



中华人民共和国国家标准

GB/T 17626.30—2023

代替 GB/T 17626.30—2012

电磁兼容 试验和测量技术 第 30 部分：电能质量测量方法

Electromagnetic compatibility—Testing and measurement techniques—
Part 30: Power quality measurement methods

[IEC 61000-4-30:2021, Electromagnetic compatibility (EMC)—
Part 4-30: Testing and measurement techniques—Power quality measurement
methods, MOD]

2023-12-28 发布

2024-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	VII
引言	X
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 总则和要求	6
4.1 测量分类	6
4.2 测量的组织	7
4.3 待测电气量	7
4.4 某时段内的测量聚合	7
4.5 测量聚合算法	8
4.5.1 要求	8
4.5.2 150 周波聚合	8
4.5.3 10 min 聚合	9
4.5.4 2 h 聚合	10
4.6 时钟不确定度	10
4.7 标记的概念	10
5 电能质量参数	11
5.1 电网频率	11
5.1.1 测量方法	11
5.1.2 测量不确定度和测量范围	11
5.1.3 测量评估	11
5.1.4 聚合	11
5.2 供电电压的幅值	12
5.2.1 测量方法	12
5.2.2 测量不确定度和测量范围	12
5.2.3 测量评估	12
5.2.4 聚合	12
5.3 闪烁	12
5.3.1 测量方法	12
5.3.2 测量不确定度和测量范围	12
5.3.3 测量评估	13
5.3.4 聚合	13

5.4	供电电压暂降和暂升	13
5.4.1	测量方法	13
5.4.2	电压暂降的检测和评估	13
5.4.3	电压暂升的检测和评估	14
5.4.4	滑模参考电压的计算	15
5.4.5	测量不确定度和测量范围	15
5.5	电压中断	15
5.5.1	测量方法	15
5.5.2	电压中断的评估	15
5.5.3	测量不确定度和测量范围	16
5.5.4	聚合	16
5.6	瞬态电压	16
5.7	供电电压不平衡	16
5.7.1	测量方法	16
5.7.2	测量不确定度和测量范围	17
5.7.3	测量评估	17
5.7.4	聚合	17
5.8	电压谐波	17
5.8.1	测量方法	17
5.8.2	测量不确定度和测量范围	18
5.8.3	测量评估	18
5.8.4	聚合	18
5.9	电压间谐波	18
5.9.1	测量方法	18
5.9.2	测量不确定度和测量范围	19
5.9.3	评估	19
5.9.4	聚合	19
5.10	供电电压上的载波信号电压	19
5.10.1	总则	19
5.10.2	测量方法	19
5.10.3	测量不确定度和测量范围	20
5.10.4	聚合	20
5.11	快速电压变化(RVC)	20
5.11.1	总则	20
5.11.2	RVC事件检测	20
5.11.3	RVC事件的评估	21
5.11.4	测量不确定度	22

5.12	负偏离和正偏离	22
5.13	电流	23
5.13.1	总则	23
5.13.2	电流幅值	23
5.13.3	电流记录	24
5.13.4	谐波电流	24
5.13.5	间谐波电流	24
5.13.6	电流不平衡	25
6	性能验证	25
附录 A (资料性)	电能质量测量——问题及指南	27
A.1	总则	27
A.2	安装注意事项	27
A.2.1	总则	27
A.2.2	试验引线	27
A.2.3	带电部件的防护	28
A.2.4	监测仪器的放置	28
A.2.5	接地	28
A.2.6	干扰	28
A.3	传感器	28
A.3.1	总则	28
A.3.2	信号电平	29
A.3.3	传感器的频率响应	30
A.3.4	瞬态测量传感器	30
A.4	瞬态电压和电流	31
A.4.1	总则	31
A.4.2	术语和定义	31
A.4.3	交流电网瞬态信号的频率及幅值特性	31
A.4.4	瞬态电压检测	32
A.4.5	瞬态电压评估	32
A.4.6	浪涌保护器对瞬态测量的影响	32
A.5	电压暂降特性	33
A.5.1	总则	33
A.5.2	快速更新方均根值	33
A.5.3	相位角/波形起始角度	33
A.5.4	电压暂降不平衡	33
A.5.5	电压暂降中的相移	33
A.5.6	电压损失	34

A.5.7 电压暂降过程的畸变	34
A.5.8 其他特性及参考	34
附录 B (资料性) 电能质量测量——应用指南	35
B.1 电能质量测量的合同应用	35
B.1.1 总则	35
B.1.2 基本考虑	35
B.1.3 特殊考虑	36
B.2 统计调查的应用	38
B.2.1 总则	38
B.2.2 考虑因素	38
B.2.3 电能质量指标	38
B.2.4 监测目标	39
B.2.5 电能质量调查的经济因素	39
B.3 调查地点与类型	40
B.3.1 监测地点	40
B.3.2 监测前的地点调查	40
B.3.3 客户端地点调查	40
B.3.4 电网侧调查	40
B.4 连接及待测量	41
B.4.1 设备连接选项	41
B.4.2 待测量的优先次序	41
B.4.3 电流监测	41
B.5 选择监测阈值及监测周期	42
B.5.1 监测阈值	42
B.5.2 监测周期	42
B.6 测量数据的统计分析	42
B.6.1 总则	42
B.6.2 指标	42
B.7 故障排除应用	43
B.7.1 总则	43
B.7.2 电能质量特征	43
附录 C (资料性) 2 kHz~150 kHz 范围内的传导发射	44
C.1 总则	44
C.2 测量方法(2 kHz~9 kHz)	44
C.3 测量方法(9 kHz~150 kHz)	44
C.4 测量范围和测量不确定度	45
C.5 聚合	45

附录 D (资料性) 负偏离与正偏离	46
D.1 总则	46
D.2 测量方法	46
D.3 测量不确定度和测量范围	46
D.4 聚合	46
附录 E (资料性) B类测量方法	48
E.1 B类的背景	48
E.2 B类——测量聚合时间间隔	48
E.3 B类——测量聚合算法	48
E.4 B类——实时时钟(RTC)不确定度	48
E.4.1 总则	48
E.4.2 B类——频率——测量方法	48
E.4.3 B类——频率——测量不确定度	48
E.4.4 B类——频率——测量评估	48
E.4.5 B类——供电电压幅值——测量方法	48
E.4.6 B类——供电电压幅值——测量不确定度和测量范围	48
E.5 B类——闪烁	49
E.5.1 总则	49
E.5.2 B级——电源电压暂降和暂升——测量方法	49
E.6 B类——电压中断	49
E.6.1 总则	49
E.6.2 B类——供电电压不平衡——测量方法	49
E.6.3 B类——供电电压不平衡——不确定度	49
E.6.4 B类——电压谐波——测量方法	49
E.6.5 B类——电压谐波——测量不确定度和测量范围	49
E.6.6 B类——电压间谐波——测量方法	49
E.6.7 B类——电压间谐波——测量不确定度和测量范围	49
E.6.8 B类——载波信号电压——测量方法	49
E.6.9 B类——载波信号电压——测量不确定度和测量范围	49
E.6.10 B类——电流——测量方法	50
E.6.11 B类——电流——测量不确定度和测量范围	50
参考文献	51

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T(Z) 17626《电磁兼容 试验和测量技术》的第 30 部分。GB/T(Z) 17626 已经发布了以下部分：

- GB/T 17626.1—2006 电磁兼容 试验和测量技术 抗扰度试验总论；
- GB/T 17626.2—2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验；
- GB/T 17626.3—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第 3 部分：射频电磁场辐射抗扰度试验；
- GB/T 17626.4—2018 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验；
- GB/T 17626.5—2019 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验；
- GB/T 17626.6—2017 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度；
- GB/T 17626.7—2017 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则；
- GB/T 17626.8—2006 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验；
- GB/T 17626.9—2011 电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验；
- GB/T 17626.10—2017 电磁兼容 试验和测量技术 阻尼振荡磁场抗扰度试验；
- GB/T 17626.11—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第 11 部分：对每相输入电流小于或等于 16 A 设备的电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验；
- GB/T 17626.12—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第 12 部分：振铃波抗扰度试验；
- GB/T 17626.13—2006 电磁兼容 试验和测量技术 交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的低频抗扰度试验；
- GB/T 17626.14—2005 电磁兼容 试验和测量技术 电压波动抗扰度试验；
- GB/T 17626.15—2011 电磁兼容 试验和测量技术 闪烁仪 功能和设计规范；
- GB/T 17626.16—2007 电磁兼容 试验和测量技术 0 Hz~150 kHz 共模传导骚扰抗扰度试验；
- GB/T 17626.17—2005 电磁兼容 试验和测量技术 直流电源输入端口纹波抗扰度试验；
- GB/T 17626.18—2016 电磁兼容 试验和测量技术 阻尼振荡波抗扰度试验；
- GB/T 17626.19—2022 电磁兼容 试验和测量技术 第 19 部分：交流电源端口 2 kHz~150 kHz 差模传导骚扰和通信信号抗扰度试验
- GB/T 17626.20—2014 电磁兼容 试验和测量技术 横电磁波(TEM)波导中的发射和抗扰度试验；
- GB/T 17626.21—2014 电磁兼容 试验和测量技术 混波室试验方法；
- GB/T 17626.22—2017 电磁兼容 试验和测量技术 全电波暗室中的辐射发射和抗扰度测量；
- GB/T 17626.24—2012 电磁兼容 试验和测量技术 HEMP 传导骚扰保护装置的试验方法；

- GB/T 17626.27—2006 电磁兼容 试验和测量技术 三相电压不平衡抗扰度试验；
- GB/T 17626.28—2006 电磁兼容 试验和测量技术 工频频率变化抗扰度试验；
- GB/T 17626.29—2006 电磁兼容 试验和测量技术 直流电源输入端口电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验；
- GB/T 17626.30—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第30部分：电能质量测量方法；
- GB/T 17626.31—2021 电磁兼容 试验和测量技术 第31部分：交流电源端口宽带传导骚扰抗扰度试验；
- GB/Z 17626.33—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第33部分：高功率瞬态参数测量方法
- GB/T 17626.34—2012 电磁兼容 试验和测量技术 主电源每相电流大于16 A的设备的电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验。

——GB/T 17626.39—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第39部分：近距离辐射场抗扰度试验
本文件替代 GB/T 17626.30—2012《电磁兼容 试验和测量技术 电能质量测量方法》，与 GB/T 17626.30—2012 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 将电流测量相关内容由资料性附录调整为标准正文(见 5.13, 2012 年版的 A.6)；
- b) 增加了快速电压变化(RVC)测量方法及性能验证相关内容(见 5.11)；
- c) 将负偏离与正偏离相关内容调整为附录 D(见附录 D, 2012 年版的 5.12)；
- d) 将 B 类测量方法相关内容调整为附录 E(见附录 E, 2012 年版的第 5 章)；
- e) 删除了影响量范围和稳态验证相关内容(见 2012 年版的第 5 章)。

本文件修改采用 IEC 61000-4-30:2021《电磁兼容(EMC) 第4-30部分：试验和测量技术电能质量测量方法》。

本文件与 IEC 61000-4-30:2021 的技术差异及其原因如下：

- 原标准 IEC 61000-4-30:2021 考虑到 50 Hz/60 Hz 不同电网情况下，对应测量时间间隔要求分别为 10/12 周波、150/180 周波，本文件仅保留了 50 Hz 对应的要求，以适应我国国情；
- IEC 61000-4-30:2021 规范性引用文件中列出 IEC 61000-4-7:2002/AMD1:2008，本文件使用 GB/T 17626.7—2017(IEC 61000-4-7:2009, IDT) 替换；
- IEC 61000-4-30:2021 规范性引用文件中列出 IEC 61000-4-15:2010，在正文其他章节中多处引用 IEC 61000-4-15 但未加日期，本文件为保持与规范性引用文件一致，在正文其他章节引用 IEC 61000-4-15 处增加日期 2010。

本文件做了下列编辑性改动：

- 为适应我国的标准体系，将标准名称修改为《电磁兼容 试验和测量技术 第30部分：电能质量测量方法》；
- 在 A 类和 S 类列项前增加了导语；
- 针对术语“闪烁”(见 3.6)，结合我国实际情况，增加注释“在电能质量领域中，该术语也称为‘闪变’”；
- IEC 61000-4-30:2021 中 4.7 第四段第一句与第三句高度重复，本文件将其合并后并入第三段。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国电磁兼容标准化技术委员会(SAC/TC 246)提出并归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、国网江苏省电力有限公司、国网湖南省电力有限公司电力科学研究院、工业和信息化部第五研究所、中国电

子技术标准化研究院、深圳供电局有限公司、武汉大学、国网湖北省电力有限公司武汉供电公司。

本文件主要起草人：刘兴发、万保权、张建功、李培、尹婷、马智泉、李妮、宁志毫、余鹏、刘健彝、鲁海亮、干喆渊、朱非白、田杰、董典帅、郭浩洲、康文斌、朱文立、陈世钢、徐吉来、路遥、黄芬、代少君。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——2012年首次发布为 GB/T 17626.30—2012；

——本次为第一次修订。



引 言

电磁兼容性是电气和电子设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。电磁兼容问题是影响环境及产品质量的重要因素之一,其标准化工作已引起国内外的普遍关注。在这方面,国际电工委员会(IEC)制定的 IEC 61000 系列标准是制造业、信息产业、电工电气工程及能源、交通运输业、社会事业及健康、消费品质量安全等领域中的通用标准,分为综述、环境、限值、试验和测量技术、安装和减缓导则、通用标准 6 大类。我国已经针对该系列标准开展了国内转化工作,并建立了相应的国家标准体系。

在该标准体系中,GB/T(Z) 17626《电磁兼容 试验和测量技术》是关于电磁兼容领域试验和测量技术方面的基础性标准,旨在描述传导骚扰、辐射骚扰等电磁兼容现象的抗扰度试验等内容,拟由 39 个部分构成。

- 第 1 部分:抗扰度试验总论。目的在于提供电磁兼容标准中有关试验和测量技术的使用性指导,并对选择相关的试验提供通用的建议。
- 第 2 部分:静电放电抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备遭受静电放电时的性能。
- 第 3 部分:射频电磁场辐射抗扰度试验。目的在于建立电气、电子设备受到射频电磁场辐射时的抗扰度评定依据。
- 第 4 部分:电快速瞬变脉冲群抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备的供电电源端口、信号、控制和接地端口在受到电快速瞬变脉冲群干扰时的抗扰度性能。
- 第 5 部分:浪涌(冲击)抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在受到浪涌(冲击)时的抗扰度性能。
- 第 6 部分:射频场感应的传导骚扰抗扰度。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在收到由射频场感应的传导骚扰时的抗扰度性能。
- 第 7 部分:供电系统及所连设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则。目的在于规定可用于根据某些标准给出的发射限值对设备逐项进行试验,对实际供电系统中谐波电流和电压的测量的仪器。
- 第 8 部分:工频磁场抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估家用、商业和工业用电气和电子设备处于工频(连续和短时)磁场中的抗扰度性能。
- 第 9 部分:脉冲磁场抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估居住、商业和工业用电气和电子设备处于脉冲磁场中的抗扰度性能。
- 第 10 部分:阻尼振荡磁场抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估中、高压变电站中电气和电子设备处于阻尼振荡磁场中的抗扰度性能。
- 第 11 部分:对每相输入电流小于或等于 16 A 设备的电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在经受电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度性能。
- 第 12 部分:振铃波抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估在实验室中居住、商业和工业用电气和电子设备的抗扰度性能,同样也适用于发电站和变电站的设备。
- 第 13 部分:交流电端口谐波、谐间波及电网信号的低频抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备对谐波、间谐波和电网信号频率的低频抗扰度性能。

- 第 14 部分:电压波动抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在受到正和负的低幅值电压波动时的抗扰度性能。
- 第 15 部分:闪烁仪 功能和设计规范。目的在于为所有实际的电压波动波形显示正确的闪烁感知电平。
- 第 16 部分:0 Hz~150 kHz 共模传导骚扰抗扰度试验。目的在于建立电气和电子设备经受共模传导骚扰测试的通用和可重复性准则。
- 第 17 部分:直流电源输入端口纹波抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,用以在实验室条件下对电气和电子设备进行来自于如整流系统和/或蓄电池充电时叠加在直流电源上的纹波电压的抗扰度试验。
- 第 18 部分:阻尼振荡波抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在受到阻尼振荡波时的抗扰度性能。
- 第 19 部分:交流电源端口 2 kHz~150 kHz 差模传导骚扰和通信信号抗扰度试验。目的在于确认电气和电子设备在公用电网下工作时能承受来自诸如电力电子和电力线通信系统(PLC)等的差模传导骚扰。
- 第 20 部分:横电磁波(TEM)波导中的发射和抗扰度试验。目的在于给出 TEM 波导的性能、用于电磁兼容试验的 TEM 波导的确认方法、在 TEM 波导中进行辐射发射和抗扰度试验的试验布置、步骤和要求。
- 第 21 部分:混波室试验方法。目的在于建立使用混波室评估电气和电子设备在射频电磁场中的性能和确定电气电子设备的辐射发射等级的通用规范。
- 第 22 部分:全电波暗室中的辐射发射和抗扰度测量。目的在于规定在同一个全电波暗室内进行辐射发射和辐射抗扰度的通用确认程序、受试设备的试验布置要求和全电波暗室测量方法。
- 第 23 部分:HEMP 和其他辐射骚扰防护装置的试验方法。目的在于通过描述 HEMP 试验的基本原理,以及防护元件试验的理论基础(试验概念)、试验配置、所需设备、试验程序、数据处理等重要概念。
- 第 24 部分:HEMP 传导骚扰保护装置的试验方法。目的在于规定 HEMP 传导骚扰保护装置的试验方法,包括电压击穿和电压限制特性的试验,以及电压和电流快速变化时的残余电压的测量方法。
- 第 25 部分:设备和系统 HEMP 抗扰度试验方法。目的在于建立通用的和可重现的基准,用于评估遭受 HEMP 辐射环境及其在电源、天线、I/O 信号线和控制线上产生的传导瞬态骚扰时的电气和电子设备性能。
- 第 27 部分:三相电压不平衡抗扰度试验。目的在于为电气和电子设备在受到不平衡的供电电压时的抗扰度评价建立参考。
- 第 28 部分:工频频率变化抗扰度试验。目的在于为电气和电子设备在受到工频频率变化时的抗扰度评价提供依据。
- 第 29 部分:直流电源输入端口电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验。目的在于建立评价直流电气、电子设备在经受电压暂降、短时中断和电压变化时的抗扰度的通用准则。
- 第 30 部分:电能质量测量方法。目的在于规定 50 Hz 交流供电系统中电能质量参数测量方法及测量结果的解释。
- 第 31 部分:交流电源端口宽带传导骚扰抗扰度试验。目的在于建立通用的基准,以评估电气和电子设备交流电源端口在遭受有意和/或无意宽带信号源产生的传导骚扰时的抗扰度。
- 第 32 部分:高空核电磁脉冲(HEMP)模拟器概述。目的在于提供国际上现有的系统级 HEMP 模拟器以及它们作为抗扰度试验与验证设备时所需要的相关信息。
- 第 33 部分:高功率瞬态参数测量方法。目的在于给出高功率电磁瞬态响应波形的测量方法和

特征参数的信息。

- 第 34 部分:主电源每相电流大于 16 A 的设备的电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验。目的在于建立评价电气和电子设备在经受电压暂降、短时中断和电压变化时的抗扰度的通用准则。
- 第 35 部分:高功率电磁(HPeM)模拟器概述。目的在于提供国际上现有的系统级 HPeM 窄带(窄谱)和宽带(宽谱、亚超宽谱和超宽谱)模拟器以及它们作为抗扰度试验与验证设备时所需要的相关信息。
- 第 36 部分:设备和系统的有意电磁干扰抗扰度试验。目的在于为评估设备和系统对有意电磁干扰源的抗扰度提供了确定试验水平的方法。
- 第 37 部分:谐波发射试验系统校准与验证协议。目的在于为制造商、终端用户、独立实验室、其他组织机构提供系统化指导,以规定一定谐波电流发射范围内适用的合规状态。
- 第 38 部分:电压波动和闪烁合规测试系统的测试、验证和校准协议。目的在于为由型式试验设备组成的系统提供定期校准和验证的指南和方法。
- 第 39 部分:近场辐射抗扰度试验。目的在于建立通用的基准,以评估暴露于近距离源的辐射射频电磁场中的电气电子设备的抗扰度要求。
- 第 40 部分:调制或失真信号功率的数字测量方法。目的在于介绍两种适用于波动或非周期负载下功率量测量的数字算法,并说明所提出的算法的工作原理。

我国在 2012 年发布了 GB/T 17626.30,对应 IEC 61000-4-30:2008,发布实施已 10 年,新版标准 IEC 61000-4-30:2021 的主要技术内容发生了重要变化,如增加了快速电压变化测量方法、增加了性能验证有关内容等。鉴于此,确有必要修订 GB/T 17626.30,以不断适应国内外相关技术内容的新变化。

本次 GB/T 17626.30 的修订,增加了快速电压变化测量方法及性能验证有关内容和 2 kHz 至 150 kHz 范围内的传导发射相关内容等,从而提高了电能质量测量方法的准确性,进一步规范国内电能质量测量。

电磁兼容 试验和测量技术

第 30 部分:电能质量测量方法

1 范围

本文件规定了标称基波频率为 50 Hz 的交流供电系统中电能质量参数测量方法及测量结果的处理。

各有关参数的测量方法均采用能提供可靠且可重复的结果的术语描述,但不涉及测量方法的实现手段。本文件涉及的是现场测量方法。

本文件所涵盖的参数测量仅限电力系统中的传导现象。本文件涉及的电能质量参数是指电网频率、供电电压幅值、闪烁、供电电压暂降和暂升、电压中断、瞬态电压、供电电压不平衡、电压谐波和间谐波、供电电压中的载波信号、快速电压变化以及电流。2 kHz~150 kHz 范围内的传导发射的考虑参见附录 C,正偏离和负偏离的考虑参见附录 D。根据测量目的的不同,可对上述全部参数或部分参数进行测量。

注 1:关于本文件的符合性测试方法见 IEC 62586-2。

注 2:供电系统和仪器之间传感器的作用众所周知,因此在本文件中没有详细叙述。在 IEC TR 61869-103 中有关于传感器应用的指导。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 17626.7—2017 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则(IEC 61000-4-7:2009,IDT)

注:GB/T 17626.7—2017 与 IEC 61000-4-7:2002/AMD1:2008 没有技术性差异。

IEC 60050-161 国际电工词汇(IEV) 第 161 部分:电磁兼容 [International electrotechnical vocabulary(IEV)—Part 161:Electromagnetic compatibility]

注:GB/T 2900(所有部分)电工术语[IEC 60050(所有部分),IDT]

IEC 61000-2-4 电磁兼容(EMC) 第 2-4 部分:环境 工厂低频传导骚扰的兼容水平(Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-4:Environment—Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances)

注:GB/T 18039.4—2017 电磁兼容 环境 工厂低频传导骚扰的兼容水平(IEC 61000-2-4:2002,IDT)

IEC 61000-4-4 电磁兼容(EMC) 第 4-4 部分:测试和测量技术 电快速瞬变/猝发抗扰度测试 [Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 4-4:Testing and measurement techniques—Electrical fast transient/burst immunity test]

注:GB/T 17626.4—2018 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验(IEC 61000-4-4:2012, IDT)

IEC 61000-4-15:2010 电磁兼容(EMC) 第 4-15 部分:试验和测量技术 闪烁仪 功能和设计

规范(Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-15: Testing and measurement techniques—Flickermeter—Functional and design specifications)

注: GB/T 17626.15—2011 电磁兼容 试验和测量技术 闪烁仪 功能和设计规范(IEC 61000-4-15:2003, IDT) IEC 61180(所有部分) 低压电气设备的高电压试验技术(High-voltage test techniques for low voltage equipment)

注: GB/T 17627—2019 低压电气设备的高电压试验技术 定义、试验和程序要求、试验设备(IEC 61180:2016, MOD)

3 术语和定义

IEC 60050-161 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

通道 channel

通过某台仪器的单个信号测量通路。

注:“通道”和“相”是不相同的。电压通道定义为两个导体之间的电位差。相是指单一的导体。在多相系统中,通道可能是两相之间,或相和中性点之间,或相和地之间,或中性点和地之间。

3.2

公称输入电压 declared input voltage

U_{din}

由传感器变比确定的公称供电电压。

3.3

公称供电电压 declared supply voltage

U_c

通常是系统的标称电压 U_n 。

注:如果根据供应商和客户之间的协议,加在终端的电压与标称电压不同,则该电压即为公称供电电压 U_c 。

3.4

暂降阈值 dip threshold

为检测电压暂降的起始和结束而规定的电压幅值。

3.5

标记数据 flagged data

在发生电压中断、暂降或暂升的任意测量时间间隔内标记的所有其他参数的测量结果。

注:例如,在有些应用中,进一步的分析可能会排除标记数据。进一步的解释见 4.7。

3.6

闪烁 flicker

亮度或频谱分布随时间变化的光刺激所引起的不稳定的视觉效果。

注:在电能质量领域中,该术语也称为“闪变”。

[来源:GB/T 4365—2003,161-08-13]

3.6.1

短期闪烁值 short-term flicker evaluation based on an observation period of 10 min

P_{st}

基于 10 min 观察周期的短期闪烁评估值。

[来源:IEC 61000-4-15:2010]

3.6.2

长期闪烁值 long-term flicker indicator

P_{fl}

长期闪烁评估值。

[来源:IEC 61000-4-15:2010]

3.7

基波分量 fundamental component

频率为基波频率的分量。

3.8

基波频率 fundamental frequency

对时域函数作傅里叶变换后得到的频谱中的频率,该频谱中所有频率以该频率作参考。

注:为避免产生理解模糊,基波频率通常由为系统供电的同步发电机的磁极数和转速得到。

3.9

谐波分量 harmonic component

具有谐波频率的任何分量。

注:它的值通常用方均根值来表示。为简便起见,这个分量通常简称为谐波。

[来源:GB/T 18039.3—2017,3.2.4]

3.10

谐波频率 harmonic frequency

基波频率整数倍的频率。

注:谐波频率与基波频率之比称为谐波次数(推荐表示符号: n)

[来源:GB/T 18039.3—2017,3.2.3]

3.11

迟滞 hysteresis

起点阈值与终点阈值之间的幅值差。

注1:迟滞的定义与电能质量(PQ)测量参数有关,该定义不同于IEC 60050的定义,后者与铁芯饱和度相关。

注2:在PQ测量中引入迟滞的目的是避免幅值参数在阈值附近振荡造成事件多次统计。

3.12

影响量 influence quantity

测量对象之外的值,其变化会影响标示值与测量结果之间的关系。

[来源:IEC 60050-311:2001,311-06-01]

3.13

间谐波分量 interharmonic component

频率在两个连续谐波频率之间的频谱分量。

注1:该定义源自GB/T 17626.7—2017。

注2:它的值通常用方均根值来表示。简单地说,这个分量通常简称为间谐波。

3.14

间谐波频率 interharmonic frequency

任何基波频率的非整数倍频率。

注1:作为谐波次数的扩展,间谐波次数是间谐波频率和基波频率之比。这个比值不是一个整数(推荐表示符号: m)。

注2:在 $m < 1$ 时,通常使用次谐波频率这个术语。

[来源:GB/T 18039.3—2017,3.2.5]

3.15

中断 interruption

电气系统中某一点的电压降低到中断阈值以下。

3.16

中断阈值 interruption threshold

为检测电压中断的起始和结束而规定的电压幅值。

3.17

测量不确定度 measurement uncertainty

与测量结果关联的一个参数,用于表征合理赋予被测量的值的分散性。

[来源:IEC 60050-311:2001,311-01-02]

3.18

标称电压 nominal voltage

U_n

指定或识别的系统电压。

3.19

正偏离 overdeviation

仅当参数的测量值大于标称值时,参数的测量值和标称值之间的差值。

3.20

电能质量 power quality

评估电气系统某一给定点的电气性能时,根据一组参考技术参数进行评估。

注:在某些情况下,这些参数可能与供电网和连接负载之间的兼容性有关。

3.21

方均根(r.m.s.)值 root-mean-square(r.m.s.) value

在规定时间间隔和规定带宽内一个量的各瞬时值的平方的算术平均值的平方根。

[来源:IEC 60050-103:2009,103-02-03]

3.22

每半周波检测更新一次的方均根电压 r.m.s. voltage refreshed each half-cycle

$U_{\text{rms}(1/2)}$

从基波的过零点开始,在一个周波内测量得到的方均根电压值,每半个周波更新一次。

注1:该技术对每个通道都是独立的,对于多相系统的不同通道将依次产生方均根值。

注2:该值仅适用于A类中的电压暂降、暂升、中断和快速电压变化(RVC)检测及评估。

注3:该方均根电压值通常是相间电压值,或相与中性点之间的电压值。

3.23

每半周波检测更新一次的方均根值电流 r.m.s. current refreshed each half-cycle

$I_{\text{rms}(1/2)}$

在相关的电压通道上,从基波的过零点开始,在一个周波内测量得到的方均根电流值,每半个周波更新一次。

注:作为指导,相关的电压通道可能是单相或星形网络上相应的相对中性点通道。如果没有相应的电压通道(例如,在三角形网络的电流、接地电流或中性点电流测量上),则可能使用用于频率测量的参考通道(见5.1.3)。

3.24

每周波检测更新一次的方均根值电压 r.m.s. voltage refreshed each cycle

$U_{\text{rms}(1)}$

在一个周波内测量得到的方均根电压值,每一个周波更新一次。

注 1: 和 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 相比, 该参数测量时不需要规定周波的开始时间。

注 2: 该值仅适用于 S 类中的电压暂降、暂升和中断检测及评估。

注 3: 该方均根电压值通常是相间电压值, 或相与中性点之间的电压值。

3.25

影响量范围 range of influence quantities

单个影响量的取值范围。

3.26

快速电压变化 rapid voltage change; RVC

发生在两个稳态条件之间的方均根电压快速转换, 且期间内方均根电压未超过暂降或暂升阈值。

3.27

参考通道 reference channel

在多相测量中, 其中一个电压测量通道被指定为参考通道。

注: 在单相测量中, 电压测量通道也为参考通道。

3.28

残余电压 residual voltage

U_{res}

在电压暂降或中断期间记录到的 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 的最小值。

注: 残余电压用伏特表示, 或用公称输入电压的百分比或标么值表示。

3.29

滑模参考电压 sliding reference voltage

U_{sr}

1 min 内的电压幅值平均值, 用以表示电压暂降或暂升之前的电压。

注 1: 精确定义参见 5.4.4。

注 2: 滑模参考电压一般用于确定暂降或暂升期间的电压变化, 通常适用于中压或高压系统。

3.30

暂升阈值 swell threshold

为检测电压暂升的起始和结束而规定的电压幅值。

3.31

时间聚合 time aggregation

为得到某一较长时间间隔上的值, 对某一给定参数的几个连续值(在相同时间间隔上确定每个值)进行累加。

注: 本文件中, 聚合总是指时间聚合。

3.32

负偏离 underdeviation

仅当参数的测量值小于标称值时, 参数的测量值和标称值之间的差值的绝对值。

3.33

协调世界时 Coordinated Universal Time; UTC

一种时标, 它构成标准频率和时间信号的协调的无线电播发的基础。它在速率上精确地对应于国际原子时, 但与之相差整数倍秒。

注 1: 协调世界时由国际度量衡局(BIPM)和国际地球旋转服务组织(IERS)建立。

注 2: UTC 时标通过插入或删除若干秒来调整, 叫作正或负跳秒, 以保证与 UT1 近似一致。

[来源: Recommendation ITU-R TF.686-3]

3.34

电压暂降 voltage dip

电气系统中某点电压幅值暂时下降到阈值以下。

注 1: 电压中断是一种特殊形式的电压暂降。后续处理通常用来区分电压暂降和电压中断。

注 2: 电压暂降也被称作电压跌落。不过在本文件中只使用电压暂降这个术语。

3.35

电压暂升 voltage swell

电气系统中某点电压幅值暂时升高到阈值以上。

3.36

电压不平衡 voltage unbalance

多相系统中的一种状态,在这种状态下,线电压(基波分量)方均根值和/或相邻线电压之间的相角不相等。

注 1: 不平衡度通常用负序、零序分量与正序分量的比值来表示。

注 2: 在本文件中,电压不平衡是指三相系统中的电压不平衡。

[来源:IEC 60050-161:2002,161-08-09,有修改——增加了注释。]

4 总则和要求

4.1 测量分类

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。每一类都包括测量方法和相应的性能要求。

a) A类

该类用于应精确测量的场合,比如,可能用于需要解决争端的合同,验证是否和标准相符等。在测量同一信号时,用两台符合A类要求的不同仪器测量同一信号的某参数时,所得测量结果将在该参数规定的不确定度范围内相匹配。

注 1: 仅当用户选择的参数(阈值、迟滞等)匹配时,A类测量才会产生匹配结果。

b) S类

该类用于调查或电能质量评估等统计性应用,使用的参数可能只是所有参数的一个有限子集。尽管S类使用和A类相同的测量间隔,但S类的处理要求比A类要低许多。有些调查可能会评估网络上多个测量点的电能质量参数;而某些调查则可能评估一段时间内单个测量点或建筑物内某点甚至单个大型设备内的电能质量参数。

c) B类

有关B类的信息,参见附录E(资料性)。新仪器不应采用B类方法。鉴于所有新的仪器设计将符合A类或S类要求,已将B类移至附录E。仍在使用的旧仪器可能与B类方法相关。B类可能在本文件的下一版中删除。

注 2: B类测量方法提供了有用但不一定可比的信息。B类在IEC 61000-4-30:2003(第1版)中引入,目的是避免旧的仪器被淘汰。在IEC 61000-4-30:2008(第2版)中已提醒B类可能在本文件后续版本中删除。在本版再次提醒B类可能在本文件后续版本中移除,并且将B类移至资料性附录E。

注 3: 在本文件中,“A”代表“Advanced(高级)”,“S”代表“Surveys(调查)”。

用户应根据应用情况选择需要的类别。对于故障排查,用户可根据问题类型选择A类或S类方法。

仪器制造商宜说明那些没有明确标示但却会降低仪器性能的影响量。

仪器应测量本文件规定的部分或全部参数,对所有参数最好使用同一类方法。有关指南,见IEC 62586-1及IEC 62586-2。

仪器制造商应说明所测是何参数,各参数采用哪类测量方法,各类测量方法的 U_{din} 范围,及满足各类所需的必要条件及附属要求(同步、探头、校准周期、温度范围等)。

4.2 测量的组织

待测量可直接测量(如在通常的低压系统中),或者通过测量传感器测量。
整个测量链路如图 1 所示。

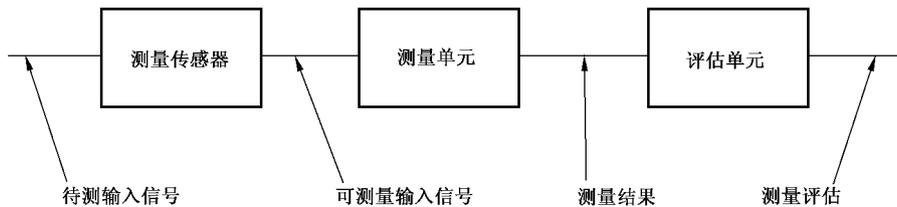


图 1 测量链路

仪器可包含整个测量链路(见图 1)。本文件规范部分不考虑仪器外部任何可能的互感器及其所引入的不确定性,但在 A.2 中提供指导。

4.3 待测电气量

测量能在单相供电系统中进行,也能在多相供电系统中进行。根据情况,可能需要测量的是相导线和中性点之间的电压(相—中性点电压),或相导线之间的电压(线电压),或相导线、中性点和接地之间(相—接地点电压、中性点—接地点电压)。本文件的目的是为了强制规定待测电气量如何选择。除了电压不平衡的测量外(只适用于多相系统),在本文件中规定的测量方法都是能在每个测量通道上独立使用的。

注:相与相之间的瞬时值一般通过直接测量,或由相对中性点或相对地的瞬时测量值推导得到。
电流测量可在供电系统的每一条导线上进行,包括中线和保护接地导线(见 5.13)。

4.4 某时段内的测量聚合

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

对 50 Hz 电力系统,幅值参数(供电电压、谐波、间谐波及不平衡度)测量的基本测量时段应为 10 个周波。

每隔 10 min UTC(协调世界时)计时点,10 周波测量应重新同步一次(见图 2)。

注 1:测量的不确定度包含在每个参数的不确定度测量协议中。

随后在另外 3 个时间段内对 10 周波值进行聚合:

- 150 周波的时间段;
- 10 min 时间段;
- 用于闪烁 P_{li} 测量的 2 h 时间段。

注 2:除了闪烁 P_{li} 测量需要 2 h 聚合时间段外,所有参数的 2 h 时间段聚合都是可选的。在某些应用中,2 h 时间段聚合在某些应用下可能有用。

注 3: B.1 和 B.2 中讨论了这些聚合时间段的应用。

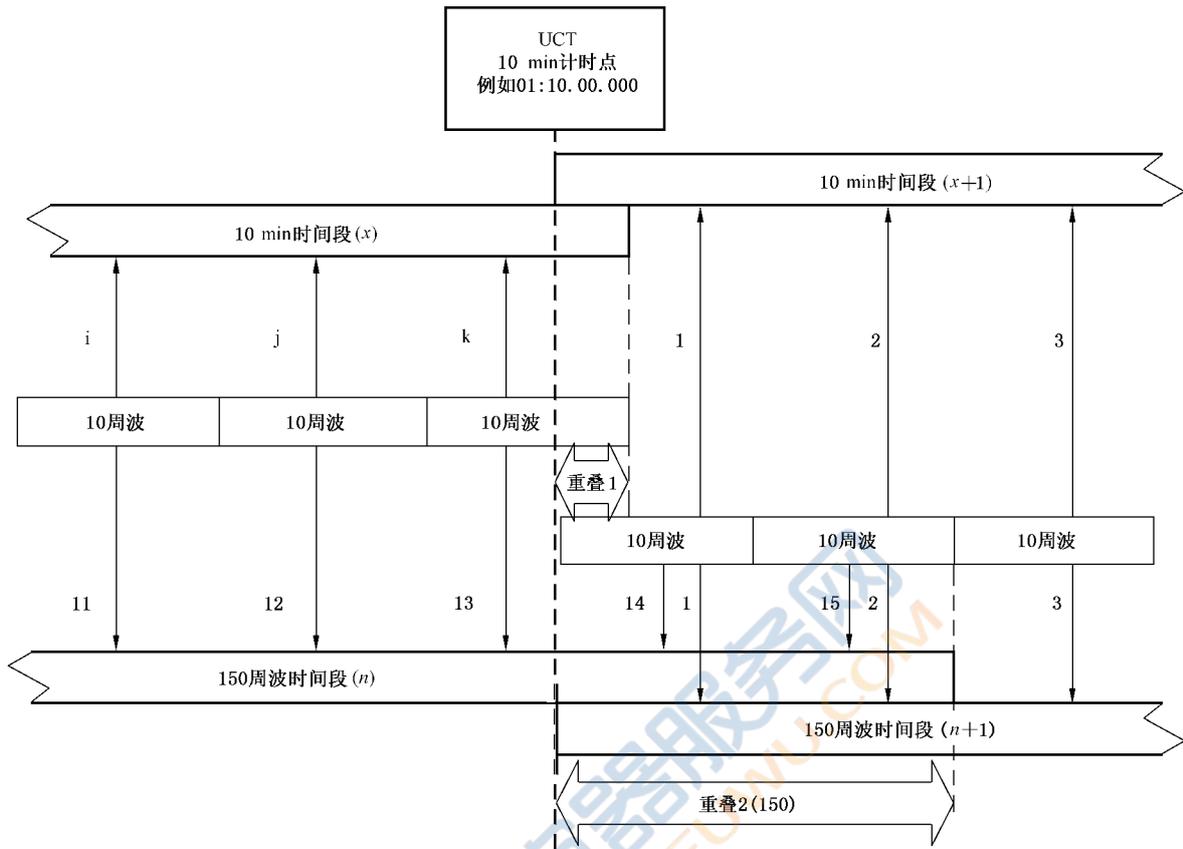


图2 A类聚合时间段的同步

- b) S类
聚合时间段与A类相同。

4.5 测量聚合算法

4.5.1 要求

应采用输入值的方均根进行聚合计算。
对闪烁测量,应使用不同的聚合算法(见 IEC 61000-4-15:2010)。

4.5.2 150周波聚合

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

150周波时段的数据应以15个10周波时段进行无缝聚合。
每个UTC 10 min时刻要对150周波时段进行一次再同步,如图2所示。
当10 min时间点到时,新的150周波时段开始,之前未完成的150周波时段也在继续,直至结束。这两个150周波时段之间可能会有重叠(图2中的重叠2)。

b) S类

150周波时段的数据应是对10周波时段数据进行聚合。允许以UTC 10 min标记再同步,但不是强制性的。(见图3)。
对于谐波、间谐波、电网载波信号和不平衡度测量,数据聚合的连续性不做强制性要求,允许有间隙。在每个150周波时段内,至少应有3个10周波时段值被聚合,而每50个周波内至少应

有一个10周波值被聚合(见图4)。对于所有其他参数,150周波时间间隔内的数据应以15个10周波时间段内没有间隙地进行聚合。

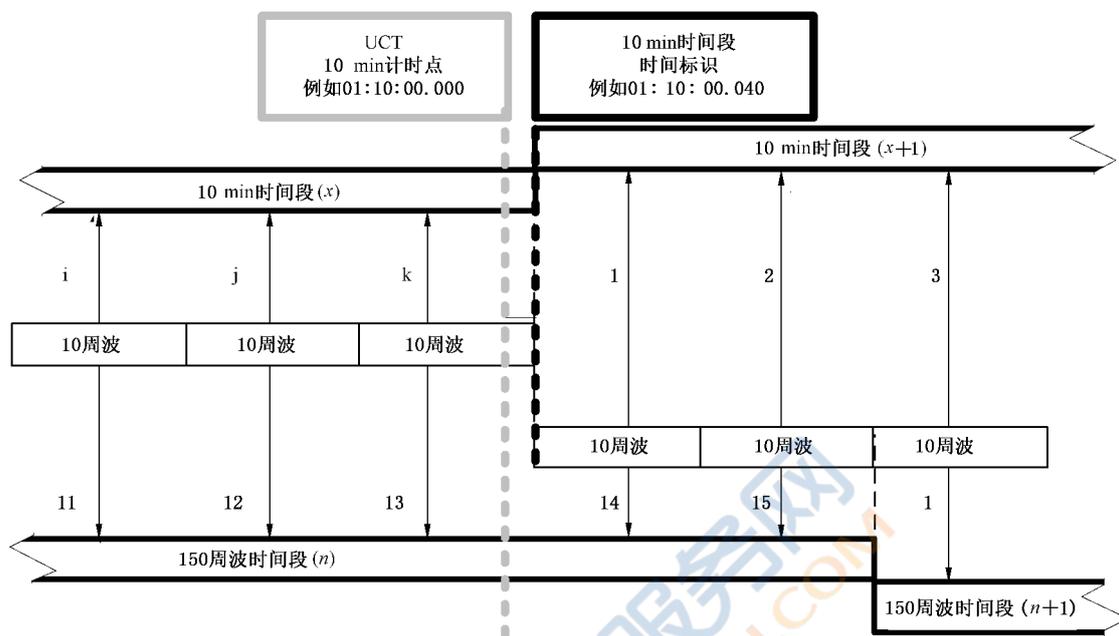


图3 S类聚合时间段的同步:参数不允许出现间隙

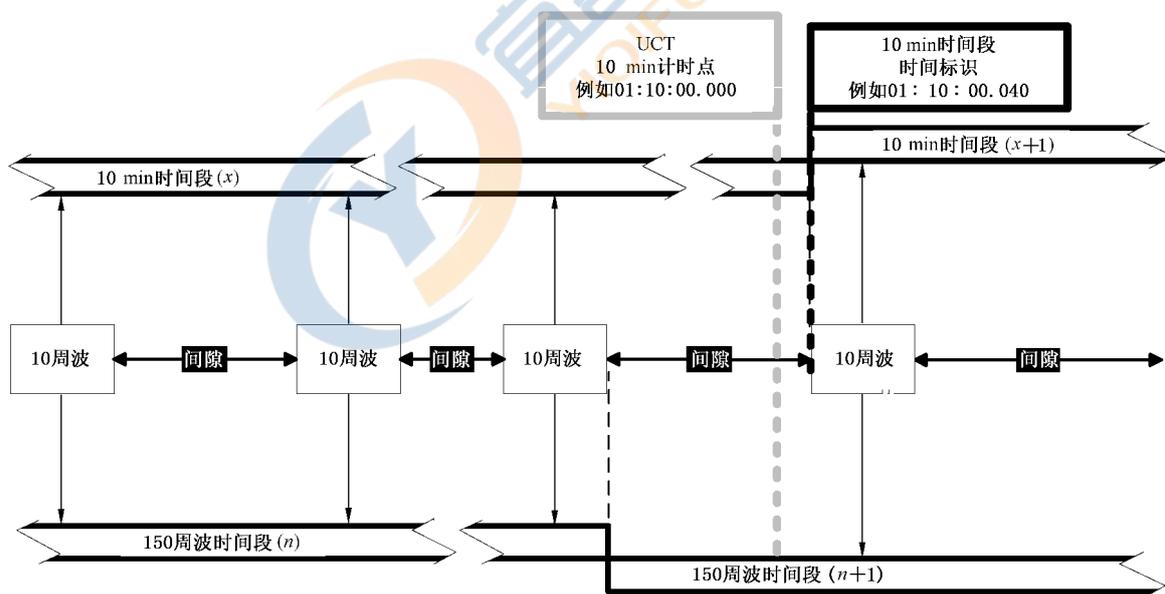


图4 S类聚合时间段的同步:参数允许出现间隙(见4.5.2)

4.5.3 10 min 聚合

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

10 min 聚合值应标记为10 min 聚合结束时刻四舍五入至最近整数秒的UTC时间值(例如,01H10.00,000)。

注：在某些情况下，使用本地时间可能会很有用。本地时间与 UTC 时间之前的偏差是固定的，或因一年中的时间而异。这种时间戳通常包括时间和日期，称作“绝对时间”。

10 min 时段内的数据应从 10 周波数据聚合。

每个 10 min 时段应从 UTC 10 min 计时点处开始。UTC 10 min 计时点也用于对 10 周波间隔和 150 周波间隔进行再同步(见图 2)。

10 min 聚合时段的最后一个 10 周波时段通常会和下一个 UTC 10 min 计时点发生重叠。任何 10 周波时段间隔的重叠(图 2 中的重叠 1)都会被包含在前一个 10 min 时间间隔的聚合中。

b) S 类

S 类中的 10 min 聚合方法应使用 A 类方法或下列简化方法。

10 min 时间间隔使用的数据应从 10 周波时间间隔聚合得来。在 UTC 10 min 计时点处没有再同步。各个 10 min 时间间隔都不是同步的。

10 min 聚合值应在 10 min 聚合结束时刻标记时间值(例如,01H10.00,040)。

此时不会有重叠出现,如图 3 和图 4 所示。

4.5.4 2 h 聚合

对每一个待测参数定义为常用的两类(A 类和 S 类)。

a) A 类

2 h 时间间隔的数据应从 12 个 10 min 时间间隔聚合得到。2 h 的间隔应无缝,并且没有重叠。

b) S 类

同 A 类。

4.6 时钟不确定度

时钟不确定度的定义是相对于协调世界时(UTC)的。UTC 在不断增加并在全球范围内可用。

注 1：在某些情况(例如外部同步更新等)下,时钟可能会向前或向后偏移。当时钟向前调整时,数据可能会有间隙。当时钟向后调整时,数据可能会重叠。

对每一个待测参数定义为常用的两类。

a) A 类

无论总的的时间间隔是多少,时钟的不确定度不应超过 ± 20 ms。

注 2：该性能通常通过测量过程中周期性同步程序实现,或通过 GPS 接收机,或通过接收发射的无线电时标信号实现,或通过使用网络对时信号实现。

当无法通过外部信号同步时,时标容差应满足每 24 h 不超过 ± 1 s;但无论如何,此例外并不意味着可不满足该段第一部分所规定的要求。

注 3：该性能要求是必需的,它用来保证采用 A 类方法的两台仪器在连接同一个信号时,产生相同的 10 min 聚合结果。

b) S 类

时钟不确定度每 24 h 不应超过 ± 5 s。

4.7 标记的概念

在电压暂降、暂升或中断时,用其他一些参数的测量算法(例如频率测量)可能产生一个不可靠的结果。因此使用标记的概念可避免以下情况出现,如将同一信号事件在不同参数测量中被重复使用(例如,将单次暂降同时记作暂降和频率变化),并表明聚合值可能是不可靠的。

标记仅在电压暂降、暂升和中断时被触发。暂降和暂升的检测取决于用户所选择的阈值,该选择将决定哪些数据会被标记。

对于 A 类和 S 类方法,标记适用于对电网频率、电压幅值、闪烁、供电电压不平衡、电压谐波、电压间谐波、电压载波信号以及对参数的负偏离和正偏离。如果在给定时间间隔内,有任一值被标记,被标记的值应存储并包括在聚合过程中,包括该值的聚合值也应标记并存储。

注 1: 有关其他类型的标记或数据标记的信息,见 IEC 62586-1。

注 2: 用户能决定如何评估标记的数据。

5 电能质量参数

5.1 电网频率

5.1.1 测量方法

对每一个待测参数定义为常用的两类(A 类和 S 类)。

a) A 类

频率读数应每 10 s 刷新一次。由于在 10 s 时间间隔内电力系统频率可能不会正好是 50 Hz,所以其中包括的周期数不一定正好是整数。基波分量频率输出是 10 s 时间间隔内,整数个周期数与该整数个周期所累计持续时间的比值。

若频率计算采用过零点方法,那么在评估之前,应对谐波和间谐波进行衰减,以最大限度减少由于多个过零点带来的影响。

测量的时间间隔之间应没有重叠。对于与 10 s 时间信号重叠的个别周期应予剔除。每个 10 s 时间间隔应严格从 10 s 计时处开始,其不确定度见 4.6 的规定。

其他可获得等效结果的方法,如卷积也可使用。

注: 对于某些应用,使用短于 10 s 的时间间隔可能很有用,例如 10 周波(风力发电机)、1 s(国家标准)等。

b) S 类

同 A 类。

5.1.2 测量不确定度和测量范围

对每一个待测参数定义为常用的两类(A 类和 S 类)。

a) A 类

在第 6 章所述条件下,在测量范围为 42.5 Hz~57.5 Hz 时,测量不确定度不应超过 ± 10 mHz。

b) S 类

在第 6 章所述条件下,在测量范围为 42.5 Hz~57.5 Hz 时,测量不确定度不应超过 ± 50 mHz。

5.1.3 测量评估

对每一个待测参数定义为常用的两类(A 类和 S 类)。

a) A 类

频率测量应在参考通道上进行。

制造商应规定参考通道失压情况下的频率测量方法。

b) S 类

同 A 类。

5.1.4 聚合

聚合不作强制性要求。

5.2 供电电压的幅值

5.2.1 测量方法

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

电压幅值的测量值,应是10个周波时间段的方均根值。每个10周波时间段应是连续的,而且相邻的10周波时间间隔应无重叠,图2中所示的重叠1除外。

注1:该测量方法用于准平稳信号,不适用于异常信号如暂降、暂升、电压中断和瞬态电压的检测和测量。

注2:根据定义,这里的方均根值包括谐波、间谐波和电网载波信号等。

b) S类

同A类。

5.2.2 测量不确定度和测量范围

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

在第6章所述的条件下,测量不确定度不应超过 U_{dim} 的 $\pm 0.1\%$,测量范围为 U_{dim} 的 $10\% \sim 150\%$ 。

b) S类

在第6章所述的条件下,测量不确定度不应超过 U_{dim} 的 $\pm 0.5\%$,测量范围为 U_{dim} 的 $20\% \sim 120\%$ 。

5.2.3 测量评估

不作要求。

5.2.4 聚合

应按照4.4和4.5的规定执行。

5.3 闪烁

5.3.1 测量方法

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

IEC 61000-4-15:2010的F3级作为最低要求适用。F3级不宜用于新的设计。宜使用F1级,在本文件的下一版中可能变为要求使用。

b) S类

IEC 61000-4-15:2010的F3级作为最低要求适用。

5.3.2 测量不确定度和测量范围

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

见IEC 61000-4-15:2010。在第6章所述的条件下,当测量范围为 $0.2P_{\text{st}} \sim 10P_{\text{st}}$ 时,应满足GB/T 17626.15—2011规定的测量不确定度要求。

b) S类

见IEC 61000-4-15:2010。在第6章所述的条件下,当测量范围为 $0.4P_{\text{st}} \sim 4P_{\text{st}}$ 时,应满足2倍于GB/T 17626.15—2011中允许的测量不确定度要求。

5.3.3 测量评估

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

适用 IEC 61000-4-15:2010。

P_{st} 所用的 10 min 时间间隔应从 UTC 10 min 计时点处开始,并应该用结束时刻时间值进行标记(见 4.5.3)。

电压暂降、暂升和中断都将导致 P_{st} 和 P_{it} 的输出值被标记(见 IEC 61000-4-15:2010)。

b) S类

同 A 类。

5.3.4 聚合

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

应根据 IEC 61000-4-15:2010 进行聚合。

b) S类

同 A 类。

5.4 供电电压暂降和暂升

5.4.1 测量方法

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

电压暂降和暂升的基本测量值 U_{rms} 应为每个测量通道上的 $U_{rms(1/2)}$ 值(见 3.22)。

测量 $U_{rms(1/2)}$ 的周波持续时间取决于频率。频率由最后一个没有标记的电源频率测量值(见 4.7 及 5.1)或者任何其他可满足第 6 章不确定度要求的方法确定。

注 1: 根据定义,这里的 $U_{rms(1/2)}$ 值包括谐波、间谐波和电网载波信号等。

注 2: 避免在快速事件序列中发生暂降和暂升时丢失很重要的数据(例如,当发生故障进行重合闸时,3 个事件可能在一秒钟到一分钟时间段内接连发生而序列之间最多间隔 1 min)。如果在快速突发事件期间无法记录暂降/暂升事件特征参数,则事件计数可能很有用。

b) S类

电压暂降和暂升的基本测量值 U_{rms} 应为每个测量通道上的 $U_{rms(1/2)}$ 值(见 3.22)或每个测量通道上的 $U_{rms(1)}$ 值(见 3.24)。制造商应规定采用何种测量值。

注 3: 根据定义,这里的 $U_{rms(1)}$ 值包括谐波、间谐波和电网载波信号等。

5.4.2 电压暂降的检测和评估

5.4.2.1 电压暂降的检测

暂降阈值表示为 U_{din} 或滑模参考电压 U_{sr} 的百分比(见 5.4.4)。用户应声明所采用的参考电压。

注: 在低压系统中通常不采用滑模参考电压 U_{sr} 。参见 IEC TR 61000-2-8 获取更多信息和建议。

——在单相系统中,当电压 U_{rms} 降低到暂降阈值以下时,记作电压暂降的开始;当电压 U_{rms} 上升到等于或大于暂降阈值与迟滞电压之和时,记作电压暂降的结束。

——在多相系统中,当一个或多个通道的 U_{rms} 电压降低到暂降阈值以下时,记作电压暂降的开始,当所有测量通道的 U_{rms} 电压上升到等于或大于暂降阈值与迟滞电压之和时,记作电压暂降

的结束。

暂降阈值和迟滞电压大小均由用户根据用途进行设定。

5.4.2.2 电压暂降的评估

电压暂降的特征值包括两个参数：残余电压(U_{res})或深度、持续时间。

——电压暂降残余电压为暂降过程中任一通道上测得的最低 U_{rms} 值。

——深度是指参考电压(U_{din} 或者 U_{sr})和残余电压之间的差值。通常用参考电压的百分比表示。

注1：在暂降期间，除了暂降的残余电压之外，同时记录每个通道上的最低 $U_{rms(1/2)}$ 可能是有用的。每个通道上低于暂降阈值的持续时间也可能有用。

注2：如果在暂降之前、期间和之后记录到电压波形，则在数据记录中可能会获得有关相角变化的有用信息。

电压暂降的开始时间应为触发事件通道的 U_{rms} 的后沿时标；电压暂降的结束时间应为终止事件 U_{rms} 的后沿时标， U_{rms} 由阈值和迟滞电压之和来确定。

电压暂降的持续时间是指从电压暂降起始到结束所用的时间。

注3：对于多相系统测量，电压暂降的持续时间通常从其中一个通道开始，而在另一个通道结束。

注4：电压暂降的包络曲线并不一定是矩形，因此，对于一个给定的电压暂降，测量持续的时间取决于所选定的电压暂降阈值。一般使用多个暂降阈值（在电压暂降至电压中断阈值范围内设定）来估计电压暂降的包络曲线。

注5：迟滞电压通常为 U_{din} 的2%。

注6：在故障检修或统计分析中的应用，暂降阈值通常为固定参考电压的85%~90%。

注7：残余电压通常对终端用户有用，同时因为残余电压是参考零电位，所以一般被优先加以利用。相比之下，深度通常对电气供应方有用，尤其是高压系统或者当使用滑模参考电压时。

注8：在电压暂降过程中会出现相位移（见A5.5）。

注9：当穿越阈值时，一般记录一个时间标记。

5.4.3 电压暂升的检测和评估

5.4.3.1 电压暂升的检测

暂升阈值表示为 U_{din} 或滑模参考电压 U_{sr} 的百分比（见5.4.4）。用户应声明所使用的参考电压。

注：在低压系统中通常不使用滑模参考电压 U_{sr} 。见IEC TR 61000-2-8可获取更多信息和建议。

——在单相系统中，当 U_{rms} 电压上升超过暂升阈值时，记作电压暂升的开始，当 U_{rms} 电压下降到等于或者小于暂升阈值与迟滞电压之差时，记作电压暂升的结束。

——在多相系统中，当一个或多个通道的 U_{rms} 电压超过暂升阈值时，记作电压暂升的开始，当所有测量通道的 U_{rms} 电压下降到等于或小于暂升阈值与迟滞电压之差时，记作电压暂升的结束。

暂升阈值和迟滞电压大小均由用户根据用途设定。

5.4.3.2 电压暂升的评估

电压暂升的特征值包括两个参数：最大暂升电压幅值和持续时间。

——最大暂升电压幅值是指电压暂升过程中任一通道上测得的 U_{rms} 最大值。

——电压暂升的开始时间应为触发事件通道 U_{rms} 的后沿时间，电压暂升的结束时间应为终止事件 U_{rms} 的后沿时间， U_{rms} 由阈值与迟滞电压之差来确定。

——电压暂升的持续时间是指从电压暂升起始到结束的时间差。

注1：对于多相系统测量，电压暂升持续时间的测量通常开始于其中一个通道，而结束于另一个通道。

注2：电压暂升的包络曲线并不一定是矩形。因此，对于一个给定的电压暂升，测得的持续时间取决于暂升阈值。

注3：迟滞电压通常为 U_{din} 的2%。

注 4: 暂升阈值通常大于 U_{dm} 的 110%。

注 5: 在电压暂升过程中也会出现相位移。

注 6: 当穿越阈值时, 一般记录一个时间标记。

5.4.4 滑模参考电压的计算

滑模参考电压是可选项, 不作强制性要求。如果滑模参考电压用于检测电压暂降或暂升, 应采用时间常量为 1 min 的一阶滤波器计算滑模参考电压。滤波器计算公式如公式(1)所示:

$$U_{\text{sr}(n)} = 0.996\ 7 \times U_{\text{sr}(n-1)} + 0.003\ 3 \times U_{(10)\text{rms}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$U_{\text{sr}(n)}$ ——滑模参考电压的当前值;

$U_{\text{sr}(n-1)}$ ——滑模参考电压的前一个值;

$U_{(10)\text{rms}}$ ——最近一个 10 周波的方均根值。

测量开始时, 滑模参考电压的初始值设置为公称输入电压。滑模参考电压值每 10 个周波更新一次。如果某 10 周波带有标记, 则滑动参考电压值不会更新, 仍使用滑动参考电压的前一个值。

5.4.5 测量不确定度和测量范围

5.4.5.1 残余电压和暂升电压幅值的测量不确定度

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

测量不确定度不应超过 U_{dm} 的 $\pm 0.2\%$ 。

b) S类

测量不确定度不应超过 U_{dm} 的 $\pm 1.0\%$ 。

5.4.5.2 持续时间的测量不确定度

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

电压暂降或暂升持续时间的不确定度等于暂降或暂升起始点不确定度(半个周波)加上结束点不确定度(半个周波)。

b) S类

如果使用 $U_{\text{rms}(1/2)}$, 电压暂降或暂升持续时间的不确定度等于暂降或暂升起始点不确定度(半个周波)加上结束点不确定度(半个周波)。如果使用 $U_{\text{rms}(1)}$, 则电压暂降或暂升持续时间的不确定度等于暂降或暂升起始点不确定度(一个周波)加上结束点不确定度(一个周波)。

5.4.5.3 聚合

聚合不适用于触发事件。

5.5 电压中断

5.5.1 测量方法

电压的各类基本测量方法应按照 5.4.1 中的规定进行。

5.5.2 电压中断的评估

电压中断的阈值为 U_{dm} 的百分比。

在单相系统中,当 U_{rms} 电压下降到低于中断阈值时,记作电压中断的起始;当 U_{rms} 电压上升到等于或大于中断阈值与迟滞电压之和时,记作电压中断的结束。

在多相系统中,当所有通道的 U_{rms} 电压都下降到低于中断阈值以下时,记作电压中断的起始;当任一通道的 U_{rms} 电压上升到等于或大于中断阈值与迟滞电压之和时,记作电压中断的结束。

电压中断阈值和迟滞电压大小均由用户根据用途设定。电压中断阈值不应小于残余电压测量不确定度与迟滞电压之和。迟滞电压通常为 U_{din} 的 2%。

电压中断的开始时间应为记录启动中断事件通道的 U_{rms} 的后沿时间,电压中断的终止时间应为记录中断过程结束 U_{rms} 的后沿时间, U_{rms} 由阈值和迟滞电压之和确定。

电压中断的持续时间是指从电压中断起始到结束的时间差。

注 1: 例如,电压中断阈值一般设为 U_{din} 的 5% 或 10%。

注 2: GB/T 4365—2003 的定义 161-08-20 将电压幅值降低到标称电压的 1% 以下的情况称为电压中断。但是当电压降低到标称电压的 1% 以下时很难准确测量。因此,用户能够考虑设置一个适当的电压中断阈值。

注 3: 在多相系统中,其中一个或多个相电压的中断对于连接到该系统的单相用户来说意味着一次中断,即使这种情况并不能归为多相系统的中断。

5.5.3 测量不确定度和测量范围

持续时间的测量不确定度见 5.4.5.2。

5.5.4 聚合

聚合不适用于触发事件。

5.6 瞬态电压

A.3 提供了表征瞬态电压重要参数的丰富信息。瞬态电压的测量是有用的,但不是强制性的。

5.7 供电电压不平衡

5.7.1 测量方法

不平衡测量仅适用于三相系统。

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

使用对称分量法评估供电电压不平衡度。在不平衡条件下,除正序分量 U_1 外,至少还存在以下分量之一:负序分量 U_2 和/或零序分量 U_0 。

测量 10 个周波时间段内输入电压的基波分量。

注 1: 通过使用滤波器或 DFT(离散傅里叶变换)算法来减小谐波的影响。

注 2: 仅使用方均根值计算不平衡度无法考虑相角位移对不平衡的影响;存在谐波电压时,将导致无法预料的结果。使用负序不平衡度和零序不平衡度获得更精确且更直接的结果。

负序不平衡度 u_2 可用百分数表示,由公式(2)计算:

$$u_2 = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% = \frac{\text{负序}}{\text{正序}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2)$$

零序不平衡度 u_0 可用百分数表示,由公式(3)计算:

$$u_0 = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% = \frac{\text{零序}}{\text{正序}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3)$$

注 3: 根据定义,测量相电压时,零序不平衡度为零。但在该情况下,相对中性点或相对地电压仍可包括零序分量。

注 4: 能够证明在数学上等效于公式(2)和公式(3)的任何其他方法都能接受。

b) S类

制造商应规定用于计算负序不平衡度 u_2 的算法及方法。可对零序不平衡度 u_0 进行评估,但不作为强制性规定。

5.7.2 测量不确定度和测量范围

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

u_2 和 u_0 的不确定度应小于 $\pm 0.15\%$ 。例如,负序不平衡度为 1.0% 的仪器,其读数 x 应满足 $0.85\% \leq x \leq 1.15\%$ (见图 5)。

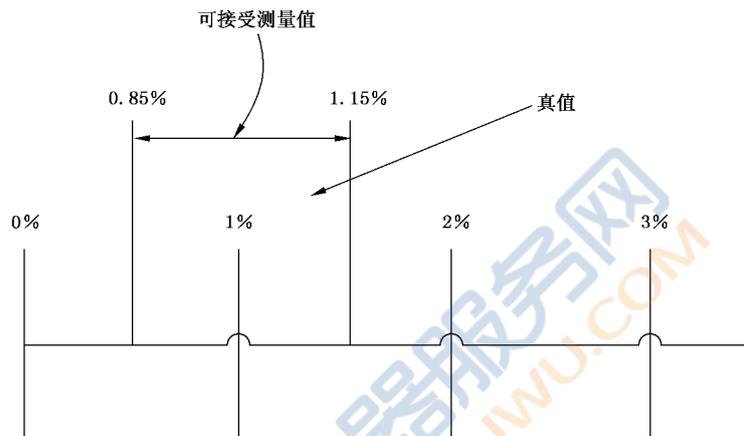


图 5 供电电压不平衡不确定度实例

b) S类

除不确定度外,同 A 类, u_2 的不确定度应小于 $\pm 0.3\%$ (如果同时估计 u_0 , 则 u_0 的不确定度也应小于 $\pm 0.3\%$)。

5.7.3 测量评估

不作要求。

注: 如果测量用互感器出现不确定度,将会给不平衡度的计算造成很大的影响。

5.7.4 聚合

应根据 4.4 和 4.5 进行聚合。

5.8 电压谐波

5.8.1 测量方法

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类):

a) A类

A类电压谐波的基本测量方法见 GB/T 17626.7—2017 的 I 类。应按照该标准来确定一个 10 周波的无缝谐波子群测量值,此值在该标准中用 $U_{sg,h}$ 表示。

注 1: 在特殊情况下,使用其他方法(例如模拟法或者频域法)可能会更合适(例如见 IEC 61000-3-8)。

至少应测量到 50 次谐波。

如果要计算总谐波畸变率,则应计算子群总谐波畸变率($THDS_Y$),见 GB/T 17626.7—2017 中

定义。

注 2：这种测量方法会生成大量数据，根据应用可能需要对其进行存储、传输、分析和/或存档。根据应用，数据量会减少。为了减少数据量，一般考虑在测量点应用统计方法，或仅存储极值和平均值，或仅在超过触发阈值时存储详细数据，或者采用其他方法。

注 3：GB/T 17626.7—2017 用符号“*I*”代替“*Y*”表示电流，用符号“*U*”代替“*Y*”表示电压。电压 THD 的首选术语是 $THDS_U$ ），但是在 GB/T 17626.7—2017 中搜索有关这些参数的信息时，请搜索符号“*Y*”。

b) S 类

S 类电压谐波的基本测量方法见 GB/T 17626.7—2017 的 II 类。允许有缝隙（见 4.5）。制造商应选择按该标准规定的 10 周波谐波群测量值 $U_{g,h}$ ，或按该标准规定的 10 周波谐波子群测量值 $U_{sg,h}$ 。制造商应指明选择何种方式。

至少应测量到 40 次谐波。

注 4：EN 50160 要求评估 40 次谐波。

如果要计算总谐波畸变率，若选择 $Y_{g,h}$ ，计算结果应视为总谐波畸变率 (THD_Y)，或选择 $Y_{sg,h}$ ，计算结果应视为子群总谐波畸变率 ($THDS_Y$)，这两种情况在 GB/T 17626.7—2017 中均有规定。

注 5：GB/T 17626.7—2017 用符号“*I*”代替“*Y*”表示电流，用符号“*U*”代替“*Y*”表示电压。因此， $U_{g,h}$ 或 $U_{sg,h}$ 是首选术语，但是在 GB/T 17626.7—2017 中搜索有关这些参数的信息时，请搜索符号“*Y*”。

5.8.2 测量不确定度和测量范围

对每一个待测参数定义为常用的两类（A 类和 S 类）。

a) A 类

最大不确定度应满足 GB/T 17626.7—2017 中 I 类规定的水平。

测量范围应为 IEC 61000-2-4 中第 3 类电磁环境的 10%~200%。

b) S 类

最大不确定度应在 GB/T 17626.7—2017 规定的 II 类水平的 2 倍以内。该标准中规定的抗互调低通滤波器应是可选的，该标准中规定的上升沿之间的时间最大允许误差 $\pm 0.03\%$ 也应是可选的，但在本文件第 6 章规定的影响量范围内，应满足最大不确定度要求。

测量范围应为 IEC 61000-2-4 中第 3 类电磁环境的 10%~100%。

5.8.3 测量评估

不作要求。

5.8.4 聚合

应根据 4.4 和 4.5 进行聚合。

注：为了最大程度地减少存储需求，在完成聚合后一般丢弃不再需要的源数据（例如 10 周波或 150 周波数据）。

5.9 电压间谐波

5.9.1 测量方法

对每一个待测参数定义为常用的两类（A 类和 S 类）。

a) A 类

对本文件而言，电压间谐波的基本测量见 GB/T 17626.7—2017 的 I 类。该标准应用于确定一个 10 周波的无缝间谐波子群测量值，此值在该标准中用 $Y_{isg,h}$ 表示。

至少应测量到 50 次谐波。

注 1: 这种测量方法会生成大量数据,根据应用可能需要对其进行存储、传输、分析和/或存档。根据应用,数据量会减少。为了减少数据量,一般考虑在测量点应用统计方法,或仅存储极值和平均值,或仅在超过触发阈值时存储详细数据,或者采用其他方法。

注 2: GB/T 17626.7—2017 用符号“ I ”代替“ Y ”表示电流,用符号“ U ”代替“ Y ”表示电压。因此, $U_{ig,h}$ 或 $U_{isg,h}$ 是首选术语,但是在 GB/T 17626.7—2017 中搜索有关这些参数的信息时,请搜索符号“ Y ”。

b) S 类

制造商应规定测量的方法。

5.9.2 测量不确定度和测量范围

对每一个待测参数定义为常用的两类(A 类和 S 类)。

a) A 类

最大不确定度应符合 GB/T 17626.7—2017 的 I 类水平。

测量范围应符合 IEC 61000-2-4 中第 3 类电磁环境的 10%~200%。

b) S 类

制造商应规定测量不确定度。

测量范围应符合 IEC 61000-2-4 中第 3 类电磁环境的 10%~100%。

5.9.3 评估

不作要求。

5.9.4 聚合

应根据 4.4 和 4.5 进行聚合。

注:为了最大程度地减少存储需求,在完成聚合后丢弃不再需要的源数据(例如 10 周波或 150 周波数据)。

5.10 供电电压上的载波信号电压

5.10.1 总则

电网载波信号电压在某些应用中称作纹波控制信号,是一种突发信号,通常采用非谐波频率,用于远程控制工业设备、收费仪表和其他装置。

5.10.2 测量方法

对每一个待测参数定义为常用的两类(A 类和 S 类)。

a) A 类

下述方法应用于电网载波信号频率低于 3 kHz 的情况。对于频率高于 3 kHz 的电网载波信号,见 IEC 61000-3-8。

该方法用于测量用户指定载频信号电压大小。

注:使用该方法是为了测量信号电压的最大值,而不是诊断电网载波信号故障。

电网载波信号电压的测量应基于:

- 对应 10 周波间谐波频带的有效值;
- 或 4 个最近 10 周波间谐波频带的有效值的平方和的平方根(例如,在供电系统中有一个 316.67 Hz 的纹波控制信号,该信号电压应近似等于 310 Hz、315 Hz、320 Hz、325 Hz 频带的平方和的平方根,各值可从 10 周波时间段的离散傅里叶变换即 DFT 得到)。

如果用户规定频率位于 DFT 频带的中心,则最好使用第一种方法。如果频率不在 DFT 频带的中心,则最好使用第二种方法。

用户应选择一个大于 $0.3\%U_{\text{dim}}$ 的检测阈值,并选择不超过 120s 的记录时间。当相关间谐波测量值超过检测阈值时,就应检测到信号发射的开始。为了得到最大的信号电压电平,在用户规定的时间内记录测量值。

- b) S 类
制造商应规定测量的技术。

5.10.3 测量不确定度和测量范围

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

- a) A 类

测量范围至少应为 U_{dim} 的 $0\% \sim 15\%$ 。

如果电网载波信号电压为 U_{dim} 的 $3\% \sim 5\%$,则不确定度不应超过测量值的 5% 。如果电网载波信号电压为 U_{dim} 的 $1\% \sim 3\%$,则不确定度不应超过 U_{dim} 的 $\pm 0.15\%$ 。如果电网载波信号电压小于 U_{dim} 的 1% ,则不确定度不作要求。

- b) S 类

制造商应规定不确定度及测量范围。

5.10.4 聚合

聚合不作强制性规定。

5.11 快速电压变化(RVC)

5.11.1 总则

3.26 中定义的 RVC 事件,通常是两个方均根电压之间的突变。根据定义,这两个方均根电压应为“稳定状态”,在后文方法中定义了一个条件。

暂降和暂升通常也以两个方均根电压之间的突变开始或结束。但是,由于电压超过了暂降和暂升阈值,根据定义,此时不是 RVC 事件。后文方法中提供了更多说明。

5.11.2 RVC 事件检测

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

- a) A 类

方均根电压处于稳定状态是指连续 100 个 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 值都保持在以这 100 个 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 算数平均值为中心的 RVC 阈值内。

RVC 阈值是 U_{dim} 的百分值,由用户根据应用设置。

注 1: 阈值范围一般为 $1\% \sim 6\%$ 。例如,在 IEC TR 61000-3-7 中,中压系统 RVC 阈值为 U_{dim} 的 $2.5\% \sim 6\%$ 。在 IEC 61000-3-3 中,低压系统 RVC 阈值为 $3.3\% \sim 6\%$ 。在这两个标准中,阈值都与每小时或每天的 RVC 事件数有关。在 IEC 61000-4-15:2010 中,其阈值 0.2% 是一个相似但不同的参数。

RVC 迟滞应小于 RVC 阈值,由用户根据应用设置。

注 2: 通常考虑迟滞在 RVC 阈值的 50% 以内。

RVC 检测方法:

- 记录第一组 100 个 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 值。

- 计算这组数据的算数平均值,然后应用后文的 RVC 检测方法。

检测 RVC 事件(见图 6 和图 7):

- 每个电压通道应创建一个“电压稳定状态”逻辑信号。当该通道上的电压处于稳定状态时,此逻辑信号为“真”,否则为“假”。此逻辑信号由每个电压通道的 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 值确定,并针对每个新的 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 值进行更新。
- 每当有新的 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 值时,计算包含此最新值的 100 个 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 的算术平均值。
- 如果包含此最新值前 100 个 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 值都在基于重新计算的算术平均值的 RVC 阈值范围(包括迟滞,若有)内,则该通道的“电压稳定状态”逻辑信号设置为“真”,否则置为“假”。
- 多相系统的“电压稳定状态”逻辑信号,由每个电压通道的“电压稳定状态”逻辑信号通过逻辑与运算得出。
- 当给定电压通道的“电压稳定状态”逻辑信号从“真”变为“假”时,该通道上的 RVC 事件开始。
- 当给定电压通道的 RVC 事件开始时,RVC 迟滞作用于该通道 RVC 阈值,且在 100 个半周波内禁止改变该通道的“电压稳定状态”逻辑信号。
- 当给定电压通道“电压稳定状态”逻辑信号从“假”变为“真”时,该给定通道的 RVC 事件结束。当 RVC 事件结束时,从该通道的 RVC 阈值中取消 RVC 迟滞。该通道的 RVC 事件结束的时间点是逻辑信号从“假”变为“真”之前的 100 个半周波时刻。

如果在 RVC 事件期间检测到电压暂降或电压暂升,包括禁止改变“电压稳定状态”逻辑信号的 10 个半周波期间,那么该 RVC 事件将被丢弃,因为该事件不是 RVC 事件而是电压暂降或电压暂升。

b) S 类

S 类方法同 A 类方法,但 S 类应根据 5.4.1 选择 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 或 $U_{\text{rms}(1)}$ 。如果选择了 $U_{\text{rms}(1)}$,那么应使用 50 个周波整体替代方法中的 100 个半周波。

5.11.3 RVC 事件的评估

RVC 事件有 4 个特征参数:开始时间、持续时间、 ΔU_{max} 和 ΔU_{SS} 。

对每一个待测参数定义为常用的两类(A 类和 S 类)。

a) A 类

- RVC 事件的开始时间,应为“电压稳定状态”逻辑信号变为“假”并启动 RVC 事件的时刻。
- RVC 事件的持续时间,比“电压稳定状态”逻辑信号处于“假”的时间短 100 个半周波。
- RVC 事件的 ΔU_{max} ,是事件期间的 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 值与事件之前的最后一个 100 个 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 算数平均值之差的绝对值。对于多相系统, ΔU_{max} 是各通道 ΔU_{max} 的最大值。
- RVC 事件的 ΔU_{SS} ,是事件之前的最后一个 100 个 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 算数平均值与事件之后的第一个 100 个 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 算数平均值之差的绝对值。对于多相系统, ΔU_{SS} 是各通道 ΔU_{SS} 的最大值。

注 1: 计算特定时间段内的 RVC 事件数可能很有用。时间段一般是基于固定间隔的 1 h,或基于滑动间隔的 1 h(每分钟滑动的最近 60 min)。或是基于日历“日”,或基于滑动间隔的最近 24 h(每小时滑动的最近 24 min)。

注 2: RVC 事件的其他特征参数尚在考虑之中。例如,基于 10 周波聚合值评估 ΔU_{max} 。

注 3: 在某些情况下,这种 RVC 测量方法可能无法完全表征两个稳定状态之间的复杂变化。记录每个通道上的 U_{rms} 值序列可能有助于开展更深入的分析。

b) S 类

S 类 RVC 事件的评估与 A 类相同,但 S 类应根据 5.4.1 选择 $U_{\text{rms}(1/2)}$ 或 $U_{\text{rms}(1)}$ 。如果选择了 $U_{\text{rms}(1)}$,那么应使用 50 个周波整体替代评估中的 100 个半周波。

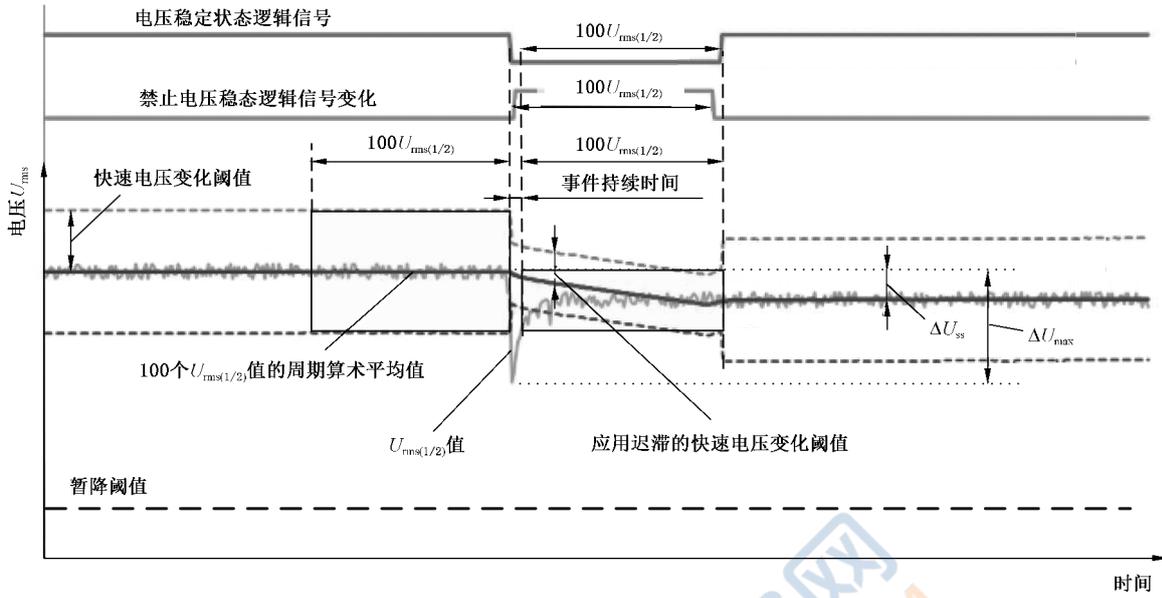


图 6 RVC 事件(方均根电压变化产生 RVC 事件的示例)

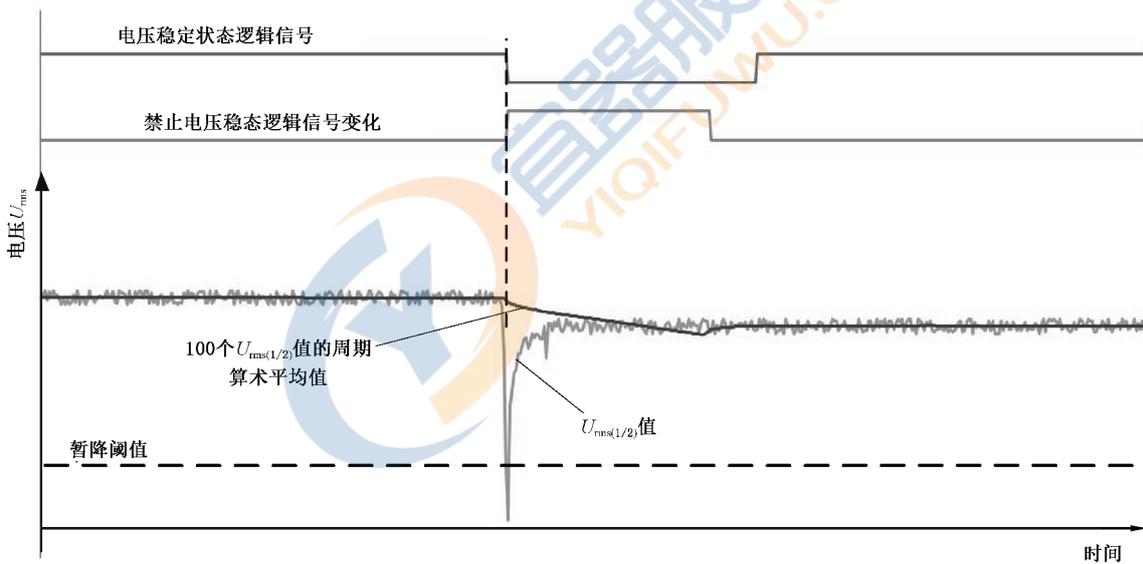


图 7 非 RVC 事件(方均根电压变化因超出暂降阈值而未产生 RVC 事件的示例)

5.11.4 测量不确定度

RVC 事件特征值的不确定度取决于 5.4.5.1 中所述的 U_{rms} 的测量不确定度,以及 5.11.1 和 5.11.2 中方法的正确实施。

5.12 负偏离和正偏离

参见附录 D(资料性附录)。

5.13 电流

5.13.1 总则

在电能质量领域,电流测量是电压测量的有效补充,尤其是在确定事件(如电压幅值变化、暂降、中断或者不平衡)起因时。

电流波形还能进一步将记录的事件和特定装置与动作(如电机启动、变压器通电或电容投切等)联系起来。

与电压谐波、间谐波相关联的电流谐波、间谐波,可用于描述连接到电网负载特性。

本文件未规定任何电流触发或阈值方法。若电流变化不足以触发电压达到任一阈值,则此电流变化不是电能质量事件。

注:本文件未考虑电流瞬变。附录 A 提供了一些有用的说明。

5.13.2 电流幅值

5.13.2.1 测量

制造商应规定满量程电流的方均根值,且瞬时峰值与方均根值之比最小为 3.0。

注:该比值有时也称为“波峰因数”。

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

电流幅值的基础测量值,应是 10 周波间隔的方均根值。电流测量间隔的边界应由相应电压通道的测量间隔边界确定并与之相同。

b) S类

制造商应规定方均根所采用的测量方法和时间间隔。

注:更详细的 S 类要求正在考虑中。

5.13.2.2 测量不确定度

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

在规定的满量程电流方均根的 10%~100%范围内,测量不确定度不应超过读数的 $\pm 1\%$ 。

注:此不确定度要求未考虑由电流传感器引入的不确定度。传感器导则参见 GB/T 18216.12—2010 的附录 C 和附录 D。

b) S类

在规定的满量程电流方均根的 10%~100%范围内,测量不确定度不应超过读数的 $\pm 2\%$ 。

5.13.2.3 测量评估

注:对于单相系统,只有 1 个电流方均根值。对于三相三线系统,通常有 3 个电流方均根值;对于三相四线系统,通常有 4 个电流方均根值。接地电流一般通过测量接地导线中的电流,或确定剩余电流得到。

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

应采用 4.4 和 4.5 所述的聚合时间间隔。

任一电流测量通道上的电流聚合时间间隔,应由相应电压通道的聚合时间间隔确定并与之相同。

b) S类

制造商或用户应说明测量的时间间隔。

5.13.3 电流记录

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

如果采用了电流测量方法,则每当记录电压时,也应记录时序由该电压通道确定并保持一致的相应电流。例如,如果记录了 $U_{\text{rms}(1/2)}$,那么也应记录所有时序由该电压通道确定并保持一致的 $I_{\text{rms}(1/2)}$ 。

b) S类

制造商或用户应说明电流的记录时间。

5.13.4 谐波电流

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

GB/T 17626.7—2017 规定了电流谐波的基本测量方法和准确度。使用该标准来确定 10 周波无缝谐波子群测量值,记作 $Y_{\text{sg},n}$ 。

注 1: GB/T 17626.7—2017 用符号“ I ”代替“ Y ”表示电流,用符号“ U ”代替“ Y ”表示电压。因此, $I_{\text{sg},h}$ 是首选术语,但是在 GB/T 17626.7—2017 中搜索有关这些参数的信息时,请搜索符号“ Y ”。使用 4.4 和 4.5 中所述的聚合时间间隔。

在出现电压暂降或暂升(见 5.4)或电压中断(见 5.5)的时间间隔内,应对该时间间隔的 10 周波电流谐波测量值作“标记”。

注 2: 这种测量方法会生成大量数据,根据应用可能需要对其进行存储、传输、分析和/或存档。根据应用,数据量会减少。为了减少数据量,一般考虑在测量点应用统计方法,或仅存储极值和平均值,或仅在超过触发阈值时存储详细数据,或者采用其他方法。

b) S类

制造商应说明测量和聚合方法。

5.13.5 间谐波电流

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

GB/T 17626.7—2017 规定了电流间谐波的基本测量方法和准确度。使用该标准可确定 10 周波无缝间谐波子群测量值,记作 $Y_{\text{isg},n}$ 。

应使用 4.4 和 4.5 中所述的聚合时间间隔。

在出现电压暂降或暂升(见 5.4)或电压中断(见 5.5)的时间间隔内,应对该时间间隔的 10 周波电流间谐波测量值作“标记”。

注 1: 这种测量方法会生成大量数据,根据应用可能需要对其进行存储、传输、分析和/或存档。根据应用,数据量会减少。为了减少数据量,一般考虑在测量点应用统计方法,或仅存储极值和平均值,或仅在超过触发阈值时存储详细数据,或者采用其他方法。

注 2: GB/T 17626.7—2017 用符号“ I ”代替“ Y ”表示电流,用符号“ U ”代替“ Y ”表示电压。因此, $I_{\text{isg},h}$ 是首选术语,但是在 GB/T 17626.7—2017 中搜索有关这些参数的信息时,请搜索符号“ Y ”。

b) S类

制造商应说明测量和聚合方法。

5.13.6 电流不平衡

对每一个待测参数定义为常用的两类(A类和S类)。

a) A类

电流不平衡的基本测量方法应与5.7中供电电压不平衡的测量方法相同。

应使用4.4和4.5中所述的聚合时间间隔。在出现电压暂降或暂升(见5.4)或电压中断(见5.5)的时间间隔内,应对该时间间隔的10周波电流不平衡测量值作“标记”。

b) S类

制造商应说明测量和聚合方法。

6 性能验证

有关A类和S类测量方法的性能验证可参见IEC 62586-2,其中包含了影响量和性能验证试验。

表1提供了有关A类和S类要求总览。若表1与本文件的规范性条款不一致,则以规范性条款为准。

请注意,仅满足表1的要求并不足以证明满足本文件,还应满足本文件中的测量和聚合方法。

表1 要求一览表(具体要求见子条款)

子条款及参数	类别	测量方法	不确定度	测量范围 ^a	影响量范围 ^b	聚合方法
5.1 电网频率	A	见5.1.1	±10 mHz	42.5 Hz~57.5 Hz	IEC 62586-2	N/R
	S	见5.1.1	±50 mHz	42.5 Hz~57.5 Hz	IEC 62586-2	N/R
5.2 供电电压幅值	A	见5.2.1	±0.1% U_{din}	10% U_{din} ~150% U_{din}	IEC 62586-2	见4.4和4.5
	S	见5.2.1	±0.5% U_{din}	20% U_{din} ~120% U_{din}	IEC 62586-2	见4.4和4.5
5.3 闪烁	A	IEC 61000-4-15: 2010	IEC 61000-4-15: 2010	0.2 P_{st} ~10.0 P_{st}	IEC 62586-2	IEC 61000-4-15: 2010
	S	IEC 61000-4-15: 2010	见5.3.2	0.4 P_{st} ~4.0 P_{st}	IEC 62586-2	IEC 61000-4-15: 2010
5.4 供电电压暂降 和暂升	A	$U_{\text{rms}(1/2)}$	幅值±0.2% U_{din} 持续时间±1周波	N/A	N/A	N/R
	S	见5.4.1	幅值±1% U_{din} 持续时间±1或 ±2周波	N/A	N/A	N/R
5.5 电压中断	A	$U_{\text{rms}(1/2)}$	持续时间±1周波	N/A	N/A	N/R
	S	见5.5.1	持续时间±1或 ±2周波	N/A	N/A	N/R
5.7 供电电压不 平衡	A	对称分量: U_2 和 U_0	±0.15%	0.5% u_2 ~5% u_2 , 0.5% u_2 ~5% u_0	IEC 62586-2	见4.4和4.5
	S	对称分量: U_2, U_0 (可选)	±0.3%	1% u_2 ~5% u_2 , 1% u_2 ~5% u_0 若选	IEC 62586-2	见4.4和4.5

表 1 要求一览表(具体要求见子条款)(续)

子条款及参数	类别	测量方法	不确定度	测量范围 ^a	影响量范围 ^b	聚合方法
5.8 电压谐波	A	见 5.8.1	GB/T 17626.7—2017 I类	IEC 61000-2-4 中第 3 类的 10%~200%	IEC 62586-2	见 4.4 和 4.5
	S	见 5.8.1	GB/T 17626.7—2017 II类的 200%	IEC 61000-2-4 中第 3 类的 10%~100%	IEC 62586-2	见 4.4 和 4.5
5.9 电压间谐波	A	见 5.9.1	GB/T 17626.7—2017 I类	IEC 61000-2-4 中第 3 类的 10%~200%	IEC 62586-2	见 4.4 和 4.5
	S	SBM	SBM	SBM	IEC 62586-2	N/R
5.10 电网载波信号 电压	A	见 5.10.2	见 5.10.3	0% U_{dm} ~ 15%的 U_{dm}	IEC 62586-2	N/R
	S	SBM	SBM	SBM	IEC 62586-2	N/R
5.11 快速电压变化	A	见 5.11.2	见 5.11.3	见 5.11.3	N/A	N/R
	S	见 5.11.2	见 5.11.3	见 5.11.3	N/A	N/R
5.13 电流	A	见 5.13.2 要求波峰因数为 3	±1%	量程的 10%~100%	N/A	N/R
	S	见 5.13.2 要求波峰因数为 3	±2%	量程的 10%~100%	N/A	N/R
附录 C 2 kHz~150 kHz	A	见附录 C	±1 V	±50 V 峰值	N/A	见附录 C
	S	N/R	N/R	N/R	N/A	N/R
瞬态电压 IEC 61180	A	N/R	N/R	N/R	6 kV 峰值 ^c	N/A
	S	N/R	N/R	N/R	N/R	N/A
快速瞬变 IEC 61000-4-4	A	N/R	N/R	N/R	4 kV 峰值 ^c	N/A
	S	N/R	N/R	N/R	N/R	N/A
SBM —— 由制造商说明； N/R —— 不作要求； N/A —— 不适用。 ^a 仪器在测量范围内满足不确定度要求。 ^b 仪器能容忍影响量范围内的信号，不会将其他参数的测量偏离出它们的不确定度要求范围，也不会出现仪器损坏。对于大于测量范围的信号，在影响量范围之内(不包括瞬态和快速瞬态)，仪器都能显示超量程。 ^c 对于瞬态电压和快速瞬态电压，在瞬态之后对测量没有影响。瞬态信号作用于测量终端，而不是作用于仪器的电源端。						

附录 A

(资料性)

电能质量测量——问题及指南

A.1 总则

本附录是本文件规范部分的参考性补充文件。

以下两条给出了电能质量测量时通常需要注意的事项及实施流程,与测量目的无关。

——A.2 安装注意事项。

——A.3 传感器。

以下两章属于测量方法的前期规范:

——A.4 瞬态电压和电流;

——A.5 电压暂降特性。

A.2 安装注意事项

A.2.1 总则

在安装电能质量(PQ)测量仪器时,要确保安装人员及相关人员的安全、被监测系统 and 仪器本身的完整性。

尽管有些安装可能只是临时的,因此与永久性安装方式不同,但仍宜遵守地方规范。地方性法规、规定和安全准则包括以下多项内容,并且其重要性高于此处所列注意事项。要遵守所有地方性和全国性安全要求(例如人员防护设备的要求)。

A.2.2 试验引线

A.2.2.1 总则

为确保安全,要遵守 IEC 61010 标准规定的测量、控制和实验室用电气设备的安全要求。

试验引线连接到负荷中心控制板或接线端子排,连接要确保不会影响所连接装置的正常使用。包括自动常闭门、盖板及检修窗口要在各自的使用位置(例如,用于封闭及固定的全套螺钉安装等)。如果在监测时检修窗口保持打开状态,则采取措施限制接近该区域,并将监测设置情况及现场负责人联系方式通知其他人员。

在绝大多数情况下,宜将电能质量测量仪器连接到系统专门设计的测量点或计量点。

试验引线的铺设要远离裸露的导体、尖锐的物体、低频及高频电磁场,以及其他恶劣环境。如有可能,将引线捆扎或系于固定物上,以避免因为疏忽大意造成连线断开。

A.2.2.2 电压试验引线

在连接到探头端(如连接到被监测系统端)的引线上加装保险丝,以提高连接的安全性。仪器制造商要说明保险丝的规格,以确保其熔断限值足够低,能够在过载条件下保护试验引线。而且,保险丝的断开容量要和连接点的工频故障电流一致。

电压互感器引线不宜随意地和已有的线缆缠绕在一起,或插入用于连接单根导线的断路器连接头上,而宜使用适宜额定值的引线并进行机械固定。临时性安装采用夹子固定时,宜遵循 IEC 61010。要确保夹子的额定值能够承受可能出现的最大电压,且宜用机械方式加以固定。在安装过程中,安装人员要考虑夹子意外脱落(比如在拖拽电缆时)带来的风险。

有些试验引线带有能相互叠插的绝缘插头。在叠插时宜注意,要仔细连接,以避免因疏忽而造成短路。要反复检查引线,确保不发生短路。另外,只能在将引线连接到电能质量仪器、并确保正确连接后,才能将互感器引线连接到被监测回路。

A.2.2.3 电流试验引线

宜注意电流互感器(如果有)的二次侧不能开路,即该电路的二次不宜有保险丝,而且到负载的连接宜采用机械方式加以紧固。

对于临时性安装的钳式电流传感器及相应的引线,设计宜符合 IEC 61010-2-032。

A.2.3 带电部件的防护

在安装或监测时,通常要移开面板。此时,所有带电部件将进行充分防护,并保持该部位不可接触。如果测量仪器中使用螺旋接线柱,则接线柱将加绝缘帽。所有连接端子要符合技术规格和使用用途。例如,设计只允许接单根导线的螺旋接线柱,不宜连接多根导线。

A.2.4 监测仪器的放置

放置电能质量测量仪器的位置要安全,尽量减少由于仪器移动或连接松动造成的危险。如果使用打印机输出故障报告,宜采取合适的预防措施以确保堆积的打印纸不会产生危险。测量仪器不可置于过热、潮湿或多尘的环境中,这会对仪器造成损坏,或者影响数据采集。

测量仪器将置于不会危及该区域工作人员的位置。有时可采用护栏或栅栏降低该类风险。如有可能,测量仪器将尽量避免放置于人员密集的地点,如在人流量较大的过道中。

另外,电能质量测量仪器也不宜置于对安装人员有较大危险的地点。有些地方可能过于狭窄,或者空间受限,无法顺利连接仪器的引线。这时候则选择其他地点来放置测量仪器。

有大量的外部环境因素会影响电能质量测量仪性能的发挥。这些环境因素包括温度、湿度、低频和高频电磁场、静电放电以及机械冲击或振动等。

A.2.5 接地

所有的仪器都有可能出现内部故障。如果制造商有明确要求,仪器的电源将有良好的保护接地线。许多安全规定也都要求电压试验引线要带接地线。对使用两根或多根接地连线(例如,一根接地连线用于电源,另一根用于试验引线)的仪器,如果接地点连接到仪器外不同物理点,就会构成接地回路。要认真考虑接地回路对测量值和待测系统带来的风险。

另外还需要考虑接地系统不同点之间的高电位差对人员及仪器构成的潜在危险。在很多种情况下,采用隔离变压器作为仪器供电电源比较有用。

无论如何,将最优先考虑安全问题。

A.2.6 干扰

如果电能质量测量仪器连接到移动电话或其他无线电发射机上,则宜注意发射天线要远离易受干扰的装置。这类干扰装置可能包括保护装置、医疗监护仪器及科研仪器等。

A.3 传感器

A.3.1 总则

电能质量测量仪器,尤其是便携式测量仪器,通常为低压输入设备。一些永久性安装的电能质量测量仪通常远离待测点。对这两种情况,均可能需要合适的传感器用于降低电压,将输入电路和系统电压

隔离,或者远距离传送信号。为此,需要提供特性适合待测参数的传感器。

在低压系统中,电能质量测量仪器通常直接连接到需关注的低压点,但对电流测量通常需要传感器。

在中压和高压系统中,电压和电流的电能质量测量均需使用传感器。

在使用传感器时需要考虑以下两个重要因素:

——信号电平:待测信号的电平不产生畸变或削幅的前提下,宜接近仪器的满量程输入;

——频率响应和相位响应:该特性对瞬态测量和谐波测量尤其重要。

为避免出现错误测量,宜仔细考虑传感器的额定满量程、线性度、频率响应、相位响应和负载特性等。

注:用于保护的电流互感器精度比测量互感器要低。

A.3.2 信号电平

A.3.2.1 电压传感器

最常见的电压传感器是电压互感器。可考虑采用两类电压互感器:一类用于继电保护电路,一类用于测量电路。第一类即使是在由于不对称短路造成过压时也能提供正确的响应。相比之下,第二类用于保护测量设备不受电网过压的影响。对于后者,出现饱和时,传送的信号就会产生畸变。

当还有其他功能(如测量)的电压互感器用于监测时,宜注意确保额外的负载不会影响其他功能校准或不确定度。

在连接用于继电保护的电压互感器的二次电路时,宜格外小心。连接错误可能导致继电器意外跳闸。

注:关于电压互感器不确定度的详细内容,参见 IEC 60044-2。

A.3.2.2 电流传感器

电流传感器的影响可参见 IEC 61869。

在电网运行过程中,电流值可从 0 变化到被监测供电网短路电流的水平。短路电流可远大于额定电流水平。出现 20 倍的额定电流值并不罕见。

最常见的电流传感器是电流互感器。

有些电流互感器带有两个或多个铁芯和/或两个二次绕组:其中一个是大电流(20~30 倍标称电流),通常用于继电保护,另一个用于标称电流。对所需测量宜选择正确的二次绕组。如果选择了错误的二次绕组,在直接连接时可能会由于故障而损坏测量仪器。损坏后可能造成互感器二次绕组开路。而电流互感器二次绕组开路则会导致危险(具有破坏性)的高压。

在实际操作中,用户宜采取措施以确保导体在电流互感器的卡口正中,并且导体与卡口正交。还宜考虑相邻导体的接近程度,并尽可能使距离最大化。

注:关于电流互感器不确定度的详细信息,参见 IEC 61869-1 和 IEC 61869-2。

瞬态测量可采用分流器或专用于高频响应的电流互感器。

同轴分流器通常用于实验室,其缺点是需要串入电流回路中,且分流器的输出信号与电流回路没有电隔离。但另一方面,同轴分流器不存在磁饱和和剩磁问题,这两个因素会影响电流互感器的测量。

带合适阻性负载的电流互感器运行时,输出的电压信号正比于一次电流。通常,通过铁芯窗口的一次回路包括一匝或多匝线圈绕组。这类电流传感器的主要优点是能够与电流回路电隔离,具有较大的安-伏比。另外一个优点是有的(并非全部)电流互感器在安装时不需要将电流回路和负载断开。

有时候也使用一些其他类型的电流传感器,包括光学偏振传感器和霍尔效应传感器等。

A.3.3 传感器的频率响应

A.3.3.1 电压传感器的频率和相位响应

通常,类似变压器电磁转换原理的电压传感器在频率低于 1 kHz 时有较好的频率响应和瞬态响应;但是有时频率范围会远低于 1 kHz,有时又会达到几 kHz。

简单的电容分压器在频率达到几百 kHz 或更高时有较好的频率响应和相位响应;但是,在很多应用中,需要特意增加一个谐振回路,使得电容分压器在测量工频以外的任何频率时频率响应变差。

电阻性分压器在几百 kHz 范围内具有较好的频率响应和相位响应。但是,也可能会带来其他问题,例如,测量仪器的容性负载可能会影响电阻性分压器的频率响应和相位响应。

A.3.3.2 电流传感器的频率和相位响应

由于电流互感器是缠绕型电磁装置,所以其频率响应根据不确定度等级、类型(制造商)、匝数比、铁芯材料和铁芯横截面积,以及二次回路负载的不同而变化。

通常,电流传感器的截止频率从 1 kHz 到几 kHz 不等,越接近截止频率,其相位响应越差。

具有更高截止频率和更好线性度的新概念电流传感器(光效应及霍尔效应传感器)正在研发中。宜认真考虑绝缘配合、噪声问题、满量程性能及安全条件等。

A.3.4 瞬态测量传感器

在选择用于交流电网瞬态信号测量的传感器时,宜考虑两个重要问题。一是信号的强弱,在仪器上满量程显示时,没有对所测信号压缩或限幅。二是传感器的频率响应(包括幅值响应和相位响应)宜能足以反映所测信号。

——电压传感器(VT)

- 电压传感器的尺寸大小宜能防止测得的干扰引起饱和。对于低频瞬态信号,要求传感器饱和曲线的拐点至少是系统标称电压的 200%。
- 标准测量类电压传感器的频率响应取决于其类型和所连接的负载。施加大阻抗负载时,频率响应通常至少在 2 kHz 内满足要求,也有可能稍低。
- 电容式电压互感器通常不提供任何较高频率分量的准确信息。
- 高频瞬态信号的测量需要一个容性分压器或者纯电阻分压器。对于需要准确测量至少 1 MHz 的瞬态信号特性,则可使用特殊的容性分压器。

——电流传感器(CT)

- 选择合适的电流传感器更为困难。配电网馈线的电流变化更频繁,而且电流幅值变化也比电压幅值变化大。
- 标准测量类电流传感器通常可工作到 2 kHz(相位偏差在该频限之前有可能变得很明显)。对于更高频率,宜使用高匝数比的窗口型电流传感器(环形、开口铁芯、棒型和钳式)。
- 电流传感器的其他性能包括:高匝数比,例如 2 000 : 5;一次绕组匝数小于 5;剩磁小,如为磁芯饱和度的 10%;磁芯面积大;二次绕组电阻及漏抗尽可能小。当使用电流传感器测量瞬态信号时,需要考虑两个关键参数,电流时间积($I \cdot t$ 最大值)以及上升时间/下降速度。上升(从 10% 上升到 90%)时间的典型值范围为 2 ns~200 ns。下降速度范围为 0.1%/μs~0.5%/ms。

在高压系统中,高频和瞬态电压的测量有时可通过电流传感器上的容性抽头和互感器套管实现。

A.4 瞬态电压和电流

A.4.1 总则

本条款最初用于测量低压系统中出现的瞬态信号,不包括气体绝缘开关(GIS)设备或高压系统中出现的瞬态信号。

在所有交流系统中都有可能出现瞬态信号。习惯上,瞬态信号往往是指“瞬态电压”;而在很多情况下,瞬态电流可能更重要。瞬态电压的检测、归类和特征描述也是颇具挑战性的课题。

A.4.2 术语和定义

A.4.2.1

瞬态(形容词和名词) transient

在两相邻稳定状态之间变化的物理量或物理现象,其变化时间小于所关注的时间尺度。

[来源:GB/T 4365—2003,定义 161-02-01]

A.4.2.2

浪涌 surge

沿线路或电路传播的瞬态电压波。其特征是电压快速上升后缓慢下降。

[来源:GB/T 4365—2003,定义 161-08-11]

A.4.3 交流电网瞬态信号的频率及幅值特性

交流电路中的瞬态信号波形、幅值和持续时间均有较大的变化范围。仅凭一组简单的参数难以对此进行描述,但是获得信号的特征后,可将其归类到几种典型波形中,以便试验时使用。图 A.1 所示为一些常用的有代表性的试验波形的频谱。这些信息能降低模拟信号进入事件的数字记录和数据处理,对算法研究是必要的,且对其有帮助。

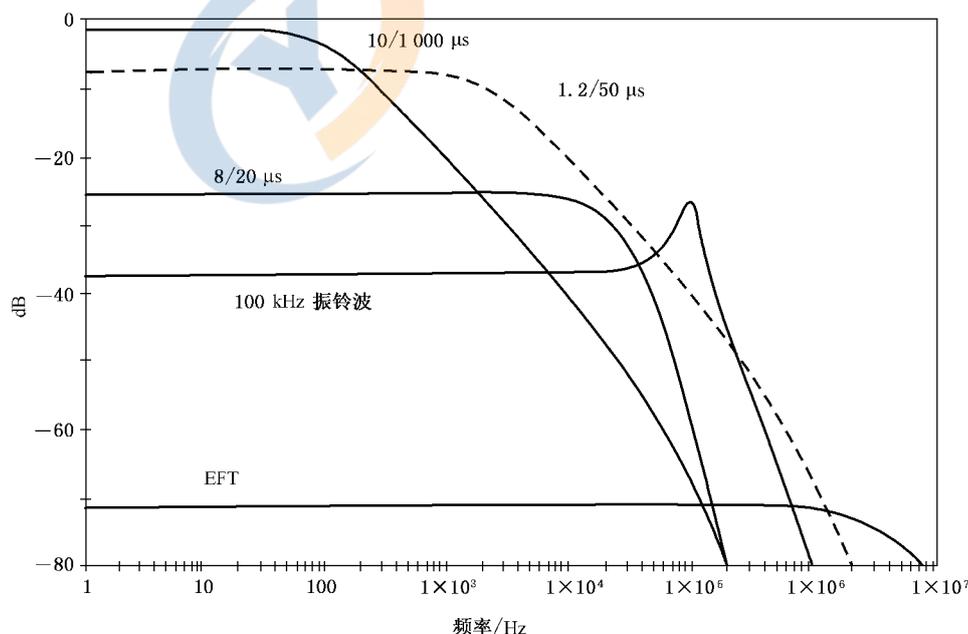


图 A.1 典型代表性瞬态试验波形频谱

电网中常见试验波形的瞬态信号,包括电压和电流,其频率最高达 10 MHz(持续 200 μs),大幅值信号频率高达 1 MHz(持续 2 ms)。对于交流电源连接的最终使用,常见试验波形的电压幅值最高达

6 kV, 电流幅值最高达 5 kA。

因此,采样频率至少宜为波形最高频率的两倍;另外,相应的抗混叠滤波器应具有合适的特性。有关瞬态信号测量的更多信息见 A.3.4。

A.4.4 瞬态电压检测

瞬态测量的结果取决于瞬态信号实际特性和用户选择的以及仪器显示的参数。如果主要考虑的是绝缘,则瞬态测量通常是在相-地间进行。如果主要考虑的是防止仪器损坏,则瞬态测量通常在相间或在相-中性点间进行。

一些检测方法及应用实例,包括:

- 比较法:如超过固定的绝对阈值,则认为检测到瞬态值,例如,对总电压敏感的浪涌保护器 (SPD);
- 包络法:类似于比较法,但是分析之前要去掉基波分量,例如,容性耦合的瞬态;
- 滑动窗口法:将瞬时值和前一周波对应的值作比较,例如,与用于功率因数校正的电容器组有关的低频开关瞬态;
- dv/dt 法:如果超过了 dv/dt 的固定绝对阈值,将误触发电力电子电路或造成电感绕组上的非线性分布;
- 方均根值:当需要进一步计算如 SPD 的能量贮存或电荷转移时,采用极快速采样法,以远低于基波周波的时间间隔计算方均根值,并用该值和阈值进行比较;
- 其他方法:例如,幅频特性测量(离散傅里叶变换或快速傅里叶变换,小波变换等)。

A.4.5 瞬态电压评估

一旦使用上述方法检测到瞬态信号,就可对其进行分类。分类方法和参数包括:

- 峰值电压和/或电流(注意峰值大小也受测量周期的影响);
- 过冲电压;
- 上升沿的上升速度(dv/dt 或 di/dt);
- 频率参数;
- 持续时间(由于衰减、波形不规则等因素,该参数较难定义);
- 阻尼系数;
- 发生频率;
- 提供的或传送的能量及功率;
- 连续瞬态(每周波都存在,如周波上的凹点)或者单次瞬态(不可预测)。

所有这些数值型参数均有助于开发一种利用统计术语描述瞬态环境的分类系统。

另一方面,尤其是在排除故障时,使用图形表示的特征可描述多个该类难以量化的参数。

A.4.6 浪涌保护器对瞬态测量的影响

浪涌保护器 (SPD) 为并联型元件,当电压超过阈值时导通。SPD 常用于限制瞬态电压。常见于电源插座的滤波装置中,并常作为敏感电子设备如个人电脑的一部分包括在其中。

由于电源回路上所有浪涌保护器都是并联的,因此,具有最低限制电压(性能范围内)的浪涌保护器将所有瞬态电压值限制在该浪涌保护器的限制电压范围内,并将进入装置的最大部分的瞬态电流分流。因此,在很多情况下(办公室、实验室、工厂等)测量瞬态电压的作用不大,因为测量到的阈值电压仅仅是众多使用的浪涌保护器中的某一个阈值电压。

由于这个原因,测量瞬态电流通常要比测量瞬态电压更能反映交流系统瞬态变化的严重程度。

A.5 电压暂降特性

A.5.1 总则

电压暂降是一种公认的常见电能质量事件。

本文件的正文规范部分用两个特征参数描述电压暂降,即深度(或残余电压)和持续时间。这两个参数需每半周波更新全周期方均根值。

不过,电压暂降通常很少是矩形,即,暂降过程中 U_{rms} 会不断变化,这将特征限制在深度和持续时间上可能会模糊有用的信息。例如,因电机启动或变压器受电导致电压暂降,在电压暂降和正常运行之间的平滑过渡。

总之,使用电压暂降过程中存储的波形能够提供最大的信息量。但使用特征参数可减少数据量,并能对事件进行描述和归类。

如在某线路部分故障,自动重合闸重新供电失败,可能会发生多次暂降。大约在同一时间内发生的事件可能会被统计为一次事件。

根据测量目的,除深度和持续时间之外,也宜考虑采用其他特征参数。

A.5.2 快速更新方均根值

在电压暂降过程中,全周波方均根值计算更新的频率快于每个半周波(如本文件的规范部分所述)可能十分有用。例如在每个周波对周波方均根值进行 128 次更新。该方法采用设置简单阈值即可更精确地标记电压暂降的起始点和结束点。其缺点是增加了数据量 and 处理过程,并引入了可能引起误解的平滑滤波器。

方均根电压能够正确反映电阻性负载的可用功率。但是,电子负载对方均根电压不敏感。相反,电子负载通常对波形接近峰值的电压敏感,而对波形的其他部分不敏感。采用方均根电压之外的方法评估电压暂降对电子负载的影响时可能更有用。

A.5.3 相位角/波形起始角度

在有些应用中,例如机电式接触器触点分离时,电压暂降起始点的相位角是一个非常重要的参数,该参数有时称为波形起始角度。

该相位角可通过采集暂降前和暂降过程中的波形来确定,采集到波形后,找出波形何时偏离理想值,例如,偏离 10%,然后返回沿着波形,采用更小的阈值,如下降 5%,找到暂降的起始点。寻找电压暂降准确起始点的算法具有很高的灵敏度,并且不会触发任何微小的非暂降变化。

也可使用类似的算法确定暂降结束点。该方法除了可提供相位角信息外,还可更为精确地计算暂降的持续时间,其精度远高于 1 周波算法。

此外,使用更先进的信号处理技术可更精确地检测到电压暂降的起始点。

A.5.4 电压暂降不平衡

即使是很短暂的不平衡,也能损坏三相整流负载,或引起过电流装置跳闸。三相暂降通常不平衡。采用 A.5.2 所述的快速更新方均根值,在暂降过程中计算三相不平衡度是十分有用的。暂降过程中不平衡度通常会有变化,因此,不平衡度可用图形表示,或采用暂降期间的最大不平衡度表示。

在不平衡暂降过程中,单独分析基波的零序、负序和正序可能更有用。该方法还能提供暂降在电网中如何传播的信息,也有助于理解不同相同时出现的暂降和暂升。

A.5.5 电压暂降中的相移

在有些应用中,如三相整流器,电压暂降的相移可能非常重要。该相移可通过对暂降开始前的一个

周波和暂降开始后的一个周波分别作 DFT 来测量得到。如果在暂降的整个过程中使用该方法,则可计算出暂降过程中的最大相移。暂降结束时的相移也可能有用。在有些应用中,如锁相环的稳定性中,使用该值有助于计算暂降过程中相位角的最大变化率($d\theta/dt$)。

通过计算不平衡电压暂降过程中的零序、负序和正序分量的幅值和相角,可将暂降的相移和不平衡度计算结合同时进行。

A.5.6 电压损失

电压损失作为电压暂降的特性可通过计算得到,根据暂降前波形的幅值、相位和频率,从一个理想波形中减去暂降波形即可得到。该特性可用于分析暂降(例如电压恢复装置)的影响。

A.5.7 电压暂降过程的畸变

暂降过程中的电压经常会畸变,而畸变对于理解暂降对电子装置的影响可能很重要。可考虑用传统方法如 THD 描述这种畸变,但是 THD 将畸变和基波比较,而基波在暂降过程中变化很快。因此,用暂降过程中非基波分量的方均根值评估畸变更有效。

暂降过程中或在暂降后存在偶次谐波可能意味着变压器饱和。

A.5.8 其他特性及参考

这里并没有包括所有的电压暂降特性。没有提到的其他特性可能会有助于分析电压暂降对于各类负载、控制装置和校正装置的影响。更多信息及实例建议见 IEC TR 61000-2-8 和 IEEE 1159。

附录 B

(资料性)

电能质量测量——应用指南

B.1 电能质量测量的合同应用

B.1.1 总则

本章提供电能质量(PQ)测量合同指导。重点介绍相关各方宜考虑的各种因素。

注：所讨论的电压质量参数如下段所述。

推荐在签订 PQ 合同前查阅 B.1.2, 在进行 PQ 测量之前查阅 B.1.3, 以确保与合同中的条款相符合。

B.1.2 基本考虑

合同中规定的条款将是一方能够实现, 另一方也能接受的。签订 PQ 合同首先宜考虑 PQ 标准或规范。宜考虑相关标准的规划值或指导值, 如 IEC 61000-2-2、IEC 61000-2-4、IEC 61000-2-12, 以及 IEC TR 61000-3-6、IEC TR 61000-3-7 和 IEC TR 61000-3-13 的一部分。

为确保测量结果能代表系统正常运行条件下的值, 在供电网遭受以下严重干扰时, PQ 测量数据可能不完全准确, 但可作为参考:

- 异常天气条件;
- 第三方干扰;
- 政府当局的行为;
- 劳工行动;
- 不可抗力;
- 由外部事件造成的电力短缺。

合同中宜规定, 在评估合同符合性结果时, 是否分析标准规范部分(见 4.7)所述的被标记的数据。如果剔除被标记的数据, 则每个参数的测量结果通常是彼此独立的; 而且也很容易将各个参数直接与合同规定值进行比较。如果包括被标记的数据, 则测量结果通常可直接反应敏感负荷的电能质量效应, 但将测量结果与合同规定值进行比较将非常困难, 甚至无法进行比较。

注: 标记过的数据意味着有干扰影响到测量结果; 而且一个干扰可能会影响多个参数。

如果 PQ 测量为了验证供电质量是否符合合同条款, 且没有永久性监测系统可利用, 则由认为有必要的一方安排测量。当然, 也可由合同具体规定由哪一方负责。这可能需要咨询第三方。

合同宜规定相关方如何承担测量费用。也可由测量结果决定。

合同宜规定合同的有效期限、测量的时间区间、待测的 PQ 参数以及测量仪器的电气位置。见 B.1.3 中关于测量时间区间及电能质量参数的实例。

测量装置接线方式(即相—中性线或相—相)的选择宜与供电连接类型一致, 或者宜经相关各方同意。该项宜在合同中明确说明。

合同条款宜规定使用的测量方法及本文件规范部分所述的不确定度。

如果合同一方未能履行合同条款, 宜明确赔偿方式。

合同可包括对测量结果解释出现争议时的解决方法规定。

合同需要规定数据获取及保密方面的内容, 例如, PQ 测量方可能不是对数据进行分析并评估合同符合性的同一方。

B.1.3 特殊考虑

B.1.3.1 总则

电能质量(PQ)评估是将 PQ 参数测量值与合同限值(合同值)作比较。这些合同限值不属本文件的讨论范围。

在合同中,每个 PQ 参数的描述可包括:合同值、考虑的时间区间,以及评估时间区间的持续时间,还可包括“标记”测量值的专门程序。

很多 PQ 参数(电压、谐波、闪烁)在工作日和周末之间会有变化。因此,评估周期宜至少为一周(或数周)。

B.1.3.2 电网频率

测量时间段:最小评估周期为 1 周。

评估技术:考虑 10 s 内的值。宜采用以下技术,而经各方同意也可采用其他评估技术。

- 在测量时间段内,统计超出合同值上限或下限值的数量或百分比。
- 将最坏情况下的值与合同值的上限值和/或下限值进行比较(该情况下测量时间段可不同)。
- 可将每周测量的以赫兹表示的一个或多个 95%(或其他百分比)概率值与合同上限值和/或下限值进行比较。
- 统计连续超过合同上限值和/或下限值的个数。
- 将偏离标称频率的值在测量时间段内求和,然后与合同值进行比较。

B.1.3.3 供电电压幅值

测量时间段:最小评估周期为 1 周。

评估技术:宜考虑 10 min 内的值。宜采用以下技术,而经各方同意也可采用其他评估技术。

- 在测量时间段内,统计超出合同上限值或下限值的数量或百分比。
- 将最坏情况下的值与合同上限值或下限值进行比较(该情况下测量的时间段可不同)。
- 可将每周测量的以伏特表示的一个或多个 95%(或其他百分比)概率值与合同上限值和/或下限值进行比较。
- 统计连续超过合同上限值和/或下限值的个数。

B.1.3.4 闪烁

测量时间段:最小评估周期为 1 周。

评估技术:可考虑 10 min 内的 P_{st} 值和/或 2 h 内的 P_{it} 值。宜采用以下技术评估,而经各方同意也可采用其他评估技术。

- 在测量时间间隔内,统计超出合同值的个数或百分比。
- 将每周测量的 99%(或其他百分比)概率的 P_{st} 值,或 95%(或其他百分比)概率的 P_{it} 值与合同值进行比较。

B.1.3.5 电压暂降/暂升

测量时间段:最小评估周期为 1 年。

评估技术:合同各方宜在设定输入电压 U_{din} 上取得一致。

注:对于低压用户,设定输入电压通常等于供电系统的标称电压。而对于中压或高压的用户,设定输入电压则能与标称电压不同。

合同各方宜对以下条款达成一致：

- 暂降和暂升的检测阈值；
- 时间聚合技术；
- 地点聚合技术(如果测量多个地点)；
- 报告技术,如残余电压/持续时间表；
- 任何其他可能相关的评估技术。

B.1.3.6 电压中断

测量时间段:最小评估周期为 1 年。

评估技术:各方协商确定区分短时、长时电压中断的持续期。可考虑在测量时间区间内电压中断的次数,以及电压长时中断的总持续时间。也可使用其他各方同意的评估技术。

对于客户得到提前通知的中断(例如至少提前 24 h)可与没有得到提前通知的中断分开统计。

B.1.3.7 供电电压不平衡

测量时间段:最小评估周期为 1 周。

评估技术:考虑 10 min 和/或 2 h 内的值。宜采用以下技术,而经各方同意也可采用其他评估技术。

- 在测量时间段内,统计超出合同上限值或下限值的数量或百分比。
- 将最坏情况下的与合同值进行比较(这种情况下测量的时间段可能不同,如 1 年)。
- 将每周测量的以百分比表示的一个或多个 95% 概率值(或其他百分比)与合同值进行比较。

B.1.3.8 谐波电压

测量时间段:10 min 内的值最小评估周期为 1 周,每日评估 150 周波时段,评估周期至少持续 1 周。

评估技术:考虑 150 周波时间段和/或 10 min 的值。可为各次谐波、谐波范围或其他谐波群规定相应的合同值,例如,根据合同各方协商,对偶次谐波和奇次谐波规定各自相应的合同值。宜采用以下技术,而经各方同意也可采用其他评估技术。

- 在测量时间段内,统计超出合同值的数量或百分比。
- 将最坏情况下的值与合同值进行比较(这种情况下测量的时间段可能不同,例如 1 年)。
- 将以百分比表示的每周测量的一个或多个 95%(或其他百分比)概率的 10 min 值,和/或每日测量的 95%(或其他百分比)概率的 150 周波时间段值与合同值进行比较。

B.1.3.9 间谐波电压

测量时间段:10 min 内的值最小评估周期为 1 周,每日评估 150 周波内的值至少持续 1 周。

评估技术:考虑 150 周波时间段或 10 min 的值。根据合同各方协商,可为某间谐波范围或其他间谐波集规定相应的合同值。宜采用以下技术,而经各方同意也可采用其他评估技术。

- 在测量时间段内,统计超出合同值的数量或百分比。
- 将最坏情况下的值与合同值进行比较(这种情况下测量的时间段可能不同,比如 1 年)。
- 将以百分比表示的每周测量的一个或多个 95%(或其他百分比)概率的 10 min 值,和/或每日测量的 95%(或其他百分比)概率的 150 周波时间段值与合同值进行比较。

B.1.3.10 供电电压上的载波信号电压

测量时间段:最小评估周期为 1 天。

评估技术:对所有值建议采用以下技术,而经各方同意也可采用其他评估技术。

——在测量时间段内,统计超出合同值的数量或百分比。

——将最坏情况下的值与合同值进行比较(这种情况下测量的时间段可能会不同,例如1周)。

B.2 统计调查的应用

B.2.1 总则

以下是有关电能质量统计调查(包括长期监测)的设计和实施指导原则。

a) 满足客户需求,此类调查的目的是提供电能质量参数信息供客户参考,并与正式发布的电能质量指标体系进行比较。该指标体系与正式发布的标准有关,或与预定的由特定安装的设备规定的要求有关(例如,合同或设备规范)。

b) 满足电网运营方需求,评估当前电网的畸变/干扰等级(例如,接入新负荷时所要求的评估)。

由于历史原因,各个国家的电网设计及营运方式有所不同,对不同国家电能质量调查工作进行规范极为复杂,并易于产生误解。

B.2 解释电能质量统计的目的,并提供一些指导原则。

首先,采用这些技术是为了对大量的测量数据进行压缩。

其次,计算包括在某特定点或整个电网上的电能质量基准指标,这是为了:

——验证是否与合同约定一致(见 B.1);

——监测较长时间段内电网的性能变化;

——在同一时间段内比较不同的电网。

B.2.2 考虑因素

统计分析的对象宜是同类数据:同样的测量时间段,同样的测量数据,同样电网等。

在对测量值进行分类的基础上作统计计算。

用户可为每一个参数规定一个变化“正常范围”,并决定是否包括标记数据(见 4.7),因为根据定义该标记数据可能是无关的。

然后将变化的正常范围分为宽度相等的若干区间。

注:区间数量取决于测量的参数、精度、投入等。对于某些应用,最少40个区间就足够了。而在其他应用中,100个区间可能更有用。

区间的数量决定了置信区间。在一个测量周期(如,1天,1周,1年等)内区间保持不变,并在正常变化范围内,按从最低区间到最高区间排序。

统计各区间测量值的数量。这些统计数值可用于确定聚合曲线,反之该曲线可用于确定百分位数值。

宜使用具有置信度的统计公式(如95%)来确定置信区间。如果统计值的数量较少,则宜注意置信区间。

B.2.3 电能质量指标

B.2.3.1 表征电网的某一点

根据相关现象,可用两类电能质量指标来表征描述单个测量点的特征:

——各统计指标如某时间段内的百分位数、最大值或平均值(谐波参见 IEC 61000-3-6, 闪烁参见 IEC 61000-3-7)的统计指标;

——事件统计及列表。

各参数的电能质量指标实例参见 B.1.3。

B.2.3.2 表征全电网

整个电网是通过将电网或客户类型进行分类的单个点的集合。可能需要采用加权法才能得出整体结果。加权法既可用于统计指标,也可用于事件。

B.2.4 监测目标

电能质量监测对于表征电力线路某特定点的电磁现象特征很有必要。

目标可能很简单,如验证某供电入口的电压调节稳定性;也可能很复杂,如分析配电网的谐波电流。一般而言,实施电能质量监测包括以下三方面的原因。

- a) 电能质量评估:评估某特定点的电气环境,以完善建模技术或建立电能质量基准。
- b) 规划新设备接入:预测计划接入设备或改善电能质量装置的性能。不管何种情况,任何监测方案最重要的任务是清楚界定被监测目标。
- c) 排除故障:诊断电源和装置内现有连接设备间可能存在的任何不兼容性。

确定监测目标的程序取决于实施监测的目的。由此可确定需要测量的参数,监测持续的时间,以及对参数进行评估的阈值等。

B.2.5 电能质量调查的经济因素

影响一次测量的成本及总体经济效益的因素有多个。这些因素包括:

- 测量设备;
- 传感器;
- 安装,包括连接通道;
- 人力;
- 通信;
- 数据管理(数据库等);
- 数据处理和分析;
- 调查持续时间。

在以上因素中,测量设备费用往往不是最多的。在变电站及输电线路应用中,安装及人力成本通常要远超过测量设备。如果考虑长期测量,则通信和数据分析费用是主要的。因此,较为明智的做法是,选择易于安装并有多种通信方式的仪器,且仪器提供的数据格式能够简化分析工作(例如,采用标准格式的数据)。

测量费用与调查持续时间以显而易见的乘积关系增加。例如与 EN 50160 等标准相关的符合性的测量活动。在这方面的指导意见是,首先要符合国家标准中关于调查持续时间的要求;其次,如果国家标准中没有关于持续时间的明确要求,根据测量的相关情况加以确定。测量的持续时间宜根据实际情况进行调整,在全面获取评估所需信息的同时,尽量缩短调查持续的时间。影响测量活动持续时间选择的因素包括:

- 客户类型(例如住宅、商业、工业);
- 监测原因(见上述内容);
- 负荷变化,以及根据经验预计负荷变化的时间段。

在安装长期电能质量监测系统之前,通常先做一个商业企划。典型的商业企划宜包括有形的和无形的效益。直接有形效益包括:

- 在完全失效之前通过特征分析判断故障设备(例如,抽头转换开关、电容器组及其开关、变压器);
- 缩短系统恢复时间(例如故障探测);

- 合同履行；
- 新设备的接入要求。

无形效益包括：

- 确认问题来源，帮助改善可靠性指标；
- 获取客户反馈，帮助改善与客户的关系。

还可使用其他非电能质量测量专用设备采集的信息，来提高系统中电能质量测量的经济性。通过这种方式共享资源，测量成本可由自动重合闸、电容器开关控制等设备的主要成本所分担。

B.3 调查地点与类型

B.3.1 监测地点

电能质量监测器的安装地点选择取决于调查的目标。如果监测目标是诊断设备性能问题，则安装地点宜尽可能接近负载。适用于灵敏电子负荷如计算机及调速驱动等带来的性能问题，以及配电设备如断路器和电容器带来的性能问题。在监测到电压波动后，为确定扰动源，可将监测器沿线路移向源端。

在不违反技术、规章或法规的情况下，也可根据经济性和便捷性来选择监测点。例如，监测低压点比监测高压点的成本低。在变电站测量通常比在杆上的馈线测量花费要少。

为使监测符合服务合同的要求，监测地点宜事先得到合同各方的同意。通常这个点被定义为客户和系统之间的公共连接点(PCC)。PCC点定义为公用电网和特定负荷之间电气距离最近的点，而且该点也接入或可接入其他负荷。

B.3.2 监测前的地点调查

在进行测量活动之前，宜收集系统环境的信息，有助于设备的放置、运行和分析。所有调查包括如下内容：

- 电气系统数据(系统主接线图、变压器规格、变压器连接、短路容量、电容器组大小及位置、分线路数据、负荷参数、接地等)；
- 电气系统结构随时间的变化情况(如：功率因数补偿电容器的状态、负荷、运行/退出的变压器等)；
- 已知的骚扰负载、额定和运行工况。

B.3.3 客户端地点调查

对于客户端设施的调查，除了上述信息外，还需要收集任何与遇到问题有关的信息。例如，敏感设备的本质与特性，任何与性能下降同时发生事件的时间标识。宜检查此类事件，确认此事件在设备内部与在电网上的动作是否一致。

B.3.4 电网侧调查

供电网调查需要收集以下的电网特定信息。

- 电网保护设备及设置：
 - 设置值是否在调查过程中由于各种原因被改动，例如，改动会影响对电压暂降的统计；
 - 可根据调查结果评估对备选的保护装置。
- 可能影响测量的脉动控制(或其他相关的通过电力线载波的遥控)的存在及特性。
- 负荷特性(例如工业、商业、住宅或其组合)。
- 关于电压/无功控制规则的电网运行协议。

B.4 连接及待测量

B.4.1 设备连接选项

需要做出多项与测量设备连接有关的决定,包括:

- 单相或三相测量;
- 线-线连接或线-中性点连接或线-接地连接;
- 变压器附近的高压侧测量或低压侧测量。

这些决定很大程度上受调查原因的制约。有时不论进行何种调查,连接受某特定标准的制约。无论如何,连接宜和需求一致,或与受影响设备的连接一致,并考虑变压器的连接问题。

一般原则是,在测量稳态现象如谐波和闪烁时,常用单相测量而不是三相测量。这可能是由于这些现象通常是三相平衡的。这一点可通过进行一次临时三相测量进行检验。如果监测的主要原因是为了发现电压暂降和暂升,则有必要监测为受影响设备供电的所有各相。

如果使用三相连接进行一般测量,和/或监测点以下有多级电压变换,则推荐在接地系统中对设备线-中性点进行测量,因为线-线测量值既可通过仪器获得,也可离线导出。

否则,在选择监测仪器连接方式时,宜考虑可能受影响设备的连接方式及下游各级电压变换方式。

B.4.2 待测量的优先次序

待测量通常由监测目标、相关适用标准及其他因素确定。对于一般的调查,为节省存储空间,有必要确定监测量的优先顺序。例如:

- a) 电能参数(V 、 I 、 P 、 Q 、 S 、 DPF 、 TPF 等,这些通常不被视为电能质量参数);
- b) 电压暂降/暂升;
- c) 谐波电压;
- d) 谐波电流;
- e) 三相不平衡;
- f) 瞬态(例如,电容器投切—低频);
- g) 闪烁;
- h) 间谐波电压和电流;
- i) 电网载波信号。

注: DPF 为相移功率因数,表示为基波电压、电流之间相角的余弦值。 TPF 是真实功率因数,用有功与视在功率之比表示。

该顺序是一个示例;实际使用的优先顺序由总目标和某次具体测量的目标确定。

一旦确定了优先顺序并基于此选择了仪器,宜尽可能利用该仪器能提供的信息。一般在测量后容易丢弃一些数据,而不是分析数据得到某个以后可能需要的量,而该量在当时无法直接测量。通常,是否丢弃数据取决于仪器的存储容量及通信时间/成本。

B.4.3 电流监测

一般而言,客户为设备从系统汲取的或者注入系统的电流负责,而供电方负责供电电压。这一点可作为确定何时测量电流的依据。

测量电流对发射评估很重要,关键是要准确确定相角。这在测量谐波电流时变得愈加困难。

在确定电能质量事件的源头或起因时,测量电流极为重要,因为测量值有助于确定事件的起因是在测量仪器所在的上游端还是下游端。在确定电压暂降起因时尤其如此。

B.5 选择监测阈值及监测周期

B.5.1 监测阈值

监测阈值由电能质量指标与测量结果进行比较确定或由负载要求确定。而且,同样宜考虑电能质量调查的目的。

宜考虑用于捕获骚扰所需的阈值和用于事件描述、统计及分析的阈值之间的不同之处。

一般宜设置一个宜严格但合理实用的阈值(同时避免连续触发阈值)。宽松的阈值可有效实现数据捕获,但是由于宽松阈值而丢失的数据不会被再次捕获。

在电网的无调节部分测量时,宜采用滑模参考阈值。例如,如果带有负载抽头变换器或电压调节电容器组的配电馈线,则其监测器可采用固定阈值。输电系统或电网中其他不能直接根据电压进行调节的部分则宜采用滑模参考阈值的方法。

注:阈值用于检测事件,例如暂降、暂升、RVC等。而为了对准稳态参数(如谐波、不平衡和闪烁)进行统计分析,则需要无阈值的连续记录。

B.5.2 监测周期

监测周期将由电能质量调查的目的确定。例如,如果调查结果用于和电能质量指标做比较,则这些指标的监测周期会有相应的指导说明。

通常比较不同时间的电能质量测量值比较有用,例如,用某一年的测量值和前一年的测量值进行比较。如果这类比较有用,则监测周期可比较固定。

有些标准中会规定最短的测量周期。总之,事件测量(如电压暂降和暂升)通常需要较长的测量周期,因为只有捕获足够多的事件才能提供有意义的统计值(月)。很少出现的事件如电压中断可能需要更长的测量周期;相比之下,谐波测量及其他稳态测量,仅需相对较短的时间周期就可获得足够有用的信息(但至少需要一周)。

对于符合性监测,监测周期在相关的标准中已有规定。出于实际原因进行调整的话,可能需要对调整标准要求说明——例如“需要对与 EN 50160 标准要求的兼容性进行每年一次测量吗?是否需要连续测量?”

B.6 测量数据的统计分析

B.6.1 总则

对所测数据宜选择适当的统计分析方法。根据电能质量参数及测量目的的不同,选择的统计方法也可能不同。不过统计方法可粗略分为以下两类:

- 统计超过某些阈值的事件产生次数的方法;
- 将大量准稳态测量值归入单个数或几个数的方法。

对于后一种方法,可能选择各种不同的数据作为最有用的汇总值:最大值、99%值、95%值、平均值、最小值等。参考各种数据表明,选择95%概率值较为有用。

可对来自多个站点的数据进行统计分析,以评估网络性能。

B.6.2 指标

测量之前,有必要了解用于和测量结果做比较的指标。该信息将有助于确定测量持续时间、触发阈值以及对结果的统计分析。如果没有公认的标准可用,则需要专门为每次测量规定一组指标。

世界上已有各种专业组织对电能质量指标方面的问题进行了大量的研究,其中一些比较知名的指标已经列于参考文献中。

B.7 故障排除应用

B.7.1 总则

排除与电能质量相关的故障通常是为解决运行中出现的事故或问题。因此,通常希望能尽快产生结果,而不是给出数据值或合同值。不过尽管需要快速诊断,但也不宜因此而得到不成熟或没有根据的结论。

通常,原始未聚合的样本对故障排除最有用,因为该类样本可进行所需任何类型的后续处理,例如,特征值、小波变换等。不过,应尽量减少排除故障所需存储及审核的数据量,仪器记录和保存某一事件(如:电压暂降、瞬态电压)发生之前、之中及之后的数据是有用的。

B.7.2 电能质量特征

用图形表示电能质量事件特征,通常还带有简明的数字特征值表格。

最常见的形式是电压、电流波形的时域图。其他形式如谐波的直方图、聚合概率分布等可能也有用。特征图形时间刻度范围在 $100\ \mu\text{s}$ ~30 d。根据事件特性值及持续时间,由仪器确定能够表征电能质量事件的最佳时间刻度。

通常认为,表示电能质量事件(预触发系统)发生之前、之中及之后的信号是有用的特征信号。典型地说,图形的四分之一用于表示事件发生前的信号。

这些电能质量特征有助于包括客户装置在内的整个电网的故障排除。通常,这些特征用于识别并定位电能质量事件的源头及选择适当的解决方法。

专业人员可能利用特征,如电压暂降的特征,来确定起因是位于监测点下游的大型电机启动,并选择适当的解决方法。尽管该例子涉及的是电压暂降,但实际上大量的参考文献中提供了数百种不同电能质量事件的典型特征:功率因数补偿电容器的投切、雷击、系统和客户设备故障、连线松动、触点电弧、无线电传输干扰,与电机共电路的电子负载等。

尽管许多专家仅通过电压特征就可识别常见的电能质量事件,但同时利用电流特征将极大提高电能质量事件报告的范围及精度。而且,电流特征还可辅助判断干扰源的方向。

附 录 C

(资料性)

2 kHz~150 kHz 范围内的传导发射

C.1 总则

本附录的目的是针对电能质量领域的应用场景,提供 2 kHz~150 kHz 范围内电压传导发射的测量方法概览。尽管这些发射可能具有幅度调制特征,但仍假定它们为准稳态水平。需要强调的是,本附录的宗旨是描述概括性的测量方法,而不是精确的测量方法。

有关此频率范围内发射和敏感度的背景信息,请参见 IEC 61000-4-19:2014 的附录 A。

在此频率范围内对测量方法的认识仍在不断发展,因此本附录仅提供一般指导。

对于需要进行高精度详细测量的应用,例如发射测试或符合性测试的型式试验,宜参考 GB/T 17626.7—2017 和/或 CISPR 16 中的测量方法。

注 1: 有关在 2 kHz~150 kHz 范围内进行测量的有用信息,参见 GB/T 17626.7—2017 附录 B(2 kHz~9 kHz)和 CISPR 16(9 kHz~150 kHz)。

注 2: 针对 2 kHz~150 kHz 发射的抗扰度测试方法,参见 IEC 61000-4-19。

注 3: GB/T 17626.7—2017 中 2 kHz~9 kHz 的测量方法为资料性附录,并非规范性附录。CISPR 16 中上述频率范围的测量方法侧重于被测设备(EUT)的发射,并未直接解决电能质量调查和测量问题。在 CISPR 16 中,现场测量被视为针对 EUT 进行的。

注 4: 在电能质量领域,对此频率范围的认识相对较新,因此标准之间可能会有差异。例如,GB/T 17626.7—2017 考虑的是相线对中性点电压,而 CISPR 16 考虑的是相线对地电压(本附录没有为测量通道选择物理连接方法)。再如,CISPR 16 的测量方法不必准确记录 IEC 61000-4-19 中某些抗扰度测试波形的特征,原因是这些测试波形的快速调制。标准之间可能还存在其他差异。

注 5: 有关 2 kHz~9 kHz 频带内发射幅值的信息参见 GB/T 18039.4—2017 C.3,例如,在 $U_{\text{lin}} = 230 \text{ V}$ 的系统中,发射值在 0.46 V~3.45 V 范围内的网络中“报告的问题很少”。对于相同的 2 kHz~9 kHz 频带,GB/T 18039.3—2017 中 B.2.3 建议的任何 200 Hz 带宽参考电平为 0.69 V。

本附录的内容有可能在本文件的后续版本中成为规范性条款。

此频率范围内的测量值可能会受到传感器的强烈影响。有关传感器影响的指南,参见 IEC TR 61869-103。

C.2 测量方法(2 kHz~9 kHz)

2 kHz~9 kHz 的测量方法,包括 A 类和 S 类的要求,仍在策划考虑中。测量方法可参考 GB/T 17626.7—2017 的附录 B(资料性)。

C.3 测量方法(9 kHz~150 kHz)

9 kHz~150 kHz 的测量方法,包括 A 类和 S 类的要求,仍在策划考虑中。

第一种方法是 CISPR 16-1-2 提供的方法。CISPR 16-1-2 中侧重于受试设备(EUT)的抗扰度和发射测量,可能不便于电能质量现场测量的优化。用于现场电能质量调查和测量时,因 CISPR 16 测量方法的无间隙和精度要求,CISPR 16 测量方法过于复杂、昂贵。CISPR 16 的测量方法可能会在现场电能质量中产生海量数据,然而,这些数据可用于协调各种 IEC 标准定义的水平。

第二种方法是对 GB/T 17626.7—2017 附录 B 中的测量方法进行扩展,将现有的 9 kHz 的频率上限提高至 150 kHz。

第三种方法见如下备注。该方法虽然不如 CISPR 16-1-2 完整和准确,但更适合现场电能质量应

用,实现成本更低,并且可避免产生海量数据。但是第三种方法无法提供足够的协调各种 IEC 标准定义的水平。并且,由于测量之间存在间隔,它不适合测量变动周期小于两倍测量间隔的幅度调制信号。同样,如果为该测量方法选择 2 kHz 的区段宽度,则难以区分同一频率段内的现象。

在本文件未来版本的开发过程中,可能会考虑其他方法。

注:对于频率在 9 kHz~150 kHz 范围考虑的第三种方法如下:

9 kHz~150 kHz 的频率范围一般划分为等宽的区段。区段宽度通常是 200 Hz 的整数倍,宜取 200 Hz 或 2 kHz。根据测量目标频率选择区段宽度,例如,如果选择 2 kHz 的区段宽度,则一般用于处理 8 kHz~150 kHz 范围的传导发射。

每一个 10 周波间隔都通常记录 9 kHz~150 kHz 的频率范围内每个频段中的方均根电压幅值的最小值、平均值和最大值。或记录任意通道上的任何频段内的单个最大值。

以下示例设计展示了该测量方法、测量范围和测量不确定度:

- a) 通常通过级联的高通和低通滤波器在每个通道上进行 9 kHz~150 kHz 的测量。高通滤波器通常有 2 个极点,3 dB 截止频率为 1.5 kHz 或更高。低通滤波器通常有 4 个极点,3 dB 截止频率为 200 kHz。滤波之后的测量范围至少为瞬时 ± 50 V,分辨力为 12 位或更高。
- b) 通常在等间隔的时间间隔对级联滤波器的输出进行 9 kHz~150 kHz 的测量,以便每个 10 周波间隔进行 32 个等间隔的测量。跨通道同步不是必需的。每次测量通常采用 1 024 MHz 的采样速率进行 512 个采样。
- c) 对于 9 kHz~150 kHz,通常使用离散傅里叶变换或等效方法处理 512 个样本,从而产生以 2 kHz 频段宽度段分割的 256 个区间。最低的 4 个区间和最高的 181 个区间能舍弃,剩余 71 个区间的幅值包含了从 8 kHz~150 kHz 发射值,这些发射值通常表示为方均根值。
- d) 对于 9 kHz~150 kHz,在每一个 10 周波间隔,通常获得 32 组的 71 个区间。每一个 10 周波间隔,报告这 71 个区间的 32 个方均根值的最小、平均及最大值。另外,在每一个 10 周波间隔,报告所有通道上 71 个区间的方均根最大值。

C.4 测量范围和测量不确定度

A 类和 S 类的测量范围及测量不确定度,尚在考虑当中。

可考虑的测量范围至少是 IEC 61000-4-19:2014 表 1 中规定的最大抗扰度水平的 200%。可考虑的最大测量不确定度为 IEC 61000-4-19:2014 表 1 中规定的最小抗扰度的 10%。

对于 2 kHz~9 kHz 范围内的传导发射,更多信息见 GB/T 17626.7—2017。

C.5 聚合

A 类和 S 类的聚合方法,尚在考虑当中。

注 1: 通常在每个聚合区间内考虑最小值、最大值和平均值。方均根的平均值通常用于确定典型发射水平。方均根的最大值通常用于确定最坏的发射水平。最小值和最大值之间的差异通常用于检测是否存在幅度调制。单个方均根最大值通常用于设置最坏情况下的 95%限值。

注 2: 该测量方法可能会生成大量数据,根据应用可能需要对其进行存储、传输、分析和/或存档。根据应用,数据量可减少。为了减少数据量,通常考虑在测量点应用统计方法如 95%或 99%的电平,或仅存储极值和平均值,或仅在超过触发阈值时存储详细数据,或者采用其他方法。

注 3: 总体而言,2 kHz~150 kHz 范围内的测量通常用 4.5 所述方法聚合。

附 录 D
(资料性)
负偏离与正偏离

D.1 总则

负偏离与正偏离参数有助于避免数据中持续的欠电压被过电压所抵消。

D.2 测量方法

对每一个待测参数定义为常用两类(A类和S类)。

a) A类

宜由10周波的方均根值 $U_{\text{rms}(10)}$ 来估计负偏离和正偏离参数相对于 U_{din} 的百分比。负偏离 $U_{\text{rms-under}}$ 和正偏离 $U_{\text{rms-over}}$ 参数由公式(D.1)~公式(D.6)确定。

负偏离估计:

使用下面公式计算 $U_{\text{rms-under},i}$:

$$\text{如果 } U_{\text{rms}(10),i} > U_{\text{din}}, \text{ 则 } U_{\text{rms-under},i} = U_{\text{din}} \dots\dots\dots (D.1)$$

$$\text{如果 } U_{\text{rms}(10),i} \leq U_{\text{din}}, \text{ 则 } U_{\text{rms-under},i} = U_{\text{rms}(10),i} \dots\dots\dots (D.2)$$

正偏离估计:

使用下面公式计算 $U_{\text{rms-over},i}$:

$$\text{如果 } U_{\text{rms}(10),i} < U_{\text{din}}, \text{ 则 } U_{\text{rms-over},i} = U_{\text{din}} \dots\dots\dots (D.3)$$

$$\text{如果 } U_{\text{rms}(10),i} \geq U_{\text{din}}, \text{ 则 } U_{\text{rms-over},i} = U_{\text{rms}(10),i} \dots\dots\dots (D.4)$$

注: 在单相系统中,每个时间段评估得到一个负偏离值和一个正偏离值。在三相三线系统中,每个时间段评估3值。四线系统中,一般测6组或3组值。

b) S类

不作要求。

D.3 测量不确定度和测量范围

10周波的方均根值 $U_{\text{rms}(10)}$ 的测量不确定度宜符合5.2.2的要求。

D.4 聚合

对每一个待测参数定义为常用两类(A类和S类)。

a) A类

负偏离估计:

$$U_{\text{under}} = \frac{U_{\text{din}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_{\text{rms-under},i}^2}{n}}}{U_{\text{din}}} [\%] \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:

n ——聚合时间段内负偏离的10周波方均根值的个数;

$U_{\text{rms-under},i}$ ——第*i*个10周波负偏离的方均根值。

正偏离估计:

$$U_{\text{over}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_{\text{rms-over},i}^2}{n}} - U_{\text{din}}}{U_{\text{din}}} [\%] \quad \dots\dots\dots (D.6)$$

式中：

$U_{\text{rms-over},i}$ ——第 i 个 10 周波正偏离的方均根值。

注：由计算式(D.4)和式(D.5)得到的负偏离和正偏离参数值均为正数。

宜根据 4.4 和 4.5 进行聚合。

b) S 类

不作要求。



附 录 E
(资料性)
B 类测量方法

E.1 B 类的背景

本文件对 B 类测量方法的参考技术要求仅限于支持仍在运行的旧仪器。

在 20 世纪最后几年,首次起草 IEC 61000-4-30 的目标是提供一种测量方法,使两台兼容的仪器连接到相同的信号时可提供相同的结果。

当时,人们意识到,该标准可能会使存量的可用仪器过时,而这并不是建立标准所期望的结果。因此标准定义了两类测量方法:实现全部上述目标的 A 类和避免在用仪器过时的 B 类。后来,在 IEC 61000-4-30:2008 (第 2 版)中添加了用于调查的 S 类仪器,其测量结果统计上有用但测量结果不一定严格一致。

B 类仪器于本文件 2003 年首次发布时就存在。IEC 61000-4-30:2008 (第 2 版)明确指出不宜将 B 类方法用于新仪器设计。在当前版本中,B 类现已从本文件的规范部分移至本附录(资料性附录)。

由于 B 类仅用于支持仍在运行但已过时的旧仪器,因此,预计 B 类将从本文件的下一版中删除。

E.2 B 类——测量聚合时间间隔

制造商宜规定聚合时间间隔的数量和持续时间。

E.3 B 类——测量聚合算法

制造商宜规定聚合方法。

E.4 B 类——实时时钟(RTC)不确定度

E.4.1 总则

制造商宜规定 RTC 不确定度以及确定聚合时间间隔的方法(如果有的话)。

E.4.2 B 类——频率——测量方法

制造商宜规定频率测量的过程。

E.4.3 B 类——频率——测量不确定度

制造商宜规定在测量范围为 42.5 Hz~57.5 Hz 的频率时测量不确定度。

E.4.4 B 类——频率——测量评估

制造商宜规定频率测量评估的过程。

E.4.5 B 类——供电电压幅值——测量方法

测量值宜为制造商规定的时间段内测得的方均根电压值。

E.4.6 B 类——供电电压幅值——测量不确定度和测量范围

测量不确定度宜由制造商规定,并且在制造商规定的测量范围内不超过 U_{din} 的 $\pm 1\%$ 。

E.5 B类——闪烁**E.5.1 总则**

不适用。

E.5.2 B级——电源电压暂降和暂升——测量方法**E.5.2.1 总则**

制造商宜规定 U_{rms} 的测量方法。

E.5.2.2 B级——电源电压暂降和暂升——幅值不确定度

制造商宜规定不确定度,不确定度不超过 U_{din} 的 $\pm 2.0\%$ 。

E.5.2.3 B级——电源电压暂降和暂升——持续时间不确定性

制造商宜规定持续时间的测量不确定度。

E.6 B类——电压中断**E.6.1 总则**

5.5 均宜适用。

E.6.2 B类——供电电压不平衡——测量方法

制造商宜规定计算不平衡度的算法及方法。

E.6.3 B类——供电电压不平衡——不确定度

评估的任何不平衡度参数的不确定度宜小于 $\pm 0.3\%$,除不确定度之外,同 5.7.2 中 A 类。

E.6.4 B类——电压谐波——测量方法

制造商宜规定测量的方法。

E.6.5 B类——电压谐波——测量不确定度和测量范围

制造商宜规定测量不确定度和测量范围。

E.6.6 B类——电压间谐波——测量方法

制造商宜规定测量的方法。

E.6.7 B类——电压间谐波——测量不确定度和测量范围

制造商宜规定测量不确定度和测量范围。

E.6.8 B类——载波信号电压——测量方法

制造商宜规定测量的方法。

E.6.9 B类——载波信号电压——测量不确定度和测量范围

制造商宜规定测量不确定度和测量范围。

E.6.10 B类——电流——测量方法

无要求。若有,制造商宜规定测量的方法。

E.6.11 B类——电流——测量不确定度和测量范围

无要求。若有,制造商宜规定测量不确定度和测量范围。



参 考 文 献

- [1] GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容(IEC 60050-161:1990, IDT)
- [2] GB/T 17626.15—2011 电磁兼容 试验和测量技术 闪烁仪 功能和设计规范(IEC 61000-4-15:2003)
- [3] GB/T 18039.3—2017 电磁兼容 环境 公共低压供电系统低频传导干扰骚扰及信号传输的兼容水平(IEC 61000-2-2:2002, IDT)
- [4] GB/T 18216.12—2010 交流 1 000 V 和直流 1 500 V 以下低压配电系统电气安全 防护措施的试验、测量或监控设备 第 12 部分:性能测量和监控装置(PMD)(IEC 61557-12:2007, IDT)
- [5] IEC 60044-2 Instrument transformers—Part 2: Inductive voltage transformers
- [6] IEC 60050(all parts) International Electrotechnical Vocabulary (IEV)
- [7] IEC 60050-103:2009 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 103: Mathematics—Functions
- [8] IEC 60050-161:2002 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 161: Electromagnetic Compatibility
- [9] IEC 60050-300 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 300: Electrical and electronic measurements and measuring instruments
- [10] IEC 60050-311:2001 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 311: General terms relating to measurements
- [11] IEC 60050-312 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 312: General terms relating to electrical measurements
- [12] IEC 60050-313 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 313: Types of electrical measuring instruments
- [13] IEC 60050-314 International Electrotechnical Vocabulary (IEV)—Part 314: Specific terms according to the type of instruments
- [14] IEC 61000-2-2 Electromagnetic compatibility (EMC)—Environment—Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems
- [15] IEC 61000-2-4 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-4: Environment—Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances
- [16] IEC TR 61000-2-8 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-8: Environment—Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results
- [17] IEC 61000-2-12 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-12: Environment—Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems—Basic EMC publication
- [18] IEC 61000-3-3 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 3-3: Limits—Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection
- [19] IEC 61000-3-6 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 3-6: Limits—Assessment of

emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems

[20] IEC TR 61000-3-7 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 3-7: Limits—Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems

[21] IEC 61000-3-8 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 3: Limits—Section 8: Signalling on low-voltage electrical installations—Emission levels, frequency bands and electromagnetic disturbance levels

[22] IEC TR 61000-3-13 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 3-13: Limits—Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV HV and EHV power Systems

[23] IEC 61000-4-7 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-7: Testing and measurement techniques—General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto

[24] IEC 61000-4-15 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-15: Testing and measurement techniques—Flickermeter—Functional and design specifications

[25] IEC 61000-4-19:2014 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-19: Testing and measurement techniques—tests for immunity to conducted differential mode disturbances and signalling in the frequency range 2 kHz to 150 kHz at a.c. power ports

[26] IEC 61010 (all parts) Safety requirements for electrical equipment for measurement control and laboratory use

[27] IEC 61010-2-032 Safety requirements for electrical equipment for measurement control and laboratory use—Part 2-032: Particular requirements for hand-held current clamps for electrical measurement and test

[28] IEC 61819(all parts) Instrument transformers

[29] IEC 61869-1 Instrument transformers—Part 1: General requirements

[30] IEC 61869-2 Instrument transformers—Part 2: Additional requirements for current transformers

[31] IEC TR 61869-103 Instrument transformers—The use of instrument transformers for power quality measurement

[32] IEC 62586-1 Power quality measurement in power supply systems—Part 1: Power quality instruments (PQI)

[33] IEC 62586-2 Power quality measurement in power supply systems—Part 2: Functional tests and uncertainty requirements

[34] CISPR 16(all parts) Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods

Recommendation ITU-R TF.686-3 Glossary and definitions of time and frequency terms

[35] CISPR 16-1-1 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Measuring apparatus

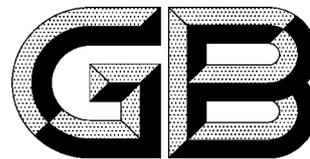
[36] CISPR 16-1-2 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus—Ancillary equipment—Conducted disturbances

[37] CISPR 16-2-1 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods—Part 2-1; Methods of measurement of disturbances and immunity—Conducted disturbance measurements

[38] EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems

[39] IEEE 1159 IEEE Recommended Practice on Monitoring Electrical Power Quality Recommendation ITU-R TF.686-3 Glossary and definitions of time and frequency terms





中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 17626.33—2023/IEC 61000-4-33:2005

电磁兼容 试验和测量技术 第 33 部分：高功率瞬态参数测量方法

Electromagnetic compatibility—Testing and measurement techniques—
Part 33: Measurement methods for high-power transient parameters

[IEC 61000-4-33:2005, Electromagnetic compatibility(EMC)—Part 4-33:
Testing and measurement techniques—Measurement methods for
high-power transient parameters, IDT]

2023-05-23 发布

2024-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
引言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 高功率瞬态响应的测量	3
4.1 总体测量概念和要求	3
4.2 测得响应的表述	5
4.3 测量仪器	5
4.4 测量程序	16
5 低频响应的测量	16
6 校准程序	16
6.1 整个测量通道的校准	16
6.2 测量通道单元的单独校准	18
6.3 近似校准技术	22
附录 A (规范性) 对测得响应特性的描述方法	25
附录 B (资料性) 测量传感器的特性	29
附录 C (规范性) HPEM 测量程序	40
附录 D (资料性) 测量链路单元的双端口表达法	42
参考文献	47
图 1 测量高功率瞬态响应的典型测量链路示例	4
图 2 平衡的传感器和电缆连接到不平衡(同轴)线的示例	8
图 3 几种简单巴伦的例子	9
图 4 测量链路中在线衰减器的典型电路	9
图 5 用于 50 Ω 系统的额定值为 20 dB 的衰减器典型衰减示例(作为频率的函数)	10
图 6 串联积分器的典型电路图	10
图 7 积分电路的传递函数	11
图 8 标准和半精制同轴电缆随频率变化的单位长度信号传输特性的示例	12
图 9 传感器电缆在不含电磁场的区域走线的示例	13
图 10 在有电磁场的区域对传感器电缆的处理	14
图 11 使电缆适应系统局部屏蔽的拓扑	15
图 12 电缆走线的正确和错误方法	15

图 13	用于传感器校准提供均匀场照射的双端 TEM 小室	17
图 14	单端 TEM 小室及其相连设备示意图	17
图 15	用于校准传感器的小尺寸测试设备尺寸图	18
图 16	测量链的电气示意图	19
图 17	一个简单电场传感器示意图	20
图 18	图 17 中所给的电场传感器的输入阻抗的实部和虚部的特性曲线	21
图 19	据天线分析程序计算得到的流入传感器终端的短路电流对不同入射角的幅频特性曲线	21
图 20	传感器等效高度的幅值对不同入射角度的变化曲线	22
图 21	衰减器的高频等效电路	24
图 A.1	用来定义瞬态响应波形 $R(t)$ 的脉冲部分的不同参数示意图	25
图 A.2	高功率瞬态电磁测量中出现的振荡波示意图	26
图 A.3	图 A.2 中波形的计算频谱幅值	28
图 B.1	一个简单的电场传感器的示意图及其诺顿等效电路	29
图 B.2	场传感器的归一化频率函数的幅频相频特性	30
图 B.3	一个简单的磁场传感器的示意图及其戴维南等效电路	31
图 B.4	放置在地面上测量垂直电场或表面电荷密度的电场传感器示意图	33
图 B.5	用于测量磁场切向分量或表面电流密度半环磁感应强度传感器示意图	33
图 B.6	测量线电流的简化示意图	35
图 B.7	电流传感器的详细构造	35
图 B.8	标称 $1\ \Omega$ 电流传感器的阻抗幅值特性曲线	36
图 B.9	嵌入式微分电流传感器的几何尺寸	37
图 B.10	同轴电缆电流传感器设计概念	37
图 B.11	CIP-10 同轴电缆电流传感器的形状和尺寸	38
图 B.12	微分同轴电缆电流传感器的结构示意图	38
图 D.1	通用双端口网络的电压电流关系	42
图 D.2	链参数的电压电流定义	43
图 D.3	两个双端口网络的级联	43
图 D.4	用链参数矩阵表示的简单测量链路	44
图 D.5	测量链路的简单等效电路	44
图 D.6	由链参数建模的简单双端口网络	44
表 A.1	波形 P 范数的例子	26
表 A.2	用于高功率瞬态波形的时域波形范数	26
表 D.1	简单电路的链参数	45

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T(Z)17626《电磁兼容 试验和测量技术》的第 33 部分。GB/T(Z) 17626 已经发布了以下部分：

- GB/T 17626.1—2006 电磁兼容 试验和测量技术 抗扰度试验总论；
- GB/T 17626.2—2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验；
- GB/T 17626.3—2016 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验；
- GB/T 17626.4—2018 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验；
- GB/T 17626.5—2019 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验；
- GB/T 17626.6—2017 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度；
- GB/T 17626.7—2017 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则；
- GB/T 17626.8—2006 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验；
- GB/T 17626.9—2011 电磁兼容 试验和测量技术 脉冲磁场抗扰度试验；
- GB/T 17626.10—2017 电磁兼容 试验和测量技术 阻尼振荡磁场抗扰度试验；
- GB/T 17626.11—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第 11 部分：对每相输入电流小于或等于 16 A 设备的电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验；
- GB/T 17626.12—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第 12 部分：振铃波抗扰度试验；
- GB/T 17626.13—2006 电磁兼容 试验和测量技术 交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的低频抗扰度试验；
- GB/T 17626.14—2005 电磁兼容 试验和测量技术 电压波动抗扰度试验；
- GB/T 17626.15—2011 电磁兼容 试验和测量技术 闪烁仪 功能和设计规范；
- GB/T 17626.16—2007 电磁兼容 试验和测量技术 0 Hz~150 kHz 共模传导骚扰抗扰度试验；
- GB/T 17626.17—2005 电磁兼容 试验和测量技术 直流电源输入端口纹波抗扰度试验；
- GB/T 17626.18—2016 电磁兼容 试验和测量技术 阻尼振荡波抗扰度试验；
- GB/T 17626.19—2022 电磁兼容 试验和测量技术 第 19 部分：交流电源端口 2 kHz~150 kHz 差模传导骚扰和通信信号抗扰度试验
- GB/T 17626.20—2014 电磁兼容 试验和测量技术 横电磁波(TEM)波导中的发射和抗扰度试验；
- GB/T 17626.21—2014 电磁兼容 试验和测量技术 混波室试验方法；
- GB/T 17626.22—2017 电磁兼容 试验和测量技术 全电波暗室中的辐射发射和抗扰度测量；
- GB/T 17626.24—2012 电磁兼容 试验和测量技术 HEMP 传导骚扰保护装置的试验方法；
- GB/T 17626.27—2006 电磁兼容 试验和测量技术 三相电压不平衡抗扰度试验；
- GB/T 17626.28—2006 电磁兼容 试验和测量技术 工频频率变化抗扰度试验；
- GB/T 17626.29—2006 电磁兼容 试验和测量技术 直流电源输入端口电压暂降、短时中

断和电压变化的抗扰度试验；

- GB/T 17626.30—2012 电磁兼容 试验和测量技术 电能质量测量方法；
- GB/T 17626.31—2021 电磁兼容 试验和测量技术 第 31 部分：交流电源端口宽带传导骚扰抗扰度试验；
- GB/Z 17626.33—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第 33 部分：高功率瞬态参数测量方法
- GB/T 17626.34—2012 电磁兼容 试验和测量技术 主电源每相电流大于 16 A 的设备的电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验。

本文件等同采用 IEC 61000-4-33:2005《电磁兼容(EMC) 第 4-33 部分：试验和测量技术 高功率瞬态参数测量方法》。文件类型由 IEC 的标准调整为我国的国家标准化指导性技术文件。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动：

- 为了与该标准体系名称保持一致，标准名称改为《电磁兼容 试验和测量技术 第 33 部分：高功率瞬态参数测量方法》。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国电磁兼容标准化技术委员会(SAC/TC 246)提出并归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、国网江苏省电力有限公司、国家电网有限公司特高压建设分公司、深圳供电局有限公司、华北电力大学。

本文件主要起草人：张建功、干喆渊、谢辉春、赵军、李妮、赵志斌、刘皓、郑树海、余鹏、周兵、贺伟、吴永康、杨波、缪金。

引 言

电磁兼容性是电气和电子设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。电磁兼容问题是影响环境及产品质量的重要因素之一,其标准化工作已引起国内外的普遍关注。在这方面,国际电工委员会(IEC)制定的 IEC 61000 系列出版物是制造业、信息产业、电工电气工程及能源、交通运输业、社会事业及健康、消费品质量安全等领域中的通用标准,分为综述、环境、限值、试验和测量技术、安装和减缓导则、通用标准 6 大类。我国已经针对该系列出版物开展了国内转化工作,并建立了相应的国家标准体系。

在该标准体系中,GB/T(Z) 17626《电磁兼容 试验和测量技术》是关于电磁兼容领域试验和测量技术方面的基础性标准,旨在描述传导骚扰、辐射骚扰等电磁兼容现象的抗扰度试验等内容,拟由 39 个部分构成。

- 第 1 部分:抗扰度试验总论。目的在于提供电磁兼容标准中有关试验和测量技术的使用性指导,并对选择相关的试验提供通用的建议。
- 第 2 部分:静电放电抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备遭受静电放电时的性能。
- 第 3 部分:射频电磁场辐射抗扰度试验。目的在于建立电气、电子设备受到射频电磁场辐射时的抗扰度评定依据。
- 第 4 部分:电快速瞬变脉冲群抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备的供电电源端口、信号、控制和接地端口在受到电快速瞬变脉冲群干扰时的抗扰度性能。
- 第 5 部分:浪涌(冲击)抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在受到浪涌(冲击)时的抗扰度性能。
- 第 6 部分:射频场感应的传导骚扰抗扰度。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在收到由射频场感应的传导骚扰时的抗扰度性能。
- 第 7 部分:供电系统及所连设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则。目的在于规定可用于根据某些标准给出的发射限值对设备逐项进行试验,对实际供电系统中谐波电流和电压的测量的仪器。
- 第 8 部分:工频磁场抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估家用、商业和工业用电气和电子设备处于工频(连续和短时)磁场中的抗扰度性能。
- 第 9 部分:脉冲磁场抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估居住、商业和工业用电气和电子设备处于脉冲磁场中的抗扰度性能。
- 第 10 部分:阻尼振荡磁场抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估中、高压变电站中电气和电子设备处于阻尼振荡磁场中的抗扰度性能。
- 第 11 部分:对每相输入电流小于或等于 16 A 设备的电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在经受电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度性能。
- 第 12 部分:振铃波抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估在实验室中居住、商业和工业用电气和电子设备的抗扰度性能,同样也适用于发电站和变电站的设备。
- 第 13 部分:交流电端口谐波、谐间波及电网信号的低频抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备对谐波、间谐波和电网信号频率的低频抗扰度性能。

- 第 14 部分:电压波动抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在受到正和负的低幅值电压波动时的抗扰度性能。
- 第 15 部分:闪烁仪 功能和设计规范。目的在于为所有实际的电压波动波形显示正确的闪烁感知电平。
- 第 16 部分:0 Hz~150 kHz 共模传导骚扰抗扰度试验。目的在于建立电气和电子设备经受共模传导骚扰测试的通用和可重复性准则。
- 第 17 部分:直流电源输入端口纹波抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,用以在实验室条件下对电气和电子设备进行来自于如整流系统和/或蓄电池充电时叠加在直流电源上的纹波电压的抗扰度试验。
- 第 18 部分:阻尼振荡波抗扰度试验。目的在于建立通用的和可重现的基准,以评估电气和电子设备在受到阻尼振荡波时的抗扰度性能。
- 第 19 部分:交流电源端口 2 kHz~150 kHz 差模传导骚扰和通信信号抗扰度试验。目的在于确认电气和电子设备在公用电网下工作时能承受来自诸如电力电子和电力线通信系统(PLC)等的差模传导骚扰。
- 第 20 部分:横电磁波(TEM)波导中的发射和抗扰度试验。目的在于给出 TEM 波导的性能、用于电磁兼容试验的 TEM 波导的确认方法、在 TEM 波导中进行辐射发射和抗扰度试验的试验布置、步骤和要求。
- 第 21 部分:混波室试验方法。目的在于建立使用混波室评估电气和电子设备在射频电磁场中的性能和确定电气电子设备的辐射发射等级的通用规范。
- 第 22 部分:全电波暗室中的辐射发射和抗扰度测量。目的在于规定在同一个全电波暗室内进行辐射发射和辐射抗扰度的通用确认程序、受试设备的试验布置要求和全电波暗室测量方法。
- 第 23 部分:HEMP 和其他辐射骚扰防护装置的试验方法。目的在于通过描述 HEMP 试验的基本原理,以及防护元件试验的理论基础(试验概念)、试验配置、所需设备、试验程序、数据处理等重要概念。
- 第 24 部分:HEMP 传导骚扰保护装置的试验方法。目的在于规定 HEMP 传导骚扰保护装置的试验方法,包括电压击穿和电压限制特性的试验,以及电压和电流快速变化时的残余电压的测量方法。
- 第 25 部分:设备和系统 HEMP 抗扰度试验方法。目的在于建立通用的和可重现的基准,用于评估遭受 HEMP 辐射环境及其在电源、天线、I/O 信号线和控制线上产生的传导瞬态骚扰时的电气和电子设备性能。
- 第 27 部分:三相电压不平衡抗扰度试验。目的在于为电气和电子设备在受到不平衡的供电电压时的抗扰度评价建立参考。
- 第 28 部分:工频频率变化抗扰度试验。目的在于为电气和电子设备在受到工频频率变化时的抗扰度评价提供依据。
- 第 29 部分:直流电源输入端口电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验。目的在于建立评价直流电气、电子设备在经受电压暂降、短时中断和电压变化时的抗扰度的通用准则。
- 第 30 部分:电能质量测量方法。目的在于规定 50 Hz 交流供电系统中电能质量参数测量方法及测量结果的解释。
- 第 31 部分:交流电源端口宽带传导骚扰抗扰度试验。目的在于建立通用的基准,以评估电气和电子设备交流电源端口在遭受有意和/或无意宽带信号源产生的传导骚扰时的抗扰度。
- 第 32 部分:高空核电磁脉冲(HEMP)模拟器概述。目的在于提供国际上现有的系统级 HEMP 模拟器以及它们作为抗扰度试验与验证设备时所需要的相关信息。
- 第 33 部分:高功率瞬态参数测量方法。目的在于给出高功率电磁瞬态响应波形的测量方法和

特征参数的信息。

- 第 34 部分:主电源每相电流大于 16 A 的设备的电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验。目的在于建立评价电气和电子设备在经受电压暂降、短时中断和电压变化时的抗扰度的通用准则。
- 第 35 部分:高功率电磁(HPEM)模拟器概述。目的在于提供国际上现有的系统级 HPEM 窄带(窄谱)和宽带(宽谱、亚超宽谱和超宽谱)模拟器以及它们作为抗扰度试验与验证设备时所需要的相关信息。
- 第 36 部分:设备和系统的有意电磁干扰抗扰度试验。目的在于为评估设备和系统对有意电磁干扰源的抗扰度提供了确定试验水平的方法。
- 第 37 部分:谐波发射试验系统校准与验证协议。目的在于为制造商、终端用户、独立实验室、其他组织机构提供系统化指导,以规定一定谐波电流发射范围内适用的合规状态。
- 第 38 部分:电压波动和闪烁合规测试系统的测试、验证和校准协议。目的在于为由型式试验设备组成的系统提供定期校准和验证的指南和方法。
- 第 39 部分:近场辐射抗扰度试验。目的在于建立通用的基准,以评估暴露于近距离源的辐射射频电磁场中的电气电子设备的抗扰度要求。
- 第 40 部分:调制或失真信号功率的数字测量方法。目的在于介绍两种适用于波动或非周期负载下功率量测量的数字算法,并说明所提出的算法的工作原理。

电磁兼容 试验和测量技术

第 33 部分：高功率瞬态参数测量方法

1 范围

本文件描述了高功率电磁瞬态响应参数测量的基本方法和主要设备。主要的响应参数包括以下内容：

- 电场(E)和磁场(H) (例如：待测试系统的入射场或入射场与散射场的叠加场)；
- 电流 I (例如：瞬态场感应的或待测系统内的)；
- 电压 U (例如：瞬态场感应的或待测系统内的)；
- 在电缆或其他导体上的感应电荷 Q 。

注：导体上的电荷 Q 是在任意频率下具有确定意义的一个基本量。然而，电压 U 是一个仅在低频情况下具有确定意义的(从属的)量。在高频情况下，电压不能由电场的线积分确定，因为这一积分依赖于路径。这样，对于上升沿很快的脉冲(具有大量的高频分量)，采用电压作为测量量是不合适的，在这种情况下，需测量电荷量。

这些被测量通常是一些可以用标量参数或“可测参数”来近似描述的复杂时变波形，这些参数包括：

- 响应的峰值；
- 波形的上升时间；
- 波形的下降时间(或持续时间)；
- 脉冲宽度；
- 数学意义上由波形得到的范数。

本文件提供了这些波形的测量方法和特征参数的信息，但没有提供有关测量具体等级要求的信息。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

IEC 60050-161 国际电工术语(IEV) 第 161 部分：电磁兼容[International Electrotechnical Vocabulary(IEV)—Chapter 161: Electromagnetic compatibility]

注：GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容(IEC 60050-161:1990, IDT)

IEC 61000-2-9 电磁兼容 第 2 部分：环境 第 9 分部分：HEMP 环境描述 辐射骚扰[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2: Environment—Section 9: Description of HEMP environment—Radiated disturbance]

注：GB/T 18039.10—2018 电磁兼容 环境 HEMP 环境描述 辐射骚扰(IEC 61000-2-9:1996, IDT)

IEC 61000-2-10 电磁兼容 第 2-10 部分：环境 HEMP 环境的描述 传导骚扰[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-10: Environment—Description of HEMP environment—Conducted disturbance]

注：GB/T 18039.8—2012 电磁兼容 环境 高空核电磁脉冲(HEMP)环境描述 传导骚扰(IEC 61000-2-10:1998, IDT)

IEC 61000-4-20 电流兼容 第 4-20 部分:试验和测量技术 横电磁波(TEM)波导中的发射和抗扰度试验[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-20: Testing and measurement techniques—Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides]

注：GB/T 17626.20—2014 电磁兼容 试验和测量技术 横电磁波(TEM)波导中的发射和抗扰度试验(IEC 61000-4-20:2010, IDT)

IEC 61000-4-23:2016 电磁兼容 第 4-23 部分:试验和测量技术 HPEM 及其他辐射骚扰保护装置的试验方法[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-23: Testing and measurement techniques—Test methods for protective devices for HPEM and other radiated disturbance]

3 术语和定义

IEC 60050-161 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电小尺寸 electrically small

相对于电磁波波长而言,远小于一个波长的物体尺寸。

3.2

等效面积 equivalent area

反映传感器的开路电压与和传感器交链的磁通密度的时间变化率关系的磁通传感器(环)的本征参数。

3.3

等效高度 equivalent height

反映传感器输出端间的测量电压与激励传感器的电场分量之间关系的电场(偶极子)传感器的本征参数。

3.4

自由场传感器 free-field sensor

在远离散射体和地面位置使用的电磁场传感器。

3.5

高功率电磁 high power electromagnetic; HPEM

涉及产生具有破坏或扰乱电子系统能力的强电磁辐射场或高的感应电压和大的感应电流的技术或领域,这些骚扰通常超出了正常条件下的水平(例如 100 V/m)。

3.6

测量链路 measurement chain

为了测量和记录电磁信号,连接在一起的两个或多个电子装置。

3.7

奈奎斯特频率 Nyquist frequency

被采样信号的带宽,等于该信号采样频率的一半。如果采样信号表示一个从 0 Hz 开始的连续谱信号(通常语音录音就是这样的情况),那么奈奎斯特频率就是能够清晰重现被采样信号的最高频率。

3.8

波前脉冲 pre-pulse

发生在主脉冲峰值时刻之前的脉冲形瞬态波的一部分。

3.9

传感器 sensor

接收特定的电磁量(例如电场、磁场、电流或电荷等)并转换成可测量的电压或电流信号的变送器。它是典型电磁测量链路的第一部分。

3.10

波形范数 waveform norm

对波形或信号由某些特定的数学运算定义的参数(例如对波形积分),从而产生一个标量,用来对不同波形或其效应进行比较。

3.11

波形参数 waveform parameter(s)

表示波形特性(例如波形的上升时间)的单个参数,通常很难融入波形的范数形式中,但在描述响应时很有用。

3.12

点(后缀) -dot

后缀,例如 I-dot,表示量(I)的时间导数,意味着测量值与响应(I)的上升时间的变化率成比例。

4 高功率瞬态响应的测量

本文件涉及由高空核爆炸(所谓的高空电磁脉冲-HEMP)或由瞬态源(脉冲发生器)等产生的高功率电磁(HPEM)场引起的高功率瞬态信号的测量和描述。被测量的典型物理量包括(靠近)设备或试验物体内部的电场强度(E)、磁场强度(H)或接入设备或试验物体的导线上的传导电流和电荷(或电压)。

本章描述了用于这些瞬态响应的各种测量技术,在附录 A 提出应用于表征所测响应特性的几种波形参数和规范。虽然许多的测量方法和设备也可用于测量时谐(即频域)信号,然而,本文件中并不深入考虑它们的应用,本文件应仅涉及瞬态信号的测量。

4.1 总体测量概念和要求

瞬态响应量值的测量是由许多瞬态信号处理单元按照一定的顺序链接起来实现的。这些称之为“测量链路”的仪器组合可以用来检测、处理、传输和记录瞬态响应。在测量完成以后,这些瞬态响应可用于分析某一被测量或受试系统的电气特性。

图 1 给出了用于测量高功率瞬态响应的两种典型测量链路,图 1a)所示的测量链路应包括以下单元:

- 同轴电缆:该单元为测量链路中不同单元之间提供电气连接,具有固定阻抗(通常为 $50\ \Omega$),该单元可用后面将要讨论的光纤传输系统替代。
- 传感器:将待测量(如电磁场、电流、电荷等)转换成可测量的电压的设备。
- 巴伦:作为匹配变换单元以确保传感器与同轴电缆信号线良好匹配的器件,该器件也有助于抑制共模信号。
- 衰减器:在线安装的减小信号的设备,用于减小过强传感器信号。
- 积分器:一个有源或是无源装置,用于对传感器的输出在时域进行积分。因为在有些情况下,传感器响应的是待测量的时间变化率(即微分)。(信号积分器也可用软件实现。)
- 光发射机:把测得的快速瞬态电信号转换成调制的光信号的设备,该光信号可从传感器附近传送到远方的记录设备。
- 光缆:可在待测系统内部或是周围铺设的无导线的纤维缆,将光信号传送到远方的光接收机。
- 光接收机:接收来自光发射机的调制光信号,解调并恢复包含在其中的来自传感器的信号的设备。

——波形记录仪:测量链路中的探测器,它接收传感器输出的模拟电信号,将其转换成数字流再传递给记录设备。

——数据采集和控制计算机:主要的逻辑处理器,控制测量以及存储和分析结果。

本章稍后给出测量链路中每个单元的其他信息。

并不是图 1a)测量链路中的所有单元都应用到。比如,衰减器只在当信号过强,可能超出光发射机的输入范围并引起信号畸变时才应用到。另外,有的传感器可能本身自带了积分器,因此测量链路中积分器应省略了。

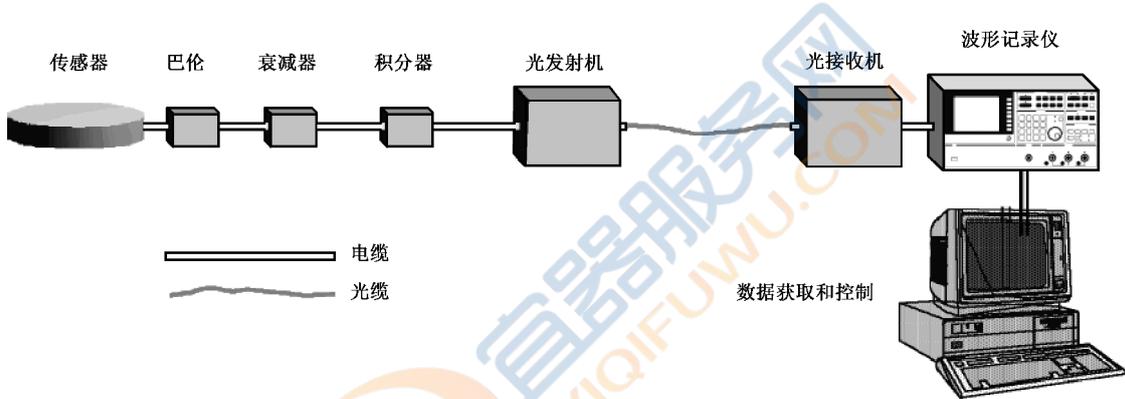
图 1b)给出了一个整个测量链路全部由同轴电缆连接起来的例子。此处没有采用光纤系统可能是因为待测信号具有一些特殊性:

——待测信号的动态范围超出了光纤发射/接收机的量程;

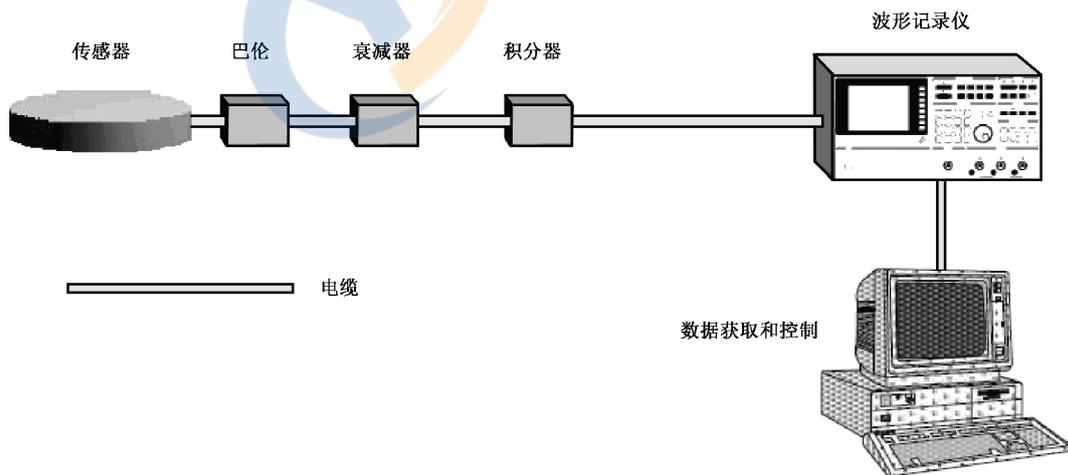
——测得的脉冲超出了光纤系统的传输能力;

——亦或由于光纤系统的成本非常高。

无论如何配置测量链路,在测量过程中应注意到如下几个基本的测量原则。



a) 采用同轴电缆和光缆的测量链路



b) 只采用同轴电缆的测量链路

图 1 测量高功率瞬态响应的典型测量链路示例

- 测量传感器总会扰动其附近的电磁场（或影响局部电流或电荷密度）。可以说如果传感器对场无扰动，被记录为零响应。
 - 测量链路的使用将“加载”所测量的系统或电路，因此所得到的读数可能不是正确的响应。
 - 测量链路可用于测量近场或远场响应。一般一个场传感器只能测量 E 场或 H 场 3 个正交分量中的一个，在描述响应时观测点在近场区或远场区并不重要。在远场区，主要分量（横波）的 E/H 比值等于自由空间的波阻抗（ 377Ω ），但是在近场区， E/H 的这个关系并不成立。
 - 为了在传感器电输出和所测的响应值之间建立合适的关系应对它进行校准。
 - 除了传感器以外，测量链路中的其他环节也会给被测的电磁场量增加误差，应使这些误差最小。这些误差可能来源于从测量设备的二次散射（这将增加被测基本电磁场的误差），或者是由传感器产生的响应的干扰在测量链路中传播（如同轴电缆上的外部共模电流将通过屏蔽转移阻抗影响内部信号）。使用光纤传输系统可以减小这种多余的干扰。其他的方法有合理布置电缆来减小耦合，或是在电缆上使用铁氧体磁环来衰减感应电流，在电缆上增加屏蔽，使电缆线尽可能短等。
 - 应对测量链路中所有单元进行校准。仅在特定的频带上积分作用才较为理想，随着频率增加同轴电缆损耗增加。在提出一种对测量链路的从头到尾的校准中应考虑所有这些影响中的每一个影响。
 - 应确定测量系统噪声，并应量化其对测得的响应量的影响。
 - 测得原始波形并记录以后，应对其进行校准来确定正确的响应波形。
 - 确定正确的波形以后，应用附录 A 中定义的一个或多个波形参数或范数来概括它。
- 测量链路每一个单元的细节和要求在 4.3 讨论。

4.2 测得响应的表述

由数据采集计算机最终记录的测得的、校准的、数字化的波形通常是时间的复杂函数。为了易于区分不同的波形，以及将特定波形与其在特定系统或设备上的可能效果联系起来，应用到一个或多个表示波形的特征标量。这样，只用瞬态波形的一部分而不是所有记录数据，就能够概括其本质特性。

以这种方式描述响应波形时，应用到两类数据。波形参数是能够快速直接地从波形中得到的一类数据，比如说峰值。另外，波形范数是另一类数据，它是数学定义上的标量，需要对整个波形进行数据处理来得到。例如波形中包括的能量。本条款定义了所有类型的波形参数。

附录 A 提供了如何表征测得的瞬态波形的其他信息。

4.3 测量仪器

如图 1 所示，测量系统中有 4 种主要的测量单元。其中包括：

- 测量电参数（电磁场量、电流、电荷）并把它转换成电压的传感器；
- 把测得的电压从传感器传输到检测仪器的传输系统；
- 获取接收到的电压响应并将其转换成可以处理和存储的数字格式的探测（数字化）系统；
- 控制整个测量过程并进行数据处理和存储的计算机。

4.3.1 测量链路

测量链路中的每一个单元都可能影响记录信号的幅值和波形，所以了解并控制这些干扰至关重要。例如，考虑由其电场分量 $E_0(t)$ 表述的瞬态电磁场入射到图 1a) 中的场传感器，在记录设备上产生瞬态响应为 $R_{\text{measured}}(t)$ 。如参考文献[1]中所述，瞬态响应与激励的关系可通过卷积运算（ $*$ ）来表示，即：

$$R_{\text{measured}}(t) = E_0(t) * T(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中, $T(t)$ 是测量系统的冲击响应。给定测得的响应 $R_{\text{measured}}(t)$, 目标是为了求得激励 $E_0(t)$, 参考文献[1]将这一过程表示为反卷积($1/*$)运算。

$$E_0(t) = R_{\text{measured}}(t)(1/*)T(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

在参考文献[1]中讨论了可用于求解确定 $E_0(t)$ 的反卷积运算的不同方法, 其中一个方法就是通过傅里叶变换将公式(1)和公式(2)在频域中重构, 然后利用参考文献[2]中提到的传递函数的概念来反卷积激励函数。

分别用 $\tilde{R}_{\text{measured}}(f)$ 和 $\tilde{E}_0(f)$ 表示测得的瞬态响应和传感器处的激励场的傅里叶变换(见附录 A), 公式(1)在频域的等价方程为:

$$\tilde{R}_{\text{measured}}(f) = \tilde{T}(f)\tilde{E}_0(f) \quad \dots\dots\dots (3)$$

现在公式(1)中的卷积运算就变成用传递函数的傅里叶变换 $\tilde{T}(f)$ 简单的乘法运算。在频域, 公式(2)的反卷积运算就由公式(3)的求逆运算得出, 即:

$$\tilde{E}_0(f) = \tilde{T}(f)^{-1}\tilde{R}_{\text{measured}}(f) \quad \dots\dots\dots (4)$$

注: 本文件中瞬态量用 $F(t)$ 表示, 对应的傅里叶频谱密度用 $\tilde{F}(f)$ 表示。

只要传递函数 $\tilde{T}(f)$ 在任意频率 f 都不为零, 这个反卷积很容易实现。一旦确定激励场的频谱, 就可以通过傅里叶反变换确定这个场的瞬态特性。

如图 1a) 所示, 测量链路包含了多个不同的单元, 每个单元都对整体传递函数 $\tilde{T}(f)$ 有影响。由于测量链路中的每个单元都是在一个固定阻抗水平(通常 50Ω) 下设计的, 测量链路总的传递函数 $\tilde{T}(f)$ 可用每一个单元的复数值表示的频域传递函数的乘积来计算。这样, 总的传递函数可表示为:

$$\tilde{T}(f) = \tilde{T}_{\text{digitiser}}(f) \cdot \tilde{T}_{\text{fibre optics}}(f) \cdot \tilde{T}_{\text{integrator}}(f) \cdot \tilde{T}_{\text{attenuator}}(f) \cdot \tilde{T}_{\text{balun}}(f) \cdot \tilde{T}_{\text{sensor}}(f) \quad \dots\dots\dots (5)$$

为了确定公式(4)得到的激励场频谱, 应知道传递函数 $\tilde{T}(f)$ 。本文件的第 6 章将详细讨论如何得到准确的传递函数(在很大频率范围的幅值和相位特性)。然而, 许多情况下, 公式(5)中的许多传递函数项都被设计成了在较大频带内简单的频率函数甚至是常数, 这就使得整个传递函数非常简单。

本文件的 4.3.2 和附录 B 讨论了许多不同传感器对于激励函数(例如入射场和感应电流)的响应输出。这些传感器的响应可以分为两大类: 一是输出与激励近似成比例关系, 二是输出与激励对时间的变化率(微分)成比例关系。

第一种类型的传感器, 其瞬态响应可表示为:

$$V_{\text{out}}(t) = K_{\text{sensor}}E_0(t) \quad \dots\dots\dots (6a)$$

其相应的频域谱表示为:

$$\tilde{V}_{\text{out}}(f) = K_{\text{sensor}}\tilde{E}_0(f) \quad \dots\dots\dots (6b)$$

式中, K_{sensor} 为传感器的特性常数。

第二种类型的传感器(微分型传感器), 其输出可表示如下:

$$V_{\text{out}}(t) = K_{\text{sensor}} \frac{d}{dt} E_0(t) \quad \dots\dots\dots (7a)$$

它的频域表达是:

$$\tilde{V}_{\text{out}}(f) = j2\pi f K_{\text{sensor}} \tilde{E}_0(f) \quad \dots\dots\dots (7b)$$

采用微分传感器时, 就应提供某种形式的积分作用以恢复传感器输出的信号。这既可以在测量链路中用积分电路实现(4.3.5 有详细的描述), 又可以通过用数值方法对计算后的响应进行后续处理来实现。如果使用了硬件积分, 积分器的输出与输入信号的积分成比例。在频域, 可以用下式表示:

$$\tilde{V}_{\text{out}}(f) = \frac{1}{j2\pi f} K_{\text{integrator}} \tilde{V}_{\text{in}}(f) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中, $K_{\text{integrator}}$ 是积分单元的特征常数。

因此,当测量链路中使用了微分传感器时,公式(3)得到的测量响应可表示成:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{\text{measured}}(f) &= \tilde{T}(f)\tilde{E}_0(f) \\ &\approx \left(K_{\text{digitiser}} \cdot K_{\text{fibre optics}} \cdot \frac{1}{j2\pi f} K_{\text{integrator}} \cdot K_{\text{attenuator}} \cdot K_{\text{balun}} \cdot j2\pi f K_{\text{sensor}} \right) \tilde{E}_0(f) \\ &\approx K \tilde{E}_0(f) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(9a)$$

如果使用的是自积分器的传感器,则响应为:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{\text{measured}}(f) &= \tilde{T}(f)\tilde{E}_0(f) \\ &\approx (K_{\text{digitiser}} \cdot K_{\text{fibre optics}} \cdot K_{\text{attenuator}} \cdot K_{\text{balun}} \cdot K_{\text{sensor}}) \tilde{E}_0(f) \\ &\approx K \tilde{E}_0(f) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(9b)$$

公式(9a)和公式(9b)中的标量系数 K 通常由测量链路中单元的生产厂商提供,一般不需要校准。然而,对于诸如 HPEM 场的精确测量中,则应在测量使用前校准每一个单元。

不管测量中用的是哪一类型的传感器,采用总的传递函数 K 来计算激励函数的频谱为:

$$\tilde{E}_0(f) = K^{-1} \tilde{R}_{\text{measured}}(f) \quad \dots\dots\dots(10)$$

由于 K 与频率无关,最终的瞬态响应可表示如下:

$$E_0(t) = K^{-1} R_{\text{measured}}(t) \quad \dots\dots\dots(11)$$

在许多实际情况下,瞬态信号的上升时间很快,所考虑的频率范围内的传递函数 $\tilde{T}(f)$ 在该频带上不是一个常数。因而,公式(10)和公式(11)不适合用来由测得的响应确定原激励。在这种情况下,应需要通过校准的方法确定整个测量链路的复传递函数,然后用公式(4)来计算激励函数。

4.3.2 测量传感器

如 4.3 中所述,图 1 中测量链路的第一个单元就是电磁场传感器,它与所处位置处的电磁场(或是电流和电荷)相互作用,并产生电压输出。鲍姆(Baum)^[3,4]已经详细的介绍了传感器的设计,理想的传感器应该满足以下条件:

- a) 它是一个模拟装置,在其输出端口把所考虑的电磁场量转换成电压或电流(在电路中测量)以驱动负载阻抗,该负载阻抗通常为一个与传输线(电缆)特征阻抗相适应的固定电阻。
- b) 它是无源的。

注 1: 如附录 B 中讨论的那样,传感器同样可能为有源的;然而无源传感器可视为更易于校准的,从而认为比有源传感器更适合于测量。

- c) 在把场量转换成电压或电流方面,一个基本部分是它的灵敏度由其几何尺寸决定,也就是所谓的“标尺校准”^[5]。负载单元的阻抗可测量或调整。从另一个角度来看,原则上,它是和校准设备中的标准场(电压等)一样精确(在这个意义上,百分之几的精度通常是很容易达到的)。

注 2: 这是对理想的传感器的要求,这时在被测场分量与其输出信号之间是一个简单的几何关系。这简化了传感器的校准过程。对于不是“标尺校准”的其他类型的传感器,必须按照 6.2.2 所述的校准过程完成校准。

- d) 传递函数设计了特定的方便使用的灵敏度,常用等效面积或有效高度来表示。
- e) 它的传递函数在宽频带内设计为简单形式。这可能意味着以伏/单位场强或伏/场的变化率表示时响应曲线“平坦”,或是其他的可用几个常数确定的简单数学形式。(这时可以选择多个灵敏度系数)。

在用这些传感器时,要特别注意的是有可能在传感器内部及其电缆上产生非常大的电压。如果待测量超出了传感器的设计范围,有可能在传感器内部产生电晕放电或者是弧光放电,这将导致错误的测量响应或者可能毁坏传感器。因此,应根据被测响应的期望水平精心选择合适的传感器。

附录 B 提供了有关不同类型电磁场传感器的传递函数的更多细节。在 IEC 61000-4-23:2016 的附录 C 中提供了更多有关传感器的物理实现的细节。

4.3.3 巴伦

当一个平衡的电磁场传感器,比如说一个偶极子天线与同轴电缆连接时,它的一部分感应的天线电流将在电缆的屏蔽层外表面流过。这些电流将在测量设备的外壳流动,把能量耦合进电源线或者是进入接地系统。这将导致设备性能不可预测,并给其他设备带来意想不到的干扰。图2举例说明了这样一种连接,很明显其传感器的部分电流 I_{out} 以一种不可控的方式在同轴电缆表面和设备外壳流动。该电流 I_{out} 也可看作是电缆电流的共模部分。

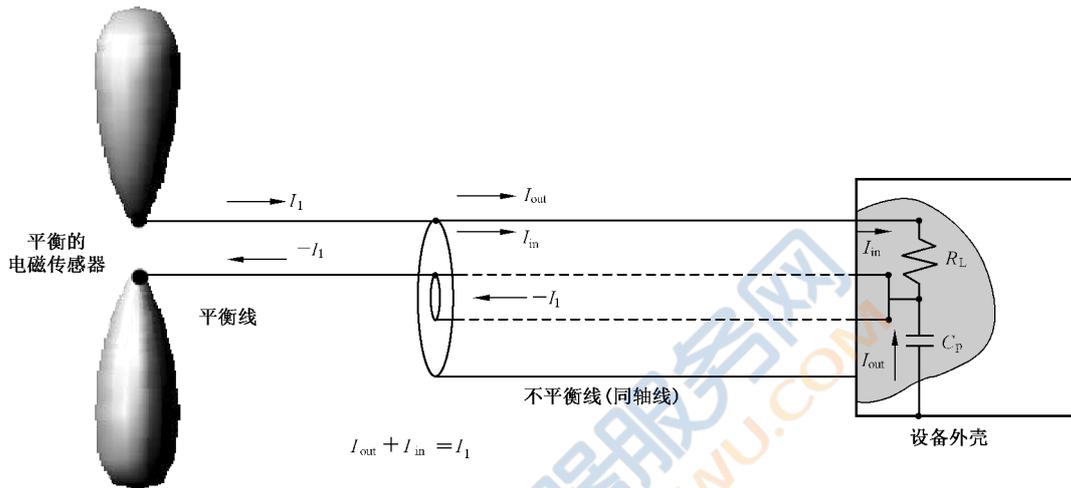


图2 平衡的传感器和电缆连接到不平衡(同轴)线的示例

巴伦可阻止电流 I_{out} 在电缆外层流动,并有助于保持天线和馈线电流平衡。这样,在保证差模电流无阻抗的同时,它给传输线上的共模电流提供了高阻抗。

巴伦有很多不同的设计,有些是基于传输线的谐振特性(因此,工作在窄带),有些带宽很宽。通常使用铁氧体扼流圈来抑制平衡线上的共模电流。在瞬态测量中,为充分保持待测电磁场的波形,巴伦必须是宽带的。

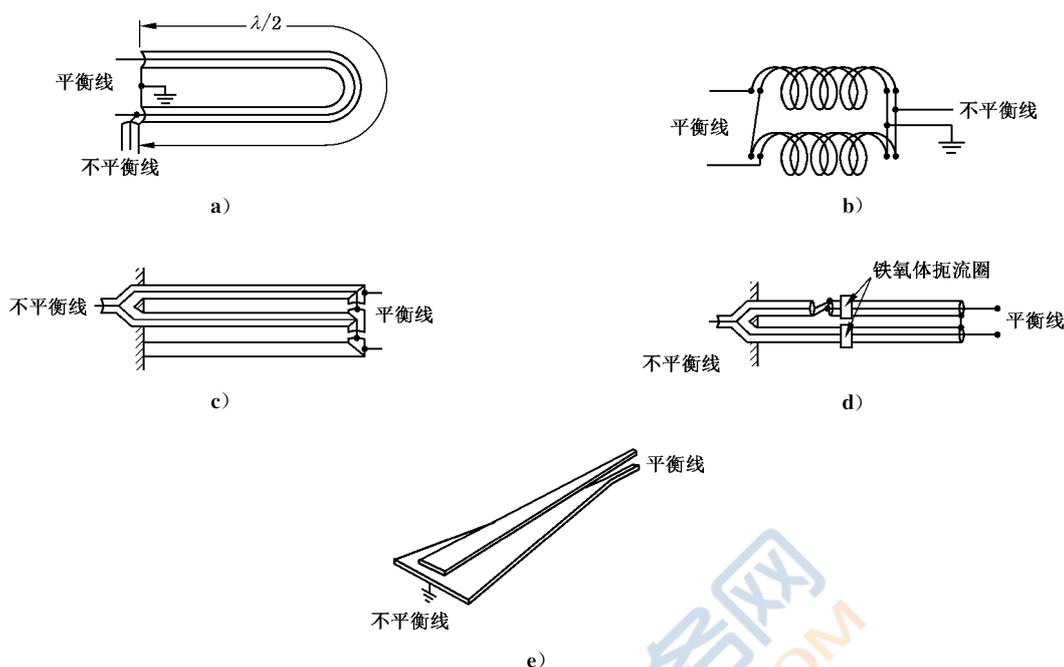
图3给出了一些不同类型的巴伦的电气结构。图3a)中巴伦由一根 $\lambda/2$ 长的延迟线构成,因此它是窄带的。如图所示,它连接在两个平衡线的端部,强迫设计频率下的线对地的电压等值反相。这种巴伦的平衡—不平衡阻抗比率为4。

图3中另外4个巴伦都工作在很大的带宽范围。图3b)巴伦由并联在不平衡端的螺旋绕制的传输线构成。采用足够长的绕线保证线圈反相端的对地高阻抗,其中的两条连接线构成平衡终端。这种巴伦的平衡—不平衡阻抗比率为4。

图3c)中部分所示是一个与频率无关的巴伦。两根同轴电缆并联在不平衡终端,串联在平衡终端。增加第3个同轴线来保持对称性。使用2根同轴电缆的巴伦的阻抗比率是4。可增加并联电缆的根数得到阻抗变换率为9和16等。

图3d)中部分的巴伦只用两根同轴电缆,其中一根电缆内导线和外导线反接。每根导线外加装一个铁氧体扼流圈来消除共模电流。

图3e)中所示的巴伦超宽带设备,由楔形传输线逐渐把不平衡线转换成平衡线。转换段的长度应大于所考虑最低频率对应的半波长。这种装置的平衡部分(带状线)和不平衡部分(电缆)的阻抗可以是不同的,可以随着转换段的几何尺寸的渐变而从一个阻抗值缓慢变化到另一个阻抗值。

图3 几种简单巴伦的例子^[4b]

在确定巴伦用于某一测量系统中时,有些实际的细节必须考虑。其中包括:

- 巴伦的带宽;
- 从平衡端到不平衡端的阻抗的变化(如果存在的话);
- 由于巴伦的插入引起的对信号电平的实际衰减;
- 该装置的最大功率。

这些数据通常都由巴伦的制造商提供。更多完整的信息诸如巴伦通过信号的扫频曲线(幅值和相角)等则很少提供。如果在仪器链的高精度模型中要用到这些特性,就需要用户自己测量。

4.3.4 衰减器

图1中所示测量链路中的另一个单元就是衰减器。有时,测得的信号可能过强,就需要减小它的幅值来避免测量设备的饱和。

如图4所示,衰减器就是一个阻抗链,用以减小信号的幅值,同时维持恒定的阻抗来匹配电缆。这些衰减器设计用于50Ω的电缆系统,其衰减量通常用分贝(dB)来表示。

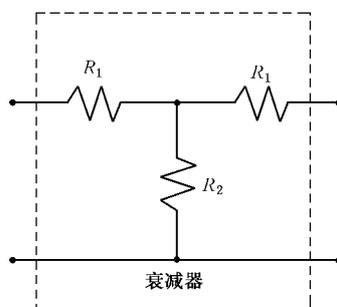


图4 测量链路中在线衰减器的典型电路

由于测量链路中还有其他的设备,设备指定的衰减量只是额定值。图 5 给出了一个适用于 50 Ω 系统标称值为 20 dB 的衰减器在 1 MHz~1 GHz 频率范围内测到的衰减。图中没有给出其相应的相频特性,这在任何一个整个测量链路的模型中也是必须要用到的。

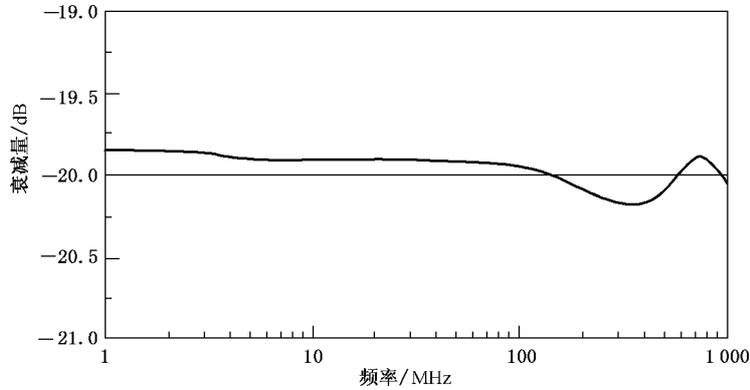


图 5 用于 50 Ω 系统的额定值为 20 dB 的衰减器典型衰减示例(作为频率的函数)

为测量链路选用衰减器时,应用到以下参数:

- 标称衰减值;
- 衰减器的阻抗大小;
- 最大工作峰值电压(或功率);
- 衰减器的有效带宽。

跟巴伦一样,这些参数都由制造商提供。然而,衰减器的详细的幅频特性和相频特性曲线一般没有提供,这些都需要用户测量。

4.3.5 积分器

由于微分传感器的输出响应与待测量对时间的变化率成比例关系,因此需要使用积分器来得到正确的波形。积分器可以是有源或无源的。

注:当然,这种积分也可以对测得的微分数据用数值方法来完成。然而,这种方法会引起基线平移,这是由被测场直流分量的不确定所引起的。

无源积分器从本质来说就是一个电阻/电容网络,如图 6 所示。因为它需要来自微分传感器的高压来保证输出响应的精度,所以这种结构特别适合峰值大上升时间快的冲击信号的积分。此外,这种装置(微分传感器加积分器)的低频灵敏度很差。这种积分器用于 HEMP 环境、雷电测试设备以及磁轨炮测量。这种结构的显著优点是它是无源的,不需要外接电源。

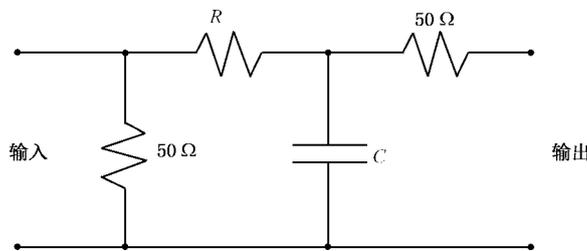


图 6 串联积分器的典型电路图

无源积分器的特性由其时间常数(RC)来确定,其中 R 是积分电阻, C 是积分电容。取不同的 R 和 C ,传感器(微分传感器加积分器)的特性可在很大的范围内变化。例如通过简单的改变这两个参数,典型的柔性线圈可以测量几个 mA 到超过 1 MA 的电流。

电压通过积分器的输入和输出端的典型的传递函数可表示如下：

$$\frac{\tilde{V}_{out}}{\tilde{V}_{in}} = \frac{1}{1 + j2\pi fRC} \dots\dots\dots(12)$$

常见的 RC 时间常数为 1 μs、5 μs、10 μs、100 μs, R 值分别为 1 kΩ、5 kΩ、10 kΩ、100 kΩ, C 值为 1.0 nF。这种积分器的规定的负载阻抗是典型的高阻抗(电阻大于 1 MΩ, 电容小于 10 pF)。许多测量装置只有一个 50 Ω 的输入电阻, 如果积分器后面使用这样的单元, 其响应将会有误差。用户必须确定使用的是一个高阻抗的测量装置。图 7 给出了前述积分时间常数在图中所示频率范围内积分作用下的积分器传递函数(幅值比) $\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|$ 。

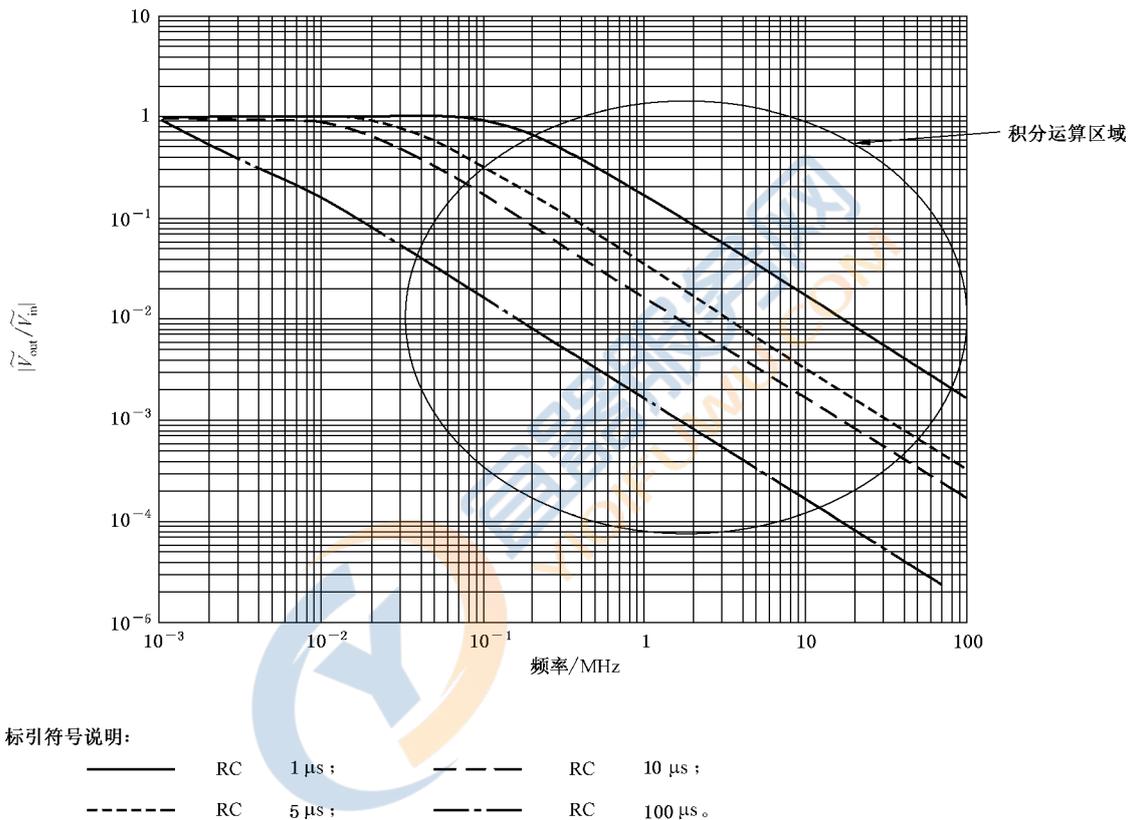


图 7 积分电路的传递函数

有源积分器通常比无源积分器应用更广泛。有源积分器既可以用于小电流(小于 1 A)低频(小于 0.1 Hz)测量,也可以用于电流大于 1 MA 频率接近 100 MHz 的测量。这类积分器的低频特性由其设计决定。

4.3.6 互联传输链路

如图 1 所示,测量链路中的不同装置之间的连接可以通过同轴电缆或是光纤来实现。两种连接方法都会影响被测信号,在理想情况下,这些连接应包括在对被测信号的校准中。在理想情况下,这些信号路径都是按信号无衰减无畸变来设计的。可事实上,当这些单元使用时对信号质量存在影响。

4.3.6.1 同轴电缆链路

考虑同轴电缆链路,会产生电缆金属导线内的损耗和介质损耗。这些损耗在电缆中产生随频率变化的信号,这也引起沿线传播的波的衰减,在多数情况下还引起信号波形的发散。也就是说,行波沿线

传播时波形将变缓并产生畸变。

虽然这些损耗影响可通过合适的同轴电缆模型来计算,但通过测量来表征电缆的特性更为精确,因为通常情况下不知道随频率变化的电缆介质常数和电导率。一些典型电缆的损耗是频率的函数,作为例子图 8 给出了常用的同轴电缆和一条更适用于高频测量的高品质铜电缆的单位长度衰减特性(单位为 dB/m)。可注意到两条电缆都在频率增加时减小了传输(也就是增加了衰减)。作为其他测量链路中的一个单元时,这个传递函数是一个复数值,这个复函数必须被用于将电缆衰减效应添加到整个测量链路中。

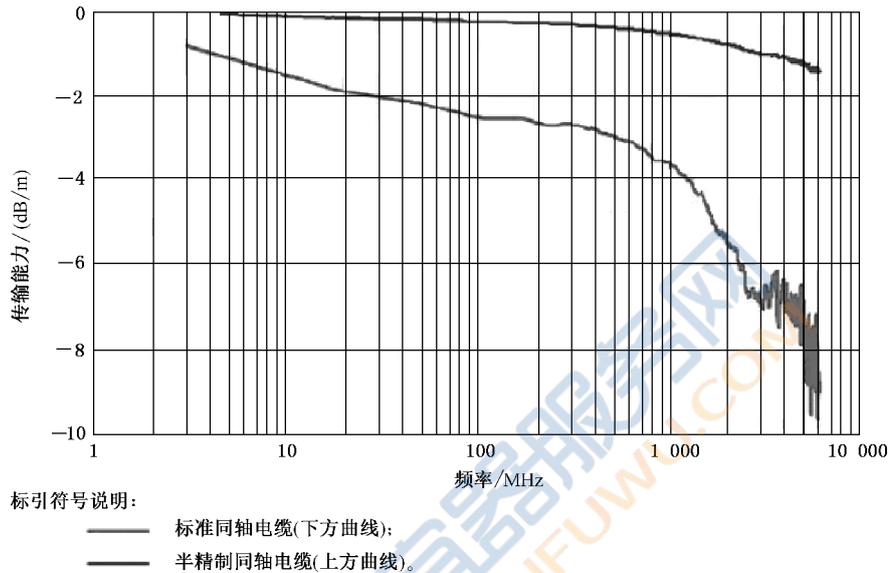


图 8 标准和半精制同轴电缆随频率变化的单位长度信号传输特性的示例

4.3.6.2 光纤链路

光纤链路可以替代电缆或是测量链路中的“硬线”。如图 1 所示,它包括了一个把电信号转换成光信号的转换器(发射机),一条远距离传输光信号的光纤,另一个把光信号还原成电信号的转换器(接收机)。原则上,这一系统的优点是光纤的非导电性。这就消除了使用同轴电缆时可能出现的不必要的信号传播路径,从而减小了测量系统对测量链路附近正常电磁场的影响。

注:有些光缆具有由电导性材料制造、用于物理保护的铠装,在 HPEM 测量中避免使用此类光缆。

尽管使用光纤链路在测量设备电气隔离方面有益处,但同时也带来了一些问题。转换器通常需要电池等外部电源,在需要换电池时给测量带来了不必要的中断。然而,更严重的是转换器将增加系统噪声并且减小整个测量链路的带宽。

4.3.7 记录设备

通常使用数字示波器或者波形记录仪来测量 HPEM 的瞬态波形。详情参见 IEC 61000-4-25:2019 的 6.1.2 和 6.2.2。

4.3.8 仪器布局

HPEM 的测量中一个重要的问题就是测量仪器的布局。如 4.2 中提到,电磁场传感器总是会扰动入射场,这是测量场时不可避免的负面影响。然而,在校准传感器时考虑了对场的扰动,传感器最终的输出显示的是无扰动的入射场。

一个实际的测量系统除了传感器外还有别的单元(见图 1),无论哪一个是金属的,都有可能与入射

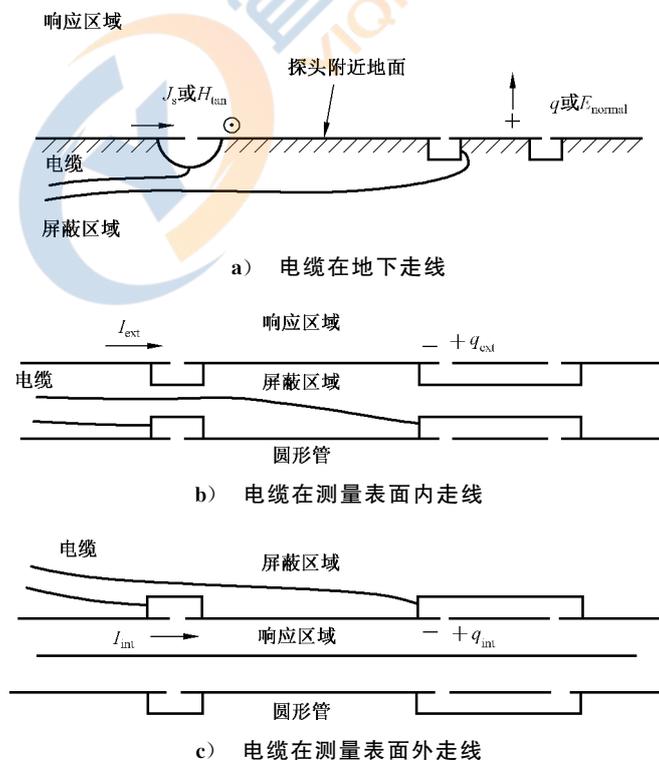
场相互作用,并给传感器形成一个附加的电磁场。因此,这些单元的出现扰动了入射场,增加了测量响应的误差。

入射场与其他单元的相互作用同样会影响这些单元自身的使用。考虑入射场与将测得的信号从传感器传送到记录仪的同轴电缆的相互作用的情况,这个外部场会在电缆外表面产生感应电流,由于屏蔽的转移阻抗和导纳作用,将在内部信号线上感应出一个内部电压源。这个源是一个有效的噪声源或干扰源,将改变电缆中传输的传感器信号。有多种办法消除这种干扰,其中包括在电缆上用更好的屏蔽,把电缆按一定方式走线来消除外部电磁场对电缆的耦合作用,在电缆外部增加铁氧体器件,或使用光纤代替电缆。

除了与环境电磁场相互作用来干扰测得响应,测量链路还可由其他的方式来影响测量。例如,考虑附录 B 中的图 B.7 中的电缆电流传感器,这个传感器放置在电缆附近将给电缆带来一个有效的阻抗单元负载,从而将减小电缆电流。因此,尽管从传感器读的电流形式上正确的,但它不是未放置传感器时电缆中流过的电流。另一个例子就是测量高 Q 腔(如混响室)内的场量。这时,传感器塞满了空腔,导致空腔中的整体电场水平(也就是说不仅仅是传感器附近)比没有传感器时低。同样的,测得的是一个真实的场,但这不是放置传感器前的场水平了。

在参考文献[6]中给出了许多关于如何放置传感器和电缆的实用的建议,在这里简单介绍。在放置传感器、电缆和其他的设备时一个重要的考虑就是它们对待测场的影响尽可能的减小。连接传感器和测量链路的电缆对待测场有很明显的干扰(除非使用光纤),不推荐使用这种类型的测量方法。推荐使用表面安装传感器来测量待测物体导体表面的电流或电荷。在这种方式下,传感器电缆可以通过在电磁场强度很小的地下走线并与测量仪器连接。这种走线方法如图 9a)所示。

同样的,如果要测量圆柱形或者是管状导体的电流或电荷时,电缆应在导体内部走线,如图 9b)所示。如果要测量柱形区域的内部电流,应采用如图 9c)所示的布置方式。



注:图 a)为平面的截面,图 b)、图 c)为电缆的截面。

图 9 传感器电缆在不含电磁场的区域走线的示例

然而,有时候不可能把电缆从传感器附近穿到无场区域,在这种情况下,电缆应放在外部区域(具有较强的电磁场),这个时候对电缆的放置和接地有些特殊的要求。对图 10a)所示的表面安装的传感器,连接传感器和测量设备的电缆的屏蔽层就应与地进行可靠的电气搭接(采用铜胶带)。另外,传感器的装配座也应接地。

当测量电缆电流或电压时,应使用如图 10b)和图 10c)所示的电缆配置方法。在这两种情况下,电缆的屏蔽层同样要接地,连接电缆屏蔽层与大地的连接线应尽可能的短。如图 10b)所示,除了把电缆接地以外,考虑沿着电缆在合适位置的屏蔽层上安装铁氧体环来减小通过电缆表面的无用电流也是可行的。

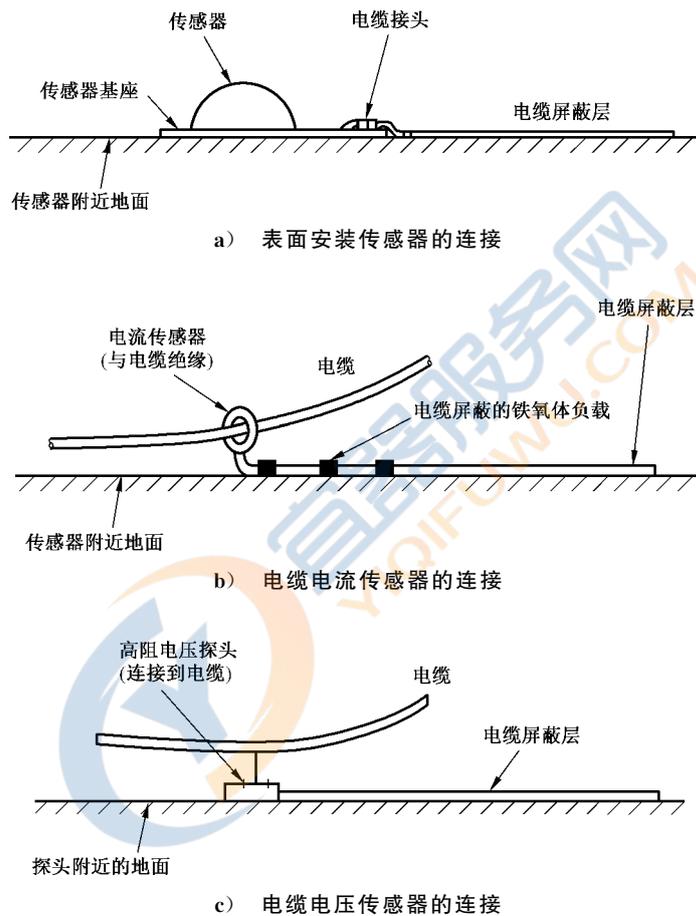
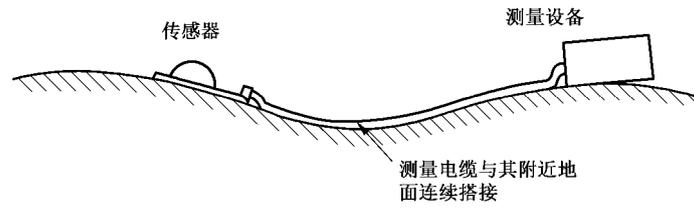


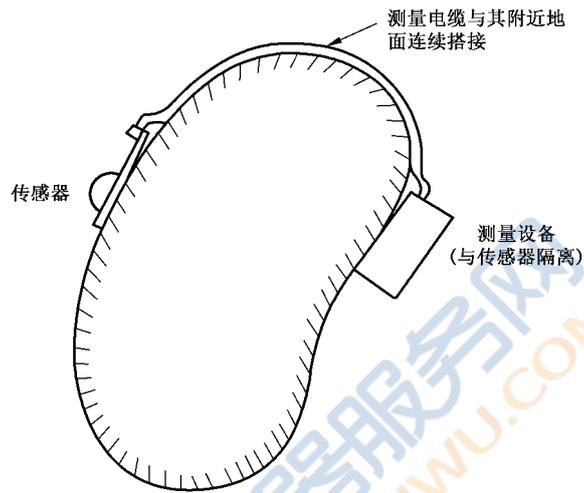
图 10 在有电磁场的区域对传感器电缆的处理

如图 11a)所示,在实际的系统中传感器附近地表面可能不是那么平坦。在这种情况下,电缆在传感器附近区域应沿着地貌铺设;如果可能,在电缆屏蔽层和地面之间电气搭接。图 11b)给出的布置方法可以进一步避免测量设备对电磁场的干扰的可能性。这里的测量设备位于由受试物体将其与传感器有效隔离的区域。当然,电缆的屏蔽层应与地面连接在一起。

图 12 给出了几种在测量中应避免的电缆走线方式。图 12a)中的电缆直接穿过了待测系统墙壁的缝隙,穿过缝隙的电磁场将激励电缆的屏蔽层,造成测量系统中不必要的干扰。同样的,图 12b)中,电缆在穿过待测设备后与另一个设备相连而不与设备表面搭接。这样就形成了一个环,它能耦合设备附近的电磁场,因而给测量带来寄生响应。

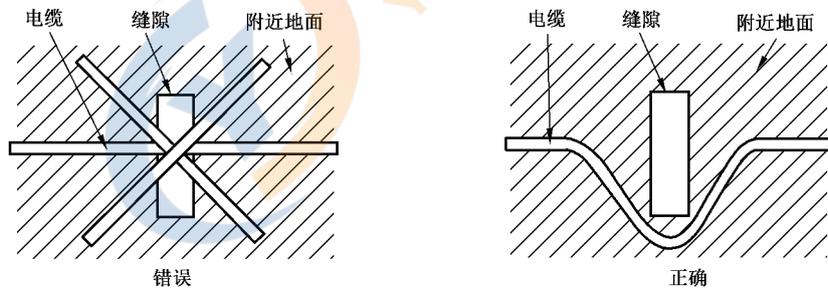


a) 使测量电缆与地形保持一致

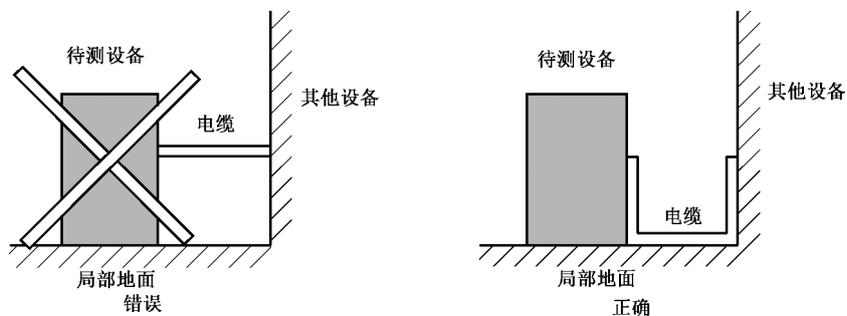


b) 使测量设备对传感器的干扰最小

图 11 使电缆适应系统局部屏蔽的拓扑



a) 电缆通过缝隙或细槽



b) 设备间的电缆走线

注：图 12 左侧上的大“×”意在表明一种错误的电缆走线。

图 12 电缆走线的正确和错误方法

4.4 测量程序

参见 IEC 61000-4-25:2016 第 8 章对测量程序的要求。本文件的附录 C 包含了更多有关 HPEM 的测量程序的信息。

5 低频响应的测量

高功率电磁场测量中也关注具有几赫兹量级频谱分量的低频信号。这些信号在电磁脉冲环境后期产生,这和地磁暴在地表产生的电场和磁场有些相似。

由于 HPEM 环境与这些自然产生骚扰如此相似,地磁暴效应测量中的许多测量技术都可以采用。其中包括地球表面磁场的暂态特性测量和接地的长导体中的电压和电流的测量等。附录 B 中的 B.9 介绍了适用于这种低频信号测量的不同传感器。

6 校准程序

测量通道的校准有多种方法,从对可溯源的标准电磁场的高精确测量到要求简单的衰减因素和其他的标量数据来描述系统中单元的特性近似估计。该条款讨论了校准程序的一般步骤,没有详细介绍校准方法。

采用哪种方法取决于测量要求,例如,如果测试辐射等级是否符合电磁兼容规范,测量时就不必考虑相位一致。此外,许多应用场合下,应采用一套固定幅值的校准程序。另一方面,如果要求测量快速上升的 HPEM,或者相反,需要用宽带 CW 测量来重建 HPEM 暂态响应,那么保证测量中的幅值和相位信息至关重要。这表明任何校准函数都必须是复值函数的。

遗憾的是,许多电磁场传感器和测量链中的其他测量单元厂家提供的都只有幅值数据。另外,一些普通的测量软件不应使用复值传递函数或者是校准因素。使用这些仪器和软件的用户应仔细检验他们的测试要求,确保使用这些数据不会给测试结果带来不可预计的误差。

校准测量链有两个基本方法,一种方法是把整条链看作一个单元对它进行整体校准,另一种方法是对包括传感器或探测器、衰减器、滤波器、连接线等的测量链建立模型,然后对每一个独立单元进行校准。接下来,这些单独的校准结果解析可组合在一起构成整个测量链的整体校准函数。

本章将讨论上述的校准概念。

6.1 整个测量通道的校准

6.1.1 直接校准

用于整条测量链的校准有几种不同的方法。对于如图 1 所示的简单测量链的校准,最简单的方法就是把传感器放在一个已知的电磁场环境中,记录检测器的读数。通过改变电磁环境的频率,可确定校准的频率变化(幅值和相位)。

然而这种方法最基本的困难在于没有一个已经校准的测量系统的情况下,很难得到所谓的标准电磁场。得到这样一个标准场的一种方法就是用类似导波结构,其内部电磁场可通过对其几何尺寸以及馈入波导射频输入功率的简单计算得到。双端的 TEM 小室就是这样的一个导波结构的例子。这种装置与同轴传输线类似,一端是源,另一端是匹配负载。源在同轴线内部产生一个横向电磁场,它与放置在同轴区域内部的试品相互作用,最终被终端阻抗吸收。

图 13 给出了一个典型的双端 TEM 小室,并且给出了同轴系统的中心导体和测试容积的剖面图。如果试品(也就是要被校准的场传感器)的尺寸比 TEM 小室的截面小的多,激励场可以近似看作一个均匀

场。由于这种导波中的横向电磁场模式没有低频截止点,所以这种校准可以在非常低的频率下(远低于辐射天线的允许的频率)进行。然而,随着工作频率的增加,将产生其他的模式和腔体谐振,这就有效限制了装置在高频校准的使用。TEM小室的供应商提供小室有关可用的带宽信息;一米高工作空间的 TEM小室可用带宽一般范围是几十 kHz 到 100 MHz。更多有关 TEM小室的信息见 IEC 61000-4-20。

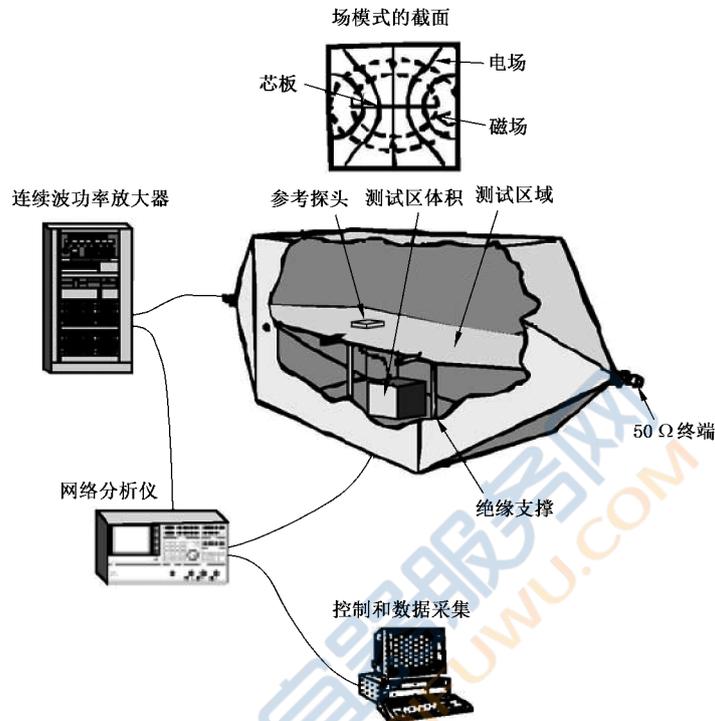


图 13 用于传感器校准提供均匀场照射的双端口 TEM 小室

图 14 所示的楔形 TEM 小室可代替上述的双端口 TEM 小室。在这个测试腔中,中间导体垂直偏置以创造了更大的测试空间。它的截面是逐渐向外展开的矩形同轴截面,以匹配负载。

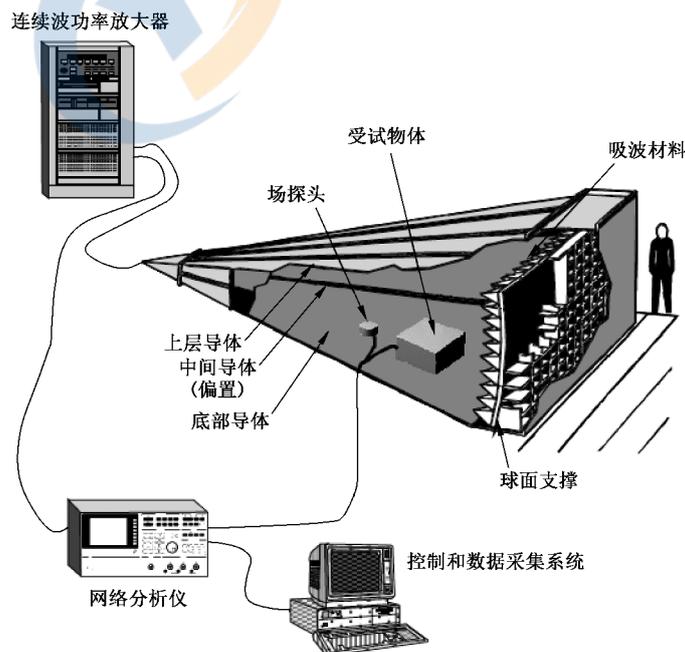


图 14 单端 TEM 小室及其相连设备示意图

终端负载由一个 $50\ \Omega$ 的低频电路元件和一个如暗室中用于吸收入射行波的高频吸波墙组成。这两部分之间的交叉由小室尺寸和吸收器长度决定。由终端提供的匹配的宽带阻抗负载用于抑制高次模式。吸收材料显著增加空腔的损耗,从而降低了腔体模式的谐振效应。在频率从直流到 $1\ \text{GHz}$ 范围内,小室内部空腔的均匀场一般小于几个分贝(见 IEC 61000-4-20)。

已建造了很多高度从 $0.5\ \text{m}\sim 3\ \text{m}$ 的测试腔,用于测试盒装仪器的内部印刷电路板的小室。正在研究能够对整个机箱或汽车进行测试的大型小室。在这种单端口的 TEM 小室中对测量链的校准与常规 TEM 小室中校准一样,除频率范围上限更高一些。因此,可使用类似的设备(但可能有更大的带宽)。

这种校准腔无需很大。例如,图 15 给出了设计用于校准 $30\ \text{MHz}\sim 1\ \text{GHz}$ 频率范围单通道测量链的小尺寸测试设备。注意到既然 TEM 小室可在低频段正常工作,那么 $30\ \text{MHz}$ 的频率限制是由传感器较差的低频响应决定的。

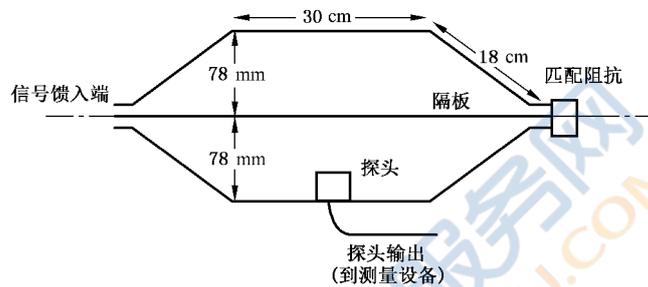


图 15 用于校准传感器的小尺寸测试设备尺寸图

6.1.2 两个测量通道的比较校准

要测量传递函数时,两条测量链的校准很简单,因为不需要激励电磁场的精确信息。校准时,两条测量链的传感器应放置在一起,尽量使得它们测的基本上是同一个电磁场,并得到响应的比率。如果两条链都精确的校准过,那么它们的传递函数比率应为 1。可是,如果其中一条链没有校准,比率将不为 1,这个比率确定该链随频率变化的校准函数。

只要频谱中没有明显的零点,这一校准过程就有效。如果存在零点,比如在距离地面一定高度处的电场激励,该处有因地面反射场的破坏性干扰场,这时将会在校准函数中产生误差。因而,应注意获得频谱合理均匀的激励场。

另外,应注意确保当两个测量传感器放置在一起以获取校准因数时,使两个传感器之间的相互影响最小。

6.2 测量通道单元的单独校准

另一个校准测量链的方法就是检验链的每一个单元,表征每个单元的电气特性,通过组合各单元的数据的方法推导出整个测量链的电气特性。作为例子,图 1 所示的测量链可用图 16 所示的传输线网络的电气特性表示。

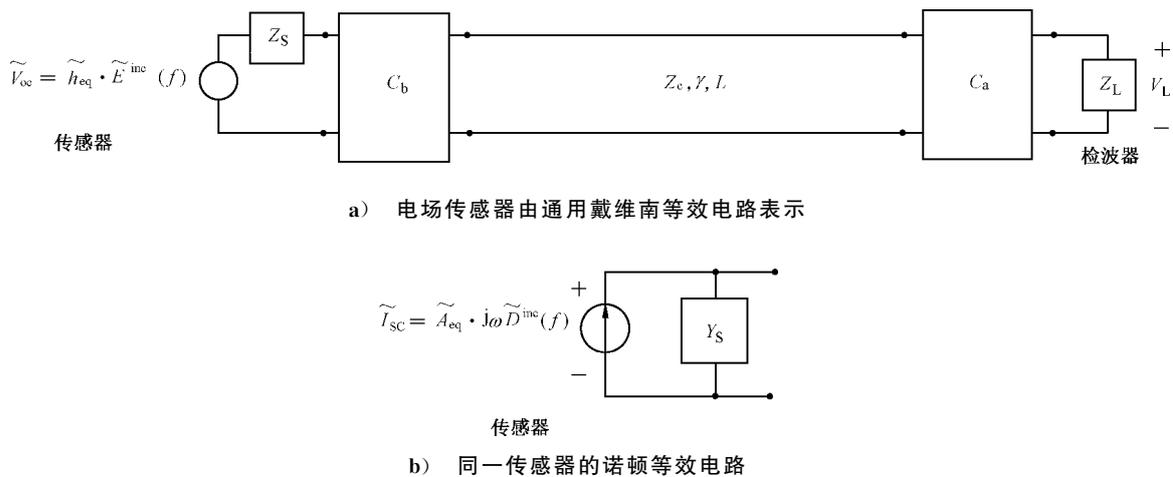


图 16 测量链的电气示意图

6.2.1 电场传感器的表示法

图 16 所示的网络中,电磁场传感器用开路戴维南电压 $\tilde{V}_{oc}(f)$ 表示,它和入射场通过等效高度 \tilde{h}_{eq} 有如下关系:

$$\tilde{V}_{oc}(f) = \tilde{h}_{eq} \cdot \tilde{E}^{inc}(f) \dots\dots\dots (13a)$$

加上传感器的输入阻抗 \tilde{Z}_s 。在大多数情况下, \tilde{h}_{eq} 和 \tilde{Z}_s 都是复值的且是随频率变化的函数,其特性与所使用的传感器设计有关。

另一种方法是,传感器可用图 16b) 所示的诺顿等效电路来表示,这种等效包含传感器等效面积(或孔径) \tilde{A}_{eq} , 位移矢量场 $\tilde{D}^{inc} = \epsilon_0 \tilde{E}^{inc}$ 激励传感器,输入导纳 $\tilde{Y}_s = 1/\tilde{Z}_s$ 。如鲍姆在参考文献[6]中所讨论的,磁场传感器也可以用一套两种上述方法表示,这里对电场传感器应用的讨论同样适用于磁场传感器。在 4.4.3 中已经详细介绍了这些传感器的参数。

对测量传感器的确定校准因数的不同方法在测量中引起相当的混乱。制造商提供传感器的校准因素时,应详细注明这些因素是如何定义的以及怎么在测量过程中使用。

6.2.2 场传感器的校准

当场传感器表示成如 6.3.2 中所讨论的形式,最通用的校准过程就是确定两个复值函数——等效高度和输入阻抗,在所讨论频率范围内为频率的函数。如果传感器在内部加载或者想得到在加载已知的确定阻抗时的特性,则只需要知道负载的电压响应,这个可以由修正的等效高度 h'_{eq} 给出。

这些量可用下述实验方法或分析法得到。

6.2.2.1 器具法校准传感器

有些情况下可用分析法得到场传感器的校准系数^[5]。对一些特定形状的导体(比如说球体或者回转椭圆柱体),可通过求解经典的散射问题得到开路电压和输入阻抗的解析表达式。尽管这些方法可能很复杂并具有很大的频率变化,如果假定传感器为电小尺寸,那么可证明传感器电压就可由公式(13)确定,且其参数 h_{eq} 可用解析解给出。这被称为“器具法校准”,是因为所有的都要确定传感器的灵敏度,原则上,是器具尺寸的测量(当然,还要加上给出响应的分析表达式)。

这种用器具法校准因其简单而有用,但依据这一技术可能存在不少不足之处。其中包括:

- 只有非常有限数量的传感器可用此方法进行分析校准;

- 有效校准的频率范围受传感器尺寸限制,无超过最大工作频率的检验方法;
- 校准过程没有考虑可能的制造缺陷和不足,这可能导致传感器没有理想的响应特性。

对于不能用分析的方法来校准的传感器,可通过测量低频时合适的校准系数来校准。一旦得到低频限值,这种传感器可用两个标量系数来描述,这两个系数可在工作带宽的任一频率测得。

6.2.2.2 替换法校准传感器

传感器校准的一个替代校准方法就是比较它和一个事先已校准的传感器在未知电磁场环境下的响应^[5]。这种方法被称为可溯源到一些可接受标准的校准。在做这种类型的校准时,重要的是维持参考传感器在干净无干扰的物理条件下,因为它的任何响应误差都将给校准函数带来误差。

6.2.2.3 分析法校准传感器

有些情况下,可用精确的电磁耦合分析来校准场传感器。这种分析法包括求解由入射电磁场在传感器上产生的感应电荷和电流的积分式^[7]。一些计算机程序可用于这种分析。

尽管过去几年在建立数字模型方面取得了一些进展,可也只能分析那些形状简单的传感器。而且很难模拟这种传感器的馈电结构的细节。尽管如此,这种方法在有些情况下还是很有效的。

作为这种校准过程的例子,图 17 给出了一个非常简单的电场传感器:一个长 $L=1\text{ m}$,半径 $a=0.1\text{ mm}$ 柱形导体。在离一端 33 cm 的地方有一个馈电点(偏置的馈电点可使结果更真实),假设原电场与柱形轴线成 θ 角。

在 6.3.2 中提到,传感器终端的输入阻抗是表征装置特性的一个必要参数。在输入端外加一个单位电压源,天线分析程序可用于计算流过导体表面的感应电流。可得到,由已知的传感器末端的流过电流,用 \tilde{I}_i 表示,可得到输入导纳 $\tilde{Y}_i = \tilde{I}_i / V_{cc}$,输入阻抗是其倒数, $\tilde{Z}_i = Y \tilde{I}_i$ 。

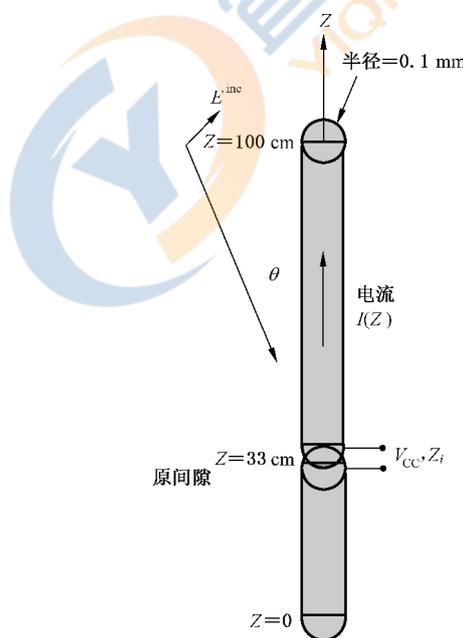


图 17 一个简单电场传感器示意图

图 18 给出了传感器输入阻抗 Z_i 的实部和虚部对频率的特性曲线,当频率低于 100 MHz 时基本上是容性的,电容 $C \approx 1.7\text{ pF}$,阻抗的实部总是正的,这是由能量守恒决定的。

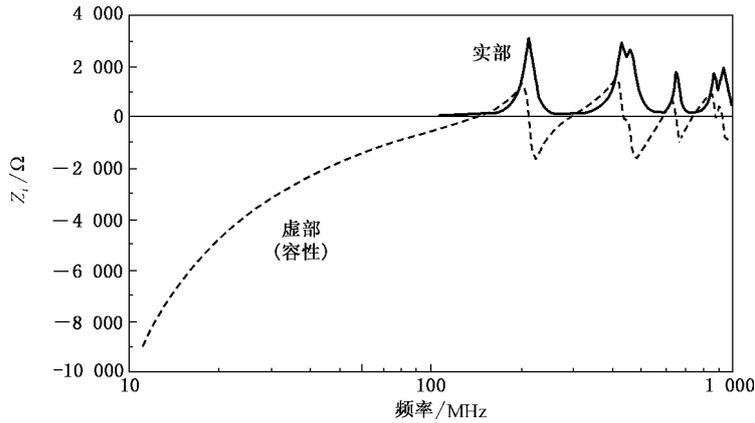


图 18 图 17 中所给的电场传感器的输入阻抗的实部和虚部的特性曲线

天线分析程序也可用于计算传感器对入射场的响应。对于如图 17 所示的入射角为 θ 的电场, 图 19 给出了不同入射角 θ 时流入传感器终端的感应短路电流的幅频特性曲线。注意在频率低于 100 MHz 时, 响应曲线很平滑, 在 150 MHz 开始发生不同的传感器谐振, 频率更高处发生高次谐振。设计的传感器应有效工作在幅值平滑的频率范围。

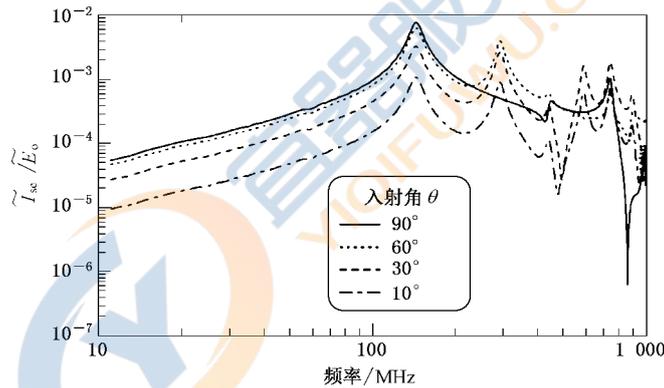


图 19 据天线分析程序计算得到的流入传感器终端的短路电流对不同入射角的幅频特性曲线

通过诺顿-戴维南变换, 就可得到传感器的开路电压。这种传感器对电场的响应与天线轴线相切, 以 $\tilde{E}^{inc}(f)\sin(\theta)$ 形式给出。在这种情况下, 想要计算的有效高度就是入射角度的函数:

$$\tilde{h}_{eq}(\theta) = \frac{\tilde{V}_{oc}(f)}{\tilde{E}^{inc}(f)\sin(\theta)} \dots\dots\dots(13b)$$

图 20 给出了传感器等效高度的结果曲线。在低频情况下, 天线响应与电场在圆柱长度方向的切线分量成正比, 等效高度 $\tilde{h}_{eq} = 0.5 \text{ m}$ 。然而, 在高频时, 不同的传感器谐振破坏了这一校准因素, 此时必须使用复值函数来表示。而且, 校准因素的变化程度取决于入射角度, 这也意味着对不同的入射角度需要不同的校准系数。不过如果传感器工作在低频范围 ($< 100 \text{ MHz}$), 只要电容量和等效高度就足以确定传感器特性。

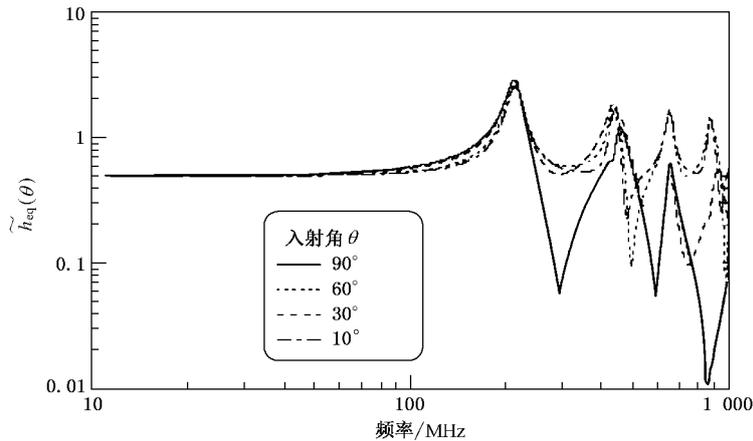


图 20 传感器等效高度的幅值对不同入射角度的变化曲线

6.2.2.4 用标准电磁环境校准传感器

替代前述章节分析校准过程的一个方法是,直接测量传感器在一个已知电磁场中的输出。如 6.2.1 中已经讨论过的,这种方法的最大的困难就是事先确定电磁场。典型的测试程序就是把传感器放置在测试腔或其他控制良好的环境中,然后测量在不同频率时的输出。将响应对入射场的强度归一化,由此得到传感器对入射场的幅频和相频特性函数。如上所述,如果传感器空载,在工作带宽中响应将保持不变(也就是平坦的)。如果传感器加载在内部,响应将与频率 ω 成正比。

除传感器的电压响应校准外,还需要对输入阻抗校准。对一个空载电场传感器,阻抗基本上是电容(磁场传感器基本上是电感)。在高频情况下,传感器的寄生元件的效应将增大,此时应测量这些效应。

在测量这两个传感器参数时,最重要的就是要考虑测量设备的动态范围。这种测量通常受测量设备的噪声门槛限制,从而限制了测量精度。而且当测量大的暂态信号时,传感器可能出现的非线性效应将导致线性校准函数无效。

6.2.3 由单个单元构成校准后的测量链

一旦单个的传感器可用等效电路表示,并用前面章节所讲的方法进行了可靠的校准,那么就可用附录 D 中描述的双端口模型的方式将不同单元组合起来对整条测量链进行校准,或如果是一个匹配系统,则可用公式(5)。

散射参数(S)很容易用网络分析得到,使用散射参数对测量通道的校准应按如下进行:

- a) 移除测量链中的每个双端口装置(衰减器、电缆、不平衡变压器等);
- b) 根据网络分析以手册给出的方法测量每一个双端口装置的散射参数(S);
- c) 用公式(D.18)把散射参数(S)转换成链参数;
- d) 把测量通道中的所有单元的参数矩阵相乘,如公式(D.8)所示,可得到整个通道的链系数表达式;
- e) 采用传感器的戴维南等效电路,用公式(D.10)计算负载响应电压 \tilde{V}_L ;
- f) 由公式 $\tilde{K}(f) = \tilde{V}_L / \tilde{E}^{inc}(f)$ 计算整条链的校准系数,其中 $K(f)$ 是描述校准函数的变量。

6.3 近似校准技术

对测量链缺少精确的校准数据时,用一些近似的方法可得到使用测量系统必须的数据。这些方法既可以得到 4.3.1 中描述的测量链中单元的简单标量系数,也可以估算这些单元的复数频率响应函数。

这种近似校准技术应作为一种后备方法考虑,对单元的精确校准总是最恰当的。

本章将介绍一些获得近似校准函数的不同方法。

6.3.1 整条测量链的标量校准

获得整条测量链近似校准系数的最简单方法就是为系统中的每个单元假定一个与频率无关的衰减函数,并应用这些函数来减少在测量点的响应。用这种方法描述的测量链见 4.3.1。

在这种校准方法中,允许通过测量链的响应来决定激励场,目的是确定公式(9)中的标量系数 K 。这既可以将每个单元的标量系数 K_i 相乘得到系数 K ,也可以直接校准整条测量链来实现。后一种方法可用替代法(见 6.3.3.3)进行,即用已校准好的传感器(和相联设备)来测量激励场,然后把这个已知的场作用到待校准系统上。

6.3.2 电路模型

确定测量系统的校准的更精确的方法是用由传感器的开路电压表示的负载电压响应来确定链参数,这与通过传感器校准因素和入射场有关。附录 D 的公式(D.10)给出了表达式。为了确定整条链中不同单元的链参数矩阵,要建立每个的简单的频率响应电路模型,用公式(D.8)组合其结果。

6.3.2.1 传输线模型

比如附录(D)的公式(D.12)给出了小段传输线的链参数表达式,其中包括线路的阻抗特性和传播常数,这些系数通常是频率的函数。假设典型传输线的特性可用单位长度的电感 L' 、电容 C' 、电阻 R' 和电导 G' 来表征,那么复值传播常数和阻抗特性的通用表达式如下^[7]:

$$r = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad Z_c = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{(G' + j\omega C')}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

实际测量时使用的传输线都是低损耗的,即 $R' \ll \omega L', G' \ll \omega C'$,在这种假设下,传播常数变成了

$$r \approx \frac{1}{2} \left(\frac{R'}{Z_c} + G' Z_c \right) + j\omega \sqrt{L' C'} \quad \dots\dots\dots(15)$$

阻抗特性 Z_c :

$$Z_c \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

在公式(D.12)中使用这些参数就可以建立小段传输线的频率响应模型。

6.3.2.2 衰减器模型

同样的方法可用于测量链中其他双端口元件的建模。一类常用的元件简单的衰减器,它具有特征阻抗 Z_c 和衰减系数 α ,可被插入传输线中使用。

直流时衰减器的简单模型可用图 4 所示的 T 型电路表示,假设衰减器工作在 50Ω 的传输系统中,电阻 R_1 和 R_2 的值可由给定的衰减系数 α 表示如下:

$$R_1 = 50 \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad R_2 = 100 \frac{\alpha}{(1 + \alpha)(1 - \alpha)} \quad \dots\dots\dots(17)$$

以处理附录 D 中公式(D.11)的方式将衰减器的三个元件组合起来,可得出两端口衰减器的整体链参数矩阵,为:

$$\begin{aligned}
 [C] &= \begin{bmatrix} 1 & R_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^2 + 1}{\alpha} \right) & \frac{25}{\alpha} (1 - \alpha^2) \\ \frac{1}{100\alpha} (1 - \alpha^2) & \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha^2 + 1}{\alpha} \right) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)
 \end{aligned}$$

这是一个用电路衰减系数 α 的链参数表达式。

如图 21 所示,在电路的输入和输出终端增加寄生电容(的效应),就可以将这种模型扩展到高频情况。加上这两个电容对链参数的影响,可用上述的同样的方法来分析这个电路。另外,引线电感的效应可用同样的方法处理。

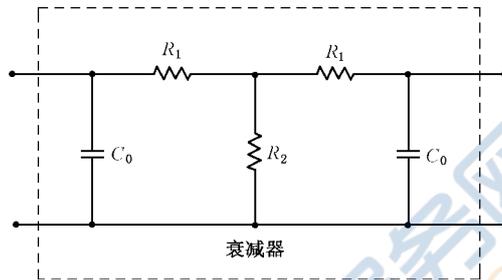


图 21 衰减器的高频等效电路

6.3.3 校准函数的拟合函数逼近

有时候,用电路或网络元件的响应的校准曲线来代替精确的电路模型或数据。通常,这种数据只有幅频特性。采用波特图的图形方式,可在 log-log 曲线上查出响应,从而推导出传递函数的有理多项式。一般是先确定频谱曲线的渐近线,然后在 log-log 图中找出其斜率(必须是整数),确定渐近线的转折频率。参考文献[8]中深入讨论了这种方法的相关细节。

附录 A

(规范性)

对测得响应特性的描述方法

A.1 波形参数

对于 HEMP 环境, IEC 61000-2-9 和 IEC 61000-2-10 描述了可激励系统的入射电场和磁场, 或在与设备相连的电缆上传播的传导瞬态的重要特性。

在电磁测试所遇到的许多不同波形中, 有一些在这类测量中经常出现。第一种常见波形是如图 A.1 所示的单脉冲函数波形。波形的主要部分是一个快速上升和下降单极性脉冲, 其特征可由上升时间, 脉冲宽度, 上升沿最大变化率和峰值来表示。图中没有给出低电平波前脉冲和波形的末尾部分, 这些在其它有些波形中也可能出现。如果用这种波形来描述远区的辐射电磁场, 就要求图 A.1 所示波形曲线下方的面积为零。因此, 这种情况下的波前脉冲和末端波形部分就很重要, 因为它们必须抵消图中主要脉冲面积。

用来描述图 A.1 中主峰值波形的参数包括以下用于瞬态响应 $R(t)$ 的参数:

- 峰值 R_{\max} ;
- 峰值时间 t_{peak} ;
- 10%~90% 上升时间, Δt_{10-90} ;
- 脉冲宽度, 定义为半峰值时长 (FWHM), 即初始 50% 峰值点到下降沿半峰值点对应的时间之差, Δt_{50-50} ;
- 上升沿最大变化率 $= (dR/dt)_{\max}$, 对于 $t < t_{\text{peak}}$ 。

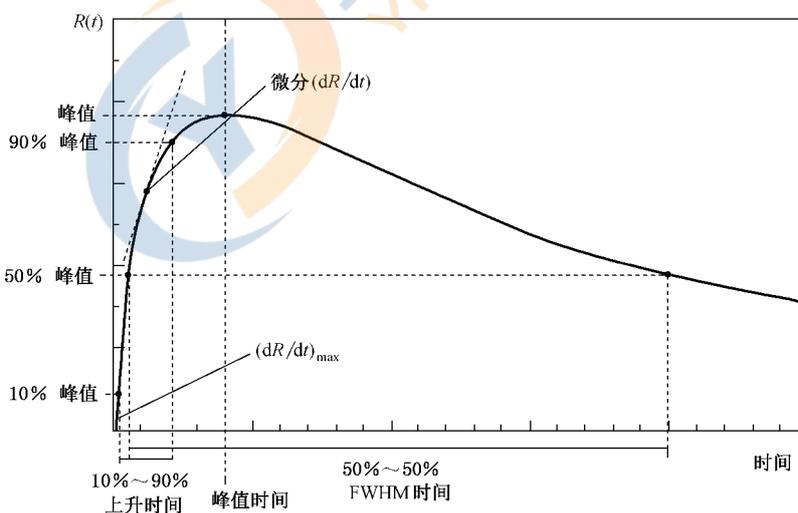


图 A.1 用来定义瞬态响应波形 $R(t)$ 的脉冲部分的不同参数示意图

除了图 A.1 所示的单脉冲响应外, 高功率瞬态测量通常得到如图 A.2 所示的振荡波形。图 A.1 中所示的参数可用来描述这种波形参数的第一个响应峰值。然而, 这种波形还需要两个额外的参数来描述。它们是振荡波形包络线的 $1/e$ 下降时间 t_f (与波形质量因数有关) 和振荡的平均周期 T 。图 A.2 给出了这些参数和前脉冲及噪声成分。

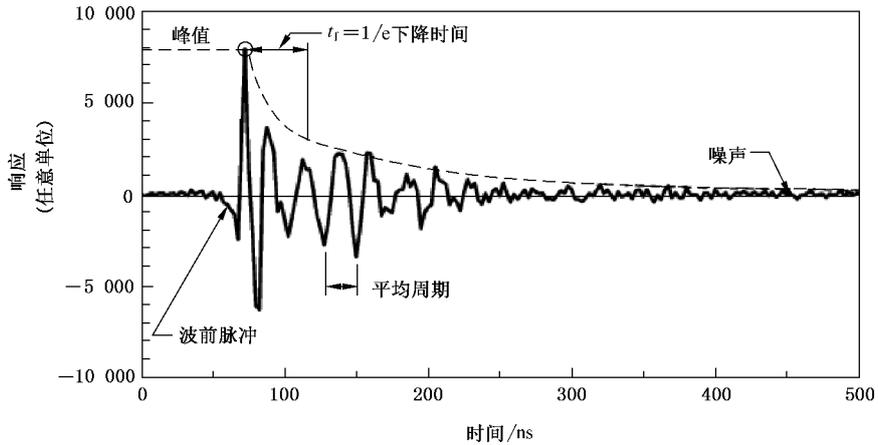


图 A.2 高功率瞬态电磁测量中出现的振荡波示意图

A.2 波形范数

另一种类型的波形参数就是时域波形 P 范数 $\|R\|_P$, 在参考文献[A.1]中定义如下:

$$\|R\|_P = \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} |R(t)|^P dt \right\}^{1/P} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中, P 为整数 1, 2 等。与 A.1 中简单波形参数不同, 这些范数量包括对整个波形的积分处理的数学运算。

注: 无穷范数 ($P = \infty$) 是一个例外。虽然它也确实包含积分过程, 但其结果可通过对波形的简单检查就可以得出。

表 A.1 给出了高功率响应波形特性的 3 种常用范数。

表 A.1 波形 P 范数的例子

P 值	波形范数的属性	物理意义
1	$\int_{-\infty}^{\infty} R(t) dt$	响应的整流冲击脉冲值
2	$\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} R(t) ^2 dt \right\}^{1/2}$	作用积分的平方根
∞	$ R(t) _{\max}$	响应的峰值

表 A.1 所用的范数通常用于描述高功率电磁响应特性。表 A.2 给出了通常用于描述波形特性参数的 $N_1 \sim N_5$ 的范数, 以及范数特殊用途的说明。

表 A.2 用于高功率瞬态波形的时域波形范数

P 范数	范数定义	名称	应用举例
$\ R\ _{\infty}$	$N_1 = R(t) _{\max}$	峰值(绝对值)	电路翻转
n/a	$N_2 = \partial R(t)/\partial t _{\max}$	上升率的最大值(绝对值)	元器件发生电弧; 电路翻转

表 A.2 用于高功率瞬态波形的时域波形范数 (续)

P 范数	范数定义	名称	应用举例
n/a	$N_3 = \left \int_0^t R(x) dx \right _{\max}$	脉冲峰值(绝对值)	绝缘击穿(如 R 表示电场)
$\ R\ _1$	$N_4 = \int_0^{\infty} R(x) dx$	整个冲击脉冲的整流	设备损坏
$\ R\ _2$	$N_5 = \left\{ \int_0^{\infty} R(x) ^2 dx \right\}^{1/2}$	作用积分的平方根	元器件烧毁

A.3 波形频谱

另一种有用的波形特性就是频谱 $\tilde{R}(f)$,它是频率 f 的复值函数,对于无限长连续瞬态响应 $R(t)$,由参考文献[A.2]确定的傅里叶积分变换来定义:

$$\tilde{R}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t) e^{-j2\pi ft} dt \dots\dots\dots (A.2)$$

注:注意参考文献[2]中用 $\exp(-j\omega t)$ 来表示时域谐波信号,而本文件按照传统工程表示法,即 $\exp(j\omega t)$ 。

通常,对于测得的瞬态响应,函数 $R(t)$ 并不是在所有时间上是已知的,仅是 N 个离散时间点 t_i 的采样函数,采样时间在 $t=0$ 到 $t=T_{\max}$ 时间段内均匀分布。这就导致在采样点之间的时间差 $\Delta t = T_{\max}/(N-1)$,同时意味着频谱是频率的周期性函数,且基本频谱是定义在由奈奎斯特频率限值 $\pm F_{\max} = 1/(2\Delta t)$ 确定的频率范围之内。在这个频率范围之外,频谱重复。因而,如果响应波形是限带的(即如果没有超过最大频率 F_{\max} 的频率较大分量),则可由离散时间采样值充分表示。这就是采样定律。

此外,公式(A.2)的数值计算中,也可由离散频率点 f_k 来计算响应,积分的简单近似是:

$$\tilde{R}(f_k) \approx \Delta t \sum_{i=0}^{N-1} R(t_i) e^{-j2\pi f_k t_i} \dots\dots\dots (A.3)$$

求解公式(A.3)的离散傅里叶转换时,频率点可选择 $f_k = k/(N\Delta t)$,式中 $k = -N/2, \dots, N/2$ 。注意到频谱的采样间隔, $\Delta f = 1/(N\Delta t) = 1/T_{\max}$ 。因而,瞬态记录的长度对频谱的低频分辨率有直接的影响。

频谱的离散特性表示瞬态响应也是时间的周期函数。离散频谱 $R(f_k)$ 既可以直接求和计算也可以用快速傅里叶变换计算,快速傅里叶变换是计算频谱的一种更快的方法。参考文献[A.2]给出了计算细节。

瞬态响应及其频域频谱分别是以 T_{\max} 和 F_{\max} 为周期的周期函数,这表明在使用它们时必须小心避免在时域和频域出现混淆。当响应或频谱从一周期延伸到另一个周期时频谱出现混淆,从而干扰了结果。因此,必须仔细检验所有计算的瞬态和频谱响应,避免混淆问题。

作为瞬态响应的频谱,图 A.3 给出了图 A.2 中振荡波形的频谱的幅值。相应的相位在图中没有给出。

图 A.2 所示的真正的时域波形包括 $N=1024$ 个点,全部时间为 $T_{\max} = 2.555 \mu s$ (尽管图中只给出了前 500 ns 的波形)。这样,采样时间 $\Delta t = T_{\max}/(N-1) = 2.497 \text{ ns}$ 。因而,图 A.2 中波形的奈奎斯特频率是 $F_{\max} = 1/(2\Delta t) = 200 \text{ MHz}$,频谱的采样间隔是 $\Delta f = 1/T_{\max} = 0.391 \text{ MHz}$ 。

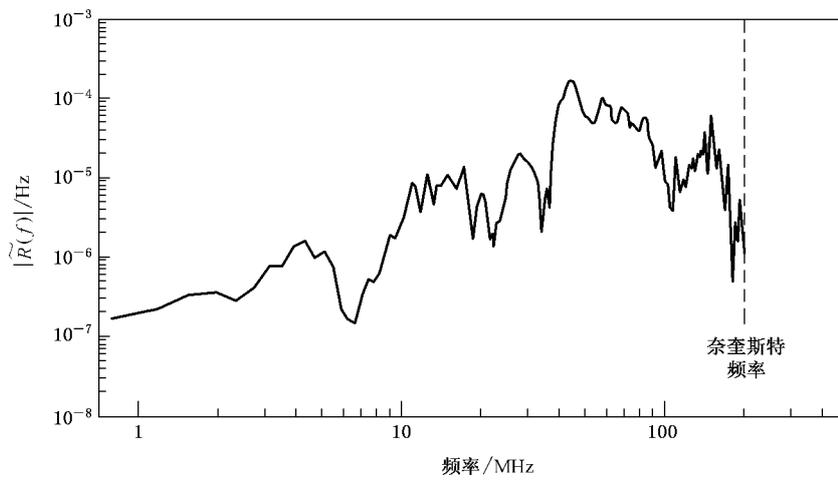


图 A.3 图 A.2 中波形的计算频谱幅值

A.4 参考文献

[A.1] Baum, C.E. Norms and Eigenvector Norms. Mathematics Notes, Note 63, Kirtland AFB, New Mexico, November 1979.

[A.2] Press, W H., et.al. Numerical Recipes, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.

附录 B
(资料性)
测量传感器的特性

B.1 自由场电场传感器

用于电场测量的传感器基本上是工作于远低于第一谐振频率的天线。在低频时,天线的响应与频率近似成比例关系,因此,可很简单地表述天线的特性。

图 B.1 给出了一个通用的电场传感器,与一个代表测量链路仪器的负载单元相连。这种传感器通常叫做“自由场”传感器,因为它被设计为远离任何可能干扰局部电场的物体工作。这种传感器可用图 B.1 右半部分的诺顿等效电路表示。

注:当然,也可以采用戴维南等效电路表示电场传感器。这将使传感器表示为与其等效高度的天线所激励电场有关的开路电压。而许多传感器的制造商倾向于用等效面积表征其传感器,因而多用诺顿电路。更多细节,参见参考文献[3]。

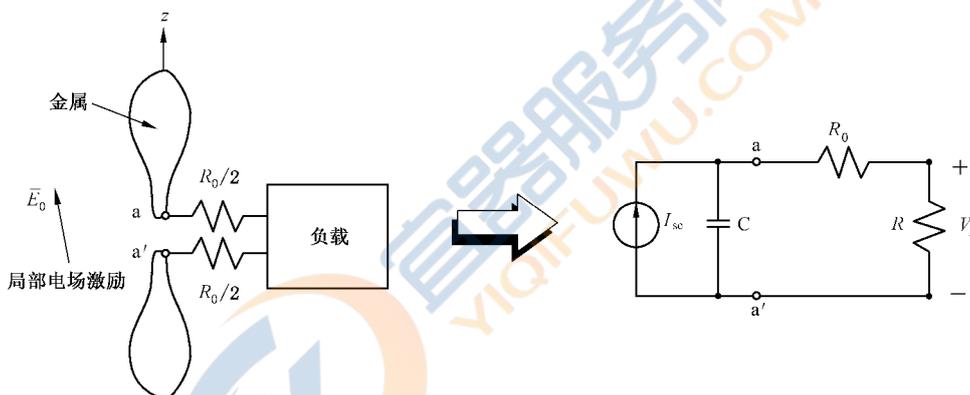


图 B.1 一个简单的电场传感器的示意图及其诺顿等效电路

传感器的短路电流源可看作由传感器附近激励电场在传感器的金属元件上的感应电荷随时间的变化率引起的。在时域可用传感器的等效面积 A_{eq} 很方便的表示如下:

$$I_{sc}(t) = \frac{\partial Q(t)}{\partial t} = -A_{eq} \frac{\partial}{\partial t} [\hat{Z} \cdot D_0(t)] \dots\dots\dots (B.1)$$

式中, $D_0(t) = \epsilon_0 E_0(t)$ 是位移电场, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m) 是真空的介电常数。

在频域, f 表示频率, $\omega = 2\pi f$ 表示角频率,诺顿电流源可表示成如下形式:

$$\tilde{I}_{sc}(\omega) = j\omega \tilde{Q}(\omega) = -A_{eq} j\omega [\hat{Z} \cdot \tilde{D}_0(\omega)] \dots\dots\dots (B.2)$$

低频情况下,当天线为电小尺寸,传感器阻抗可近似看作电容,因为传感器阻抗的实部(辐射电阻)可以忽略。当频率接近传感器的谐振频率,单个电容不再是合适的近似,此时需要一个更复杂的传感器阻抗表达式。

负载阻抗 R 表示由测量链路提供的负载。通常测量链路用 50Ω 的同轴电缆来连接各单元。因为电场传感器具有平衡输出,就需要用巴伦把这个平衡输出变换后送给 50Ω 的不平衡同轴电缆。因此,这个巴伦改变了线路的阻抗大小,传感器负载的有效阻抗通常是 100Ω 。4.3.3 中提供更多有关巴伦的信息。

除了测量装置的阻抗 R ,还有另一个阻抗 R_0 可能与设备相连。不是所有的电场传感器中都有这个阻抗,这个阻抗可用来调节传感器的工作状态,稍后即将谈及。

对诺顿等效电路的频域分析可得到负载上的电压响应:

$$\tilde{V}_L(\omega) = \frac{\tilde{I}_{sc}R}{1 + j\omega C(R + R_0)} = \frac{-j\omega A_{eq}R\epsilon_0\tilde{E}_{OZ}(\omega)}{1 + j\omega C(R + R_0)} \dots\dots\dots(B.3)$$

式中, \tilde{E}_{OZ} 表示频域中 Z 方向的外电场。定义归一化频率函数 $\tilde{F}(\omega\tau)$:

$$\tilde{F}(\omega\tau) = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau} \dots\dots\dots(B.4)$$

公式(B.3)中电场传感器的负载电压的通用表达式就变成:

$$\tilde{V}_L(\omega) = -\frac{A_{eq}\epsilon_0}{C} \frac{R}{(R + R_0)} \tilde{F}(\omega\tau_{RC}) \tilde{E}_{OZ}(\omega) [这里 \tau_{RC} = (R + R_0)C] \dots\dots\dots(B.5)$$

或等价于:

$$\tilde{V}_L(\omega) = \tilde{T}_{sensor}(f) \tilde{E}_{OZ}(f) \dots\dots\dots(B.6)$$

最后一个方程定义了整条测量链路中用于表示电场传感器的频域传递函数 $\tilde{T}_{sensor}(f)$ 。通常 \tilde{T}_{sensor} 指传感器的等效高度,用 $h_e(f)$ 表示。

公式(B.4)中的函数 F 给出了传感器工作的幅频和相频特性曲线,如图 B.2 所示。在频率足够低时, $\omega\tau \ll 1$, 频率函数与 $j\omega$ 成正比,表示传感器响应与电场的变化率成正比。在高频情况下, $\omega\tau \gg 1$, 频率函数是一个常数,表示传感器响应与电场成正比。在这两个区域之间,传感器的响应从一种特性到另一种特性平滑过渡。在图 B.2 中表示了这些区域。

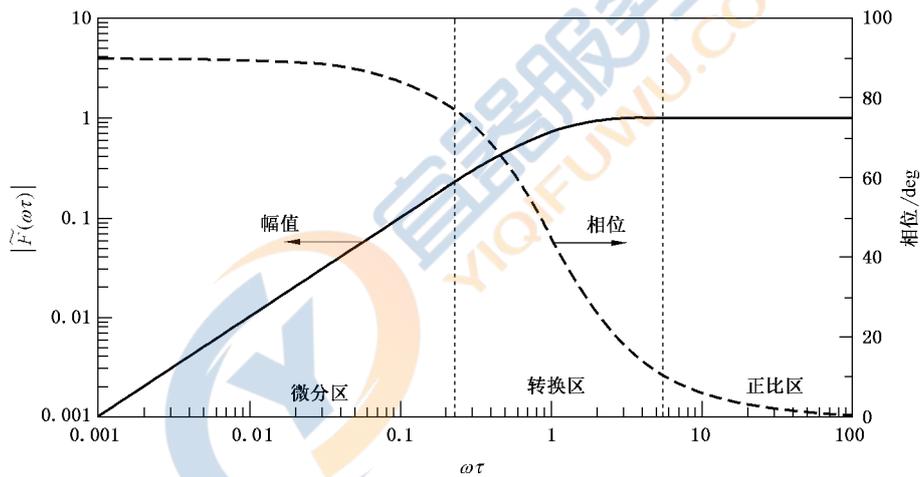


图 B.2 场传感器的归一化频率函数的幅频相频特性

B.1.1 微分传感器(D-dot)

通过选择传感器合适的设计参数,可使得它响应外加电场的变化率。例如,如果公式(B.5)中的 RC 时间常数 τ_{RC} 选的非常小,响应将与 $j\omega$ 成正比,这样,这个传感器就成了一个微分器件。可通过忽略阻抗 R_0 , 令 $1/\tau_{RC} = 1/(RC) \gg 2\pi f_{max}$ 来实现,式中 f_{max} 是该传感器频谱的最大频率。

在这些假设下,公式(B.5)的负载电压为:

$$\tilde{V}_L(\omega) \approx -j\omega A_{eq}R\epsilon_0\tilde{E}_{OZ}(\omega) (R_0 = 0; \quad 2\pi f \ll 1/RC) \dots\dots\dots(B.7)$$

在时域,负载电压的表达式为:

$$V_L(t) \approx -A_{eq}R\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} [E_{OZ}(t)] \dots\dots\dots(B.8)$$

这个表达式对所有上升时间 $t_r \ll RC$ 的待测电场都成立。

这种传感器之所以成为微分传感器,是由于它们的响应与电位移矢量 D (或者是电场强度 E) 的变化率(微分)成正比。传感器制造商通常用等效面积 A_{eq} 和最大截至频率 $f_{max} = 1/(2\pi RC)$ 而不是用内

部电容和电阻来说明此类传感器。这种方式下,制造商通常认为这种传感器工作时的有效负载阻抗为 100 Ω。如果这种传感器使用其他负载,或工作在响应不是简单的 $j\omega$ 的比例的频率范围的情况下,必须采用公式(B.5)的更通用的校验函数从传感器测得的电压来得到原电场。

当电场传感器用于微分模式(即测量电场的变化率),应对其响应积分来得到真实的电场值。如本文件的图 1 所示,可通过在测量链路中加入积分装置来实现,也可在数字处理时用软件来实现。

B.1.2 直接电场传感器

通过改变电场传感器的参数,可使得传感器直接响应激励场,而不是它对时间的变化率(对时间的微分)。通过选择公式(B.5)中的 RC 时间常数使得 $1/\tau_{rc} = 1/(R + R_0)C \ll 2\pi f_{min}$, 式中 f_{min} 是测得频谱的最小频率,负载电压就变为:

$$\tilde{V}_L(\omega) = -\frac{A_{eq}\epsilon_0}{C} \frac{R}{(R + R_0)} \tilde{E}_{Oz}(\omega) [2\pi f \ll 1/(R + R_0)C] \dots\dots\dots (B.9)$$

由于 R 的固定阻值为 100 Ω,为了满足 $1/(R + R_0)C \ll 2\pi f_{min}$,既可以增大串联电阻 R_0 也可以增大电容 C 。如公式(B.5)所示,任何做法都将降低传感器的灵敏度。

在设计这种直接响应传感器时,通常改变电阻元件。对给定固定尺寸的传感器,不同的阻值 R_0 可调整它的带宽。

B.2 自由场磁场传感器

图 B.3 所示的自由场磁场传感器与电场传感器电气对偶。随时间变化的磁通量(Φ)穿过线圈时将在负载阻抗上感应出可以测量的电压。对于足够低的瞬态激励场(诸如上升时间远长于其穿过线圈的短暂时间),线圈的开路戴维南电压源可表示如下:

$$V_{oc}(t) = \frac{\partial \Phi(t)}{\partial t} = A_{eq} \frac{\partial}{\partial t} [\hat{z} \cdot \vec{B}_0(t)] \dots\dots\dots (B.10)$$

式中, $\vec{B}_0(t)$ 是穿过线圈的磁通量密度, A_{eq} 是传感器的等效面积。它的频域表达式为:

$$\tilde{V}_{oc}(\omega) = j\omega \tilde{\Phi}(\omega) = A_{eq} j\omega [\hat{z} \cdot \vec{B}_0(\omega)] = A_{eq} j\omega \mu_0 [\hat{z} \cdot \vec{H}_0(\omega)] \dots\dots\dots (B.11)$$

这个表达式表明,磁场强度 H 和磁通密度 B 通过 $B = \mu_0 H$ 相关,式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) 是真空的磁导率。

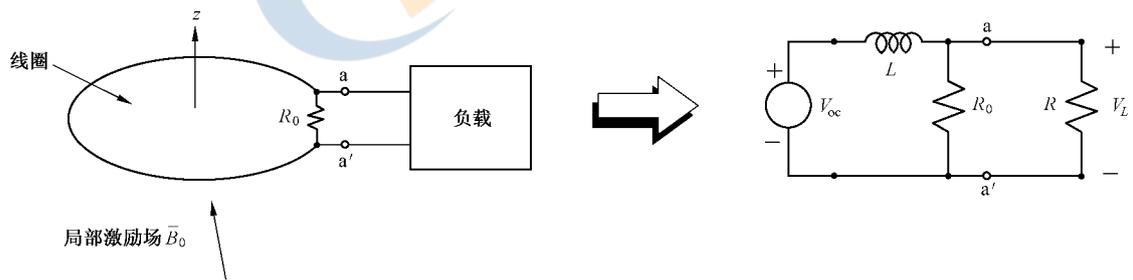


图 B.3 一个简单的磁场传感器的示意图及其戴维南等效电路

如图 B.3 所示,测量线圈的两端可能存在并联电阻 R_0 ,整个线圈的负载电阻就是并联电阻 R_0 和测量链路阻抗 R 的并联。整个阻抗为

$$R_t = \frac{RR_0}{R + R_0} \dots\dots\dots (B.12)$$

给出传感器的测量电压如下:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_L(\omega) &= \frac{\tilde{V}_{oc}}{1 + j\omega L/R_t} \\ &= \frac{j\omega A_{eq} \tilde{B}_{oz}(\omega)}{1 + j\omega L/R_t} \\ &= \frac{A_{eq}}{\tau_{RL}} \tilde{F}(\omega\tau_{RL}) \tilde{B}_{oz}(\omega) \text{ (这里 } \tau_{RL} = L/R_t) \\ &= \tilde{T}_{sensor}(f) \tilde{B}_{oz}(f) \dots\dots\dots (B.13) \end{aligned}$$

公式(B.13)中的函数 $\tilde{F}(\omega\tau_{RL})$ 仍由公式(B.4)给出,但现在其时间常数为 $\tau_{RL} = L/R_t = L(R + R_0)/(RR_0)$ 。

B.2.1 微分传感器(B-dot)

对于确定的传感器参数,传感器响应可用于测量激励磁场的变化率。例如,如果 $1/\tau_{RL} = R_t/L \gg 2\pi f_{max}$,传感器的频域响应近似为:

$$\tilde{V}_L(\omega) = j\omega A_{eq} \tilde{B}_{oz}(\omega) \dots\dots\dots (B.14)$$

时域表达式为:

$$V_L(t) \approx A_{eq} \frac{\partial}{\partial t} B_{oz}(t) \dots\dots\dots (B.15)$$

可通过去掉并联电阻($R_0 = \infty$)来满足 $R_t/L \gg 2\pi f_{max}$ 的要求。

跟电场传感器一样,制造商通常假定负载电阻标称值为 100Ω ,用等效面积 A_{eq} 和最大工作带宽 $f_{max} = R/(2\pi L)$ 来描述磁场传感器。

B.2.2 直接磁场传感器

和电场传感器类似,恰当的加载感应线圈,可使得它直接响应磁场。如果 $1/\tau_{RL} = R_t/L \ll 2\pi f_{min}$,式中 f_{min} 是待测频谱的最小频率,负载电压表示为:

$$\tilde{V}_L(\omega) = \frac{A_{eq}}{\tau_{RL}} \tilde{B}_{oz}(\omega) = \frac{A_{eq}\mu_0}{\tau_{RL}} \tilde{H}_{oz}(\omega) \dots\dots\dots (B.16)$$

可通过减小线圈负载阻抗 R_0 至近似于短路使得 $1/\tau_{RL}$ 足够小,然而这样会减小测得的电压。因此,应权衡传感器的最小截止频率和对测量回路的电压输出水平。

B.3 电场(或表面电荷)地面传感器

研制可在导体附近正常工作的电磁场传感器是可能的。假定传感器安放在无限大地平面上,可用镜像原理来制作这种传感器。比如电场的测量,图 B.4 给出了安放在导体表面的电场传感器的布置图。这个传感器实际上是图 B.1 中自由场传感器的一半,另一半为地面下的镜像。

对图 B.4 所示的传感器,图 B.1 中给出的自由场传感器的等效电路同样适用,只是它的等效面积 A_{eq} 是自由场传感器的一半,而电容是它的两倍。另外,这种类型的传感器的输出是不平衡的(同轴的),专为 50Ω 阻抗等级的测量链路设计。因此,这种类型的传感器不需要巴伦。

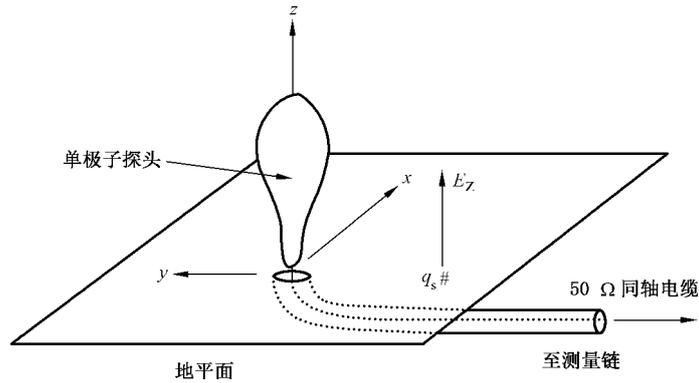


图 B.4 放置在地面上测量垂直电场或表面电荷密度的电场传感器示意图

在地面上,电场的切向分量为零(假设为理想导电地面),只有电场的垂直分量(Z 方向),就是这个分量作用在传感器上。

注:注意在这里所讨论的所有电磁场传感器,所测量的总的电磁场,是由入射场和传感器附近物体反射场相加构成的。在传感器安装在地面上的情形下,散射场与入射场的幅值相当,这时满足切向电场为零和垂直磁场为零的边界条件。

这种传感器都是典型的微分传感器,其(50 Ω 负载两端的)电压由公式(B.7)和公式(B.8)确定。在这种情况下,传感器内部负载阻抗 R_0 为零,这样就能保证传感器能测量电场的变化率。

在平面导体上,电通量 D 必须终止于电荷密度 q_s 。即为边界条件

$$D_{Oz} = \epsilon_0 E_{Oz} = q_s (\text{coulombs/m}^2) \dots\dots\dots (B.17)$$

该式表明图 B.4 中的传感器实际测量的是对局部表面电荷密度的响应。因此公式(B.7)的频域表达可由 q_s 写成:

$$\tilde{V}_L(\omega) = -j\omega A_{eq} R \tilde{q}_s(\omega) \quad (R_0 = 0; \omega \ll 1/RC) \dots\dots\dots (B.18)$$

负载电压的时域表达为:

$$V_L(t) \approx -A_{eq} R \frac{\partial}{\partial t} [q_s(t)] \dots\dots\dots (B.19)$$

B.4 磁场(或表面电流)地面传感器

与在地面使用镜像传感器测量电场类似,可用半环结构测量地面的磁场强度。如图 B.5 所示。

可用图 B.3 所示的戴维南等效电路建模表征该传感器的电气特性,同样采用镜像原理,注意到它的等效面积 A_{eq} 是同尺寸全环的一半,电感 L 也是全环的一半,输出通过不平衡同轴电缆馈接 50 Ω 负载。

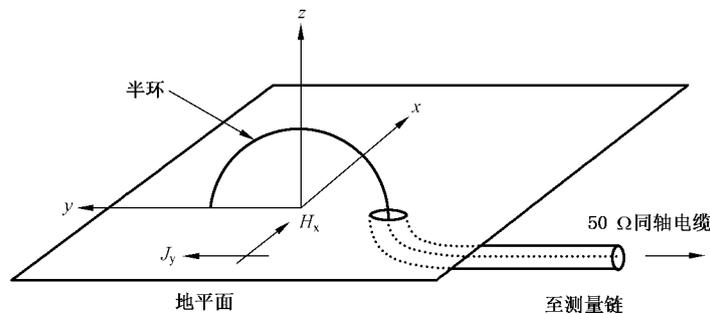


图 B.5 用于测量磁场切向分量或表面电流密度半环磁感应强度传感器示意图

该传感器设计时移除内部负载电阻($R_0 = \infty$),使得它的响应特性与场变化率成正比。由传感器对 B_x (或 H_x)场分量的响应得到的,在 50Ω 负载两端测得的电压可由公式(B.14)和公式(B.15)给出。

在导电大地表面,磁场的切向分量和表面电流 J_s 通过以下的边界条件相关:

$$\vec{J}_s = \hat{Z} \times \vec{H}_{\text{tan}} \text{ (A/m)} \quad \dots\dots\dots \text{(B.20)}$$

因此,图 B.5 所示的适用于对 H_x 场分量响应的传感器,可当作测量频域表面电流的 J_y 分量:

$$\tilde{V}_L(\omega) \approx j\omega A_{\text{eq}}\mu_0 \tilde{J}_y(\omega) \quad \dots\dots\dots \text{(B.21)}$$

时域表达式表示如下:

$$V_L(t) \approx A_{\text{eq}}\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} J_y(t) \quad \dots\dots\dots \text{(B.22)}$$

B.5 有源传感器

有源传感器包括内部电子电路,可对测量信号执行一些信号处理。例如,这种传感器可能包括有源积分电路,这样就可以去掉测量链路的积分器。另外,这种传感器可提供更好的噪声特性,从而提高了测量链路的灵敏度。

当然,像测量链路中的光纤等单元,有源传感器需要外部供应电源,这就需要定期的维修,有些情况下带来一些不便。

有源传感器可从电磁场测量设备提供商得到,由于它们设计复杂,所以比无源传感器要昂贵的多。但在有些特殊方面的应用,对它们可能非常有用。

B.6 波形包络探测传感器

测量调幅 HPEM 信号时,通常只需要了解脉冲形状和幅值。如果接收信号已经在传感器处由高速二极管解调的情况下,可使用慢速数字记录仪和光纤链路。这个过程不会记录调制信号。使用第 6 款的概念选择和校验探测二极管是关键的,宜认真考虑。二极管接在巴伦的后面,这种测量不需要积分器。

B.7 导线电流传感器

传感器也可用于测量导线中流过的电流。这通过先测线路周围磁场,然后换算成线电流。图 B.6 给出了这种传感器的示意图,通过适当选择参数,可使得它直接反应电流,而不是电流的变化率。

在频域,下式给出传感器线圈感应的开路电压:

$$\tilde{V}_{oc}(\omega) = j\omega\tilde{\Phi}(\omega) = j\omega M\tilde{I}(\omega) \quad \dots\dots\dots \text{(B.23)}$$

式中, $I(\omega)$ 为线电流, M 是导线和感应线圈的互感。对这种感应线圈,图 B.3 的戴维南等效电路可以用来确定负载电阻上的感应电压。对于这种类型的传感器,输出一般为 50Ω 的不平衡负载,所以不需要巴伦。

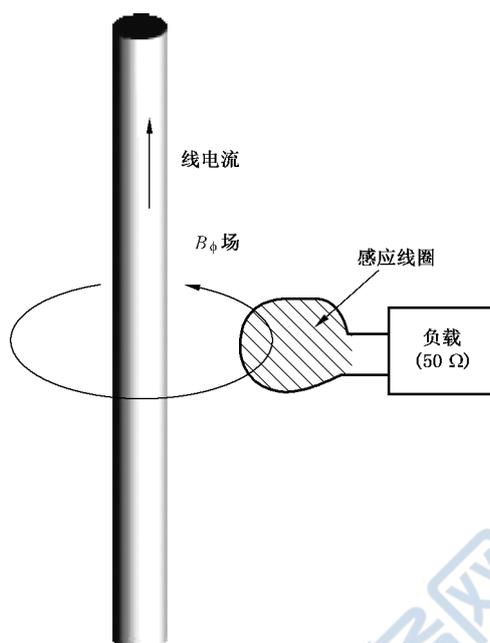


图 B.6 测量线电流的简化示意图

B.7.1 自积分电流传感器

“自积分”是指测得的波形不需要进一步的积分来还原的原始激励电流波形。这类电流传感器的实际构造比图 B.6 所给的示意图要复杂得多。图 B.7 给出了传感器主要的结构。首先,为了增加传感器的灵敏度,感应线圈是多匝的(N 匝),缠绕在高相对磁导率 μ_r 的磁物质周围,内径为 r_1 ,外径为 r_2 ,厚度为 w 。磁心用来增加穿过线圈的磁通量。另外,在传感器的输出端设置调谐电阻 R_0 ,用来调整传感器的低频带宽。

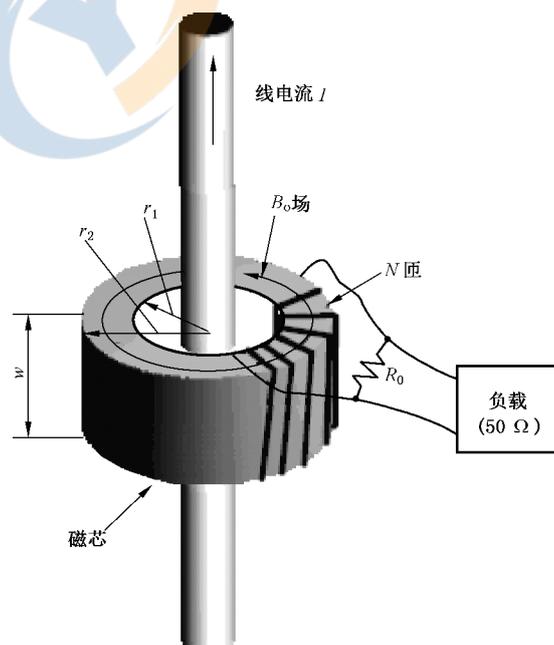


图 B.7 电流传感器的详细构造

这种传感器 N 匝线圈的互感可表示如下：

$$M = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} N \omega \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \dots\dots\dots (B.24)$$

这种传感器可自积分。对其用图 B.3 所示的等效电路，开路电压由公式(B.23)给定，假设调谐电阻 R_0 的阻值很小，50 Ω 负载上的感应电压可表示如下：

$$\begin{aligned} \tilde{V}_L(\omega) &= \frac{j\omega M \tilde{I}(\omega)}{1 + j\omega L/R_t} \\ &\approx \frac{M}{\tau_{RL}} \tilde{I}(\omega) \text{ (这里 } \tau_{RL} = L/R_t \text{)} \dots\dots\dots (B.25) \end{aligned}$$

式中， $\tau_{RL} = L/R_t$ 是感应线圈的时间常数， L 是 N 匝线圈的自感， R_t 是 R_0 和 50 Ω 电阻的并联， R 由公式(B.12)确定。当满足 $1/\tau_{RL} = R_t/L \ll 2\pi f_{\min}$ 时，公式(B.25)对大于 f_{\min} 的所有频率都适用。后一个要求是通过使调谐电阻 R_0 足够小实现的。

公式(B.25)中的参数 M/τ_{RL} 的单位为 Ω ，这种传感器通常用实数参数表征其特性，记为传感器阻抗 Z_P 。这样，传感器在 50 Ω 电阻负载上的感应电压可表示为：

$$\tilde{V}_L(\omega) \approx Z_P \tilde{I}(\omega) \dots\dots\dots (B.26)$$

只要工作频率大于 f_{\min} ，该表达式都适用。

电流传感器的阻抗为频率的函数，图 B.8 给出了标称阻值为 1 Ω 的电流传感器在 1 000 Hz ~ 200 MHz 频率范围内的传感器阻抗幅值曲线。从曲线上很明显看到传感器低于频率 $f_{\min} \approx 0.2$ MHz 下的微分特性。在这个频率以上，传感器阻抗曲线很平滑，阻值大约为 0.95 Ω ，略小于它的标称值 1 Ω 。

应记住，传感器的阻抗通常为复值函数，如果传感器用于不满足公式(B.26)的频率范围，必须采用公式(B.25)第一行中的更复杂的等式来计算得到响应。

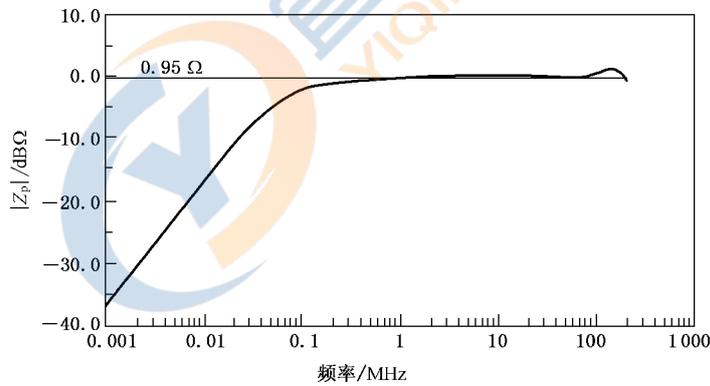


图 B.8 标称 1 Ω 电流传感器的阻抗幅值特性曲线

B.7.2 嵌入式微分电流传感器

嵌入式电流传感器是一种可嵌入管状导体来测量外部电流的传感器。这种传感器的输出引线在管状导体中，向两端延伸到导体端部，因而对外部电流特性没有干扰。

这种传感器响应的是线电流的变化率，几何尺寸如图 B.9 所示。在导体的外部圆周进行环形切割，形成了一个内部传感器腔。整个的几何尺寸是旋转对称的。这个腔可用作感应线圈，测量导体电流产生的磁场。

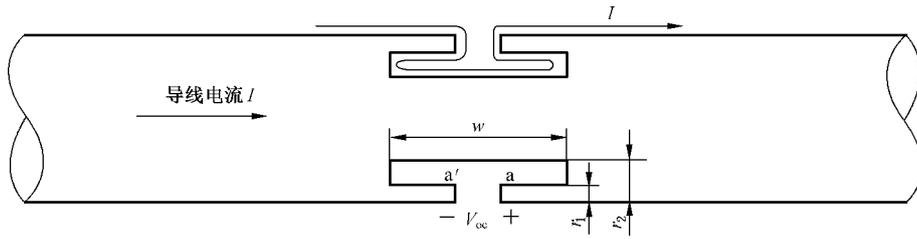


图 B.9 嵌入式微分电流传感器的几何尺寸

感应腔内的磁通量将在端子 a-a' 上产生电压。感应间隙的开路电压通过同轴电缆(图中未标出)馈至测量设备。对于这种电流传感器,图 B.3 的等效电路仍然适用,间隙的开路电压可由公式(B.23)给出。这种情况下,腔的互感可由公式(B.23)得到,式中 N 和 μ 等于 1。

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \omega \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \dots\dots\dots (B.27)$$

假设这种传感器没有调谐电阻($R_0 = \infty$), 50Ω 负载上电压响应的频域表达为:

$$\tilde{V}_L(\omega) = j\omega M \tilde{I}(\omega) \dots\dots\dots (B.28)$$

时域表达为:

$$V_L(t) = M \frac{\partial I(t)}{\partial t} \dots\dots\dots (B.29)$$

在制造传感器时可采用多个感应间隙,这将改变互感值。不过,这种传感器的制造商在提供性能参数时,将给出传感器的总互感系数 M 和传感器的带宽。

B.8 同轴电缆电流传感器

测量同轴电缆内的电流的传感器同样引起广泛的兴趣。下面将予以讨论。

B.8.1 自积分同轴电流传感器

对同轴电缆,有一些不同类型的传感器可用于测量电流。最简单的就是用分接箱,用于嵌入同轴电缆,且有同轴连接成 B.7.1 所述那类自积分电流传感器的内部导体。这种传感器的设计概念如图 B.10 所示。这种传感器的分析方法和它的特性同前面条款描述的一样。

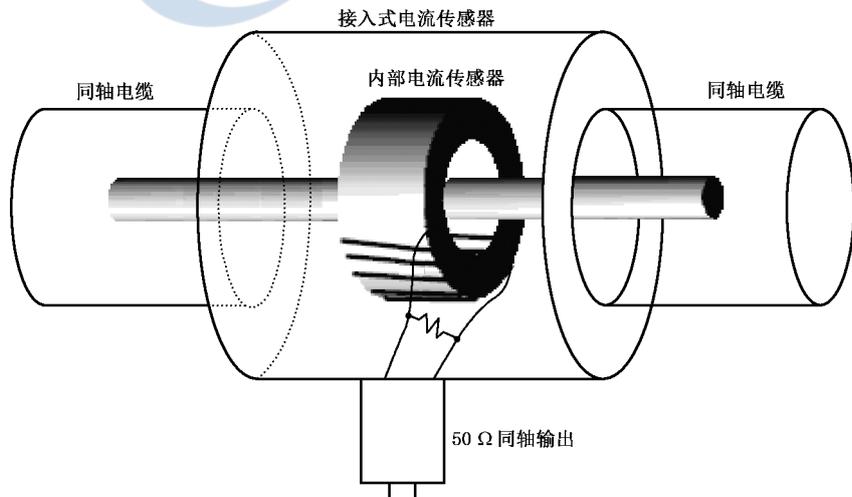


图 B.10 同轴电缆电流传感器设计概念

有几种不同类型的这种同轴电缆电流传感器可用,图 B.11 给出了一种常用的传感器的尺寸和形状。这是传感器阻抗为 $1\ \Omega$,带宽从 20 kHz 到 400 MHz,最大可通过 1 A 的均方根电流的 CIP-10 传感器。两种类型的 GR 接头用来连接同轴电缆,用 N 型电缆接头输出传感器的输出信号。

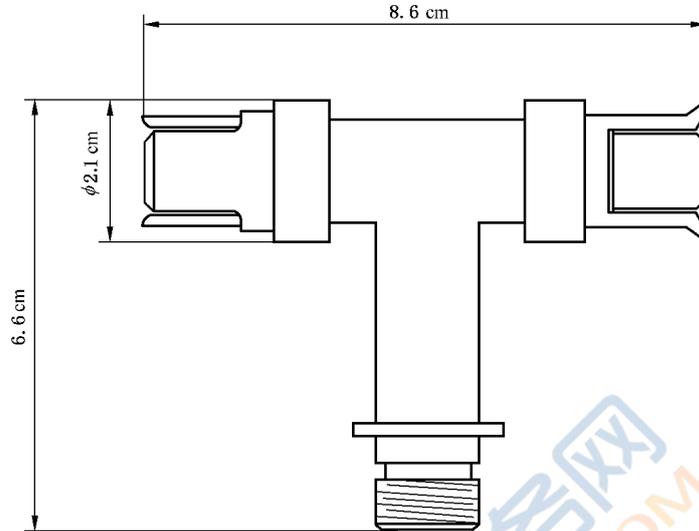


图 B.11 CIP-10 同轴电缆电流传感器的形状和尺寸

B.8.2 微分同轴电缆电流传感器

另一种类型的电流传感器可用于检测同轴形状导体的电流。这种传感器与 B.7.2 介绍的嵌入式微分传感器类似。它的响应的是同轴电缆线电流的变化率,它的几何尺寸如图 B.12 所示。

在这种传感器的同轴电缆的外层有一个环形切口,传感器腔放置在这个位置的线上。这个腔作为感应线圈,测量由同轴电缆内部导体电流产生的磁感应强度(电缆外部导体上的回流从传感器腔的外部表面流过,因此不对测试腔产生磁场的作用)。

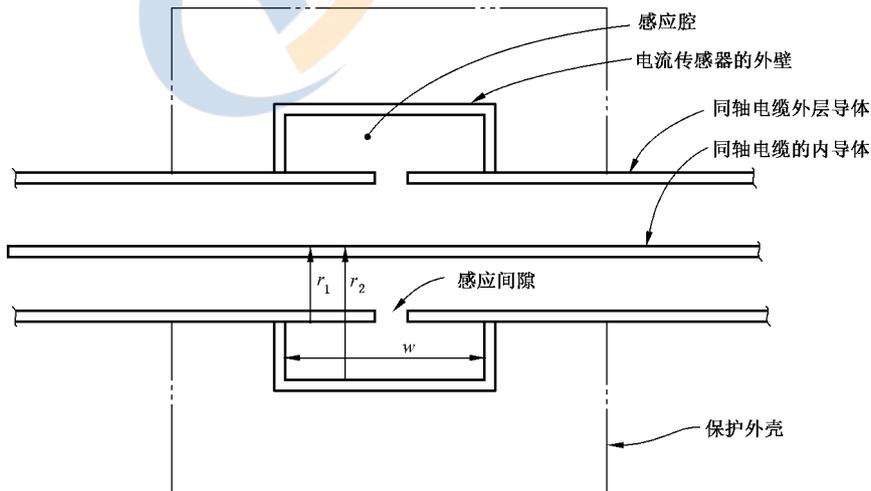


图 B.12 微分同轴电缆电流传感器的结构示意图

负载电压(端接在感应间隙的 $50\ \Omega$ 负载两端)可用图 B.3 的等效电路计算,电压可由公式(B.28)确定,互感 M 可由公式(B.27)确定。

B.9 低频传感器

虽然附录前面介绍的大多数传感器都是用来测量从 100 kHz~1 GHz 频率范围的高频信号或快速瞬态信号的,但有时候要测量频率非常低的信号。比如说 EMP 晚期信号(比如说磁流体动力电磁脉冲信号,或 MHD EMP),根据 IEC 61000-2-9,这种信号的频谱从几 Hz 甚至更低开始。

由于这种信号的频率这么低,通常可以使用测量准直流信号的测量方法。其中包括:

- 用低阻值监测电阻器与载流的导体串连,用标准的电压测量设备测量电阻器上的电压,把设备连接到数据记录仪或者计算机记录对时间的响应。最小采样频率宜为电流频谱的最大频率的两倍。
- 使用电压分压电路和用于电流测量的标准低频电压测量设备一起进行的导线电压测量。
- 可用半导体霍尔传感器测量的低频磁场。该设备中,在合适的半导体晶体上有一印刷模或是薄片。这个薄片具有通过半导体流过已知电流的端子,也具有感应由施加于晶体的磁通产生霍尔电压的端子。这种传感器检测垂直于晶体表面的磁通分量并给出与磁通成比例的电信号。这类传感器通常称作磁通计。



附 录 C
(规范性)
HPEM 测量程序

C.1 试验计划

鉴于测量系统或单元对 HPEM 的感应响应的确定要求,应制定详细的试验计划。这个计划应充分考虑细节问题,使一个事先对系统或现场缺乏了解的具有一定知识的技术人员可以根据计划成功的进行测试。

这样一个试验计划应包括以下项目:

- 整体试验目的和目标的摘要;
- HPEM 危害的定义(即,待测设备或系统的电气危害);
- 数据处理概念的表述及如何处理数据的例子;
- 优先测试点和测得响应量定义的清单;
- 如果有些优先试验点不可测量,宜制定其他补充试验点或测量的备用清单;
- 所需测量设备和材料的清单;
- 所有必备人员和他们在试验中的任务清单;
- 物理尺寸测量结果(蓝图等);
- 与试验相关的其他问题的讨论;安全、个人安全、运输要求和其他后勤;
- 进度时间表;
- 试验报告和文档要求。

试验实际上是一个不断完善的过程。试验前的预测结果很少与测试结果一致。随着试验的进行,可出现很多不同的测量点和新的系统信息。因此,为进一步了解系统特性,可能要求额外的测试。

考虑到这种可能性,重要的是可在试验过程中修正试验方案。测试计划只是试验的初级指导,不宜看作是不能更改的计划。然而,修改时宜经过考虑并咨询所有对试验有一定见解的试验人员。

C.1.1 进行试验

试验负责人

试验计划的详细要求给试验的进行提供指南。试验负责人负责保证执行这一指南。所有成功的试验都只能有一个负责人。试验负责人应对试验决策和背离试验计划以及其他管理行为有最终权威。当缺少试验负责人时,应任命代理试验负责人。

每日审查数据的会议

在长时间(大于 3 d)的试验过程中,应每日召开所有试验人员参加的会议,审查已经测量的数据并规划明天的测量计划。这个很重要,可以使每个试验人员明白当前试验的情况,试验中的问题,以及任何所需的试验计划的修改。

测量数据

试验应根据试验计划开展,并随只有试验负责人才能修改的试验计划而相应变化。一旦测量完毕,应画出原始数据曲线,把曲线存入试验日志。这样可以保证即时估计数据质量。

应经常进行噪声测量以保证正在进行的测量是正确的且测试具有良好的信噪比。当然,这种测量宜在试验计划中提前计划。

同步测量与分析

测量中,应分析试验数据。这个很重要,因为处理数据的过程可看作对刚测到的数据质量的检验。

最好是在试验后一两个小时内知道数据的有效性,而不是到了试验最后而无法补救。

此外,实时的数据分析可为试验负责人提供基于结果分析的对试验计划可能修改的指南。

数据存档

试验数据典型地由测量计算机上的波形记录仪(数字化仪)获取,然后传给分析工作站处理试验数据。这意味着这些计算机上应有两个备份的数据。备份和冗余数据是至关重要的。

在试验过程中,分析人员可找到数据的问题,需要手动校准数据(异常数据或不准确的头信息)或重新测量。任何情况都必须在试验日志中详细记录,并对实验数据恰当的批注。对原始数据进行了这些校准后,这些数据应下载到磁盘或磁带存储起来。

修正试验计划

如上所述,试验必须灵活以解决在试验中出现的突发问题。如果试验负责人在与其他试验人员商量后修正了试验计划,应对这个修正及修正合理性的讨论有文字记录,对新的测量方法应详细描述。某种意义上,这就像试验计划的附录,这很重要,因为试验结束后,试验人员很可能忘记了为什么要进行某种修正。

C.1.2 测量的质量保证

为了保证测量精确,能反应待测系统的真实响应,宜考虑以下几条:

- a) 在开展待测系统的任何测量之前,关掉外部 HPEM 激励,并把测试设备置于正常状态,然后测试系统对周围环境的响应。
- b) 在电缆终端用匹配阻抗代替传感器(或把传感器从待测激励场可靠屏蔽掉),检查测量系统噪声电平。如步骤 1,外部 HPEM 环境宜关闭。
- c) 用第 6 章介绍的程序校验电磁场传感器或电流传感器和测量链路。
- d) 尽量用 $2n$ 个点(512、1 024 等)的等间隔来采样任何波形,避免对测量数据的插值。
- e) 对每个试验点通过多次测量确保所有测量的可重复性。
- f) 倒换传感器极性(如果可能的话),确认传感器的位置不是测量中的控制因素。
- g) 在试验日志中记录所有观察结果和试验结果。

附录 D

(资料性)

测量链路单元的双端口表达法

D.1 介绍

本文件图 D.1 所示的测量链路由几级可用输入端和输出端的线性关系来描述的双端口电路级联而成。这样,测量链路中每个电气单元(例如巴伦、衰减器、积分器等)都可用与其他单元、源或负载电路特性无关的量表示出来。本附录给出了几种对双端口电路的不同表示的通用方法。

图 D.1 给出了一种通用的两个电流电压定义端口的双端口网络,为方便计,如图中所示正电流流入网络。假定电路为线性的,这种电路端口的电气特性完全由电流电压的关系来确定。

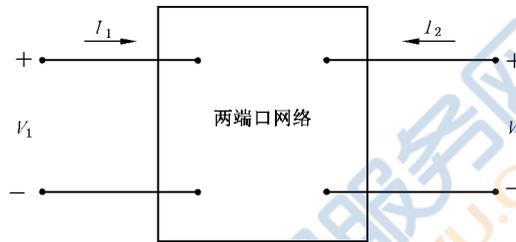


图 D.1 通用双端口网络的电压电流关系

D.2 开路阻抗参数

如参考文献[D.1]中所介绍的,描述网络的一种方法就是用矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中的矩阵元素 z_{ij} 为开路阻抗参数。这种矩阵叫做双端口网络的 Z 矩阵。式中的每个阻抗单元可通过计算(或测量)另一个端口开路时的选择端口电压和电流来确定,即:

$$z_{11} = \left. \left(\frac{V_1}{I_1} \right) \right|_{I_2=0}, z_{12} = \left. \left(\frac{V_1}{I_2} \right) \right|_{I_1=0} \text{ 等} \dots\dots\dots (D.2)$$

如单端口电路的戴维南或诺顿等效电路,公式(D.1)的双端口表达式只在网络的两个端口适用。双端口内部的所有响应信息都丢失了。

无源线性电路本质上都是可互换的,即互易性。就 Z 矩阵中的所有单元而言,根据互易原理:

$$z_{12} = z_{21} \dots\dots\dots (D.3)$$

因此,这种类型的双端口网络只需要测量三个独立的阻抗参数来表示。

D.3 短路电流导纳参数

如果 Z 矩阵式(D.1)的逆矩阵存在,则给出了端口电流用端口电压的与诺顿等效电路类似的表达式。这种对偶表示法由导纳矩阵或 Y 矩阵给出,其形式如下:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (D.4)$$

对于对称网络, $Y_{12} = Y_{21}$ 。与 Z 矩阵类似,单个的 Y 矩阵元素可通过计算或测量当一个端口短路时另一个端口的电流和电压。这些元素可按如下得到:

$$y_{11} = \left. \left(\frac{I_1}{V_1} \right) \right|_{V_2=0}, y_{12} = \left. \left(\frac{I_1}{V_2} \right) \right|_{V_1=0} \text{ 等} \dots\dots\dots (D.5)$$

D.4 链参数(ABCD)

假设双端口网络是线性的,端口电压和电流的其他组合也能用来描述它的电气特性。对级联电路的有用参数为链参数。链参数也叫做 ABCD 或传递参数,由矩阵定义如下:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I'_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (D.6)$$

图 D.2 给出了链参数的端口电压和电流的位置和起止方向。端口 2 的电流方向与 Z 参数和 Y 参数的定义相反,这个电流记做 I'_2 。

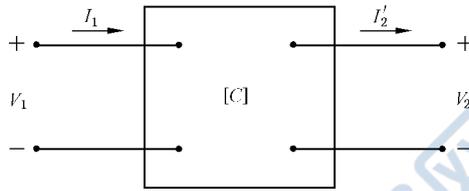


图 D.2 链参数的电压电流定义

作为双端口的互易性一个特性,链参数关系满足 $(AD - BC) = 1$ 。因此,同 Z 参数和 Y 参数一样,只需要三个独立链参数就可以描述双端口网络。

链参数表示法最有用的特性就是用于处理如图 D.3 所示的级联双端口网络。图中 $[C_1][C_2]$ 代表网络 1 和网络 2 的链参数矩阵,组合电路的整条链参数矩阵可由两个链参数矩阵的积矩阵给出。表示如下:

$$[C_{tot}] = [C_1][C_2] \dots\dots\dots (D.7)$$

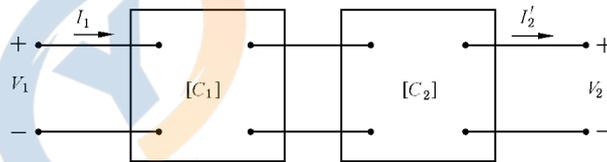


图 D.3 两个双端口网络的级联

将单个电路级联起来的概念可用于含有集中参数网络和分布参数网络(如传输线)的测量链路。考虑图 D.4 所示的测量链路,包括(从左到右)一个传感器、一个巴伦、一条传输线、一个衰减器和一个负载阻抗。巴伦、传输线和衰减器的双端口网络由链参数矩阵 $[C_b][C_t][C_a]$ 单独表示。对这三个链矩阵用公式(D.7),整条链矩阵可定义如下:

$$[C_{tot}] = [C_b][C_t][C_a] \dots\dots\dots (D.8)$$

测量链路的整体等效电路可用图 D.5 表示。

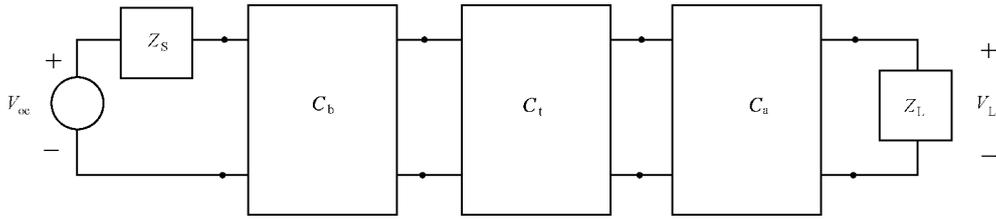


图 D.4 用链参数矩阵表示的简单测量链路

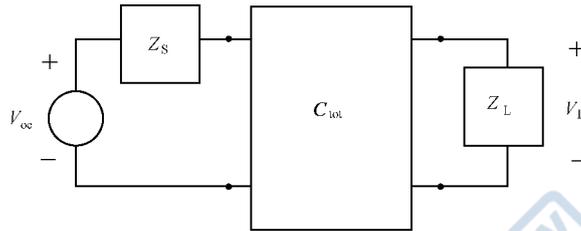


图 D.5 测量链路的简单等效电路

对图 D.5 所示电路的分析是直接的,可根据负载阻抗,电源阻抗 Z_s 和开路电压 V_{oc} 来表示流过负载阻抗 Z_L 上的电流,表示如下:

$$I_L = \frac{V_{oc}}{(A + CZ_s)Z_L + DZ_s + B} \dots\dots\dots (D.9)$$

式中 A, B, C, D 是整条级联网络的链参数。负载上的电压可表示成:

$$V_L = \frac{V_{oc}Z_L}{(A + CZ_s)Z_L + DZ_s + B} \dots\dots\dots (D.10)$$

当然,测量过程中用的是公式(D.10)的反过程,因为负载响应 V_L 可以测得,而电场强度(由传感器特性得到 V_{oc})是待求的。

D.4.1 简单电路的链参数

为了更好地用于分析,链参数必须能从一般电路很方便地得到。摘自参考文献[D.1]的表 D.1 列出了一些简单双端口电路的链参数。有了这些参数,复杂的电路可由这些单元的串联及并联得到,因此,整个链参数可由一些矩阵按照公式(D.6)相乘得到。例如,图 D.6 所示的电路包括两个串连元件和一个并联元件,这个电路的整条链参数可表示如下:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & j\omega L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (D.11)$$

这些参数对处理由大量的同样结构构成的 T 型网络也是有用的。如果确定了单个环节的链参数 $[C]$, n 个环节级联而成的整体链参数矩阵由 $[C_T] = [C_A]^n$ 给出。

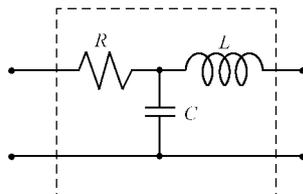
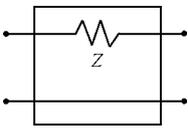
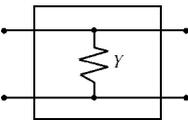
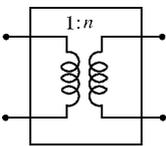
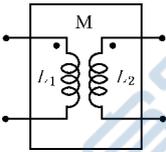


图 D.6 由链参数建模的简单双端口网络

表 D.1 简单电路的链参数

电路元件	电路图	链参数
串联电阻		$\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
并联电阻		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix}$
理想变压器 匝数比 1 : n		$\begin{bmatrix} 1/n & 0 \\ 0 & n \end{bmatrix}$
耦合电感		$\begin{bmatrix} L_1 & j\omega(L_1L_2 - M^2) \\ M & L_2 \\ \frac{1}{j\omega M} & \frac{L_2}{M} \end{bmatrix}$

注：对于可逆网络 $AD - BC = 1$ 。

另一种电路是长度为 L 传输线段,其特性阻抗 Z_c 和传播常数 γ 。如在参考文献[D.2]中提到,这种电路有如下链参数表达式:

$$[C_t] = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & Z_c \sinh(\gamma L) \\ Z_c^{-1} \sinh(\gamma L) & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (D.12)$$

因为它们都描述同一电路,认识到 Z, Y 和双端口网络的链参数不能单独确定是很重要的。可通过不同关系利用一套参数表示另一套参数。参考文献[D.1]给出了由一套参数推导出另一套参数的列表。

D.5 散射参数

对于测量链路中的双端口电路,在能够直接测量 Z, Y 或链参数之前,还需介绍另一套很有用的双端口表达式。这就是散射矩阵(或 S 参数)表达式。虽然这个表达式提供的信息并不比别的多,它特别有用是因为许多实际的网络分析仪可直接测量这些参数。因此,对这些参数的测量可直接得出双端口元件特性的链参数。

散射参数与双端口电路的端口输入和输出电压有关。这些参数通过矩阵方程相联系:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix} \dots\dots\dots (D.13)$$

式中, V_1^+ 和 V_2^+ 表示网络端口的入射电压波形, V_1^- 和 V_2^- 表示另一个端口的反射电压。总(或测得的)电压由输入电压和反射电压的和决定。

在假设连接每个端口的线阻抗有已知的阻抗水平条件下,定义 $[S]$ 矩阵的独立元素 s_{ij} 。通常适用的值为 50Ω ,虽然别的阻抗也可用到。因此, S 参数值由测量设备的阻抗水平决定。如果用的是另一

个阻抗,最终的[S]矩阵将不同;然而,设备的终端伏安特性与 S 参数的测量阻抗水平无关。

测量散射参数的详细细节由网络分析仪的使用手册提供,在此不重复。我们应假设这种测量可以实现,用户得到了表征整条测量链路特性的四个复数 S 参数。同其他双端口参数一样,只有三个 S 参数可独立获得。对于无源对称网络,S 参数是角对称的(即 $S_{12} = S_{21}$),这可用于 S 参数测量可能的检验方法。为了减小 S 矩阵的误差,测得的非对角元素 s_{ij} 可取平均值,即

$$\langle s_{12} \rangle = \frac{1}{2}(s_{12} + s_{21}) \quad \dots\dots\dots (D.14)$$

除了检查上述对称性,还可对[S]进行能量守恒校验。对于无损电路,矩阵[S]是单位矩阵,即满足关系:

$$[S]^* = \{[S]^t\}^{-1} \quad \dots\dots\dots (D.15)$$

式中,* 代表共轭复数,t 是矩阵的转置。这种关系对无损网络适用,[S]矩阵的行元素必须满足下列关系:

$$s_{11}s_{11}^* + s_{12}s_{12}^* = 1 \quad \text{和} \quad s_{21}s_{21}^* + s_{22}s_{22}^* = 1 \quad \dots\dots\dots (D.16)$$

对于有损耗的网络,能量守恒不再满足,变成了上界。

只要确定了 S 矩阵,就可以确定阻抗矩阵[Z]。

$$[Z] = Z_c([U] - [S])^{-1}([U] + [S]) \quad \dots\dots\dots (D.17)$$

式中, Z_c 是对散射参数的定义参考阻抗水平(这里为 50Ω),类似的,导纳矩阵可由公式(D.17)的逆求得。

然而,在这种情况下,使用更多的是由 S 参数表示链参数表达式。可表示如下:

$$A = \frac{(1 + s_{11})(1 - s_{22}) + s_{12}s_{21}}{2s_{21}}$$

$$B = Z_c \frac{(1 + s_{11})(1 + s_{22}) - s_{12}s_{21}}{2s_{21}}$$

$$C = Z_c^{-1} \frac{(1 - s_{11})(1 - s_{22}) - s_{12}s_{21}}{2s_{21}}$$

$$D = \frac{(1 - s_{11})(1 + s_{22}) - s_{12}s_{21}}{2s_{21}} \quad \dots\dots\dots (D.18)$$

式中,A,B,C,D 代表公式(D.6)中链矩阵的独立元素。

D.6 参考文献

[D.1] Tesche, F.M., et al. EMC Analysis Methods and Computational Models. John Wiley and Sons, New York. January 1997.
 [D.2] Pozar, D.M. Microwave Engineering, Addison Wesley, Reading Mass, 1990.

参 考 文 献

- [1] Nahman, N.J. Software Correction of Measured Pulse Data. In Fast Electrical and Optical Measurements, Vol.I, eds.I.E.Thompson and L.H.Luessen, Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1986.
- [2] Cheng, D.K. Analysis of Linear Systems. Addison-Wesley, Inc., Reading Mass., 1959.
- [3] Baum, C.E. Electromagnetic Topology for the Analysis and Design of Complex Electromagnetic Systems, in Fast Electrical and Optical Measurements, Vol I, eds.I.E.Thompson and L.H.Luessen, Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1986.
- [4] Baum, C.E. Accuracy Considerations in the Design of B-Dot and I-Dot Sensors, Sensor And Simulation Notes, Note 344, Kirtland AFB, New Mexico, June 1992.
- [4b] *Antenna Engineering Handbook*, 2nd Edition, eds.Richard C.Johnson and Henry Jasik, McGrawHill Company, New York, 1984, pp.4324 to 4325.
- [5] Sower, G.D. Standard Calibration Method For Electromagnetic Field Probes, Sensor and Simulation Notes, Note 362, Kirtland AFB, New Mexico, August 1993.
- [6] Baum, C.E. Electromagnetic Sensors and Measurement Techniques, in Fast Electrical and Optical Measurements, Vol I, eds. I. E. Thompson and L. H. Luessen, Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1986.
- [7] Tesche, F.M., M.V.Ianoz, and T.Karlsson, EMC Analysis Methods and Computational Models, John Wiley & Sons, New York, December, 1996.
- [8] Thaler, G.J., and R.G.Brown, Analysis and Design of Feedback Control Systems, McGraw-Hill, New York, 1960.
- [9] JOHNK, R.and ONDREJKA, A.Time-domain Calibrations of D-dot Sensors.U.S.National Institute of Standards and Technology Note 1392, February 1998.
- [10] IEC 61000-2-11 Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2-11:Environment-Classification of HEMP environments
- [11] IEC 61000-4-25:2019 电磁兼容 第 4-25 部分:试验和测量技术 设备和系统高空电磁脉冲(HEMP)抗扰度试验方法[Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-25:Testing and measurement techniques—HEMP immunity test methods for equipment and systems]
-