



图 19-1 元器件涵盖的种类

第二节 元器件的检验及失效分析

由于元器件的种类繁多，结构不同和质量要求不同，因此检验其质量的具体项目和检验的具体方法也不同。但一般应从以下几方面去对元器件的质量进行检验。

一、包装的检验

元器件的包装属于保护商品类包装，其作用是确保元器件完美无缺地运送到用户手中，当元器件到达用户手中开始使用时，包装的作用才完成任务。元器件一般用盒或袋包装，应检验以下内容：

- (1) 包装完好性，包装不得破损；
- (2) 包装上的制造厂名称或商标；

- (3) 产品型号、名称及数量；
- (4) 生产的标准代号；
- (5) 产品质量类别或等级；
- (6) 检验批识别代码；
- (7) 防雨、防潮标志。

二、外观质量的检验

打开包装盒或袋后，首先要检查是否有产品的出厂合格证，若无合格证，应拒绝检验。如果有合格证，再清点元器件的数量，看与包装盒或袋上标的数量是否一致。再检查每个元器件的外观质量，看是否有锈蚀、碰伤等缺陷，然后检查以下内容：

- (1) 元器件上的制造厂名称或商标；
- (2) 产品型号、规格；
- (3) 质量类别或等级；
- (4) 检验批号代码；
- (5) 引出端标志。

如果元器件的体积太小，在其上应标注出主要项目。

三、识别引出端

许多元器件都有引出端，由于品种不同，引出端的数量及布置形式是不同的，检验时应按产品的技术规范或说明书去识别引出端，不要识别错了。

四、电参数的检验

按产品的技术规范对其电参数进行检验，测试条件及检测结果均应符合被检验元器件的技术规范或订货合同的规定要求。检验中应注意：

- (1) 测试期间，应避免外界干扰对测量精度的影响，测试仪器的不确定度应符合规定要求；
- (2) 若无特殊说明，测试期间的环境温度、湿度偏离规定值的范围应符合规定要求；
- (3) 若电参数值是由几步测试的结果经计算后而确定时，各步测试之间的时间间隔应尽可能地短。
- (4) 应严格按照检测规程进行检测。

五、其他检验

表 19-2 ~ 表 19-4 是国军标列出了元器件的一些试验方法的名称。

表 19-2 GJB 360B—2009 电子及电气元件的试验方法

编 号	试 验 方 法 名 称	编 号	试 验 方 法 名 称
100 系列 环境试验		100 系列 环境试验	
101	盐雾试验	107	温度冲击试验
103	稳态湿热试验	108	高温寿命试验
104	浸渍试验	109	爆炸性大气试验
105	低气压试验	110	沙尘试验
106	耐湿试验	111	有焰燃烧性试验

(续)

编号	试验方法名称	编号	试验方法名称
100 系列 环境试验		200 系列 物理性能试验	
112	密封试验	217	微粒碰撞噪声检测
200 系列 物理性能试验		300 系列 基本电性能试验	
201	低频振动试验	301	介质耐电压试验
203	随机跌落试验	302	绝缘电阻试验
204	高频振动试验	303	直流电阻试验
206	旋转寿命试验	304	电阻-温度特性试验
207	强碰撞冲击试验	305	电容量测试
208	可焊性试验	306	品质因素 (Q) 测试
209	X 射线照相试验	307	接触电阻测试
210	耐焊接热试验	308	固定电阻器电流噪声测试
211	引出端强度试验	309	电阻电压系数测试
212	稳定加速度试验	310	触点抖动监测
213	冲击 (规定脉冲) 试验	311	低电平负载切换试验
214	随机振动试验	312	中等电流切换试验
215	耐溶剂性试验		

表 19-3 GJB 128A—1997 半导体分立器件的试验方法

编号	试验方法名称	编号	试验方法名称
1000 系列 环境试验		1000 系列 环境试验	
1001	低气压	1040	老炼 (闸流晶体管)
1011	浸渍	1041	盐气 (浸蚀)
1015	稳态一次光电流辐照程序 (电子束)	1042	老炼和寿命试验 [功率场效应晶体管或绝缘栅双极晶体管 (IGBT)]
1016	绝缘电阻	1046	盐雾 (腐蚀)
1017	中子辐照	1048	阻断寿命
1018	内部水汽含量	1049	阻断寿命 (抽样方案)
1019	稳态总剂量辐照程序	1051	温度循环 (空气-空气)
1020	静电放电敏感度分类	1054	灌注环境应力试验
1021	耐湿	1055	监测任务温度循环
1022	耐溶剂	1056	热冲击 (液体-液体)
1026	稳态工作寿命	1061	管壳和螺栓温度测量
1027	稳态工作寿命 (抽样方案)	1066	露点
1031	高温寿命 (非工作)	1071	密封
1032	高温寿命 (非工作) (抽样方案)	2000 系列 机械性能试验	
1036	间歇工作寿命	2005	轴向引线抗拉试验
1037	间歇工作寿命 (抽样方案)	2006	恒定加速度
1038	老炼 (二极管、整流管和稳压管)	2016	冲击
1039	老炼 (晶体管)		

(续)

编号	试验方法名称	编号	试验方法名称
2000 系列 机械性能试验		3000 系列 晶体管的电特性测试	
2017	芯片粘附强度	3011	集电极-发射极击穿电压
2026	可焊性	3103	绝缘栅双极晶体管的热阻抗测试
2031	耐焊接热	3104	砷化镓场效应晶体管的热阻抗测试(恒流正偏栅极电压法)
2036	引出端强度	3161	绝缘栅双极晶体管的热阻抗测试(变量源-漏电压法)
2037	键合强度	3256	小信号功率增益
2046	振动疲劳	3320	射频功率输出、射频功率增益和集电极效率
2051	振动噪声	3407	源-漏击穿电压
2052	粒子碰撞噪声检测	3472	开关时间测试
2056	扫描振动	3505	砷化镓场效应晶体管的 1dB 压缩输出功率 (P_{1dB})
2057	扫描振动(监测)	3510	砷化镓场效应晶体管的 1dB 压缩增益 (G_{1dB})
2066	物理尺寸	3570	砷化镓场效应晶体管的正向增益 (S_{21} 幅值)
2068	非透明玻璃封装、双管脚、轴向引线二极管外部目检	3575	砷化镓场效应晶体管的正向跨导
2069	封帽前目检(功率金属氧化物半导体场效应晶体管)	4000 系列 二极管的电特性测试	
2070	封帽前目检(微波分立和多芯片晶体管)	4011	正向电压
2071	外观及机械检查	4016	反向漏电流
2072	晶体管内部目检(封帽前)	4023	二极管特性曲线
2073	芯片目检(半导体二极管)	4066	浪涌电流
2074	内部目检(半导体二极管)	5000 系列 高可靠空间应用试验	
2075	开帽内部设计目检	5001	圆片批接收试验
2076	X 射线照相检验	5002	确定气化物质量的电容-电压测量
2077	金属化扫描电子显微镜(SEM)检查	5003	洁净间和工作台空中尘粒分级及测量
2081	正向不稳定冲击(FIST)	附录	低频功率晶体管快速综合筛选试验方法
2082	反向不稳定冲击(BIST)		

表 19-4 GJB 548B—2008 微电子器件的试验方法

编号	试验方法名称	编号	试验方法名称
1000 系列 环境试验		1000 系列 环境试验	
1001	低气压(高空工作)	1009.2	盐雾(腐蚀)
1002	浸液	1010.1	温度循环
1003	绝缘电阻	1011.1	热冲击
1004.1	耐湿	1012	热性能
1005.1	稳态寿命	1013.1	露点
1006	间歇寿命	1014.2	密封
1007	模拟寿命	1015.1	老炼试验
1008.1	稳定性烘焙	1016	寿命/可靠性试验

(续)

编号	试验方法名称	编号	试验方法名称
1000 系列 环境试验		2000 系列 机械试验	
1017	中子辐射	2020.1	粒子碰撞噪声检测试验
1018.1	内部水汽含量	2021	玻璃钝化层的完整性
1019.2	电离辐射(总剂量)试验程序	2022.2	可焊性(浸润法)
1020.1	剂量率感应锁定试验程序	2023.2	非破坏性键合拉力试验
1021.1	数字微电路的剂量率翻转试验	2024	玻璃熔封盖板的扭矩试验
1022	MOS 场效应晶体管阈值电压	2025.1	引线涂覆附着着力试验
1023.1	线性微电路的剂量率响应和翻转阈值	2026	随机振动
1030.1	密封前老炼	2027.1	芯片与基座的附着强度
1031	薄膜腐蚀试验	2028	针栅阵列式封装破坏性引线拉力试验
1032	封装引起的错误试验程序(由于 α 粒子)	2029	陶瓷片式载体焊接强度(破坏性推力试验)
1033	“写/擦”疲劳寿命	2030	芯片粘接的超声检测
2000 系列 机械试验		2031	倒装片拉脱试验
2001.1	恒定加速度	2032	无源元件的目检
2002.1	机械冲击	3015	静电放电敏感度的分类
2003.1	可焊性	5000 系列 试验程序	
2004.2	引线牢固性	5001	参数平均值控制
2005	振动疲劳	5002	参数分布值控制
2006	振动噪声	5003	微电路的失效分析程序
2007	扫描振动	5004.2	筛选程序
2009.1	外部目检	5005.2	鉴定和质量一致性检验程序
2010.1	内部目检(单片)	5006	极限试验
2011.1	内部键合强度(破坏性键合拉力试验)	5007.1	晶片批验收
2012.1	X 射线照相	5008.1	混合和多片微电路的试验程序
2013	破坏性物理分析(DPA)的内部目检	5009	破坏性物理分析
2014	内部目检和机械检查	5010.2	复杂单片微电路试验程序
2015.1	耐溶剂性	5011	聚合材料的评价和验收程序
2016	物理尺寸	5012	数字微电路的故障覆盖率测量
2017.1	内部目检(混合电路)	5013	GaAs 工艺的晶片制造控制和接收程序
2018.1	扫描电子显微镜(SEM)检查		
2019.2	芯片剪切强度		

1. GJB 360B—2009 电子及电气元件的试验方法

该标准包括电子及电气元件的环境试验方法 11 个、物理性能试验方法 14 个、基本电性能试验方法 12 个。具体的试验方法名称见表 19-2。

2. GJB 128A—1997 半导体分立器件的试验方法

该标准包括半导体分立器件的环境试验方法 31 个、机械性能试验方法 26 个、电特性试验方法 16 个、高可靠空间应用测试方法 3 个和附录 1 个。具体的试验方法名称见表 19-3。

3. GJB 548B—2008 微电子器件试验方法和程序

该标准包括：环境试验方法 27 个、机械试验方法 30 个、性能测试方法 1 个、试验

程序 13 个。具体的试验方法名称见表 19-4。

表 19-2 ~ 表 19-4 只给出试验方法名称，起到索引作用，如果要进一步了解每个试验方法的细节，还必须查阅相关的标准。

六、失效分析

在寿命期内，如果设备、元器件失效的话，应对它们进行失效分析，这是一项很重要的技术质量工作。正如一个青壮年人突然因不明原因死亡一样，要对他的尸体进行解剖，研究其死亡的原因，为医药理论积累科学数据。通过对设备、元器件失效分析，找出失效原因，可为改进产品设计和产品使用提供参考。

失效分析不是检验人员的主要工作，但应主动参与这项工作。

1. 失效模式

失效是产品终止完成规定功能的能力这样的事件。失效的模式很多，要针对不同的失效模式进行失效分析。失效模式是失效的表现形式，主要有：

(1) 致命失效：可能导致人员伤亡、重要物件损坏或其他不可容忍后果的失效。例如飞机的某个元器件失效造成机毁人亡事故。

(2) 非致命失效：不太可能导致人员伤亡、重要物件损坏或其他不可容忍后果的失效。

(3) 设计失效：产品设计不当造成的失效。

(4) 制造失效：由于产品的制造未按设计或规定的制造工艺造成的失效。

(5) 突然失效：事前的检测或监测不能预测到的失效。

(6) 渐变失效：产品规定的性能随时间的推移逐渐变化产生的失效。这种失效又称为漂移失效，通过事前的检测或监测是可以预测的，有时可通过预防性维修加以避免。

(7) 突变失效：使产品完全不能完成所有规定功能的突然失效。

(8) 完全失效：完全不能完成全部规定功能的失效。

(9) 部分失效：非完全失效的失效。

(10) 独立失效：不是由另一个产品的失效或故障直接或间接引起的产品的失效。

(11) 系统性失效：肯定与某个原因有关，只有通过修改设计或制造工艺、操作程序、文件或其他关联因素才能消除的失效。

(12) 误操作失效：由于对产品操作不当或粗心引起的失效。等等。

失效与故障两者的概念是不同的，故障是产品不能执行规定功能的状态。

2. 失效原因

引起失效的设计、制造或使用阶段的有关事项。

3. 失效机理

引起失效的物理、化学或其他的过程。

对元器件规定了失效率，所谓失效率是一批元器件在规定条件下、规定的时间内工作或储存，失效元器件数与工作或贮存元器件数乘时间数之积的比。例如 1000 只晶体管，在规定的条件下仓储存放了 1000 小时，失效了 5 只，则这批晶体管的失效率 $\lambda_N = 5 / (1000 \times 1000) = 0.000005 = 5 \times 10^{-6} / h$ 。

我国的元器件失效率等级见表 19-5。

表 19-5 我国的元器件失效率等级

失效率等级名称	失效率等级代号		最大失效率 (1/h 或 1/10 次)
	GB/T 1772—1979	GJB 2649—1996	
亚五级	Y	L	3×10^{-5}
五级	W	M	10^{-5}
六级	L	P	10^{-6}
七级	Q	R	10^{-7}
八级	B	S	10^{-8}
九级	J	—	10^{-9}
十级	S	—	10^{-10}

4. 失效分析方法

失效分析的任务是确定元器件的失效模式和失效机理，找出失效原因，主要方法有显微分析、X 射线分析、红外扫描分析、质谱分析、电特性分析等。由于每种方法都存在局限性，往往要几种方法联合应用，而且要先做非破坏性分析，而后进行破坏性分析。

5. 失效分析的基本程序

应按下述程序进行失效分析：

收集失效的元器件→确定失效模式→假设失效机理→验证失效机理→判定失效性质→估计失效发生的概率→提出处理建议

确定元器件的失效模式比较容易，有经验的人一看失效的实物，基本上能比较准确地判定失效模式，而确定失效机理较复杂。有时同一种失效模式而失效机理可能不相同，失效机理与失效模式有一定联系。表 19-6 是国防科工委 2002 年总结归纳了这些年来国防系统分析常用元器件失效中常见的失效模式和失效机理。从表中看到同一种失效模式中可能存在多种失效机理。在元器件失效分析中，根据失效模式假设失效机理时，可以参考此表。

表 19-6 元器件常见的失效模式和失效机理

元器件类别	主要失效模式	可能的失效机理
半导体器件	正向漏电流大或短路	(1) 表面氧化层缺陷、布线间绝缘层缺陷（针孔、裂纹、厚度不均匀） (2) 受潮或器件内部气氛不良 (3) 管壳内部灰尘、导电性杂物或有机碳化物 (4) 应力释放导致芯片裂纹 (5) Na^+ 离子沾污或 H^+ 离子沾污 (6) 热氧化过程中的杂质凝聚引起反型 (7) SiO_2 与 Si 表面结合不良等造成高界面态密度，集电极空间电荷区内的界面态在反向偏压下产生空穴—电子对辐射损伤

(续)

元器件类别	主要失效模式	可能的失效机理
半导体器件	击穿特性劣变	<p>(1) Cu、Fe、Au 等重金属离子在结区位错上沉淀, 引起微等离子体低击穿、管道击穿或 C-E 击穿</p> <p>(2) PN 结反向偏压增大时, 空间电荷区展宽, 对反向电流起作用的界面态密度增加, 界面态密度越大, 其击穿特性越软</p> <p>(3) 由于 Na^+ 离子等可动离子沾污而形成的反型沟道, 除使漏电流增加, 也使击穿电压下降</p> <p>(4) 氧化层中较多的氧离子空穴和可动正电荷, 使 BV_{cb0} 随负荷时间增加而蠕变上升</p> <p>(5) 制造过程和管壳漏气的沾污使 SiO_2 层吸附水汽和其他正负离子, 引起击穿电压蠕变</p> <p>(6) 氧化层、布线间绝缘层缺陷</p>
	正向压降或饱和压降劣变	<p>(1) 芯片与管壳烧结不良、焊料热疲劳等</p> <p>(2) 对于二重扩散式硅晶体管, 集电区是厚高电阻率层, 易造成输出特性的大电流部分曲线倾斜</p> <p>(3) 引线键合不良</p> <p>(4) 水分、内涂料引起芯片与焊料、键合点界面之间的电化学腐蚀</p> <p>(5) 辐射损伤</p>
	电流增益的劣变	<p>(1) 氧化层 Na^+ 离子引起的基区表面反型, 反型层使基区与发射区之间形成直接通道</p> <p>(2) 发射结空间电荷区的界面态起着表面复合中心作用, 使小电流增益下降</p> <p>(3) 铝-硅互溶使发射结退化</p> <p>(4) 铝-二氧化硅反应使发射结退化</p> <p>(5) 辐射损伤</p>
	短路、开路或高阻	<p>(1) 金属化缺陷或腐蚀</p> <p>(2) 键合点焊点脱落或位移形成金属间化合物</p> <p>(3) 内引线断裂或碰接</p> <p>(4) 芯片脱落或有裂纹</p> <p>(5) 壳内有导电的可动多余物</p> <p>(6) 过电压击穿、过电流 (电浪涌) 熔断或熔断</p> <p>(7) 光刻针孔、小岛</p> <p>(8) 快扩散金属沾污与 PN 结区缺陷相结合形成 PN 结管道穿通、短路</p> <p>(9) 基片、外延层的位错或层错等缺陷以及外延层电阻率不均匀引起击穿</p> <p>(10) 腐蚀导致柯伐管脚脆裂, 内部引线及键合开路或高阻</p>

(续)

元器件类别	主要失效模式	可能的失效机理
金属膜电阻器	开路	(1) 焊点污染、焊接工艺不良、材料成分不当等缺陷造成引线与帽盖虚焊 (2) 帽盖与基体尺寸配合不良, 造成帽盖脱落 (3) 基体材料有杂质或外力过大, 造成基体断裂 (4) 碱金属离子侵蚀或膜层附着力差, 造成膜层大块脱落 (5) 热不匹配, 造成膜层开裂 (6) 缺陷部分高阻过热或过电应力, 造成膜层烧毁
电容器	参数超差	(1) 焊点污染、焊接工艺不良、材料成分不当等缺陷造成引线与帽盖接触不良 (2) 制造中有杂质沾污, 造成膜层和基体被污染 (3) 碱金属离子侵蚀或膜层附着力差, 造成膜层小块脱落 (4) 由于机械应力造成膜层划伤或有孔洞 (5) 膜层材料有杂质造成膜层氧化 (6) 基体材料不良造成基体不平、厚薄不均、有杂质
	击穿 (短路呈电阻特性)	(1) 电介质中有疵点或缺陷, 存在杂质或导电粒子 (2) 电介质老化 (3) 电介质电化学击穿 (4) 离子迁移 (5) 在制造中电介质有机械损伤 (6) 在高湿度或低气压环境下极间边缘飞弧 (7) 在机械应力作用下电介质瞬时击穿
电磁继电器	触点断开	(1) 引出端接触不良 (2) 引出端振动疲劳而脱落 (3) 弹簧机构老化触点压力受损 (4) 壳体内有害气体对触点的污染 (5) 壳体内有可动绝缘体多余物
	触点粘结	(1) 壳体内有可动导体多余物 (2) 由于局部电流密度过高造成触点熔接
	线圈短、断路	(1) 引出端接触不良 (2) 引出端振动疲劳而脱落 (3) 线圈导线绝缘物热老化 (4) 线圈受潮、电解腐蚀
	参数漂移	(1) 壳体内有害气体对触点的污染, 造成接触电阻增大 (2) 线圈导线老化造成线圈电阻变化

6. 失效分析注意事项

应从人、机、料、法、环、测几个方面加以注意，以保证分析结果的准确性。

(1) 人：从事元器件失效分析的人员应具备：

第一，对所分析的失效的元器件的结构原理及其构造情况应熟知；

第二，应熟知被分析元器件的制造过程；

第三，应了解被分析元器件的使用情况；

第四，应会操作分析用的设备、仪器；

第五，工作认真，敬业；应有物理、化学和电方面的理论知识和工作的实践经验。

(2) 机：国防系统的企业一般都有元器件实验室，其中失效分析所用的设备花钱最多。满足失效分析工作要求应有观测设备，如扫描电子显微镜、X射线仪、摄影设备等；分析设备，如质谱仪、红外光谱分析仪等；试验设备，如恒定加速度机、高低温试验箱等；电特性测试仪器，如示波器、电压表等；各种辅助工具。

(3) 料：指被分析的失效的元器件，要认真收集，仔细保护，不得人为损伤它，以避免带入新的非原有的失效因素，否则会得出错误的分析结果。

(4) 法：要根据元器件的失效模式和假设的失效机理，选择合适的分析方法进行分析。

(5) 环：除另有规定外，失效分析应在下列环境下进行：

①精密测试室应无振动，洁净度符合要求；有接地装置；能采取静电放电防护措施；

②温度要求：电测量时要求 20 ~ 28℃，其他试验时要求 15 ~ 35℃；

③相对湿度：20% ~ 80%。

(6) 测：所用的测试仪器的精度要满足分析所需精度的要求，而且测试环境要符合规定要求。

(撰稿人 梁国明)