

# 电桥测量的校准

技术白皮书

By Dipl.-Ing Martin Riedel

翻译：张后宇

理想的测试应该足够的精确和准确，也就是说测试设备给出的测量值应与实际值充分接近并保持高度的一致性。校准过程就是为了实现这一目标而存在的。无需精确定义和区分“平衡(Balanceing)”、“校准(Calibration)”和“调整(Adjustment)”，通过图 1 的分类便可一目了然。

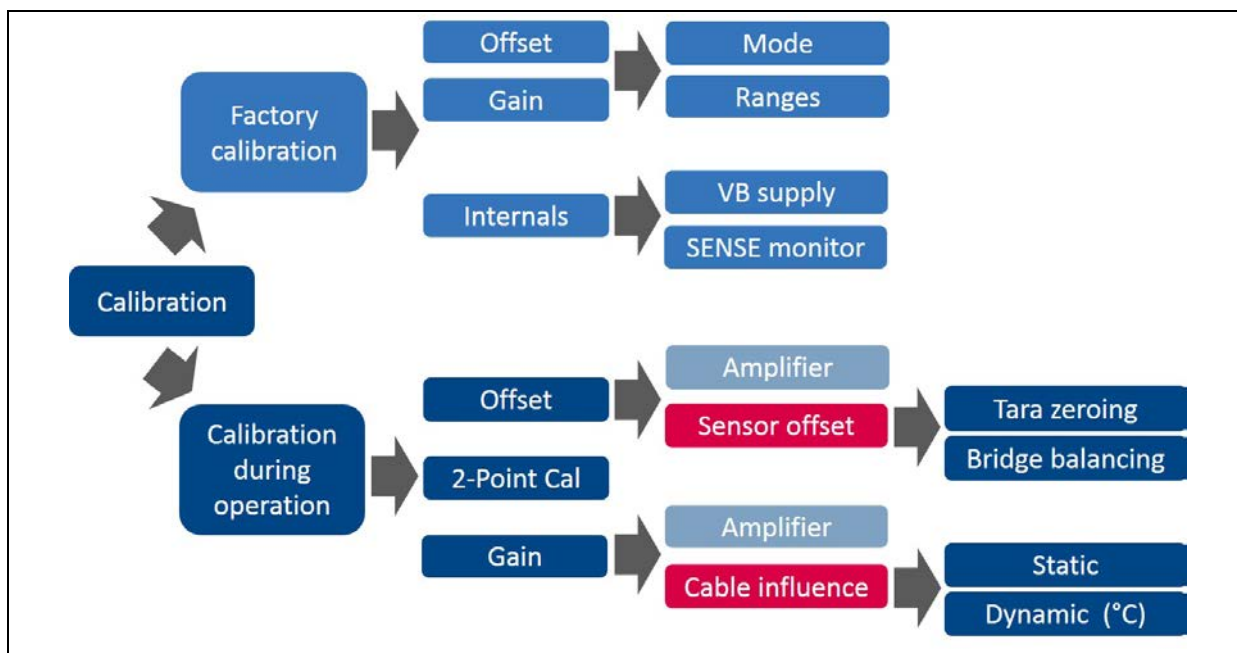


图 1 校准--概念与分类

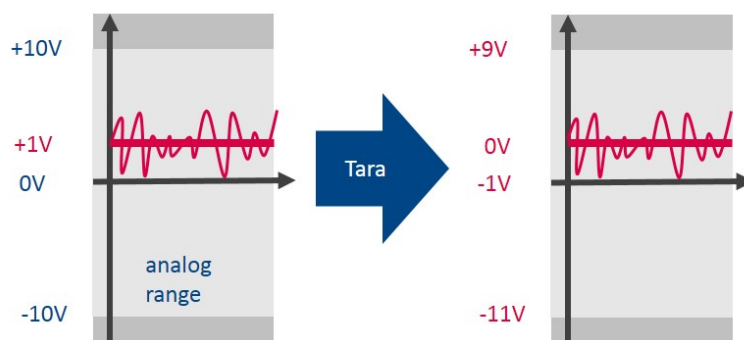
## 偏移：Tare归零vs. 电桥平衡

Tare归零采用简单的标度调整，而电桥平衡可以对原始的测量值进行补偿，并能得到更大的测量范围。电桥中一个单臂的微小变化可以引起较大的偏移量，如 $\pm 0.1\% \rightarrow 1\text{mV/V}$ 。通常来说，在一个完整的四分之一电桥中，应变计的精确度为0.3%，也就是 $3\text{mV/V}$ 。很显然，采用电桥平衡的方法极大的扩大了测量范围。

Tare 归零采用简单重新标度，所以会导致测量量程不对称。电桥平衡中采用的放大器的量程要比实际的测量范围大很多，因此采用模拟或数字的补偿后，能够实现测量量程针对新的零点称。

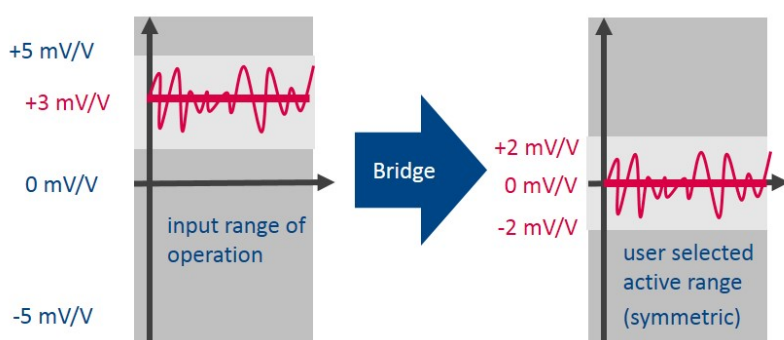
## Tara归零

- 简单的重新标度
- 调零后的不对称并且每次校准后结果都不同



## 电桥平衡

- 偏移量可比实际测量范围大
- 经过补偿和偏移处理
- 一致性好，测量量程对称

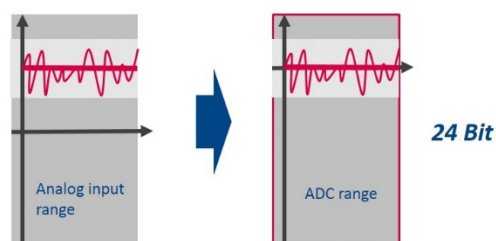
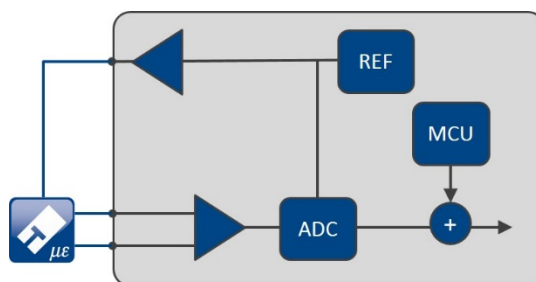


Modern digital concepts (such as imc systems) use high-resolution and stable 24-bit ADC, having enough headroom to digitize the entire offset signal, yet still providing sufficient resolution for the high-activity areas being used. Thus, the subtraction of the offset can be purely digital and realized absolutely drift-free.

现代数字测试系统（如 imc 系统）采用 24bit 高精度和高稳定性的模拟数字转换器（ADC），有足够的空间将整个模拟信号数字化，并能保证感兴趣的测试区域内足够的分辨率。因此扣除偏移之后，测量结果能够实现完全的数字化并且无漂移。

## 电桥平衡的数字化

- 不需要超稳定的模拟节点—但需要稳定的ADC
- ADC获取模拟信号全部输入范围
- 先进的理念，现代 24 位 ADC 技术



## 调零和平衡的稳定性

实际测量中，由于某些不可预料的原因，电桥的偏移量可能会异常大，而且系统本身增益偏移也会造成便宜补偿的稳定性。上面两种情况都会严重影响补偿值。

举例来说：

需补偿的原始偏移量：	2mV/V @ 5V，其中绝对量程为 10 mV
增益漂移：	10 ppm / °C
等效的偏移量：	10mV * 10 ppm / °C = 0.1 μV / °C

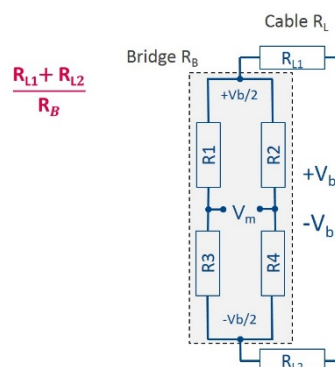
这是典型放大器的本征偏移量的量级。

## 由导线线阻引起的增益误差

供电线线阻可造成传感器有效激励信号的衰减，因为这些线阻的存在严重影响电桥上的阻抗比。这种损耗可以通过附加的传感器导线（SENSE）进行补偿。

举例来说：

- 传感器中最细的铜导线的截面积为 0.14mm<sup>2</sup>
- 其电阻为 130 mΩ / m，假定导线长度为 10 米(供电线和回电线各一根)
- 电桥中平衡电阻越小影响越大，选最小的 120 Ω 计算
- 增益误差为：2 x 1.3 Ω / 120 Ω，约为 2%

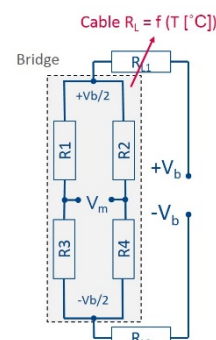


## 温度漂移引起的动态线阻

测试开始时可以对静态增益误差进行补偿，但测试过程中也会产生动态的增益误差，所以动态的增益误差也是需要考虑并追踪的。在室外测试环境中，温差可能高达 60 °C，譬如说早上时温度为-10 °C，而中午的温度高达 50 °C。

以铜为例来说明 60°C 的温差对电阻偏移的影响：

- 铜的温度漂移：4000 ppm/°C
- 温差ΔT：60°C
- 偏移量为 4000 ppm/°C \* 60°C =24%
- 因此，对于初始增益误差为 2%，10 米铜线的增益误差为  
 $2\% * 24\% = 0.48\%$  增益漂移 (10 米导线)  
 对于更长的导线，这种增益误差更加明显  
 $4.8\%$  增益漂移 (100 米导线)



## 对称性电路和简单的补偿导线（SENSE补偿）

常用电缆和电线都是铜导线，铜是非常合适的传感器导线材料，即便是其他材料的电缆，电缆中的明显的局部过热也可以忽略。此外导线接头部分的电阻非常小，不会破坏电路的对称性。

一般导线的接触电阻最大为 25 mΩ，即使接头部分被腐蚀，也影响不大。

增益误差为： $25 \text{ m}\Omega / 120 \Omega = 0.02 \%$

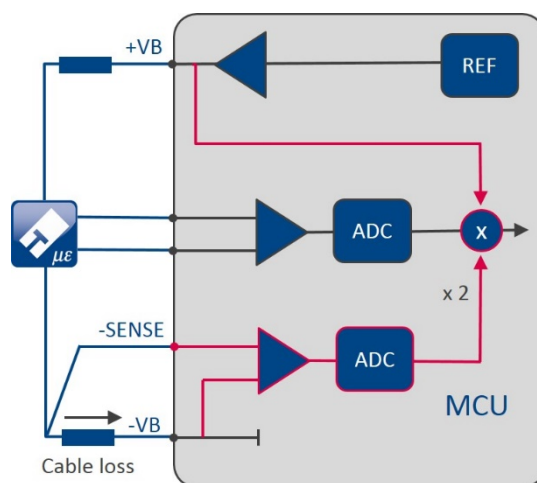
在这种情况下，单路 SENSE 补偿导线就足够了。

在 imc 系统中，补偿是数字化的。

附加的测试线路和 ADC 来检测基本的线路损耗，然后采用数学补偿的方法放大一倍。这种补偿在测试过程中是动态连续的。

这种动态补偿而且还可以得到温度漂移和线阻。

此外，即使没有阻尼输入也可以在放大器端 VB 直接获取



**Digital Single-SENSE compensation**

## 电桥测量的比例

采用电桥的方式，可以显现完美的比例放大测量。比例放大意味着 mV 级的传感器信号输入可放大 1000 倍得到 V 级的信号输出。因此阻尼的输入可以通过纯粹的计算进行补偿。这种情况下，都无需将实际的物理量根据电压而进行调整，也就避免了引入额外的测量误差，解决了模拟控制回路的稳定性问题。

## 双路 SENSE 补偿导线

如上所述，单路 SENSE 导线对传感器线路的补偿非常有效果，那么双路 SENSE 补偿导线是否还有必要呢？

实际上，除了极少数的对称性电路，双路 SENSE 补偿是非常有必要的，尤其是在载波频率模式下，双路 SENSE 补偿精确度非常高。

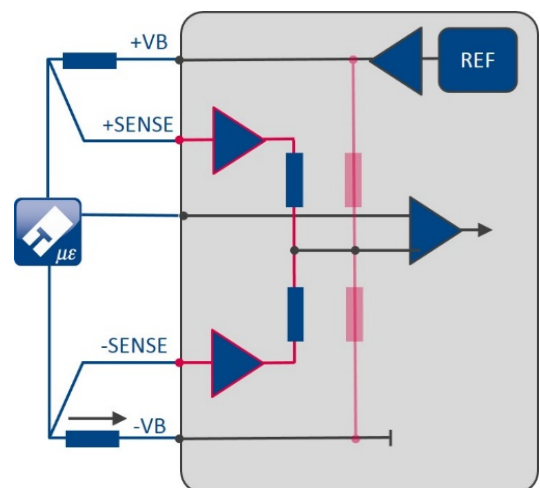
## 半桥的动态干扰

双路 SENSE 补偿可用于更加复杂的情况，尤其是电路中含有大量的接触不良、动态干扰和耦合等情况。下面将详细阐述双路 SENSE 补偿对半桥来说是非常有效果。

在单路 SENSE 补偿中，基于对称性，在设备内部完成的半桥总是与内部 VB 节点相连。所以不平衡和动态的干扰只影响电桥的外部的半桥，而不影响内部的半桥。尽管这些影响非常小，但是不对称的影响仍然会可观察的道德偏离误差和信号跳动。

由于这些影响是本症的，所以无法通过简单的算术补偿进行消除。

双路 SENSE 补偿实现了对称性的信号反馈，协助完成了半桥的完成，非常适合消除动态噪音。



半桥的动态干扰

## 结论：imc电桥中的SENSE补偿

imc 系统支持SENSE补偿

- SENSE补偿导线能够远程监测实际的有效电压
- SENSE补偿的实现可以采用单路或者双路的形式
  - 如果供电导线是对称性的—双路SENSE补偿没有必要
  - 经济的单路SENSE补偿是imc模块的重要卖点
  - 双路SENSE补偿适用于CF或者复杂情况的动态干扰。
  - Imc的放大器模块BR2-4和UNI-4支持单路和双路SENSE补偿
  - 软件能自动检测当前电桥配置
- 后台自动进行增益误差的算术补偿
- 测试过程中的动态补偿也可以减少温度漂移的影响

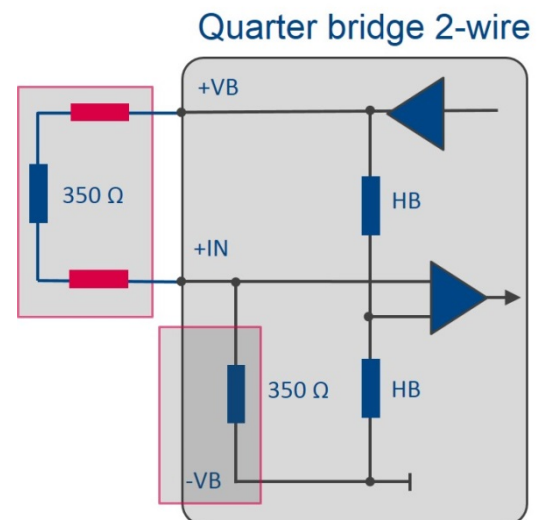
## 1/4电桥

因此，通常采用 3 线制揭发来避免这种由于电桥中上臂和下臂的对称性分布导致的偏移误差。

在 1/4 电桥中，有三个桥臂是在放大器内部实现的，应变计作为第四个桥臂与放大器有两种连接方式，分别为两线制或者三线制。下面用一般的篇幅介绍二线制 1/4 电桥回路，虽然这种方式在实际运用中并不多，因为这样会导致眼中的偏差和漂移问题，如下所述：

## 二线制

- 两根导线都位于电桥的上支
- 线阻: e.g.  $2 * 10 \text{ m}, 130 \text{ m}\Omega / \text{m} = 2.6 \Omega$
- 增益误差:  $2.6 \Omega / 120 \Omega = 2\%$  → 可接受
- 偏离误差:  $\frac{1}{4} * RK/RB = \frac{1}{4} * 2\%$   
 $\frac{1}{4} * 20 \text{ mV/V} = 5 \text{ mV/V}$  → 很大!
- 偏离漂移: 以铜为例  $4000 \text{ ppm} / ^\circ\text{C} * 5 \text{ mV/V}$   
 $= 20 \mu\text{V/V} / ^\circ\text{C}$  → 非常大!!
- 对于温度计来说,  $50^\circ\text{C}$  已经可以引起  $1\text{mV/V}$  的误差



因此, 通常采用三线制来避免这种由于电桥中上支和下支的线阻非对称性分布导致的偏移误差。

## 3 线制

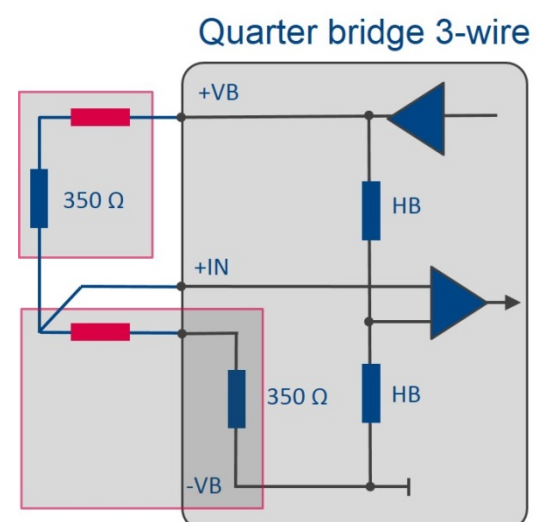
导线均分在电桥的上臂和下臂

偏移和温度漂移得到了补偿

增益误差: (10m 的铜线) $2.62.6 \Omega / 120 \Omega = 2\%$ , 是可以接受而且无法避免的

## 三线制

- 导线均匀分布在电桥的上支和下支
- 偏移和温度漂移得到了补偿
- 增益误差: (10m 的铜线) $2.6 \Omega / 120 \Omega = 2\%$ , 是可以接受而且无法避免的



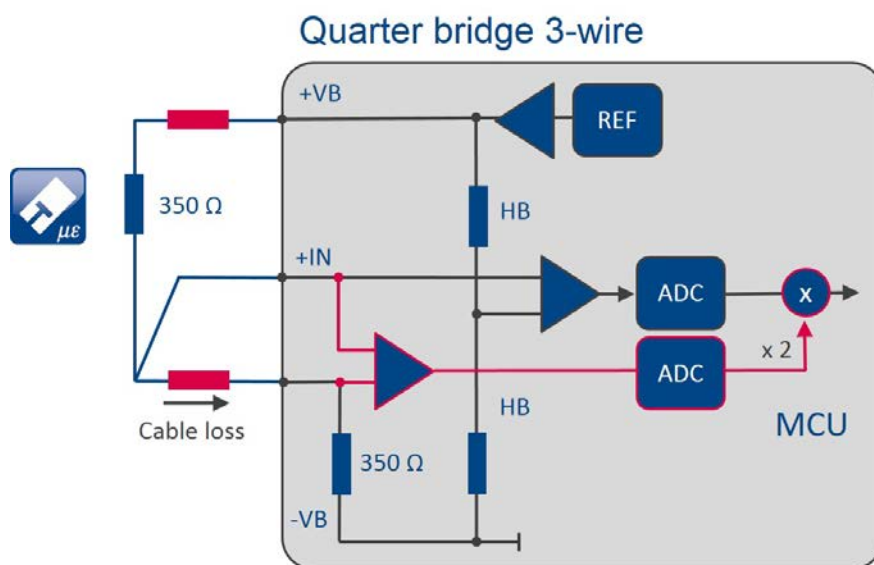
对于传统的电桥放大器或者类似的结构, 三线制中是由于电桥中线阻比引起的增益误差, 如果只考虑简单的三线制结构, 无法通过补偿的方法消除。但是可以采用分路校准的形式进行校正。

## imc 3线制1/4电桥 (包含增益补偿)

3 线制电路的偏移稳定性非常出众, 为 IMC 系统提供了一个独特的 3 线制电路全增益校正

在 imc 系统中, 采用一个独立的辅助 ADC 放大器用于获取回路的电压降。这个电压降表征了总能耗的一半, 所以增大一倍后可以用于计算增益误差。

因此，imc 这种动态跟踪补偿使得 1/4 电桥中的任何分路校准变得不重要，是一种更加先进的方式。



*imc 3-wire quarter-bridge circuit with dynamic gain correction*

## 分路校准

如前所述，在全桥和半桥中采用SENSE补偿的方式，在1/4电桥中采用imc特有的补偿方式已经能够明显地降低了增益误差，甚至降低了外界环境的影响，那么为啥还要采用分路校准呢？

通常分路校准可以扩大量程，譬如说 0.5mV/V，这样就可以定性的排除断线和接线错误。

如果一个人想要校正设备的“内部错误”，或者想要检查或者提高放大器模块的出厂精度，如果采用分路校准的方法，就需要非常精确的高阻抗校准电阻，但是高阻抗的校准电阻在 GΩ 级的情况下很容易损坏。那么这种情况下采用分路校准的方法不仅是没有必要，甚至会适得其反。

在一些应用场景，如传感器安装，采用 SENSE 补偿线即可修正线阻的影响，而不需要采用分流校准的方式。但是在另外一些情况，线阻的影响可能会非常大进而会影响测试结果。在这种情况下，就分路校准就是非常有必要的。

下面将距离说明线阻误导分路校准的几种情况。

分流电阻并联到应变计上，产生的实际信号的变化比预期的要小

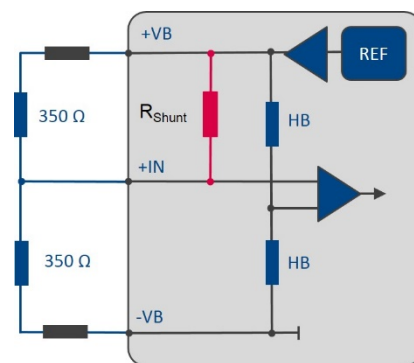
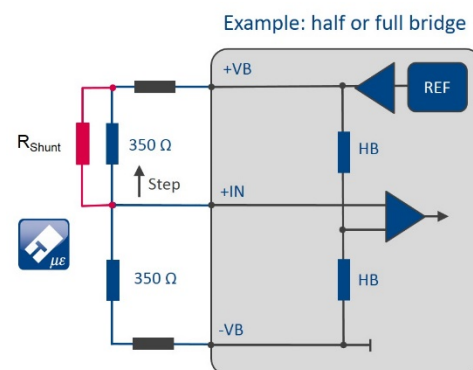
因为远程的传感器导致了能量的衰减，这个引起了+/- VB.位置的线阻

量级大约为  $R_{\text{线缆}}/R_{\text{应变计}}$ ，譬如说 1%（当线阻为 1.3 Ω，应变计为 120 Ω）

。

但是，因为分流电阻实际上并不是连接在远程传感器的附近，而是在放大器的内部，等效于分流电阻并联于应变计电阻和线阻

因此实际的信号并不是变小，而是变大了。





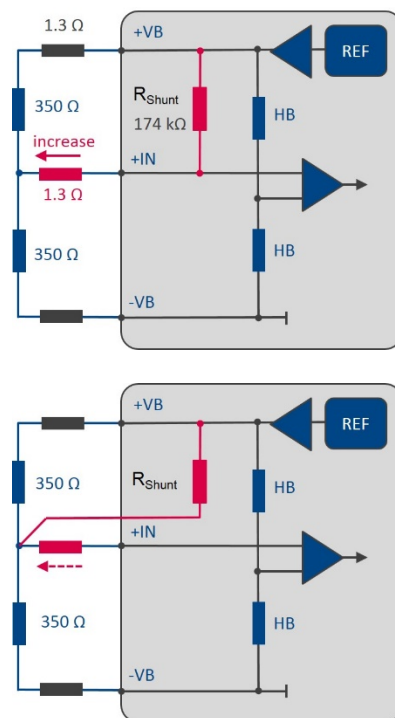
而且，更多的相对误差来自于输入端的线阻

举例来说，在 60 kΩ 的分流电阻上实现 0.5mV/V 的增益

尽管线阻和分流电阻比例很小，1.3Ω/60kΩ，只有 22ppm，但是对于半桥中的电压增益  $V_B/2 * 22\text{ppm} = 11\mu\text{V/V}$

因此没有得到预期中的误差消除，反而得到了更大误差，从 0.5mV/V 跳到了 2.2%

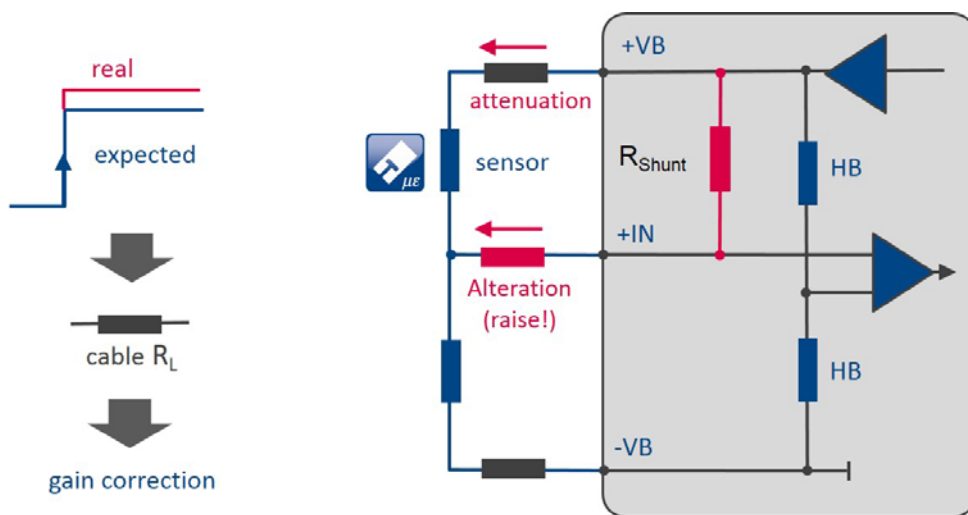
在这种情况下，采用独立的校准电阻可以避免增大误差，但是这种额外的导线是不存在的。



### 没有SENSE线的电路补偿—通过分路校准C

将上面用到的连接器一起放入到数学模型中，并且假定线路是对称的，就可以计算出线路的电阻和必要的增益误差。

这个功能已经集成在 imc 系统中，能够自动实现两点校正，这也是 imc 的独特功能之一。



**Cable compensation without SENSE – via shunt calibration**

## 附加信息

### imc Meßsysteme GmbH

Voltastr. 5  
13355 Berlin, Germany  
Telephone: +49 (0)30-46 7090-0  
Fax: +49 (0)30-46 31 576  
E-Mail: [hotline@imc-berlin.de](mailto:hotline@imc-berlin.de)  
Internet: [www.imc-berlin.com](http://www.imc-berlin.com)

德国imc集成测控有限公司，以26年专业经验，融合精湛的德国工艺、先进的制造技术与多项开发专利，设计制造专业的测试测量系统，致力于为全球工程技术领域提供包含硬软件的解决方案。

无论是整车测试、试验台架还是工厂或机械设备的自动化监控——imc数据采集系统的优势获得测量业界的广泛认同，易于操作、性价比高，令测试更有效率！无论是研究、开发、测试还是试运行，imc可提供标准化的测量设备和软件产品，以及完整的交钥匙解决方案。

对于机械/电子类测试应用，imc测量系统提供高达每通道100kHz的采样频率，支持物理量测量的各种传感器，如压力、力、速度、振动、噪声、温度、电压或电流等信号。imc的产品系列集成了信号调理和硬件的实时分析，并结合软件分析和测试管理产品，涵盖测量控制工作流程的所有方面，从信号调理单元、实时分析与控制，到自动化测试控制和生成测试报告。

imc成立于1988年，总部设在柏林，拥有约200名员工，在全球28个国家或地区拥有25家合作伙伴。我们不断努力，为地面交通工具（汽车、商用车辆和铁路机车等）、航空航天、能源和土木工程等工业领域的客户创新提供最佳的测量解决方案！

### imcAccess Co.

#### 北京

西城区裕民路18号北环中心1110室 100029  
电话: 010-6552 8700 传真: 010-6552 1600

#### 上海

长宁区新华路728号华联发展大厦M10室200052  
电话: 021-5230 1156 传真: 021-5230 1117

#### 重庆

沙坪坝区沙正街174号理科楼530室 400040  
电话: 023-8131 6242

电邮: [hotline.1@imcaccess.com](mailto:hotline.1@imcaccess.com)

网站: [www.imc-china.com](http://www.imc-china.com)

imcAccess公司是由德国imc集成测控有限公司控股的贸易及技术服务公司，公司成立于2002年，独家负责德国imc公司产品在中国的全面推广以及技术服务！

我们竭诚为您提供快速、准确、及时的技术支持和服务：

1. 周到和专业地产品咨询服务，如产品的详细技术指标、硬件的方案配置；
2. 系列化的培训服务，从产品的硬件连接到软件的使用操作，以及结合应用的高级技术培训；
3. 快捷方便的沟通平台，如您在产品使用过程中有任何问题或需要，均可与我们专业的技术支持工程师取得联系；
4. 客制化服务，针对用户的实际需要，可谓客户完善现有分析功能，以及二次开发定制界面和功能；
5. 已有设备的定期校准、系统检查、系统升级等服务。



#### 使用条款:

本文档版权归imc Meßsysteme GmbH所有, 并保留一切权利。未经书面许可, 任何公司或个人不得对此文档内容进行编辑、修改或以任何方式改变。该文档可以出版或复制。如果单独发表, 我们要求必须包含我公司名称和网页链接[www.imc-berlin.com](http://www.imc-berlin.com)。尽管内容已精心准备, 文档内容仍有可能包含错误。若有任何信息不正确, 请通过[info@imcaccess.com](mailto:info@imcaccess.com)告知我们。如因文档使用不当造成的直接或间接损失, 本公司不承担任何责任。