

# 应变式传感器常见故障原因分析

中航电测仪器股份有限公司 王世元

**[摘要]** 本文论述了电阻应变式传感器的结构原理、工艺流程及故障分析，对应变式传感器制作过程中常见故障进行了归纳总结及研究分析，探索传感器工艺质量提升的技术方法，从而为规范传感器设计制造过程提供理论依据。

**[关键词]** 应变式传感器；工艺流程；故障分析；设计制造

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，首先要解决的就是获取准确可靠的信息，这就需要各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在正常状态或最佳状态，并使产品达到最好的质量。因此可以说，没有众多的优良传感器，现代化生产也就失去了基础。随着技术的进步，使用称重传感器制作的电子衡器已广泛应用到各行各业，实现了对物料的快速、准确的称量，特别是随着微处理机的出现，工业生产过程自动化程度化的不断提高，称重传感器已成为过程控制中的一种必需的装置。应变式传感器由于其制作工艺较为简单，加工成本较为低廉，故被大量生产，在我国工业生产过程检测与控制、自动计量等领域已大量应用。

## 一、应变式传感器

### （一）概述

#### 1、基本定义

电阻应变式传感器是一种用金属弹性体将力转换为电信号的功能元件。它通过粘贴在弹性体敏感表面的电阻应变计及其以一定方式组成的电桥电路，在外加电源的激励下，实现力—应变—电阻—电信号变化四个转换环节转化的一种力敏感传感器。由于电阻应变式传感器必须通过一定形态的机械构件来实现力的传递，通过电阻应变计来实现电信号的传递，从而达到力的测量，因此，电阻应变式传感器被人们称为机电一体化器件。二十世纪三十年代，人们发明了应变计，利用应变计对材料进行应力分析，来研究材料的力学特性。随着研究的深入，人们反其道来分析，利用金属材料的稳定性，设计出了各种电阻应变式传感器，来进行各种物理量的测量。二十世纪五十年代，随着电子技术的快速发展，应变计制造技术的进一步成熟，电阻应变式传感器开始得到广泛地应用，各种结构、不同用途的电阻应变式传感器也相应被设计出来。

#### 2、基本分类

人们对电阻应变式传感器的命名各种各样，根据其结构形式，应变式传感器可分为：平膜片式、平行梁式、柱式、桥式、悬臂梁式、双梁式、轮幅式、压力环式、板环式等。根据其用途可以分为：

测力传感器、称重传感器、压力传感器、引伸计、位移传感器、扭矩传感器、速度传感器、高度传感器、加速度传感器等。

### 3、应用范围

电阻应变式传感器的检测对象——力，不单指垂直方向的拉力或压力它还可以是力空间六分量中任何一个单独的分量（力或力矩）。只要对弹性体进行专门设计，它可对融合作用于一个构件的六分量进行互不干扰的检测，同时输出六个与被测量有线性关系的电信号。适当改变弹性体的承载结构，电阻应变式传感器同样可检测压强（单位 kg/m<sup>2</sup>），其中包括气体压强、液体压强、土层压强等。电阻应变式传感器还可应用于位移检测、应变检测、形位检测、密度检测及液位检测。因为这些几何量和物理量都可以通过弹性体结构上的变化，将其转换为力学量。如今，电阻应变式传感器已广泛地应用于航空、航天、钢铁、石油、煤炭、交通、计量、机械制造等等领域。

#### （二）传感器基本原理

##### 1、传感器的电路原理

电阻应变式传感器是通过弹性体来实现力的传递，通过粘贴于弹性体上的应变计阻值的变化来实现力—电信号转换，通过惠斯登电桥的放大作用将信号输出。

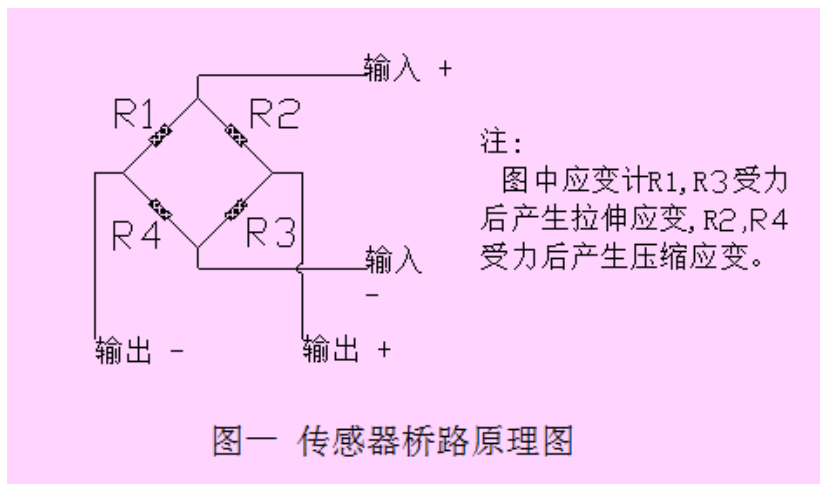


图 1 电阻应变式传感器的基本电路图

##### 2、传感器的电路计算

图 1 是典型的惠斯登电桥，其计算分析过程为：

$$\begin{aligned}
 U &= U_0 \frac{R_3}{R_2 + R_3} - U_0 \frac{R_4}{R_1 + R_4} \\
 &= U_0 \left[ \frac{R_3 (R_1 + R_4) - R_4 (R_2 + R_3)}{(R_1 + R_4) (R_2 + R_3)} \right] \\
 &= U_0 \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_4) (R_2 + R_3)}
 \end{aligned}$$

对其微分：

$$\Delta U/U_0 = (\Delta R_1/R_1 - \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 - \Delta R_4/R_4) / 4$$

根据应变计原理： $K \varepsilon = \Delta R/R$

$$\Delta U/U_0 = (K \varepsilon_1 - K \varepsilon_2 + K \varepsilon_3 - K \varepsilon_4) / 4 = K (\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 - \varepsilon_2) / 4$$

在上式中： $U$  为传感器输出电压； $U_0$  传感器输入电压，即供桥电压； $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  分别为各桥臂应变计标称电阻值； $K$  为电阻应变计的灵敏系数； $\varepsilon$  即为粘贴应变计处弹性体的应变量。如果  $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ，那么  $\varepsilon_1=\varepsilon_3=-\varepsilon_4=-\varepsilon_2=\varepsilon$ ，则传感器输出  $\Delta U/U_0 = K \varepsilon$ 。

以上可以看出，应变式传感器的输出灵敏度  $\Delta U/U_0$  是与输入电压无关的，只与弹性体的应变有关，单位为  $mV/V$ 。

### 3、应变式传感器的组成

电阻应变式传感器主要由弹性体、应变计、补偿电路、电缆线、密封材料等几部分组成，下面对这几部分的功能加以简单描述：

- (1) 弹性体：力的采集元件，是应变式传感器的基本构成部件；
- (2) 应变计：将力信号转换为电阻值变化的敏感元件，是构成应变式传感器的核心元件；
- (3) 补偿电路：用于对传感器的零点，输出灵敏度等基本参数进行修正，以满足产品标准和用户使用要求，是构成传感器的必要部分；
- (4) 电缆线：用于将应变计采集的信号输出的载体，是构成传感器的必须部分；
- (5) 密封材料：为保护传感器的性能满足设计要求，适应外界环境的变化，刷涂，粘贴或封灌在传感器敏感栅上的一些材料，主要目的是防止外界的灰尘，潮气和有害气体侵蚀传感器，对产品性能造成影响和破坏。

## 二. 传感器制作工艺

### (一) 主要工艺步骤

贴片→组桥→补偿→测试→防护

### (二) 贴片过程简述

贴片就是利用胶粘剂，将应变计粘贴在弹性体上，并通过一定的条件（升温，加压），使弹性体与应变计紧密结合，从而达到由应变计来传递弹性体应力应变的过程。贴片是整个传感器制造过程中（机械加工部分除外）关键工序，贴片质量的好坏，直接决定了一只传感器的性能，直接影响到传感器的零点，零点补偿，滞后，蠕变，重复性，稳定性等关键指标。

### (三) 组桥过程简述

组桥是将应变计按一定的要求连成惠斯顿电桥的过程。组桥是由焊点打磨挂锡、焊接导线的准备、桥路的连接等步骤组成。

#### （四）补偿过程简述

补偿指的是对连完桥的传感器零点输出和满量程输出的修正。

##### 1、对零点输出的修正

传感器在应用于称重系统的时候，由于要与仪表相配套使用，因此需将其零位修正到一定的范围，否则会增加整个测试系统的误差。同时，由于传感器在使用时环境温度的变化，也会引起零点输出随时间温度变化而变化，则就需要在生产中对传感器零点进行补偿，将其在应用到系统中后受环境影响而产生的变化降到符合使用要求的误差范围之内。

##### 2、对满量程的修正

传感器在使用时，由于材料受环境温度变化的影响，温度升高时其弹性模量变小，使得满量程输出变大；当温度降低时弹性模量变大，使得满量程变小。而这种满量程随输出温度变化而产生的变化往往大大超出传感器所允许的误差范围，因此就需要对这一现象进行修正，即对满量程的修正，也称之为温度灵敏度补偿。一般的，对温度灵敏度的补偿，在设计产品时已按一定的参数进行了修正，加入了桥路中。

#### （五）测试过程简述

##### 1、测试的原理及计算

理论上的传感器输入与输出之间应当是线性关系，并且当输入为零时，输出也应当为零。理论计算公式为  $y=ax$ （ $x$ —力、 $y$ —输出电压、 $a$ —灵敏度系数）；但是实际传感器不会达到以上理想的效果，非线性及其它性能会受环境、时间、材料等各种因素的影响。

##### 2、传感器测试性能要求

测力值与输出之间线性度要好，滞后要小，重复性要小，蠕变要小。

##### 3、传感器的输入输出关系

静态性能是被测量值处于稳定状态时的输入—输出关系，动态性能是输出量与随时间变化输入量的影响关系。测试的目的是检测传感器部分静态性能（线性、滞后、重复性、蠕变、阻抗、零位、输出灵敏度、温度灵敏度等）的过程。

#### （六）防护过程简述

测试合格的产品需要进行必要的防护处理以增强传感器的防潮性能和稳定性，延长传感器的使用寿命。

传感器的防护可依据传感器的使用环境和传感器用户的要求来设定。一般超市中使用的计价秤或计数秤使用与室内环境，防护等级要求较低，一般 IP65 即可，这些产品我们一般只用硅橡胶涂敷于传感器的应变计或电路上进行保护即可。大多数汽车衡都被用于室外，环境较为恶劣，对传感器的

防护等级较高，我们一般将传感器的贴片部位设计在沉孔中，防护时在沉孔中灌封硅酮树脂，再加一保护座封盖。这样的防护一般可满足 IP66 的要求。

随着焊接技术的发展，为了提高传感器的密封性能，有些传感器在应变计贴片孔、接线处等电器元件部分焊接膜盒、盖板、或波纹管，这种结构的传感器的防护等级最高可达到 IP68，不但可以达到防潮、防水外，也可以对一般的腐蚀性气体、腐蚀性介质达到防护效果。

目前传感器的焊接方法常见的有激光焊接和氩弧焊接，但是对于应变式传感器，在应力采集处焊接膜盒后，膜盒的变形会影响应变计对弹性体的应力采集，对于小量程传感器尤为明显，这样会影响传感器的线性滞后等性能，因此必须考虑每种传感器所使用膜盒的薄厚程度，通过具体的试验得出影响量的大小，得出合适的焊接参数，使传感器的性能达到最好。

焊接的主要目的起到密封作用，因此焊接后的传感器，必须对焊缝进行检查，检查方法有用眼看，用放大器或监视器观测，气压试验，湿热试验等。焊缝不能有缝隙、气泡、气压后不漏气，湿热试验绝缘性能必须达到要求。为了保证外观质量，焊缝也应光滑、均匀。

### 三 . 应变式传感器故障原因分析

#### (一) 贴片工序常见故障及分析

##### 1、故障分类

贴片在传感器整个生产过程中，起着非常重要的作用，若贴片质量不能保证，则整个传感器的质量都难以保证。在贴片过程中常见的质量问题主要有以下几个方面：（1）应变计鼓包；（2）应变计移位；（3）应变计加压不够。

##### 2、造成应变计鼓包的分析

应变计鼓包指的是应变计表面在贴完片后凹凸不平。众所周知，传感器是将应变计贴在弹性体表面上来传递应变，而由于弹性体材料的本身的特性，传感器在设计时一般的最大应变量为 1500-2000 微应变，通过应变计转换后，其输出信号一般只有 20-30 毫伏，而传感器的设计精度一般在 0.02-0.03 级（万分之二到万分之三），其允许偏差只有 4-10 毫伏。当贴完片的传感器若应变计表面鼓包，则在传递应变时就会失真，不能将弹性体的真实应变传递，从而造成传感器性能超差。同时，由于应变计的丝栅极细，若应变计表面鼓包，则会使其鼓包处丝栅变细，形成阻值不均匀（该出阻值变大），在传感器使用过程中，使得该点热输出变大，轻者造成传感器零点漂移，使传感器无法正常使用；严重的会使传感器丝栅断裂，造成传感器报废。下面对造成应变计鼓包的原因加以分析：

（1）弹性体表面光洁度不够。由于弹性体在机械加工时表面光洁度不够，整个表面本身凹凸不平，就造成应变计鼓包。在强光下观察应变计，可看应变计表面色度一致，但凹凸不平。去除应变计后，可明显看到弹性体表面凹凸不平，凸起处发亮，若应变计保持完整，在有放大镜或投影仪下可观察

到应变计背面的金属颗粒。

(2) 弹性体清洗不干净，贴片部位有其他异物存在，应变计与弹性体间夹杂其他杂物。主要为灰尘、砂粒、胶粒及胶中悬浮物等。在强光下观察应变计，可看到鼓包处应变计颜色与其他地方不同，较其他地方颜色深。完整去除应变计后，可看到弹性体表面光洁、平整，而应变计背面在放大镜或投影仪下观察，可看到有异物存在。

### 3、造成应变计移位的分析

应变计移位指的是应变计偏移其定位线。由于应变计采集的是最大应变（设计时定），若偏离预定贴片位置，则会造成应变计采集应变偏小，从而影响传感器满量程，其输出灵敏度偏小，同时会影响到传感器的线性、滞后这两项指标。应变计移位主要特征为应变计定位图标偏移定位线，一般情况若偏移距离大于 0.5mm，则该应变计应予以返工重新贴片。造成应变计移位的主要原因有两个方面：

(1) 贴片时本身对位不准，偏离定位线，从而造成应变计移位。大部分是由于胶粘剂刷的过多或胶粘剂比例不对，在挤胶过程中造成应变计偏离贴片位置，而挤胶完毕后又未进行检查所致。

(2) 加压工装设计不合理，从而造成应变计移位。主要集中在钢制传感器，由于其贴片部位形式各异，工装设计不合理，及易造成应变计移位。

### 4、造成应变计加压不够的分析

造成应变计加压不够主要原因是加压工装设计不合理，抑或加压时工装未放正，弹性体与工装间有其他硬物，影响加压效果，从而造成应变计加压不够。加压不够对应变计造成的影响是隐性的，轻微的在初期阶段并不影响传感器的正常使用，使用一段时间后，会出现传感器零点不稳，满量程偏移等现象。严重的在初期阶段即可体现出，如传感器零点不稳，温漂无法补偿，满量程漂移等，更严重的传感器根本无法使用。

应变计加压不够的主要特征为：在强光下观察应变计，可明显看到其表面颜色不一致，有大块面积颜色偏浅（压力不够所致），甚至整个应变计颜色与其它应变计颜色不一致，严重的整个应变计轻微触动即脱离贴片面，略轻的去除应变计时可明显感到用力要小的多。

## (二) 组桥工序常见故障及分析

### 1、故障分类

组桥工序常见故障有以下几个方面：

(1) 桥路组错；(2) 零点不稳；(3) 绝缘阻抗超差；(4) 桥路阻抗超差。

### 2、造成桥路组错的分析

将应变计通过导线按一定的要求连接起来，构成惠斯顿电桥。连桥过程中应注意，焊接引线

时，电烙铁不能在应变计焊点上接触时间过长，否则易造成焊点脱落和浮栅。对于用导线直径大于  $\Phi 0.5\text{mm}$  的，应先在应变计前粘一块接线端子，将应变计与接线端子用线径小于  $\Phi 0.2\text{mm}$  的镀银线或漆包线连接，然后将直径大于  $\Phi 0.5\text{mm}$  导线焊接在接线端子上。对于高精度传感器（精度高于  $0.02\%FS$ ），此方法可消除连桥导线所产生的附加应力，使传感器的稳定性、一致性更高。对连完桥的传感器，应及时用丙酮或酒精棉球将焊点清洗干净，若清洁不及时，会造成传感器不稳现象。同时还应注意应变计的性质，受拉还是受压，若连错桥路，会造成传感器无输出现象或输出为负现象。正确的连桥方式应为输入（+）与输出（+）之间用压片连接，输入（+）与输出（-）之间用拉片连接，输出（+）与输入（-）之间用拉片连接，输出（-）与输入（-）之间用压片连接（注：弹性体受力后产生拉伸变形部位所贴应变计简称为拉片；弹性体受力后产生压缩变形部位所贴应变计简称为压片）。

连完桥后的传感器应先进行阻抗测试，阻抗满足工艺要求后，用绝缘阻抗测试仪进行绝缘阻抗测试，绝缘阻抗大于 5000 兆欧（100V 直流电源或 50V 交流电源）方为合格产品，才可进行下一步骤。

### 3、造成零点不稳的分析

组桥造成零点不稳的主要原因是桥路焊接过程中出现虚焊、假焊、焊点清洗不干净等。表现为传感器标定时零点闪烁不定，在某一数值上下  $5\mu\text{V}$  摆动。对于这一情况，一般应重新焊接各组桥线接头部分，并彻底清洗干净即可排除故障。

### 4、造成绝缘阻抗超差的分析

绝缘阻抗超差指的是传感器桥路与弹性体之间阻抗达不到要求的指标。主要有两种表现形式：

（1）弹性体与桥路间绝缘阻抗小于 2000 兆欧，但大于  $1 \times 10^4$  欧，即通常所说的绝缘不够。这种情况一般的都是由于在焊接时清洗不干净，使用酸性助焊剂等所导致。相应的处理办法为：将传感器桥路各焊点重新焊接，并彻底清洗干净即可。还有就是由于焊接时电烙铁与应变计、柔性线路板、接线端子接触时间过长，导致这些电器元件绝缘强度降低，此时则应将这些电器元件予以更换。

（2）弹性体与桥路间绝缘阻抗小于  $1 \times 10^4$  欧，即通常所说的绝缘通，表现在用绝缘电阻测试仪测量时，其指针摆幅剧烈。造成这种情况的原因属于桥路某部分与弹性体接触，此时绝缘阻抗为零；或似接非接，这种情况测试时绝缘组抗极不稳定，一般为组桥用漆包线或塑胶线外层破损所致。对于这种情况则应仔细查找，将损坏元件替换掉即可。

绝缘阻抗不够一直是困扰诸多传感器生产厂家的难题，因为组桥过程中稍微的操作不当均可能导致传感器绝缘超差。而传感器的桥路至少有四个应变计，大部分的由八个应变计组成，甚至更多，当产生绝缘超差时，查找起来非常麻烦，而且极难确定故障所在。因此，对于这些问题，总结近几年现场生产的经验，按如下步骤即可准确找到故障所在点：①将传感器桥路由输出线两端断开，使

其成为两部分，分别测量这两部分绝缘阻抗，对绝缘阻抗超差的桥臂，再将其分为两部分，依次测量，直至找到故障点。此方法对于多应变计桥路最为有效，可快速有效的确定故障点；②对确定的故障点重新进行焊接，测试绝缘阻抗合格后，重新将桥路连接起来；③桥路连接完毕后，重新对照图纸进行检查，测量输入、输出阻抗和绝缘阻抗，合格后方可提交。若仍不合格，重复步骤①②③直至合格。

### 5、造成桥路阻抗超差的分析

桥路阻抗超差指的是传感器输入阻抗、输出阻抗、零桥阻抗（即相邻桥臂间的阻抗）与标称值不相符合。如图 2 所示传感器桥路图，分别标出了传感器的输入阻抗、输出阻抗。

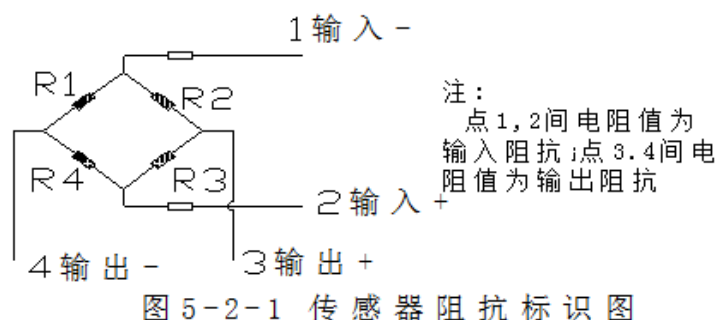


图 2 电阻应变式传感器阻抗图

### （三）补偿工序常见故障及分析

#### 1、温度漂移

当传感器温度变化时，弹性体、贴片胶、应变计会随温度的变化有不同程度的热胀冷缩，引起应变计丝栅变化，从而使阻抗变化，输出值产生变化。一般情况传感器的零点输出值会随温度变化成比例关系，这样在传感器桥路中串联一电阻温度系数较大的电阻 R，就可以对零点温度漂移起到抵消作用，这一过程称为温度补偿。

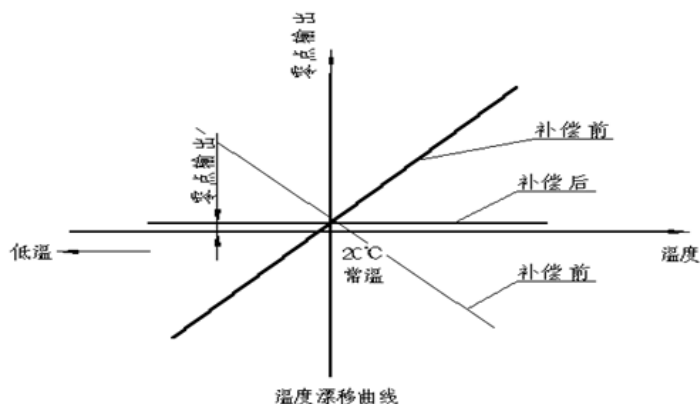


图 3 传感器温度漂移曲线图



## 2、造成初始不稳的分析

由于焊点虚焊及电路其它接触不牢靠，会使零点输出不稳定。

## 3、造成断桥的分析

惠四通电桥中有一桥臂或多桥臂短路，会出现阻抗变大。

### （四） 测试工序常见故障及分析

测试工序常见故障形式为：

- （1）初始超差：零点输出值大于所要求范围；
- （2）加载无输出：由于惠四通电桥中受拉力、压力应变计连接不正确，或桥路错误造成；
- （3）线性超差：线性误差超出传感器所要求精度；
- （4）滞后超差：滞后误差超出传感器所要求精度；
- （5）蠕变超差：蠕变超出传感器所要求精度；

## 四 . 结束语

总之，以应变计为核心的应变式传感器在实际的制造过程中引发故障的原因很多，有时几个故障可能同时出现。最好是在传感器工作原理的基础上制作传感器检查表，以提高分析的针对性和分析效率，从而快速而又准确的发现故障。在检查应变式传感器故障时，首先要对传感器外观进行检查，下道工序检查测量上道工序的质量，然后根据检查表对其进行逐步的分析和测试，这样故障就会被发现并很快排除。通过传感器制造过程的故障分析，使我们能够更好的优化设计、规范工艺，才能创造出高精度、高水平和世界一流的电测产品。

### 【参考文献】

- [1] 王云章，《应变式传感器故障分析与修理》，中国计量出版社，1994年。
- [2] 刘九卿，《电阻应变式称重传感器》，中国衡器协会专业培训教材，2006年。
- [3] 冯志辉，《称重传感器原理及常见故障解决方法》，中国计量出版社，2012年。

### 作者简介

作者：王世元

工作单位：中航电测仪器股份有限公司汉中分公司技术中心

邮 编：723000

联系电话：0916-2386062 13093931759