

应变式传感器 故障分析与修理

王云章 著

中国计量出版社

应变式传感器故障分析与修理

王云章 著

中国计量出版社

(京) 新登字 024 号

图书在版编目 (CIP) 数据

应变式传感器故障分析与修理/王云章著. - 北京: 中国计量出版社, 1994

ISBN 7-5026-0732-3

I. 传… II. 王… III. 传感器-故障检测-维修 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 12539 号

应变式传感器故障分析与修理

王云章 著

责任编辑 孙维民

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

北京怀柔燕文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

•

开本 787 × 1092/32 印张 9.5 字数 220 千字

1995 年 4 月第 1 版 1995 年 4 月第 1 次印刷

•

印数 1—6000 定价: 12.00 元

序

信息技术是扩展人类信息器官功能的技术，主要包括扩展感觉器官功能的感测技术，扩展神经网络的通讯技术，扩展思维器官功能的智能技术，以及扩展效应器官功能的控制技术与显示技术。其中，感测技术包括传感技术、测量技术及遥感遥测技术等。传感器是信息技术的前沿环节，如果没有传感器对原始信息进行准确、可靠的采集和转换，那末，准确、可靠的测量也是难以实现的。传感器的应用，已遍及科技、经济和社会发展的各个领域，愈来愈受到人们的重视。

本书着重介绍一种常用的传感器——电阻应变式力敏传感器的故障分析与修理。作者长期从事传感器的设计、制造与开发。第一章侧重于从实用的观点，阐述传感器及其故障特点、掌握传感器故障分析的重要性、传感器的修理及故障诊断技术。第二章分析了传感器的桥路网络和线路故障，列表说明了故障的名称、现象及判断方法。第三章分析了传感器的零点变化或零点漂移的原因，以及相应的克服或补救的办法。第四、五、六章分析了传感器的非线性、滞后及蠕变现象，提出了减小它们的影响的技术措施。第七、八、九章分析了传感器的角差修正和方位误差，介绍了传感器的密封技术和由密封件可能引起的故障，以及传感器某些关键附件可能引起的故障。第十章简要分析了由于应变计、弹性体的疲劳，以及传感器超载或冲击可能引起的失效。

07555/04

本书的出版，无疑会对设计、研制、使用电阻应变式传感器的科技人员有所裨益；也必定会对感测技术，进而对信息技术的发展作出贡献。应出版社和作者的要求，我高兴地
为本书作序。

中国计量科学研究院

施昌彦研究员

1994年10月3日

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 电阻应变式传感器及其故障特点	(1)
§ 1.2 掌握传感器故障分析技术的重要性	(4)
§ 1.3 传感器的修理	(7)
§ 1.4 故障诊断技术	(9)
第二章 传感器的桥路网络及故障分析	(13)
§ 2.1 典型的传感器桥路网络	(13)
§ 2.2 调零电路	(23)
§ 2.3 温度补偿电路	(33)
§ 2.4 线性补偿电路	(45)
§ 2.5 灵敏系数调整电路	(52)
§ 2.6 输出阻抗调整电路	(56)
§ 2.7 微调电路及并联调整电路	(57)
§ 2.8 传感器桥路网络的对称性	(62)
§ 2.9 电阻应变计的选型、布片及焊接	(65)
§ 2.10 传感器故障的初步探索	(80)
第三章 传感器的零点变化	(87)
§ 3.1 概述	(87)
§ 3.2 应变计质量引起的零点漂移	(89)
§ 3.3 贴片、组桥工艺质量引起的零点漂移	(97)
§ 3.4 传感器设计不合理引起的零点变化	(102)

§ 3.5	传感器机加工质量引起的零点漂移	(105)
§ 3.6	传感器复零特性的检测	(108)
§ 3.7	传感器内腔的保护、密封质量引起的零点漂移	(111)
§ 3.8	温度梯度引起的零点漂移	(116)
§ 3.9	使用现场的力致零点突变	(122)
§ 3.10	电磁场干扰引起的零点波动	(128)
§ 3.11	传感器零点高稳定技术的探索	(130)
第四章	传感器的非线性误差	(135)
§ 4.1	概述	(135)
§ 4.2	柱式传感器的非线性	(137)
§ 4.3	筒式和垫圈式传感器的非线性	(146)
§ 4.4	圆板式传感器的非线性	(156)
§ 4.5	板环传感器的非线性	(164)
§ 4.6	桥式传感器的非线性	(168)
第五章	传感器的滞后误差	(176)
§ 5.1	传感器的滞后误差及其分布状态	(176)
§ 5.2	传感器正滞后误差的成因分析	(178)
§ 5.3	传感器负滞后误差的成因分析	(183)
第六章	传感器的蠕变误差	(188)
§ 6.1	蠕变 (Creep) 及其检测	(188)
§ 6.2	传感器产生正蠕变的成因分析	(190)
§ 6.3	传感器产生负蠕变的成因分析	(194)
§ 6.4	传感器的蠕变补偿技术	(199)
§ 6.5	蠕变测试方法的探讨	(202)
§ 6.6	蠕变补偿的方法	(204)
第七章	传感器的角差修正和方位误差分析	(206)
§ 7.1	传感器的角差和方位误差	(206)
§ 7.2	计价秤用双孔式传感器的四角误差	(207)
§ 7.3	角差成因及其修正	(217)
§ 7.4	单 S 梁式传感器的角差	(218)
§ 7.5	钢轨式传感器的偏置误差	(220)

§ 7.6	三梁剪切式传感器的角差	(225)
§ 7.7	传感器的方位误差	(234)
第八章	传感器的密封技术及故障分析	(244)
§ 8.1	概述	(244)
§ 8.2	传感器的胶封技术	(245)
§ 8.3	硫化橡胶膜片及塑料膜片密封技术	(247)
§ 8.4	O型橡胶圈密封技术	(250)
§ 8.5	金属膜片热套焊接密封技术	(251)
§ 8.6	波纹管密封技术	(261)
§ 8.7	硅胶灌填密封技术	(264)
第九章	传感器关键附件及其引起的故障	(265)
§ 9.1	接线盒和引线端子	(265)
§ 9.2	电缆的选用、屏蔽层处理及断缆对接	(269)
§ 9.3	传感器外壳接地技术	(282)
第十章	传感器的失效分析	(286)
§ 10.1	应变计的疲劳	(286)
§ 10.2	弹性体的疲劳失效	(287)
§ 10.3	传感器失效的分析	(289)
结束语		(291)

第一章 绪 论

§ 1.1 电阻应变式传感器及其故障特点

电阻应变式传感器是一种用金属弹性体作为力转换为应变的功能元件。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网络,在外加电源的激励下,实现力、应变、电阻变化、电信号变化四个转换环节的一种力敏传感器。

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)。此外,只要对弹性体进行专门设计,它还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一定线性关系的电信号。

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^2),其中包括气体压强、介质压强、土层压强等。

电阻应变式传感器还广泛应用于位移检测、应变测量、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一定的中间过渡器件,或通过弹性体结构上的改变,而将其转换为力学量。

电阻应变式传感器之所以被人们称为机电一体化器件,是因为传感器的上述转换功能一半是依靠被设计成一定形态的机械构件来完成的。就一般工程用称重传感器而言,其机

机械构件包含弹性体、外罩、密封膜片、接线盒、底座及上下承力附件。这些机械零件的设计、材质选择、材质热处理及机加工工艺，与通用机械零件相比，有其自己固有的结构特点和工艺特点。

电阻应变式传感器实现转换功能的另一半是依靠与弹性体结合为一体的电子线路来完成的。电子线路中包括电阻应变计、各种补偿电阻、调整电阻、连接导线、线路板及传输电缆。从测量网络的线路结构看可以说相当简单，并不涉及任何深奥的电子理论。但其中电桥的布局设计、各种电阻器件的分压计算、补偿效应分析及补偿电阻的阻值计算、各种调零网络的设计、各种干扰现象的分析及措施、输入输出信号的检测等等，都归属于电子仪表制造专业范围。

这“机”“电”两者在传感器内的“结点”，是应变计和金属弹性体敏感表面的粘接剂胶层。胶的特性研究和胶的粘接技术涉及高分子的聚合、交联和固化，它应归属于有机化学工程的研究范围。而正是这个小小的“结点”却是传感器技术研究的热点。所以，严格的说电阻应变式传感器是一种机电一体化的产品；它是一门涉及力学、电学、化学等多门学科的边缘科学。

电阻应变式传感器是一种计量器具，近年来还普遍用它来作为力值传递的基准。所以就传感器而言，不仅没有信号输出或输出信号异常认为是一种故障，即使信号稳定，但信号与力之间的多项对应关系中只要有一条不符合设计要求，就认为是有故障。信号与温度之间的多项影响量中只要有一条超过规定，也认为是有故障；信号随着时间推移而产生的漂移超过规范，也认为是有故障。上述故障中只要存在其中一条，依照传感器的国家标准和应用的实际要求，就不允许作为计量产品在市场上流通。所以，研究电阻应变式传感器各

种可能出现的故障，研究其故障机理，从生产工艺上保证传感器的质量，是一项极其重要的工作。

电阻应变式传感器由于其工作机理上所涉及的学科的交错和元器件的交错，也就造成了故障成因的交错、诊断的困难和复杂。传感器故障成因可粗分为下列三类：

（一）纯机械构件引起的故障

这类故障中有些可以在制作过程中用量具检测，但更多的缺陷是难以用一般测量工具或仪器检测的。例如应力集中、残余应力、微量的塑性变形、疲劳裂纹、非恒弹性行为及复杂构件的形位误差，这些细微的缺陷，既看不到又测不出，但在传感器桥路网络的输出信号中，却相当敏感。所以尽管这类故障就其根源来说纯粹来自弹性体或其它机械构件，但唯有通过电信号的变化现象才有可能去进行故障的分析和推断。

（二）电桥网络内的线路故障

电阻应变式传感器的电桥网络相比于其它电子产品线路来说简单得多，但它的每个元件都有它独特的功能和特性，任何细微的变化都会使输出信号产生较大的变化。另一方面，尽管不同的传感器其线路可说是大同小异，但不同结构的传感器，桥路网络确有所区别。进口传感器与国内传感器桥路网络又另有特点。所以，线路故障分析的关键在于对这些元件在检测中的作用要有全面深入的了解；对几种典型的桥路网络要了如指掌。当熟练掌握了这些知识之后，就不难用一只高精度万用表在电缆端头或接线盒线路板上对测量网络内的各种器件进行故障寻觅，例如短路、断路、绝缘损坏及各元件的阻值状态。

在谙熟了传感器的工作机理和积累了相当实践经验之后，甚至某些非线性故障，也都可以通过对电阻器件的阻抗

检测及变化量来进行判断。例如弹性体是否遭受了冲击和超载，粘贴质量是否理想等。因为这些故障尽管不产生在电子线路内，但这些故障都会使应变片的阻抗产生一些特征性的变化。

(三) 粘贴部位的故障

这一类故障是由胶粘剂本身材质和胶粘工艺质量引起的。可以通过刀刮作破坏性试验，获得一些粗略的感觉。但同机械故障中的某些无法用一般量具检测的故障一样，胶接故障也只有依靠传感器总体信号的性能测试来进行判断。

综上所述，电阻应变式传感器机、电、化三方面交错重叠一起的故障，唯有利用桥路网络这个媒介去分析内情，利用桥路网络的输出信号与力值、温度以及与时间之间的多种对应关系这几个窗口去认识它的内在质量和寻觅故障所在。所以，传感器的故障诊断事实上是一个很复杂的推理过程。只有大量积累知识，有效利用积累的经验，才能根据测量仪表提供的数字、数列和现象，快速准确地作出诊断，并提出消除故障的措施。

§1.2 掌握传感器故障分析技术的重要性

故障总是在系统终端的显示仪表上首先被发现的。不论工程上使用的复杂的电子衡器和测力系统，还是实验室内进行一类最简单的试验，事实上都由机械装置、一个或多个传感器和系统的中间接线盒、传输电缆和检测仪表构成。所以现场测控人员或实验室测试人员在诊断传感器故障时，首先应判别故障究竟来自测量系统的哪一个环节，这对有效判断传感器故障非常重要。可通过仔细观察机械装置的安装状态来发现并排除一些明显的机械故障。可用一台同类型但不同

量程的高准确度的小传感器当作标准信号发生器来判别显示仪表是否有故障。同样，也可以打开中间接线盒的盖子，用一台正常的仪表来分别检测每只传感器的工作状态，从而判别究竟是哪一只传感器出了故障。此时，我们还可用普通电工万用表和摇表来检查总电缆是否受到伤害。

通过仪表上异常示值的现象，已可对故障作出大致的定位，从而可直接对某些部件进行检查。只有在示值现象无法表现任何一种较确切的推断时，才依上述程序逐一去进行检验和判断。

当把存在有故障的传感器进行了更换之后，应将其送到有一定测试条件的工作室里作进一步的分析。同时必须了解故障发生当班的运行情况，这点极为重要。因为故障根源固然很可能是由传感器的内在质量所引起，但也很可能是因为使用违规，或机械装置的某一安装细节出现了异常所引起。若不加分析地更换新传感器，则当类同情况产生时，必然重蹈覆辙，会接二连三地把价格昂贵的传感器损坏。这不仅严重影响生产，而且会造成巨大的经济损失。不少引进生产线上的称重测力系统已有许多这样的事例发生。

另外，综合多年来传感器的修理记录后发现，不少故障完全可在使用单位就地消除。这样不但不致影响生产，而且可节省许多开支。

鉴于上述两种情况，证明现场维护人员了解电阻应变式传感器各种典型的桥路网络，掌握故障判断技术是极有实用价值的。由于应变式传感器技术本身并不涉及深奥的基础理论，而是一门工艺性很强的应用技术，所以对具有一定文化素质的使用者，要掌握一些基本技能，其知识跨度其实是不会很大的。

传感器厂销售部的人员与各行各业的用户接触，用户的

使用工况多种多样。一个有水平的销售人员应能从用户陈述的故障现象中，初步判断产生的原因。许多故障的产生是与销售人员的职责相关的，例如所选用的传感器型式、所推荐的量程与用户的使用工况是否相适应；或者在签订合同时，是否问清使用工况，是否提醒、指导用户选型时应考虑的各种因素等。产品说明书不仅应罗列产品的各种参数，更应说明它的使用注意事项及简单的故障排除方法。

故障判断工作更是传感器生产厂技术人员经常要进行的一项工作。就定型产品而言，质检部门应随时跟踪产品的质量。传感器是一个工艺环节极多、精度要求很高的产品，只要一个极细小的环节出了人为的或客观的问题，就会使部分产品或一批产品不合格或不符合订货单上规定的质量要求。运转着的生产体系就会要求技术人员迅速作有说服力的分析，并期望给出一个有效的挽救措施。由于传感器故障诊断的复杂性，所以传感器厂的专业技术人员若不能不断更新知识，若没有多年的实践经验和掌握一定的分析方法，是难以胜任此工作的。

故障判断工作还贯穿在新设计传感器的试制工作中。对于新设计的传感器，设计者最关心的是他期望的精度指标是否达到，实测灵敏系数与设计灵敏系数是否一致或接近。若其中有不尽人意或失败之处，则必然要通过各种手段去寻求失败的原因，是力学分析错误？是结构设计不当？还是加工中的工艺差错？或是元器件质量不佳所引起。所以新产品的整个开发过程，几乎一直伴随着故障分析。

改革开放以来，国内引进了许多生产线。这些生产线上配备了各种传感器，其中有大量的电阻应变式传感器。备件难已是引进企业呼吁多年的问题，难点在于少量订货，国外交货时间长；有的已改型，找不到对应的生产厂；还由于费

用昂贵，这些发生了故障的传感器就急需国内传感器厂去修理。

修理的前提条件是要对传感器作出正确的故障判断，而故障判断的前提要对各种国外传感器的结构、制作工艺及内部的桥路网络有透彻的了解。所以，备件国产化工作的第一个环节还是故障判断。总之，故障判断是传感器设计者、研制者及生产厂科技人员、销售人员的一项重要技术工作，它有极强的技术性。

故障判断工作不仅具有维持正常生产、维持正常使用的现实作用，还有颇大的科研价值；因为故障不仅是工作质量的反馈，还是理论设计是否符合客观事实的一种检验。从故障判断到故障消除这一个艰苦的过程，事实上也就丰富了传感器的设计理论。

故障判断还会促使从事传感器研制的科技人员去研究一些看来与传感器专业无直接关系的学科，例如振动冲击问题、温度剧变问题、强磁场问题、核辐射问题、金属的疲劳问题、防腐问题等。所以故障判断工作和传感器技术的发展始终相辅相成。国内传感器设计技术和工艺技术的日趋提高，正是这种不断探索的结果。

从上述多层次的情况分析可见，掌握故障判断技术，不仅为使用者所迫切需求，还为设计者、研制者、生产技术管理人员所迫切需求。

§ 1.3 传感器的修理

传感器修理是跟随着传感器故障判断后所必然要进行的一种工作。当传感器的某些元件、部件已被损伤，但从价值含量分析关键部分尚完好，则可对这个还是基本完好的传感

器进行修理以减少损失。

随着电阻应变式传感器工艺技术的日趋成熟完善和工时费用在传感器总成本中含量的不断增大，国产电阻应变式传感器也将日趋成为一种一次性使用器件。分析国外某些公司生产的工程用传感器的结构设计和工艺特征可见，他们为保证传感器的可靠密封，传感器已成为一种不允许修理的一次性器件。

但鉴于国情，我们短期内还难于丢掉修理这一传统的工作。因为国产传感器大多不是应变片到了使用极限或弹性体材料到了疲劳极限才出现异常的，很多故障是由于密封不良、元件质量不佳、粘贴不牢、焊接不牢等技术原因引起的。

修理国外进口传感器，就国内目前的情况看更具有双重的意义。其一，经济价值较大。进口传感器一般价格较高。例如 KELK 公司 2000t 轧制力传感器，93 年为 12 万元一只；圆盘式轧制力传感器 25 万元一只。所以只要弹性体还未因疲劳而失去转换功能，则给予修复使用是值得的。其二，通过修理可全面剖析这些传感器的结构和所采取的工艺措施，从而有助于提高专业生产厂的设计水平和工艺水平。从这个意义上说，对于一些有技术特色的进口传感器，即使已是一个被损坏的残骸，也是极有剖析价值的。

修理国外引进传感器的技术难度是相当大的。因为引进传感器一般均与专用二次仪表配套，所以传感器厂科技人员必须查询原产品说明书，了解它的结构特征、工艺特征、零部件材质及故障部位后才能进行修理。修理后不仅外形安装尺寸要与原机一致，而且技术参数也必须与原机完全一致，只有这样才能与进口的传感器和进口的二次仪表兼容。

传感器在使用中产生的损坏大多是指传感器器件的完整

性而言的，例电缆被砸破了，膜片砸弯了。对于这些硬件被损坏的传感器，可能已无信号，也可能尚有信号输出，但已严重失真。我们的经验证明，在很多情况下，这类传感器比长时间使用后产生的信号失真更容易修理。因为这往往是外力致损，而内在质量大多还处于寿命的青春期，只要更换某一器件就能基本恢复。而对于较长时间现场使用后的精度降低，信号失真，绝缘下降之类“软毛病”有时反而颇费周折，此时，修理工作主要决定于故障的正确定位。

不仅故障判断是一项技术性很强的工作，修理同样有极强的技术性。因为修理的最终目的不仅要达到原机具有的精度的指标，还要尽量达到原机具有的稳定性、可靠性和抵抗一切恶劣环境的能力。修理不是只求一时的满足，而要求近乎完美无缺。所以，有时比重新仿制有更高的技术难度。

§ 1.4 故障诊断技术

电阻应变式传感器故障的多项性、复杂性及其成因的交错性，使人们难于用常见的“故障分析一百例”之类的书来指导使用者去进行多种多样故障的判断和维修。

根据仪表显示的数据或现象进行故障的逻辑推理，关键在于自身知识的结累和运用合理的推理方法。所以本书重点在于向读者提供与传感器故障相关的各种专业知识，同时尽量提供一些业已证实无误的故障现象和成因之间成对应关系的实例，以期望读者能通过本书的阅读，为电阻应变式传感器的故障分析提供参考。

会有大量的故障尚未被罗列于内，也可能会有不少已得到分析的故障被另外一些成因所对应，这些都是不可避免的。当新的故障现象被发现时，就需要我们从深层的原理知