

# 关于应变式称重传感器的可靠性问题

中国运载火箭技术研究院第七二研究所 刘九卿

**【摘要】** 可靠性是应变式称重传感器非常重要的质量指标，是市场竞争力的决定性标志，也是我国应变式称重传感器与工业发达国家同类产品的主要差距。结合我国应变式称重传感器研制、生产总体情况和在电子衡器应用中的可靠性问题，介绍了可靠性概念和研究方向；讨论了可靠性设计、控制和管理问题；分析了影响应变式称重传感器可靠性的系统性和随机性因素。提出生产过程中的设计符合性控制和工艺可靠性控制是提高应变式称重传感器可靠性的重要途径。

**【关键词】** 称重传感器；可靠性；故障；失效

## 一、概述

所有应变式称重传感器（以下简称称重传感器）和由称重传感器组成的电子称重系统，都将随着时间或使用而出现性能波动，不能完成规定功能并最终失效（不稳定）。称重传感器从开始使用到失效前的时间是不确定的，可靠性就是研究在规定的条件和时间内，称重传感器的平均无故障工作时间、工作失效率和可靠寿命，这对提高称重传感器组装的电子衡器和电子称重系统的可靠性至关重要。因此，可靠性已成为称重传感器非常重要的质量指标和市场竞争的决定性标志。

国际标准化组织（ISO8402）对于可靠性的定义：“单元在给定的环境及运行条件下和在给定的时间内，完成规定功能的能力”。这里“单元”一词是讲作为一个整体来考虑的对象，它可以是一个元件，一个子系统，一个系统。单独考虑称重传感器它就是一个元件，与称重系统一起考虑它就是子系统或系统中的重要环节。“时间”应从广义角度去理解，就称重传感器或电子衡器而言，它是受应力循环的次数。对于质量的定义：“产品的质量反映产品满足明确和隐含需要的能力的特征总和”。“需要”按定义可包括性能、可用性、可信性、可靠性等，这里的“性能”是需要的一个方面，是中心考虑的问题，而可靠性就是产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。根据上述定义，把不能完成规定功能的状态称为故障或失效。可靠性的核心是故障，即可靠性是由产品的故障引发出来的。失效——故障——可靠性——可靠度，四者之间密切相关，构成了因果链。从上述可靠性理论可以得出称重传感器的可靠性就是在规定的的环境条件下无故障的持续工作时间。可靠性是由称重传感器故障引发出来的，可靠度是用来度量称重传感器可靠性水平的数值，是在统计称重传感器工作时间和故障次数的基础上进行数据处理的结果。若要达到较高的可靠性水平，必须作好称重传

传感器的可靠性设计、控制和管理。

## 二、应变式称重传感器的可靠性

20 世纪 90 年代以来,我国称重传感器和电子衡器在工业与商业称重计量中得到广泛应用,称重传感器的稳定性和可靠性问题,越来越引起用户的普遍关注。在目前条件下,研制生产出较高准确度等级的称重传感器并非难事,但研制生产出具有较高稳定性和可靠性的称重传感器并非易事。

在多次国际学术会议和学术交流中,各国专家一致认为就称重传感器的工作原理、结构特点、制造工艺和应用条件而言,它应属于半永久性的工作器件,IP67、IP68 防护密封等级的称重传感器应能稳定可靠的工作 10 年以上。

根据产品可靠性定义和称重传感器的实际应用情况,其可靠性定义为:称重传感器在规定的使用条件下和一定的时间内完成规定功能的能力或概率。具体来说,就是在规定的使用条件下和一定时间内,称重传感器保持其各项技术性能并稳定工作的能力,多以无故障工作时间或可靠寿命来度量。众所周知,称重传感器主要用于各种电子衡器和电子称重系统,要求综合性能好且稳定,即非线性、滞后误差和灵敏度温度影响等所有偏差之和,应处于某一允许误差带之内。其中零点和灵敏度的稳定性直接影响称重传感器的长期稳定性和工作可靠性。

目前,国内外对传感器可靠性多集中在一些可靠性要求高的系统上,例如运载火箭与导弹、卫星与宇宙飞船、军用与民用飞机、大型工业控制系统等。对于这些系统所用的各种传感器,根据 4 个可靠性基本函数,进行各项试验,完成了大量的数据采集、分析处理工作。美国的可靠性分析中心和我国的军事科研部门都累积了大量的传感器可靠性数据。对于称重传感器可靠性的研究,国内外还只限于可靠性分析和跟踪测试阶段。

可靠性分析贯穿于称重传感器设计、制造、使用的全过程,它是可靠性研究的重要环节。主要是故障(失效)机理分析,通过对故障进行宏观到微观分析,查找故障原因,摸清故障的内在规律,从而采取相应对策,提高称重传感器的固有可靠性。

跟踪测试是经济适用的研究称重传感器可靠性的简易方法,国内外一些企业在这方面进行了两种工作。一种是在试验室环境条件下,对称重传感器的贮存寿命进行了跟踪测试;一种是在使用环境条件下,对称重传感器的无故障工作时间,即使用寿命进行了跟踪测试。寿命试验是可靠性试验中的重要内容,除贮存寿命试验外还有损耗寿命试验、加速寿命试验等。建议生产企业与使用单位密切配合,互相进行信息交流,积累称重传感器的无故障工作时间等可靠性数据。

按传统的可靠性分析方法,产品的失效率遵循浴盆曲线,如图 1 所示。

左边部分为早期失效期是递减的,在产品使用的早期,由于加工制造内部留下一些缺陷,失效率往往较高,一般都是在产品出厂前通过老炼试验消除早期失效。中间部分为偶然失效期是水平的接近一个常数,这是因为产品经过早期失效后,失效率稳定在一个较低的水平,这个时期的失效率往往因随机的原因引起,称为偶然失效期。右边部分为损耗失效期是递增的,由于零部件老化、损

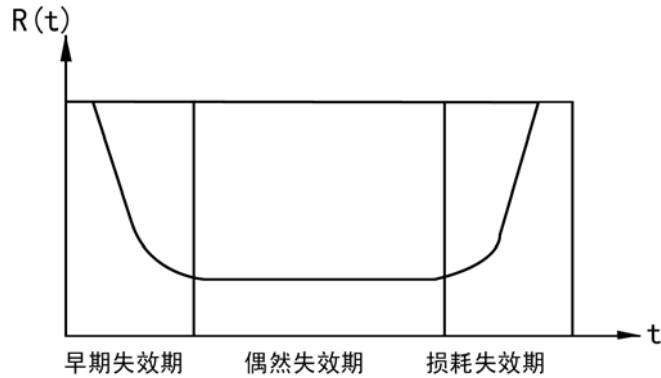


图 1 产品失效率曲线

耗等原因，失效率开始增加。称重传感器的稳定性和可靠性完全符合这一规律，分为初始不稳定期、稳定期和疲劳不稳定期。初始不稳定期是由于弹性元件经过锻造、机械加工、热处理以及表面打磨、喷砂、贴片等工艺产生残余应力，并不断的松弛和释放，使零点和灵敏度发生变化，造成称重传感器性能波动。它可以通过对元器件实施环境应力筛选，对称重传感器进行老炼和稳定处理，尽量释放和消除残余应力，在生产过程中渡过初始不稳定期，出厂后就开始进入能够稳定可靠工作的稳定期。在经历了长时期的无故障工作后，由于防护密封材料老化，电路补偿与调整元器件损耗，电阻应变计疲劳等原因，使称重传感器产生性能波动，工作不稳定直至失效，称为疲劳不稳定期。称重传感器的可靠性理论就是研究分析各种影响其可靠性的系统性和随机性因素，科学合理的提出可靠性的定性和定量要求，如故障模式及影响分析、无故障工作时间和可靠寿命等。

### 三、应变式称重传感器的可靠性设计

把比较复杂系统的可靠性设计方法引入称重传感器可靠性设计，采用系统化的分析程序进行故障模式与严重度分析，查明可能存在的隐患，采取措施改进设计，目前还有较大困难。因为称重传感器的可靠性是属于指数分布还是威布尔分布还有待于进一步认识。但根据称重传感器的工作原理、制造工艺和应用情况，从残余应力影响，元器件和密封材料老化，电阻应变计疲劳积累等方面分析，一个合乎逻辑的处理就是按其功能将称重传感器各个相互作用又相互依赖的组成部分，独立出来分别研究其可靠性。例如弹性元件材料及热处理；电阻应变计及应变胶粘剂；电路补偿元器件与补偿工艺；防护密封材料与密封工艺等。称重传感器的技术指标确定后，不能像设计一个比较复杂系统那样，将技术指标分配给各分系统、单机或部件，为可靠性设计提供定量的目标。因为称重传感器的各组成部分是相互作用又相互依赖的，可以说都是称重传感器的基础，哪一个环节的故障率高，都对称重传感器的可靠性产生较大影响，因此，必须作好称重传感器可靠性的基础设计。

#### 1、弹性元件的可靠性设计

弹性元件的结构是称重传感器的基础，是稳定性和可靠性的重要因素。因此，弹性元件及其保

护外壳、焊接密封膜片、上下承载压头和压垫的设计,必须保证称重传感器受载后在结构上不产生性能波动,或使其性能波动减至最小。为得到较高的可靠性,在弹性元件结构设计时应尽量作到:应变区受力单一,应力分布均匀,应变程度不应太高,非应变区应处于低应力水平,即应变区之外不能有高于应变区的应力场和应力集中处;通过自身结构或利用保护外壳使其具有较强的抗偏心和侧向载荷的能力,克服非测量载荷的影响;安装力远离应变区,引入载荷的压头和承受载荷的压垫受力合理,避免载荷引入点和支承点的位移;粘贴电阻应变计的表面尽量为平面,并有足够的工作面积,为贴片作业和防护密封创造有利条件。尽管称重传感器属于装配部件,但为了获得最佳性能和保证它能稳定可靠的工作,在结构设计时必须尽量减少零部件,提高集成化程度,尽可能是一个整体结构,因为各连接件之间的位移都可以引起非线性和离散性。

## 2、弹性元件材料及热处理工艺选择

弹性元件材料及热处理工艺对称重传感器的综合性能指标,长期稳定性和工作可靠性有较大影响,是称重传感器可靠性设计的关键问题。特别是不锈钢弹性元件材料的固溶热处理工艺及时效方法直接决定称重传感器的性能和可靠性。从弹性元件材料的弹性模量、滞弹性效应、残余应力影响和抗疲劳等方面考虑,应尽量选择弹性极限和屈服极限高;弹性模量的时间与温度稳定性好;弹性滞后与弹性后效小;耐振动、冲击,抗疲劳能力强;锻造、机械加工和热处理工艺性能好且产生残余应力小的金属材料。要使某一种金属材料同时具备上述各项性能是很难作到的,但可以通过某些控制方法和处理后,使其尽量满足或接近上述各项要求。在弹性元件材料上提高称重传感器可靠性的有效途径是严格要求成份的纯度和材质的均匀性,不突出某一单项指标,追求综合性能良好,特别要试验出最佳热处理工艺和时效制度。例如 0Cr17Ni4Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢,就必须在固溶热处理工艺及两次时效法或冷却处理加时效法上多进行试验,确定满足称重传感器综合能和可靠性要求的热处理与时效工艺制度。

## 3、电阻应变计选择

电阻应变计是称重传感器的核心部件,其稳定性和可靠性在很大程度上决定称重传感器的稳定性和可靠性,因此是可靠性控制的重要环节。由于电阻应变计试验测试后不能二次使用,只能测量出实验室环境条件下的疲劳寿命,这给研究工作带来较大困难。目前国内外称重传感器生产企业,对电阻应变计可靠性的控制,通常围绕敏感栅结构形式、影响可靠性的诸因素和工作特性筛选等问题进行。

### (1) 电阻应变计的结构

称重传感器用电阻应变计的结构设计,不能停留在传统的经验设计水平上,只是在栅长、栅宽和电阻值上做文章,而重点应对电阻应变计的应变传递理论、工作稳定性和疲劳寿命进行研究。生产实践证明,在相同结构的称重传感器上,粘贴不同结构的电阻应变计,其蠕变指标、达到同一准确度等级的合格率和疲劳寿命有明显差异,这都是对电阻应变计的应变传递理论、蠕变机理等研究

不够所致。称重传感器用电阻应变计，多采用平面和三维问题有限单元分析方法，对应变传递，基底和覆盖层的力学效果及最佳厚度，敏感栅的端部效应及端部形状与蠕变的关系，基底厚度对滞后的影响等进行分析与选择，设计出满足称重传感器综合性能指标和可靠性要求的电阻应变计结构。

### (2) 影响电阻应变计可靠性诸因素

电阻应变计的结构、制造工艺和应变传递原理决定了大批量生产的各种产品，不可避免的产生一些工艺缺陷，直接影响电阻应变计的长期稳定性和工作可靠性。归纳起来影响稳定性和可靠性的因素主要有：

#### 1) 敏感栅箔材及热处理工艺的影响

称重传感器用电阻应变计敏感栅箔材多为康铜(铜镍合金)和卡玛、伊文合金(镍铬改良合金)，影响稳定性和可靠性的因素除合金成份的纯度和组织的均匀性外，主要是合金箔材的热处理工艺。箔材在多次轧制、碾压过程中，晶格产生位错、滑移、空位破裂等缺陷，其附近的原子处于热力学上的不稳定状态，是电学性能不稳定的重要原因。因此必须进行稳定性处理，即退火处理，在达到退火温度时这些原子吸收热能产生扩散，使晶格缺陷迁移和消失，电阻率和电阻温度系数趋于稳定。退火温度、保温时间、循环次数是稳定性处理的三要素。如果箔材热处理和稳定性处理工艺选择不当，将造成箔材的电学和温度特性不稳定，是电阻应变计不稳定的主要因素。

#### 2) 基底、覆盖层和应变胶粘剂的影响

电阻应变计的基底、覆盖层和应变胶粘剂均为有机高分子材料。而所有高分子材料都会受到空气中的水分和氧气的影响，因为水能渗入几乎所有聚合物产生增塑，也同样会随时间而发生劣化，即由于物理的或化学的变化使其性能降低。从而使基底、覆盖层与敏感栅之间的粘结强度下降，导致称重传感器的滞后、蠕变、零漂增大，灵敏度降低，直至完全失效。电阻应变计基底胶膜和覆盖层的厚度，对应变传递和蠕变、滞后性能均有较大影响，因此必须加强对材料品质的选取确保基底胶膜厚度为  $25\pm 5\mu\text{m}$ ，复覆盖层厚度为  $10\pm 2\mu\text{m}$ 。

#### 3) 残余应力的影响

电阻应变计的制造和粘贴均经过多道工序生产过程，由于箔材清洗、与框架粘接、涂基底胶、化学蚀刻、加复覆盖层及固化夹持力、机械或化学调阻等工序，需经受酸、碱、各种试剂(丙酮、无水乙醇、丁酮)以及水等各种介质的作用，都在敏感栅、基底和覆盖层内产生残余应力。这些残余应力随着时间和使用逐渐释放造成电阻应变计性能不稳定。为克服残余应力的影响，必须采用特殊的稳定性处理工艺。

#### 4) 工艺缺陷的影响

由于工艺装备和制造工艺水平等因素造成敏感栅蚀刻后，在栅条上和栅条间出现较大锯齿、锯齿间细栅、过蚀刻缺口、欠蚀刻“小岛”、栅间“连桥”，在基底内产生气泡，甚至夹带灰尘、杂质等缺陷。敏感栅上的锯齿间细栅或缺口，随着应力循环次数的增加而引起电阻不可逆变化，造成滞后增大、零

点不稳定等严重后果。基底内的气泡可产生不均匀的热交换，使电阻应变计的零点漂移增大。

#### 5) 残余蚀刻液的影响

电阻应变计敏感栅在粗、精蚀刻过程中，都采用三氯化铁等蚀刻液，蚀刻或调阻后若工艺控制不严格，表面清洗不彻底会在敏感栅表面残留微量蚀刻液，继续对敏感栅进行蚀刻，使电阻值缓慢增加，产生性能波动。

为减少上述影响，提高称重传感器的可靠性，必须从源头上控制这些不可靠因素。由于敏感栅将弹性元件的应变转换为电阻变化，基底支持敏感栅使其保持规定的几何形状，覆盖层既保护敏感栅又增加敏感栅与基底的粘结力，所以只有敏感栅、基底和覆盖层三者结为一个整体，才能保证应变传递，提高电阻应变计的可靠性。

#### (3) 电阻应变计的筛选

电阻应变计的制造工艺决定了其成品必然存在一些不可避免的工艺缺陷，作为短期使用的工程结构实验应力分析完全可以满足要求。用于长期使用的称重传感器，即使是 A 级电阻应变计有些指标还存在一定差距。为了提高称重传感器的长期稳定性和工作可靠性，对电阻应变计必须进行严格的检查与筛选。主要检查与筛选项目是：几何形状与表面质量，机械与电学性能，电阻值分散度等。只有将电阻温度系数小且稳定、电阻值偏差小的电阻应变计粘贴在同一个弹性元件上，才能有利于各道工序作业并提高称重传感器的可靠性。

### 4、电路补偿与调整原材料、元器件的选用

电路补偿与调整所用的原材料、元器件与电阻应变计一样，都是影响称重传感器可靠性的基本单元，为提高称重传感器的可靠性，必须认真选择原材料、元器件并进行严格的环境应力筛选，一般应遵循下列原则：

(1) 在广泛调研基础上编制原材料、元器件优选目录，避免盲目选用而引入档次低或不合格原材料、元器件；

(2) 对原材料、元器件进行综合评价，主要是可靠性、可用性、适应性、经济性和生产一致性五项指标，以保证称重传感器各项电路补偿与调整指标的稳定性和可靠性，应在评价和试验的基础上决定是否选用；

(3) 对原材料、元器件的生产厂家进行质量认证，必须经权威机构认证合格，并以此作为原材料、元器件选点和选用依据；

(4) 对可靠性有较大影响的关键元器件应进行严格的环境应力筛选。

### 5、电桥及补偿电路的简化设计

提高称重传感器可靠性的重要措施之一，是对电桥及补偿电路，补偿与调整工艺进行简化设计。其设计原则是尽量减少各种补偿电阻、焊线端子、焊线接线板等元器件的数量，优化制造工艺，避免或减少重复焊接，尽量使工序作业一次就做到优秀。电桥及补偿电路简化设计对于称重传感器可

靠性的主要贡献是：

- (1) 元器件数量减少，使焊点数量也随之减少，从而减少了出现故障的机会；
- (2) 提高工艺性，便于生产过程质量控制，减少了降低可靠性的因素；
- (3) 容易实现标准化、通用化的高效智能电路补偿与调整工艺，有利于多品种、小批量生产，并能较大限度的减少人为差错。

### 6、耐环境设计

称重传感器可靠性的本质问题是如何耐受可能遇到的各种环境条件作用，而能稳定可靠的工作。因此必须重视并了解各种环境条件及其潜在影响，选择能够抵抗这些环境条件影响的设计方案。

按环境的性质和特征，一般环境条件分为客观环境和感应环境两种类型。前者为周围的自然环境，后者是人为环境。称重传感器耐受的环境条件两者兼而有之，主要是温度、湿度、盐雾、振动、冲击，因此采取的耐环境条件措施主要是耐温度、湿度、抗振动、冲击等。由于称重传感器的结构原理和制造工艺决定了它能承受一定的振动冲击载荷，而耐高温、低温称重传感器为特别设计制造的专用产品，一般称重传感器的使用温度范围多为 $-20 \sim +70$ ，所以称重传感器的耐环境条件设计主要是防潮湿（含防水）、防盐雾、防霉菌的三防设计。

潮气并不完全是 $H_2O$ ，通常是许多复杂的水溶液，它能渗入几乎所有聚合物而产生增塑。潮气对称重传感器的作用是化学和物理反应。化学反应使弹性元件应变区内电阻应变计的粘贴表面锈蚀，物理反应使电阻应变计和应变胶粘剂吸潮而膨胀，介电常数增大，绝缘电阻、粘结强度降低，特别是剪切强度急剧下降，引起称重传感器弹性元件应变不规则变化，造成零点和灵敏度漂移，技术性能波动，并最终失效。

盐雾是一种气溶胶状体，主要成份是氯化钙、氯化镁，少量的硫酸钙、硫酸镁和其它杂质。它对称重传感器弹性元件应变区和外表面也有较强的腐蚀作用。

霉菌属于真菌，为单细胞生物，当温度在 $26 \sim 32$ ，相对湿度达到85%以上时，有机密封材料易受霉菌侵蚀。霉菌的破坏作用主要是吸附水份，导致绝缘电阻大幅度下降。许多防潮湿、防盐雾技术与工艺也适用于防霉菌。

称重传感器的防潮密封主要有焊接密封、盲孔灌封和表面密封三种类型。焊接密封多采用电子束焊、激光焊、弱等离子焊、脉冲亚弧焊等，其密封等级可达IP68。盲孔灌封属于开放型密封，对所用防潮密封材料和密封工艺要求较高，主要是具有极佳的防潮湿、防盐雾性能，优良的粘结性；固化发热少，收缩小，较柔软，绝缘性能好；对电阻应变计、应变胶粘剂无腐蚀作用。此外，对防潮密封材料的电学性能和物理机械性能也都有具体要求。称重传感器盲孔灌封的密封等级可达IP67。

### 四、应变式称重传感器生产过程的可靠性控制

生产过程的可靠性控制就是采取设计符合性控制和工艺可靠性控制，最大限度的排除各种不可

靠因素，并避免这些因素引起称重传感器可靠性降低。称重传感器生产过程中的不可靠因素有系统性和随机性两种。系统性因素主要是指偏离了正常的生产条件和工艺条件的因素，例如不熟练工人顶班作业，原材料、元器件搞错，制造工艺随便改动或随意简化，违反操作工艺规程等。这些不可靠因素一旦出现，将存在严重的故障隐患，降低了称重传感器的可靠性。随机性因素是不能确切预知的因素，但在生产过程中大量存在，例如生产环境发生变化，原材料成份出现微小差异，弹性元件热处理及回火工艺控制不严格等，造成称重传感器性能波动，直接影响称重传感器的稳定性和可靠性。不论是系统性还是随机性不可靠因素，都必须通过质量控制和工艺控制使其不产生或减到最小。

### 1、设计符合性控制

设计符合性控制，就是在称重传感器生产的全过程采取质量控制措施，使其符合 GB/T7551—2008《称重传感器》国家标准和 JJG669—2003《称重传感器》国家计量检定规程要求达到的各项技术性能指标和准确度等级，以及有关设计文件规定的其它要求。称重传感器设计符合性控制的主要环节是：

(1) 工艺规程、质量控制文件必须符合称重传感器国家标准和国家计量检定规程样机试验的技术要求，试验条件，试验项目和试验、计算、结果判定方法，并随样机试验合格后定型。

(2) 超差、代料处理必须以不引入降低称重传感器可靠性因素为原则。特别是用于高准确度称重传感器弹性元件的金属材料一般不允许代料，因为弹性元件材料改变后，电路补偿与调整元器件和补偿工艺均发生变化，并对综合性能指标、稳定性和可靠性产生较大影响，这一点是世界各国称重传感器生产企业的共识。例如钢制弹性元件的金属材料美国 SATM E4340、H—11，德国 30CrNiMo8、X45NiCrMo4，英国 En24、En26，日本 SNCM8，中国 40CrNiMoA 等几乎长期不变。

(3) 称重传感器的核心部件电阻应变计，电路补偿与调整所用的原材料、元器件，以及其它外购件、外协件，都必须经过筛选、复检、复试，确保符合设计要求。特别是电阻应变计由于它不能二次粘贴使用，所以一定要有行之有效的质量检查与筛选方法。

(4) 称重传感器的工序检验和出厂测试方法，必须符合设计的准确度和可靠性要求，保证国家监督抽查符合国家计量检定规程要求。在生产过程中若采用自行规定的简化测试方法进行质量控制时，必须保证按正规试验测试程序进行测试时，称重传感器的各项技术性能指标完全合格。

(5) 生产工艺装备和检测手段必须配套齐全，特别是与称重传感器额定量程相适应的带有高低温试验箱的力标准机必须配备，不能简化。所有工艺装备和检测仪器仪表必须定期检定，保持 100%合格率。

(6) 生产线上各工序的生产、测试人员，一律考核上岗，保证操作程序和产品质量符合工艺和设计要求。

(7) 生产环境符合要求，特别是电阻应变计粘贴工序一定要在温度、湿度、洁净度和照明都



符合要求的净化间内进行，对防潮密封工序的环境条件也应较高标准要求。

(8) 称重传感器的结构与工艺设计应采取平行作业模式，即在称重传感器设计之初就着手进行工艺设计和工艺准备，使两者协调一致符合技术性能要求。在生产过程中，又提倡设计配合工艺，实行技术状态控制，不能任意更改工艺、工序和内控技术指标。

### 2、工艺可靠性控制

工艺可靠性控制是实施设计可靠性控制的根本环节，因为工艺方法不当会引入使称重传感器可靠性下降的系统性因素，埋下故障隐患，降低称重传感器的可靠性。工艺可靠性控制的主要途径是：

(1) 通过对工艺可靠性的研究和试验，优选科学、合理的制造工艺方法。例如以 0Cr17Ni4Cu4Nb 沉淀硬化不锈钢为弹性元件的称重传感器，其综合性能指标，特别是滞后和蠕变指标，在很大程度上取决于固溶热处理和时效工艺制度。固溶热处理的加热温度、淬火介质、冷却速度；是采用二次时效法还是冷却处理加时效法，都需要经过多次试验才能找出最佳方案。当称重传感器各项技术性能指标均满足设计要求后，工艺方法也随之定型。

(2) 工艺方法和工艺流程一旦选定，就必须维持工艺稳定性，不得随意简化或更改。如确实需要更改，必须按程序经过审批，并确保这种更改对称重传感器的可靠性不产生任何影响。

(3) 严格工艺管理和工艺纪律，杜绝违反工艺规程、违反操作规程和检测差错，必须保证工艺兑现率达到 100%。那些为了提高产量，不顾质量随意简化试验项目，减少检测次数的做法是非常危险的，必须杜绝。

(4) 在称重传感器生产全过程中的各道工序，提倡自检，关键工序设检验点，严格控制不合格率，最大限度的减少工艺缺陷。因为称重传感器的故障很大一部分是工艺问题，堵住了工艺缺陷其实质就是提高了称重传感器的可靠性。

### 3、稳定性与可靠性处理

由于生产条件、工艺条件，原材料、元器件等因素，不可避免的总是存在着某些随机的波动，使得生产出来的称重传感器可能潜在着某些缺陷和故障隐患，从而出现初始不稳定期。因此，在称重传感器生产完成后和出厂前，通常经过筛选的方法剔除不合格产品，但这种筛选只能提高出厂产品中的合格品比例，由于制造工艺并未进行改进，所以不能提高批量生产的产品合格率。根据生产后和出厂前技术性能测试出现的问题，在生产工艺中对原材料、元器件进行环境应力筛选，对出厂前的称重传感器增加老化和稳定性处理，使称重传感器在生产过程中渡过初始不稳定期，一出厂就进入稳定期。称重传感器的稳定性处理主要有热处理和机械两种方法。热处理稳定性处理法多针对冷热加工后的弹性元件，主要是高温油煮、低温深冷、冷热循环、恒温时效等方法。机械稳定性处理法是针对已完成所有工序的产品，主要有脉动疲劳、超载静压、振动时效、共振时效等方法。

20 世纪 70 年代，美国海军首先推行了混合式环境应力筛选，被称为高效应力筛选法，它是将热处理时效法和机械时效法两者结合起来的一种新的时效方法。其核心是温度循环加随机振动，对

于释放和消除各种残余应力最有效。因为温度循环采用了高变温率，传感器在热应力下使缺陷尽早暴露、消除。而随机振动是在整个振动时间内，对每个频率同时激振，有充分时间激起共振，释放传感器的残余应力并促使缺陷暴露。此种方法目前只应用于军用传感器的筛选中，因为成本问题民用称重传感器尚未采用。借鉴这种方法对称重传感器进行温度循环老化、电老化和低频脉动疲劳时效，对提高零点、灵敏度的稳定性和工作可靠性效果明显。

### 五、应变式称重传感器的可靠性管理

称重传感器的可靠性管理是对设计和生产的全过程，各项可靠性技术工作，全体研制、生产人员进行规划、组织、协调、监控等一系列技术活动，以实现预定的可靠性目标。从图 2 所示的可靠性工程诸环节关系图，不难看出可靠性管理的重要性，深刻说明了“产品的可靠性是设计出来的，生产出来的，管理出来的”理念的正确性，及其在称重传感器研制生产中的地位和作用。

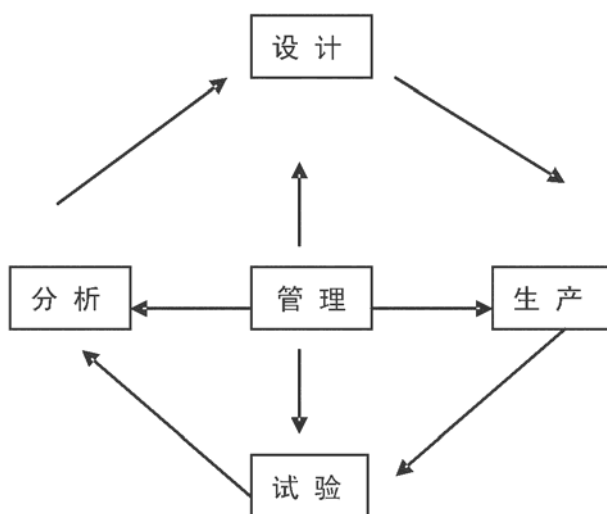


图 2 可靠性工程诸环节关系图

可靠性工程诸环节关系图基本反应了称重传感器研制、生产全过程的可靠性控制与管理。称重传感器在完成了各项可靠性设计，经过生产过程可靠性控制生产出产品后，应进行可靠性增长试验和可靠性验证试验。可靠性增长试验的目的是暴露问题或了解潜力（可靠性裕度）进行改进，以促进称重传感器的可靠性增长。可靠性验证试验的目的是评价可靠性设计技术是否有效，验证是否达到了称重传感器可靠性指标要求。

目前，称重传感器的可靠性试验多采用统计无故障工作时间的跟踪测试方法，尽管还不够完善，但也能说明问题。对可靠性增长试验、可靠性验证试验和跟踪测试所暴露出的问题和故障进行分析，查找故障原因，摸清故障的内在变化规律，从而采取相应对策，改进可靠性设计和工艺可靠性控制。在这些环节中，可靠性管理起着至关重要的核心作用，它使称重传感器可靠性的各个环节有效的运转。

### 六、引入可靠性概念提高称重传感器的可靠性

国内外一些企业的研制、生产经验证明,生产高准确度和高可靠性称重传感器必须引入可靠性概念,明确称重传感器的可靠性设计就是考虑可靠性的称重传感器设计,不存在独立于称重传感器设计之外的可靠性设计。在可靠性诸环节中,可靠性的基础设计和生产过程的可靠性控制是决定称重传感器可靠性的两个重要环节。

由可靠性定义可以得出,称重传感器的可靠性就是无故障工作时间超过任务时间(由电子衡器的种类和工作环境条件决定)的概率,超过程度越大可靠性越高,可以从以下几个方面提高称重传感器的可靠性。

(1) 引入可靠性概念,明确可靠性要求。考虑可靠性的称重传感器设计就是做好可靠性的基础设计,主要包括弹性元件及附件设计、弹性元件材料及热处理工艺选择、电阻应变计及元器件筛选、耐环境条件设计等,从结构和原材料、元器件上保证称重传感器性能波动最小。

(2) 重视工艺装备,完善检测手段。进入 21 世纪,可以说称重传感器的竞争主要是制造技术、制造工艺的竞争。生产过程中的关键工艺装备,例如带高低温度试验箱的力标准机、智能化的温度补偿装置等不能简化或缺少。生产工艺必须先进、科学、合理,并不断提高工艺装备的自动化、智能化水平,严格生产可靠性控制,尽最大可能从工艺装备上减少人为因素对称重传感器可靠性的影响。

(3) 在生产过程中加强全面质量控制和可靠性管理,提高技术和生产人员的质量意识和可靠性意识,严格工艺纪律,遵守试验与测试规定,最大限度的排除不可靠因素,并避免这些因素引起称重传感器可靠性下降。

(4) 努力做好支持工艺、基础工艺、核心工艺和特殊工艺的科学运用和集成。采用先进的电路补偿与调整工艺,不断提高补偿工艺水平。除研究改进基础工艺外,还应加强特殊工艺的研究与应用,特别要研究和应用提高稳定性和可靠性的工艺技术与方法。

(5) 生产厂家与用户密切配合,加强应用中的信息传递,不断积累称重传感器无故障工作时间等可靠性信息。有条件的产厂家可进行称重传感器可靠性增长试验、可靠性验证试验,取得称重传感器可靠寿命的重要依据。

(6) 充分认识称重传感器稳定性和可靠性的初始不稳定期、稳定期和疲劳不稳定期之间的关系。采用有效的老化处理和稳定性处理工艺,尽量在生产过程中渡过初始不稳定期,投入使用时即可进入稳定期。使称重传感器真正成为国际公认的“半永久性器件”,对于 IP67 和 IP68 防护密封等级的称重传感器应能稳定的工作 10 年以上。

### 七、结语

综上所述,关于称重传感器的可靠性问题可以得出以下结论:

(1) 称重传感器的可靠性就是在规定的使用条件下和一定的时间内保持技术性能并稳定可靠

工作的能力,以无故障工作时间或可靠寿命来表示。称重传感器属于半永久性工作器件,一个防护密封良好的称重传感器至少应能稳定的工作 10 年。

(2) 称重传感器可靠性的核心是故障,即可靠性是由故障引发出来的,因此在称重传感器研制、生产的全过程中,采取各种技术与工艺措施消除故障隐患,是提高可靠性的重要途径。

(3) 称重传感器的可靠性设计就是考虑可靠性的称重传感器设计,不存在独立于称重传感器设计之外的可靠性设计。

(4) 考虑可靠性的称重传感器设计,就是作好可靠性的基础设计,主要包括弹性元件结构与附件设计、弹性元件材料与热处理工艺选择、电阻应变计与辅助元器件选择、电桥与补偿电路的简化设计、耐环境设计等。

(5) 在称重传感器可靠性诸环节中,可靠性设计和生产过程可靠性控制是两个重要环节,而可靠性管理则起着核心作用,它使可靠性各环节有效运转。

(6) 称重传感器的寿命试验多采用在使用环境条件下,对无故障工作时间即使用寿命进行跟踪测试,寿命试验是可靠性试验的重要内容。

(7) 称重传感器的可靠性是设计出来的,生产出来的,管理出来的。要特别重视设计符合性控制和工艺可靠性控制。

(8) 生产高可靠性称重传感器必须提高技术和生产人员的质量意识、可靠性意识,严格工艺纪律,保证工艺兑现率达到 100%。

#### 参考文献

1. 周正伐. 可靠性工程基础 [M]. 宇航出版社, 1999 年 8 月。
2. 美国国防部可靠性分析中心 (RAC). 压力传感器的可靠性分析. 原国防科学技术委员会情报研究所传感器资料汇编, 1993 年。
3. 尹福炎. 传感器用电阻应变计不稳定性原因及其对策 [J]. 传感器应用技术, 1987 年第 2 期。
4. 刘九卿. 称重传感器的可靠性设计、控制和管理 [J]. 衡器, 2003 年第 2、3 期。

#### 作者简介

刘九卿 (1937- ), 男, 汉族, 辽宁省海城, 研究员、享受国家特殊津贴专家。

(作者通讯地址: 北京市丰台区桃源里小区 11 号楼 2 单元 6 号 邮政编码: 100076)