

关于电子台案秤的稳定性问题

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】稳定性是电子台案秤非常重要的质量指标，是市场竞争力的决定性标志，也是我国与工业发达国家同类产品的主要差距。结合我国电子台案秤研制、生产总体情况和在应用中出现的问题，介绍了电子台案秤自身稳定性和对环境条件稳定性概念；讨论了提高电子台案秤稳定性的相关问题及系统性和随机性因素；提出了在生产过程中对核心部件铝合金称重传感器的稳定处理工艺和对电子台案秤的温度循环时效处理方法，两者结合起来将是提高电子台案秤稳定性的有效途径。

【关键词】电子台案秤；称重传感器；准确度；稳定性；可靠性；稳定性处理

一、概述

我国电子台案秤生产企业多、产量和出口量大、应用范围广，即涉及到广大消费者利益，又涉及到我国出口产品形象，是国家强制管理的法制计量器具和 3C 认证产品。其中电子台案秤的准确度、稳定性和可靠性是广大消费者和国际经销商最关心的问题；也是我国与工业发达国家同类产品差距最大的问题；更是各生产企业需要下一番功夫才能实现的问题。其中稳定性和可靠性是基础，没有稳定性和可靠性何谈准确度。稳定性是指在一定时期内、相同条件下电子台案秤耐受环境条件变化影响的程度；可靠性是指在规定的使用条件下和一定的时间内，电子台案秤保持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。两者的共同点是如何能够耐受各种可能遇到的环境条件作用，而能稳定可靠的体现其技术性能指标，即对环境条件的适应性。因此必须重视并了解环境条件及其潜在影响，选择能够对抗这些环境条件影响的设计方案和工艺措施。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。前者为周围的自然环境，后者是人为环境。电子台案秤耐受的环境条件两者兼而有之，主要是环境温度、湿度和各种干扰。

2001 年国家监督抽查 14 省市 25 个企业 15kg 电子计价秤 75 台，合格 36 台，合格率 48%；2003 年国家监督抽查 9 省市 33 个企业生产的 33 种 15kg 电子计价秤，合格 17 种，合格率 51.5%。两次国家监督抽查因为称重传感器温度性能指

标超差，而造成电子计价秤温度试验项目不符合标准规定分别占不合格产品的54%和56%。其中最大误差低温-13.5g，常温-11.5g，高温-12.0g。可见称重传感器的温度性能对电子台案秤的稳定性和可靠性的重要性，这也是长期以来生产企业致力于解决的主要技术问题。其实质是电子台案秤对外部条件的稳定性，或者说是环境适应性，主要是对温度、湿度变化和各种干扰的稳定性。根据处于国际市场引导者地位的电子台案秤制造企业的经验，解决此问题的有效方法是提高铝合金称重传感器的防护与密封技术和稳定性处理工艺水平，并对整秤进行温度循环的时效处理。

二、电子台案秤用铝合金称重传感器的稳定性

电子台案秤用铝合金称重传感器的稳定性是建立在比较精确的灵敏度温度补偿前提下，即通过灵敏度温度补偿消除了弹性元件材料弹性模量 E 、电阻应变计灵敏系数 K 和弹性元件几何尺寸随温度变化的影响。由于称重传感器的灵敏度温度误差是一个系统误差，灵敏度温度补偿不像零点温度补偿那样逐个进行，而是批量进行。在弹性元件材料、电阻应变计、应变粘接剂等都不变的前提下，灵敏度温度补偿电阻和并联的线性化调整电阻均不改变。实际上，批量的进行灵敏度温度补偿并不可能使称重传感器的灵敏度温度漂移为零，与完全补偿的理想值之间总是存在一定的偏差。当此偏差为正时产生过补偿，为负时产生欠补偿。过补偿的结果使称重传感器随着环境温度的升高而输出减少，导致高温负差。这就需要测量出电子台案秤测量电路的温度漂移方向，控制称重传感器灵敏度温度补偿电阻量，使其产生与测量电路温度漂移方向相反的温度漂移量，即克服了批量灵敏度温度补偿的缺陷，又提高了电子台案秤的稳定性。

称重传感器的稳定性，就是在一定时间内和相同条件下其特性变化的程度，主要是零点和灵敏度的变化程度，也可以说是零点和灵敏度的稳定性。

所谓零点稳定性，就是称重传感器在一定时间内和相同条件下，零点输出的最大变化量。零点输出稳定性 Z_w 用 %FS / 三个月、%FS / 六个月、%FS / 年表示，可用下式计算：

$$Z_b = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_0} \times 100\%$$

式中： Z_2 —在规定时间内零点输出的最大值；

Z_1 —在规定时间内零点输出的最小值；

Z_0 —零点输出的标称值。

所谓灵敏度稳定性，就是称重传感器在一定时间内和相同条件下，灵敏度的最大相对变化量。灵敏度稳定性 S_b 用%/三个月，%/六个月，%/年表示，可用下式计算：

$$S_L = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\%$$

式中： S_1 —前次试验测得的灵敏度；

S_2 —本次试验测得的灵敏度。

若每次测试时温度无法保持相同，允许根据实测的灵敏度温度系数进行计算修正。称重传感器的稳定性是极为重要的质量指标，但在国内外生产企业的产品样本中却很少给出。其原因是目前国内外尚无统一的评定标准，行业内的普遍共识是称重传感器的灵敏度变化不应该超过重复性误差的两倍。

提高铝合金称重传感器稳定性的有效途径是合理选择铝合金材料及热处理时效状态；优化防护密封材料及密封工艺；实施有效的稳定性处理工艺。

1. 合理选择铝合金材料

由于电子台案秤的量程较小，为使称重传感器即有较高的灵敏度又具有较大的刚度，多采用比重小， E_p 乘积小，屈服比高，比强度大，塑性好，耐腐蚀，低温性能好，并具有优良机械加工性能的低弹性模量铝合金材料。尽管铝合金材料有如此多的优点，但如果对铝合金种类和热处理时效状态选择不当，会使称重传感器蠕变误差增大，稳定性变差。

国内外应用较多的是强度高，耐热性好，属于铝—铜—镁系的硬铝合金，美国、日本牌号为 2024，我国牌号为 2A12（原牌号 LY12），有两种热处理时效状态，即热处理自然时效 2A12— T_4 和热处理人工时效 2A12— T_6 。由于 2A12 铝合金淬火后产生较大的内应力，其表层为拉应力，芯部为压应力，经自然时效得不到有效的消除，加工成弹性元件后，会因为应力松弛而产生变形。自然时效状态的相和组织也不稳定，使用过程中会继续进行沉淀相的脱溶过程，而引起尺寸变化，造成称重传感器的零点和灵敏度不稳定，产生较大的测量误差。因此必须选择热处理人工时效状态的 2A12— T_6 铝合金。

由于国内市场销售的多为热处理自然时效状态的 2A12— T_4 铝合金，应用前必须进行改变热处理状态的再时效处理，变自然时效状态 T_4 为人工时效状态 T_6 。

改变时效状态的再时效处理工艺为： $190^{\circ}\text{C}\times 24\text{h}$ 或连续升温 110°C 、 150°C 、 190°C 保温 6、12、24 小时（时间连续计算）。再时效处理，不仅改变了状态、稳定了组织，而且还达到了消除热处理和粗加工产生的残余应力的目的。

2. 优化防护密封材料及密封工艺

铝合金称重传感器防护与密封的基础是涂刷电阻应变计防护面胶，涂刷时机与涂刷前的清洗至关重要。一般是在贴片、加压固化、卸压后固化、质量检查、粘贴端子、焊线组桥和测量绝缘电阻各工序质量检查合格后进行。即将整体清洗后的弹性元件尽快放入高温试验箱内，加温 40°C 并保温一定时间，从箱内取出弹性元件在干燥的环境条件下涂刷防护面胶^[1]，其目的是防止电阻应变计在生产过程中受潮，并为最后的防护与密封打好基础。用于电阻应变计保护涂层的材料较多，具有代表性的是：美国 VISHAY 公司生产的 M-CoatC 型防护面胶，它是一种溶剂稀释的 RTV 硅橡胶，固化后形成坚韧而有弹性的透明薄膜，且有良好的机械、电气特性和防化学侵蚀性能，其涂层的薄膜厚度为 $0.4\sim 0.5\text{mm}$ ；德国 HBM 公司生产的 SN-4 型氯丁橡胶和 BARRIER-C 型无腐蚀性硅橡胶。

在铝合金称重传感器电路补偿与调整工艺完成后，实施表面多层防护密封工艺。其防护密封机理是利用多种防护与密封材料的特性和它们之间的互补性，组成一个具有优良防护性能的表面密封结构。它由内层的防护胶粘剂，中层的密封薄膜和外层的硅橡胶构成。靠近电阻应变计的内层防护胶粘剂主要起粘结密封薄膜作用，外层硅橡胶起一定的密封和机械防护作用，真正起密封作用的是密封薄膜。在这类密封薄膜中有一种 PTFE 密封薄膜，实际上是双面经过特殊处理的聚四氟乙烯薄膜，它具有防湿热、耐水解性能好，抗大气老化和化学侵蚀能力强的特点。有关资料给出，厚度为 0.1mm 的聚四氟乙烯薄膜在室外暴露六年多，其外观和机械性能等均无明显变化。

3. 实施有效的稳定性处理工艺

铝合金称重传感器的稳定性处理分两次进行，第一次稳定性处理是在铝合金弹性元件机械加工后进行，第二次稳定性处理是在完成全部制造工艺形成产品后进行。

根据美国 20 世纪 80 年代伯萨迪纳传感器技术研讨会资料介绍，第一次稳定性处理采用热处理法，主要是恒温时效法和冷热循环法。恒温时效即可消除机械

加工产生的残余应力，又能消除热处理引入的残余应力。LY12 硬铝合金在 200℃ 高温下恒温时效时，残余应力释放与时效时间关系表明，保温 24 小时，可使残余应力下降 50%左右。冷热循环工艺为-196℃×4 小时/190℃×4 小时，循环 3 次，可使残余应力下降 90%左右，并且组织结构稳定，微量塑性变形抗力高，尺寸稳定性好。冷热温度梯度产生的热应力与残余应力相互作用，使其重新分布而获得残余应力下降的效果。

第二次稳定性处理采用机械法，主要有脉动疲劳、超载静压和振动时效三种方法。脉动疲劳法是将铝合金称重传感器安装在特制的多工位低频疲劳试验机上，施加下限为(1/5~1/3)额定载荷，上限为额定载荷或 120%额定载荷，以每秒 3~5 次的频率进行 5000~10000 次的循环，可有效的释放弹性元件、电阻应变计、应变粘结剂胶层的残余应力。超载静压法是在专用的标准砝码加载装置中或简易机械螺旋加载设备上，对铝合金称重传感器施加 125%额定载荷，保持 4~8 小时，或施加 110%额定载荷，保持 24 小时，以达到释放残余应力的目的。由于超载静压工艺所用设备简单，成本低，效果好，为铝合金称重传感器制造企业广泛采用。振动时效法是将铝合金称重传感器安装在额定正弦推力满足振动时效要求的振动台上，根据额定量程估算频率来决定施加的振动载荷、工作频率和振动时间。对于小量程平行梁称重传感器，在频率 30Hz、振动加速度 10g 时，振动 15 分钟即可获得较好的效果。共振时效比振动时效释放残余应力的效果更好。振动时效和共振时效工艺的特点是：能耗低，周期短，效果好，不损坏弹性元件表面，而且操作简单。以上三种稳定性处理方法，提高铝合金称重传感器零点和灵敏度稳定性的效果极为明显。

三、电子台案秤的稳定性

国内外电子台案秤生产企业大量试验证明，即使是常温技术性能符合标准要求，各项误差均比较小的电子台案秤，在高温+40℃、低温-0℃环境下，其误差值可能达到误差线边缘甚至出现超差。有的电子台案秤在“安全过负荷”试验之前误差较小，但在该项试验之后误差突然变大，甚至超过温度误差限。上述两种情况有一个共同的规律，就是低温时输出表现为正差，高温时输出表现为负差。究其原因，除上述分析的铝合金称重传感器灵敏度温度补偿不精细、零点和灵敏度稳定性处理不充分或缺失外，组成电子台案秤测量电路的电子元器件、模块等

环境应力筛选不严格或未进行，来自于电源、功放、变压器的热源影响处理不当等，都将引起电子台案秤自身的温度系数变化而产生温度漂移，使稳定性变差。根据国内电子台案秤制造企业对实际检测结果的统计分析得出，铝合金称重传感器和测量电路的温度漂移分别占整秤温度漂移的 65%和 35%。这就要求生产企业在重点解决铝合金称重传感器稳定性的同时，也要努力解决测量电路的温度漂移和稳定性问题。

由于电子台案秤的高温环境要比低温环境严酷，当外部环境温度达到 40℃ 时，电子台案秤内部测量电路的温度已达到 47℃左右，铝合金称重传感器部分的温度将达到 44℃。这就要求在电子台案秤结构、测量电路设计和铝合金称重传感器选择时，应以秤内可能达到的最高温度为依据。

为提高电子台案秤的稳定性，保证工作时的计量准确度，必须在其经过各项制造工艺形成产品后，逐台进行环境应力筛选。根据国外处于市场引导者地位企业的经验，主要采用两种环境应力筛选方法：一种是温度循环，也称之为老化；一种是随机振动，即振动时效。由于电子台案秤除物流运输之外，基本都是处于静态使用状态，而且不论铝合金称重传感器还是测量电路受温度变化的影响更大一些。此外，再从经济性和可行性上考虑，国内外生产企业多采用温度循环方法进行整秤的稳定性处理。

1. 电子台案秤温度循环稳定性处理的工艺装备

由于各生产企业的制造模式、批量大小、一次性温度循环处理台数都不尽相同，市场上无标准设备供应，所有电子台案秤生产企业都是自己设计建造温度循环处理老化室。归纳起来，温度循环处理老化室应具备下列条件：满足温度循环的高温、低温极限温度要求，方便实现高低温交变；能自动控制温度，控温误差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ；由常温到高温的升温速率为 $15^{\circ}\text{C} / \text{h}$ ，由高温到低温的降温速率为 $10^{\circ}\text{C} / \text{h}$ ；老化室内应有电源和接地装置，保证电子台案秤实施通电老化；对温度循环全过程自动控制，即升温速率、温度保持时间、降温速率、温度保持时间自动控制和自动转换；人员方便进入和在内部进行各项试验测量，在外部进行老化情况观察。

2. 电子台案秤温度循环稳定性处理工艺

电子台案秤温度循环稳定性处理的主要参数有高温和低温的极限值；高温和

低温的停留（保持温度）时间；由常温到高温和由高温到低温的升、降温速率；一个温度循环时间；温度循环次数。只有上述这些参数选择的科学合理，才能取得有效的稳定性处理结果和合理的成本投入。

OIML R76《非自动秤通用检定规程》规定“在秤技术说明中，没有说明特定的工作温度，则秤应在下列温度界限内保持其计量性能， $-10^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ ”。GB/T7722—2005 电子台案秤国家标准规定使用温度范围为 $0^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ 。根据我国电子台案秤多在室内使用，以及温度老化条件应高于使用温度条件这一原则，温度循环的上限值为 $+45^{\circ}\text{C}$ ，下限值为 0°C 。一个温度循环时间和温度循环次数可参考日本大和制衡株式会社的电子计价秤老化工艺，即一次温度循环的时间为24小时，其中，由常温升温至高温的时间为2小时，高温停留时间为8小时；由高温降温到低温的时间为6小时，低温停留时间为8小时。一个温度循环的稳定性处理工艺的温度与时间曲线如图1所示。

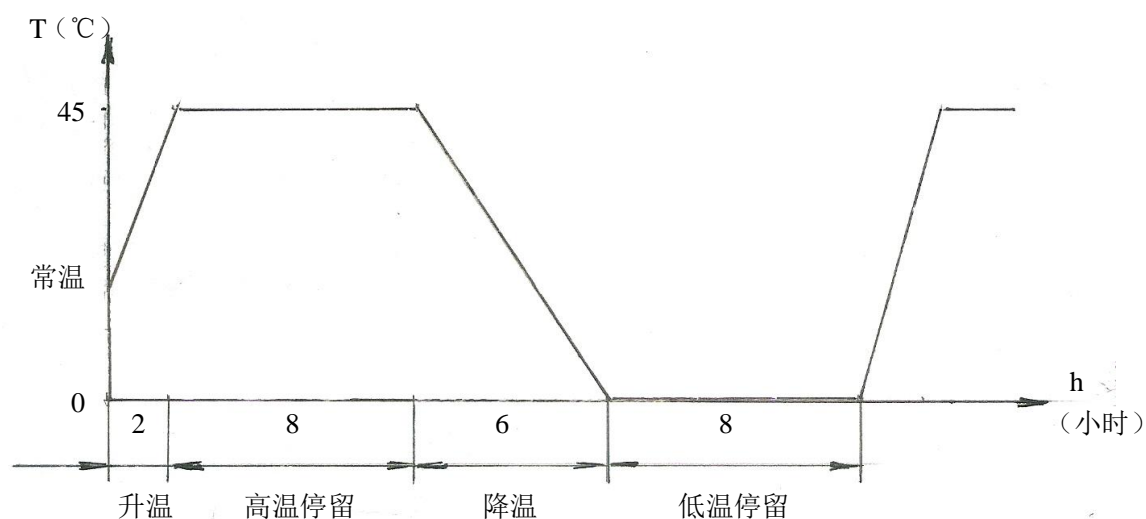


图1 一个温度循环稳定性处理温度与时间曲线

从图1可以看出，温度循环稳定性处理室的温度由常温升至高温 45°C ，温度梯度较小，所用时间较短；由高温 45°C 降温至低温 0°C ，温度梯度较大，所用时间较长。总之升温、降温的速率都不大，实现起来比较容易。

国内外电子仪器仪表制造企业产品的温度老化处理，基本参照美国军用标准《电子设备环境应力筛选方法》，该标准的5.12条款规定：“为了消除复杂电子设备中大多数隐藏的制造缺陷，至少应进行10个热循环。”日本大和制衡株式会

社会的温度循环稳定性处理工艺，也规定温度循环次数为 10 次，即进行 10 天 10 夜的温度循环稳定性处理。对 10 次高、低温的温度循环稳定性处理观察、试验、测量结果统计表明，电子台案秤的显示、键盘、测量电路、电源电路、称重传感器、A / D 电路等故障，在第 9、第 10 个温度循环故障为零，即电子台案秤已趋于稳定；在第 7、第 8 个温度循环出现的故障数只占总故障数的 5%；95% 的故障发生在第一至第 6 个温度循环中，特别是第一和第二个温度循环出现的故障数最多。以上温度循环稳定性处理测量结果证明，采用 10 个温度循环处理工艺是科学合理的。

在 10 个温度循环稳定性处理过程中，应根据电子台案秤计量性能要求和本企业制造工艺特点设定检测项目，最好是在高温和低温停留期间结束前进行检测。对电子台案秤出现的各种故障，应记录清楚出现故障时的环境鼓励情况。通常温度循环稳定性处理出现故障有两种情况，其一是永久性损坏，多为功能上问题，由于承受不了高温环境元器件性能时效，导致系统产生缺陷或不能工作；其二是周期性变差，多为性能上问题，例如在高温下产生漂移或工作异常，但回到常温又恢复正常。针对上述问题应制定具体的故障检查程序和相应的故障排除方法，是温度循环稳定性处理至关重要的问题。由此不难得出，如果没有合理有效的监测，就不能达到电子台案秤温度循环稳定性处理的目的。

四、结束语

电子台案秤的稳定性由自身的稳定性和对外部环境条件的稳定性组成，所以在研制生产过程中必须统一考虑，不得厚此失彼。提高电子台案秤自身稳定性的有效途径是合理设计秤体结构、优选原材料、元器件并进行严格的环境应力筛选。特别是要选择好铝合金称重传感器，要求进行严格的零点和灵敏度温度补偿，零点和灵敏度稳定性好。电子台案秤对外部环境条件的稳定性，主要是对温度变化的稳定性，特别是对高温环境条件下的稳定性。由于铝合金称重传感器和测量电路的温度漂移分别占整秤温度漂移的 65% 和 35%，这就为解决整秤的温度漂移问题指明了方向。国内外生产企业解决此问题的有效途径是利用“有向补偿”效应控制铝合金称重传感器灵敏度温度补偿后的温度漂移方向与测量电路的温度漂移方向相反，使两者相互抵消保证整秤的温度系数最小且稳定，同时优化电阻应变计和测量元器件的防护密封材料及工艺。对整秤实施 10 个高温 45℃、低温 0℃

温度循环的稳定性老化处理，使故障暴露在稳定性处理老化工艺过程中，并对其进行有效的处理，使电子台案秤一到用户手中即进入各项性能稳定工作时期。

参考文献

【1】殷伟宁. 改善计价电子秤高低温性能的探讨 [C]. 电子衡器技术交流论文集, 1990 年。

【2】日本大和制衡株式会社. R208 电子计价秤制造工艺资料, 1988 年。

【3】美国军用标准. 《电子设备环境应力筛选方法》. 1990 年。

作者简介：刘九卿（1937—），男、汉族，辽宁省海城市。中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问，衡器技术专家委员会顾问，《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》、《国家职业资格培训教程—称重传感器装配调试工》，在有关杂志上共发表学术论文 110 多篇。