

面向复杂环境的计量检测设备可靠性设计与验证

高大山, 石 栋, 郭天虹*

(山东特检计量检测有限公司, 济南 250104)

摘要: 随着工业需求多样化的推进, 计量检测设备被广泛地应用于高温、高湿、强震动, 以及腐蚀性气体等复杂环境中, 其可靠性成为亟待解决的问题。为提高计量装置在恶劣环境中运行的稳定性和长期运行能力, 本文对复杂环境中影响计量检测设备可靠度的因素进行了分析, 讨论了相关设计方法, 着重阐述系统架构, 软硬件和环境适应性等设计方案, 并且针对复杂环境下的装备可靠性验证和试验方法进行了详细说明, 主要包括环境试验、长期稳定性试验、应力筛选和现场验证, 为增强计量设备在复杂环境下的运行稳定性提供了坚实基础。

关键词: 复杂环境; 计量检测; 可靠性设计

0 引言

随着科技进步与工业需求多样化, 计量检测设备被广泛应用于高温, 高湿, 强震动, 以及腐蚀性气体等复杂环境中^[1-5]。设备工作在上述环境下, 其可靠性直接关系到检测结果是否准确。保证设备在复杂环境中的可靠性已成为工程领域急需解决的难点。可靠性设计既涉及软硬件系统的稳健性问题, 又涉及环境适应性和应力筛选的试验方法问题。本文旨在为复杂环境下计量检测装备可靠性设计和验证提出一种综合方法, 以促进相关技术发展并增强装备在复杂环境下的运行稳定性。

1 复杂环境下计量检测设备可靠性的影响因素

1.1 环境因素

复杂环境中环境因素深刻影响计量检测设备可靠性。温度、湿度、振动、电磁干扰和腐蚀性气体, 这些因素直接影响到设备的使用性能、稳定性和寿命。在高温或者低温环境下, 该装置的物料可能会产生热膨胀或者收缩等现象, 从而造成零部件间连接松动或者破坏, 继而影响该装置的精准度以及长期稳定性。高湿环境下, 装置内电子线路, 接触点会被腐蚀甚至短路。对某些传感器来说, 受潮会使其传输信号准确性降低, 严重者甚至会完全无效。湿度对于装置外部材料也有显著影响, 如塑料外壳可能会在潮湿环境中膨胀或者变形, 从而降低装置密封性能并影响装置防护能力。

1.2 使用条件

计量检测设备运行工况是影响设备可靠性最主要的因素。

操作温度范围、负荷工况、操作频率和工作时长决定着装置实际运行时的性能。当温度较高时, 装置中电子元件会过热, 造成功率消耗加大, 工作效率下降, 甚至会触发装置过热保护机制; 在低温环境中, 一些传感器及电池性能会急剧下降, 造成设备信号传输速率减缓, 响应落后, 甚至完全无效。设备的稳定性和使用寿命受到负荷条件的直接影响。长时间超负荷或过频运行, 加剧了设备各部分磨损, 造成故障率增加。当负载条件失稳时, 由于设备内部组件过载或者受到设计范围以外的作用力, 设备会变形或被破坏, 从而影响其可靠性。

1.3 可靠性需求

计量检测设备对可靠性的要求不仅表现为设备基本工作性能, 更重要的是在具体环境中的稳定性、持久性以及高效性。设备对可靠性的要求一般包括高可用性、低故障率、长寿命、维护性、精度几个方面。高可用性就是设备能在一个给定的时间里正常运行的比率。高可用性需要装置具有较强的抗干扰能力与容错机制, 通过冗余设计可以保证即使局部失效也能使整个系统继续工作。低故障率、长寿命是计量检测设备可靠性设计的一项重要指标。复杂环境中设备使用寿命受到环境条件、使用强度和维护频率等因素的影响。故装置的设计要求在材质, 制造工艺和组件选择上都要追求卓越, 尽量延长使用寿命和降低失效的可能性。

2 面向复杂环境的计量检测设备可靠性设计方法

2.1 系统架构设计

系统架构设计应该多层次地考虑恶劣环境中设备可靠性问题, 主要包括硬件设计, 软件架构以及系统冗余和容错设

第一作者: 高大山, 工程师, 研究方向为计量检测。

* 通信作者: 郭天虹, 硕士, 中级工程师, 研究方向为计量检测。E-mail: 429336354@qq.com

计^[6-8]。一是设备架构设计应兼顾系统冗余性和容错能力。以某一高端气象观测站点为研究对象,该监测设备使用了三组不同的温湿度传感器和两个气压计来进行数据收集,任何一个传感器出现的故障都将由其他相关设备的数据进行补偿。该设计可以保证该装置在恶劣环境中持续提供精确监测数据,甚至某一传感器出现故障时也可以保证整个系统正常运行。二是系统架构设计需兼顾设备热管理和散热。极端温度环境中,器件内部电子元件会因为温度过高而发生故障。所以,在设计时会使用合适的散热材料及结构来保证该装置能在大范围的温度波动中长期稳定地运行。以某型号军用测量仪器为例,在高温环境中进行检测,该仪器主板设计为双层散热,外层为铝合金散热片,内层利用热传导材料将内热有效地散发出去,以避免电子元件因温度过高而造成性能降低。

2.2 硬件可靠性设计

硬件部分设计须综合考虑环境变化,负载波动及长时间使用所产生的压力等因素^[9-11]。以某军用激光测距仪为例,本装置设计中采用加固型外壳,关键部位采用防震垫、密封圈等,保证即使在经常受到振动、冲击的情况下测量仍能稳定准确。同时该装置内所有电路板及连接线都经过防震设计以避免振动造成硬件故障。其次,为了避免高温、高湿及其他环境因素的影响,该装置使用耐高温、抗腐蚀性材料。如某型号高温气体分析仪传感器局部使用耐高温陶瓷材料,电路板选抗氧化材料制成,可在高温环境中连续运行且不会失效。在电源设计中,该装置要求有足够的电源冗余及长期工作能力。对长时间工作于恶劣环境的装置,一般采用双电池冗余设计或者太阳能电池板+蓄电池相结合的方式在保证装置在没有外部电源情况下仍能长时间平稳工作。

2.3 软件可靠性设计

可靠的软件设计既要能保证数据采集的准确性与实时性,又要有高效的故障检测与恢复机制^[12]。一是软件要有较强的错误检测和容错能力。为在硬件故障或者数据丢失的情况下仍能继续运行,在设计中会引入冗余设计以及数据校验机制。以某环境监测设备为例,从软件层面上设计一种双重数据存储机制——主存储器与备份存储器。在主存储器出现故障或者数据被破坏的情况下,备份存储器中的数据将自动被占用,确保了装置可以连续被监控,降低了数据缺失的危险。二是软件系统需要实时性与高效性。在极端环境中,该装置可能会要求长期持续工作,而任何软件延迟均会对其检测精度及稳定性造成影响。以某型高频传感器数据处理系统为例,它采纳了基于嵌入式实时操作系统的架构,能在极短的时间内处理传感器的数据,并向用户提供实时反馈。该设计保证装置对环境的变化做出快速的反应,甚至在高负载时仍能保持稳定的工作状态。

2.4 环境适应性设计

环境适应性设计对于保证计量检测设备能够在复杂环境中稳定工作具有重要意义^[13]。因此,在进行环境适应性设

计时需要从多个角度评估设备对环境的抵抗力。一是装置外壳设计须有高防护等级来对付周围环境中尘土,水和腐蚀性物质。如某海洋监测设备壳体设计防护等级为IP68,可在充分浸水条件下长期稳定运行,且不受海水盐雾影响。该设计既可有效地保护装置内部组件不受潮湿环境影响,又可避免装置外壳被盐雾腐蚀破坏。二是装置温度适应性设计非常关键。在极端高温或者低温环境中,该装置需确保内部电子元件及电池能在所设计温度区间正常运行。比如某高温监测仪器内部元件由耐高温材料制成,电池上设计有温控模块,可以在高温环境中稳定输出电压,不因为温度过高造成电池容量降低或者设备失效。

3 面向复杂环境的计量检测设备可靠性验证与测试

3.1 环境试验

通过装置的环境试验可以有效地评价该装置在各种环境中性能的稳定性^[14]。以某型号航空气象探测装备为例,该装备需要长时间处于高空条件下,接触低温、高湿以及强紫外线辐射等环境,所以需要开展系列的环境试验。在实验阶段,该设备必须承受从-40℃的低温到+70℃的高温的迅速波动,每一次的温度都需要调整30 min,并连续执行500轮的循环操作。该装置的传感器、外壳和电池在这一过程中并没有发生性能衰退现象,因而该装置能在低温环境中正常使用,保证了其在寒冷地区能长时间工作。关于湿度,该设备在100%的相对湿度条件下进行了长达72 h的实验性工作。湿气会给装置内电子元件造成腐蚀及短路风险。经测试,该装置壳体为防水密封设计避免水汽进入装置内,确保装置在潮湿环境中运行可靠。

3.2 长期稳定性测试

长期稳定性测试的目的是验证该装置长期高负荷运行时的稳定性与可靠性,并对该装置在恶劣环境中的长期运行能力进行评价^[15-17]。这种试验可以检测出设备各方面性能是否会因为使用时间的延长而下降,为维护周期、更换周期等提供了理论依据。某无人机载激光雷达系统已进行半年长期稳定性试验,试验环境包含大温差,强风和湿度波动等条件。系统每天连续运行8 h,并通过对其激光雷达的扫描精度,系统响应速度和数据传输稳定性等主要性能指标进行了实时记录。在测试过程中,激光雷达的精确度变化不超过±1 cm,其数据传输的稳定性高达99.9%或更高,证明了该设备在长时期高强度操作下的稳定性能。在连续高强度作业时,系统并未出现过热、掉线或数据丢失等问题,温度控制系统和电池管理系统均表现出较好的稳定性,确保设备能够长时间可靠地完成工作。当温度为60℃时,该装置连续运行半年,电池容量的衰减幅度小。该研究表明,该装置的电池设计,在高温环境中寿命更长。

3.3 应力筛选

应力筛选通过附加物理或者热应力来检测装置面对极端条件下的可靠性,常用于排除不满足设计要求或者具有潜

在故障隐患的装置,以保证装置正式使用之前具有高可靠性^[18]。以某型号地震监测仪器为例,首先在测试台上对装置进行加速老化实验,实验采用温湿度交替变化来模拟装置长时间运行过程中的环境应力情况。加速老化的流程涉及:在15 min内从0℃逐步上升到85℃,连续运行24 h,以模拟设备在快速变化环境中的长时段工作。经过应力筛选,该装置各传感器模块没有发生性能衰退和失效现象,传感器的响应时间仍然处于预设范围,电路板运行平稳。此外,对于机械应力,该装置采用施加6 g振动加速度来检验该装置对长期振动的耐受能力。该振动情况下装置需要维持较好的测量精度。在进行了48 h的震动测试之后,该设备没有出现任何断裂、松动或接触问题,这证实了其机械构造和连接部分具有很高的抗震动性能。

3.4 现场试验与验证

现场试验及验证是目前最为直接和高效的验证方式之一,其目的就是为了模拟装置实际使用时的工作状态,以保证其性能及可靠性能满足现实需要^[19-20]。实验室和实际应用环境有很大不同,所以现场试验对保证设备可靠性至关重要。某型号遥感监测设备通过一系列的实验室验证之后,投入到真实的工作环境中开展现场试验。本装置部署于偏远山区对环境的变化进行实时的监控。现场测试时,该装置必须面对高海拔、低氧高湿和强烈紫外线辐射的环境因素。该装置自测试启动以来已持续运行三个月,其间没有发生数据丢失,系统崩溃和精度降低的情况。经现场实验,该装置气压传感器能准确地记录大气变化情况,其误差范围均在 ± 0.5 hPa内。另外,该装置太阳能电池板确保电力供给充足,同时低温环境中电池系统性能稳定,没有发生容量衰减和电压波动。该装置的通信系统现场测试也取得了突出的性能,虽然布放位置距离通信基站较远,但是该装置通过卫星通信模块仍然可以将数据稳定地上传到远程监控平台上,验证了该装置在偏远地区具有长期稳定工作的能力。

4 结束语

通过系统分析复杂环境下影响计量检测设备可靠性因素,提出综合性设计验证方法。装置的可靠性既取决于软硬件的设计是否合理,又要注重对环境的适应性和长期稳定性。文中介绍的设计和测试方法可为计量检测设备研制和应用提供强有力的支撑,促进设备在极端环境中的使用。伴随着相关科技的进步,今后的装备会越来越智能化与高效化,可靠性设计也会不断趋于精细化与自动化,以适应更复杂的应用要求。

参考文献

- [1] 兰维永,程戴毅,刘洪达.医用计量器具计量检测的必要性探讨[J].大众标准化,2024,(18):193-195.
- [2] 韦明星,杨正明.探究医疗设备计量检测存在的问题分析及优化措施[J].中国设备工程,2024,(15):173-175.
- [3] 李征.论标准化方法对计量检测过程的质量控制[J].大众标准化,2024,(13):4-6.
- [4] 邹细财.浅谈医疗设备计量检测中的问题及改进措施[J].品牌与标准化,2024,(04):161-163.
- [5] 钱福颖.医疗设备计量检测存在的问题及优化对策探讨[J].品牌与标准化,2024,(04):198-201.
- [6] 梁裕婧.基于PDCA循环法提高医疗设备计量检测率的策略研究[J].质量与市场,2024,(05):12-14.
- [7] 张小飞.燃气表计量检测及技术[J].大众标准化,2024,(08):181-183.
- [8] 张杰.化学分析仪器计量检测结果不准确因素及控制策略[J].品牌与标准化,2024,(02):197-199.
- [9] 蒋卓.浅谈电子仪器仪表计量管理标准及计量检测分析[J].中国标准化,2024,(01):198-201.
- [10] 银温尚,马文萃,赵忠庆.计量检测在医疗设备质量保证中的作用[J].中国质量监管,2023,(12):76-77.
- [11] 杨国昌.计量检测行业大数据分析挖掘潜在问题与优化解决方案[J].大众标准化,2023,(16):196-198.
- [12] 汤天宇.计算机技术在计量检测体系中的应用分析[J].大众标准化,2023,(11):189-191.
- [13] 李莉.计量监督检测有效性监控方法研究[J].品牌与标准化,2022,(06):48-50.
- [14] 李政.SH质控院计量检测服务质量管理研究[D].上海:东华大学,2021.
- [15] 董文龙. γ 射线剂量仪计量检测系统的开发[D].成都:电子科技大学,2021.
- [16] 刘欣.化学分析仪器计量检测问题分析[J].中国科技信息,2019,(23):48-49.
- [17] 吴巍,岳伟.精准计量检测保障大飞机可靠运行[J].中国军转民,2019,(07):24.
- [18] 李伟.医疗设备计量检测中的问题及改进措施[J].科学技术创新,2018,(21):29-30.
- [19] 徐振刚.计量检测质量的影响因素与对策探讨[J].大众标准化,2018,(04):24-26.
- [20] 卢肖静.计量检测业务系统及自组织计算元集应用的研究与实现[D].西安:西安理工大学,2017.