

微型化仪器仪表设计与性能测试分析

崔海鹏

广东思谷智能技术有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i8.21632

[摘要] 本文围绕微型化仪器仪表的设计及性能测试问题展开研究,先从系统架构方向分析传感器单元、嵌入式处理模块以及电源管理系统的微型化设计方案,着重解决了多参数集成和低功耗控制的技术难题,之后对三维堆叠结构的设计方法、微封装工艺展开讨论,利用热-机械耦合仿真完成元件布局优化,还针对复杂应用环境给出了温度补偿与抗振的设计方案。最终搭建出完整的性能测试体系,从静态精度、动态响应以及长期可靠性三个方向对样机进行性能评估,测试结果表明本次微型化设计在保证测量精度不变的基础上,达成了体积缩减60%以上的目标。为小型化、便携式测量设备的开发给出了参考依据。

[关键词] 微型化仪器; MEMS传感器; 系统级封装; 性能测试; 可靠性评估

中图分类号: TH86 **文献标识码:** A

Design and Performance Testing Analysis of Miniature Instruments and Meters

Haipeng Cui

Guangdong Sigu Intelligent Technology Co., Ltd

[Abstract] This article focuses on the design and testing of miniaturized instruments and meters. Firstly, the miniaturization design scheme of sensor units, embedded processing modules, and power management systems is analyzed from the perspective of system architecture, with a focus on solving the technical problems of multi parameter integration and low-power control. Then, the design methods and micro packaging processes of three-dimensional stacked structures are discussed, and the layout optimization of components is completed using thermo mechanical coupling simulation. Temperature compensation and anti vibration design schemes are also proposed for complex application environments. Finally, a complete performance testing system was established to evaluate the performance of the prototype from three aspects: static accuracy, dynamic response, and long-term reliability. The test results showed that the miniaturization design achieved the goal of reducing the volume by more than 60% while ensuring the same measurement accuracy. This study provides a reference for the development of miniaturized and portable measuring devices.

[Key words] miniaturized instruments; MEMS sensors; System level encapsulation; Performance testing; reliability assessment

引言

仪器仪表做微型化处理,是测量技术发展的重要方向,传统仪表受分立元件和旧式封装工艺的限制,很难适配便携医疗、可穿戴设备、无人系统这类应用场景对体积、功耗的严格要求, MEMS技术和先进封装工艺逐渐成熟,给微型化设计打下了基础,但要在极小空间里做到多参数测量、保障测量精度、管控热效应并保证长期稳定运行,依旧存在不少技术难题。本文以实际的微型仪表开发项目作为例子,对微型化设计中的关键技术环节做了系统梳理分析,搭建出覆盖静态、动态以及可靠性指标的测试方案,再利用实验数据证明了这套设计方案确实有效,给微

型化仪器仪表的工程落地给出了可行技术路径。

1 微型化仪器仪表系统架构设计

1.1 微型化传感器单元设计

传感器单元是仪表的核心部件,微型化设计首先需要解决多参数测量与空间限制的矛盾。本文采用MEMS工艺集成温度、压力和加速度三类传感器,单颗芯片尺寸控制在3mm×3mm以内。传感阵列采用对称式布局,将温度敏感元件置于芯片中心以减少边缘效应影响,压力传感膜片与加速度质量块分别位于两侧区域避免机械耦合干扰。信号调理电路采用低噪声仪表放大器 ADA4528配合16位Σ-Δ型ADC,在保证0.1%测量精度的前提下将

功耗控制在1.2mW以下。为补偿MEMS器件的温漂特性,在信号链路中嵌入了三阶多项式校准算法,通过现场标定系数实时修正输出值,使全温区误差降至 $\pm 0.3\%$ 以内。传感器输出采用I²C总线接口,支持多从机级联,为后续功能扩展预留了硬件接口。

1.2 嵌入式处理与控制模块

微型化仪表的处理模块需要在有限算力下完成数据采集、滤波处理和通信三项任务。本次设计选用STM32L476微控制器,这款芯片采用ARM Cortex-M4内核,封装尺寸仅为7mm×7mm,在80MHz主频下运行时功耗不超过50 μ A/MHz。数据采集环节采用定时器触发DMA传输模式,避免CPU频繁被中断打断,将处理器利用率控制在40%以内,给后续算法优化预留了空间,针对传感器输出的高频噪声,完成了自适应卡尔曼滤波算法的移植,算法可根据信号方差动态调整滤波参数,在压制随机噪声的同时保留了200Hz的有效带宽。通信模块同时兼容蓝牙5.0和USB2.0接口,蓝牙连接负责便携场景下的无线数据传输,USB接口则用来实现高速数据记录和固件升级^[1],为提高系统可靠性,在软件层面设置了看门狗监控和故障自恢复机制,检测到传感器失效或是数据异常时,会自动切换到安全模式并记录故障代码。

1.3 微型化电源管理系统

电源系统直接影响仪表的续航能力和可靠性。本文设计了多级电源管理架构,输入端采用3.7V锂电池供电,经过DC-DC降压转换器TPS62840生成1.8V数字电源和3.3V模拟电源,转换效率达到92%。模拟电源采用低压差线性稳压器(LDO)进一步滤波,将纹波抑制到10 μ V以下保证传感器测量精度。为延长续航时间,实施了分级功耗管理策略:待机模式下关闭所有传感器和通信模块,MCU进入停止模式,系统功耗降至8 μ A;测量模式下传感器按需唤醒,单次采样完成后立即进入休眠,平均功耗约为150 μ A;连续监测模式下所有模块保持运行,功耗上限为15mA。电源管理芯片集成了电量计量功能,通过库仑计数法实时估算剩余电量,并在电池电压低于3.2V时触发低电量告警。测试表明,在典型应用场景下(每秒采样一次),500mAh电池可支持连续工作120小时以上。

2 微型化结构与封装工艺

2.1 微型化结构设计方法

微型化仪表的结构设计需要在狭小空间内合理布置电路板、传感器、电池和外壳。本文采用三维堆叠式结构,将系统分为四层:底层为电池仓和电源管理电路,第二层为主控PCB,第三层为传感器模块,顶层为显示屏和按键。各层之间通过柔性排线(FPC)连接,既节省了空间又提高了装配灵活性^[2]。主控PCB采用六层板设计,外层走信号和电源线,内层作为地平面和屏蔽层,板厚控制在0.8mm。为验证结构强度,利用ANSYS Workbench进行了热-机械耦合仿真,在环境温度-20℃至60℃范围内,PCB最大变形量为12 μ m,元件焊点应力峰值53MPa,均在安全范围内。传感器芯片直接焊接在PCB表面,采用倒装焊(Flip-Chip)工艺减少引线长度,寄生电感降低40%以上。整机尺寸最终优化至45mm×28mm×12mm,重量18克,相比传统分立式设计体积缩减62%。

2.2 微封装技术与工艺流程

封装工艺决定了微型仪表的集成度和可靠性。本设计采用系统级封装(SiP)技术,将传感器芯片、MCU和无源元件集成在单个封装体内。工艺流程包括:首先在陶瓷基板上完成互连布线,采用厚膜印刷工艺形成多层导电通道;然后通过共晶焊或导电胶将裸芯片贴装到基板上,芯片间距控制在0.5mm以内;接着用金线或铜线完成芯片与基板的电气互联,线径25 μ m,键合强度大于60mN;最后采用环氧树脂灌封保护内部结构,固化后形成7mm×7mm×1.5mm的模块。为保证气压传感器的通气性能,在封装顶部预留了透气孔,孔径0.3mm,并覆盖疏水透气膜防止液体侵入。SiP模块经过气密性测试,漏率小于 1×10^{-8} Pa·m³/s,满足IP67防护等级要求。与传统PCB布板方式相比,SiP封装使互连长度缩短70%,寄生参数显著降低,系统噪声水平下降6dB,同时封装体积仅为分立方案的1/5。

2.3 环境适应性设计

微型仪表常工作在恶劣环境下,必须具备温度补偿、抗振和电磁防护能力。温度特性方面,MEMS传感器的零点和灵敏度均随温度变化,本文建立了分段线性补偿模型,在-20℃至60℃范围内每隔10℃标定一组系数存储在MCU闪存中,运行时根据内置温度传感器读数查表插值计算补偿量,补偿后全温区误差从 $\pm 1.2\%$ 降至 $\pm 0.25\%$ 。抗振设计采用了弹性体缓冲结构,在PCB与外壳之间填充硅橡胶减振垫,厚度2mm,硬度邵氏A50,可吸收10g加速度冲击。振动台测试显示,在5Hz至200Hz扫频激励下,PCB传递率峰值出现在85Hz处,数值为2.3,远低于刚性连接的6.8,有效保护了焊点和元件^[3]。电磁兼容性设计包括电源去耦、信号线滤波和外壳屏蔽三个层面,所有IC电源引脚就近布置0.1 μ F和10 μ F电容,高速信号线串联22 Ω 电阻抑制振铃,外壳采用铝合金材料并与电路可靠连接。经第三方实验室测试,辐射发射在30MHz至1GHz频段内低于CISPR22 Class B限值8dB以上,抗扰度测试中在10V/m场强电磁场干扰下仍能正常工作。

3 性能测试与分析评估

3.1 静态性能测试

静态性能反映仪表在稳态条件下的测量能力,主要指标包括精度、线性度和稳定性。测试采用标准校准平台,温度参考源为干体式温度校准炉Fluke9142,准确度 $\pm 0.05^\circ\text{C}$;压力参考源为活塞式压力计Ruska7250,准确度0.008%。测量精度测试在0至100℃范围内选取11个温度点,每点重复测量10次取平均值,与参考值比较得到绝对误差,结果显示最大误差为0.28℃,相对误差0.28%。线性度采用端点平滑法评估,拟合直线与实测数据的最大偏差为0.15%FS,说明传感器输出特性接近理想线性关系。零点稳定性测试在恒温箱内进行,设定温度 $25^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$,连续记录8小时,零点漂移量为0.02℃,折合0.02%FS/8h。温度漂移测试覆盖-20℃至60℃区域,未补偿时零点温漂系数为0.015℃/℃,灵敏度温漂系数为0.08%/℃;经软件补偿后分别降至0.003℃/℃和0.012%/℃。重复性测试在同一测量点往复加载10次,计算标准差为0.06℃,重复性误差0.06%。滞后测试采用升降循环法,

上行与下行曲线最大差值为0.12℃, 滞后误差0.12%。各项静态指标均满足±0.5%FS的设计要求。

3.2 动态性能测试

动态性能表征仪表对时变信号的跟踪能力, 关键参数为响应时间和频率特性。响应时间测试将传感器从25℃环境骤然浸入75℃水浴中, 记录输出信号随时间的变化曲线。定义达到最终值90%所需时间为响应时间 t_{90} , 实测值为2.8秒, 主要受传感器热容和封装热阻限制^[4]。为了分别区分传感器本身、信号处理电路各自带来的影响, 本次测试单独检测了ADC与滤波器的延迟, 其中ADC延迟为0.125秒(对应采样率8Hz), 滤波器延迟为0.3秒(对应卡尔曼滤波算法), 两者加起来占总响应时间的15%, 说明传感器热惯性才是影响响应时间的主要因素。频率特性测试使用正弦波调制法, 利用半导体制冷片(TEC)在传感器表面生成幅度为±5℃、频率范围为0.01Hz至10Hz的温度波动, 同时记录输出幅度与相位变化。测试结果表明, 频率在0.1Hz以下时幅频特性保持平稳, 衰减幅度小于1dB; 频率到1Hz时衰减达到3dB, 相位滞后45°, 频率到10Hz时衰减达到20dB, 相位滞后接近90°, 根据上述结果确定该系统的带宽为1Hz, 能够满足绝大多数温度监测场景的使用需求, 阶跃响应曲线呈现出典型的一阶惯性环节特征, 拟合得到的时间常数 $\tau=1.2$ 秒, 和实际测得的响应时间一致。动态误差分析结果表明, 当输入温度变化率不超过5℃/s时, 动态误差小于0.5℃, 如果变化率提高到20℃/s, 动态误差会增大到1.8℃, 这时需要借助历史数据做外推预测, 以此提高跟踪精度。

3.3 可靠性与寿命评估

可靠性直接决定了微型仪表的实用价值, 常用的可靠性评估方法包括加速寿命试验与失效模式分析, 本次加速寿命试验参照GJB899A标准进行, 选用了高温存储与温度循环两种测试应力, 高温存储试验将样品放在85℃的烘箱中静置1000小时, 每间隔200小时取出测试电气参数, 参与测试的10只样品均未出现功能失效问题, 其中零点漂移的最大值为0.18℃, 灵敏度变化率的最大值为0.6%, 性能退化程度非常轻微。温度循环试验设置温度范围为-40℃至85℃, 单次循环时长为2小时, 一共完成500次循环, 试验过程中通过监测电阻值变化判断焊点状态, 结果表明所有焊点的电阻增长率都小于5%, 没有出现开路或虚焊问题。根据Arrhenius模型做外推计算后可得, 该仪表在25℃常温条件下的等效工作寿命超过10年, 失效模式与影响分析(FMEA)一共识别出三个关键风险, 分别是传感器芯片粘贴层脱落、引线键合点断

裂、密封胶开裂^[5], 对应的改进措施包括: 将芯片贴装温度提高至280℃保证共晶层完全成型、优化引线弧度减小应力集中、选用低应力灌封胶并严格控制固化温度。改进后的样品通过了跌落试验(从1.5米高度落在混凝土地面, 6个面各测试2次)与IP67防水测试(在1米水深中浸泡30分钟), 结构可靠性得到验证。长期稳定性评估采用连续运行试验, 5台样机在实验室环境下不间断运行6个月, 每周记录一次校准偏差, 数据表明零点累计漂移的平均值为0.32℃, 年化漂移率约0.64℃/年, 符合工业仪表年漂移率小于1%的通用标准。

4 结论

本文对微型化仪器仪表的设计方法与性能评估体系展开了系统性研究。在系统架构方面, 利用MEMS传感器集成、低功耗嵌入式处理以及分级电源管理做到功能密集化, 整机功耗被控制在15mA以内, 续航时长可达120小时, 结构设计使用三维堆叠和SiP封装技术, 将仪器体积缩小到45mm×28mm×12mm, 跟传统方案相比体积减少了62%, 还借助热-机械仿真和环境适应性设计保障了结构可靠性。性能测试数据表明, 样机测量精度为±0.28%, 线性度0.15%FS, 响应时间2.8秒, 所有静态、动态指标都符合设计要求, 加速寿命试验与长期稳定性评估验证出样机工作寿命可达10年以上, 年漂移率0.64℃满足工业标准要求。本次研究成果为便携式测量设备、可穿戴医疗仪器以及嵌入式监测系统的开发给出了可行的技术路径, 后续工作可围绕无线能量传输、多传感器融合算法以及自校准技术做进一步拓展。

【参考文献】

- [1]王虎.微型化机械仪器仪表的制造工艺改进与实现[J].模具制造,2026,26(1):228-230.
- [2]陈芙蓉.电子仪器仪表计量管理及计量检测探析[J].新潮电子,2023(9):55-57.
- [3]刘晓慧,唐杰.面向航空发动机性能测试的智能化数据采集与校准仪器设计研究[J].仪器仪表用户,2025,32(4):66-68.
- [4]吴国勇,余江武,程俊儒.仪器仪表电气安全综合测试系统测试系统设计分析[J].产品设计,2024(23):108-110.
- [5]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(1):198-201.

作者简介:

崔海鹏(1993--),男,满族,辽宁抚顺人,博士,工程师,研究方向:仪器仪表技术/微纳加工/电流体喷印。