

智能电能计量箱的结构优化与可靠性设计研究

程铁钢, 张寿朋*

(山东火石电气设备有限公司, 山东 德州 253000)

摘 要 针对智能电能计量箱实际运行中结构不合理、防护性能不足、运维不便及可靠性欠佳等问题, 结合现有技术现状, 采用新型复合材料应用、结构模块化设计及智能防护技术, 对计量箱箱体结构、内部布局及防护体系开展系统性优化设计。经系列试验验证, 优化后的计量箱为相关问题提供了可行方案, 使运行稳定性与使用寿命得到明显优化, 适用智能电网集约化、精细化管理需求, 以期为智能电能计量设备的逐步优化提供技术参考。

关键词 智能电能计量箱; 结构优化; 可靠性设计; 复合材料

中图分类号: TM933.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.026

0 引言

智能电能计量箱是智能电网末端核心设备, 承担电能精准计量、数据采集传输及用电安全防护的关键职能, 其性能直接影响电力计量准确性与供电可靠性。当前智能电能计量箱设计与应用仍存在诸多短板: 传统金属箱体易锈蚀、复合材料箱体性能不均, 结构设计缺乏规范性, 防护体系难以适用复杂户外环境, 运维便捷性不足。现有研究多侧重单一方面的改进, 未能实现结构与可靠性的配合优化^[1]。为此, 本文针对该领域现存的技术瓶颈开展系统性研究与分析, 重点优化计量箱的设计逻辑与性能指标, 逐步完善其全流程设计体系, 对推动智能电网高质量发展兼具理论参考价值与现实应用意义。

1 智能电能计量箱现有问题分析

1.1 箱体结构设计缺陷分析

现有智能电能计量箱结构设计存在明显不合理性, 多数产品采用传统一体式结构, 内部元器件布局混乱, 铜排连接方式繁杂, 既占用过多空间, 也增加了接线错误概率。户内计量箱多未考虑散热与布线合理性, 户外计量箱密封结构简陋, 易出现雨水渗入、灰尘堆积问题。部分拼接式设计的箱体, 连接部位强度不足, 长期运行易松动、变形, 影响整体稳定性^[2]。同时存在材质选择与结构设计不匹配问题, 金属箱体重量大、安装不便, 普通塑料箱体抗冲击性能差, 难以适应复杂安装与运行环境。

1.2 可靠性运行隐患分析

智能电能计量箱的可靠性隐患主要集中在防护性能、电气安全及运维管理三个方面。一是防护等级未达行业规范, 户内产品防护等级多低于 IP30, 户外产品未达 IP44 标准, 易受外界环境影响损坏内部元器件; 二是电气安全设计存在疏漏, 绝缘电阻、工频耐压值未达低压成套设备要求, 接地端子连接不牢固, 存在触电与短路隐患; 三是缺乏有效的智能监测预警机制, 箱体异常开启、内部温升过高及线路故障等问题无法及时发现, 人工巡检效率低下, 易遗漏潜在隐患^[3], 影响计量箱长期稳定运行。

2 智能电能计量箱结构优化设计

2.1 箱体材质优化设计

箱体材质是决定计量箱结构稳定性与使用寿命的核心因素, 本文摒弃传统金属与普通塑料材质, 选用新型改性 PP+LGF 复合材质优化。该材质采用“核一壳”增韧技术, 在聚丙烯基材中融入长玻璃纤维, 实现轻量化与高强度的配合提升, 弯曲模量可达 6 000 MPa, 可承受 20 J 撞击力, 阻燃等级达 V-0 级, 符合电气设备阻燃要求, 且可 100% 回收利用, 兼顾环保性与实用性。户外型计量箱表面增设抗紫外线涂层, 提升耐候性, 适用高海拔、强紫外线等恶劣环境。

2.2 箱体结构模块化优化

针对传统一体式结构的弊端, 采用模块化设计理念, 将计量箱划分为总开关、仪表安装、接线及通信

作者简介: 程铁钢 (1984-), 男, 专科, 研究方向: 电气自动化技术。

*通信作者: 张寿朋 (1996-), 男, 本科, 研究方向: 计量箱研究。E-mail: 1033998416@qq.com

四个独立单元，各单元通过标准化接口连接，实现元器件快速装配与更换。总开关与仪表模块采用公母卡口连接，替代传统导线连接，简化接线流程，降低接线错误概率^[4]。优化箱体内部布局，合理规划铜排走向，采用预埋铜排设计，减少导线用量，缩小箱体体积。模块间预留合理的散热与检修空间，既便于运维操作，也能提升内部空气流通效率，降低元器件温升。箱体采用壁挂式设计，减轻重量的同时提升安装便捷性。

2.3 密封与散热结构优化

密封结构以提升防护等级为核心，户外型计量箱采用柔性防护罩与密封胶条组合密封，箱体缝隙加装耐高低温密封胶条，防护等级提升至 IP44，可有效阻

隔雨水、灰尘渗入。箱门与箱体连接处采用 360° 导电衬垫密封，兼顾密封性与电磁屏蔽性能。散热结构采用自然通风与被动散热结合的方式，箱体侧面与底部开设 2 mm ~ 3 mm 孔径的百叶式散热孔，兼顾通风散热与异物防护^[5]。内部元器件安装板选用高导热铝合金材质，可将元器件工作热量快速传导至箱外，确保箱内温度控制在 -40℃ ~ 70℃，符合行业运行标准。

分析表 1 可知，优化后计量箱的材质性能与结构参数均优于传统产品，弯曲模量显著提升，冲击载荷翻倍，可有效抵御外力撞击；户外产品防护等级达 IP44，符合户外运行环境要求；箱体体积缩小 20%，集约化布局可适用不同安装场景的空间需求，各项参数均符合

表 1 结构优化前后核心参数对比

参数名称	传统计量箱	优化后计量箱	参考标准
箱体材质	普通冷轧钢板	PP+LGF 复合材质	行业公开标准
弯曲模量	3 500 MPa	6 000 MPa	行业公开标准
冲击载荷	10 J	20 J	行业公开标准
防护等级	IP30（户外 IP40）	IP30（户外 IP44）	GB/T 4208-2017
箱体体积	0.12 m ³	0.096 m ³	专利公开数据

国家及行业标准，为计量箱可靠运行奠定了结构基础。

3 智能电能计量箱可靠性设计

3.1 电气安全可靠性设计

电气安全可靠性设计围绕绝缘防护、接地保护及防触电设计三个核心展开。在绝缘性能设计中，选用耐高压绝缘材料封装内部元器件，确保绝缘电阻不低于 100 MΩ，工频耐压值达 2 kV，符合低压成套设备电气安全要求。在接地保护设计中，箱体金属部分与接地端子可靠连接，接地端子标识清晰，连接电阻控制在 0.1 Ω 以下；采用“一点接地+网格化等电位”设计，计量箱、配电箱及避雷器接地极共用同一低阻接地网，接地电阻 ≤ 4 Ω，有效避免地电位抬升引发的设备损坏^[6]。在防触电设计中，带电体全封闭封装，箱门开启设置安全联锁装置，确保开门时切断内部带电回路，杜绝触电隐患。

3.2 防雷与电磁兼容可靠性设计

结合计量箱运行环境，重点优化防雷与电磁兼容设计，降低雷电与电磁干扰对计量精度及设备运行的影响。雷电防护采用“三级配合防护”体系，电表进线端加装 II 类试验（8/20 μs，40 kA）可插拔式组合型浪涌保护器，其与电表 PCB 板的引线长度控制在 0.5 m

以内，抑制寄生电感；计量芯片供电入口设置 π 型 LC 滤波与 TVS 钳位，RS485 收发器前端集成 ≥ 5 kVrms 高隔离度磁耦合隔离器，提升电路抗干扰能力^[7]。电磁兼容设计遵循“分区布板、数模分离”原则，优化 PCB 板关键信号路径，所有外设接口配置共模扼流圈与 X/Y 电容滤波，金属部件与接地系统多点低阻连接。

分析表 2 可知，优化后计量箱的防雷与电磁兼容性能均满足标准要求，可有效抵御感应雷与雷电行波冲击，强辐射环境下通信稳定无数据丢失，干燥环境下抗静电能力达标，接地电阻 3.2 Ω 符合设计要求，可有效泄放雷电流，避免设备故障。

3.3 智能运维可靠性设计

智能运维可靠性设计围绕隐患预警与便捷运维，提升计量箱整个运行过程的可靠性。集成状态可视化智能物联网模块，采用公网通信方案，实现运行状态远程监测与控制。箱门安装响应时间小于 2 s 的智能门锁，支持手机端远程开锁与异常开锁报警，箱体被异常打开时，运维人员可第一时间收到报警信息，缩短隐患处理时效^[8]。内置温湿度传感器，实时采集内部环境参数，温度超 70℃ 或湿度高于 85% 时，自动引发通风散热装置，同步上传异常数据至运维后台。设

表 2 防雷与电磁兼容测试数据

测试项目	测试条件	测试结果
浪涌抗扰度	线—地 6 kV，线—线 4 kV	无损坏，计量正常
电磁辐射抗扰度	30 V/m，80 MHz ～ 1 000 MHz	通信正常，无数据丢失
静电放电抗扰度	接触放电 ±8 kV，空气放电 ±15 kV	无死机，功能正常
接地电阻	工频接地测试	3.2 Ω

置外接应急电源的应急开锁方案，确保断电时可正常开锁检修，进一步提升运维便捷性与可靠性。

4 优化设计试验验证与应用分析

4.1 试验验证方案设计

为验证优化设计的有效性，搭建专项试验平台，选取 30 台优化后计量箱与 30 台传统计量箱开展对比试验。试验涵盖环境适应性、机械性能、电气性能及长期运行可靠性四个方面，严格遵循《外壳防护等级（IP 代码）》（GB/T 4208-2017）、电磁兼容试验和测量技术（GB/T 17626）等相关标准，确保试验数据科学准确。

4.2 试验结果分析

环境适应性试验中，优化后计量箱在-40℃～70℃高低温环境下运行正常，无箱体变形、元器件损坏；40℃、95%湿度湿热试验 72 h，内部无凝露、绝缘性能稳定；淋雨试验 30 min 后内部无进水，防护性能达标；168 h 强紫外线照射后，箱体表面无老化开裂，耐候性良好。传统计量箱在高低温、紫外线试验中出现箱体变形、表面老化，部分箱体淋雨试验后存在进水隐患^[9]。在机械性能试验中，优化后计量箱可承受 20 J 冲击载荷，振动试验后模块连接牢固无松动，密封性能满足 IP44 标准，各项指标均优于传统产品。

4.3 工程应用效果分析

优化后的计量箱在 3 个居民小区及 1 个农村台区开展 6 个月试点应用，此期间运行稳定，无箱体破损、进水、元器件故障等问题，计量数据准确率 100%，异常开锁报警响应时间均小于 30 min，隐患消缺及时率 100%。相较传统计量箱，优化后产品运维工作量显著减少，安装效率大幅提升^[10]，可适用不同安装场景需求，具备广泛的工程推广价值。

5 结束语

本文针对智能电能计量箱结构不合理、可靠性不足等问题，开展结构优化与可靠性设计研究，通过新型复合材料应用、模块化结构设计、密封散热优化及

防雷、智能运维等可靠性设计，为传统计量箱的诸多弊端提供了可行方案，形成了完善的优化设计体系。试验表明，优化后的计量箱在结构稳定性、防护性能、电气安全及运维便捷性等方面均得到明显优化，可有效保障电能计量准确性与供电可靠性。未来将进一步优化材质性能与防护体系，结合人工智能技术提升运维智能化水平，推动计量箱向更高效、更可靠、更智能的方向发展。

参考文献：

[1] 刘洪敏,韩光,刘壮,等.基于物联网技术的户外智能防水电能计量箱运行状态监测方法[J].电气时代,2025(06):118-121.

[2] 陈义林,单永梅,孙永.数字化计量箱在台区数字化管理中的应用研究[J].自动化应用,2025,66(10):129-131.

[3] 俞书伟,卢璿威,陆婷燕.基于 DFA 理论的电能计量箱可装配性设计评价方法[J].包装工程,2022,43(S1):36-41.

[4] 李亮,宋强,许晓.电能计量箱外壳材料的选择与应用[J].中国战略新兴产业,2024(30):94-97.

[5] 李焱,郝建姝,杨子元,等.基于 LMS 自适应滤波算法的智能电能计量箱故障诊断方法研究[J].电工技术,2025(10):106-108,111.

[6] 郑跃进.基于区块链技术的电能计量系统的设计与实现[J].自动化应用,2024,65(07):239-241.

[7] 郝建姝,杨子元,罗元绮,等.基于改进 PSO-LSTM 算法的智能电能计量箱运行状态监测方法研究[J].电器工业,2025(05):28-32.

[8] 朱彦文.基于电能计量的供电可靠性评价及改进策略分析[J].集成电路应用,2025,42(08):314-315.

[9] 任凯德,董雪,刘志勇,等.基于智能物联感知的电能计量箱状态在线监测分析[J].集成电路应用,2024,41(02):302-303.

[10] 陆春光,黄荣国,沈建良,等.基于模糊聚类算法的电能计量箱接插件性能评估方法[J].电测与仪表,2020,57(19):126-131,139.