

可靠性工程在高压电器设备质量管理中的应用与优化

范燕龙

赣州爱康光电科技有限公司 江西赣州 341000

摘要：可靠性工程与质量管理的深度融合是高压电器设备质量管理的必然趋势。通过在设计研发阶段应用可靠性指标分配、FMECA、元器件优选等技术，奠定产品固有可靠性基础；在生产制造阶段采用PFMEA、SPC、ESS及RGT等手段，确保设计可靠性的有效实现；在运行维护阶段依托状态监测、RCM策略及数据反馈，实现预防性维护与精准维修。进一步从理念（全生命周期可靠性管理）、流程（构建可靠性工作闭环）、技术（融合ALT、HASS及数字化监测）层面优化应用路径，可显著提升设备内在质量、降低全生命周期成本、增强运行安全性，推动从“制造合格”向“运行可靠”跨越。

关键词：可靠性工程；高压电器设备；质量管理

引言

高压电器设备作为电力系统的核心组成部分，其可靠性直接关系到电网的安全稳定运行。传统质量管理模式侧重产品出厂检验与短期性能达标，难以满足现代电力系统对设备长期稳定运行的需求。可靠性工程通过在产品全生命周期中系统识别、分析和控制潜在风险，为提升设备质量提供了科学方法论。

一、可靠性工程与高压电器设备质量管理概述

(一) 可靠性工程的核心理论

可靠性工程是研究产品全生命周期保持规定功能能力的学科，核心理论基于概率统计、系统工程与故障物理等学科。可靠性指产品在规定条件和时间内完成规定功能的能力，强调时间与环境对功能维持的影响。常用指标有失效率（单位时间故障概率，变化符合“浴盆曲线”模型）、平均无故障工作时间（衡量可修复设备可靠性）、平均失效前时间（适用于不可修复设备）。可靠性建模用概率模型描述产品寿命分布，如指数、威布尔、对数正态分布等，威布尔分布在高压电器设备寿命预测中应用广。故障模式与影响分析（FMEA）识别潜在故障模式、分析影响与严重程度，为设计改进提供依据；故障树分析（FTA）用逻辑演绎追溯顶层故障原因，构建传播路径，用于复杂系统风险评估。这些理论构成可靠性工程基础框架，为高压电器设备质量管理提供科学依据^[1]。

(二) 高压电器设备质量管理的特点与要求

高压电器设备包括断路器、变压器等，技术特点是

高电压、大容量、结构复杂、运行环境严酷。如1100kV特高压断路器需承受高电压，灭弧室结构精密，材料要求高；运行环境涉及极端温度、高湿度等，对稳定性要求高。其质量管理特点为高标准、长周期、系统性强。高标准体现在对制造工艺等严格要求，如变压器绕组需多项型式试验；长周期指覆盖全生命周期，部分设备设计寿命超30年；系统性强强调贯穿各环节形成闭环控制。与传统质量管理侧重出厂合格率不同，高压电器设备质量管理更关注全生命周期运行可靠性，要求通过设计优化等手段确保长期稳定性能，降低故障率与维护成本。

(三) 可靠性工程与质量管理的内在联系

可靠性工程与现代质量管理之间存在相辅相成、深度融合的内在联系。传统质量管理主要关注产品是否符合设计规范与标准要求，即“符合性质量”，其核心在于通过检验与控制手段确保产品出厂时的质量水平。然而，对于高压电器设备而言，仅符合出厂标准无法保证其在复杂运行环境下的长期可靠性。可靠性工程则强调预见性与预防性，通过理论建模、数据分析与试验验证等手段，识别潜在故障模式、评估寿命分布规律、预测失效风险，从而在设计阶段即采取措施提升产品固有可靠性。将可靠性工程的理念与方法融入质量管理，可实现从被动符合“向主动预防”的转变。例如，在产品设计阶段采用FMEA与FTA分析，可提前发现薄弱环节并优化设计方案；在生产制造过程中通过可靠性增长试验（RGT），验证工艺改进对失效率的降低效果；在运行维护阶段利用状态监测与剩余寿命预测技术，实现预防性维护与精准维修。这种融合不仅提升了产品的内在质量

与长期可靠性，还降低了全生命周期成本，增强了设备在电力系统中的运行安全性。因此，可靠性工程与质量管理的深度融合是高压电器设备质量管理发展的必然趋势，也是实现从制造合格“向运行可靠”跨越的关键路径^[2]。

二、可靠性工程在高压电器设备质量管理中的应用

(一) 设计研发阶段的应用

在高压电器设备的设计研发阶段，可靠性工程的应用直接决定了产品的固有可靠性水平，是质量管理的前置性核心环节。首先，可靠性指标的确定与分配是设计输入的关键依据。可靠性指标需逐级分解至各子系统及关键元器件，形成自上而下的可靠性目标体系。可靠性预计则采用基于元器件计数法或应力分析法，结合相关标准，对设计方案进行定量评估，以验证其是否满足预定目标。故障模式、影响及危害性分析（FMECA）通过系统识别潜在故障模式，评估其发生概率、严重度及检测难度，计算风险优先数，并针对高风险项目强制实施设计改进。元器件优选与降额设计是提升可靠性的基础手段，通过选用高可靠性等级元器件并实施降额使用，有效降低元器件失效率。可靠性设计准则的制定与贯彻，确保设计过程中充分考虑环境适应性、维修性及测试性等因素，从源头上提升产品的固有可靠性，奠定高质量的基础。

(二) 生产制造阶段的应用

在生产制造阶段，可靠性工程的应用旨在确保设计可靠性得以有效实现，是质量控制的关键环节。过程失效模式与影响分析（PFMEA）通过识别制造过程中的潜在失效模式，评估其对产品可靠性的影响，并制定预防措施，从工艺层面控制风险。统计过程控制（SPC）通过监控关键工艺参数的波动，利用控制图识别异常变异，实现制造过程的稳定性控制，确保产品一致性。环境应力筛选（ESS）通过对产品施加温度循环、随机振动等环境应力，激发早期缺陷并剔除潜在故障产品，提高出厂批次的可靠性水平。可靠性增长试验（RGT）通过试验-分析-改进（TAAF）循环，系统性地暴露设计或工艺中的薄弱环节，实施针对性改进，实现产品可靠性的持续增长。制造过程可靠性数据的收集与分析，为工艺优化和可靠性改进提供数据支持，形成闭环管理。这些技术的综合应用，有效减少制造缺陷，确保产品的一致性与可靠性水平，实现设计可靠性的准确传递^[3]。

(三) 运行维护阶段的应用

在设备投运后的运行维护阶段，可靠性工程的应用核心在于通过状态评估与科学决策，延长设备使用

寿命并保障系统安全。设备状态监测与可靠性评估采用在线监测技术与离线试验数据相结合，构建可靠性评估模型，实时掌握设备健康状态。以可靠性为中心的维修（RCM）策略制定通过分析故障后果，对安全相关故障采取定期维修策略，对经济相关故障实施状态维修，优化维修资源配置。备品备件的可靠性管理采用基于概率分布的需求预测模型，结合供应商可靠性数据，建立动态库存策略，平衡库存成本与供应保障能力。可靠性数据的收集与分析系统记录设备运行、维修及故障数据，形成可靠性数据库，为设备更新改造、维修策略优化及新设备研发提供依据。这些应用使运维模式从定期检修向状态检修转变，通过数据驱动的决策机制，在保障设备可靠性的同时实现全生命周期成本最优，为系统的安全稳定运行提供坚实支撑^[4]。

三、高压电器设备质量管理中可靠性工程应用的优化路径

(一) 理念层面的优化

理念层面的优化核心是推动企业从“被动满足标准”向“主动追求卓越可靠性”转变，树立覆盖设备全生命周期的可靠性管理理念。这种理念需贯穿高压电器设备从设计立项、原材料采购，到制造装配、出厂检验，再到现场安装、运行维护，直至报废回收的全流程，将可靠性视为与安全性、经济性同等重要的核心质量属性，而非仅在出厂检验阶段达标即可的附加要求。具体实践中，企业需将可靠性目标纳入战略规划，明确不同阶段的可靠性指标（如设计阶段的可靠性预计值、制造阶段的缺陷率控制值、运维阶段的平均无故障工作时间），并通过制度设计让可靠性文化渗透至各部门：对设计部门，要求在方案评审中加入可靠性论证环节；对制造部门，将关键工序的可靠性控制要求纳入操作规范；对运维部门，明确故障数据的采集与反馈职责。同时，通过定期开展可靠性培训（如每年不少于40学时的专项课程）、将可靠性指标纳入绩效考核（如设计人员的方案可靠性达标率占绩效权重的20%），让“可靠性优先”成为员工开展质量活动的默认准则，从根本上改变传统质量管理中“重检验、轻预防”“重短期达标、轻长期稳定”的局限，使可靠性成为企业核心竞争力的重要组成部分。

(二) 流程层面的优化

流程层面的优化需构建贯穿设备全生命周期的可靠性工作闭环，实现各阶段可靠性工作的无缝衔接与信息互通。在设计阶段，需前置可靠性工作，通过故障模式与影响分析（FMEA）识别高压电器设备（如高压断路

器、隔离开关)的潜在故障点(如触头过热、绝缘件老化),并针对性制定设计改进措施(如优化触头材质、增加绝缘层厚度);同时开展可靠性预计,基于相似产品历史数据与行业标准,确定设备的理论平均无故障工作时间(MTBF),为后续质量管控设定基准。制造阶段需建立“可靠性控制-数据采集-异常反馈”机制,在关键工序(如焊接、绝缘装配)设置可靠性监控点,采用统计过程控制(SPC)实时监测工艺参数波动,一旦出现偏离可靠性要求的趋势(如焊接电流波动超出 $\pm 5\%$),立即触发异常处理流程;同时记录每台设备的制造数据(如原材料批次、工序参数、检验结果),形成唯一的可靠性档案。运维阶段需强化数据反馈,通过现场传感器采集设备运行数据(如温升、振动、绝缘电阻),定期汇总故障发生时间、故障部位、故障原因等信息,上传至企业级可靠性数据库;数据库需定期向设计、制造部门推送数据分析报告(如某类绝缘件的故障频次占比),设计部门据此优化下一轮产品设计,制造部门调整工艺参数,形成“设计优化-制造改进-运维验证-数据反馈-再优化”的良性循环,持续提升产品可靠性水平。

(三) 技术层面的优化

技术层面的优化需通过引入先进可靠性技术与数字化、智能化手段融合,提升可靠性工作的效率与精准度。在可靠性分析与试验技术方面,企业可引入加速寿命试验(ALT)与高加速应力筛选(HASS)技术:ALT通过在实验室模拟高于实际使用的应力环境(如高温、高电压),缩短高压电器设备的寿命试验周期(如将传统自然寿命试验的2000小时缩短至500小时),快速评估产品长期可靠性;HASS则通过施加极限应力(如温度循环、机械冲击),提前筛选出制造过程中隐藏的潜在缺陷(如虚焊、绝缘层微小裂纹),避免缺陷在现场运行中演变为故障。同时,推动可靠性工程与数字化技术融合,构建基于大数据的设备状态监测与故障预测系统:在高压电器设备上安装智能传感器,实时采集运行中的关键参数(如高压开关柜的柜内温度、断路器分合闸线圈电流),数据传输至云端平台后,通过机器学习算法分析参数变化趋势,当出现异常波动(如温度骤升 $10^{\circ}\text{C}/\text{小时}$)时自动发出预警,实现从“事后维修”向“预测性维护”转变;此外,可借助数字孪生技术构建设备虚拟模型,模拟不同工况(如电网电压波动、环境湿度变化)下的可靠性表现,提前优化设计方案或运维策略,减少实体试验的成本与周期。

西安西电集团在2021年针对110kV高压隔离开

关的质量管理中,应用了上述优化路径:理念上确立“ $\text{MTBF} \geq 10000$ 小时”的全生命周期可靠性目标;流程上构建“设计FMEA-制造HASS筛选-运维数据反馈”闭环;技术上引入ALT与大数据状态监测。公开数据显示,该型号隔离开关的平均无故障工作时间(MTBF)从2020年的8000小时提升至2021年的12000小时,现场故障率从1.2%降至0.5%,不仅降低了客户的运维成本,也使该产品在2021年的市场占有率达到提升了8个百分点,直接印证了可靠性工程优化路径对提升产品质量与企业竞争力的实际价值^[5]。

结语

高压电器设备的质量管理与可靠性工程的深度融合,不仅体现了现代工业对高质量、高可靠性的追求,也为企业发展提供了从传统制造向智能制造转型的重要路径。通过在设计研发、生产制造和运行维护各阶段的系统性应用,可靠性工程有效提升了设备的固有可靠性与运行稳定性,同时降低了全生命周期成本。特别是在当前电力系统对设备安全性与经济性要求日益提高的背景下,优化可靠性工程的应用路径已成为企业保持竞争优势的关键举措。未来,随着数字化技术与智能化手段的进一步发展,高压电器设备的质量管理将更加精准高效,为电力系统的安全稳定运行提供更强有力的保障。这一趋势也表明,只有持续创新并深化可靠性理念,才能在激烈的市场竞争中实现可持续发展。

参考文献

- [1] 李治帽.关于高海拔地区超高压密闭式组合电器(GIS设备)安装关键节点控制的思考[C]//青海省电机工程学会第八届中青年科技学术论坛.青海省电机工程学会, 2020.
- [2] 武星, 王瑜, 殷晓刚, 等.电力设备状态评价系统的开发与应用[J].高压电器, 2020, 56 (6): 6.DOI: CNKI: SUN: GYDQ.0.2020-06-003.
- [3] 金理剑.高压电气设备绝缘性能检测及注意事项[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2021 (1): 122-123.
- [4] 武星, 王瑜, 殷晓刚, 等.电力设备状态评价系统的开发与应用[J].高压电器, 2020, 56 (6): 7-12.
- [5] 田阳, 刘颖, 王宁华, 等.低环温下特高压GIS设备 SF_6 气体状态管理系统研究[J].高压电器, 2019.DOI: CNKI: SUN: GYDQ.0.2019-06-011.