

地铁通信专业蓄电池全生命周期管理研究

贾寒超 陈韶杰 李明

郑州轨道交通运营有限公司 河南 郑州 450000

摘要：地铁通信系统是保障列车安全运行、乘客信息服务及运营调度的神经网络，而蓄电池作为后备电源的核心，可靠性直接关系到地铁运营的安全与稳定。本文针对地铁通信蓄电池管理现状，系统性地提出了全生命周期管理的理念与框架，深入剖析从规划选型、采购验收到安装调试、运行维护、状态评估，直至退役回收的完整闭环流程。通过构建数字化管理平台、引入智能预测性维护、优化成本模型及强化供应链责任，实现从“故障后维修”到“状态预管理”的根本转变，最终达到提升系统安全性、降低全周期成本、践行绿色环保目标，为地铁运营企业的精细化、智慧化管理提供一套切实可行的系统性解决方案。

关键词：地铁通信；蓄电池；全生命周期管理

引言

地铁作为城市公共交通的骨干，其安全、准点、高效的运营至关重要。地铁通信系统涵盖传输、无线、公务电话、专用电话、时钟、广播、乘客信息（PIS）、视频监控（CCTV）等多个子系统，承担着行车指挥、设备监控、公众信息服务、应急通信等关键任务，一旦通信中断，将可能导致列车运行秩序混乱、乘客恐慌，甚至引发重大安全事故。因此，通信系统对供电的可靠性要求极高，必须实现24小时不间断运行。

1 背景与战略意义

1.1 蓄电池在地铁通信系统中的作用

蓄电池在地铁通信系统中既是保障正常运行的“稳定器”，也是应对突发状况的“守护者”，其可靠性和性能直接决定了地铁通信系统的整体质量和安全性。蓄电池作用具体如下所示：

应急供电保障，当地铁通信系统市电供应中断（如停电、电源故障等），蓄电池作为后备电源立即启动，为通信设备提供持续的电力支持，确保通信链路不中断。

电压稳定与调节，地铁通信设备对电源电压的稳定性要求极高。蓄电池可在电源电压波动时起到缓冲作用，通过自身的充放电特性，维持输出电压的稳定，保护设备免受电压波动和瞬间停电的影响。

支持关键设备启动，在地铁系统启动或重启过程中，蓄电池为通信系统的控制设备、传输设备等提供初始启动电源，确保这些设备能够正常开机并进入工作状态^[1]。

1.2 传统蓄电池管理模式的挑战与痛点

长期以来，许多地铁运营单位对蓄电池的管理存在以下问题：

重采购、轻维护：关注初次采购成本，对后续数十

年的维护、更换成本缺乏规划。

被动式维修：通常是在电池已出现明显故障或无法放电时才进行更换，缺乏预警机制，安全风险高。

维护手段落后：依赖人工定期巡检、测量电压等传统方法，难以发现电池内部的早期劣化。

数据管理缺失：运行数据、维护记录分散、不完整，无法进行有效的寿命预测和决策支持。

退役处置随意：报废电池的环保处理不规范，存在环境污染和法律风险。

以上问题会导致蓄电池的实际使用寿命远低于设计寿命，故障率高，总体拥有成本（TCO）居高不下，且潜藏着巨大的运行安全隐患。

1.3 实施全生命周期管理的必要性与战略价值

引入全生命周期管理（Life Cycle Management）理念，是将蓄电池视为一个从“摇篮”到“坟墓”的完整资产进行管理。其战略价值在于：

提升安全性与可靠性：通过主动、预防性的管理，大幅降低因蓄电池失效导致通信中断的风险。

优化总体拥有成本（TCO）：从整个生命周期视角平衡初投与运维成本，实现综合成本最低。

实现精益化资产管理：精确掌握每一组电池的状态，实现“该换才换”，避免过度维修或维修不足。

履行环保责任：确保废旧电池得到合规、环保的处理，符合国家绿色发展的政策要求。

支撑智能化运维转型：为构建数字孪生、智能运维平台积累核心数据资产。

2 蓄电池全生命周期管理的核心理念与体系框架

2.1 全生命周期管理的定义与内涵

蓄电池全生命周期管理，是指从蓄电池规划、选

型、采购、安装、调试、运行、维护，直至报废的整个过程，进行的一系列技术、经济和管理活动的总称。其核心内涵是系统性、全过程、精益化，追求资产在生命周期内综合效能（安全、可靠、成本）的最优化。

2.2 管理体系的四大核心目标

安全：确保蓄电池在任何工况下均不对设备、人员及环境构成威胁，杜绝漏液、起火、爆炸等事故。

可靠：保证蓄电池在需要时能按设计容量和时长可靠放电，满足后备时间要求。

经济：通过科学管理，延长电池健康寿命，降低总体拥有成本（TCO），实现资产价值最大化。

环保：严格遵守国家关于危险废弃物的管理规定，实现废旧电池的无害化处理和资源化回收。

2.3 全生命周期管理的四个主要阶段

为便于管理，我们将生命周期划分为四个连续且相互关联的阶段：

阶段一：规划与采购：确定需求、技术选型、供应商选择、合同签订。

阶段二：安装与验收：环境准备、规范安装、初始化、性能验收、数据建档。

阶段三：运行与维护：日常监控、定期维护、状态评估、故障处理、寿命预测。

阶段四：退役与回收：报废判定、安全拆卸、环保回收、溯源归档。

3 第一阶段—规划与采购

此阶段是决定蓄电池“基因”的关键，决定了其未来数十年的性能基线。

3.1 需求分析与技术选型

需根据通信设备的负载功率、后备时间要求、机房物理空间、承重、环境条件等，精确计算所需电池的容量、电压和型号，另外需综合考虑蓄电池性能指标、安全性、经济成本，优先选择更为成熟稳定的蓄电池。

3.2 供应商评估

不仅要看蓄电池成本价格，更要考察供应商的资质、行业声誉、技术水平、质量保证体系、过往业绩（特别是在地铁行业的应用案例）以及售后服务与技术支持能力、物资交付能力。

3.3 合同签订

合同技术内容应明确电池的设计寿命、性能参数、使用环境条件、连接部件要求、绝缘阻燃托盘和垫板要求、质保期（通常为3-5年，甚至更长）、质保内容（如承诺质保期内容量不低于80%），性能参数主要包含结构要求、耐高电流能力、防爆性能、材料阻燃能力、

气密性等。合同商务内容应明确付款方式、交货期、培训、应急响应方式等^[2]。

3.4 LCC在采购中的应用

建立LCC模型，量化计算初始采购成本、安装成本、运维成本（电费、维护人工、测试耗材）、故障损失成本、退役处置成本。引导决策者从“最低价中标”转向“全生命周期成本最优中标”。

4 第二阶段—安装与验收

糟糕的安装会“夭折”优质电池的寿命。

4.1 安装环境

检查机房温度（理想范围20-25℃）、湿度、清洁度、通风条件。温度每升高10℃，电池寿命约减半。确保电池架/柜稳固、接地良好。

4.2 规范化安装

严格执行安装规程，包含新电池搬运、旧电池拆卸、新电池安装，不规范的安装会导致环流和局部过热等。

4.3 初充电与容量测试

安装后必须按照厂家要求进行初充电（均充/浮充），检查UPS和高开的蓄电池浮充电压参数，如不满足新电池浮充电压要求，进行调整。新蓄电池更换完成后，UPS、高开要切换到蓄电池供电，设备正常工作，闭合开关后转为市电供电，再次确认电池、UPS、高开功能完好。

最重要的验收环节是100%容量测试，即用假负载对电池组进行全程放电，验证其实际容量是否达到额定容量。这是后续所有性能评估的基准，必须严格执行并记录。

4.4 文档与数据建档

收集所有技术文档（说明书、合格证、测试报告）、安装记录、初始内阻和电压值，在管理平台中为每一只/每组电池建立“电子身份证”，开启其数字化生命周期档案。

5 第三阶段—运行与维护（核心环节）

这是生命周期中最长、最关键的阶段，目标是“延年益寿，防患未然”。

5.1 日常巡检与例行维护

地铁蓄电池检修周期推荐为月检和年检，主要进行外观检查、参数检查及核对性放电测试。针对蓄电池运行时间5年以上线路，增加蓄电池周巡要求，周巡内容为设备外观检查及参数检查。

5.2 状态监测与在线预警

推广部署蓄电池在线监控系统。该系统能实时监测每只电池的电压、内阻、温度，并可集成充放电电流监测。通过设置阈值，系统能在参数异常时（如单体电压偏差过大、内阻急剧增长）自动告警，实现从“被动检

修”到“主动预警”的转变。推广单独蓄电池充放电测试,延长蓄电池使用寿命。

5.3 定期核对性放电与容量测试

核对性放电:每年进行一次,放电至额定容量的30%-40%,用于检验电池的带载能力,发现潜在问题,对电池损伤较小。

容量测试:每3-5年或在性能有怀疑时进行,放电至终止电压(12V电池至10.8V、2V电池为1.8V),精确测量实际容量。这是评估健康度(SOH)最直接的方法。

5.4 SOH评估与剩余寿命预测

健康度(SOH)=(当前实测容量/额定容量)*100%。通常认为SOH低于80%时,电池已进入寿命末期,需重点监控并规划更换。

剩余寿命预测:结合历史容量测试数据、浮充运行时间、累计放电次数、环境温度历史、内阻变化趋势等,利用统计模型或机器学习算法,预测电池的剩余使用寿命,为备件采购和预算编制提供科学依据。

5.5 以可靠性为中心的维护(RCM)

根据电池的重要性、故障后果和状态监测结果,制定差异化的维护策略。对核心站点、关键系统的电池实施更频繁、更严格的监测和测试;对非关键站点,可适当延长测试周期,优化资源配置。

5.6 故障分析与应急预案

建立故障分析流程,对每一例失效电池进行根因分析,是质量问题、安装问题还是维护不当?根据分析结果持续改进管理体系。同时,制定详细的蓄电池故障应急预案,确保在电池组故障时能快速隔离、投切,保障通信供电不中断。

5.7 专业技能培训

维护人员必须理解蓄电池的电化学原理、特性、维护要点和安全规程。定期组织培训,提升团队识别隐患、处理故障的能力^[3]。

6 第四阶段—退役与回收

此阶段关乎环保合规与资产的“善终”。

6.1 退役标准

明确且量化的退役标准。

6.1.1 单体蓄电池更换条件需满足以下任一条件:

蓄电池存在明显鼓包,单体更换。

蓄电池外壳出现破损、裂纹、渗漏液等,单体更换。

蓄电池充电期间,环境温度应为5℃—35℃,蓄电池表面温度超过45℃,单体更换。

单体蓄电池浮充状态下,2V蓄电池单体电压不在2.1V—2.4V范围、12V蓄电池单体电压不在13V—14.5V范围时,单体更换。

单体蓄电池内阻达到首次测量内阻值3倍,单体更换(蓄电池内阻基准值是指蓄电池现场安装后首次检修测量的内阻值,既有线可参考最早蓄电池内阻测量值作为内阻基准值)。

蓄电池放电过程中,2V蓄电池单体出现端电压下降至1.8V或12V蓄电池单体出现端电压下降至10.8V,应立即停止放电,单体更换。

6.1.2 整组蓄电池更换条件需满足以下任一条件:

蓄电池放电测试时,负载工作达不到设计后备供电时间时,整组更换。

蓄电池单体累积故障超过整组30%以上时,整组更换。

6.2 退役流程

制定标准作业程序,包括断电、拆卸、绝缘处理、搬运、暂存。确保操作人员安全,防止短路和电解液泄漏。

6.3 环保回收

严格遵守《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》和《危险废物管理名录》规定,委托具有危险废物经营许可证的正规回收企业进行处理。签订回收合同,并索要并保存《危险废物转移联单》,确保可追溯。

6.4 溯源与台账管理

在管理平台中更新该电池的状态为“已退役”,记录退役原因、时间、回收商信息、转移联单号等,形成完整的生命周期闭环。

结束语

地铁通信蓄电池的全生命周期管理是一项复杂的系统工程,它不仅是技术问题,更是管理理念的革新。实施全生命周期管理,能够从根本上提升地铁通信电源系统的安全保障能力,实现从粗放式管理向精细化、智能化管理的转变,最终达成安全、可靠、经济、环保的综合目标。

参考文献

- [1]李涛,王圆妹,李世豪,等.基于健康状态的蓄电池检修策略优化[J].价值工程,2024,43(12):12-14.
- [2]汤连军.通信用阀控密封铅酸蓄电池的使用与维护探究[J].数字通信世界,2023,(08):28-30+33.
- [3]逯海燕.阀控式密封铅酸蓄电池远程诊断与维护系统设计[J].低碳世界,2024,14(10):190-192.DOI:10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2024.10.051.