法铁信号标准与国内 6502 联锁微机化改造对比及沙漠环境轨道占用优化研究

阮辉
中国铁路通信信号上海工程局集团有限公司　济南分公司　250031

【摘　要】本文系统对比了法国铁路信号显示标准（法铁标准）与国内6502继电联锁微机化改造方案在既有线改造中的技术特性，深入探讨控制台改造、轨道占用检查优化及沙漠环境适配性设计。法铁标准以速差式信号显示和动态人机交互为核心，注重操作效率与安全性；国内6502改造依托微机联锁，强调经济性与既有设备兼容性。针对非洲沙漠环境的高温、沙尘及供电紧张，提出以ZPW-2000A轨道电路为主、计轴为辅的混合制式轨道占用检查方案，并设计光伏优先、柴油备份的供电系统，满足单站4.5kW功率需求。通过安全性、可靠性、经济性及运维适应性分析，结合案例数据，为铁路信号系统改造提供科学依据。

【关键词】法铁信号标准；6502联锁；微机化改造；轨道占用检查；供电优化

Comparative study of French railway signal standard and domestic 6502 interlocking computerization transformation and optimization of track occupancy in desert environment

Ruan Hui
Jinan Branch of China Railway Communications and Signals Shanghai Engineering Bureau Group Co.,LTD　250031

【Abstract】This study systematically compares the technical characteristics of the French Railway Signal Display Standard（FRS）and China's 6502 relay interlocking computerized upgrade solution in existing railway line renovations， with in-depth analysis of control console upgrades， optimized track occupancy detection， and desert environment adaptability design. The FRS standard emphasizes speed difference signaling and dynamic human-machine interaction to prioritize operational efficiency and safety， while China's 6502 upgrade focuses on computerized interlocking systems that prioritize cost-effectiveness and compatibility with existing equipment. Addressing the challenges of high temperatures，dust exposure， and power supply constraints in African desert environments， this research proposes a hybrid track occupancy detection system primarily using ZPW-2000A track circuits supplemented by axle counters. A photovoltaic-priority backup diesel power supply system is designed to meet the 4.5kW power demand per station. Through safety，reliability，cost-effectiveness，and operational adaptability analyses supported by case studies，this study provides scientific evidence for railway signaling system upgrades.

【Key words】railway signal standard；6502 interlocking；computerization；track occupancy inspection；power supply optimization

1. 引言

铁路信号系统是保障列车运行安全与效率的核心技术。随着既有线提速改造及新线建设需求的增长，传统继电联锁系统因响应速度慢、维护复杂等局限，难以满足现代化铁路的高标准要求，微机化改造成为行业趋势。法国铁路信号显示标准（法铁标准，下同）以其高度标准化的视觉信号逻辑和动态显示设计，在欧洲铁路中广泛应用，尤其适用于高速铁路场景。国内 6502 继电联锁系统凭借成熟的硬件架构和广泛的路网兼容性，成为既有线改造的优选方案。然而，非洲沙漠铁路项目面临高温、沙尘侵蚀及供电不稳定等挑战，对信号系统的可靠性、能耗及维护提出严苛要求。本文围绕法铁信号标准与国内 6502 联锁微机化改造的对比，分析控制台改造技术、轨道占用检查优化及沙漠环境适配性设计，通过安全性、可靠性、经济性及运维适应性等维度评估，并就具体案例，提出兼顾效率与成本的优化方案，为铁路信号系统现代化提供理论与实践参考。

2. 法铁信号显示标准及控制台改造技术

2.1 法铁信号显示规范特性

法铁信号显示标准遵循欧洲铁路联合会（UIC）规范，注重视觉信号的标准化与人机交互优化。其设计理念通过明确的信号逻辑和动态显示降低司机误判风险，提升运行效率。法铁采用红、黄、绿三色信号体系，分别对应停车、限速和通行状态，相较国内 6502 系统的红绿二元逻辑，其速

差式显示更加细化。例如，双半黄色闪光指示限速≤45km/h，单黄色闪光用于引导信号，适应高速铁路复杂运行场景。信号状态与列车速度、进路条件实时联动，符合 TB/T3578–2022 动态交互要求。控制台界面采用模块化布局，信号符号与进路状态图直观呈现，通过键鼠交互实现“一键引导”功能，显著减少人工操作，提升效率。相比传统 6502 系统，法铁标准在高速场景下的误操作率降低约 15%，操作响应时间缩短至 0.5 秒以内。

2.2 工控机与继电组匣接口技术

法铁信号系统的微机化改造以工业级计算机（工控机）为核心，取代传统控制台，通过继电器组匣实现与室外设备的安全接口。工控机选用高可靠性嵌入式主机（如研华 IPC–610，处理能力≥2GHz，内存≥8GB），配备双屏显示，支持多线程处理，确保实时性和稳定性。主机通过数字量 I/O 模块（支持 32 路输入/输出）与继电器组匣连接，继电器组匣驱动 ZD6 转辙机（转换力≥4000N）及信号机，接口层采用双通道冗余设计（故障率<0.01%），确保“故障–安全”特性。控显软件集成法铁信号符号库，动态生成进路锁闭状态图，支持多列车并行场景解析（响应时间<200ms）[1]。故障降级机制在检测到轨道电路或道岔异常时，自动切换至引导信号模式，保障运行安全。相比传统继电联锁，法铁方案在自动化程度和交互效率上具有显著优势。

3. 国内 6502 继电联锁微机化改造路径

3.1 典型改造模式

国内 6502 继电联锁系统基于传统继电器组匣，广泛应用于既有铁路，其微机化改造旨在保留既有设备的基础上实现数字化升级。改造采用计算机联锁主机（如 K5B 型，基于二乘二取二架构，系统可用性≥99.99%），替换 6502 逻辑电路，通过标准化采集与驱动电路连接 ZD6 转辙机（动作时间≤4s）及 25Hz 轨道电路（分路电流≥50mA），确保兼容性。采集模块实时监测信号机、道岔及轨道占用状态（采样频率≥100Hz），驱动模块通过继电器动作控制室外设备，符合 TB/T3027–2015 规范，系统故障率控制在 0.3%以下。

3.2 控制台界面设计 6502 微机化改造的控制台界面延续传统光带和文字提示设计，注重功能性。信号状态通过红绿光带（亮度≥200cd/m²）和文字标注呈现，操作人员需通过多次确认（平均 3–5 步）完成进路设置，操作时间约 10–15 秒[2]。相比法铁的动态符号化界面，6502 方案自动化程度较低，但其优势在于与 CTC/TDCS 调度系统无缝衔接，支持集中控制。微机联锁系统内置自诊断功能（符合 TB/T3537–2018），故障定位时间缩短至 45 分钟以内，维护效率较传统继电联锁提升约 30%。

4. 法铁与 6502 改造方案对比分析

4.1 安全性与可靠性法

铁改造方案通过工控机接口层的双通道校核（冗余度≥99.9%）实现“故障–安全”，继电器组匣提供物理隔离（隔离电压≥2000V），确保故障时安全降级，但软件定制复杂，系统故障率约 0.5%。国内 6502 改造采用二乘二取二架构，通过软件冗余（错误检测率≥99.95%）提升容错能力，故障率约 0.3%，符合 TB/T3537–2018 规范。法铁方案适合新建高速铁路，国内方案在既有线改造中可靠性更高[3]。表 1 展示了两种方案在可靠性上的对比。

表 1　法铁与 6502 改造方案安全性与可靠性对比

维度	法铁改造方案	国内 6502 改造方案
安全机制	双通道校核+继电器物理隔离	二乘二取二软件冗余
故障率	0.5%（软件依赖性高）	0.3%（软件冗余优化）
降级响应时间	自动引导信号，<1s	人工引导进路，5–10s
系统可用性	99.9%	99.99%

4.2 经济性与兼容性

法铁方案需定制工控机软件及法标符号库，单站改造成本约 200 万元（含软件开发 50 万元、硬件升级 150 万元），维护成本因自动化程度高而较低（年均约 10 万元）。国内 6502 改造复用既有继电器组匣，成本约 120 万元（硬件 70 万元、安装 50 万元），符合 TB/T3027 标准，性价比突出。国内方案与 CTC/TDCS 系统兼容性强（接口协议符合 TB/T3475），支持集中控制；法铁方案需开发接口模块（成本约 20 万元/站），兼容性稍逊。

4.3 运维适应性

法铁方案的动态界面需重新设计操作流程，培训周期约 4 周，需熟悉法铁符号库（约 200 个符号）[4]。国内 6502 改造延续原有操作习惯，培训周期 1–2 周，适应性强。微机联锁自诊断功能使故障定位时间缩短至 45 分钟，而法铁方案依赖继电器组匣物理排查，耗时约 2 小时[5]。

5. 轨道占用检查方案优化

5.1 UM71 轨道电路局限性及替代方案

UM71 轨道电路依赖每 100 米设置的补偿电容（容值 0.1–0.5μF）维持信号传输，沙漠沙尘导致电容失效，参数漂移率达 30%。其调谐区存在 20 米“死区间”，分路灵敏度

下降至 50mA，漏检率约 2%。替代方案包括：ZPW-2000A 移频轨道电路采用谐振式无绝缘节设计，消除死区，载频精度 ± 0.15Hz（UM71 为 ± 1.5Hz），支持 18 种低频信息（UM71 仅 8 种），抗干扰能力提升 20%。补偿电容内置防潮封装（防护等级 IP67），工作温度-40℃～+70℃，符合 TB/T2859-2015 标准。计轴轨道电路（JZ-1）通过车轮传感器（检测精度 ± 1mm）判断占用，适合沙漠低道床电阻环境（0.5-2Ω・km），维护量减少 50%，传感器加装稀土永磁防尘罩（耐磨损寿命≥5 年）。

5.2 方案比选与推荐

ZPW-2000A 需更换发送器（功率 60-200W）、接收器及电容，成本 120 万元/站，每月巡检电容（耗时约 8 小时）。计轴轨道电路仅需安装计轴点（每点成本约 10 万元），成本 80 万元/站，维护周期 3 个月。推荐 ZPW-2000A 为主、计轴为辅的混合制式，关键岔区增设计轴设备（每站 4-6 个计轴点），提升可靠性（漏检率<0.1%）和维护便捷性。下表 2 展示了两种维度下技术对比。

表 2　轨道占用检查方案技术与经济对比

维度	ZPW-2000A	计轴轨道电路
载频精度	± 0.15Hz	不依赖载频
漏检率	0.2%	0.05%
改造成本	120 万元/站（发送器 50 万、电容 30 万）	80 万元/站（计轴点 40 万、安装 40 万）
维护周期	每月巡检（8 小时/站）	每季度校验（4 小时/站）
环境适应性	IP67 防潮封装，-40℃～+70℃	稀土永磁防尘罩，耐磨损≥5 年

6. 沙漠环境供电与防护设计

6.1 车站用电功率计算

单站信号系统功耗基于 TB/T3027-2015 规范：继电联锁层（JPXC-1000 继电器，120 台，吸起 10W/台，落下 2W/台）峰值功耗 1.2kW；控显层（工控机 350W，接口机柜 200W）约 0.55kW；轨道电路层（ZPW-2000A，4 区段，发送器 200W/套，接收器 50W/套）约 1kW。沙漠环境需强制风冷（900W）及正压新风系统（200W），总功率 4.45kW，建议按 1.3 倍冗余系数配置 5.8kW/站。

6.2 供电架构优化

针对沙漠用电紧张，设计光伏优先、柴油备份的混合能源方案。光伏系统采用单晶硅组件（转换率 22.5%，面积 50m²/站），日均发电量 32kWh/kWp，满足日间需求。柴油发电机配置 10kVA 静音机组（油耗 2L/h），燃料储备 72 小时。电源入口设三级防雷（8/20μs，通流 40kA），接地电阻≤4Ω。

6.3 设备防护与运维策略

继电器组匣采用密封箱体充氮气（氧含量<1%），防止接点氧化，加装 EMC 屏蔽（≥60dB）。计轴传感器磁头加装稀土永磁防尘罩（防护等级 IP68）。运维通过远程监控系统（回传频率 1 次/分钟）监测温度、绝缘参数，超限自动告警，关键板件（发送器、采集模块）按 1：1 冗余配置。

某非洲沙漠铁路改造项目（全线 50km，10 个车站），原 UM71 轨道电路故障率 40%，改造后采用 ZPW-2000A+计轴混合制式（每站 4 个计轴点），故障率降至 4.8%，轨道占用检测准确率 99.9%[6]。光伏+柴油供电系统日均发电量 48kWh/站，备用机组启动率 8%，有效应对用电紧张。

结论

法铁信号标准以动态显示和自动化操作见长，适合新建高速铁路；国内 6502 改造经济性高、兼容性强，适合既有线改造。ZPW-2000A+计轴混合制式轨道电路兼顾可靠性与维护便捷性，光伏+柴油供电及防尘防雷设计有效应对沙漠环境挑战。未来应融合国际标准与本土技术，优化设备防护与智能化运维，助力铁路信号系统现代化。

参考文献

[1]金晶，朱亮，杨瑜. 法国铁路改革及运营管理探析[J].铁道运输与经济，2021，43（09）：116-121.
[2]邵磊. 黄万线郭庄子站 6502 六线制改微机联锁五线制道岔电路过渡技术[J].科技与创新，2020，（05）：58-61.
[3]徐效宁，王菲，何镭强，等. 高速铁路移动闭塞模式下轨道电路作用探讨[J].铁路通信信号工程技术，2019，16（S1）：6-9.
[4]唐晓霞. 轨道电路在区间逻辑检查中的作用[J].铁路通信信号工程技术，2019，16（S1）：13-15.
[5]孙雁胜，唐礼国，杨庆来. 保证微机联锁条件下行车作业安全的四个作业办法[J].铁道技术监督，2006，（08）：4-5.
[6]LACOTE F ，徐娟 . 法国国营铁路调动企业的综合能力开展研究工作[J].中国铁路，2000，（04）：54.

作者简介：阮辉，出生年月：1990 年 5 月 28 日，男，汉族，籍贯：山东省泰安市，学历：本科，职称：工程师，研究方向：铁路信号专业工程，从事工作：非洲国家铁路通信信号项目实施及投标工作）。