

基于PLC与上位机协同控制的CIR自动化测试平台研制与应用研究

张雪松

通号通信信息集团上海有限公司 上海 200071

摘要：本文基于“研制CIR自动化测试工装”项目的全过程实践，详细阐述了CIR（机车综合无线通信设备）自动化测试平台的设计、实现与验证过程。针对传统人工测试效率低、易出错、产能适配性差的痛点，提出并实现“PLC+上位机软件”协同控制的CIR自动化测试平台架构。通过价值工程法完成多模块方案选型，详述PLC测速、算法验证及集成调试等关键环节，为轨道交通车载通信设备自动化测试提供可复制的技术路径与工程范本。

关键词：CIR；自动化测试；PLC控制；上位机软件；价值工程法

引言：机车综合无线通信设备（CIR）是铁路车载通信的核心装备，其可靠性直接关乎行车安全。针对机车综合无线通信设备(CIR)传统人工测试效率低、一致性差、难以满足产能需求的问题，本项目提出并实现了一种基于“可编程逻辑控制器(PLC)+上位机软件”协同控制的自动化测试平台。该平台的研制与应用旨在大幅缩短测试时间，保障产品质量，并为同类设备的自动化测试提供了可靠的技术解决方案。

1 研究背景与课题提出

1.1 CIR设备及其测试挑战

CIR（Cab Integrated Radio，机车综合无线通信设备）是基于GSM-R数字移动通信、GPS全球定位和450M模拟无线电台技术的铁路综合车载通信核心设备，其可靠性直接关系到行车安全与调度效率。

产量激增带来的压力：根据国家铁路发展规划，CIR需求量随铁路里程增长而急剧上升。根据数据显示，2023年最高月测试量已达435台，日均20台。传统依赖人工操作的功能测试和性能测试耗时长已成为产能瓶颈。

人工测试模式的固有缺陷：人工测试存在步骤繁琐、测试结果受人员状态影响大、一致性难以保证等问题，无法满足未来三年内预计日测试41台的目标。

1.2 问题定义与创新需求

核心矛盾：日益增长的生产测试需求与低效、不稳定的人工测试模式之间的矛盾。

需求量化分析：通过“人时产能(UPH)”公式分析，单纯增加人力或延长工时虽可解一时之急，但将导致人力成本飙升，非可持续之道。

因此，研制一套能够替代人工、实现自动化测试的专用工装成为必然选择。该工装可以提升测试效率、保

证产品质量、应对未来产能挑战。项目组借鉴了公司“直放站自动测试工装”中嵌入式软件控制的核心技术，为本次创新提供了技术起点^[1]。

2 研究目标、可行性论证与总体方案设计

2.1 明确研究目标

核心目标：成功研制一套CIR自动化测试工装。

量化指标（KPI）：将CIR单台平均测试总时间从114.5分钟降低至46分钟以内，以满足未来产能需求。

2.2 目标可行性论证与技术预研

模拟验证：项目组未直接进行全功能开发，而是先进行了科学的可行性验证。选取了25%的功能测试项和20%的性能测试项，分别在预设的“嵌入式板卡控制”和“上位机软件控制”两种模式下进行模拟测试。

数据支撑：测试数据显示，两种自动化模式均能将预估总用时降至37分钟以内，远低于46分钟的目标值，从技术上证明了目标的可行性。

2.3 基于价值工程法的总体方案选型

项目组运用价值工程法（ $V = F/C$ ，价值 = 功能/成本），对两种初步方案进行了系统化比选，构建了科学的决策框架：

方案一：嵌入式板卡控制模式。以单片机为核心，通过驱动电路控制继电器。

方案二：上位机软件控制模式。以上位机（工控机）为核心，通过可编程逻辑控制器(PLC)控制继电器。

比选维度：

功能评估：以“日最大检测量”作为核心功能指标。方案二（51台）略优于方案一（48台）。

成本评估：综合考虑硬件、软件及试验成本。方案二总成本（4400元）低于方案一（4920元）。

价值决策：计算得出方案二的价值系数（1.10）高于方案一（0.91）。遵循“价值系数高者为优”的原则，最终选定“上位机软件控制模式的测试工装”作为总体方案。这一决策过程体现了从技术可行性到工程经济性的综合考量。

3 系统详细设计与关键技术实现路径

依据总体方案，进行逐层分解与精细化设计，其技术路径清晰展现了从顶层架构到底层实施的完整逻辑。

3.1 系统架构设计

总体框架：系统采用“上位机(工控机) — 可编程PLC控制器 — 射频/信号继电器矩阵 — 被测CIR设备及测试仪表”的分层控制架构。上位机作为“大脑”发送指令并处理数据；PLC作为“神经中枢”执行精确的逻辑控制和I/O操作；继电器矩阵作为“手脚”完成物理信号的切换与连接^[2]。

信号流与数据流：流程为：上位机软件根据测试用例生成指令->通过通讯接口下达至PLC->PLC驱动对应继电器动作，切换音频、控制、射频等通路->仪表按指令激励或测量CIR->测量数据回传至上位机软件->软件进行判断、记录并生成报告。

3.2 核心模块选型与详细设计路径

通过严谨的模块化选型过程，为每个子系统确立了最优技术路线。

3.2.1 电源模块设计与验证路径

选型决策：在明纬（LRS-350-24）与金升阳（LM350-10B24）两款电源中，从额定功率、漏电流、驱动电压三个维度进行功能评分，结合成本计算价值系数。明纬电源以1.37的价值系数胜出。

验证路径：

1. 耐压与安全性验证：使用泄露电流测试仪进行抽样测试，确认漏电流（平均约0.18mA）远低于0.75mA的安全标准。

2. 稳定性与效率验证：在90V-264V宽范围输入电压下，测试输出电压、电流，计算转换效率。结果表明其转换率在89.5%-92.5%之间，符合“90±2.5%”的设计要求，证明其在电网波动下输出稳定。

3.2.2 控制系统设计与验证路径

选型决策：在继电器控制器与可编程PLC控制器（FXON-24MT）间，从控制方式（灵活性）、控制速度、延时精度三个维度比较。PLC在控制灵活性和速度上占优，价值系数（1.04）高于继电器方案（0.93）。

关键性能验证路径：

响应速度测试：采用“M测速法”。上位机在固定周期（ $T = 20\text{ms}$ ）内发送大量脉冲（ $K = 1500$ 次），通过统

计PLC输出端口的实际响应次数（ k ），计算单次控制速度 $v = T/k$ 。经10次测试，速度在13.6-16.2 μs 之间，远优于20 μs 的设计指标，确保了测试序列执行的时效性。

3.2.3 软件系统设计与验证路径

编程语言选型：基于公司人才储备现状，对C、VB、Python三种语言的掌握人数和熟练度进行功能值量化评估。C语言以最高功能值被选用，保证了开发效率与后期维护的基础。

软件可靠性验证路径：这是确保自动化测试准确性的核心。

1. 基于混淆矩阵的算法评估：编译测试程序后，发送10000条测试命令，构建混淆矩阵。计算得出：准确率、精确率、召回率均大于99.86%，三项关键指标均远超99%的设计目标，证明软件逻辑判断极为精准。

2. 基于ROC曲线的综合性能评估：绘制ROC曲线并计算AUC（曲线下面积）值为0.9978（ > 0.95 ），表明软件模型具有极佳的区分能力，综合性能优异。

3.2.4 机械结构与电气互联设计路径

选型决策：在层叠式机柜（图腾600）与操作台（宏创666）之间，从电磁屏蔽效能、通风散热性和操作便捷度三个维度评估。层叠式机柜价值系数更高，其结构更利于模块化布局、线缆管理和电磁兼容。

人机工程验证：工装制成后，实测测试员连接CIR设备至工装的时间，平均仅需1.44分钟，远低于3分钟的设计目标，证明了结构设计的合理性与易用性。

3.3 硬件集成与原理图解析

结合《CIR测试平台电路原理图》，可将硬件系统具体化为以下子系统，其设计思路在原理图中得到完整呈现：

电源子系统：220V市电输入，经电源模块（U18）转换为系统所需的110VDC、24VDC、12VDC等，为PLC、继电器、工控机等供电。

控制与信号切换子系统：这是工装的“执行层”。PLC接收上位机指令，驱动一系列继电器（K1-K16）。将继电器精准控制：

音频通路：送受话器、喇叭、450M电台/LBJ电台的MIC/AF信号的接入与切换。

控制信号：摘机/挂机、发射/待发等逻辑信号的通断。

测量信号：将万用表HI/LO线切换至不同测试点（监测、录音等），实现电压、电平等参数的自动采集。

射频信号：通过射频开关切换天线通路，连接至综测仪。

通信接口：通过422通信控制继电器（K13）实现与CIR主机MMI的串口通信。

仪表与被测设备接口：设计有标准化的航空插头和接口板，用于快速连接CIR的送受话器、喇叭、监测、录音、LBJ等外围单元。

直观化操作指引：原理图中包含“CIR整机性能/功能测试直观接线图”，用图形化方式明确了测试时的物理连接关系，极大降低了操作复杂度^[3]。

4 系统实现、测试与综合效益分析

4.1 对策实施与系统集成

依据“5W1H”原则制定的对策表被严格执行，确保了项目按期保质推进。所有模块完成独立验证后，进行系统集成：

硬件组装与布线：按照电气原理图和机械图纸，完成所有部件安装与线缆连接。

软硬件联调：导入测试用例，验证上位机软件对PLC的指令控制、继电器动作、仪表触发、数据回传的整个闭环流程。

4.2 功能与性能测试验证

测试用例验证：选取代表性功能与性能测试用例，进行10轮重复测试。

结果：功能测试与性能测试的成功率均为100%。功能测试时间稳定在约13.4分钟，性能测试时间稳定在约18.1分钟。总测试时间（含准备时间）稳定在33分钟左右，重复性与一致性极佳。

4.3 目标达成度与综合效益评估

核心目标达成：对30台CIR进行批量实测，平均测试时间为33分钟，成功达成“小于46分钟”的课题目标。

经济效益显著：根据计算，在活动期间（产量680台）产生的直接经济效益为21,462元。此效益将在后续生产中持续放大。

质量与社会效益突出：

提升一致性：自动化测试彻底消除了人为操作差异和误判，确保了每台CIR的测试标准统一。

保障铁路安全：更高一致性和可靠性的测试，为CIR设备在铁路线上的安全稳定运行奠定了坚实基础。

释放人力价值：将测试人员从重复性劳动中解放出来，可转向设备维护、工艺优化等更高价值工作。

形成技术资产：完成了从设计图纸、操作手册到工艺流程文件的标准化，形成了可传承、可推广的知识产权和技术规范。

5 总结、不足与未来展望

5.1 项目总结

本项目成功地走完了从需求分析、方案论证、详细设计、实现验证到标准化推广的完整创新闭环。其成功关键在于：

问题导向，目标量化：精准定位产能瓶颈，并以可测量的时间指标作为核心目标。

科学决策，路径清晰：广泛应用价值工程法、对比试验、统计分析等工具，确保每个技术选型都有数据支撑，构建了从顶层到底层的清晰技术路径。

闭环验证，注重实效：在每个子模块和整机阶段都设定了明确的验证方法与验收标准，确保最终成果可靠、可用。

5.2 存在的不足与反思

技术储备：在方案选择初期，对更底层的单片机芯片直接控制技术不够深入，未来可加强此方面预研。

创新思维：部分成员对技术创新可进一步深化，未来需加强创新方法论的培训^[4]。

5.3 未来展望与下一步打算

本次研制的自动化测试平台为后续工作奠定了坚实基础。未来可从以下方向深化：

横向扩展：将此“PLC+上位机+继电器矩阵”的自动化测试框架，推广至公司其他车载或地面通信设备的测试中。

纵向深化：引入机器视觉、更先进的传感器和AI算法，实现测试结果的智能诊断、故障预测和自适应测试优化。

结论：本文系统梳理并深化了CIR自动化测试工装的研制过程。研究表明，通过采用“上位机软件控制+可编程PLC”的总体架构，并结合价值工程法进行的精细化模块选型，能够成功构建一个高效、稳定、可靠的自动化测试平台。该平台不仅圆满解决了CIR测试产能不足的迫切问题更在提升测试质量、形成技术标准、产生经济效益方面取得了综合性成功。本论文所构建的从需求分析、目标设定、方案比选、技术实现到效益验证的完整框架，对于复杂电子设备的自动化测试系统开发，具有普遍的参考和借鉴价值。

参考文献

- [1] 李华, 王刚. 可编程逻辑控制器(PLC)原理与应用[M]. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [2] 陈晓, 赵伟. 工业测控系统中上位机与PLC通信技术研究[J]. 自动化技术与应用, 2021,40(5): 45-48.
- [3] 国家铁路局. 《铁路数字移动通信系统(GSM-R)总体技术要求》(TB/T 3324-2021). 北京: 中国铁道出版社, 2021.
- [4] James, G., Witten, D., Hastie, T., et al. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R[M]. New York: Springer, 2021.