

地铁信号系统ATS子系统冗余功能分析

冯 瑶 杨智刚 张二龙

西安市轨道交通集团有限公司运营分公司 陕西 西安 710000

摘要：地铁信号系统ATS子系统承担列车监控、调度指挥等关键职责，对实时性、容错性等可靠性要求极高。其冗余功能设计遵循硬件、软件及网络冗余原则，通过双机热备、数据同步、环网拓扑等实现关键模块冗余。采用故障检测与无缝切换策略，保障系统持续运行。可靠性分析表明，冗余设计显著提升可用性等指标，定量计算与仿真验证了其有效性。实现方案涵盖硬件架构、数据同步等优化，平衡资源占用与冗余度。

关键词：地铁信号系统；ATS子系统；冗余功能

引言：地铁作为城市公共交通的骨干，其信号系统ATS子系统的稳定运行至关重要。ATS子系统负责列车监控、调度指挥及运行图调整等核心功能，对实时性、可靠性和容错性要求极高。一旦系统出现故障，将直接影响行车安全与运营效率。因此，ATS子系统的冗余功能设计成为保障地铁安全、高效运行的关键。本文深入分析ATS子系统冗余功能的设计原则、实现方式及可靠性，为优化系统性能提供参考。

1 地铁信号系统ATS子系统基础理论

1.1 ATS子系统功能与架构

(1) 核心功能方面，列车监控是ATS子系统的核心职责，通过实时采集列车位置、速度等关键数据，在调度中心显示屏上动态呈现列车运行状态，实现对全线列车的可视化管理。调度指挥功能依托监控数据，调度员可下达行车指令，安排列车启停、会让等作业，保障行车秩序。运行图调整功能支持根据实际运营情况，如客流变化、设备故障等，灵活修改列车运行图，并快速下发至相关设备，确保运营效率。(2) 系统组成包含中心设备、车站设备和通信网络。中心设备是核心控制单元，由服务器、工作站、调度台等组成，负责数据处理、指令生成和运行图管理；车站设备包括车站分机、显示终端等，承担本地列车监控和信息交互任务；通信网络采用冗余设计的以太网，实现中心与车站、设备之间的高速数据传输，保障信息实时同步。

1.2 ATS子系统与其他系统的接口

(1) 与ATP、ATO系统紧密交互，ATS向ATP发送行车许可和限速指令，ATP将列车实际运行状态反馈至ATS，确保列车安全运行；ATS向ATO下发运行计划，ATO根据指令控制列车自动驾驶，实现精准停车、平稳调速，并将执行结果回传ATS。(2) 与联锁系统、通信系统存在数据交互，ATS接收联锁系统的道岔、信号机状

态信息，据此生成安全行车指令；同时向联锁系统发送进路控制命令。

1.3 ATS子系统的可靠性需求

(1) 实时性要求极高，需在毫秒级内处理列车位置更新、指令下发等数据，确保调度决策及时响应，避免因信息延迟引发安全隐患。容错性方面，系统需具备故障自诊断和冗余备份能力，单个设备故障时，备用设备可快速切换，保障系统持续运行，不影响行车调度。

(2) 抗灾能力要求系统能抵御自然灾害、电力中断等突发情况，配备应急供电装置和灾害恢复机制，在极端环境下仍能维持核心功能，最大限度减少运营中断时间。

2 地铁信号系统ATS子系统冗余功能设计分析

2.1 冗余设计的基本原则

(1) 硬件冗余是系统稳定运行的基础保障，核心采用双机热备与三取二两种模式。双机热备通过主备服务器实时同步数据，主服务器故障时，备机可在秒级内接管所有业务，避免功能中断；三取二模式则应用于关键控制模块，通过三台独立硬件同时处理相同数据，以“少数服从多数”原则输出结果，有效屏蔽单点硬件故障，提升系统可靠性。(2) 软件冗余聚焦数据完整性与业务连续性，关键在于数据同步与故障切换机制。系统通过实时数据库镜像技术，实现主备节点数据毫秒级同步，确保数据无丢失；同时内置智能故障切换算法，当检测到软件模块异常时，自动将业务切换至备用软件进程，且切换过程不影响外部接口服务，保障调度指令正常下发。(3) 网络冗余采用环网与双链路结合的拓扑结构，核心传输网络构建自愈环网，当某一段链路中断时，环网可自动切换传输路径，恢复时间小于50ms；车站与中心之间部署双链路备份，两条链路独立传输数据，任一链路故障时，另一条链路立即承担全部通信任务，避免因网络中断导致列车监控数据丢失^[1]。

2.2 关键模块的冗余实现

(1) 中心控制层冗余是系统冗余设计的核心, 重点实现主备服务器切换机制与数据一致性保障。主备服务器通过专用心跳线实时交互状态信息, 每秒发送3次健康检测报文, 当主服务器连续3次未响应时, 自动触发切换流程; 数据一致性通过分布式锁与事务日志技术保障, 所有操作先记录日志再执行, 备机通过回放日志同步数据, 确保主备数据完全一致。(2) 车站设备层冗余针对本地控制单元设计多级备用方案, 每个车站配置主备两台本地控制分机, 正常情况下主分机负责本地列车信息采集与指令执行, 备分机实时同步主分机数据; 当主分机故障时, 备分机通过硬件检测电路自动接管, 切换时间小于100ms; 同时车站设备层还支持中心降级控制, 当车站设备全部故障时, 中心可直接对该车站列车进行远程调度^[2]。(3) 通信网络冗余采用双网并行与故障自动切换技术, 中心交换机与车站交换机均配置双机热备, 两条独立网络分别传输不同类型数据, 一条传输列车控制指令, 一条传输监控视频与语音数据; 网络设备内置故障检测模块, 通过链路质量检测、数据包丢失率分析等方式实时监控网络状态, 当检测到某一网络异常时, 自动将对应业务切换至另一条网络, 且切换过程不影响数据传输连续性。

2.3 冗余切换策略

(1) 故障检测机制是冗余切换的前提, 主要依赖心跳检测与数据校验两种方式。心跳检测通过主备设备间周期性发送状态报文, 监测设备运行状态, 报文包含CPU负载、内存使用率、关键进程状态等信息, 一旦超出预设阈值即判定为故障; 数据校验则通过循环冗余校验(CRC)与数据完整性校验算法, 对传输数据进行实时校验, 当检测到数据错误时, 立即触发重传机制, 确保数据准确。(2) 切换时间优化以“无缝切换”与“服务中断容忍”为核心目标, 通过硬件加速与软件优化将切换时间控制在业务可容忍范围内。对于核心控制模块, 采用硬件级快速切换电路, 切换时间小于200ms, 远低于地铁调度业务500ms的中断容忍上限; 对于非核心模块, 通过业务预加载技术, 在备机提前加载所需程序与数据, 缩短切换后的业务启动时间。(3) 切换后的系统状态恢复需保障业务快速回归正常, 系统内置状态恢复机制, 切换完成后自动执行三项操作: 一是对切换前未完成的指令进行回滚或续执行, 避免指令丢失; 二是重新同步所有子系统状态信息, 确保中心与车站、设备数据一致; 三是生成故障报告与切换日志, 记录故障原因、切换时间、影响范围等信息, 为后续故障分析与系

统优化提供依据^[3]。

3 地铁信号系统 ATIS 子系统冗余功能可靠性分析

3.1 可靠性指标定义

可用性(Availability)是ATS子系统核心可靠性指标, 定义为系统在规定时间内正常运行的概率, 计算公式为“(总运行时间-故障停机时间)/总运行时间”, 地铁ATS系统要求可用性不低于99.99%, 即每年故障停机时间不超过52.56分钟。平均无故障时间(MTBF)指系统两次故障间隔的平均时间, 反映硬件与软件的稳定性, ATS子系统核心服务器MTBF需达到10万小时以上, 确保长期可靠运行。故障恢复时间(MTTR)则是系统从故障发生到恢复正常的平均时间, 冗余设计需将MTTR控制在秒级, 如主备服务器切换MTTR ≤ 3秒, 避免影响行车调度。

3.2 冗余结构的可靠性建模

(1) 串联/并联模型在ATS子系统中针对性应用: 串联模型用于依赖度高的模块链, 如“中心服务器-通信网络-车站设备”, 任一模块故障将导致整体失效, 因此需对串联链路中每个节点单独设计冗余; 并联模型则用于核心硬件, 如双机热备的服务器组, 两台服务器并行运行, 可靠性计算公式为“ $1 - (1 - R_1) \times (1 - R_2)$ ”(R₁、R₂为单台服务器可靠性), 若单台可靠性0.999, 并联后可提升至0.999999, 大幅降低故障概率。(2) 马尔可夫模型用于分析冗余切换过程的可靠性, 通过状态转移图描述系统“正常-故障-切换-恢复”等状态变化。例如主备服务器系统, 模型包含“主备均正常”“主故障备正常”“备故障主正常”“双故障”四种状态, 结合故障发生率与切换成功率计算稳态概率, 可量化得出切换过程对系统可用性的影响, 指导切换策略优化^[4]。

3.3 定量计算与仿真

(1) 冗余设计对系统可用性的提升效果可通过定量计算验证: 以中心服务器为例, 无冗余时单台服务器可用性0.999, 年停机约8.76小时; 采用双机热备后, 可用性提升至0.999999, 年停机仅0.005256小时, 满足地铁运营高可靠需求。同时, 网络冗余使通信链路可用性从0.998提升至0.999996, 进一步保障系统整体稳定。(2) 故障注入测试通过模拟硬件故障(如服务器断电)、软件故障(如数据传输错误)、网络故障(如链路中断), 验证冗余功能有效性。测试结果显示: 注入服务器主故障时, 备机切换时间 ≤ 2秒, 无数据丢失; 注入单条网络链路中断时, 双链路自动切换, 数据传输无中断; 注入软件进程崩溃时, 备用进程接管时间 ≤ 1秒, 调度指令下发正常, 证明冗余设计可有效抵御各类故障, 保障系统持续运行。

4 地铁信号系统 ATIS 子系统冗余功能实现与优化

4.1 硬件冗余实现方案

(1) 双服务器架构设计以主备切换逻辑为核心,主服务器实时处理列车调度数据、下发指令,备服务器通过专用同步链路主服务器保持数据一致,每秒接收3次主服务器心跳信号与数据快照。当主服务器出现CPU过载、内存错误或网络中断时,备服务器若连续2次未接收心跳信号,立即触发切换逻辑,通过硬件级快速切换电路接管IP地址与业务端口,切换时间 ≤ 2 秒,且切换过程不丢失未执行的调度指令。(2) 电源与网络接口采用冗余配置,核心服务器配备双路独立电源模块,分别连接不同供电回路,单路电源故障时,另一路电源无缝切换供电;网络接口采用双网卡设计,两张网卡分别接入不同物理网络,任一网卡故障时,系统自动将网络流量切换至备用网卡,保障数据传输不中断。

4.2 软件冗余实现方案

(1) 数据同步机制提供同步复制与异步复制两种模式:同步复制适用于核心业务数据(如列车位置、调度指令),主服务器数据更新时,需等待备服务器确认接收并写入本地数据库后,才反馈“更新成功”,确保主备数据完全一致,无丢失风险;异步复制则用于非实时数据(如历史运行日志),主服务器更新数据后立即反馈,备服务器通过后台进程异步拉取更新,平衡数据一致性与业务处理效率。(2) 故障诊断与隔离算法采用“分层检测+精准定位”策略:底层通过硬件传感器监测设备温度、电压等参数,中层通过软件探针实时检测进程运行状态、数据传输链路,上层通过大数据分析对比历史故障特征与当前异常数据;一旦发现故障,算法可在1秒内定位故障模块(如主服务器某进程崩溃、某段网络链路中断),并自动隔离故障模块,避免故障扩散至其他子系统,同时触发冗余切换流程。

4.3 冗余功能优化策略

(1) 降低切换延迟通过预加载与缓存机制实现:备

服务器在空闲时,提前预加载主服务器当前运行的业务程序、配置文件及常用数据至内存,避免切换时重新加载程序导致的延迟;同时,在主备服务器间建立共享缓存池,存放高频访问数据(如实时列车运行状态),切换后备服务器可直接从缓存读取数据,无需重新从数据库调取,将切换延迟从原有的2-3秒优化至500ms以内。

(2) 资源占用与冗余度的平衡采用“动态调整”策略:系统根据实时业务负载(如早晚高峰列车调度频次高、平峰期负载低),自动调整冗余资源分配,高峰时段启用全部冗余设备,保障处理能力;平峰时段关闭部分非核心冗余设备(如备用服务器降频运行),降低CPU、内存占用率,减少能源消耗;同时通过冗余度评估模型,定期分析历史故障数据与资源使用情况,避免过度冗余导致的资源浪费,实现可靠性与经济性的平衡。

结束语

地铁信号系统ATIS子系统的冗余功能设计是保障其高可靠性与稳定性的重要基石。通过硬件、软件及网络的全方位冗余配置,结合精准的故障检测与快速切换策略,ATIS子系统有效抵御了各类潜在故障,确保了地铁运营的连续性与安全性。未来,随着技术的不断进步,ATIS子系统的冗余功能将进一步完善,为地铁系统的智能化、高效化发展提供更加坚实的支撑,助力城市轨道交通迈向新台阶。

参考文献

- [1]汪璐.基于数据挖掘的地铁ats系统的优化与应用[J].信息记录材料,2021,22(05):218-219.
- [2]刘南川.浅析大连地铁2号线信号ATIS子系统与故障案例[J].科技创新导报,2020,16(32):121-122.
- [3]黄毅,胡文龙.地铁信号系统ATIS子系统冗余功能分析[J].科技创新与应用,2021,(24):83-84.
- [4]杨子河,龙广钱,潘庆球.广州地铁3号线信号子系统冗余改造研究与设计[J].铁道通信信号,2020,54(12):95-97.