

非侵入式车载 ATC 设备在线检测 运维系统方案设计

张小虎¹, 李 博^{2,3}, 钟敏富¹

1. 广州地铁集团有限公司, 广州 510330;
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 北京 100081;
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

摘要: 列车运行控制系统中, 车载 ATC (automatic train control) 设备行车日志里记录着各子系统的整个运行周期的全部信息, 分析行车日志是监测车载设备状态和分析系统故障的重要手段; 但在实际维护中, 设备实际输入输出和传感器电气工作状态信息中隐含大量故障特征信息, 而这些信息在既有的车载信号系统中没有有效记录; 行车日志收集依靠人工, 效率低, 成本高; 故障诊断依靠经验, 诊断结果具有局限性; 为了解决以上问题, 采用非侵入式传感器对电气状态参数进行采集, 利用车地无线网络将数据实时回传至地面服务器, 由地面服务器进行数据分析, 从而达到对各子系统和关键零部件进行状态监测, 并对异常信息进行预警的目的; 结果显示, 系统对无线通信异常、应答器异常、速度传感器与测速雷达异常、ATP 板卡异常和车辆接口异常等故障能进行有效检测; 系统的应用降低了运维成本, 提高了运维效率。

关键词: 车载信号; 在线检测; 城市轨道交通; 运营维护系统

Scheme Design of on-line Detection and Operation System for Non Intrusive on-board Signal Equipment

Zhang Xiaohu¹, Li Bo^{2,3}, Zhong Minfu¹

1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510330, China;
2. Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081, China;
3. China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In train operation control system, vehicle Automatic Train Control (ATC) device log records all information of the whole operation cycle of each subsystem, and analyzing the log is an important means to monitor the state of on-board equipment and analyze the failure of the system. However, in the actual maintenance, a large amount of fault feature information is hidden in the actual input and output of the equipment and the electrical working state information of the sensor, which is not effectively recorded in the existing vehicle signal system. Log collection relies on labor, low efficiency and high cost; Fault diagnosis relies on experience, and the diagnosis results have limitations. In order to solve the above problems, the electrical parameters are collected by non-intrusive sensors, and the data is transmitted back to the ground server in real time by the wireless communication network of the vehicle. The data are analyzed by the ground server, so as to achieve the purpose of monitoring the subsystems and key parts and monitoring the abnormal information. The results show that the system can effectively detect wireless communication abnormality, balise abnormality, speed sensor and speed radar anomalies, ATP board and vehicle interface abnormalities. The application of the system reduces the cost of operation and maintenance and improves the efficiency of operation and maintenance.

Keywords: on-board signal; online detection; urban rail transit; operation and maintenance system

0 引言

目前, 城市轨道交通中车载 ATC 设备的故障时有发生, 可靠的故障诊断是降低系统故障率和故障影响的有效方式。既有的信号系统运维手段主要包含定期维修和故障维修, 定期维修是以列车投入运营的时长为单位对列车信号系统进行检修, 排查故障隐患; 故障维修是在列车信号

系统出现故障时对其进行维修, 寻找故障原因^[1]。通过在线监测, 并对故障进行预警的预防性维修是信号系统维护的发展方向。

既有的故障维修的主要方式是对车载 ATC 设备的行车日志进行分析, 从中查找故障原因。但由于行车日志记录信息的局限性, 其中缺少设备实际输入输出和传感器电气工作状态等信息, 导致故障维修时部分故障无法准确定位、责任无法划分的情况^[2]。为此, 需要对车载 ATC 设备的实际输入输出和传感器电气工作状态等信息进行采集, 从而补充行车日志的监测盲区, 为故障诊断提供依据^[3]。采集后的监测信息与既有的行车日志整合并按照时间序列的形

收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-07-02。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201202)。

作者简介: 张小虎(1984-), 男, 甘肃平凉人, 工程师, 主要从事轨道交通通信、信号技术研究及设备维修方向的研究。

式进行存储,经过车地无线网络回传至轨旁地面服务器,由地面服务器行车日志下载与数据分析软件对数据进行解析、清洗、筛选和分析等操作,并对异常信息和故障进行预警。

1 研究背景

1.1 方案采集接口信号简介

列车自动控制系统简称 ATC 系统,其中车载 ATC 设备是其关键的组成部分^[4]。本方案采集的接口信号如下。

1.1.1 车辆至车载 ATC 输入接口

1) 司机钥匙开关:位于司机驾驶控制台上,司机钥匙打到合时,继电器接点导通;

2) 车门关闭:当列车所有门锁闭时,车载 ATC 设备通过采集相应继电器信息获取车门锁闭信息,只有在所有车门锁闭时,列车才能启动;

1.1.2 车载 ATC 至车辆输出接口

1) 紧急制动请求:当车载 ATC 设备检测到需要紧急制动的情况时会输出紧急制动命令控制列车紧急制动;

2) 左/右门使能:门使能是控制车门开启的前提,门使能继电器接点导通时,按压开车门按钮或 ATO 给出开门指令后,相应车门方可开启;

3) 开/关门命令:DC110V 电压输出,在上升沿时有效,在 ATO 模式下且门使能有效时,控制车门开启或关闭;

4) 牵引制动命令:车载 ATC 设备控制车辆运行方向、牵引和制动力的大小;

5) 按钮输出:司机驾驶台上的有 ATO 启动按钮、车门旁路、模式升级、模式降级、自动折返及紧急制动按钮,当按钮被按下时,继电器接点导通。

1.1.3 传感器等设备供电

1) 速度传感器:车头、车尾在不同车轴安装独立的速度传感器,单个速度传感器一般有多路供电电源;

2) 测速雷达:车头、车尾分别安装雷达传感器,单个雷达传感器有 1 路供电电源^[5];

车载 ATC 设备中子系统众多,且系统之间相互关联,这就要求检测设备具备较高的安全性和可靠性,在不引入新的风险源且不影响既有系统功能的前提下进行检测;同时 ATC 设备的复杂性也为故障诊断带来了挑战。

1.2 车载 ATC 设备典型故障概述

1) 列车输入输出接口故障:

列车冲标是一种常见故障,冲标会导致站台车门与站台屏蔽门无法联动开启,影响行车效率;其故障原因从运维责任上主要划分为信号故障和车辆故障两种。从故障原因角度分析,信号系统中 ATO 牵引制动电流的实际输出与理论输出不一致会导致列车冲标,车辆电制动与气制动配合不合理也会导致列车冲标。

因缺少车辆与信号设备之间的接口监测,既有的信号维护中此类故障一般无法定位具体故障原因,故障责任也无法划分^[6]。因此,如果对 ATO 实际牵引制动输出电流进

行监测,并与 ATO 数据报文中理论的输出电流进行比较,就可以定位故障来源,从而划分具体故障责任。同理对车门信息、开关按钮等继电器干接点电信号进行监测,进而提高故障诊断的准确性。

2) 传感器等设备供电故障:

列车速度传感器与测速雷达传感器在正常工作时都有一定的正常工作电流范围,当设备故障或通道故障时,设备供电电流往往呈现异常,与正常供电电流之间存在较大偏差。因此可以对传感器等设备的供电电流进行采集,通过计算与正常供电电路范围的差值进行故障诊断。

2 车载信号设备在线检测方案硬件设计

方案中的电信号采集传感器采用非接触测量的形式,并不会对既有车载 ATC 设备的安全及非安全功能造成影响,可以在维持设备可靠性的基础上对所需信息进行采集。采集后的电信号经过模数转换后由主控单元 MCU (Main Controller Unit) 负责处理和存储。在收集了既有 ATC 设备未监测到的盲区信息之外,系统还对车载 ATC 其他子系统的日志进行收集和整理。无线通信单元用于提供实现行车日志自动收集的传输通道,传输后的日志存储于地面服务器,由地面服务器进行整理和分析。方案总体架构如图 1 所示。

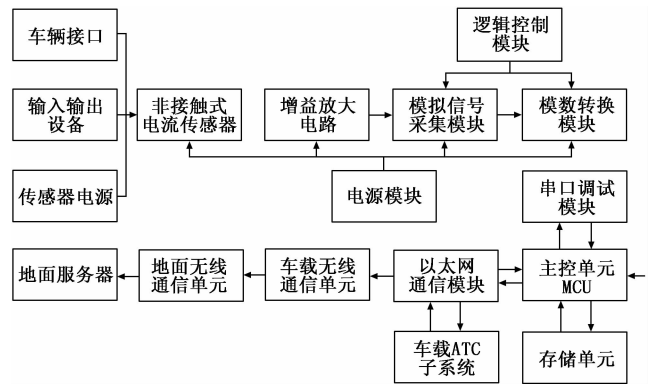


图 1 在线检测方案总体架构图

2.1 非侵入式电流传感器

车载信号设备属于安全等级要求较高的系统,传统的接入式电信号采集方式多为串联或并联采集,在采集设备功能失效时会对被采集的信号及电路造成影响,引入了新的系统风险源。而利用非接触式电流传感器实现的非侵入式电信号采集与被采集电路没有电气接触,待测电流导线穿过传感器线圈从而产生感应电动势,通过测量感应电动势大小获取待测电信号的大小;因而非侵入式电信号采集方式在安全性上有较大优势。由于被测信号多为毫安级的小电流信号,系统采用在测量范围和噪声控制水平均表现优异的磁通门电流传感器^[7]。

信号采集传感器的工作原理为磁通门电流隔离测量技术,即利用磁芯的饱和现象实现被测磁场到电场的转换,通过测量感应电动势的大小可以度量被测电流所产生的磁

场大小^[8]。当被测电流经由导线穿过环形磁芯时, 根据安培环路定理可以得到磁芯中磁感应强度为:

$$B = \frac{\mu I}{\pi d}$$

其中: B 为磁感应强度, I 为被测电流大小, d 为磁芯直径。

由法拉第电磁感应定律, 线圈所产生的感应电动势为:

$$V_{out} = INS \frac{dB}{dt}$$

其中: N 为线圈导线匝数, S 为横截面积, B 为磁感应强度, t 为时间^[9]。

当被测电流导线穿过传感器时, 传感器的输出电压与被测电流满足线性关系:

$$V_{out} = K_{sensor} * I_m$$

其中: V_{out} 为传感器输出电压, K_{sensor} 为线性比例系数, I_m 为待测电流。

2.2 在线采集系统

2.2.1 信号采集

对于毫安级别电信号的采集, 磁通门传感器的感应电动势输出为 0.2 V/mA, 为了减小传输损耗以及电磁干扰的影响, 需对感应电动势信号进行放大, 放大后的电压传输给模拟信号采集模块。通过调节增益放大电路的负反馈电阻分压器电阻比可以调节电路不同的放大倍数。经过测试, 放大电路的输出电压范围为 2.5~5 V。实际测量传感器输出信号、放大电路输出信号与待测电流间的关系如图 2 所示。

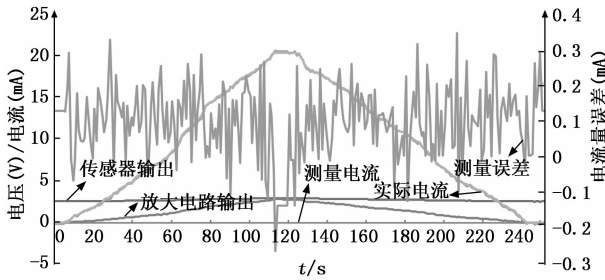


图 2 信号采集方案测试结果图

2.2.2 主控单元信息处理

主控单元 MCU 接收到采集后的电压信息后进行数值逻辑处理, 从而得出待测电流值的大小:

$$I_x = \frac{\left(\frac{V}{K_{gain}} - V_{ref} \right)}{K_{sensor}}$$

其中: I_x 为待测电流大小; V 为 MCU 接收到的放大电路输出电压; K_{gain} 为放大电路放大倍数; V_{ref} 为参考电压, 本方案中 $V_{ref} = 2.5 \text{ V}$; K_{sensor} 为传感器感应电动势输出和待测电流的比值。计算出待测电流大小后, 根据信号有效电流大小得出该路信号的逻辑值, 并将逻辑信息与既有行车日志整合存储。

在硬件架构方面, 主控单元 MCU 分别与串口调试模块、以太网通信模块和存储单元相连。其中以以太网通信模块是从其他子系统中收集既有行车日志的通道。

串口调试模块可以实现软件开发、功能测试、数据传输的功能, 通过 RS232 接口与计算机相连。同时串行调试模块还可以作为数据传输的备用接口实现数据的人工读取。存储单元与主控单元 MCU 相连用于存储 MCU 的信息数据, 信息数据包括监测信息和既有行车数据。

2.2.3 车地无线通信

为了实现车载设备的在线检测, 需将采集数据实时发送至地面服务器进行存储和分析, 即需构建用于数据传输的车地无线传输系统^[10]。新建无线通信网络会增加系统构建成本, 也会对既有的无线通信系统造成干扰。为此, 方案采用既有信号系统的车地无线通信网络实现, 既有无线通信网络由轨旁骨干网络和车地无线通信网络构成。轨旁骨干网络为地面服务器提供接入数据传输通道, 实现彼此双向通信。既有的无线通信网络带宽满足同时传输行车数据及原始车地通信需求, 与新建通信网络实现数据传输的方案相比在实用性与便利性方面有较大优势。

在线采集系统将采集后的信息与既有的行车日志整合, 将整合后的行车日志按照数据报文的形式实时发送给列车无线单元 (TRU, train radio unit), 通信方式为 UDP (user datagram protocol) 通信。TRU 将数据报文传输给地面 AP (access point), 经由无线控制器和网络交换机, 通过轨旁骨干网络送发地面服务器, 由地面服务器完成数据处理。

3 车载信号设备在线检测方案软件设计与实现

3.1 软件逻辑设计

地面服务器接收到数据报文后, 首先对数据进行清洗、规整和分类。之后按照既定的数据分析原则对行车数据进行无线通信系统、应答器、速度传感器、测速雷达、ATP (automatic train protection) 设备板卡、车辆接口等不同种类信息进行分析, 从中筛选异常信息。软件处理逻辑架构如图 3 所示。

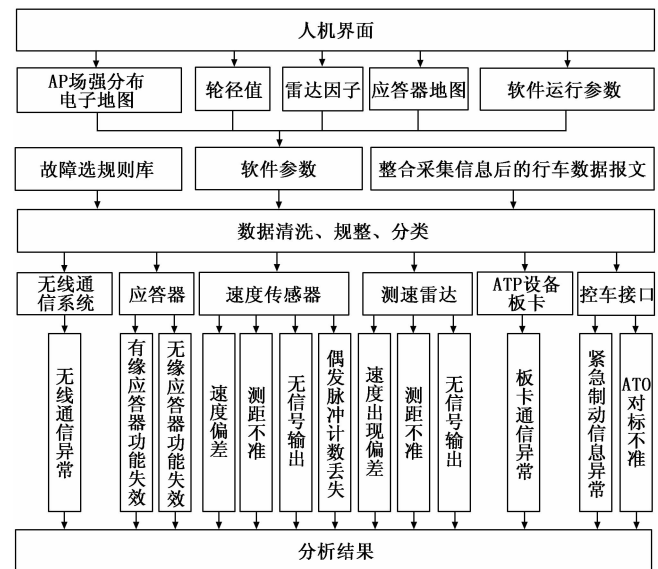


图 3 地面服务器行车日志下载与数据分析软件处理逻辑图

1) 无线通信系统异常分析:

通过遍历车载 TRU 与轨旁 AP 的连接状态可以得出无线通信连接断开的异常时刻;同时建立基于公里标的场强分布电子地图,计算实际信号场强与理论场强之前的差值实时监测无线设备场强,如果出现突变或者偏差超过阈值则进行报警,分析原理如图 4 所示。

$$\begin{cases} W_{RSSI} > W_{warning}, \text{正常} \\ W_{RSSI} \leq W_{warning}, \text{预警} \end{cases}$$

其中: W_{RSSI} 为无线设备实际场强, $W_{warning}$ 为场强预警阈值。

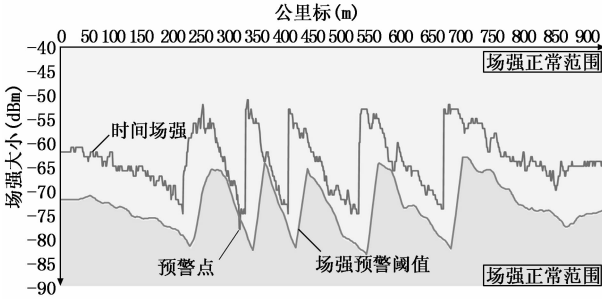


图 4 无线通信系统异常分析原理示意图

2) 应答器异常分析:

对于不会引起车载 ATC 设备的应答器隐性故障,可通过挖掘 ATP 日志,遍历出丢失的无源应答器以及失效的主信号应答器实现诊断。在连续式控制模式下,车载列车控制系统从车地无线通道获取移动授权,地面主信号应答器的信息在该模式下不参与列车授权计算^[1]。如果此时出现主信号应答器故障,列车控制系统不会产生紧急制动,列车保持正常运行。但是在点式控制模式下,主应答器故障将导致列车产生紧急制动,造成列车停车、降级。无源应答器的隐性故障表现在单个无源应答器的丢失,至少连续两个无源应答器丢失才会导致列车紧急制动,故丢失单一应答器不会产生紧急制动,列车保持正常运行。此外,通过行车日志的多车横向比较与单列车纵向比较可以定位丢失应答器的原因是由 BTM (balise transceiver module) 故障导致还是由应答器故障导致。

3) 速度传感器与测速雷达异常分析:

分析速度传感器与测速雷达信号供电电流,计算实际电流信号与正常电流信号之间的偏差,可以判断速度传感器与测速雷达通道工作是否正常,从而对速度传感器和测速雷达的故障进行预警,并定位系统故障;通过计算行车日志中的固定应答器间距与实际走行距离误差百分比,可以量化速度传感器与测速雷达的测量精度,以此确定传感器与雷达的性能下降幅度并预警;利用速度传感器多通道间脉冲值差比较,可以诊断出单个传感器通道的偶发脉冲丢失故障,同时可以得到丢失脉冲的个数。

选取两个固定应答器间速度传感器或雷达走行距离,对应答器间距与走行距离差值百分比进行阈值判断。预警策略可表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq \frac{|x_{OPG/Radar} - x_{balise}|}{x_{balise}} < X_{warning}, \text{正常} \\ X_{warning} \leq \frac{|x_{OPG/Radar} - x_{balise}|}{x_{balise}} < X_{fault}, \text{预警} \\ X_{fault} \leq \frac{|x_{OPG/Radar} - x_{balise}|}{x_{balise}}, \text{故障} \end{cases}$$

其中: $x_{OPG/Radar}$ 为速度传感器或测速雷达走行的距离, $X_{warning}$ 为报警阈值, X_{fault} 为报警阈值。

4) ATP 板卡间通信异常分析:

分析行车日志中板卡通信时间戳,可以对板卡的工作状态进行监测,当通信延时到达故障时间戳间隔判断阈值时,对故障进行预警。通过这种策略可以在板卡工作通信异常或输入输出异常时进行预警,分析原理如图 5 所示。

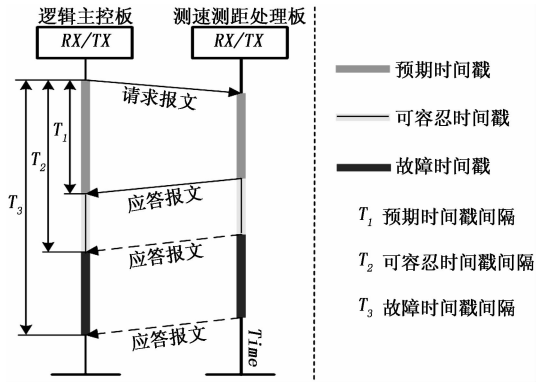


图 5 ATP 板卡间通信异常分析原理示意图

5) 车辆接口异常分析:

对检测的车辆接口信息进行分析,通过与报文中解析出的理论输出相比较,计算接口输出是否存在偏差从而划分信号与车辆的责任;监测输入的电源信息,在供电异常时进行预警;实时采集车辆接口信息,如果出现输出信号异常抖动则进行报警;实时统计 ATO 日志中的对标精度,如果出现不符合性能模型的数据,则进行报警。车辆接口预警分析原理如图 6 所示。

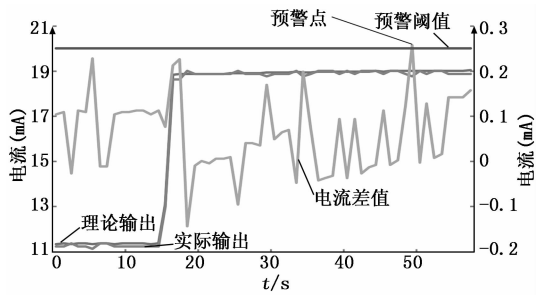


图 6 车辆接口预警分析原理示意图

从列车对标数据中建立列车对标精度分布模型,分布模型从统计学角度反映了列车精准停车性能。当出现对标精度分布与模型差别较大时,向运维人员预警,提示运维人员对列车进行检修。