

地铁列车主动维保平台及关键技术

陈建校, 王 超, 袁文烨

(株洲南车时代电气股份有限公司技术中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 陈建校 (1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 现从事城轨信息化领域技术研发工作。

摘 要: 在分析地铁列车维保现状基础上, 分析了地铁列车主动维保不同层面的模式, 提出了一种地铁列车主动维保平台, 简要地介绍了平台的基本功能、平台拓扑结构以及平台研究实现的关键技术, 即基于最优互信息的特征选取预处理技术、信息复接与分接技术。

关键词: 地铁列车; 主动维保模式; 主动维保平台; 信息复接与分接

中图分类号: U231+.94

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)01-0058-04

Initiative Maintain Platform and Key Technic for Metro Train

CHEN Jian-xiao, WANG Chao, YUAN Wen-ye

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Based on the maintain actuality of metro train, a kind of initiative maintain platform was introduced. Main function and topology of the system were presented, as well as the key technic including the information pretreatment technic based on optimized mutual data, the tap and connecting technic of information.

Key words: metro train; initiative maintain mode; initiative maintain platform; tap and connecting technic of information

1 地铁列车维保现状

地铁因有利于解决制约城市发展的交通拥堵及空气污染等重大问题, 修建地铁成为众多城市稳定持续发展的重要举措之一^[1]。

截至目前, 已经有 36 个城市制订了城市轨道交通规划, 其中大部分城市已获得国务院审批, 另有部分城市处于筹备中, 如太原、大同、济南等。2011年至2015年, 城市轨道交通新增营业里程将达到 2 410.56 km, 到 2020 年, 我国城市轨道交通累计营业里程将达到 7 000 km^[2]。

根据上海轨道交通网络规划以及近期建设规划, 至2012年, 上海轨道交通基本网络建成, 将投入运营 13 条轨道交通线路, 车站 354 座, 线路总长将接近 570 km。按照规划, 上海轨道交通网络完全建成后, 将投入运营 21 条轨道交通线路, 车站 587 座, 线路总长将超过 1 000 km^[3]。

在城市轨道交通运营过程中, 由于整个城市轨道交通系统异常复杂, 尤其是列车系统, 包括牵引系统、

制动系统、列控系统、车门系统、空调系统、走行部系统、网络控制系统等, 任何形式的故障都可能造成一定程度的损失。列车系统作为轨道交通系统中的核心单元, 其稳定持续运营是各地铁公司的重中之重, 为此, 地铁公司都在一定程度上开展了相关的地铁列车维保工作。

根据上海、广州、北京等地铁公司运营维护保养的现状可知, 地铁列车现场维保工作停留在初级阶段。例如在线的地铁列车出现故障, 当值司机电话告知维保调度中心, 维保调度中心与司机沟通了解列车故障基本情况, 在毫无具体数据的基础上, 经过简单经验分析之后, 指派现场维保人员赶赴现场处理故障。现场维保人员到达现场之后才能够从故障现象出发, 根据尽量保证该列车能够继续运营至终点的原则, 在规定的时间内凭借经验进行故障处理。这种被动式维保手段具有致命的缺点: ①现场维保人员经验及技术水平的不同导致维保任务完成的效果不同; ②司机、维保调度中心、现场维保人员之间的多方沟通方面具有一定的不确定性, 且浪费时间, 导致误解误判; ③现场维保人员无法及时了解相关的故障真实情况及相关数

收稿日期: 2011-11-25

基金项目: 国家 863 计划项目 (2007AA11Z247)

据, 仅凭借实际经验进行处理; ④司机无法准确判断在途故障的危害性及严重程度^[2]。

2 地铁列车主动维保系统模式

地铁列车运营过程中, 采用被动维保手段具有诸多的不稳定性和不可靠性, 与地铁列车运营的高可靠性高稳定性要求相距甚远。为弥补被动维保过程中的缺点, 探索主动维保手段, 研究地铁列车主动维保系统模式逐渐成为该领域的热门研究方向之一。

根据技术成熟度, 地铁列车主动维保系统模式包括: 远程指导司机现场处理在途列车故障, 地铁列车可运营状态评估, 地铁列车故障影响推演及预警。

远程指导司机现场处理在途列车故障主要是通过车地信息化平台实现的, 一旦在途列车发生故障, 地面维保中心人员立即能够接到故障报警信息, 地面维保中心人员针对该故障进行技术分析、故障影响度分析、故障处理办法分析与决策, 然后快速发送列车在途故障处理参考办法给司机, 司机便可以按照参考处理办法进行处理, 以确保列车稳定运行, 降低在途列车故障对整个线路运营的影响。

地铁列车可运营状态评估主要是采用高性能计算系统, 根据列车可运营性指标体系, 针对每列车的可运营状态进行评估。若该列车的可运营状态为不稳定, 便可立即进行全方位的检查, 以确保在线运营车辆健康运行。

地铁列车故障影响推演及预警主要是采用高性能计算系统与先进的故障影响推演算法, 提取列车状态特征, 识别列车故障特征, 智能感知、预警影响列车可运营状态的故障, 实现故障前预警, 达到列车健康运营的目的。

相比之下, “远程指导司机现场处理在途列车故障”的技术成熟度最高, 而“地铁列车故障影响推演及预警”技术要求高、难度大。然而, 无论是哪种主动维保模式, 都需要通过信息化手段采集列车状态数据, 实现车地之间双向数据传输, 针对列车状态数据进行预处理、特征感知识别, 然后实现终端相关应用。因此研制地铁列车主动维保平台成为首要任务。

3 主动维保平台功能

地铁列车主动维保平台是采用信息化技术武装列车维保工作的手段之一。平台通过列车状态数据智能采集技术、车地可信无线传输技术, 将列车运营状态数据汇聚到地面数据中心, 然后数据中心进行特征提取等, 形成一种高性能系统平台, 为各种业务应用提供平台支持。

1) 异构系统数据智能采集

地铁列车主动维保平台车载系统采用以太网接口、RS232接口、MVB接口、RS485接口等接口技术, 采

集列车车辆中的车门系统、空调系统、牵引系统、制动系统、信号系统、走行部系统等关键装备状态数据以及列车工况数据, 并且通过以太网总线传输给车地传输主机。该系统具备接口智能判别机制、信息源判别机制、动态组网机制、接口自适应机制, 可适应采集不同型号列车状态数据的要求。

2) 异构数据智能预处理

地铁列车主动维保平台车载系统针对车门系统、空调系统、牵引系统、制动系统、信号系统、走行部系统等关键装备状态数据以及列车工况数据, 采用基于自律分散理论数据智能拆分与重组技术, 实现数据融合功能; 采用基于神经网络故障特征识别技术, 实现故障泛特征智能提取及特征关联数据重组功能。

3) 车地高可信数据传输

由于车载系统固有的存储量小, 运算能力不足的特点, 地铁列车主动维保平台采用信息复接/分接技术、OFDM调制技术、无线通信网络层协议、信道编解码技术以及扩频跳频技术, 实现了车地之间数据高可信传输的功能。

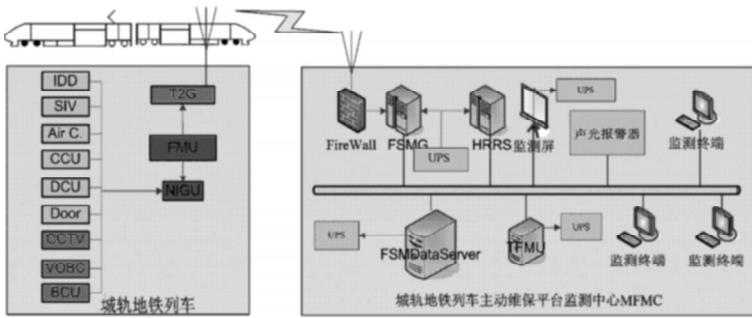
4) 地面数据智能预处理

地铁列车主动维保平台在数据下载到达地面之后, 根据数据的特征, 采用数据泛特征模糊识别技术, 实现数据智能分类存储、数据泛特征智能修正、数据源智能判别功能; 结合地铁列车及车辆关键装备的设计原理、电气原理, 智能分拆与重组数据, 根据复合业务应用的特征, 智能提取与分发数据。

4 主动维保平台拓扑结构

为实现地铁列车主动维保平台的相关功能, 需安装车辆节点信息采集单元(NIGU)、高可信无线传输装置(T2G)及轨旁地面AP接收发送点, 形成大容量数据无线可信传输网络, 由通信网关、高性能服务器组成地面数据处理中心。车载装置、无线可信传输网络及地面数据处理中心共同构成地铁列车主动维保基础平台。在此平台基础上, 根据技术成熟度与实际业务的需求, 可增设一定的应用终端, 形成不同层面维保模式下的主动维保系统。具体的系统架构如图1所示。

车辆节点信息获取单元(NIGU)通过采用插件式机箱结构, 复合了各种接口, 以满足MVB接口、RS232接口、RS485接口、以太网接口、CAN总线等接口数据采集的要求, 具备接口智能判别、信息源智能判别等机制, 具有高性能处理能力, 可智能采集车辆各关键设备数据及列车工况数据。车辆关键设备包括: 列车中央控制单元(CCU)、智能显示单元(IDD)、牵引控制单元(DCU)、辅助变流器(SIV)、门控系统(Door)、制动系统(BCU)、空调控制系统(Air C)、信号系统、走行部传感器等。这些设备可完成车辆数据智能分拆重组等数据融合预处理, 基于神经网络故障特征识别, 实



FSMG —— 列车故障及状态监测网关；CCU —— 列车中央控制单元；FMU —— 故障实时监测单元；Firewall —— 防火墙；IDD —— 智能显示单元；DCU —— 牵引控制单元；NIGU —— 节点信息采集单元；FSMDataServer —— 故障及状态数据服务器；SIV —— 辅助变流器；VOBC —— 车载区域控制器；BCU —— 制动控制单元；HRRS —— 列车保养隐患智能识别系统；Door —— 门控系统；MFMFC —— 维保平台监测中心；TFMU —— 列车故障监测终端；Air C —— 空调控制系统；T2G —— 车地无线设备

图1 地铁列车主动维保平台拓扑结构图

现故障泛特征智能提取、特征关联数据重组及大容量数据高速存取等功能。

由于地铁列车包括了多个电气设备，其数据量巨大，因此需要架设大容量数据传输网络，主要负责数据透明传输与转发，实现网络管理、VLAN划分、优先级控制、网络管理及控制功能、动态组网等功能，带宽为100 Mbps，传输时延不大于50 ms。

高可信无线传输装置（T2G）与轨旁AP形成车地无线传输系统，采用信息复接/分接技术、OFDM调制技术、无线通信网络层协议、信道编解码技术以及扩频跳频技术，负责车地之间数据高可信传输。

通信网关可实现数据验证、智能转发功能。

FSMDataServer 故障及状态数据中心存储数据。HRRS 列车保养隐患智能识别系统采用高性能服务器，完成数据智能分类存储、数据泛特征智能修正、数据源智能判别及分发数据等功能。

在此平台基础上，可以增设各种终端，包括列车运行状态实时监视终端、故障报警终端、故障危害性推演结果终端、故障数据关联及分析终端、远程指导司机处理在途列车故障终端等，以达到主动维保目标。

5 主动维保平台关键技术

5.1 基于最优互信息的特征选取预处理技术

1) 列车状态互信息预处理

根据Shannon信息理论，一个随机变量 C 的不确定性可以由熵 $H(C)$ 来估计。对于2个随机变量 X 和 C ，条件熵 $H(C|X)$ 可以估计当变量 X 已知时，变量 C 的不确定性。而互信息 $I(C; X)$ 可以估计变量 C 和变量 X 的相互依赖性。从而， $H(C)$ ， $H(C|X)$ 和 $I(C; X)$ 三者有如下的关系^[4-6]：

$$\begin{aligned} H(C) &= H(C|X) + I(C; X), \text{ 等价于} \\ I(C; X) &= H(C) - H(C|X) \end{aligned} \quad (1)$$

列车状态数据包括网压、计算载荷、中间直流环

节直流侧电流、中间直流环节直流侧电压、牵引单元#1斩波电流、牵引单元#2斩波电流等数百种。在故障诊断或者预警过程中，为提高其效率，必须分别计算这些数据与故障之间的依赖关系，从而初步确定某一个故障的泛特征属性集。某一个故障设定为一个类 C_i ，而列车状态数据为随即变量 X_i ，通过历史数据分别可计算其互信息量 $I(C_i; X_i)$ 。

2) 获取最优列车状态特征集

训练列车状态特征集分类模型的目的是从泛特征集中找出最小特征集。具体原则是“若 $I(C; X)$ 比较大，则意味着训练数据集 X 所包含的信息能够有效地预测 C 类属性；相反地，若 $I(C; X)$ 比较小，则意味着训练数据集 X 所包含的信息不能够有效地预测 C 类属性^[4]”。因此为

找到最小特征集，需要找一组参数 θ ，尽可能增大互信息 $I(C; X)$ 。通过互信息量 $I(C_i; X_i)$ ，根据其互信息量的大小进行初步排序，以确定取二级特征集 $X(|X|=n)$ ，然后针对每一个状态数据属性，获取其训练数据值，确定参数。二级特征集中所有的参数组成该特征集的一组参数 θ ，以确定特征子集 $F(|F|=n_\theta)$ ，使得互信息 $D=I(C; F)$ 尽可能地大以导致于特征子集 F 能够有效地预测训练数据的 C 类属性，从而获得最大的 $I(C; F)$ 所对应的 F 来作为最优的特征集来代表特征全集 X 。

然后，根据整车逻辑及故障逻辑规则剔除掉那些逻辑上不相关的特征，使得处理后的 F 成为新的最优的特征集^[4-6]。

$$\text{即 } \min \left(S = \sum_{i=1}^{n_f} I(f_i; F') \quad (\text{其中 } F' = (F - f_i)) \right)$$

将最大相关性和最小冗余性相结合，定义算子 $\theta(D, S)$ ，最大化算子 $\max \theta(D, S)$ ，同时优化 D 和 S 。

采取前向递增的搜索方法，便可获得最优的特征向量集。在主动维保平台中，有 $(m-1)$ 个特征集 F_{m-1} ，通过优化式(3)，从 $(X-F_{m-1})$ 中选取 m 个特征。式(3)为

$$\max \left[I(f_j; C) - \frac{1}{m-1} \sum_{x_j \in F_{m-1}} I(f_j; f_i) \right] \quad (2)$$

其中， $f_j \in X - F_{m-1}$ 。

3) 列车状态最优互信息特征提取算法

主动维保平台中，为获取最优互信息特征OMI (Optimal Mutual Information)，其算法表述为如下^[5]：

①初始化目标特征集 F 与泛特征集 X ，即：初始化 F 为空集， X 为泛特征集（包含所有特征的全集）。

②计算每一个列车状态数据与故障类属性的互信息：即对每一个特征 $f_j \in X$ ，计算 $I(f_j; C)$ ，其中 C 为某一特定的故障。

③选取第一个特征：选择特征 f ，并计算对应最大的互信息量 $I(f_j; C)$ ，设置 $X=X-\{f\}$ ， $F=\{f\}$ 。

④递归计算: 选择数据属性特征 f , 对应最大的 OMI 评价函数, 即

$$f = \arg \max_{f_j \in X - F_{m-1}} \left[I(f_j; C) - \frac{1}{m-1} \sum_{x_i \in F_{m-1}} I(f_j; f_i) \right]$$

⑤如果 $|F| < |X|$, 回到第 2 步, 否则 F 即为最终所有特征向量的排序。

通过计算列车状态数据与故障类属性的互信息值来导出每个状态数据特征向量与故障相关性的排序, 在 OMI 算法中, 只需计算 $I(f_j; C)$ 和 $I(f_j; f_i)$, 即只需先计算 $p(f_j; C)$ 和 $p(f_j; f_i)$ 即可。

5.2 信息复接与分接技术

针对列车车辆的众多关键设备, 如牵引、制动、车载信号、走行部、车门、空调等系统的监测信息(简称车辆工况)的多元化、及时性、大容量及准确度等特点, 提出了一种适应于地铁列车车辆关键设备信息车地无线传输机制, 通过信息复接/分接技术实现多路信息的同时传输, 见图 2。

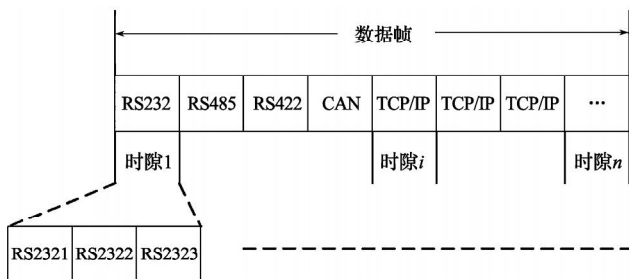


图 2 信息复接/分接帧结构示意图

①信息复接: 包括缓存器信息处理, 数据帧封装和数据复帧处理。

缓存器信息处理是根据数据级别决定消息排队序列。由数据评级模块将非常态车况数据评级得到一级至四级数据, 其中一级数据可靠性要求最高, 四级数据可靠性要求最低, 在实际应用中, 列车在途故障及环境数据可靠性要求最高, 列车正常工况数据可靠性要求最低。根据数据的级别排列消息队列, 存入缓存器。

数据帧封装采用数据帧结构的数据传输方式, 如图 2, 数据发送周期为 20 ms, 每个周期由 n 个时隙构成 n 个物理信道, 接口的数据作为逻辑信道映射到 n 个对应的物理信道, 从而满足故障信息传输实时性的要求。列车工况数据格式如图 3 所示。对于已经评级的故障信息, 采用根据不同的故障级别, 重复不同的次数。故障级别越高, 重复次数越多。

STX	DATA	ETX	CRC
-----	------	-----	-----

ST: 数据开始位

DATA: 数据(重复 n 次)

ETX: 数据结束位

CRC: 校验位(校验位与数据之和为 0)

图 3 信息数据结构

数据复帧处理为一种数据重复机制, 将要发送的数据重复 3 次, 组成数据复帧, 满足信息传输的可靠性要求, 以提高车地无线传输的可信度。

②信息分接: 3 中取 2 的安全机制, 适配器接收到数据后, 如果 3 组数据一致, 任取其中一组; 如果 3 组数据中的 2 组一致, 取 2 组相同数据中的任意一组; 如果 3 组数据均不相同, 则丢弃该数据, 等待下一帧数据, 从而减少误报率, 提高了车地无线传输的可信度, 见图 4。



图 4 3 中取 2 信息可信传输机制

由于采用了信息复接与分接技术, 可实现车地之间高可信数据传输。

6 结语

为提高地铁列车运营的稳定性与可持续性, 地铁公司迫切需要采用主动维保模式, 无论是哪种主动维保模式, 都需要以地铁列车主动维保平台为基础, 根据技术成熟度与不同的业务应用需求, 增加应用终端即可实现不同主动维保模式下的主动维保系统。

经过多年的努力, 该平台于 2009 年成功研制, 并于 2010 年 3 月安装在上海地铁 1 号线直改交列车中, 目前平台运行稳定可靠。

参考文献:

- [1] 金碧筠, 陈建校. 地铁列车远程维保技术支持系统的设计与实现 [J]. 数字技术与应用, 2010(9).
- [2] 丁玲玲. 浅析我国城市轨道交通建设投融资 [J]. 铁道建筑技术, 2011(S1).
- [3] 周巧莲, 陈建校. 地铁列车运行状态监视系统 [J]. 机车电传动, 2010(2).
- [4] 朱敏铭, 张 磊. OMI 特征提取算法及关于风险偏好的决策规则的研究 [J]. 现代计算机, 2010(10): 5-9.
- [5] 杨建博, 袁中凡. 基于最优互信息的特征提取 [J/Q/L]. 计算机与信息技术, 2008(4): 13-16.
- [6] 唐 亮, 段建国, 许洪波, 梁 玲. 基于互信息最大化的特征选择算法及应用 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(13): 130-133.