

城市轨道交通线网级电力调度系统应用研究

张长开¹ 刘 彬² 解 凯¹ 李 莹¹ 张志学¹

(1. 南瑞继保电气有限公司, 211102, 南京; 2. 南京地铁建设有限责任公司, 210012, 南京)

摘 要 [目的]城市轨道交通网络化建设趋势日益明显,作为城市轨道交通核心业务的线网级电力调度系统的研究与发展也得到越来越多的重视,需要对系统软件架构、数据交互、云平台部署等内容进行深入研究。[方法]针对城市轨道交通线网级电力调度系统设计了应用和平台相互解耦的系统软件架构,在此基础上,针对平台层的数据库建模技术、数据订阅和发布技术,应用层的网络拓扑分析和数据分片等关键技术进行了较为详细的研究和论述。[结果及结论]系统软件平台和应用解耦以及规范接口定义、数据订阅与发布技术等相关技术的采用,有利于促进后期线网级电力调度应用分析业务的不断扩展。多节点分布式实时数据库采用分片技术,一方面使得线网级电力调度系统更方便在云平台上进行容器化部署,另一方面在不中断业务运行情况下,解决了线网级电力调度系统实时数据库容量随着线路增建需要不断扩容的问题。

关键词 城市轨道交通; 电力调度系统; 系统架构; 网络拓扑; 云平台

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.043

Research on Application of Urban Rail Transit Network-Level Power Dispatching System

ZHANG Changkai¹, LIU Bin², XIE Kai¹, LI Ying¹, ZHANG Zhixue¹

(1. NR Electric Co., Ltd., 211102, Nanjing, China; 2. Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210012, Nanjing, China)

Abstract [Objective] With the increasingly clear trend of network construction in urban rail transit, the line-level power dispatch system, as the core business of urban rail transit, is receiving more and more attention on its research and development. It is necessary to carry out an in-depth research on system software architecture, data interaction, cloud platform deployment, etc. [Method] A system software architecture in which applications and platforms are decoupled from each other is designed for the urban rail transit network-level power dispatching system. On this basis, key technologies such as database modeling technology, data subscription and publishing technology at the platform layer, network topology analysis and

data sharding at the application layer are studied and discussed in detail. [Result & Conclusion] The decoupling of system software platform and application, as well as the adoption of related technologies such as standardized interface definition, data subscription and publishing technology, is beneficial for promoting the continuous expansion of the network-level power dispatching application analysis business in the later stages. The multi-node distributed real-time database adopts sharding technology, which on one hand makes it easier for the network-level power dispatching system to be containerized on the cloud platform, and on the other hand without interrupting business operations, solves the problem of continuous expanding real-time database capacity of the network-level power dispatching system with the construction of new lines.

Key words urban rail transit; power dispatching system; system structure; network topology; cloud platform

随着城市轨道交通线网化运营趋势发展,线网级业务系统的研究和应用越来越广泛^[1-2]。线网级电力调度系统作为城市轨道交通线网级业务系统核心应用之一,其网络化运营尤其具有重要意义。在城市轨道交通网络化发展日益明显的趋势下,现有的单一线路级 PSCADA(电力监控系统)越来越难以满足城市轨道交通各条线路之间协调优化和线网级电力调度的需求。通过线网级电力调度系统可以实现对主变电所及中压环网供电系统的快速灵活调整,实现对所有线路供电设备的监视和控制,在紧急情况下为快速支援供电、故障快速恢复供电提供技术支撑。目前,在南京、上海、广州、长沙等城市都已经开始建设线网级电力调度系统,并且已经取得了阶段性研究和应用成果。

近年来,关于城市轨道交通网络化电力监控系统的探索和研究获得很多关注^[3-7],但对于线网级电力调度的应用扩展架构设计及实时数据库分片云平台部署都少有涉及。本文介绍了城市轨道交通线网级电力调度系统平台层及应用层的解耦软件架构设计,更有利于线网级电力调度系统业务应

用的长期发展和持续不断升级、更新,也方便与线网级其他业务系统之间的数据交互。在此基础上,针对系统建设中的数据库建模、数据订阅和发布、网络拓扑分析、数据库分片等技术进行了较为深入的研究分析,希望能够为后期各城市线网级电力调度系统的研究及应用提供借鉴。

1 系统架构

1.1 硬件架构设计

城市轨道交通线网级电力调度系统硬件设备架构设计,一般由 PSCADA 采集服务器、系统应用分析服务器、历史存储服务器、操作人员监视工作站,以及交换机、防火墙等网络设备组成。如果在四区存在 Web 应用,或者需要和办公网进行业务交互,则在一区和四区之间还须通过物理安全隔离装置进行单向数据隔离。

在数据通信网络配置上,线网控制中心的线网级电力调度系统通过与现有线路级 OCC(运行控制中心)环网联通,实现与 110 kV 主变电所数据的通信。通过在主变电所远动机配置,直接给线网级电力调度系统转发数据,实现线网级电力调度系统与

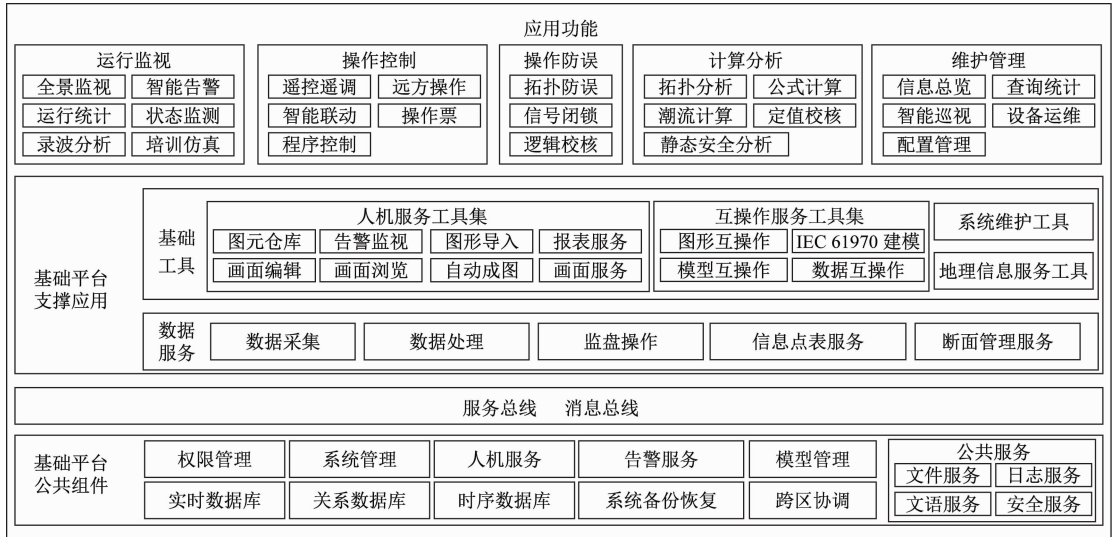
110 kV 主变电所之间的数据直接采集。对于 35 kV 降压变电所、混合变电所,如果具备条件,可以通过线路级 OCC(或线路级 PSCADA)环网和线网中心环网相连来直接采集数据;如果不具备条件,可以由线路级 OCC(或线路级 PSCADA)转发数据。

1.2 软件架构设计

线网级电力调度系统软件架构包括基础平台和应用功能两部分,如图 1 所示。其中基础平台包括基础平台公共组件及基础平台支撑应用两部分。

基础平台公共组件为各类分析应用的开发、运行和管理提供基础的数据和维护管理服务,包括模型管理、实时数据库、关系数据库、系统管理、权限管理及公共服务等模块。

基础平台支撑应用包括基础和数据服务工具两部分内容。数据服务包括数据采集、数据处理、监盘操作、信息点表服务和断面管理服务等模块,为应用开发提供基础数据服务。基础工具包括人机服务工具集、互操作服务工具集、系统维护工具、地理信息服务工具等,为应用开发提供基本的图形、数据、模型支持工具,满足应用开发的一般需求。



注:IEC 61970 建模指按 IEC 61970 系列标准要求建模。

图 1 线网级电力调度系统软件架构

Fig. 1 Software architecture of network-level power dispatching system

2 数据订阅与发布

2.1 数据服务框架

城市轨道交通线网级电力调度系统获取的供电系统数据汇集了全市轨道交通供电系统的完整

数据,既有通过直接采集方式获取的数据,也有通过线路级综合监控系统转发的数据。为了更好地服务于线网级其他业务应用系统,线网级电力调度系统为其他后建线路电力监控系统提供共享主变电所数据,并在基础平台数据服务层提供数据订阅

与发布机制。线网级电力调度系统采集处理供电系统实时数据之后,实现了城市轨道交通全线网所有业务的多点共享,减少了各系统之间多方通信协议开发及多次数据汇集的中间环节,提高了其他业务系统使用全网供电系统数据的实时性和一致性。

数据订阅与发布技术采用面向服务体系架构的数据交互方式^[8]。数据订阅与发布如图 2 所示。线网级电力调度系统平台层通过数据订阅与发布技术直接将采集的供电系统数据发送给其他业务系统,实现了线网控制中心各业务系统实时数据的同步处理,避免了多次转发及处理造成的延时。线网级电力调度系统对内提供注册服务,对外提供供电设备实时数据共享服务。其他业务系统均可通过线网级电力调度系统提供的服务来查询或订阅所需的供电系统实时数据。

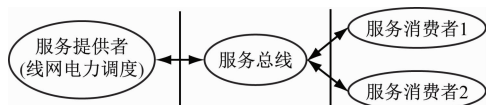


图 2 数据订阅与发布示意图

Fig. 2 Diagram of data subscription and publication

通过数据订阅与发布技术,作为接收方的其他业务应用具有数据接收的决定权。这提高了数据采集及转发的灵活性和快速性,使得线网控制中心供电系统数据维护从多端维护变成了电力调度系统单端维护,更有利于数据维护和应用集成,不仅提高了数据传输网络的利用效率,也保证了数据传输的时效性和一致性。

2.2 接口实现

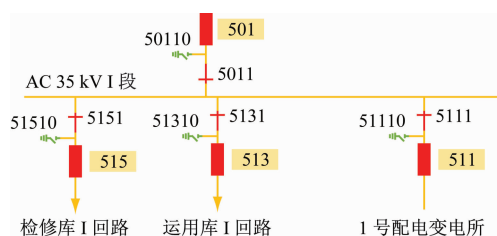
线网级电力调度系统的平台层通过采用消息的方式发布模拟量、状态量、告警的实时数据。在基础数据平台层定义了消息体和消息类型,上层应用及其他业务系统可通过平台消息总线接收指定的消息来获取实时数据的变化情况。状态量和模拟量可以共用一个消息结构体,通过消息事件号进行区分,也可以根据需要分别定义。

3 网络拓扑分析

3.1 拓扑模型

供电系统网络拓扑是线网级电力调度系统的基础功能模块,为供电系统状态估计、潮流计算、静态安全分析、故障分析等应用模块提供基础网络结构模型。城市轨道交通供电系统的网络拓扑模型

可以通过 3 个层次逐级进行拓扑分析。这 3 个层次包括:连接点(Connectivity Node)、拓扑节点(Topological Node)和拓扑岛(Topological Island)。图 3 中,连接点就是相互连接的电气设备之间的汇聚点。拓扑节点由闭合的断路器、隔离开关连接的多个连接点构成,这些闭合的开关和刀闸把这些连接点相互连接,形成电气拓扑节点。拓扑岛(电气岛或孤岛)是通过线路及变压器等支路联结在一起的拓扑节点集合。



注:501、511、513、515 为闭合的断路器;5011、5111、5131、5151 为闭合的隔离开关;50110、51510、51310、51110 为接地刀闸;箭头表示负荷线路。

图 3 某降压变电站示意图(部分)

Fig. 3 Diagram of a step-down substation (partial)

在图 3 中,断路器、隔离开关和接地刀闸相互之间的连接线交接处就是一个连接点,母线及其连接线也作为一个连接点;闭合的断路器(501、511、513、515)、闭合隔离开关(5011、5111、5131、5151)和相连的母线隶属同一个拓扑节点;多个拓扑节点通过具有电气连接的线路、变压器关联到同一个拓扑岛。针对轨道交通牵引变电所中包含直流供电相关设备的拓扑分析模型类关系图如图 4 所示。

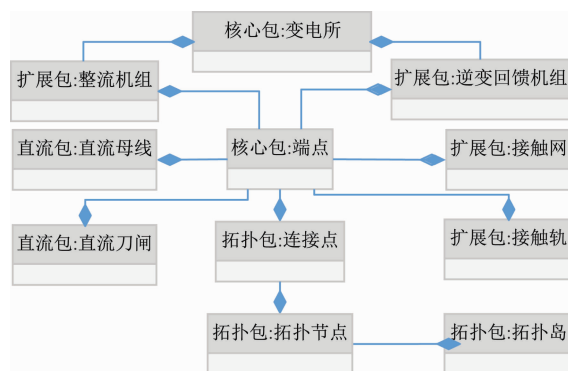


图 4 牵引变电所拓扑模型类图

Fig. 4 Class diagram of traction substation topology model

3.2 拓扑算法

在电力系统网络拓扑分析中,比较常用的拓扑搜索算法包括 DFS(深度优先算法)和 BFS(广度优先算法)。这两种搜索算法都适用于连接点和拓扑

点的搜索——搜索电气导通的连接节点形成拓扑节点,搜索电气导通的拓扑点生成拓扑岛。对于线网级电力调度系统,节点规模并不是特别大,DFS和BFS的效率基本相当。

在一般的电力系统中,拓扑分析算法都采用无向图搜索方式。需要注意的是,由于城市轨道交通供电系统存在整流机组和逆变回馈器等具有拓扑方向性的特殊设备,故整流机组一般按照交流侧进行带电拓扑分析,逆变回馈器按照直流侧进行带电拓扑分析。

在实际应用过程中,一般会在断路器或隔离开关发生变位信号时,启动拓扑分析的重计算。但是根据图论的基本原理可知,若处于分位的断路器或隔离开关的2个端点隶属于同一个电气岛,则断路器及隔离开关的闭合不会引起电气岛的变化。

此外,在拓扑分析计算之后对实时数据库中各电气设备带电状态更新时,要与各设备之前的状态进行对比,判断其带电状态是否发生变化,并只对带电状态发生变化的设备模型发送实时数据库的更新报文,以避免重复更新瞬间产生大量的网络报文。

4 数据库分片

线网级电力调度系统的实时数据库均为大容量数据库。考虑到线网级电力调度系统的实际应用场景,随着新建线路的不断增加,实时数据库的容量调整需求会较大。在供电系统中各线路之间既有一定的关联性,也具有一定的独立性,是数据库分片和容器化部署技术的良好应用场景。相关技术在电力系统和城市轨道交通行业也有一些研究与应用^[8-9]。

采用数据库分片技术既能很好地解决线网级电力调度系统数据库容量的水平弹性扩展问题,又能显著降低局部数据的查询响应时间。

数据库分片过程为:首先,根据线路信息,对线网级电力调度系统全局数据进行逻辑分片;然后,通过容器化部署形成各自独立的物理分片;最后,通过在不同的容器中部署同一逻辑分片数据来实现冗余备份。

4.1 OID 索引编码

数据库分片的架构基础和检索效率依赖于强大的数据库引擎技术。分布式实时数据库通过64位长整型OID(对象标识符)不仅能唯一标识一个

物理设备(一个逻辑设备)或者一个测点信息,还能标识相应设备及测点对应的数据库分片信息。

数据库分片OID编码结构如图5所示。OID编码按表号、域号、分片号及记录号分为4段。其中:对于设备,OID域号为0;对于模拟量和状态量,OID域号为量测类型号。对OID编码进行解析,即可获得分片号、表号、域号,还可根据OID查询设备对象的其他域信息。

OID 编码			
表号	域号	分片号	记录号
2B	2B	1B	3B

注:2B 等为编码长度。

图5 数据库分片OID编码

Fig. 5 Database sharding OID encoding

例如,某OID编码十进制为“114 | 560 | 362 | 816 | 209 | 352”,对应的二进制为“0000000110010111 | 0000000000001011 | 00000011 | 000000000000000011100100”,可用于标识断路器(表号407,二进制为0000000110010111)的分合状态域(域号11,二进制为0000000000001011),所在分片号为3(二进制为00000011)。如果要查询该断路器的其他域信息需要使用断路器OID(把量测点OID的域号清零,二进制为0000000110010111 | 0000000000000000 | 00000011 | 000000000000000011100100,十进制为114 | 560 | 315 | 571 | 569 | 096)进行检索。

4.2 CIM(通用信息模型)分片

在线网级电力调度系统中对供电系统实时数据库进行数据库分片,总体上可以按照线路区域来划分,其他所有110 kV主变电所单独占用1个实时数据库分片。

对于各分片实时数据库共享的供电系统CIM(公共信息模型)容器类或设备类信息(如电压类型类(basevoltage)、区域类(subcontrolarea)、线路类(acline)等),可采用两种方式进行部署:

1) 方式一。CIM和110 kV主变电所共用1个实时数据库分片,其他线路实时数据库分片可引用这部分内容。

2) 方式二。在所有的实时数据库分片中都留有副本。基于这种部署方式本地进程可以通过实时数据库文件映射方式紧耦合快速访问。

这两种部署方式各有特点。在实际应用过程中,可以根据自有数据库引擎特点选择不同的方式

进行设计及部署。

5 结语

在城市轨道交通网络化建设不断发展的情况下,线网级电力调度系统在研究领域越来越受重视,并已经在很多城市成功投入运行。现有的城市轨道交通各类应用系统软件对平台和应用的界定并不十分明确,也没有制定较为完善的软件平台技术规范。这在一定程度上限制了后期业务应用扩展的需求开发。对此,本文在软件架构方面基于平台层和应用层相互解耦的设计思想,论述了城市轨道交通线网级电力调度系统软件架构的重新设计。平台和应用相互解耦的方式可以更有效地促进应用业务长期、可持续地不断完善和发展。本文详细介绍并论述了线网级电力调度系统的平台层数据订阅和发布技术,以及应用层网络拓扑分析和拓扑算法技术,可以为后续应用开发提供一定参考。通过采用实时数据库分片技术,一方面,使得线网级电力调度系统更方便地在云平台上进行容器化部署;另一方面,也解决了城市轨道交通线网级电力调度系统实时数据库容量随着系统发展不断扩容的问题。

参考文献

- [1] 解凯,钱晓超.城市轨道交通线网指挥中心系统关键技术研究[J].现代城市轨道交通,2018(6):53.
XIE Kai, QIAN Xiaochao. Study on key technology of traffic control center system of transit network[J]. Modern Urban Transit, 2018(6): 53.
- [2] 谭耿.城市轨道交通线网级智能调度业务需求研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(11):43.
TAN Geng. Research on business requirements of urban rail transit network level intelligent dispatching[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(11): 43.
- [3] 杨凯,喻奇,汪理,等.都市圈轨道交通线网级电力调度系统应用方案[J].城市轨道交通研究,2023,26(3):216.
YANG Kai, YU Qi, WANG Li, et al. Application scheme of power SCADA system for metropolitan rail transit network[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 216.
- [4] 葛森,刘琴,俞铭,等.城市轨道交通线网级云平台电力监控系统研究[J].无线互联科技,2023,20(1):66.
GE Miao, LIU Qin, YU Ming, et al. Research on power monitoring system of urban rail transit network level cloud platform[J]. Wireless Internet Technology, 2023, 20(1): 66.
- [5] 李莹,张志学,邹大云,等.轨道交通PSCADA系统设计与应用[J].工业控制计算机,2020,33(5):45.
LI Ying, ZHANG Zhixue, ZOU Dayun, et al. Design and application of PSCADA for urban rail transit[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(5): 45.
- [6] 解凯,邹大云,赵佳微,等.城市轨道交通供电系统的CIM拓展及应用[J].电测与仪表,2020,57(14):63.
XIE Kai, ZOU Dayun, ZHAO Jiawei, et al. Extension and application of CIM for the urban railway traction power supply system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 63.
- [7] 王洪杰,林珊,潘家颖.城市轨道交通供电系统线间联络环网应用研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(10):76.
WANG Hongjie, LIN Shan, PAN Jiaying. Application of interconnection ring network among lines in urban rail transit power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 76.
- [8] 刘德贺,张高峰,李晖,等.基于混合服务架构的电网事故追忆应用研究[J].工业控制计算机,2023,36(10):148.
LIU Dehe, ZHANG Gaofeng, LI Hui, et al. Research on PDR of power grid based on hybrid service architecture[J]. Industrial Control Computer, 2023, 36(10): 148.
- [9] 许洪强,姚建国,於益军,等.支撑一体化大电网的调度控制系统架构及关键技术[J].电力系统自动化,2018,42(6):1.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Architecture and key technologies of dispatch and control system supporting integrated bulk power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 1.

· 收稿日期:2024-06-24 修回日期:2024-08-12 出版日期:2025-04-10
Received:2024-06-24 Revised:2024-08-12 Published:2025-04-10
· 第一作者:张长开,高级工程师,zhangck@nrec.com
通信作者:张志学,正高级工程师,zhagnzx@nrec.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821