

轨道交通多中心时钟源同步统一的必要性及应用技术研究

简 青

重庆市轨道交通（集团）有限公司 重庆 400020

摘 要：在轨道交通领域，多中心运营模式逐渐形成。这种模式有其特点，但也面临诸多挑战。时钟同步对于保障行车安全、提升运营效率、优化系统管理维护及契合行业标准极为必要。它的原理、架构及技术实现备受关注。以武汉地铁为例，依托光谷控制中心的中心一级母钟，利用PTP和NTP接口达成多中心时钟同步，为长达606km的线路网构建统一时间基准，显著增强了运营效能。

关键词：轨道交通；多中心时钟源；同步统一；必要性；应用技术

引言

随着城市轨道交通规模的急剧扩张，多中心运营模式已成为行业发展的必然趋势。在这种复杂架构下，时钟源的同步统一作为保障系统稳定运行的关键技术，其重要性日益凸显。精确的时间同步不仅是列车安全运行的基础，也是提升运营效率、优化系统管理的核心支撑。一旦时钟出现不同步的情况，极有可能导致列车调度失误、信号控制紊乱，进而严重威胁轨道交通系统的正常运转。因此，深入研究时钟源同步统一技术，对于推动轨道交通行业的高质量发展具有重要的现实意义。

1 轨道交通多中心运营模式概述

1.1 多中心架构的形成与发展

随着城市规模的扩张以及轨道交通客流量的持续增长，单一控制中心难以满足日益复杂的运营需求。多中心架构应运而生，它将轨道交通系统划分为多个相对独立又相互协作的控制区域，每个区域配备独立的控制中心。这些控制中心分别负责不同线路或区域的运营管理，如线路监控、列车调度等。这种架构有助于分散管理压力，提高运营的灵活性与可靠性。早期的轨道交通多中心架构相对简单，各中心之间的协同程度有限。但随着技术的不断进步，各中心之间的信息交互和协同工作能力逐渐增强，形成了更为紧密和高效的多中心运营模式。

1.2 多中心运营模式的特点与挑战

多中心运营模式具有显著特点。一方面，各中心能够针对本区域的实际情况进行精细化管理，根据线路客流量、设备状态等因素灵活调整运营策略。另一方面，不同中心之间需要保持高度的协同，以确保整个轨道交通网络的连贯性和整体性。然而，这种模式也带来了诸多挑战。其中，时钟源的同步统一问题尤为突出。由于各中心在物理位置上相互独立，其时钟系统容易出现偏

差。若时钟不同步，可能导致列车运行时刻不一致，信号控制混乱，通信信息传递错误等问题，严重影响轨道交通系统的正常运行。

2 轨道交通多中心时钟源同步统一的必要性

2.1 保障行车安全

在轨道交通系统中，列车的安全运行依赖于精确的时间控制。准确的时钟同步能够确保列车按照预定的时刻表运行，避免列车之间的追尾、碰撞等事故。在多中心运营模式下，各中心对列车运行的控制需要高度协同。如果时钟源不同步，各中心所掌握的列车运行时间信息将出现偏差，可能导致对列车的调度指令错误。当一个中心认为某列车已到达指定站点，而另一个中心由于时钟差异认为列车尚未到达，此时若发出错误的行车指令，极有可能引发严重的安全事故^[1]。统一的时钟源能够为各中心提供一致的时间基准，使列车运行时刻在整个网络中保持准确和协调，从而有效保障行车安全。

2.2 提高运营效率

精确的时钟同步对于提高轨道交通的运营效率起着关键作用。在多中心运营模式下，不同中心负责的线路之间存在换乘、联运等业务。统一的时钟源能够使各中心在列车发车、到站时间上保持一致，减少乘客换乘等待时间，提高换乘效率。各中心能够根据统一的时间标准进行设备维护、检修计划的安排，避免因时间不一致导致的设备维护冲突。各中心之间的通信、数据传输等也依赖于准确的时间同步，以确保信息的及时、准确传递，提高运营管理的整体效率。

2.3 优化系统管理与维护

轨道交通系统包含众多子系统，如信号系统、通信系统、供电系统等。这些子系统的正常运行需要精确的时间同步。在多中心运营模式下，统一的时钟源有助于对各子系统进行集中管理和维护。当各中心的时钟同步

统一时,系统管理人员能够更方便地对不同区域的子系统进行状态监测和故障诊断。在分析系统故障时,准确的时间信息能够帮助快速定位故障发生的时间点和相关子系统,提高故障排查和修复的效率。统一的时钟源还便于进行系统升级和改造,确保各中心在同一时间基准下进行操作,避免因时间差异导致的系统兼容性问题。

2.4 符合行业标准与规范

在轨道交通行业,国内外均制定了一系列标准和规范,对时钟同步的精度和可靠性提出了严格要求。实现多中心时钟源的同步统一是满足这些标准和规范的必要条件。遵循行业标准有助于提高轨道交通系统的通用性和互操作性,便于不同地区、不同企业之间的技术交流与合作。在国际合作项目或跨区域的轨道交通网络建设中,符合统一的时钟同步标准能够确保系统的兼容性和协同性,促进轨道交通行业的健康发展。

3 轨道交通多中心时钟源同步统一的应用技术

3.1 时钟同步原理

基于网络时间协议的同步原理:NTP是一种用于互联网中时间同步的标准协议。在轨道交通多中心环境下,各中心的时钟设备通过网络与时间服务器进行通信。时间服务器通常具有高精度的时钟源,如原子钟或GPS时钟。各中心时钟设备从时间服务器获取准确的时间信息,并根据NTP协议的算法对自身时钟进行调整。NTP协议通过对网络延迟、时钟偏差等因素的计算和补偿,实现各时钟设备之间的同步。其同步精度在局域网环境下可达毫秒级,在广域网环境下也能达到亚秒级。

北斗时源同步原理:北斗时源同步基于卫星授时技术。北斗卫星搭载高精度原子钟,持续向地面发射包含时间信息的信号^[2]。地面时钟设备的天线接收这些信号,通过计算信号传播延迟,得出本地时钟与北斗时源的时间差。设备依据该时间差调整自身时钟,使本地时钟与北斗时源精准同步。这一过程不断循环,确保轨道交通系统内各时钟始终与北斗标准时间保持一致,为列车运行、调度等提供精准统一的时间基准。

精确时间协议同步原理:PTP是一种专为工业自动化和网络测量等领域设计的高精度时间同步协议。与NTP相比,PTP能够提供更高的同步精度,在理想情况下可达亚微秒级。PTP协议通过硬件时间戳技术,精确测量数据包在网络中的传输延迟,从而更准确地计算时钟偏差并进行同步。在轨道交通多中心系统中,PTP适用于对时间同步精度要求极高的子系统,如信号系统。PTP可采用主从模式,由一个高精度的主时钟设备向多个从时钟设备发送同步信号,实现整个系统的高精度同步。

3.2 同步系统架构

分层式同步架构:在分层式同步架构里,轨道交通系统的时钟同步有序分层。最顶层优先采用北斗卫星时源,其依托我国自主建设的卫星导航系统,具有高可靠性与安全性,为系统提供精准时间基准。次选GPS时源,在全球范围内广泛应用,能在特定场景补充时间同步。再者是BITS时源,通过通信基站提供稳定授时。高精度原子钟作为备用,其具备极高的时间稳定性。各层时源依据优先级递减排列,在运行中,系统优先从高优先级时源获取时间信号,确保时钟同步的准确性与稳定性,保障轨道交通各环节有序运转。

分布式同步架构:分布式同步架构下,各控制中心时钟设备独立运作,既能发送也能接收同步信号。这种架构通过网络实现时间信息交互,灵活性高,某中心时钟故障时,其他中心可继续维持同步。然而,它对网络稳定性和通信延迟有较高要求,需采取有效措施确保时间信息准确传递。这包括加强网络通信稳定性、优化同步算法及采用冗余设计等,以保障时间同步的精确性和可靠性,满足轨道交通系统对时间同步的高标准需求,确保运营安全与效率。

混合式同步架构:混合式同步架构结合了分层式和分布式同步架构的特点。在系统中,既有核心时间源和分层式的时间传递结构,又允许各控制中心之间进行一定程度的分布式时间交互。在一些关键区域或对时间同步精度要求极高的子系统中,采用分层式架构,确保高精度的时间同步。而在其他区域或子系统中,采用分布式架构,提高系统的灵活性和容错能力。

3.3 同步技术实现

硬件设备选型与配置:为实现轨道交通多中心时钟源的同步统一,需要选择合适的硬件设备。时间服务器是关键设备之一,应具备高精度的时钟源、强大的数据处理能力和稳定的网络通信功能。在选择时间服务器时,需根据系统规模和同步精度要求确定其型号和配置。对于大规模多中心系统,可选用具有多端口、高性能的时间服务器。GPS接收设备也是常用的硬件设备,应选择具有良好的抗干扰性能和高精度定位功能的产品。在各中心和子系统中,还需配置相应的时钟模块或设备,确保能够接收和处理时间同步信号。

软件系统设计与开发:时钟同步软件系统负责实现同步协议的运行、时间信息的处理和时钟设备的控制。软件系统需要具备良好的可扩展性和稳定性,能够适应不同的同步架构和硬件设备^[3]。在软件设计中,应充分考虑网络延迟、时钟漂移等因素,采用有效的算法进行时

间补偿和同步控制。软件系统还应具备故障检测和报警功能,当出现时钟同步异常时能够及时发出警报,并采取相应的措施进行恢复。对于多中心系统,软件系统还需实现各中心之间的时间信息交互和协同同步功能,确保整个系统的时钟同步统一。

网络通信保障:稳定可靠的网络通信是实现时钟同步的基础。在轨道交通多中心系统中,应构建专用的时钟同步网络,确保时间同步信号的快速、准确传输。网络应具备高带宽、低延迟和良好的抗干扰性能。采用冗余网络架构,当主网络出现故障时,备用网络能够及时切换,保障时间同步不受影响。在网络通信过程中,还需采取加密和认证措施,防止时间同步信号被窃取或篡改,确保同步的安全性和可靠性。

4 轨道交通多中心架构现状及时钟源同步统一的实施案例分析

为保证一个城市的轨道交通线网拥有统一且唯一的时间基准,拥有多条轨道交通线路的城市大多设置了线网中心(指挥中心),在此设置一套时钟系统,除了为线网中心其他系统及子钟提供标准时间外,还配置多路多种类型接口,为其它各条线路的时钟系统提供标准时间。目前拥有线网中心或上层网中心的城市有:北京地铁TCC线网中心、上海上层网、广州线网中心、深圳线网中心、天津TCC、青岛MMCC、武汉线网中心、乌鲁木齐TCC、厦门线网中心、南宁地铁线路、沈阳线网中心等。

在轨道交通运营中,时间同步对于保障系统的高效、安全运行起着至关重要的作用。典型的是武汉地铁通过科学构建多中心架构,并实现时钟源同步统一,为其庞大复杂的地铁网络提供了精准的时间保障。

截至2024年12月,武汉地铁运营网络已极为庞大,线路总里程达606km,12条已开通运营的线路纵横交错,连接武汉三镇各个区域,每日客流量高达数百万之巨。如此规模的系统,设有硃口路、铁机路、三金潭、光谷以及国博等多个控制中心,各中心分别承担不同区域线路的运营管理重任。

其中,光谷控制中心被确立为线网中心,其核心地位通过一台中心一级母钟得以彰显。这台母钟为整个地

铁网络提供统一时间基准,配备了PTP(精确时间协议)接口和NTP(网络时间协议)接口等多种先进接口类型。PTP接口以亚微秒级的时间同步精度,确保标准时间在长距离传输中,时间偏差被控制在极小范围,精准地将时间传输至各控制中心的一级母钟。NTP接口则在复杂网络环境下,凭借其对不同网络状况的良好适应性,稳定传递标准时间。

以各控制中心管辖范围来看,硃口路控制中心负责约60km线路及40个车站,铁机路控制中心管理80km线路与50个车站,三金潭控制中心承担100km线路及60个车站的运营,国博控制中心负责70km线路和45个车站。这些控制中心的一级母钟通过PTP和NTP接口与光谷控制中心的中心一级母钟相连,精准接收标准时间信号,并将其传递至各自管辖范围内的车站、车辆段及其他相关设备。

武汉地铁凭借这一完善的时钟源同步统一系统,实现了606km线路网采用统一唯一的时间基准。这一精准时间基准,使列车发车、到站时刻精准无误,各类运营设备协同工作默契高效。在提升运营效率的同时,极大地保障了乘客出行体验,为城市轨道交通的高效、安全运行树立了行业典范,其成功经验对其他城市地铁建设与运营具有极高的借鉴价值。

结束语

综上,轨道交通多中心时钟源同步统一,对保障运营安全、提升效率、优化管理意义重大,武汉地铁等案例已证实其成效。但当下,国内部分轨道交通多控制中心时钟源尚未统一,存在列车运行紊乱、调度指令失误等潜在风险,影响系统整体性能。因此,各城市运营方应高度重视,积极推进时钟源同步统一项目建设与运营改造,这是当下运营刚需,更是推动行业高质量发展的关键。

参考文献

- [1]黄荣光,梁宇.列车全自动运行信号系统时间同步方案[J].城市轨道交通研究,2024,27(2):203-206,211.
- [2]张成志,刘晓晖,罗育荣,等.TD-LTE系统新增GPS时钟源方案研究[J].铁道通信信号,2023,59(5):42-45.
- [3]姜磊.轨道交通时钟系统部署方案[J].数字通信世界,2019(4):105.