



面向微秒级开关控制的地面分布式网络研究

曹薇¹, 肖健¹, 赵岸峰¹, 徐娟¹, 张宝剑¹, 石煜²

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 421001;

2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 421001)

摘要: 基于长定子直线电机的驱动系统, 无论是高速磁浮系统, 还是高速直线驱动系统、超高速直线驱动系统, 都呈现出“源-控-网-端”强耦合特性。其中“网”以地面分布式网络为核心, 连接牵引控制单元与定子开关群, 其实时性与可靠性决定定子换步响应性能及牵引输出能力, 是驱动系统稳定高效运行的关键。面向超高速直线驱动系统, 定子开关换步控制已达到微秒级响应需求, 对地面分布式网络提出了更高的性能要求。文章提出一种适配超高速工况的微秒级定子开关分布式控制网络设计方法。首先, 回顾高速磁浮换步策略与网络架构, 明确其百毫秒级切换响应难以满足超高速场景需求; 其次, 针对该需求构建“电源模块-换相单元”分布式控制新架构, 同步优化网络拓扑与实时传输机制, 将开关换步响应延迟压缩至微秒级; 最后, 依托高速直线驱动试验台开展性能验证, 试验结果表明: 该方法可将开关控制延迟由百毫秒级优化至百微秒级, 牵引力输出更加连续平稳, 能够适配更大加速度、更高速度的应用场景。本文提出的新型分布式控制网络架构, 突破了既有网络的实时性瓶颈, 可为后续超高速直线驱动系统的设计提供理论支撑与工程应用参考。

关键词: 地面分布式网络; 微秒级开关控制; 超高速直线驱动; 分段供电; 试验验证

中图分类号: TM359.4; U237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2026)02-0216-11

0 引言

长定子直线电机是一种将电能直接转换为直线运动机械能的动力装置, 因其次级结构轻巧、速度上高等优势, 被广泛应用于高速磁浮、矿井提升等领域^[1]。在高速磁浮交通中, 由于摆脱了轮轨束缚, 牵引设备安装于地面可大幅扩容, 直线电机可将列车牵引至更高速; 在超高速平台中, 凭借强大的瞬时加速性能, 该电机可满足超大加速度、超高速等多种极限场景的需求。随着技术与装备的不断进步, 长定子直线电机驱动系统及其极速应用已成为行业研究热点。

长定子直线电机工作时, 向定子绕组通入交变电流, 可在气隙中产生行波磁场, 通过定子与动子的相互作用

实现直接直线运动。若对整个长定子持续通电, 会出现漏感过大、功率因数及能效偏低的问题^[2-3]。针对该问题, 已有学者提出将长定子划分为若干小段, 通过牵引控制网络及定子开关切换, 仅对载具(或动子)所在定子段供电, 以此实现牵引力连续输出^[4]。该分段供电模式已成为长定子直线电机驱动系统的主流控制方式。

随着长定子直线电机驱动系统向超高速方向发展, 载具跨越定子段的时间大幅缩短, 开关切换频率显著提升。经计算, 极限工况下需实现微秒级的开关响应与精准切换^[5-6]。现有控制网络方案的响应速度已无法满足超高速场景的核心需求, 且在稳定性、同步性与实时性的协同优化上存在不足, 亟需开展进一步的研究, 创新设计适配微秒级开关控制需求的地面分布式网络, 以突破现有技术瓶颈。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB4302503)

通信作者: 曹薇, 女, 硕士, 主要从事磁浮领域牵引控制系统方面的研究; E-mail: 3218652788@qq.com

引用格式: 曹薇, 肖健, 赵岸峰, 等. 面向微秒级开关控制的地面分布式网络研究[J]. 机车电传动, 2026(2): 216-226.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.024.

Citation: CAO Wei, XIAO Jian, ZHAO Anfeng, et al. Research on ground distributed network for microsecond-level switching control[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 216-226.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.024.

本文将设计一种面向微秒级开关控制的地面分布式网络, 解决现有控制网络响应速度不足、无法适配超高速直线驱动场景的问题, 同时保障开关切换的稳定性与同步性。研究工作主要包括: 回顾高速磁浮双端三步法换步策略及通信环网架构, 明确其性能局限; 针对超高速直线驱动系统微秒级高实时控制需求, 设计“电源模块-换相单元”分布式定子开关控制方案, 优化网络拓扑与实时传输机制, 有效压缩开关换步切换延迟; 在高速直线驱动试验台上开展性能验证, 以验证所提方案的可行性与优越性。

本研究提出的差异化控制网络方案, 可有效突破传统控制网络的响应速度瓶颈, 为超高速直线驱动系统的分段供电控制提供技术支撑, 对推动长定子直线电机在超高速领域的工程应用具有参考意义。

1 高速磁浮系统地面分布式网络设计与试验验证

本章以既有高速磁浮系统为典型应用案例, 阐述

其地面分布式网络的架构与原理, 并通过半实物仿真试验, 验证了既有高速磁浮分布式网络仅具备百微秒级切换性能、其实时性存在固有瓶颈, 明确了其网络架构无法适配超高速直线驱动工况的核心问题, 为后文新型微秒级控制网络架构的优化设计奠定研究基础与理论依据。

1.1 高速磁浮系统双端三步法供电架构

高速磁浮定子段换步策略主要包括两步法、三步法^[7-8], 这里以双端供电三步法为例, 其牵引系统电气连接与供电关系如图1所示。牵引变电所包含三组变流器单元, 通过三组馈电电缆轮流向轨道两侧定子段绕组供电。双端供电三步法的定子段电流随时间变化示意图如图2所示。三步法换步策略的主要特点在于, 列车运行的任何时刻, 其所在轨道两侧的定子段绕组始终保持通电状态, 因此列车在通过两个定子段期间没有牵引力损失, 运行平稳性和舒适度较高^[9-10]。

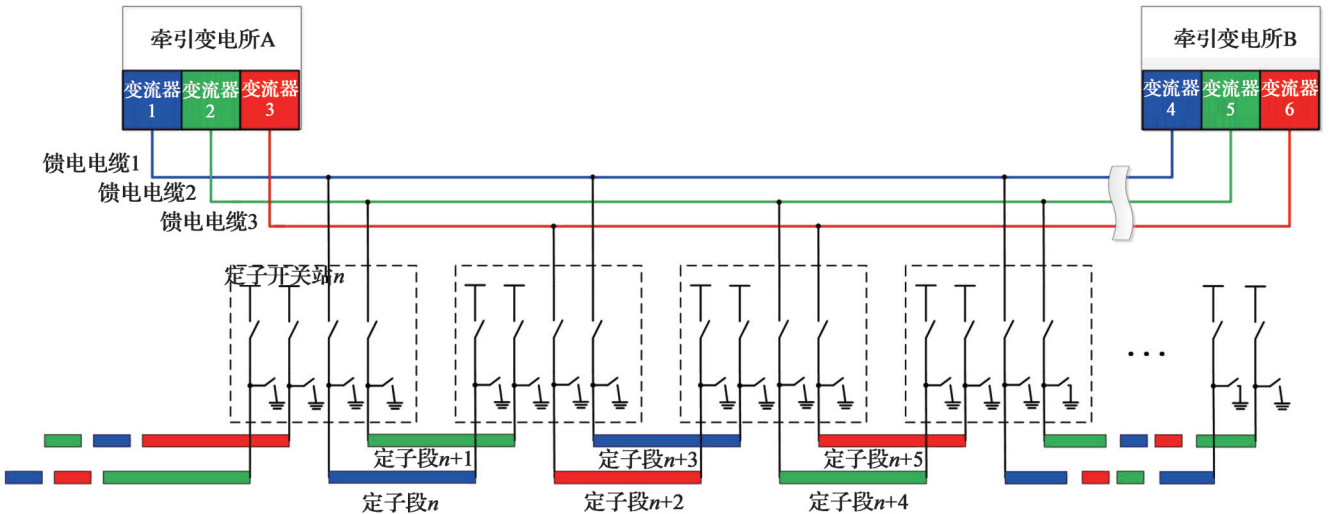


图1 双端供电三步法的牵引系统电气连接与供电关系图

Fig. 1 Schematic diagram of electrical connections and power supply relationships of traction system in double-end power supply configuration based on the three-step method

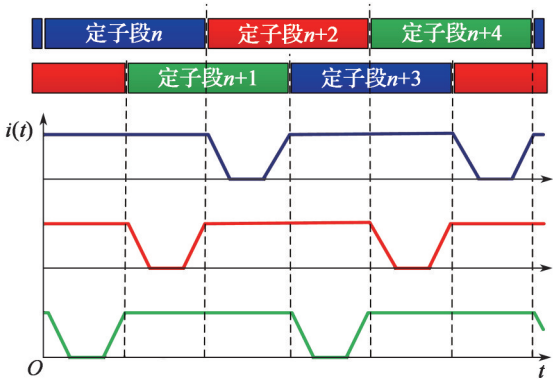


图2 双端供电三步法的定子段电流随时间变化示意图
Fig. 2 Time-varying stator segment currents in double-end power supply configuration based on the three-step method

1.2 上海磁浮线分布式网络设计与验证

1.2.1 网络设计

高速磁浮系统必须通过设立定子开关站, 采用分段供电的方式为磁浮列车提供电能, 供电通过沿线布置的定子开关站 (switching station, SS) 进行分配, 并通过馈电电缆分别向轨道左右两侧的定子段供电。沿线所有定子开关站控制单元 (switch station control, SSC) 通过光纤链路与两端牵引变电所的电机控制单元 (motor control unit, MCU) 组成通信环网, 构建多层控制逻辑。SSC接收MCU发送的控制指令, 驱动对应定子开关站内的定子开关动作, 从而实现定子段供电的平稳切换与同步控制。

定子开关站环网通过光电交换机将MCU与SSC组成光纤环网，支持MCU和SSC的实时通信，环网拓扑图如图3所示。环网将左右轨定子段对应的SSC分别依次连接，相比按物理位置依次连接，一方面减少了

MCU每个方向的网络节点，降低传输时延；另一方面光电交换机之间距离近，方便预留双分区改造光纤。MCU与48台SSC采用组播通信，相比单播通信，减少了报文头部开销，降低了通信带宽。

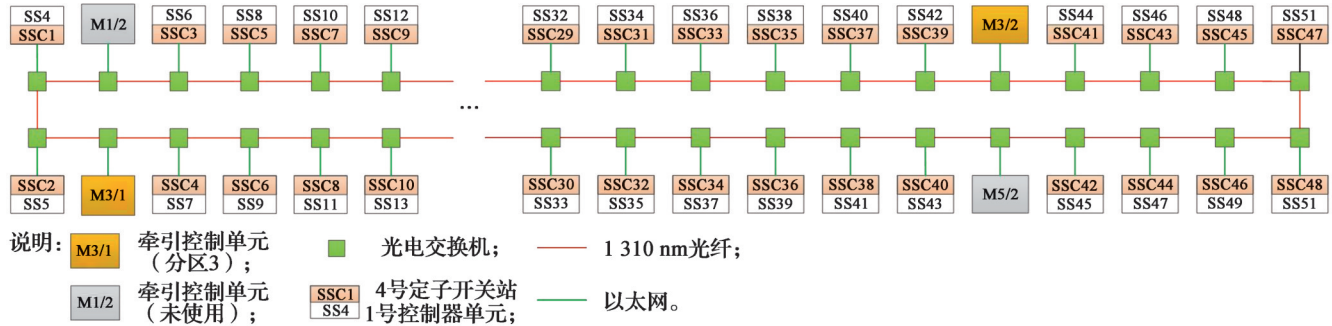


图3 定子开关站环网拓扑

Fig. 3 Ring network topology of stator switching station

鉴于实际线路正处于运营状态，无法进行现场测试，本研究基于半实物仿真平台开展试验验证工作。该平台采用与上海磁浮线路一致的系统配置，牵引主电路采用仿真模型^[11-12]，控制设备按1:1实物比例搭建，完整还原了线路通信与控制过程。

半实物仿真平台通过实时仿真机和综合仿真机，承载车辆数字模型、三电平牵引变流器模型以及长定子直线电机数学模型，实现对真实运营场景的高精度复现^[13-16]。仿真平台的牵引控制系统由MCU、牵引变流控制单元（converter control unit,CCU）及网络通信设备与介质组成。

为了验证方案的可行性，基于以上半实物仿真平台开展了定子开关站环网的试验验证。在硬件在环部分，设置4台实物SSC，连接MCU与综合仿真机，其中，2台实物SSC与2台MCU组成实物定子开关站环网，另2台实物SSC与分区4台MCU组成实物定子开关站环网；在软件仿真部分，建立虚拟SSC集群，连接MCU与综合仿真机，模拟48节点行为；在接口设计部分，实物SSC与实现虚拟SSC模型设计的综合仿真机采用硬线连接，并通过以太网交换机与MCU建立组播通信。SSC通过光电交换机接入轨旁控制光纤环网，实现与MCU的通信连接。运行过程中，SSC具备双向通信与控制能力：一方面，SSC实时采集定子开关站的状态信息，并通过通信网络上报给MCU；另一方面，当接收到MCU下发的分闸/合闸控制命令后，SSC通过数字量输出接点控制中间继电器的分断或接通，从而完成对定子段的停送电控制。

针对高速磁浮定子开关站环网开展带宽测算，在单分区满负荷通信场景下，系统以太网端口最低需配置5 Mbps带宽。该配置可满足现有高速磁浮系统百毫秒级开关响应的传输要求，但受通信机制与带宽条件限制，既有网络架构无法进一步降低传输时延，难以适配超高速工况对微秒级控制响应的要求。从带宽层

面剖析现有方案的性能短板，为后续新型网络架构的优化设计提供支撑。

1.2.2 网络仿真验证

基于高速磁浮交通系统定子段分段供电控制软件的信号交互关系，在仿真平台上开展测试的路径如图4所示。测试路径如下：定子段控制软件下发定子开关分闸/合闸指令给MCU控制软件；MCU控制软件基于TRDP（列车实时数据协议，train real-time data protocol）将指令下发给光电交换机实现各设备之间的以太网通信；光电交换机传达定子开关分合指令给SSC软件；SSC软件输出动作指令给仿真机内的虚拟开关，通过DI、DO通道实现状态采集和动作指令输出。

对指令下发至状态反馈的全链路响应时长开展多次测试，测得开关合闸响应时间范围为79~129 ms，分闸响应时间范围为59~129 ms。试验结果表明，既有架构下开关切换时延为百毫秒级，与超高速直线驱动系统所需的微秒级响应能力存在明显差距。

基于半实物平台开展三步法换步过程中的牵引力动态分布试验，不同变流器分配牵引力的动态变化如图5所示。由图5可知，第一次定子段切换时，变流器1分配的牵引力逐步减小，变流器2分配的牵引力逐步增加；第二次定子段切换的换步过程中，变流器2分配的牵引力逐步减小，变流器3分配的牵引力逐步增大，以保证列车总牵引力保持不变。

分配的牵引合力和反馈的合力如图6所示。由图6可知，三步法换步过程中，左右轨的总反馈力和系统的总下发力始终保持一致，这是由于列车跨接的前后定子段由不同变流器同时供电，不存在因开关切换引起的牵引力损失。

综合各项试验结果，高速磁浮现有换步控制与网络方案能够实现平稳切换，但百毫秒级的开关响应时延成为系统向超高速工况拓展的主要瓶颈，需要进一步明确后续研究的优化方向。

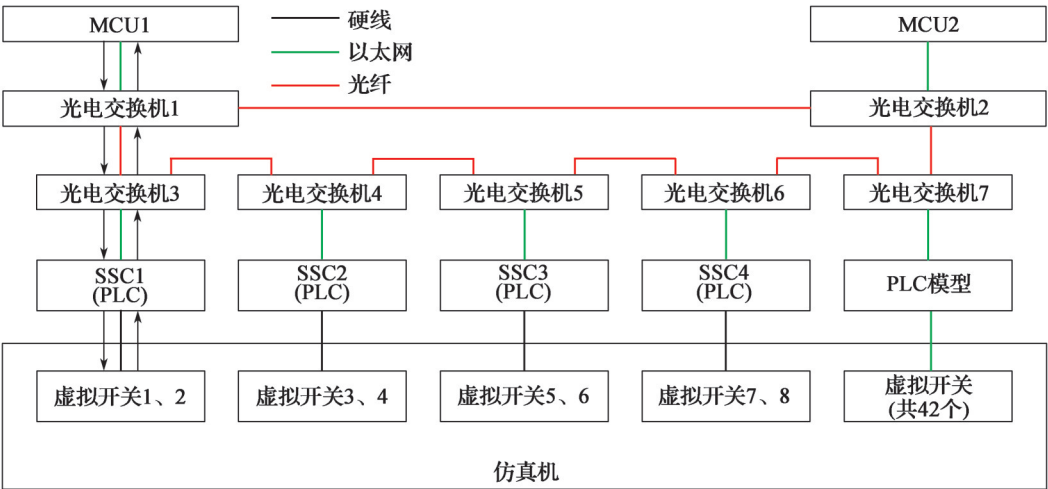


图4 高速磁浮定子开关站环网测试路径

Fig. 4 Test path of ring network for stator switching station in high-speed maglev system

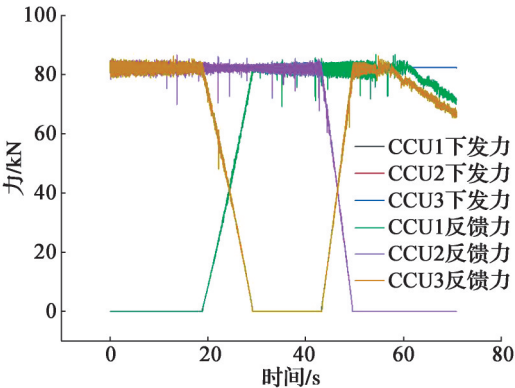


图5 变流器分配力的变化

Fig. 5 Variation in traction force allocation by converters

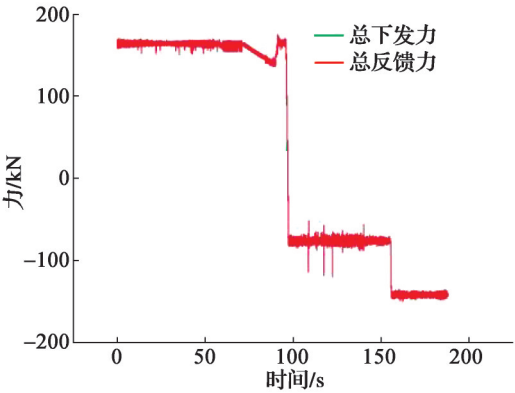


图6 牵引分配合力和反馈合力的变化

Fig. 6 Variation in allocated resultant traction force and feedback resultant force

2 直线驱动系统地面分布式网络设计

尽管超高速直线驱动系统与高速磁浮系统均采用长定子直线电机驱动方式，但两类系统在运行特性、供电频率以及控制实时性要求上存在量级差异，需差异化设计地面分布式网络。高速磁浮系统定子段切换仅需满足百毫秒级响应要求；高速直线驱动系统的实时性要求介

于两者之间；而超高速直线驱动系统运行速度可达马赫数级及以上，定子段切换的有效时间窗口被大幅压缩至百微秒级。若直接沿用高速磁浮系统的控制网络方案，其响应速度与同步精度均无法适配超高速运行场景，因此亟需开展新型网络架构的针对性设计。

高速磁浮系统、高速直线驱动系统与超高速直线驱动系统的技术特征与设计差异如表1所示。

由表1对比可知，3类系统网络设计的核心差异在于换步控制的实时性指标。高速磁浮系统采用百毫秒级响应架构即可稳定运行；高速与超高速直线驱动系统受定子长度、切换频次、功率等级等条件约束，对实时性要求大幅提升，其中超高速直线驱动系统则以百微秒级响应为指标。

综上，本文在现有技术成果基础上，面向高速、超高速直线驱动场景，差异化设计更高响应速度的地面分布式控制网络。本章将围绕这两种应用场景，详细阐述对应网络的整体设计思路与具体实现方法。

2.1 直线驱动系统单端蛙跳法供电架构

高速磁浮系统所采用的两步法、三步法换步方式，在切换过程中均会出现变流器断流现象，其核心流程为：开关切换时，变流器输出电流需先降至零，再重新上升至目标值。这种切换模式在超高速场景下存在明显弊端：当系统运行速度过高时，次级动子进入新定子段的速度极快，变流器断流后重新升流的过程无法及时跟踪目标电流，会直接导致牵引力损失，影响系统运行的平稳性和动力性能。此外，两步法和三步法还存在同步控制难度大的问题。该类方法中，定子两侧初级需由不同变流器轮流控制，对双边变流器的同步性要求极高，而超高速直线驱动系统对换步响应速度和控制精度的要求远高于高速磁浮，现有同步控制模式无法满足其严苛需求。综上，高速磁浮的传统换步方法，无法适配超高速大推力直线电机的分段切

表1 3种系统的多维对比结果

Table 1 Multi-dimensional comparison results across three types of systems

比较项	高速磁浮系统	高速直线驱动系统	超高速直线驱动系统
工作方式	定子段长度可达公里级别，开关切换频次低	定子段较短，存在一定频次的段间切换	定子段短，运行全程需高频、快速切换
实时性要求	整体要求百毫秒级响应	实时性要求介于高速磁浮与超高速系统之间	要求极高，需实现百微秒级精准换步切换
功率规模	功率等级偏低，采用多套装置分散供电	功率中等，能量分配逻辑相对简单	功率等级高，工作电流大，对能量分配效率要求严苛
供电策略	采用双端供电三步法，切换过程平稳	采用单端供电蛙跳法，结构简洁、执行效率高	采用单端供电蛙跳法，适配高频切换工况
组网方式	基于以太网组播协议搭建长距离环网	采用点对点光纤直连，侧重传输时效与响应速度	采用长距离光纤总线架构，优先保障低时延、高同步性与网络扩展性

换需求。

基于此，直线驱动系统通常采用单端供电蛙跳法作为换步方案，以解决传统换步方法的弊端。在供电架构上，该方法将轨道左右两侧同段编号的定子段串联，构成一个有效定子段，从而形成连续无间断的供电区域，避免了分段切换时的供电断层。在控制策略上，直线驱动系统采用提前通电的优化设计：在次级动子即将进入新的定子段前，提前控制该段定子的开关导通并供电，确保动子在定子段交界处能够持续获得牵引力，从而避免了换步过程中的牵引力中断问题，充分适配超高速直线驱动系统的运行需求。

沿线所有光纤控制板通过光纤链路与MCU组成通信控制网络，构建起多层控制逻辑，控制板接收MCU发送的控制指令，驱动对应定子开关动作。整体来看，单端蛙跳供电法控制逻辑简单、执行效率高，是直线驱动系统中实现高实时性供电控制的理想方案。采用单端供电蛙跳法换步策略的牵引变流器模块由两组变流器单元组成，通过两组馈电电缆分别向轨道线路的前后定子段绕组供电，其牵引系统电气连接与供电关系图如图7所示，其定子段电流随时间变化如图8所示。该方法具有供电区域紧凑、系统响应迅速、能量利用率高等优点，适合对响应速度要求极高的应用场景。

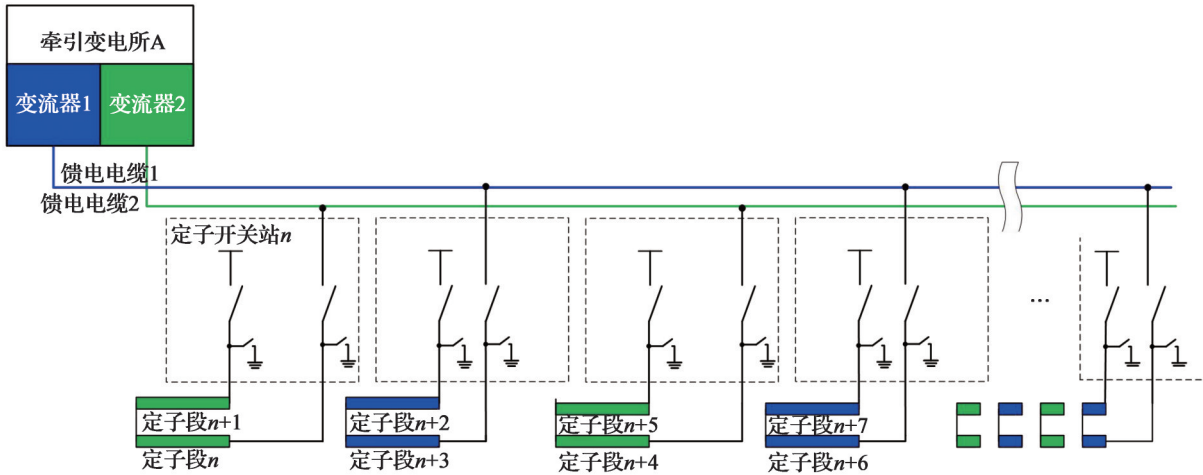


图7 单端供电蛙跳法的牵引系统电气连接与供电关系图

Fig. 7 Schematic diagram of electrical connections and power supply relationships of traction system in single-end power supply based on the leapfrog method

为满足高速、超高速直线驱动系统对高实时性通信与控制的需求，本文提出基于“电源模块-换相单元”的分布式定子开关控制方式。在50 m直线驱动试验平台中，定子开关控制架构采用“集中控制+分布执行”方式，整体通信方式为点对点直连模式。系统由1台MCU作为中央控制核心，负责牵引系统分段供电控制等关键任务。试验线单侧划分为12个定子段，每个定子段配置A/B/C三相定子开关，用于控制定子绕组的通断。定子开关系统采用左右轨道对称布置，即每个

开关柜同时控制左右轨对应的三相共6路定子开关。各定子开关由驱动电源模块驱动晶闸管，实现对定子段的电气隔离与激励。由于MCU的光纤输出口数量有限，难以直接控制全部36路定子开关，为此，系统引入脉冲分配板作为中间控制节点，承担脉冲信号分配及开关状态采集功能，构建一套高效、可靠的分布式定子开关控制网络。通过上述架构设计，系统不仅实现了对大规模定子开关的精准控制，还大幅提升了整体通信与响应速度，满足了直线驱动系统对供电切换

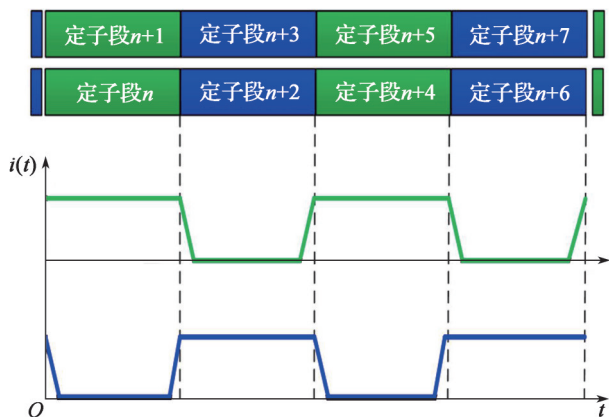


图8 单端供电蛙跳法的定子段电流随时间变化示意图

Fig. 8 Time-varying stator segment currents in single-end power supply configuration based on the leapfrog method

实时性与可靠性的要求。

2.2 高速与超高速直线驱动系统分布式网络设计

现有高速磁浮系统采用以太网组网架构, 需依托专用硬件芯片完成协议解析与数据传输, 存在架构复杂、硬件成本高、实时性受限的问题^[17], 无法适配直线驱动系统的控制需求。针对两类直线驱动系统的工况差异, 本文开展差异化网络设计。高速直线驱动试验平台采用点对点光纤直连架构, 该架构结构简洁、传输时延小、成本可控, 能够适配短距离、小规模高速冲速工况, 有效保障系统稳定运行与实时控制需求^[18]。但该架构拓扑固定、多节点扩展能力弱、传输距离有限, 仅适用于短距离冲速试验场景, 无法满足超高速直线驱动系统公里级传输、高频切换及百微秒级高精度同步的组网与控制要求。为此, 超高速直线驱动系统摒弃点对点通信模式, 采用新型串行总线架构并优化通信物理层, 以适配长距离、高精度、高动态的超高速运行场景。两套地面分布式网络方案均无须配置专用以太网芯片, 基于纯光纤链路实现高速数据传输, 具备低时延、低抖动、低成本的特点, 规避了传统以太网架构的固有缺陷, 可精准适配不同工况下直线驱动系统的控制需求。

2.2.1 高速直线驱动系统网络设计

短距离高速直线驱动试验平台采用三相单独导通控制策略, 系统包含6块光纤控制板, 可由MCU直接点对点下发控制命令, 实现开关导通控制, 其网络结构较为简洁。该方案已成功完成多轮稳定性验证, 适用于短线段、低节点密度的测试环境, 控制拓扑如图9所示。

高速直线驱动系统采用MCU与6块光纤控制板点对点光纤直连通信架构。通信过程中, 当控制指令使能位有效时, 对应光纤控制板连接的6路定子开关即可执行闭合动作。系统单帧控制与状态反馈报文长度仅为2 Bytes, 数据收发周期为10 μ s。经核算, 系统上

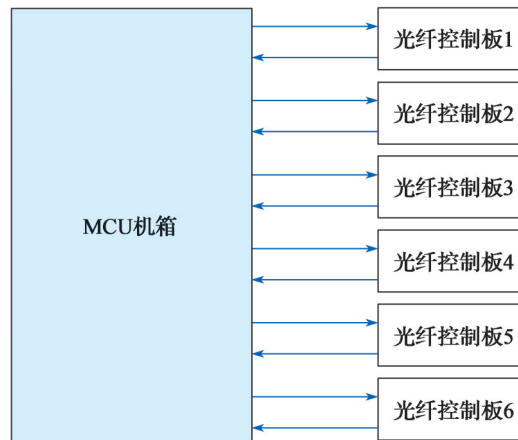


图9 高速直线驱动系统光纤控制板拓扑

Fig. 9 Topology of optical fiber control board in high-speed linear drive system

行、下行通信带宽均为1.6 Mbps。相较于高速磁浮系统采用的以太网组播通信方案, 本系统未引入复杂的协议封装与解析开销, 报文结构精简、有效数据占比高, 带宽利用效率显著提升。该点对点光纤直连方式仅需极少的带宽资源, 即可实现高频数据交互, 体现了光纤直连架构低时延、高实时性、轻量化的技术优势, 能够完全适配短距离高速直线驱动系统的工况运行需求。

2.2.2 超高速直线驱动系统网络设计

面向长距离工程应用场景, 超高速直线驱动系统需要对上百个定子段进行集中管控。传统点对点光纤直连架构受设备接口数量、组网扩展能力制约, 难以支撑大规模节点协同控制。为此, 本文设计了一对多串行总线控制架构, 能有效提升系统扩容能力与整体运行效率, 系统控制拓扑如图10所示。

通信流程如下:

① 指令下发: 直线电机控制单元(ZCU)以“源地址+目标地址”的通信格式, 将控制指令通过串行总线统一下发, 实现对6个光纤控制板的同步控制。

② 指令解析: 光纤控制板接收到指令后, 根据目标地址判断指令是否发给自身, 仅在确认目标地址匹配时才执行指令。

③ 状态反馈: ZCU在指令下发完成后, 将通过总线收集各光纤控制板的反馈信号, 完成一次完整的闭环通信过程。

本系统选用1 310 nm单模光纤搭建串行总线通信链路, 单台ZCU可接入百余块光纤控制板, 系统上下行数据发送周期均为10 μ s, 其中下行控制报文长度为16 Bytes, 上行由6块光纤控制板联合组包反馈, 单帧报文长度达96 Bytes。由于上行数据为多节点并发传输、数据体量更大, 系统整体带宽需求由上行链路决定, 经核算, 上行通信总带宽为76.8 Mbps。该波段单模光纤兼具长距离传输与高带宽承载能力, 配套光模块传输速率可达百兆级以上, 带宽余量充足, 完全满

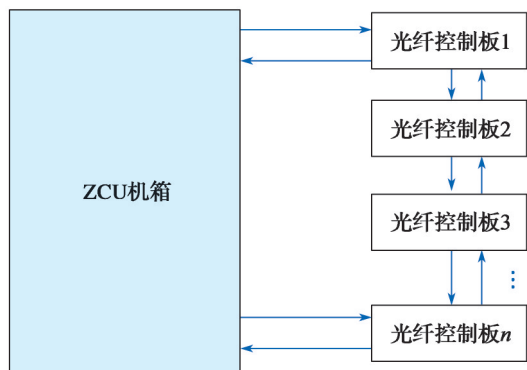


图 10 超高速直线驱动系统光纤控制板控制拓扑
Fig. 10 Control topology of optical fiber control board in ultra-high-speed linear drive system

足系统传输要求。同时其传输损耗低、抗干扰性强，有效解决了原有架构传输距离不足的问题，能适配长距离、多节点、高实时性的超高速直线驱动运行场景。

3 直线驱动系统地面分布式网络试验验证

3.1 高速直线驱动系统分布式网络试验验证

3.1.1 验证方法

在高速直线驱动试验平台上，开展了定子开关电网的集成测试，目标是评估定子开关及变流器供电控制的整体响应特性。与高速磁浮系统相比，直线驱动系统的定子开关控制对控制系统的实时性要求更高，需要达到百微秒级。测试过程中，通过分析 MCU 记录的变流器输出波形的变化来判断网络控制延迟时间，控制响应的发生时间始终早于电流变化的起始时刻。

测试流程如图 11 所示，MCU 周期性下发定子开关指令，经由通信网络传输至定子开关驱动电源模块，最终驱动 6 路定子开关执行合闸操作。

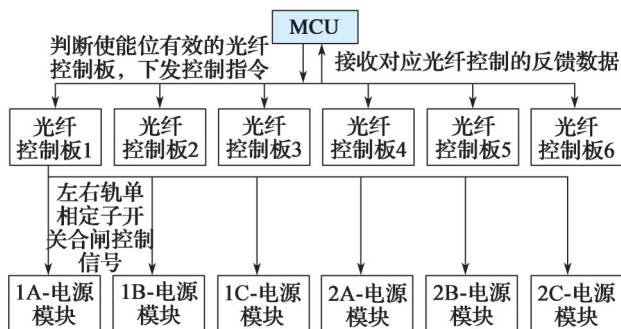


图 11 高速直线驱动定子开关测试路径
Fig. 11 Test path of stator switch in high-speed linear drive system

3.1.2 验证结果

直线驱动系统在合闸控制过程中展现了较好的实时性能。测试起点为 MCU 记录下定子开关合闸指令时刻，测试终点为记录变流器输出电流开始上升的时刻，重复试验的结果表明，平均控制延迟为 221.3 μs （其中已经扣除 CCU 传输电流波形至 MCU 的通信

周期 100 μs ）。

相比于高速磁浮系统 79 ~ 129 ms 的响应时间，直线驱动系统在响应速度上实现了大幅提升，充分验证了该方案在高速运行工况下满足低时延控制要求的能力。部分测试结果详见图 12~图 14 所示。

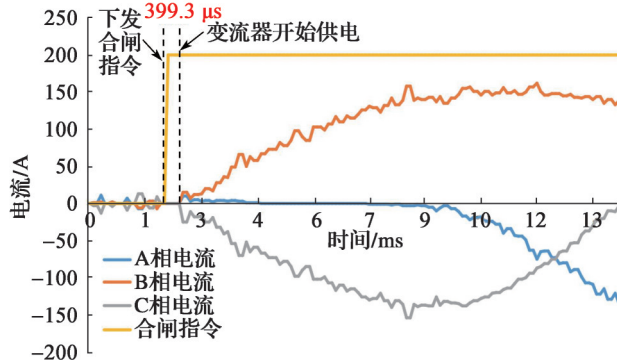


图 12 高速直线驱动系统分段供电控制时间测试 1
Fig. 12 Time test 1 of sectional power supply control in high-speed linear drive system

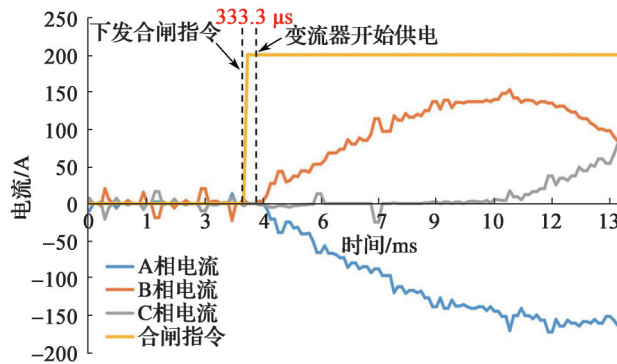


图 13 高速直线驱动系统分段供电控制时间测试 2
Fig. 13 Time test 2 of sectional power supply control in high-speed linear drive system

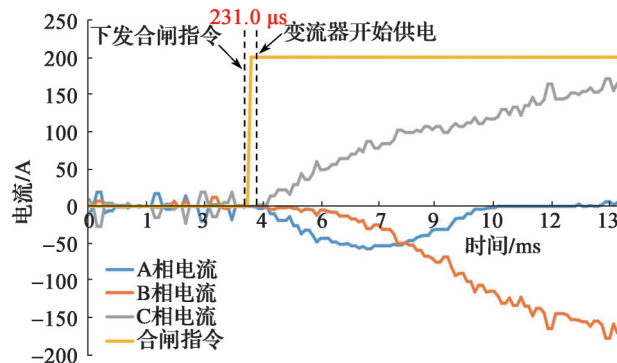


图 14 高速直线驱动系统分段供电控制时间测试 3
Fig. 14 Time test 3 of sectional power supply control in high-speed linear drive system

在直线驱动系统运行过程中，动子小车与其前后定子段之间的耦合面积随着动子位置不断变化。为实现高效、连续的牵引控制，系统采用耦合面积比例法对前后定子段之间的牵引力进行动态分配，耦合面积占比越大的定子段承担的牵引力输出也越大。结果表明，当前系统基于分段控制策略，可实现牵引力的动

态平滑过渡与连续稳定运行。

3.2 超高速直线驱动系统分布式网络仿真验证

3.2.1 仿真验证方法

针对长距离超高速直线驱动系统, 由于尚处于方案设计阶段, 暂无法在实物上进行大规模一对多光纤直连测试。为此, 采用现有高速直线驱动试验台的定位测速系统进行了光纤网络时延测试, 并基于关键器件实测数据对系统综合时延进行估算。测试内容包括FPGA处理时延和光纤传输时延两部分。测试方法为: 通过模拟发送板发送数据至光纤控制板, 控制板接收到数据后立即通过光纤反向输出, 利用光纤控制板内部RX0(接收)和RX1(转发接收)信号之间的时间差测量时延, 测试原理如图15所示。

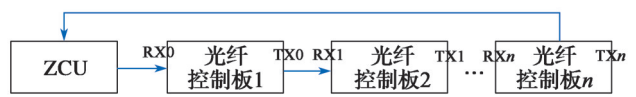


图15 光纤控制板时延测试原理图

Fig. 15 Schematic diagram of time delay test for optical fiber control board

3.2.2 仿真验证结果

FPGA处理时延测试如图16所示, rec_ok为接收数据校验完成标志(信号11), 完成有效数据校验电平翻转一次; sig_out[0]为FPGA光纤串行输出信号(信号12); ast_rx0为光纤接收串行数据(信号13)。由图16可见, 竖线①对应单帧光纤数据全部接收完成的时序位置, 竖线②对应数据校验完成、光纤发送信号启动输出的时序位置, ①到②之间的采样间隔为79个波形分辨率单位, 每个分辨率时长为5 ns。经计算, 光纤数据接收完成至对外光纤输出的FPGA完整处理时延为395 ns; 同时校验完成标志与光纤输出信号时序高度同步。

光纤链路传输时延测试如图17所示, ast_rx0(信号8)为RX0接收数据, ast_rx1(信号9)为RX1接收数据, 图17中两条竖线分别对齐两路光纤数据同一比特的跳变沿, 两路信号的时序间隔仅为2个波形采样分辨率单位。因此双通道光纤接收信号的时序差值经核算最大为10 ns, 即多路光纤链路间传输时延差为10 ns, 通道同步性能优异。

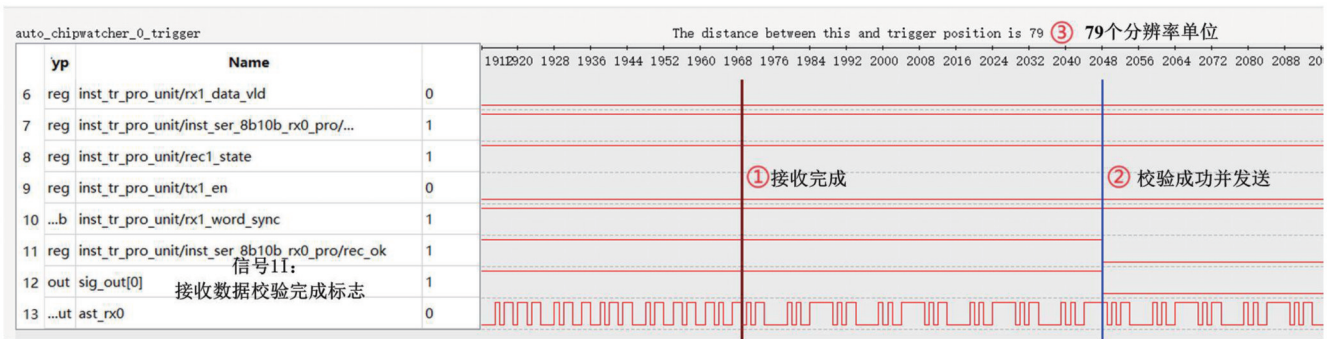


图16 光纤控制板FPGA处理时延测试

Fig. 16 Test of FPGA processing time delay for optical fiber control board

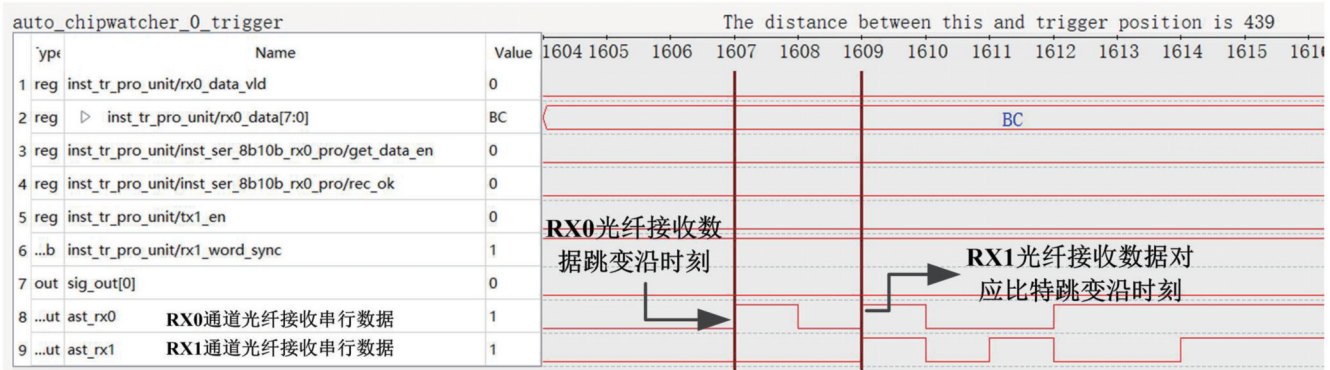


图17 光纤链路传输时延测试

Fig. 17 Test of optical fiber link transmission time delay

针对3 km超高速直线驱动试验线开展时延综合估算, 其地面分布式网络至少需串联120块光纤控制板, 系统总时延主要由光纤串行网络通信时延、主控单元周期处理时延及定子电力电子开关动作响应时延3部分组成, 本次估算111.6 μs为理论综合估算值, 尚未经实物平台试验验证, 完整估算流程与误差不确定性分析

如下:

① 光纤串行网络通信时延: 包含单板串行传输时延与FPGA本地处理时延。其中, 每块控制板的传输时延为10 ns, FPGA内部数据处理时延为395 ns。由于各板卡数据处理过程并行完成, 仅串行传输时延随串联级数逐级叠加。根据“总时延=串联板卡数量×单板传

输时延+单板并行处理时延”，即总时延为 $120 \times 10 \text{ ns} + 395 \text{ ns} = 1.595 \mu\text{s}$ ，光纤链路整体时延占比极低，实时性能优异。

② MCU主控周期处理时延：主控单元处理时延是当前系统时延的主导分量。本系统现阶段采用 $100 \mu\text{s}$ 固定控制周期，MCU需在单周期内完成工况判断、指令组包与总线下发任务，指令输出时刻在周期内随机浮动。对于超高速直线驱动系统的微秒级高精度换步需求而言， $100 \mu\text{s}$ 控制周期时长裕量较大，是系统整体实时性进一步提升的主要瓶颈，本文取完整周期时长作为主控时延上限参与估算。

③ 定子开关动作响应时延：定子开关采用晶闸管型电力电子开关器件，器件固有动作响应时间不超过 $10 \mu\text{s}$ ，取 $10 \mu\text{s}$ 作为该项时延最大值参与叠加估算。

综上，系统整体理论最大总控制时延为3类时延上限值直接叠加，总延迟为 $1.595 \mu\text{s} + 100 \mu\text{s} + 10 \mu\text{s} \approx 111.6 \mu\text{s}$ ，整体控制时延处于百微秒级区间。

上述 $111.6 \mu\text{s}$ 为理想工况下理论上限值，实际工程场景存在3类影响因素，可能造成真实时延与估算值产生偏差：一是分布式节点串行传输差异，光纤控制板沿试验线路串联分布，不同位置节点的指令传输级数不同，末端节点通信时延高于前端节点，会引起全线路各定子段控制时延不一致；二是MCU周期下发随机抖动，MCU指令下发时刻在 $100 \mu\text{s}$ 控制周期内随机分布，指令输出时序存在抖动，可能降低全线开关控制时延的稳定性；三是器件与环境工况偏离理想假设，估算过程基于“每块控制板传输时延不长于 10 ns 、定子开关响应时间不长于 $10 \mu\text{s}$ ”的理想参数假设，实际运行中元器件性能温漂、光路干扰、电磁噪声等外部扰动，均可能放大各环节时延，系统真实最大延迟存在进一步上升的可能性。

尽管存在上述不确定性，理论估算结果仍表明，系统整体控制时延可稳定维持在百微秒级区间，相较于传统高速磁浮百毫秒级控制体系实现了量级提升，能够满足超高速直线驱动微秒级高精度换步控制的基本要求。后续优化将重点针对现有主控周期过长的主要瓶颈开展改进，通过缩短MCU控制周期、优化指令调度时序、补偿分布式节点时延差、抑制工况扰动误差等方式，进一步压缩系统总时延，持续推进超高速直线驱动控制系统的性能升级与工程化落地。

4 结论

长定子直线电机驱动系统具有显著的“源-控-网-端”强耦合特征，地面分布式网络是实现定子精准换步、保障系统牵引输出的核心链路，其时延与同步性能直接决定整机动态控制精度。既有高速磁浮系统依托以太网环网架构实现组网通信，受协议封装冗余、

固定通信周期约束，仅能实现百毫秒级开关响应，难以满足超高速直线驱动系统的百微秒级高精度控制的需求。针对该技术瓶颈，开展了适配超高速工况的定子开关分布式控制网络架构设计、机制优化与性能评估，通过理论分析、试验验证与工程场景推演，主要结论如下：

① 提出了适配长短距离工况的差异化分布式网络架构，突破了传统组网实时性约束。结合超高速直线驱动单端分段供电运行机理，摒弃高速磁浮传统以太网环网控制模式，构建了“电源模块-换相单元”分布式控制体系。通过简化通信交互逻辑、剔除协议解析冗余、优化光纤拓扑，将定子开关换步响应时延由百毫秒级压缩至百微秒级，有效提升了分段供电切换平滑性，满足高加速度、超高速运行工况的精准控制需求。

② 试验验证了所提方案的可行性与性能优势。高速直线驱动试验台实测结果表明，本文设计的轻量化光纤通信网络时序精度高、稳定性好，系统平均控制延迟为 $221.3 \mu\text{s}$ 。相较于现有高速磁浮控制体系 $59 \sim 129 \text{ ms}$ 的合闸响应时间实现了数量级提升，能够有效支撑高速工况下的实时换相与分段供电控制，为超高速直线驱动地面控制网络设计提供了试验依据。

③ 长距离场景时延估算证明了方案的工程适配性。面向公里级超高速试验场景，完成多节点全链路时延拆解分析，明确系统控制时延由光纤传输时延、主控处理时延与开关动作时延共同构成，系统最大综合控制时延为 $111.6 \mu\text{s}$ ，可满足微秒级高精度同步换步要求，验证了该架构可适配长距离、大规模节点的工程组网场景。

本文阐明了地面分布式网络的时延约束机制与优化方法，提出的无专用以太网芯片的轻量化光纤组网方案，兼顾低时延、高同步与低成本优势，弥补了传统轨道交通通信架构在超高速工况下的性能短板，可为超高速直线驱动系统的控制网络设计与性能优化提供理论支撑和工程参考。

参考文献：

- [1] 龙退令. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
LONG Xialing. Theory and electromagnetic design method of linear induction motors[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 陈宇, 卢琴芬, 叶云岳. 长定子同步直线电动机的设计及其优化[J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 18-21.
CHEN Yu, LU Qinfen, YE Yunyue. Optimal design of a long stator synchronous linear motor[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2003, 18(2): 18-21.
- [3] 李瑞妮. 高速磁悬浮列车用直线同步电机特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LI Ruini. Research on characteristics of linear synchronous

- motor for high-speed maglev train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [4] 张明元, 马伟明, 何娜. 长初级直线电动机分段供电技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 96-104.
ZHANG Mingyuan, MA Weiming, HE Na. Application of block feeding methods in long primary linear motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 96-104.
- [5] 鲁军勇, 柳应全. 电磁发射用直线电机及其控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 5899-5913.
LU Junyong, LIU Yingquan. Review on linear motor for electromagnetic launch and its control technology[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2024, 39(19): 5899-5913.
- [6] 张谦. 高速磁浮列车长定子段换步馈电新技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
ZHANG Qian. The research of a novel stator section crossing method of long stator linear synchronous motor for high speed maglev vehicles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [7] 李俊, 肖健, 徐娟, 等. 中高速磁浮列车两步法定子段换步控制技术研究[J]. 控制与信息技术, 2021(2): 30-36.
LI Jun, XIAO Jian, XU Juan, et al. Research on two-step-method stator section crossing control technology for medium and high speed maglev train[J]. Control and information technology, 2021(2): 30-36.
- [8] 刘静. 磁浮列车牵引控制系统建模和仿真分析及与运行控制系统通信的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
LIU Jing. Research on modeling and simulation analysis of traction control system for maglev trains and communication with operation control system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [9] 刘进海, 史黎明, 郭科宇, 等. 直线电机分段供电协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2861-2870.
LIU Jinhai, SHI Liming, GUO Keyu, et al. Cooperative control of segmented long stator linear motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2861-2870.
- [10] 魏远乐, 郝文瑾, 刘建强. 高速磁浮列车供电分区及定子段设计方法研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(12): 1-5.
WEI Yuanle, HAO Wenjin, LIU Jianqiang. Research on the design method of power supply division and stator segment of high-speed maglev train[J]. Railway construction technology, 2020(12): 1-5.
- [11] ZOU Z Y, ZHENG M F, LU Q F. Modeling and simulation of traction power supply system for high-speed maglev train[J]. World electric vehicle journal, 2022, 13(5): 82.
- [12] 徐娟, 肖健, 李俊, 等. 高速磁浮牵引控制集成技术研究[J]. 控制与信息技术, 2022(1): 40-46.
XU Juan, XIAO Jian, LI Jun, et al. Research on integrated technology of high speed maglev motoring control[J]. Control and information technology, 2022(1): 40-46.
- [13] 刘金鑫, 葛琼璇, 王晓新, 等. 高速磁浮牵引控制系统半实物实验研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 497-503.
LIU Jinxin, GE Qiongxuan, WANG Xiaoxin, et al. Hardware-in-loop research of traction-system for high-speed maglev[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2015, 30(14): 497-503.
- [14] 邓自刚, 刘宗鑫, 李海涛, 等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474.
DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development status and prospect of maglev train[J]. Journal of southwest Jiaotong university, 2022, 57(3): 455-474.
- [15] 杨永康. 定子分段式永磁同步直线电机的控制方案及其在门控系统应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
YANG Yongkang. Research on control strategies of stator-segmented permanent magnet synchronous linear motor and its application to door system[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [16] 李莉, 张瑞华, 杜玉梅, 等. 直线电机轨道交通牵引系统研究与试验[J]. 机车电传动, 2016(6): 88-91.
LI Li, ZHANG Ruihua, DU Yumei, et al. Research and experiment on rail transit linear motor vehicle traction system[J]. Electric drive for locomotives, 2016(6): 88-91.
- [17] 胡振豪, 左小五, 万红平. 工业以太网 EtherCAT 的实时性研究[J]. 软件导刊, 2018, 17(2): 179-181.
HU Zhenhao, ZUO Xiaowu, WAN Hongping. The real-time research of industrial Ethernet EtherCAT[J]. Software guide, 2018, 17(2): 179-181.
- [18] 王海明, 陈立, 蒋俊. 基于多运行态实测的高速磁浮毫米波无线通信系统时延特性评估[J]. 控制与信息技术, 2025(3): 103-108.
WANG Haiming, CHEN Li, JIANG Jun. Evaluation of delay characteristics in millimeter-wave wireless communication system in high-speed maglev transportation based on measurements in multi-operational states[J]. Control and information technology, 2025(3): 103-108.

Research on ground distributed network for microsecond-level switching control

CAO Wei¹, XIAO Jian¹, ZHAO Anfeng¹, XU Juan¹, ZHANG Baojian¹, SHI Yu²

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 421001, China;
2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Drive systems based on long-stator linear motors, including high-speed maglev systems, high-speed linear drive systems, and ultra-high-speed linear drive systems, all exhibit strong "source-control-network-terminal" coupling characteristics. As the core component of the "network" layer, the ground distributed network connects the traction control units and stator switch groups; its real-time performance and reliability therefore determine the stator commutation response and traction output capacity, making it key to ensuring stable and efficient drive system operation. For ultra-high-speed linear drive systems, commutation control by stator switching already achieves microsecond-level response, which imposes stricter performance requirements on the ground distributed network. This paper proposes a distributed control network design method to support microsecond-level stator switching under ultra-high-speed operating conditions. The commutation strategy and network architecture used in high-speed maglev systems are first reviewed, to clarify that their millisecond-level switching response is inadequate in ultra-high-speed scenarios. A novel "power module-commutation unit" distributed control architecture is then proposed to close this gap, featuring an optimized network topology and real-time transmission mechanism, to reduce commutation response delays to the microsecond range. Performance verification was carried out on a high-speed linear drive test bench. Experimental results show that the proposed method reduces switching control delays from milliseconds to microseconds, yields more continuous and stable traction output, and suits application scenarios requiring higher accelerations and operating speeds. The proposed novel distributed control network architecture breaks the real-time performance bottleneck of existing networks, providing theoretical support and engineering application references for future design of ultra-high-speed linear drive systems.

Keywords: ground distributed network; microsecond-level switching control; ultra-high-speed linear drive; sectional power supply; experimental verification

收稿日期：2026-02-15；修回日期：2026-02-28
责任编辑：詹 婧