

Construction of a Comparative System for Traction Technologies from a Multidimensional Perspective

Pei Chen

China Construction (Tianjin) Rail Transit Investment & Development Co., Ltd., Tianjin, 300380, China

Abstract

With the rapid development of China's rail transit equipment manufacturing industry, the traction system, as the "heart" of trains, has seen continuous advancements in technological localization and diversification. Leading domestic manufacturers, represented by companies such as Jiangsu Jingwei, CSR Electric, and Shenzhou High-Speed Rail, have developed distinctive technical approaches and product systems based on the digestion and absorption of imported technologies. This paper aims to establish a comprehensive technical comparison framework encompassing four dimensions: main circuit topology, underlying control algorithms, system integration level, and maintainability convenience. Through this framework, it systematically analyzes the similarities, differences, strengths, and weaknesses of these three enterprises in core traction system technologies, providing theoretical references and practical foundations for technical selection, product optimization, and future technological development directions within the industry.

Keywords

Traction system; Technical comparison; Main circuit; Control algorithm; Integration; Maintainability

多维度视角下的牵引系统技术对比体系构建

陈沛

中建(天津)轨道交通投资发展有限公司, 中国·天津 300380

摘要

随着我国轨道交通装备制造业的迅猛发展, 牵引系统作为列车的“心脏”, 其技术自主化与多元化进程不断深化。以时代电气、江苏经纬、神州高铁等为代表的国内主流厂商, 在消化吸收引进技术的基础上, 已形成各具特色的技术路线与产品体系。本文旨在构建一个涵盖主电路拓扑结构、底层控制算法、系统集成化程度及可维护便利性四个维度的综合性技术对比体系。通过该体系, 系统性地剖析上述三家企业在牵引系统核心技术上的异同与优劣, 以期为行业内的技术选型、产品优化及未来技术发展方向提供理论参考与实践依据。

关键词

牵引系统; 技术对比; 主电路; 控制算法; 集成化; 可维护性

1 引言

牵引传动系统是轨道交通车辆的核心部件, 直接决定了列车的牵引/制动性能、运行效率及可靠性。长期以来, 该领域技术被少数国际巨头所垄断。然而, 在国家战略引导与市场需求的驱动下, 中国中车旗下时代电气, 江苏经纬轨道交通设备有限公司, 以及神州高铁技术股份有限公司等企业异军突起, 不仅实现了关键技术的自主可控, 更在激烈的市场竞争中形成了差异化发展格局。

目前, 业界对于国产牵引系统的评价多集中于单一性能指标或市场占有率, 缺乏一个系统、深入的技术层面多维度对比分析。这种分析的缺失, 不利于用户根据具体应用场

景进行精准选型, 也阻碍了厂商对自身技术短板的认知与补强。因此, 构建一个科学、全面的技术对比体系, 具有重要的理论价值与现实意义。本文选取在市场上具有广泛代表性和技术影响力的江苏经纬、时代电气和神州高铁作为研究对象, 从技术本源出发, 构建一个多维度对比框架, 以期填补现有研究的空白。

2 多维度技术对比体系的构建

为全面、客观地评价牵引系统的技术水平, 本文摒弃单一的性能指标对比, 转而构建一个包含四个核心维度的综合性体系:

牵引系统主电路拓扑结构: 这是能量变换的物理基础, 决定了系统的效率、功率密度与成本。

底层控制算法: 这是系统的“大脑”, 直接决定了牵引/制动特性的精准性、响应速度与稳定性。

【作者简介】陈沛(1993-), 男, 本科, 从事地铁车辆运用与检修研究。

集成化程度：反映了系统设计的先进性与紧凑性，影响体积、重量、可靠性及成本。

可维护便利性：关乎全生命周期成本与运营效率，是产品设计人性化与成熟度的重要体现。

这四个维度从硬件到软件，从设计到运维，构成了一个立体化的评价网络，能够较为完整地刻画一个牵引系统产品的综合技术面貌。

3 核心维度下的国产牵引系统技术对比分析

3.1 牵引系统主电路拓扑结构对比

主电路是实现 DC-AC 能量转换的关键。三家企业均采用成熟的电压源型两电平或三电平逆变器拓扑，但在技术传承与细节优化上存在差异。

时代电气：传承自西门子、三菱等日欧技术，其主电路设计以高可靠性和鲁棒性著称。早期产品多采用成熟的两电平拓扑，结构经典，技术风险低。在新一代产品中，已广泛推广应用三电平 NPC (Neutral Point Clamped) 拓扑。该结构能有效降低功率器件承受的电压应力，输出波形谐波含量更少，电机侧 dV/dt 更低，有利于减少对牵引电机绝缘的冲击，提升系统整体效率。其设计理念偏向于在保证极致可靠性的前提下，进行渐进式技术创新。

江苏经纬：其技术源于捷克斯柯达，并在国产化过程中进行了深度优化。江苏经纬在主电路设计上展现了较高的灵活性，尤其在应对复杂电网波动和恶劣工况方面有独到之处。其电路设计注重系统的过载能力和环境适应性，例如，在直流侧抑振电路、接地保护电路等方面有其特色设计，以确保系统在电压波动较大的线路上仍能稳定运行。其拓扑选择同样紧跟行业趋势，向三电平等高效率拓扑演进。

神州高铁：其技术源于瑞士 ABB，神州高铁在主电路技术上采取了更开放的策略，博采众长，并注重成本与性能的平衡。其主电路设计强调简洁与高效，倾向于采用经过市场充分验证的、具有高性价比的拓扑方案。在器件选型上，积极导入国产 IGBT，并与电路设计进行协同优化，以在保证基本性能的同时，有效控制成本，形成了其独特的市场竞争力。

小结：在主电路层面，时代电气体现了“稳健派”的风格，技术底蕴深厚；江苏经纬展现了“适应派”的特点，注重环境鲁棒性；而神州高铁则更具“实用派”色彩，在成本控制与性能平衡上发力。

3.2 底层控制算法对比

控制算法是牵引系统的灵魂，直接关乎乘坐舒适度与轮轨黏着利用效率。

时代电气：其控制算法库完备，继承了欧系企业对控制理论深度的追求。在矢量控制 (VC) 和直接转矩控制 (DTC) 两大主流技术路线上均有深厚积累。其算法对电机参数的敏感性较低，鲁棒性强，即使在电机参数发生漂移时，仍能保

持良好的控制性能。特别是在黏着控制方面，时代电气的算法能够快速、平滑地抑制空转/滑行，在雨雪等低黏着工况下表现优异，确保了列车的安全与准点。

江苏经纬：在控制策略上，江苏经纬更注重动态响应与精细化控制。其算法采用以经典矢量控制为主，融入了更多对实际运营工况的思考，例如，针对频繁启停的地铁线路，优化了牵引/制动曲线的平滑性，减少冲击，提升乘客舒适度。在弱磁区控制、功率均衡控制等方面有其独到的处理逻辑，使得系统在高速或大负载条件下仍能保持稳定输出。

神州高铁：其控制算法的开发更侧重于实用性与快速迭代，采用以经典矢量控制为主，并融合现代智能控制（如模糊 PID、自适应控制等）进行辅助优化的混合策略。这种策略的优势在于开发周期相对较短，能够快速响应市场需求。虽然其在理论体系的完备性上与前两者存在一定差距，但其通过场景化的算法调优，在多数常规运营场景下已能提供令人满意的控制性能。

小结：在控制算法层面，时代电气展现了“理论驱动”的深厚功底，江苏经纬体现了“场景驱动”的精细化设计，而神州高铁则呈现出“需求驱动”的敏捷开发模式。

3.3 集成化程度对比

集成化是衡量牵引系统技术先进性的重要标尺，高集成度意味着更小的体积、更轻的重量、更少的连接器和更高的可靠性。

时代电气：在集成化方面走在行业前列。其推出的“牵引逆变器-辅助变流器”一体化装置，将两个独立箱体合二为一，显著节省了车下空间，减轻了重量。通过高度的功能集成和部件共享（如冷却系统、中间直流环节），降低了系统的复杂度和制造成本。这体现了其强大的系统架构设计能力和产业链整合能力。

江苏经纬：同样积极推进集成化技术。其集成化方案在保证维护便利性的前提下进行。例如，采用模块化设计思想，将功率模块、控制单元等设计成标准模块，再根据不同车型需求进行“搭积木”式组合。这种“模块化集成”策略，既获得了集成化带来的部分优势，又保留了一定的现场更换与维修灵活性。

神州高铁：在集成化道路上，更倾向于采用逐步跟进的策略。其产品初期以分立式为主，但随着技术积累，正快速向集成化方案靠拢。其集成化设计更注重生产的便利性与成本，通过将多个功能单元集成在一个箱体内，来达到降低总体成本和简化布线的目的。

小结：在集成化程度上，时代电气处于“引领者”地位，推出了革命性的一体化产品；江苏经纬是“稳健的推进者”，注重模块化与可维护性的平衡；神州高铁则是“积极的追赶者”，正通过集成化来提升产品竞争力与控制成本。

3.4 可维护便利性对比

可维护性直接影响车辆的可用性和全生命周期成本。

时代电气：由于其设计源于对可靠性的极致追求，其产品往往在设计中就考虑了长检修周期。然而，高度的集成化在带来诸多好处的同时，也对现场级维护提出更高要求。一旦出现板卡或模块故障，更倾向于采用“整板/整模块更换”的模式，这对备品备件的管理和人员的技能水平提出了新要求。但其完善的远程诊断与健康管理系统（PHM）能够部分弥补这一挑战，实现故障的精准定位。

江苏经纬：在可维护性方面具有优势。其模块化设计理念使得现场维护人员可以对疑似故障的功率模块、控制单元等进行独立拆卸和更换，无需将整个牵引箱运回工厂，大大缩短了维修时间。其接口设计相对标准化，降低了维护的技术门槛和备件库存成本。同时由于江苏经纬背靠国产变频器龙头汇川技术，其技术底蕴雄厚，对用户的需求响应更加快速。

神州高铁：作为市场挑战者，非常注重用户体验，可维护性是其产品设计的重要考量因素。其设备提供了更友好的人机交互界面（如更清晰的故障代码、更详细的维护手册），并简化了维护流程。在部件布局、接线端子的可达性等方面进行了优化，力求让维护工作更简便、高效。同时由于神州高铁的牵引系统技术核心都在ABB手中，复杂的故障分析依赖国外厂商，其客户需求响应速度稍显落后。

小结：在可维护性上，江苏经纬凭借其模块化设计和快速的响应速度略占优势；神州高铁通过人性化设计提升了用户体验；而时代电气的高集成化方案则在维护模式上引发了变革，推动了维护体系向更高层级发展。

4 综合对比与讨论

通过对三个厂商在四个维度的深入剖析，可以勾勒出它们各自清晰的技术画像：

时代电气如同一位“技术权威”，其技术体系完整、严谨，在可靠性、基础理论研究和高密度集成方面优势明显，代表了行业技术发展的标杆水平，尤其适用于对可靠性要求极高的干线铁路和高速动车组领域。

江苏经纬更像一位“精工巧匠”，其在特定工况的适应性、控制算法的精细度以及模块化设计带来的维护便利性上特色鲜明，在地铁、轻轨等需要频繁启停、工况复杂的城轨市场上具有很强的竞争力。

神州高铁则是一位“灵活的创新者”，其技术策略灵活，注重成本控制与市场需求的快速响应，通过实用化的技术路径和优化的用户体验，在部分区域铁路、市域快轨及新兴市

场中开辟了属于自己的天地。

需要指出的是，这种差异并非绝对的优势之分，而是不同企业基于自身历史沿革、市场定位和技术战略所做出的选择。例如，时代电气的高集成化是技术领先的体现，但牺牲了部分现场级维护的灵活性；江苏经纬的模块化设计便于维护，但在体积和重量上不敌一体化产品；神州高铁的成本优势是其市场利器，但需要在核心算法的深度和长期可靠性上持续投入和验证。

5 结语

本文成功构建了一个包含主电路、控制算法、集成化程度和可维护便利性的四维技术对比体系，并应用该体系对国产牵引系统三大主流厂商——时代电气、江苏经纬和神州高铁进行了系统性的对比分析。研究表明，三家企业在技术路线上已形成显著差异化：时代电气以高可靠性和集成化见长；江苏经纬在环境适应性和可维护性上优势突出；神州高铁则以成本控制和市场敏捷性为核心竞争力。

未来，国产牵引系统的竞争将不再局限于单一性能或价格，而是转向基于全生命周期成本的综合技术实力的较量。发展趋势将集中于：

更高层次的集成化：从“牵引+辅助”向“牵引+辅助+充电+储能”等多功能深度集成发展。

算法的智能化：深度融合人工智能、大数据技术，实现自学习、自适应的智能控制与预测性维护。

核心器件的自主化：基于国产SiC（碳化硅）等新一代宽禁带半导体器件以及永磁同步电机的应用的牵引系统将成为技术竞争的新高地。

本论文所构建的对比体系，不仅为当前的技术选型与评估提供了科学工具，也为各厂商认清自身定位、规划未来技术发展路径提供了有益参考。

参考文献

- [1] 冯江华, 陈高华, 黄济荣. 现代轨道交通牵引传动系统与控制技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [2] 葛兴来, 王磊, 韩坤. 轨道车辆牵引传动系统三电平逆变器拓扑及其调制策略综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 1-15.
- [3] 丁荣军, 桂卫华. 中国高速列车牵引传动技术发展展望[J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 39-47.
- [4] 刘可安, 尚敬. 基于模块化多电平变流器的牵引传动系统研究进展[J]. 电源学报, 2020, 18(2): 1-12.
- [5] 各公司官方网站产品技术白皮书及公开年度报告.