



超导电动悬浮技术的发展现状与关键技术

罗俊¹, 朱韬宁¹, 苏振华², 钱承智^{1,3}, 庞聪⁴, 赵春发¹, 马光同^{1,2}

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

3. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001;

4. 中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 超导电动悬浮技术是实现轨道交通超高速运行的核心技术之一, 具备悬浮间隙大、自稳定悬浮、运行效率高等优势, 成为全球轨道交通领域的研究热点。文章首先梳理了超导电动悬浮技术在日本、中国的发展历程与工程化试验进展, 对比了两国在技术研发、试验线建设及速度突破方面的成果; 其次系统分析了超导电动悬浮系统的3类轨道侧拓扑结构的结构特点、性能优劣及工程应用适配性; 再次从理论分析角度, 阐述了动态电路法、标量磁位谐波分析法、矢量磁位谐波分析法3类解析方法的研究进展与优化方向, 并且围绕车辆动力学, 分别从单悬浮架、整车动力学建模及车辆振动控制3个维度, 总结了现有建模方法、模型精度优化及减振控制策略的研究成果; 最后指出当前超导电动悬浮技术在电磁耦合建模、动力学特性优化、工程化可靠性等方面存在的问题, 并对其未来发展趋势进行了展望。

关键词: 磁悬浮列车; 超导电动悬浮; 拓扑结构; 车辆动力学; 振动控制

中图分类号: U237; U266.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0001-14

0 引言

磁浮交通依托无接触的电磁作用力实现列车的支承与驱动, 兼具安全、舒适、节能、环保等优势, 是突破轮轨交通速度瓶颈、实现轨道交通高速化发展的有效途径^[1-2]。

目前, 已实现或即将实现商业化运营的磁浮列车制式主要有2种: 一种制式是以德国TR系列为代表的电磁吸力式磁悬浮列车, 它利用车载可控电磁铁与铁磁轨道之间相互作用产生的电磁吸力实现悬浮和导向。由于该制式磁浮列车采用常规导线式励磁绕组作为载流源, 为降低励磁损耗, 悬浮间隙通常设计得较小, 典型值约为10 mm。电磁吸力式磁悬浮系统依赖气隙位移的实时检测, 需要通过动态调节励磁电流实现悬浮力的稳定控制。另一种制式是以日本山梨试验线为

代表的电动斥力式磁悬浮列车, 它依靠车载超导磁体产生的空间强磁场与轨道侧闭合的非磁性导体内感生的涡流相互作用, 产生以斥力为主的电磁力, 从而实现列车的悬浮和导向。该制式具有悬浮间隙大(可达100 mm以上)、自稳定悬浮、效率高等优点, 成为超高速磁浮交通的主流技术路线之一。

本文首先梳理超导电动悬浮技术的国内外研究进展, 然后从系统拓扑结构、电磁理论分析、车辆动力学、振动控制4个核心维度, 系统性地总结当前技术研发的关键难点与瓶颈, 为我国超导电动悬浮技术的工程化研发与应用提供理论支撑。

1 超导电动悬浮技术研究进展

日本是超导电动悬浮技术研发的先行者, 自上世纪70年代起持续开展研究, 目前已具备商业化应用条

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFF0508000); 国家自然科学基金项目(52425702, 52577070); 轨道交通运载系统全国重点实验室自主课题(2026RVL-T03); 高速磁浮运载技术全国重点实验室开放课题(SKLM-SFCF-2024-009)

第一作者: 罗俊, 男, 博士, 副研究员, 主要从事磁悬浮与电磁驱动方面的研究; E-mail: jl原因@swjtu.edu.cn

通信作者: 马光同, 男, 博士, 研究员, 主要从事电磁悬浮与超导工程研究; E-mail: gtma@swjtu.edu.cn

引用格式: 罗俊, 朱韬宁, 苏振华, 等. 超导电动悬浮技术的发展现状与关键技术[J]. 机电传动, 2026(2): 1-14. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.001.

Citation: LUO Jun, ZHU Taoning, SU Zhenhua, et al. Current development status and key technologies of superconducting EDS[J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 1-14. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.001.

件。其研发历程历经原理验证、试验线测试、工程化落地几个阶段,如图1所示,1972年成功研制超导直线推进电机与首辆超导电动悬浮列车 ML-100,1977年、1997年先后开通宫崎试验线、山梨试验线进行线路试验,2015年山梨线 L0 型列车实现 603 km/h 的载人

运行速度,成为目前唯一突破 600 km/h 的地面载人运输系统^[3]。在相关技术得到充分验证后,日本于 2014 年开工建设东京品川至名古屋的中央磁浮新干线,该商业运营线线路全长 286 km,列车设计运行时速达到 505 km,并预计在 2034 年前后开通运行。

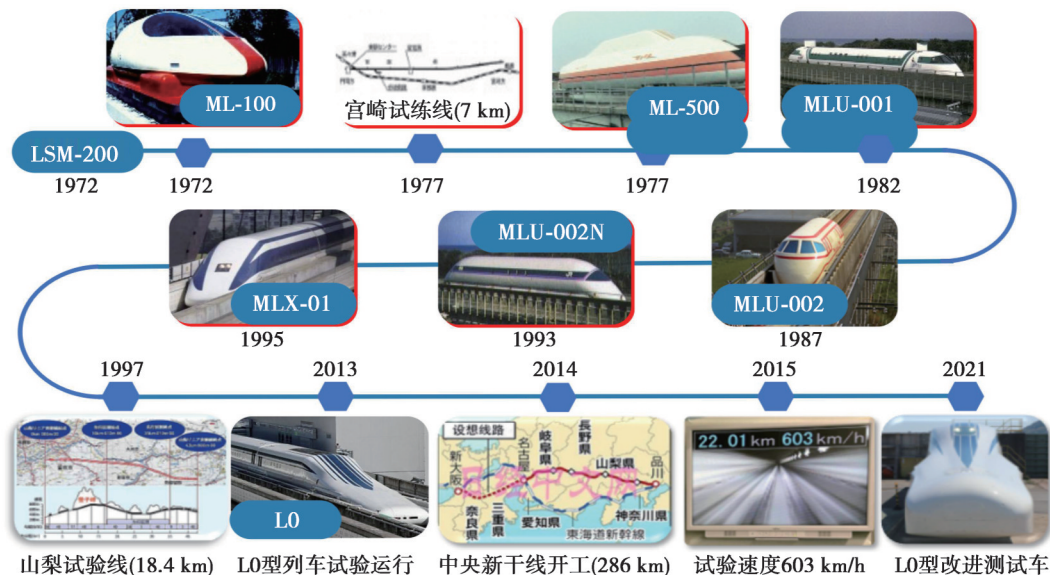


图1 日本超导电动悬浮列车开发进程

Fig. 1 Milestones of superconducting EDS development in Japan

我国关于超导电动悬浮技术的研究起步较晚,近年来也在积极探索,进行样机研制和试验线建设。中车长春轨道客车股份有限公司(中车长客)于2019年3月启动超导电动悬浮全要素试验线研发工作。试验线整体概况如图2所示,线路全长200 m,包括加速区、悬浮区和制动区。试验车辆搭载缩比尺寸的超导磁体,在2023年3月实现了悬浮运行^[4],但受限于线路尺寸,其运行速度仅为50 km/h。该试验线的悬浮运行对超导磁体、直线同步牵引及低温制冷等关键技术进行了充分验证,为超导电动磁浮交通系统的工程化应用奠定了基础^[5-6]。



(a) 轨道线圈



(b) 磁浮车辆

图2 中车长客超导电动悬浮试验线

Fig. 2 Test line of CRRC for superconducting EDS

2015年航天科工三院对多种制式磁浮方案论证,初步锁定低温超导电动悬浮作为超高速管道交通技术路线,并成立了磁悬浮与电磁推进技术总体部。基于超导电动悬浮原理,航天科工三院研究了高速磁浮推进技术,在河北涿水建立了一条超导电动悬浮推进试验线,如图3(a)所示,并在2021年5月与山西省合作建设了高速飞车试验线——大同(阳高)试验线^[7],如图3(b)所示。2021年11月,该项目组采用板式超导电动



(a) 涿水试验线



(b) 大同(阳高)试验线

图3 航天科工超导电动悬浮试验线

Fig. 3 Test line of CASIC for superconducting EDS

磁悬浮技术路线, 建设了400 m超高速超导电动磁悬浮电磁推进试验线, 并完成了最高速度623 km/h的悬浮验证。2023年9月7日, 在380 m长的试验线上实现了234 km/h的试验速度^[8]。2024年3月, 航天科工三院与山西省联合建成超高速低真空管道磁浮试验线, 试验线全长2 km, 采用线圈式超导电动磁悬浮, 实现了试验车级别的稳定悬浮, 最高悬浮试验速度达150 km/h。为应对高速运行带来的挑战, 项目组继续开展了以地面试验为主的电磁激振试验台研究工作^[9]。

国防科技大学磁浮团队在长沙建立了400 m的超导电动磁悬浮试验线, 并于2025年12月25日成功将吨级重的试验车在2 s内加速至700 km/h的试验速度, 该速度是目前全球最快的超导电动磁悬浮试验速度^[10]。

2 超导电动悬浮系统拓扑结构

超导电动悬浮系统电磁单元的核心功能是实现列车纵向牵引与制动、垂向和横向稳定支撑。其中, 超导磁体产生的空间磁场与地面推进线圈产生的行波磁场相互作用, 为列车提供驱动力或制动力; 超导磁体的磁场切割闭合的“8”字形线圈, 在其内部产生感应电流, 它们共同作用, 形成车辆的悬浮力和导向力。轨道侧结构作为超导电动悬浮系统电磁耦合的关键载体, 其拓扑形式直接决定了系统的浮阻比、承载能力、制造成本及工程适配性。根据结构形式的不同, 磁浮轨道可分为片状导体式、短路线圈式与零磁通线圈式3类^[11]。

片状导体式轨道具有结构简单、制造成本低等优点^[12], 但次级板内感应涡流损耗较大, 导致系统效能偏低。为改善这一不足, 文献[13]提出了梯状导体结构, 通过次级板镂空设计提高浮阻比, 并减少材料用量。但该结构会大幅增加次级轨道的制造与维护成本; 此外, 片状导体结构要求导体板沿运动方向连续分布, 相邻导体板的搭接位置容易因次级导体开断产生较大的悬浮力波动。

相较而言, 线圈式结构承载能力更强, 更有利于模块化生产, 其浮阻比较片状导体结构也有所提高。因此, 早期的超导悬浮列车研究主要采用短路线圈式结构^[14], 如图4所示。图4(a)为采用倒“T”形轨道的超导电动磁悬浮列车结构示意图。图4(a)中, 超导磁体呈“L”形分布, 其中, 沿水平方向安装的超导磁体通过切割地面闭合的线圈产生悬浮力; 沿竖直方向安装的超导磁体与地面推进线圈构成超导直线同步电机, 产生推进车辆运行的驱动力。将两侧轨道上相对的推进线圈横向并联, 当车辆出现横向偏移时, 由于两侧线圈内的感应反电势出现差值, 因而在线圈回路中感应生成环流, 该环流在超导磁体励磁磁场的作用下, 会产生指向轨道平衡位置的恢复力, 可增强列车导向

力, 最终实现推进和导向功能的集成化^[15]。

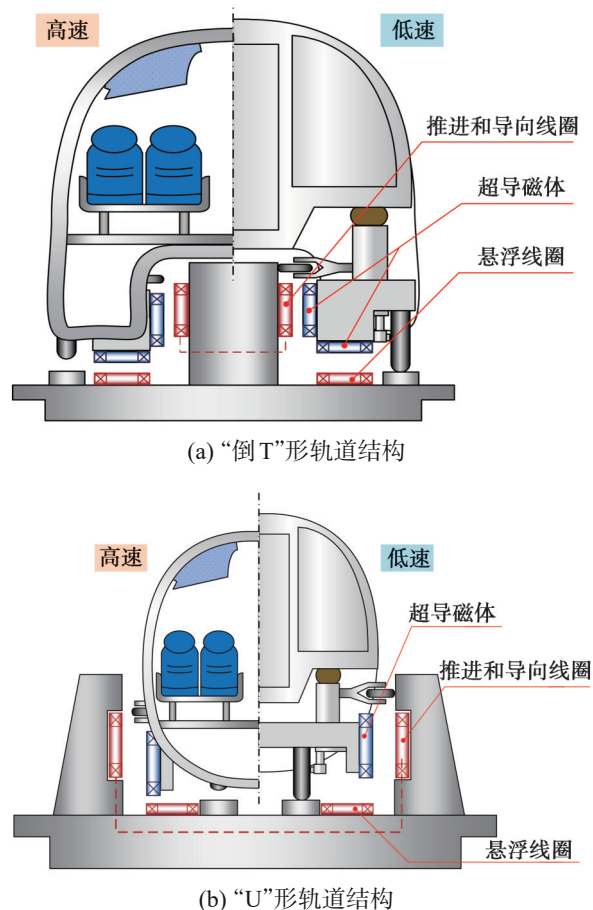


图4 单线圈式悬浮结构

Fig. 4 Schematic diagram of single-coil EDS system

日本早期研制的ML-100A与ML-500磁浮列车采用了倒“T”形轨道结构, 但由于车辆底部可利用空间小, 之后被结构形式更加友好、更加安全的“U”形轨道梁所取代^[16], 如图4(b)所示。由图4(b)可知, 该结构取消了车辆底部布置的超导磁体, 悬浮力和驱动力均通过安装在车辆两侧的超导磁体产生, 实现了超导磁体的轻量化和低温容器结构的简化。

为了进一步提高超导电动悬浮系统的浮阻比, 减小列车运行损耗, 美国学者Powell和Danby提出了零磁通电动悬浮原理结构。该结构将与同一个超导线圈耦合的两个轨道线圈回路设计为反向串联连接, 使得在平衡位置处轨道线圈和超导线圈之间的净耦合磁通为0, 从而减小轨道线圈和超导线圈之间的互感绝对值、增大互感随位移的增量, 实现系统浮阻比的提高。基于零磁通线圈原理, 文献[17]提出了侧壁安装的零磁通线圈结构: 由于上下2个线圈回路构成“8”字形拓扑, 因此该结构也被称作“8”字形零磁通线圈。此外, 通过将横向相对布置的2组零磁通线圈互连, 可实现横向方向的零磁通结构设计, 进而将悬浮与导向功能集成到侧壁安装的零磁通线圈上。推进系统仍然采用无铁芯的超导直线同步电机。该结构示意图如图5(a)所示。

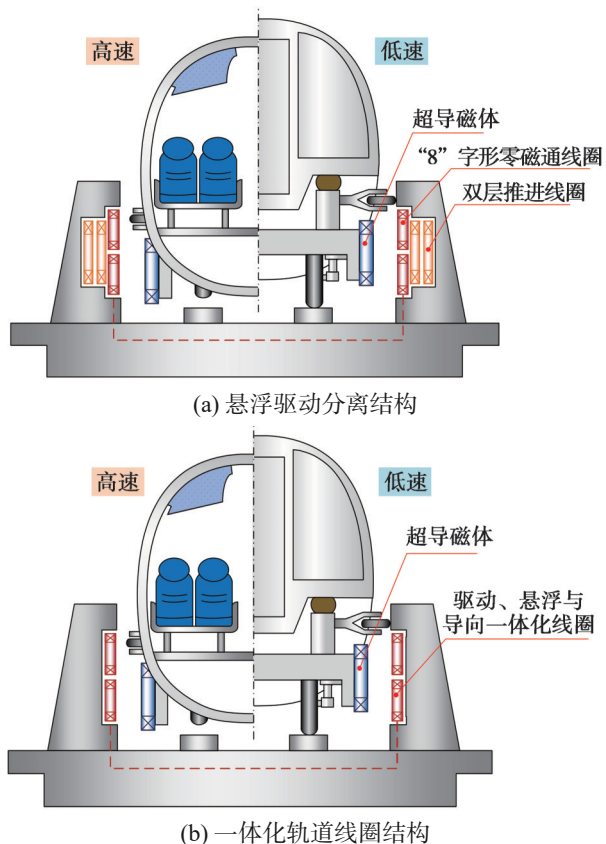


图5 零磁通线圈式悬浮结构

Fig. 5 Schematic diagram of null-flux-coil EDS system

在上述结构中,推进和悬浮功能需分别由独立线圈完成;而轨道线圈沿全线路铺设,若能减少线圈使用数量,即可达到降低制造成本的目标。因此,文献[18]的作者在1994年首次提出了采用一体化轨道线圈实现推进、悬浮与导向功能的集成化设计,如图5(b)所示。该结构的悬浮导向原理与侧壁式超导电动悬浮系统一致,不同之处在于通过将三相交流电注入零磁通线圈,省去了独立设置推进线圈的需求。之后,相关研究人员通过在宫崎试验线上安装一段长150 m的一体化线圈,测量了列车240 km/h速度运行条件下轨道线圈上的电磁力、磁场、感应电压等参数,验证了一体化线圈的结构原理^[19]。

一体化轨道线圈结构在降低轨道制造成本方面具有优势,但受轨道线圈分布形式的影响,磁轨间电磁耦合力的波动幅度显著加剧,且3个方向电磁力集中于同一线圈也导致了线圈应力集中和温度升高的问题,仍需要结合实际应用需求进行线圈结构优化和可靠性提升设计。

3 磁轨电磁作用关系

超导电动悬浮气隙磁场呈现三维分布、强耦合、动态变化的特征,其电磁解析是系统设计与性能优化的基础。有限元法虽求解精度高,但受限于系统大尺寸、长行程的特点,仿真计算耗时长,且难以揭示内

部电磁转换机理。解析法则因计算高效、物理意义明确,成为超导电动悬浮系统分析的主流方法。根据建模思路,解析法主要分为动态电路法、基于标量磁位的谐波分析法以及基于矢量磁位的谐波分析法3类。各类方法历经多年研究与优化,求解精度与适用范围不断提升。

动态电路法将轨道线圈与超导线圈之间复杂的空间磁场耦合关系等效为随空间位置变化的耦合互感。基于动态电路理论,建立等效电路电压方程以求解线圈感应电流,并采用虚功法推导系统所受的电磁力。日本铁道技术研究所^[17-18]于20世纪90年代建立了超导电动悬浮系统解析计算模型,并在试验线测试中验证了模型的可靠性。随后,美国阿贡实验室^[20]采用谐波近似法对超导电动悬浮系统不同拓扑构型的电磁解析公式进行了推导与计算,系统揭示了侧壁式超导电动悬浮系统与一体化超导电动悬浮系统的电磁力演变规律。然而,在上述模型中,超导磁体与轨道线圈之间的互感仅考虑了基波分量,模型的计算精度不高。

近年来,中、韩两国学者基于动态电路法,进一步完善并发展了超导电动悬浮系统的解析模型。韩国铁道科学研究院研究人员^[21-22]将零磁通线圈降维简化为二维矩形回路,引入解耦等效互感处理多线圈间耦合效应,有效提升了模型的计算速度,同时通过傅里叶级数表征了互感的谐波分量,可得到三维电磁力的瞬态变化规律。西南交通大学研究团队^[23-24]建立了超导电动悬浮场-路-运动耦合模型,提出考虑线圈真实几何特征与空间姿态,并基于离散诺依曼(Neumann)公式求解车载超导磁体与轨道线圈间互感的方法^[25],进一步提升了动态电路模型的求解精度;同时团队还提出基于解析-试验耦合的超导电动悬浮测试方法,用于静态测量零磁通电动悬浮电磁力特性^[26]。

动态电路法是基于“场化路”的集总参数思想,利用耦合互感来表征线圈之间磁耦合关系,该方法为分析计算超导电动悬浮电磁力特性带来极大便利,但无法描述磁体或轨道线圈的复杂空间磁场分布。基于标量磁位或矢量磁位的谐波分析方法直接在三维空间中求解麦克斯韦方程,可以得到空间磁场分布特征。其中,标量磁位法采用空间磁动势表征线圈内电流分布情况,并利用双重傅里叶级数对磁动势波形进行分解展开,将其转化为连续函数后完成求解^[27]。日本九州大学研究人员^[28]采用标量磁位法求得超导磁体的空间磁场分布,推导超导直线同步电机在交直流旋转坐标系下的数学模型,并提出可通过控制电枢电流为超导直线同步电机提供辅助悬浮力和导向力的方案。北京交通大学学者进一步发展了基于标量磁位的谐波分析方法,提出一种基于超导磁场磁势分布的解析方法^[29],该方法考虑了超导磁体端部效应对超导电动悬浮三维电磁力的影响,围绕悬浮架偏移及偏转工况展

开了一系列电磁力特性分析^[30]。

基于标量磁位的谐波分析法通常以线圈中心线为空间磁动势分布的边界, 该处理方式会忽略线圈截面尺寸对磁场的影响; 而基于矢量磁位的谐波分析法通过双重傅里叶变换直接表征线圈内部的电流分布, 可将线圈截面尺寸对空间磁场分布的影响纳入计算框架, 因此能够有效提升磁场分布的计算精度。文献[31]通过矢量磁位方法求解得到超导线圈在空间域内的磁场分布, 在此基础上推导得到超导线圈与推进线圈间的互感解析表达式, 最终实现了电机输出推力的精准计算。文献[32]运用该模型研究了有重叠绕组和非重叠绕组的超导直线同步电机的电磁力特性。哈尔滨工业大学学者^[33]基于矢量磁位法建立了考虑线圈纵向端部效应的超导磁体空间磁场计算模型, 并推导了双边超导直线同步电机磁链、反电势与三维电磁力表达式。西南交通大学学者^[34]基于矢量磁位的谐波分析法研究了双层绕组超导直线同步电机电枢磁场, 指出了内外层绕组谐波磁场存在空间互补效应, 可有效提高电枢磁场的正弦度, 抑制电机推力波动。在此基础上, 进一步研究了双层绕组超导直线同步电机参数设计方法^[35]。

综上, 在超导电动悬浮系统磁轨电磁作用关系的研究中, 有限元法通用性强、计算精度高, 但受计算量限制, 难以适配大尺寸长行程工况, 运算效率偏低; 解析法虽前期建模推导工作量较大, 但具备运算效率高、计算精度高的优势, 是当前该领域的主流研究方法, 其可进一步划分为动态电路法、基于标量磁位的谐波分析法、基于矢量磁位的谐波分析法3类。基于矢量磁位的解析方法通过描述空间电流或磁动势分布, 求解区域控制方程以获得磁场分布, 进而计算电磁力。该方法能够较好地反映空间磁场的实际分布, 为车辆磁屏蔽及动态磁场影响分析等研究提供可靠手段。动态电路法通过磁轨间空间依赖的耦合互感表征线圈之间的磁耦合关系, 省去了复杂的空间磁场求解, 简化了计算流程, 并且耦合互感的计算可借助空间坐标变换考虑车体多自由度运动, 从而为车辆多体动力学耦合分析提供了有效的计算方法。现有研究仍存在不足: 当前解析模型普遍假设磁轨空间内不存在铁磁材料的干扰, 但实际超导电动悬浮系统的车体结构中通常集成了大量金属导体与铁磁构件; 尽管受磁场空间指数衰减特性的影响, 该类材料引入的非线性干扰作用相对较弱, 但仍有必要建立更精准的电磁作用模型, 对该影响开展系统性研究。

4 车辆动力学

超导电动悬浮列车在实际运行过程中, 受轨道不平顺、桥梁-隧道过渡段参数突变、轨道超高变化等多源因素耦合作用, 始终处于复杂的耦合激振环境中。

与常导电磁悬浮列车可通过主动控制调节悬浮电流的控制模式不同, 超导电动悬浮列车依托动生电磁力原理实现被动自稳定悬浮, 其悬浮电磁力完全由车轨间相对位置与相对运动速度决定, 无法通过主动控制实时调节; 同时该系统以电磁结构作为初级悬挂, 整体阻尼较小, 对外部激振的抑制能力偏弱^[36], 因此对系统被动稳定性分析与动力学建模提出了更高要求。

车辆动力学建模的核心在于精准描述车轨电磁耦合机理及列车各部件的空间受力传递关系。当前研究主要分为单悬浮架动力学与整车动力学两大层面, 并围绕模型精度提升与振动抑制开展了大量工作。

4.1 单悬浮架动力学

单悬浮架动力学是超导电动悬浮列车动力学研究的基础。该方法将车载超导磁体与悬浮架等效为单一刚体, 对列车多部件间的复杂耦合关系进行降阶处理, 具有模型结构简洁、求解效率高、计算成本低等优势, 能够有效反映悬浮架在电磁激扰下的振动规律, 主要用于探究系统阻尼特性与振动演化规律。

早期单悬浮架动力学研究以基础模型构建与振动抑制效果验证为主, 聚焦于简单自由度模型的搭建与阻尼线圈的减振作用探究。日本关西大学较早开展了超导电动悬浮列车系统性的动力学研究工作, 通过在悬浮架中引入阻尼线圈^[37-40], 构建了垂向2自由度动力学模型(如图6所示, 图中尺寸单位为m), 从理论与试验层面验证了阻尼线圈对车辆垂向与俯仰振动的有效抑制能力, 为单悬浮架动力学的后续研究奠定了基础。该研究的核心贡献在于明确了阻尼线圈在振动抑制中的有效性, 搭建了简单可行的列车动力学框架。然而, 该模型仅考虑垂向单一方向振动, 未涉及多方向耦合作用, 模型简化程度较高。随着研究的深入, 研究人员逐步突破简单自由度与单一物理场的局限, 聚焦于多场耦合模型的构建与系统阻尼特性的量化分析, 推动单悬浮架动力学研究向精细化方向发展。中国航天科工集团^[41-42]基于动态电路理论, 构建了场-路-运动耦合的超导电动悬浮3自由度动力学模型, 突破了单一物理场建模的局限, 系统解析了单悬浮架系统的固有振动特性, 明确了自由振动工况下系统垂向与横向振动均呈发散趋势的演化规律, 并揭示了系统垂向、横向阻尼特性与列车运行速度、振动频率、振动幅值等关键参数间的内在映射关系, 弥补了早期研究无法量化阻尼特性的不足, 进一步完善了单悬浮架动力学的理论体系。

在多场耦合模型的基础上, 研究人员进一步拓展模型自由度, 聚焦于电磁力波动对悬浮架振动的影响及抑制策略研究, 使单悬浮架动力学研究更贴合实际工程场景。西南交通大学研究团队^[43]结合动态电路理论与刚体动力学, 构建了悬浮架5自由度磁-电-机械耦

合动力学模型,进一步细化了悬浮架的振动维度,系统分析了电磁力波动及其分配不均对悬浮架动力学行为的影响。研究表明,悬浮架在垂向和俯仰方向上的振动幅值较大,且随时间推移呈加剧趋势。针对这一实际工程问题,进一步提出了一种非均匀励磁电流抑制策略,有效抑制了悬浮架的俯仰振动。

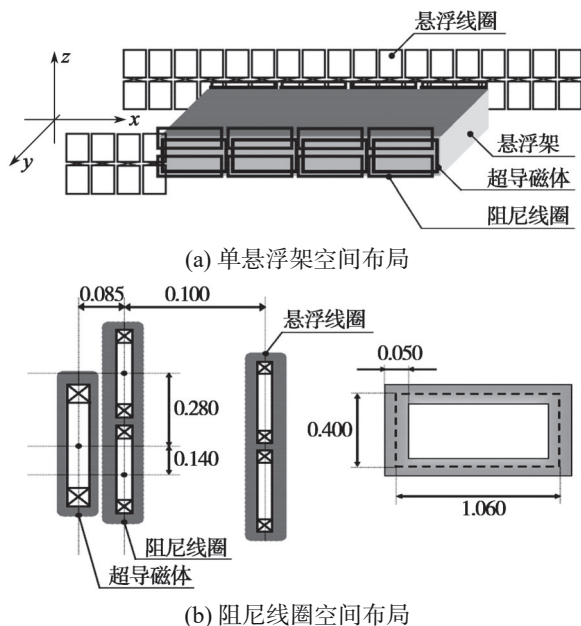


图6 超导电动悬浮系统单悬浮架示意图

Fig. 6 Schematic diagram of single levitation bogie for superconducting EDS

单悬浮架动力学模型的局限性在于忽略了车体-悬浮架、相邻悬浮架之间的多体耦合作用,无法复现多编组列车的动力学响应差异,且未引入轨道不平顺的

随机振动激励,因此,现有模型的计算结果难以反映列车实际运行的动态响应规律,仅适用于局部部件的振动特性分析,无法支撑整车性能评估。

4.2 整车动力学

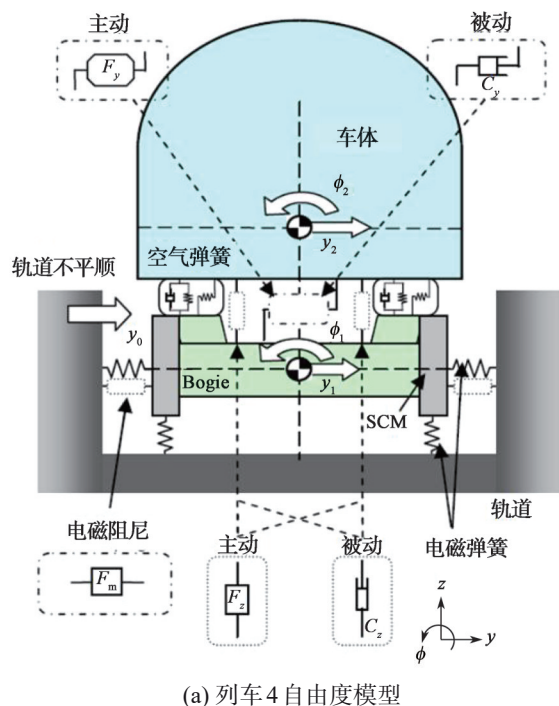
相较于单悬浮架动力学分析方法,整车动力学研究需覆盖更高维度的系统自由度,列车多部件间的空间耦合受力传递特性也更为复杂。以日本 L0 系超导电动悬浮列车为例,其中间车体与头车、尾车体之间通过铰接式悬浮架实现跨车体连接,车体-悬浮架间的拓扑耦合关系复杂,整车动力学模型的构建难度进一步加大。

适用于不同自由度超导电动悬浮列车的动力学模型通用解析表达式为

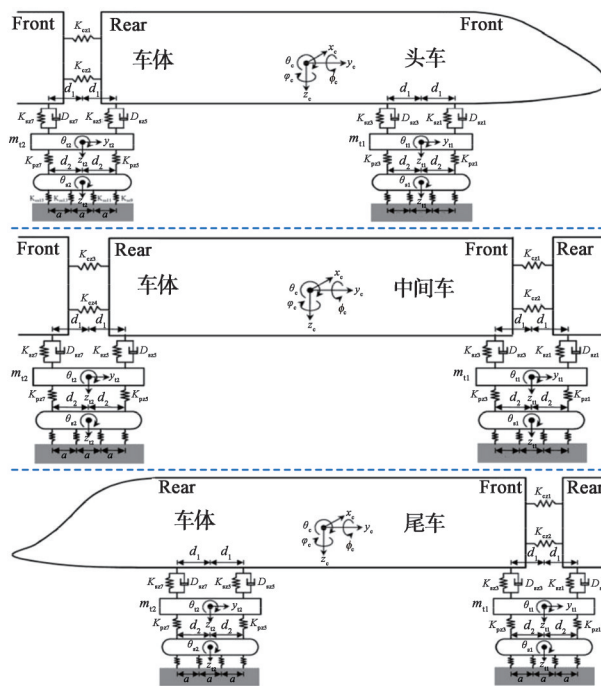
$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为质量、阻尼与刚度矩阵; $\ddot{X}$ 、 $\dot{X}$ 和 X 分别为列车不同部件的位移列向量、速度列向量和加速度列向量; F 为外界随机振动激励列向量(如电磁激励、轨道不平顺和气动阻力等)。

基于上述表达式,国内外学者建立了超导电动悬浮列车的多自由度动力学模型。在超导电动悬浮列车整车动力学的建模研究中,针对车轨复杂电磁耦合关系的降阶简化,是平衡模型求解效率与计算精度的核心技术手段。日本铁道技术研究所研究人员^[44]建立了列车 4 自由度模型,如图 7(a)所示,通过线性弹簧模拟了车轨间的电磁关系,并以提升车辆在横向与侧滚运动方面的乘坐舒适性为目标,提出了采用主动执行器作为二次悬挂的磁悬浮车辆振动控制系统。韩国斗山重工业企业研究开发院研究人员^[45]采用线性简化思



(a) 列车 4 自由度模型



(b) 列车 24 自由度模型

图7 超导电动悬浮列车定刚度动力学模型

Fig. 7 Dynamical model of superconducting EDS train with constant stiffness

路, 将车轨间的悬浮力与导向力等效为各向独立的定刚度线性弹簧单元, 基于此构建了整车24自由度多体动力学运动方程, 开展了列车系统的动力学性能分析, 如图7(b)所示。然而, 在真实运行工况中, 车轨间的动态电磁耦合作用虽具备等效电磁弹簧的力学属性, 但其等效刚度并非恒定值, 而是呈现出强非线性特征, 且悬浮、导向、俯仰、偏航等各自由度间存在显著的力学耦合效应。若采用各向解耦的定刚度线性弹簧简化模型, 无法精准复现车轨电磁耦合的非线性、强耦合力学特性, 也难以准确反映悬浮架与整车系统在复杂多源激励下的真实动力学行为。

针对线性解耦模型无法精准刻画车轨电磁耦合非线性、强耦合特性的核心局限, 国内外学者围绕电磁力高精度建模方法开展了大量优化研究。韩国铁道研究院^[46]研究了胶囊式超导电动悬浮系统的动态电磁特性, 通过参数化拟合建立了电磁刚度随悬浮架运行速

度、空间位姿动态变化的解析模型, 并在此基础上搭建了列车15自由度多体动力学模型, 如图8(a)所示, 同时系统分析了不同系统设计参数下的列车动力学响应特性与运行稳定性。然而, 该方法参数化拟合的精度受拟合范围限制, 难以覆盖列车全运行工况下的电磁特性。为解决电磁力计算精度不足的问题, 韩国嘉泉大学^[47-48]采用了高精度数值预计算的技术路线, 通过全参数化电磁仿真构建了悬浮力、导向力与系统垂向偏移、横向偏移的全工况映射关系数据库, 基于查表插值法将实时非线性电磁力数据嵌入整车多体动力学模型, 实现了车轨动态电磁耦合作用的高精度复现, 如图8(b)所示; 西南交通大学^[49-51]通过构建电磁力与姿态的二阶多项式综合考虑了垂向-横向运动对电磁力的综合影响, 并基于14自由度动力学模型完成了列车动力学性能评估、运行平稳性优化、振动主动控制等一系列系统性研究, 如图8(c)所示。

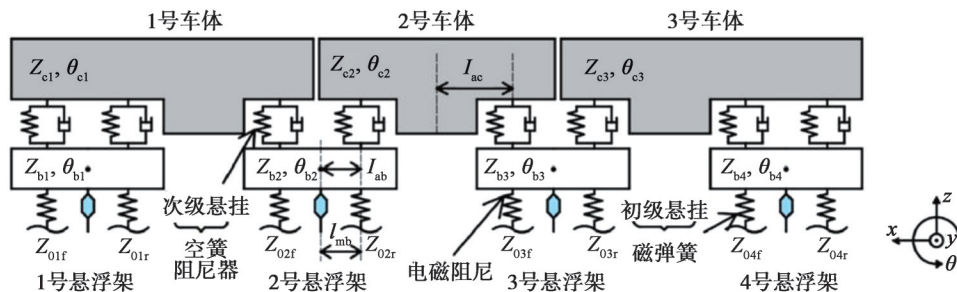
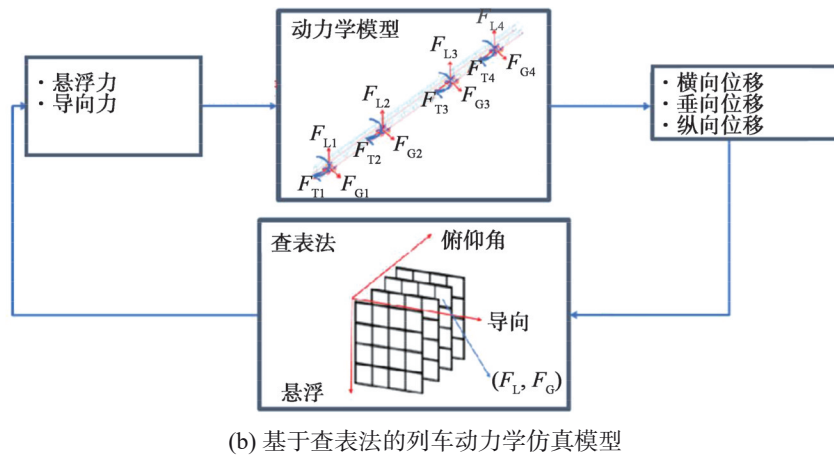
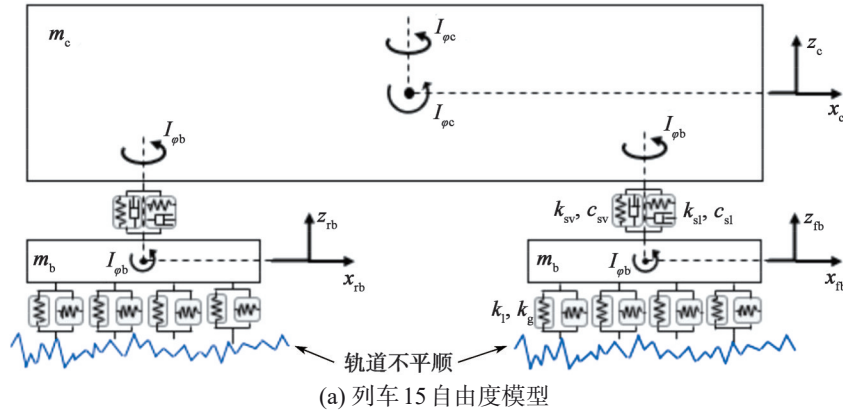


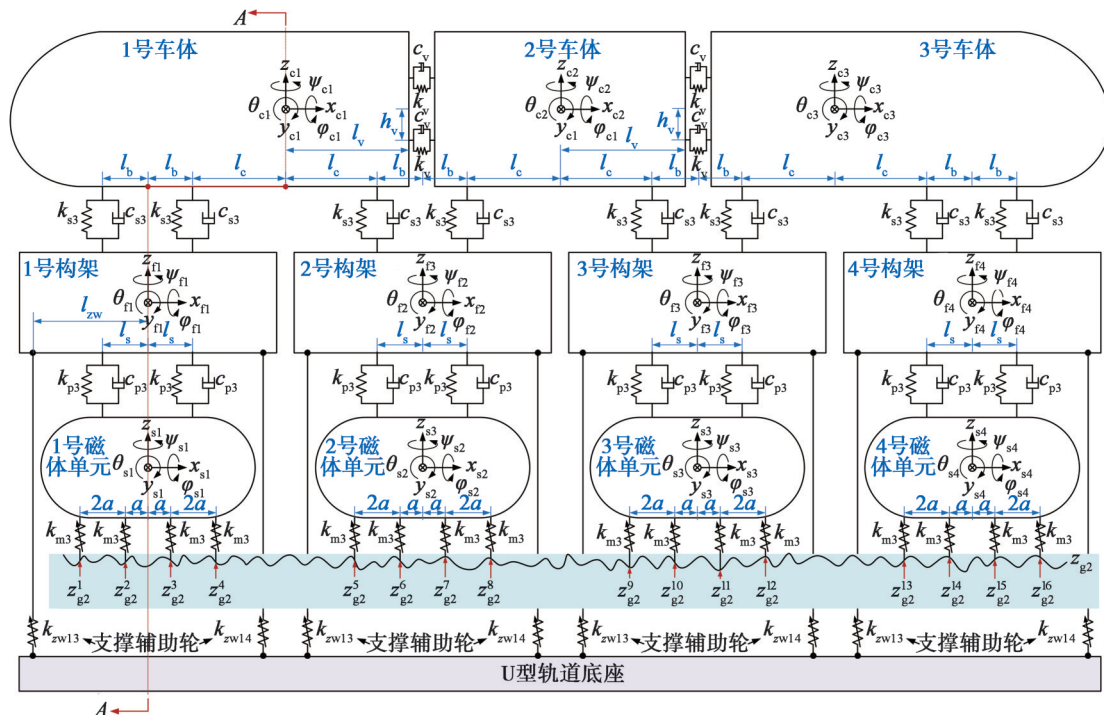
图8 超导电动悬浮列车变刚度动力学模型

Fig. 8 Dynamical model of superconducting EDS train with variable stiffness

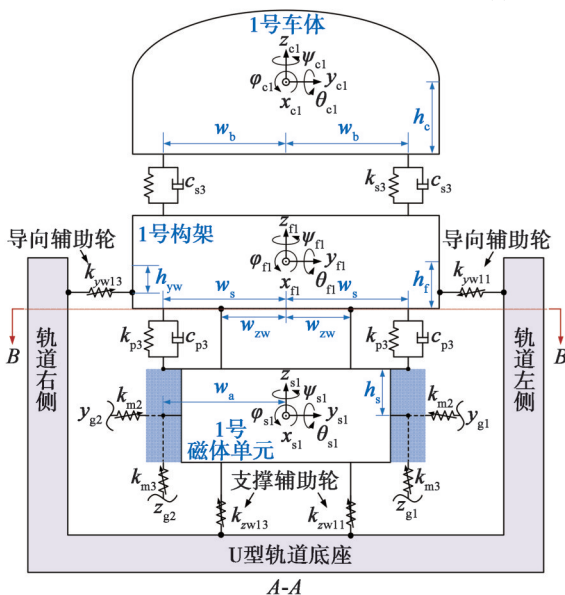
上述机构针对电磁力的计算精度进行了更深层次的研究, 变刚度电磁力模型也能更好地模拟电磁力的真实变化, 但所建立的动力学模型自由度有限, 仍然无法反映实际运行条件下复杂激励对列车动力学多自由度振动响应的影响。

基于上述分析, 当前研究者们着眼于建立包含更多自由度的超导电动悬浮列车动力学模型。西南交通大学学者以集成推进、悬浮与导向功能的超导电动悬浮系统为研究对象, 提出一种考虑线圈横向连接形式的电磁力解析计算方法, 并通过有限元仿真与试验数据进行了综合验证; 在此基础上, 建立了包含 3 节车体、4 个悬浮架在内的 66 自由度横垂耦合动力学数学

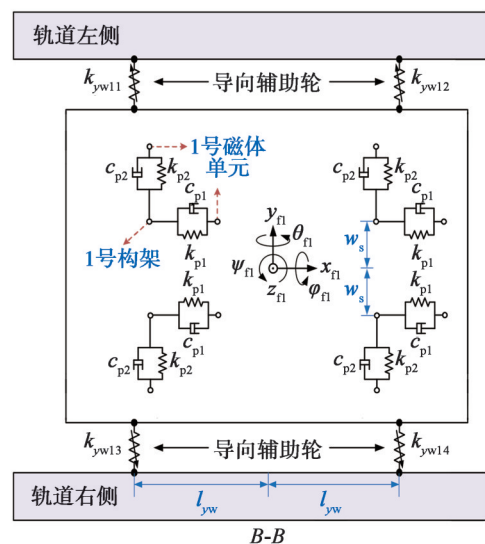
模型, 并借助仿真验证了其可靠性; 同时, 为解决变刚度动力学模型中电磁力求解效率低的问题, 引入了 BP 神经网络算法, 构建了磁单元空间姿态与电磁力之间的映射关系, 显著提升了计算效率; 此外, 还建立了考虑辅助轮保护效应的失超工况动力学模型, 如图 9 所示, 通过在电磁模型中引入可变电阻实现了正常与失超状态的切换, 并通过采用区间求解法降低电压方程维度, 实现了长距离仿真计算效率的提升^[53]。文献 [54] 基于欧拉-伯努利梁理论, 建立了超导电动悬浮系统车-轨-桥耦合数值动力学模型, 采用响应面法拟合了电磁力与超导磁体单元姿态及运行速度之间的关系, 并通过决定系数 R^2 指标验证了拟合精度。



(a) 整车侧视图



(b) 整车截面局部剖视图 A-A



(c) 整车截面局部剖视图 B-B

图 9 考虑辅助轮的超导磁悬浮列车 66 自由度动力学模型

Fig. 9 Dynamical model of superconducting EDS train with auxiliary wheels (66 DOFs)

上述研究是对变刚度非线性精准模型的延伸, 也是对动力学模型的升级, 从单一工况到特殊工况、从单一耦合到多场耦合、从低效率到高效率, 研究的核心目标是解决变刚度模型的工程应用瓶颈, 提升模型的工程实用性与全工况适配能力。该模型与定刚度模型、变刚度模型共同构成整车动力学研究的完整体系。

未来, 整车动力学研究的发展趋势将聚焦于3个核心方向: 一是构建多场耦合、全工况适配的精细化动力学模型, 充分考虑电磁、机械、气动、轨道不平顺等多源激励的耦合效应, 提升模型与真实工况的贴合度; 二是优化模型求解算法, 融合智能算法与传统求解方法, 实现精度与效率的双重提升; 三是建立统一的模型评价标准, 加强不同建模方法的对比分析, 为工程实际中的模型选择提供参考。

4.3 车辆振动控制

超导电动悬浮列车在运行过程中承受着轨道不平顺、电磁激励等多源激励, 且系统自身阻尼较小, 导致车体与磁体长期处于剧烈振动环境中。剧烈的振动不仅影响乘坐舒适性, 还可能引发超导磁体失超、低温容器疲劳失效等安全问题。因此, 开展有效的振动控制研究, 对于保障列车运行安全与服役可靠性具有重要意义。上述研究中, 学者已建立超导电动悬浮列车悬挂定刚度和定阻尼动力学模型, 未采用可调阻尼器或电磁阻尼线圈对列车振动进行有效控制。因此, 近年来, 国内外学者围绕一、二系悬挂控制以及电磁阻尼控制等方面开展了系统研究, 逐步构建起涵盖被动、半主动与主动控制的多层次减振体系。

被动控制是振动控制的基础, 具有结构简单、可靠性高、无额外能耗的优势, 其中阻尼线圈被动控制是主要的技术路径。文献[55]针对日本JR Maglev转向架, 采用三维数值仿真与虚拟位移法, 在每台超导线圈前方对称布置2个阻尼线圈(单台16个), 通过建立电动悬浮系统电路与转向架运动方程, 评估其对转向架旋转运动及垂向振动的抑制效果。研究表明, 阻尼线圈可显著改善各方向的阻尼性能, 侧滚阻尼提升最为明显, 俯仰、偏航阻尼也大幅提升, 振动发散得到有效抑制。

主动悬挂控制通过控制器实时输出控制力, 具有响应快、精度高、减振效果显著的优势, 弥补了被动控制在自适应能力方面的不足。文献[56]基于线性二次型(LQ)最优控制理论在二系悬挂中设计了主动控制器, 构造了分别以车体和悬浮架的动能和势能为二次型的目标函数, 以2自由度的悬浮车辆垂向振动模型为研究对象, 从理论计算和试验2个方面初步验证了LQ主动悬挂系统可有效提高悬浮车辆的运行稳定性。但既有研究仅选取阶跃信号作为外界激励开展分析, 与列车实际运行中的复杂多源激励场景存在较大差异,

未能充分体现控制器在实际工况下的适应性。随着研究的深入, 研究人员逐步突破单一自由度、单一激励的研究局限, 将主动控制的研究视角拓展至横向振动控制领域。文献[57]以横向-侧滚4自由度横向动力学模型为对象, 仿真分析了悬浮车辆的横向动力学响应规律, 并基于LQ理论设计了主动控制器来抑制车体的横向及侧滚振动幅值。

主动悬挂控制具有结构复杂、能耗偏高的局限性, 而半主动悬挂控制可通过调节阻尼/刚度参数衰减振动, 能够兼顾减振效果与可靠性, 更贴合超导电动悬浮列车的实际工程应用需求。西南交通大学研究人员^[58]针对超导电动磁悬浮列车横向动力学性能劣于垂向的问题, 提出了基于天棚-地棚混合阻尼的二系悬挂半主动控制策略, 并通过SIMPACK与Simulink联合仿真优化控制参数, 如图5所示, 仿真结果表明, 相比被动悬挂, 该控制策略有效抑制了车体和悬浮架小于5 Hz的低频振动。文献[59]以超导磁体为控制目标, 提出了地棚-反向位移驱动协同控制策略, 采用NSGA-II算法对控制策略的比例因子和最大阻尼值进行多目标优化, 结果表明, 相比天棚阻尼控制, 该控制策略可使超导磁体单元的振动得到更好抑制。

针对超导电动悬浮系统自身阻尼小、部分速度区间存在负阻尼的核心问题, 目前学界已突破传统悬挂系统控制的框架局限, 开展了基于电磁阻尼的主动控制研究。研究的核心思路是通过设计电磁阻尼线圈, 利用电磁感应原理生成阻尼力, 直接对车体、构架及磁体的振动进行衰减; 该方案具有响应速度快、无机械接触、减振效果稳定的特点, 既是对传统悬挂系统控制的有效补充, 又是提升整体振动控制性能的重要技术路径。文献[60]建立了考虑磁体姿态与轨道不平顺的精细化磁-电-力相互作用模型, 提出了基于电压控制阻尼线圈的主动电磁阻尼控制方法。研究表明, 未施加主动控制时, 当系统运行速度高于76 km/h后, 系统垂向阻尼为负值; 采用主动控制方法后, 在0~600 km/h速度范围内, 系统垂向方向阻尼均为正值。该方法有效衰减了车体、构架和磁体在2.8~18.5 Hz频段内的垂向振动, 使3编组列车的平稳性指标均降至2.5以下。

表1总结了不同控制方法的特点。由表1可知, 3类方法具有明显的互补性: 二系悬挂控制以提升乘坐舒适性为目标, 一系悬挂控制是抑制超导磁体与悬浮架振动的关键, 而电磁阻尼控制则是解决超导电动悬浮特有负阻尼问题的核心手段。单一控制方法难以同时满足乘坐舒适性、磁体安全性以及全速度段稳定性的多重要求, 未来应向初级与次级协同的复合控制体系发展。

综上, 振动抑制方法从早期的单一控制方法、简化模型, 逐步向复合控制方法、精细化模型、全工况适配方向发展, 研究的重点已从抑制车体振动、提升

表1 不同控制方法对比分析
Table 1 Comparison of control methods

控制方法	作用位置	核心优势	固有局限
一系悬挂控制	悬浮架-超导磁体	控制直接作用于磁体，振动抑制响应迅速，可有效保护超导磁体	对车体振动的传递衰减有限，难以单独满足乘坐舒适性要求
二系悬挂控制	车体-悬浮架	减振频带宽，可显著提升乘坐舒适性，技术成熟度高	磁体振动需经悬浮架传递，控制滞后，难以抑制磁体的高频振动与负阻尼发散
电磁阻尼控制	超导磁体-轨道	无机械接触，从电磁角度缓解负阻尼问题，全速域适配性好	主动控制需额外电路与功率器件，存在电磁干扰风险，能耗与减振效果需平衡

乘坐舒适性，逐步延伸至保护超导磁体、保障运行安全，更贴合实际工程应用需求。振动控制方法均以车辆动力学模型与磁-电-力相互作用模型为基础，核心目标聚焦于多源激励下的振动抑制；该方法通过控制理论优化与仿真试验验证相结合，实现控制效果的提升与工程实用性的增强。然而，超导电动悬浮的振动控制仍存在诸多挑战，包括系统固有阻尼极低且列车中低速段存在负阻尼、超导磁体对振动极其敏感且失超后果严重，高速下磁-电-力多场强耦合分析具有复杂性等，导致模型建立困难；同时，目前分析方法的控制目标单一，存在多目标协同控制研究匮乏、全速域振动的适配性研究缺乏等问题；而且，当前研究着重于仿真与台架试验验证，缺少实车线路试验数据，无法对控制策略进行进一步验证与修正，制约了技术的工程化转化。

5 总结与展望

超导电动悬浮技术作为高速与超高速轨道交通的核心技术，历经数十年研发，已在系统拓扑结构、电磁理论分析、车辆动力学、振动控制等方面取得了显著进展。系统拓扑结构从早期的片状导体式发展为短路线圈式，目前零磁通线圈式已成为主流，一体化轨道线圈实现了推进、悬浮、导向功能的集成，大幅降低了工程制造成本；电磁解析方法不断优化，动态电路法实现了场-路-运动耦合建模，标量/矢量磁位谐波分析法弥补了磁场分布描述的缺陷；车辆动力学建模从单悬浮架降阶模型发展为整车多自由度非线性模型，实现了车轨电磁耦合、车-轨-桥耦合、失超工况等复杂场景的精准刻画，神经网络、响应面法等算法的引入提升了模型求解效率；振动控制形成了主动悬挂、半主动阻尼、主动电磁阻尼的多层次体系，半主动控制与主动电磁阻尼控制兼顾效果与工程适配性，成为解决系统阻尼不足、振动过大的关键技术。

我国的超导电动悬浮技术虽起步较晚，但已实现试验线建设与中低速试验的突破，在电磁解析、动力学建模、振动控制等理论研究方面也得到加强，为后续超高速试验与工程化研发奠定了基础。但从工程化应用视角审视，当前我国高速超导电动悬浮技术与日

本已具备商业化运营条件的技术水平相比仍存在显著差距：一是缺乏 600 km/h 速度级超高速实车线路试验数据，全速度区间内的动力学特性与系统安全性尚未得到充分验证；二是超导磁体、低温容器、轨道线圈等核心部件的长周期可靠性与寿命评估体系缺失，工程化服役性能难以保证；三是针对系统级安全防护技术的研究滞后，特别是磁体失超、悬浮间隙突变等致命故障的主动防护与应急处置能力不足；四是工程化设计标准、施工规范与运维体系尚未建立，制约了技术的规模化推广应用。结合当前的技术研究现状与工程化需求，超导电动悬浮技术未来的研究重点与发展方向主要集中在以下方面：

①高精度、多物理场耦合解析模型。融合电磁、结构、热学、气动等多物理场，建立全工况耦合解析模型；引入深度学习算法，实现电磁力、磁场的快速精准预测，为系统优化设计提供更全面的理论支撑。

②全速度区间车辆动力学特性优化。开展高速、超高速工况下车轨电磁耦合、气动-电磁耦合的动力学研究，完善失超、轨道突变等极端工况的动力学模型；优化悬浮架与车体的结构设计，提升系统的被动稳定性与抗干扰能力。

③高可靠性的振动控制技术。进一步优化半主动阻尼与主动电磁阻尼控制策略，实现控制参数的实时自适应调节；研发新型阻尼线圈与电磁执行机构，降低控制系统的工程成本，提升其服役可靠性。

④超导磁体失超的主动防护与容错控制技术。针对超导磁体失超这一工程化应用的主要安全隐患，研究基于光纤传感与电磁信号融合的毫秒级失超快速检测技术；设计高效可靠的主动失超保护与能量泄放系统，最大限度降低失超对磁体与低温系统的损伤；建立失超工况下的车辆动力学容错控制策略，确保列车在磁体局部失超时仍能安全减速停车；开展磁体失超实车模拟试验，验证防护系统的工程可靠性。

⑤基于数字孪生的全生命周期工程化管理。构建涵盖设计、制造、试验、运维全流程的超导电动悬浮列车数字孪生体，实现物理实体与虚拟模型的实时数据交互与状态映射；开发基于数字孪生的故障诊断与预测性维护系统，提前识别核心部件的潜在故障，降低全生命周期运维成本；利用数字孪生技术开展极端

工况模拟与应急演练, 提升系统运营安全性与应急处置能力。

参考文献:

- [1] 马光同, 杨文姣, 王志涛, 等. 超导磁浮交通研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 68-74.
MA Guangtong, YANG Wenjiao, WANG Zhitao, et al. Research development of superconducting maglev transportation[J]. Journal of south China university of technology (natural science edition), 2019, 47(7): 68-74.
- [2] 刘士菟, 王磊, 王路忠, 等. 电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 734-753.
LIU Shixian, WANG Lei, WANG Luzhong, et al. Review on electrodynamic suspension trains and on-board superconducting magnets[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2023, 58(4): 734-753.
- [3] IET. The graphic: maglev train [News Briefing] [J]. Engineering & technology, 2015, 10(5): 16.
- [4] 于青松, 李凯, 胡浩, 等. 超导电动悬浮应用研究与技术展望[J]. 机车电传动, 2023(4): 1-8.
YU Qingsong, LI Kai, HU Hao, et al. Research and technological prospects of applications for superconducting electrodynamic suspension[J]. Electric drive for locomotives, 2023(4): 1-8.
- [5] YU Q S, WANG M, YAO G F, et al. Study on beat vibration of a high temperature superconducting EDS maglev vehicle at low speed[J]. Applied sciences, 2023, 13(5): 3131.
- [6] SHAO Q, LI K, SHAO N, et al. Multiphysics field topology optimization design of main support structure of high-temperature superconducting magnets[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2022, 32(6): 1-5.
- [7] 沈佳. 高速飞车将从山西“起飞”[N]. 山西日报, 2021-08-28(004).
SHEN Jia. High-speed flying train to "take off" from Shanxi [N]. Shanxi Daily, 2021-08-28(004).
- [8] 凤凰网. 电磁炮当火箭助推器, 中国商业航天电磁发射高温超导电动悬浮航行试验成功[EB/OL]. (2023-09-11) [2026-01-23]. <https://tech.ifeng.com/c/8SzPcnsWJTV>.
Phoenix News. Electromagnetic gun as rocket booster: high-temperature superconducting electrodynamic suspension navigation test for commercial aerospace electromagnetic launch succeeded[EB/OL]. (2023-09-11) [2026-01-23]. <https://tech.ifeng.com/c/8SzPcnsWJTV>.
- [9] 胡道宇, 闫少强, 蔡华, 等. 磁悬浮列车超导磁体电磁激振试验台设计[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(6): 193-205.
HU Daoyu, YAN Shaoqiang, CAI Hua, et al. Design of electromagnetic vibration test bench for maglev superconducting magnets[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2023, 23(6): 193-205.
- [10] 王昊昊, 王连春, 何畅. 时速700公里国防科大创造超导电动磁悬浮推进世界纪录[EB/OL]. (2025-12-26) [2026-01-23]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2025/12/557766.shtm>.
WANG Haohao, WANG Lianchun, HE Chang. A record speed of 700 km/h: national university of defense technology sets new world record for superconducting electrodynamic maglev propulsion[EB/OL]. (2025-12-26) [2026-01-23]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2025/12/557766.shtm>.
- [11] 温旭辉, 徐善纲. 电动式磁悬浮系统分析综述[J]. 电工电能新技术, 1995(3): 7-11.
WEN Xuhui, XU Shangang. Analysis of electrodynamic levitation systems[J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 1995(3): 7-11.
- [12] HSU Y H, LANGHORN A, KETCHEN D, et al. Magnetic levitation upgrade to the Holloman high speed test track[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2009, 19(3): 2074-2077.
- [13] YAMADA T, IWAMOTO M, ITO T. Levitation performance of magnetically suspended high speed trains[J]. IEEE transactions on magnetism, 1972, 8(3): 634-635.
- [14] SAIJO T, KOIKE S, TADAKUMA S. Characteristics of linear synchronous motor drive cycloconverter for maglev vehicle ML-500 at Miyazaki test track[J]. IEEE transactions on industry applications, 1981, IA-17(5): 533-543.
- [15] MAKI N, OKUDA H, TATSUMI T, et al. A combined system of propulsion and guidance by linear synchronous motors[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1977, 96(4): 1109-1116.
- [16] FUJIWARA S. Characteristics of EDS magnetic levitation with ground coils for levitation arranged on the side wall[J]. Electrical engineering in Japan, 1988, 108(3): 101-110.
- [17] FUJIWARA S, FUJIMOTO T. Characteristics of combined levitation and guidance EDS maglev system[J]. Electrical engineering in Japan, 1993, 113(3): 123-134.
- [18] MURAI T. Characteristics of LSM combined propulsion, levitation and guidance[J]. Electrical engineering in Japan, 1995, 115(4): 134-145.
- [19] MURAI T, FUJIMOTO T, FUJIWARA S. Test run of combined propulsion, levitation and guidance system at Miyazaki test track[J]. Electrical engineering in Japan, 1996, 117(2): 68-79.
- [20] HE J L, ROTE D M, COFFEY H T. Study of Japanese electrodynamic-suspension maglev systems: ANL/ESD--20; ON: DE94011486[R]. IL United States: Argonne National Laboratory, 1994.
- [21] LIM J, LEE C Y, OH Y J, et al. Equivalent inductance model for the design analysis of electrodynamic suspension coils for hyperloop[J]. Scientific reports, 2021, 11(1): 23499.
- [22] LIM J, LEE C Y, LEE J H, et al. Design model of null-flux coil electrodynamic suspension for the hyperloop[J]. Ener-

- gies, 2020, 13(19): 5075.
- [23] 王志涛, 蔡尧, 龚天勇, 等. 基于场-路-运动耦合模型的超导电动悬浮列车特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1162-1170.
- WANG Zhitao, CAI Yao, GONG Tianyong, et al. Characteristic studies of the superconducting electrodynamic suspension train with a field-circuit-motion coupled model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1162-1170.
- [24] CAI Y, MA G T, WANG Y Y, et al. Semianalytical calculation of superconducting electrodynamic suspension train using figure-eight-shaped ground coil[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2020, 30(5): 3602509.
- [25] SU Z H, LUO J, MA G T, et al. Fast and precise calculation of mutual inductance for electrodynamic suspension: methodology and validation[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69(6): 6046-6057.
- [26] MA G T, WANG Y Y, LUO J, et al. An analytical-experiment coupling method to characterize the electrodynamic suspension system at various speeds[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2022, 69(7): 7170-7180.
- [27] NONAKA S, HIROSAKI T, KAWAKAMI E. Analysis of characteristics of repulsive magnetic levitated train using a space harmonic technique[J]. The transactions of the institute of electrical engineers of Japan, 1980, 100(5): 80-88.
- [28] SAKAMOTO T. Analysis of a superconducting linear synchronous motor propulsion in terms of DQ variables[J]. IEEE transactions on industry applications, 1996, 116(2): 177-182.
- [29] LV G, LIU Y, ZHOU T, et al. Analysis of suspension and guidance system of EDS maglev based on a novel magnetomotive force model[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2020, 10(3): 2923-2933.
- [30] LV G, LIU Y Q, ZHANG Z X, et al. Characteristic analysis of coreless-type linear synchronous motor with the race-track coils as secondary for EDS maglev train[J]. IEEE-ASME transactions on mechatronics, 2022, 27(6): 4654-4664.
- [31] CARBONARI N, MARTINELLI G, MORINI A. Calculation of levitation, drag and lateral forces in EDS-MAGLEV transport systems[J]. Archiv für elektrotechnik, 1988, 71(2): 139-148.
- [32] ANDRIOLLO M, MARTINELLI G, MOISIO M F, et al. Calculation of propulsion forces in EDS-maglev transport systems with superconducting coils[J]. Archiv für elektrotechnik, 1989, 72(5): 333-339.
- [33] GE Q W, KOU B Q, ZHANG H, et al. Harmonic magnetic field analysis method and modeling of double-sided air-cored superconducting linear synchronous motor for EDS train[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2023, 70(2): 1717-1728.
- [34] LUO J, LIU K, SU Z H, et al. Harmonic modeling of armature field of air-cored linear synchronous motor with race-track coil[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2024, 10(3): 5400-5411.
- [35] 罗俊, 刘康, 赵正伟, 等. 无铁心双层绕组超导直线同步电机参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8663-8672.
- LUO Jun, LIU Kang, ZHAO Zhengwei, et al. Optimal design of a coreless double-layer-winding superconducting linear synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8663-8672.
- [36] HAYES S, FLETCHER D I, BEAGLES A E, et al. Effect of contact wire gradient on the dynamic performance of the catenary pantograph system[J]. Vehicle system dynamics, 2021, 59(12): 1916-1939.
- [37] OHASHI S, UESHIMA T. Control method of the semi-active damper coil system in the superconducting magnetically levitated bogie against vertical and pitching oscillation [J]. IEEE transactions on magnetics, 2012, 48(11): 4542-4545.
- [38] OHASHI S. Effect of the damper coils on the guideway displacement in the superconducting magnetically levitated bogie[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2012, 22(3): 3600604.
- [39] OHASHI S, NAKAKIDA R, TAKEUCHI T. Control of the lateral vibration by using weight reduced damper coil on superconducting magnetically levitation bogie[C]//2019 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA). Neuchatel: IEEE, 2019: 1-5.
- [40] BETSUNOH R, OHASHI S. Stable levitation in the low velocity range with the damper coils in electrodynamic suspension system[J]. IEEE transactions on industry applications, 2021, 57(6): 7046-7053.
- [41] 胡道宇, 冯馨月, 张志华. 超导电动悬浮系统阻尼特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4679-4687.
- HU Daoyu, FENG Xinyue, ZHANG Zhihua. Study on the damping characteristics of superconducting electrodynamic suspension system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4679-4687.
- [42] HU D Y, FENG X Y, ZHANG Z H. Study on the damping characteristics of superconducting electrodynamic suspension using a field-circuit-motion coupled model[C]//2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA). Wuhan: IEEE, 2021: 1-6.
- [43] LI H D, ZHU H L, HUANG H, et al. A new suppression strategy of pitching vibration based on the magnetic-electric-mechanical coupling dynamic model for superconducting EDS transport system[J]. Mechanical systems and signal processing, 2023, 188: 110039.
- [44] WATANABE K, YOSHIOKA H, SUZUKI E, et al. A study of vibration control systems for superconducting maglev vehicles(vibration control of lateral and rolling motions) [J].

- Journal of system design and dynamics, 2007, 1(3): 593-604.
- [45] SONG M K, FUJIO Y. Dynamic analysis of guideway structures by considering ultra high-speed maglev train-guideway interaction[J]. Structural engineering and mechanics, 2008, 29(4): 355-380.
- [46] YOON R, NEGASH B A, YOU W, et al. Capsule vehicle dynamics based on levitation coil design using equivalent model of a sidewall electrodynamic suspension system[J]. Energies, 2021, 14(16): 4979.
- [47] HA H, PARK J, PARK K S. Advanced numerical analysis for vibration characteristics and ride comfort of ultra-high-speed maglev train[J]. Microsystem technologies, 2020, 26(1): 183-193.
- [48] HA H, PARK K S. Construction of simulation framework for dynamic analysis of a superconducting magnetic levitation train with flexible car bodies[J]. Journal of mechanical science and technology, 2019, 33(3): 1177-1183.
- [49] YAN Z Y, LI G, LUO J, et al. Vibration control of superconducting electro-dynamic suspension train with electromagnetic and sky-hook damping methods[J]. Vehicle system dynamics, 2022, 60(10): 3375-3397.
- [50] YAN Z Y, MA G T, ZHANG W H, et al. Dynamic response of a superconducting EDS train with vehicle/guideway coupled dynamics[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2020, 30(4): 3603105.
- [51] YAN Z Y, ZENG J S, ZHANG W H, et al. Dynamic simulation of vibration characteristics and ride quality of superconducting EDS train considering body with flexibility[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2021, 31(5): 3602105.
- [52] SU Z H, LUO J, FENG P J, et al. Vertical-lateral coupled dynamic model for integrated propulsion, levitation and guidance superconducting EDS train[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2024, 25(5): 4364-4380.
- [53] SU Z H, MA G T, LUO J, et al. Dynamic characteristics and protection strategy for superconducting electrodynamic suspension train with quenched magnet[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2025, 11(2): 5709-5722.
- [54] FENG P J, MA G T, SU Z H, et al. Dynamic modeling and analysis of vehicle-track-bridge coupled system for superconducting EDS train[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2025, 11(1): 4157-4168.
- [55] OHASHI S, UEDA N. Influence of the damper coil system on the levitation characteristics in the superconducting magnetically levitated system in case of SC coil quenching[J]. IEEE transactions on magnetics, 2014, 50(11): 8300304.
- [56] NAGAI M, TANAKA S. Study on the dynamic stability of repulsive magnetic levitation systems: optimal control of active secondary suspension[J]. JSME international journal, 1992, 35(1): 102-108.
- [57] WATANABE K, YOSHIOKA H, SUZUKI E. Combined control of primary and secondary suspension of maglev vehicles[J]. Quarterly report of RTRI, 2004, 45(1): 26-31.
- [58] 马光同, 曾靖淞, 冯丕极, 等. 超导电动磁悬浮列车次级悬挂混合阻尼半主动减振控制研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(10): 236-249.
- MA Guangtong, ZENG Jingsong, FENG Piji, et al. Study on the hybrid damping semi-active control of secondary suspension of superconducting electrodynamic suspension train[J]. Journal of mechanical engineering, 2023, 59(10): 236-249.
- [59] 冯丕极, 马光同, 杨晶, 等. 面向磁体振动抑制的超导电动磁悬浮列车半主动控制策略研究[J]. 铁道学报, 2025, 47(7): 28-39.
- FENG Piji, MA Guangtong, YANG Jing, et al. Study on semi-active control strategy for vibration suppression of superconducting magnets in EDS train[J]. Journal of the China railway society, 2025, 47(7): 28-39.
- [60] NING X F, ZHAO C F, YU Q S, et al. Vibration attenuation research on superconducting EDS with active electromagnetic damping coils based on refined magnetic-electric-mechanical interaction model[J]. Mechanical systems and signal processing, 2025, 224: 112081.

Current development status and key technologies of superconducting EDS

LUO Jun¹, ZHU Taoning¹, SU Zhenhua², QIAN Chengzhi^{1,3}, PANG Cong⁴, ZHAO Chunfa¹, MA Guangtong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

4. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Superconducting electrodynamic suspension (EDS) is one of the core technologies for achieving ultra-high-speed operation of rail transit systems. With advantages such as large levitation gaps, self-stabilizing levitation, and high operational efficiency, it has become a global research hotspot in the rail transit field. This paper first reviews the development history and experiment progress toward engineering deployment of superconducting EDS technologies in Japan and China, and compares achievements of the two countries in technology research and development, test line construction and speed breakthroughs. Next, it presents a systematic analysis of the structural characteristics, performance advantages and disadvantages, and engineering adaptability of three guideway-side topologies in superconducting EDS systems. From the perspective of theoretical analysis, the paper then reviews the research progress and optimization directions for three analytical methods: dynamic circuit method, scalar magnetic potential harmonic analysis method, and vector magnetic potential harmonic analysis method. Focusing on vehicle dynamics, existing research results on modeling methods, model accuracy optimization and vibration reduction control strategies are summarized respectively from three dimensions: single suspension frame, vehicle dynamical modeling and vehicle vibration control. Finally, the paper highlights outstanding challenges in existing superconducting electric levitation technologies in aspects such as electromagnetic coupling modeling, optimization of dynamic characteristics, and reliability in engineering applications, and discusses future development trends.

Keywords: maglev train; superconducting EDS; topology; vehicle dynamics; vibration control

收稿日期: 2026-01-10; 修回日期: 2026-03-01

责任编辑: 白 云