DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.001

轨道交通变流器共性技术研究综述

刘海涛，刘永江，李　华，贺冠强，彭宣霖
（中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲 412001）

摘　要：随着技术的不断进步，市场对变流器的品质要求日益提升，推动着变流器向轻量化、低噪声、高可靠性、美观的方向发展。文章重点介绍了轨道交通变流器设计中的重要共性技术，覆盖了功率器件应用、轻量化、减振降噪、电磁兼容、热管理、工业设计等重要领域，概述了这些重要共性技术的国内外发展现状，分析总结了各项技术当前所面临的难题与挑战，并以实际应用为例，对这些技术在提升产品市场竞争力所起到的重要作用进行了深入阐述，为设计出“更轻、更静、更可靠、更美观”的变流器提供参考与技术指引。

关键词：变流器；共性技术；振动噪声；电磁兼容；热管理；工业设计；轻量化

中图分类号：U264.3^{+}7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2024)04-0001-16

0　引言

共性技术作为一系列在多个领域或行业广泛应用的基础性技术，对于产品性能的全面提升具有不可或缺的支撑作用。这些技术的核心特征包括广泛适用性、基础性、创新驱动性、跨学科性、前瞻性。变流器作为轨道交通和能源电气化领域中电能转换的核心设备，其性能和可靠性对于整个系统的稳定运行至关重要。随着技术的不断进步和产品迭代，变流器在效率、功率密度等功能性“硬指标”方面已经取得了显著的提升，并且在多个应用领域中表现出日益趋同的趋势。然而，随着市场对产品性能要求的不断提高，以振动噪声、轻质高效、电磁兼容、散热性能、稳定可靠、外观设计等为代表的产品品质“软指标”逐渐受到重视，并成为衡量产品竞争力的重要因素。在这种背景下，变流器设计中的一些关键共性技术，如功率器件应用技术[1]、轻量化技术[2]、减振降噪技术[3]、热管理技术[4]、电磁兼容性（Electromagnetic Compatibility，EMC）技术[5]、工业设计等，越来越受到关注。这些技术不仅能够提升变流器的可靠性和安全性，而且能够显著提高产品的用户体验，从而增强产品的市场竞争力。本文旨在通过对轨道交通牵引变流器的关键共性技术进行深入的分析和综合论述，为轨道交通牵引变流器的设计和优化提供有价值的参考，并为推动相关技术的发展作出贡献。

1　共性技术概述

对于变流器设计而言，关键的共性技术包括功率器件应用技术、轻量化技术、减振降噪技术、热管理技术、电磁兼容技术和工业设计技术六大类，它们的发展历程可以简单划分为3个阶段，每个阶段的共性技术与设计流程的融合，对产品品质提升的作用都是逐步递进加深的。

1) 初级阶段

在初级阶段，共性技术主要扮演着问题解决者的角色。当变流器产品在实际应用中出现问题时，共性技术提供基础的技术支持，包括利用专业的测试设备、仿真软件和分析方法对故障进行解析，然后进行优化改造。这一阶段的共性技术侧重于问题诊断和后处理，帮助设计者理解问题所在，并提供解决方案。

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFB4300100）
通信作者：贺冠强，男，博士，高级工程师，从事牵引变流系统共性技术及数字化研发技术研究；E-mail: hegq2@csrzic.com
引用格式：刘海涛, 刘永江, 李华, 等. 轨道交通变流器共性技术研究综述[J]. 机车电传动, 2024(4): 1-16.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.001.
Citation：LIU Haitao, LIU Yongjiang, LI Hua, et al. Review on key generic technologies for railway converters[J]. Electric drive for locomotives,2024(4): 1-16.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.04.001.

2) 中级阶段

随着共性技术的发展，其在设计过程中的位置逐渐前移，并开始在方案设计阶段提供技术指导。在这一阶段，共性技术不仅包括了专业技术知识，而且融合了丰富的工程经验，形成了一系列的设计准则和规范，能帮助设计者在设计前端规避一些典型的、常见的共性技术问题，从而提高设计的整体质量和效率。

3) 高级阶段

共性技术在这一阶段已经与变流器的正向设计流程实现了深度融合，并贯穿于设计的各个阶段。共性技术与设计过程的紧密结合不仅能让设计者在设计的早期阶段预见潜在的技术挑战，并采取预防性措施，还能加强多学科之间的协同合作，促进融合创新思维，确保变流器产品能够满足市场的需求，并适应未来的技术发展趋势。

在变流器设计中，共性技术的研究与应用是多维度且跨学科的。它主要的研究难点包括：①跨学科整合的挑战：共性技术需要不同领域的专家紧密合作，具备系统性思维和多目标综合优化的能力。在轻量化技术的研究中，材料工程师负责新材料的开发与应用，结构工程师负责结构优化设计与强度校核，系统工程师负责整体质量分配与成本管控等多专业、多学科的协同合作。②基础研究的高投入：共性技术通常都需要投入大量资源进行基础研究。减振降噪技术和EMC技术都需要具备精细化的仿真技术能力，同时还需要强大的测试试验能力作为支撑，其研究往往还需要长期的投入与积累才能产出成果。此外，由于技术复杂性高，还需要投入高水平的技术人才与先进的研发设备，同样也增加了研究的难度与成本。③标准化与通用性的难题：为了实现共性技术的广泛应用，必须推进标准化和通用化，制定既科学又严谨，同时覆盖各种应用场景的设计准则、规范或标准，这需要进行大量的研究和深入讨论。对于EMC技术，制定一套能够适应不同国家和地区法规要求的标准，需要进行广泛的国际合作和深入的技术讨论。

综上所述，共性技术在变流器设计领域扮演着日益重要的角色，其发展是一个由问题解决到技术指导，再到深度融合的过程，也是从应用后端逐渐转向设计前端的过程。必须坚持紧密的多学科协同合作、长期的资源投入、不间断的总结积累才能持续推进共性技术的研究，确保共性技术的创新与应用能够满足市场和未来发展的需求。

2 变流器设计中的关键共性技术

2.1 功率器件应用技术

功率半导体器件应用技术是指合理利用功率半导体器件实现电能处理、转换、控制以及保护的一系列技术的总和，根据变流器系统技术参数、散热条件、主电路结构、驱动器性能，配置功率器件驱动参数，折中功率器件应用电应力与开关损耗，实现器件安全、高效运行。随着高压大功率变流技术的不断发展，功率半导体器件作为变流器的核心部件，对系统可靠性影响至关重要，一旦器件发生失效，将会造成变流器模块炸损等严重安全事故，合理地进行器件应用评估，能够保证其安全运行，同时也对变流器模块散热、母排结构设计等起到正向指导作用。考虑实际场景下的器件应用，目前已经开展了动静态测试技术、多并联技术、驱动技术、主回路寄生参数量化等精细研究，形成了标准的测试与量化方案，以及设计准则。通过精细化的器件应用技术研究，能够正向促进变流器模块的性能提升，确保器件可靠安全工作，未来器件应用聚焦于输出能力边界量化，在线结温监测，深挖器件潜能，实现高可靠、高输出运行。

功率半导体器件应用技术经历了由定性研究到精细量化的发展过程。目前，中车株洲电力机车研究所有限公司（以下简称中车株洲所）在器件应用技术精细量化方面深耕多年，已经建立了高压大容量功率半导体器件测试平台，能够开展电压等级6 500 V及以下器件的动静态特性测试，可开展器件开关瞬间速度、动态损耗、上升/下降时间、关断过电压等参数量化工作，形成了标准化器件应用准则，用于规范功率器件应用试验的实际操作、数据处理、试验报告撰写，以保证试验过程安全、试验项目完整和试验数据可信。器件应用的精细化、标准化、自动化是未来发展趋势，其工作内容包括杂散电感量化、多并联应用、结温评估技术等。文献[6]介绍在功率器件开通瞬态过程中的特定阶段采用积分计算可对母排杂散电感进行最准确提取（如图1所示），并且该方法还可以用于提取母线电容的杂散电感，以及换流回路中其他器件的杂散电感。文献[7]通过基于离散积分原理实现了对基波周期内的结温量化表达，开发了一种简化结温曲线计算方法，能够精准快速确定最大/最小结温及其出现时刻，有助于提升器件应用可靠性（如图2所示）。文献[8]通过对并联均流理论研究，从元件、驱动器、主电路、散热4个方面设计着手，使得并联器件均流达到97%以上，提升了变流器性能。随着IGBT应用与测试技术的成熟，以及宽禁带半导体材料技术和低成本设计的发展，功率器件应用技术的发展逐渐转变为两大方向：以SiC器件应用为典型的新型功率器件应用研究和功率器件模组定制化研究。

SiC器件研究是功率器件应用技术未来的重要发展方向之一，SiC器件研究不局限于器件本身，为充分发挥SiC的应用优势，更要对其外围设备开展深入研究，包括模块参数、驱动器性能设计等。基于全SiC器件开发的牵引变流器，在国外已有日本三菱和加拿大庞巴

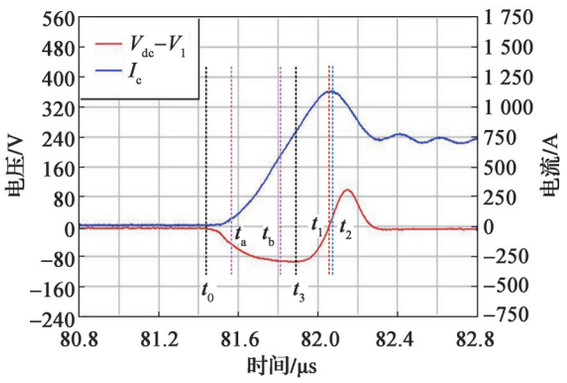


图 1　积分法量化杂散电感

Fig. 1　Quantifying stray inductance by integral method

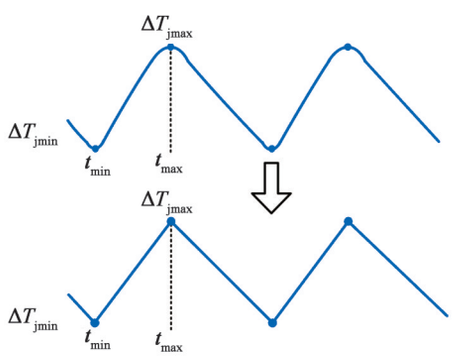


图 2　简化结温曲线计算示意图

Fig. 2　Calculation diagram for simplified curve of junction temperature

迪的示范应用，而国内以中车株洲所为代表，已经建立了标准化的SiC测试平台，可覆盖全电压等级的SiC测试，在机车、高速动车、城际动车已经有了众多示范应用项目，其模块产品如图3所示。SiC应用研究范围广泛，包括静态参数匹配、杂散电感提取与分析、驱动回路设计、叠层母排设计等。文献[9]以3 300 V SiC器件为例，从理论上详细分析了其开通和关断过程，验证了驱动电阻、结温、杂散电感对开关特性的影响，探寻了其变化规律，指出了优化开关特性参数的方向，为后续器件研究及其应用提供技术参考依据。在城际动车领域，开展了SiC静态参数匹配以优化静态、动态均流，其中静态均流系数优化约3%，动态均流系数优化约10%，其方法可推广应用于所有SiC应用项目。在宽禁带分立半导体器件应用中，开展了PCB寄生电感对于SiC开关过程的影响分析，优化了SiC开关过程中的栅极振荡现象，形成正向设计经验，为驱动板PCB栅极回路设计布局提供了指导（如图4所示）。SiC因其开关频率高、损耗低的优点，未来必将代替IGBT成为变流器领域中的核心部件，因此仍需深挖潜能，做好技术储备。

功率器件应用技术的另一重要发展方向是器件模组定制化应用，中车株洲所提出了一种新型高功率密度智能化集成功率器件（Power Converter Unit，PCU）。通过高度集成化设计，将器件封装技术引入传统功率

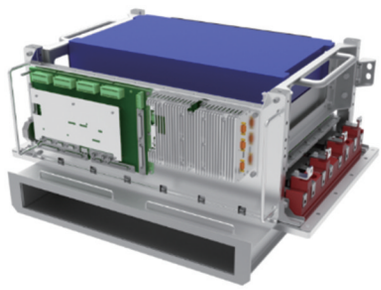
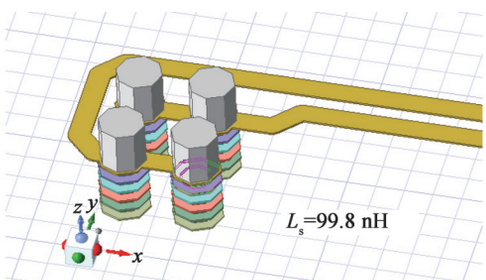
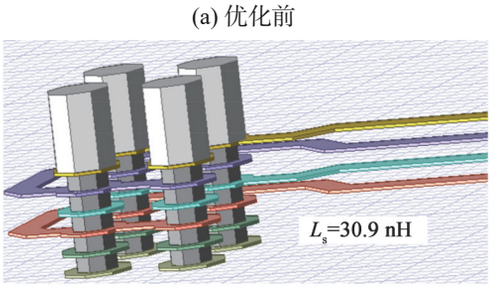


图 3　3 300 V SiC变流器模块

Fig. 3　3 300 V SiC converter module



(a) 优化前



(b) 优化后

图 4　PCB布局杂散参数仿真

Fig. 4　Simulation of stray inductance for PCB layout

模块设计中，在封装层面集成了功率芯片、低感功率互联电路、智能控制器、多类型传感器和快速插拔式水电连接器，将传统IGBT器件的散热基板和变流模块的散热器合并，实现了机、电、热、控制、快速连接等一体化高度集成[10]，在器件封装维度即可实现单相桥、两相桥、三电平等模块功能，其集成化示意图如图5所示。

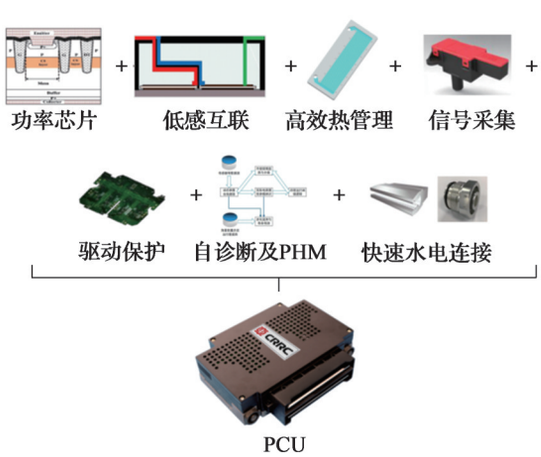


图 5　PCU集成化示意图

Fig. 5　Schematic diagram of PCU integration

PCU 高功率密度、高集成度、智能化的特点可通过以下技术手段实现：①芯片技术的发展，如逆导芯片可实现 IGBT 芯片与快速恢复二极管芯片面积共享，显著降低热阻；对于沟槽栅芯片，可通过精细化元胞设计，实现降低损耗、提升电流密度的目标。②高效的热管理技术，将散热器与器件直接集成，可实现降低热阻和良好的均温效果，单个 PCU 内部各衬板间温差小于 3 K。③功率互联技术，采用高集成、低电感式互连路径设计，提升各芯片间寄生参数均匀性，提升极限性能和内部均流水平。④控制回路技术，将控制和检测辅助端子固化于封装内，与控制器直接连接，所有器件控制回路均一致，无传统模块的连线布线差异，信号同步性更优。⑤智能化技术，通过内置传感器和信息采集通道获取器件运行状态信息，结合自诊断技术，实现器件健康状态监控和寿命预测。未来 PCU 将基于其集成化平台，进一步在主电路拓扑、电压电流等级、不同芯片版本（如 SiC）等方面拓展产品谱系。

2.2 轻量化技术

轻量化的技术理念是在保障产品安全性能的前提下，通过轻质高强度材料应用、结构优化设计、制造工艺优化、先进连接技术应用、结构功能一体化集成等手段尽量降低产品重量，以实现降低成本、提高能效、增强产品竞争力等目标。在国家“双碳”目标指引下，国家“十三五”规划明确要求城市轨道交通装备减重 10%，降耗 15%，“十四五”规划更进一步提出兼顾效益的中低运量轨道交通系统规划建设目标。在乘用车领域，通过政策引导提升高强度钢、镁合金和碳纤维等轻质材料研发与应用力度，支持轻量化结构设计、工艺技术创新，实现节能减排的目标。与此同时，载运装备在高速、高温、高湿、高寒等极端环境下的长期服役安全问题日益凸显，如早期引进的 CRH2A/CRH380A 平台动车组，其采用的 7XXX 系铝合金型材结构在长期服役后偶发应力腐蚀开裂问题[11]。因此，轻量化技术是实现轨道交通牵引变流器功率密度提升、节能降耗、保障服役安全的关键共性技术之一。相对于车体结构件，变流器轻量化设计过程中需兼顾电气、散热、电磁兼容等综合性能指标，技术应用难度陡增。

在交通载运装备领域，轻量化技术主要有 2 种实现途径：一种是选用比强度高的铝合金、复合材料进行结构设计；另一种是对结构进行尺寸优化、形状优化和拓扑优化，以减轻结构重量。轻量化材料在变流器领域使用广泛，文献[12]介绍在研制标准地铁平台牵引变流器时，开发了 8 种铝型材，实现了全铝合金柜体的轻量化设计；株洲中车时代电气股份有限公司（以下简称“中车时代电气”）开发了碳纤维牵引变流器柜体[13]，轻量化水平提升 20% 以上，并完成了仿真与试验验证。结构优化方法的理论基础相对成熟，通常采用 OptiStruct 和 Isight 等软件的商用算法开展工程应用，文献[14]采用 OptiStruct 对地铁高频辅助变流器柜体开展形貌及其吊耳拓扑优化，实现柜体第一阶振动频率提升 32%、吊耳减重 21% 的目标[14]；文献[15]通过最优拉丁超立方法筛选辅助变流器柜体设计参数，基于 Ansys 和 Isight 软件开展联合仿真优化实现减重 11.6%。结构轻量化技术在轨道交通变流器领域有广泛的应用，但也存在轻量化材料应用不成熟、优化减重程度较低等问题。

目前，轻量化技术的研究与应用已逐步转向设计前端，下面以某型动车变流器为例介绍轻量化技术是如何融入正向设计的及其应用效果。结合下挂式柜体复杂服役环境工况，综合考虑材料的力学性能、疲劳性能和腐蚀性能，选用 6005A-T6 铝合金型材和 5083-O 板材铆焊结合的整体方案。在早期电气设计布局完成后及时开展整柜拓扑优化，获取设计域内的最佳传力路径，结合 6005A-T6 铝合金型材截面的优化，完成强度和刚度综合最优的主承载框架设计方案；详细设计定型后，建立精细的有限元仿真模型（如图 6 所示），针对柜体板梁结构开展尺寸优化，对底盖板等设备舱外露结构开展形貌优化设计，以提升板件刚度。相对上一代产品，柜体骨架轻量化水平提升至 35%，骨架重量占比由 30% 降低至 22%，同时开展整柜的模态匹配设计，评估焊接、铆接和螺栓等连接强度，以保障整体设计的可靠性。

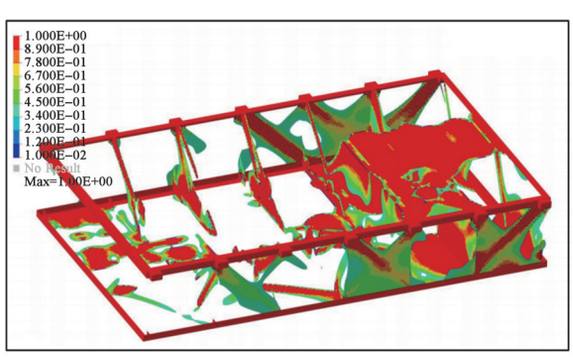


图 6 轻量化铝合金变流器柜体的拓扑优化结果

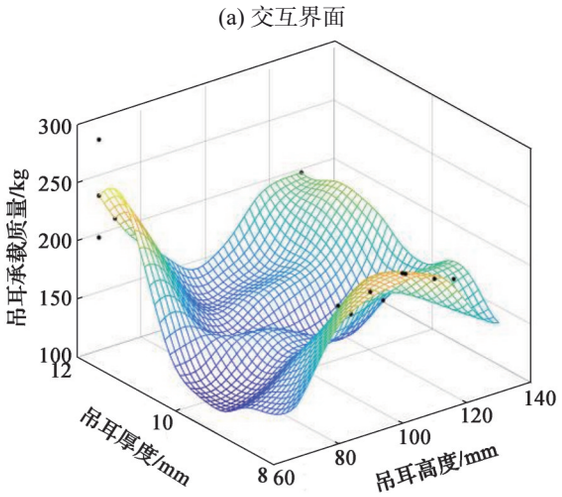
Fig. 6 Topology optimization result of lightweight aluminum alloy converter cabinet

此外，轻量化技术与其他前沿技术的融合创新也是该共性技术研究的重要方向之一。以一个将轻量化技术与机器学习相结合大幅提升地铁变流器吊耳轻量化优化效率的设计工具为例进行说明——边梁吊耳结构快速校核评估工具（如图 7 所示）。通过梳理边梁吊耳结构设计参数，建立了自适应结构有限元模型，获取一定离散度的仿真计算结果数据点；以边梁吊耳组件和关键焊缝应力为响应，建立高灵敏度的 Kriging 优化算法代理模型，获取各设计变量对响应的灵敏度，探索可行的设计空间，得到全局最优化的设计方案；

最后，开发基于机器学习的普适性快速校核工具，实现了该类型变流器吊耳设计参数的即时评估与最佳优化减重目标。



(a) 交互界面



(b) 三维模型

图 7　结构快速评估方法与工具

Fig. 7　Methods and software tools for rapid structural evaluation

新一代轻量化材料应用是轨道交通变流器轻量化技术发展方向之一，如选用比强度更高、减振性能和电磁屏蔽性能更好的镁合金材料（如 AZ31、ZK60 和 AZ80）进行减重、开发功能结构一体化的集成部件、对于形状复杂的部件可采用整体压铸成形方案，但镁合金材料弹性模量相对较低，焊接和阻燃性能较差，如何提升零部件刚度、优化焊接工艺、调控阻燃合金元素仍有待进一步研究，另外，汽车行业采用低成本的高强度钢（如 DP590 等）进行减重设计，效果明显，能大幅增加构件的抗变形能力，提升吸能能力[16]，也具备一定的借鉴意义。在结构仿真与优化层面，强度与刚度裕量设计的精准程度决定了变流器产品的轻量化水平，可通过试验对标的手段提升仿真精度，研究更合理、更高效的优化算法提升结构优化的准确度，开发适用范围更广的快速仿真优化工具，提升轻量化程度的同时保障服役的结构安全与预期寿命。综上所述，轻量化技术未来在轨道交通变流器的应用方向如表 1 所示。

表 1　轻量化技术发展方向

Table 1　Development trend of lightweight technology

技术发展方向	细分方向	待解决问题
新材料应用	镁合金应用	①阻燃镁合金开发；②焊接性能提升
	高强钢材料应用	可焊性评估
结构仿真与优化	提升仿真精度	试验对标的方法及准确度
	高效优化算法应用	

2.3　减振降噪技术

减振降噪技术是指通过设计或工程措施，预防、减少或消除系统中振动和噪声的技术手段，该技术在轨道交通、航空航天、建筑工程、海洋船舶等多个行业领域都有广泛的应用。对轨道交通变流器而言，其面临的振动噪声问题可以分为 2 类：第一类是安全性与可靠性问题。变流器受到车体传递的路谱随机振动影响，或是变流器内部本身存在振动的部件（如散热风机、变压器和电抗器），可能影响周围其他设备的正常运行，甚至导致柜内设备发生故障。第二类是舒适性问题。变流器内部本身存在振动的部件产生的振动和噪声会传递至车厢内部，导致车厢内部产生令人不适的乘坐感受。因此，在轨道交通变流器设计中，减振降噪技术是一项旨在提升设备安全性、可靠性与乘客舒适性的共性技术。

大量研究表明，变流器振动与线路坡度、车速、轮对磨损等存在极强的关联性，在部分线路运行时机车变流器振动量值远超标准 IEC 61373:1999 规定值，对功率半导体器件 IGBT、风机等设备可靠性产生直接影响，严重者甚至导致电连接故障、关键设备损毁报废，图 8 为振动导致的 IGBT 主端子开裂的图片。

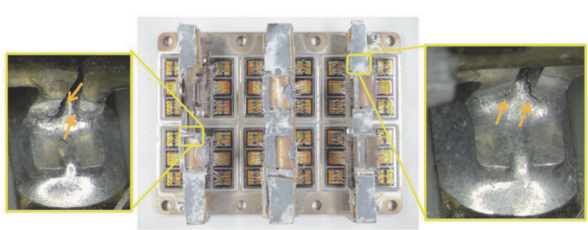


图 8　振动导致的 IGBT 主端子开裂

Fig. 8　Vibration-induced cracking of main IGBT terminal

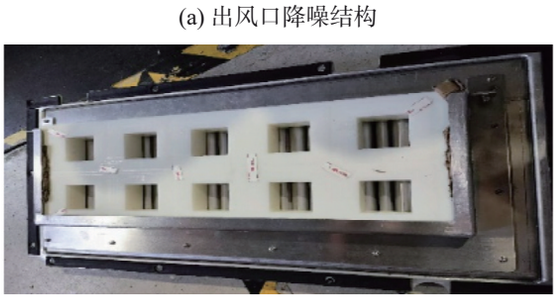
在轨道交通轻量化的发展趋势下，车身特别是地板的刚度降低，使得变流器内部风机、变压器等振源对车厢地板的影响更加显著。同时，随着乘客对乘坐舒适性要求的提升，以及国家环境噪声污染防治法相关政策的出台[17]，对变流器的噪声要求也变得更加严格，不仅声功率级指标更加严苛，而且对声品质提出了更细致的纯音管控需求，要求相邻倍频程的差值不超过 6 dB(A)。因此，减振降噪技术在轨道交通变流器

设计中具有重要的现实意义。实施有效的减振降噪措施能显著提高变流器及其内部设备的安全性和可靠性，减少故障率，延长设备使用寿命，降低维护成本，同时还能够提升乘客的乘坐舒适性，提高轨道交通服务的整体质量。

减振降噪技术从实施路线上可以分为两大类：一是源头控制。在风机、变压器和水泵等自振体处直接遏制振动与噪声生成，此类技术是从振动噪声的产生原理入手，以试验与仿真相结合的方式研究自振体本身的减振降噪手段[18]。以风机噪声问题为例，散热风机作为变流器的主要噪声源之一，其产生的噪声包括宽频气动噪声与叶片通过频率下的离散噪声。从源头控制上来说，采用文献[21]提出的基于仿生学的设计理念，将风机叶片的出流边优化为锯齿形可以破坏叶片尾缘脱落涡流的形成，有效地降低宽频气动噪声，并采用非均布式叶片设计可以抑制叶片通过频率下的离散噪声，消除尖锐的单频纯音。采用上述2种优化措施后，不仅能有效降低整柜声功率级，而且能明显改善人耳主观听感。二是传递路径控制。这类技术是聚焦于振动与噪声的传递路径，在传递途径上削弱、阻隔振动与噪声，针对性地设计或应用具有减振降噪能力的结构、装置和材料等[19-20]。从传递路径上来看，变流器的气动噪声主要沿风道传播，柜体的进出风口处的噪声明显大于周围其他测点，且对柜体的总噪声的贡献最大。因此，中车时代电气在柜体的进、出风口处设计了降噪结构，可以在保证流量满足散热要求的前提下，大幅增加风道的吸隔声能力，达到降低整柜平均声压级的目的，图9(a)为出风口的阻抗式降噪结构，图9(b)为进风口共振式降噪结构，两者都能在测点位置降噪3~5 dB(A)，可使整柜平均声压级降噪1~2 dB(A)。



(a) 出风口降噪结构



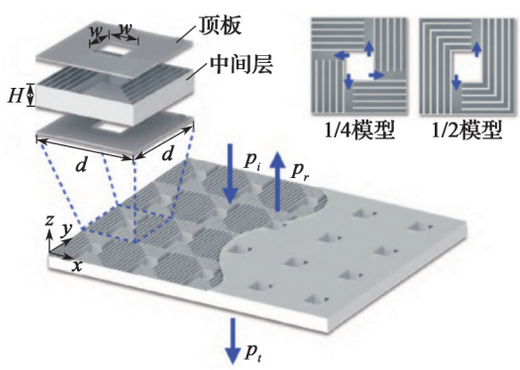
(b) 进风口降噪结构

图9 风道传播路径降噪设计

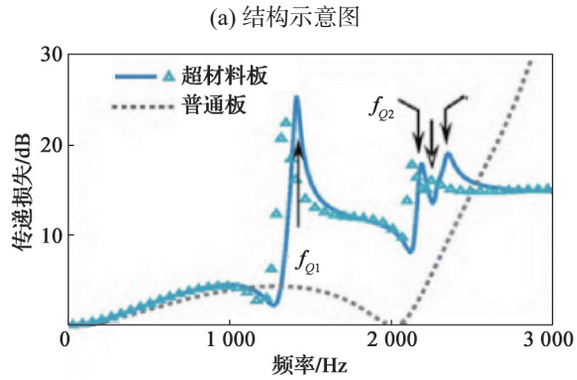
Fig. 9 Design for noise reduction in air duct propagation path

减振降噪技术的未来发展方向主要包括以下3点：

①引入新材料和新结构提升现有减振降噪措施在中低频带的性能，如声子晶体、声学超材料和声学黑洞等。文献[22]介绍了Helmholtz共振结构、空间盘绕结构、声学超笼和声传输可调结构等几种声学超材料在通风和降噪方面应用的最新进展，展示了其在低频宽带噪声衰减、通风效果和结构轻薄化等方面的明显优势。图9(b)所示的出风口降噪结构是采用多孔吸声和共振消声相结合的声学超材料，相比原有的阻抗式降噪结构低频段降噪效果更优，风量损失更小，具体如图10所示。文献[23]提到的声学黑洞概念是一种轻质高效的减振降噪思路，尽管目前工程应用上还不太成熟，但也是一个非常有潜力的发展方向。



(a) 结构示意图



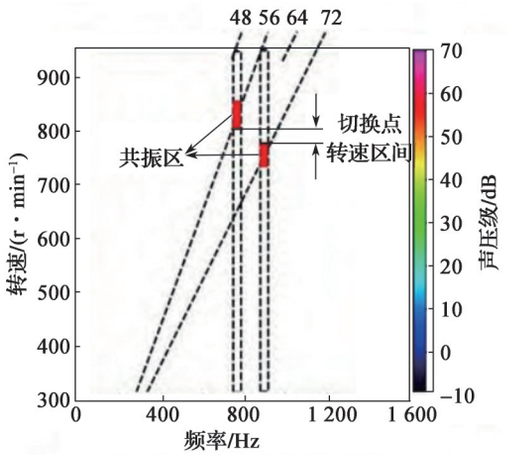
(b) 传递损失

图10 声学超材料模型[22]

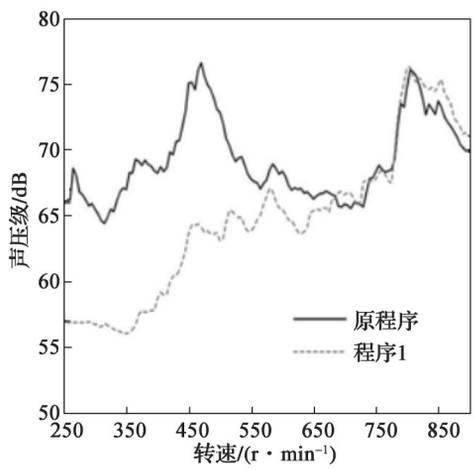
Fig. 10 Model of acoustic metamaterial[22]

②研究“结构–电磁–流场–声场”耦合的多物理场联合仿真与分析方法，深入挖掘自振体的振动噪声特性，从源头上进行优化设计[24]。这类研究需要同时具备精细化仿真能力和精准的测试能力，两者相互结合、相互印证后才能成功解析振动噪声的产生原理，得出优化改进方向。以文献[25]提及的牵引电机噪声问题为例，牵引变流器为牵引电机提供驱动电源，其输出电流中存在谐波通常是造成车内异常噪声的主要原因，通过调整变流器逆变输出控制策略达到降低牵引电机噪声的目的，即是在充分解析“控制–电磁–结构”耦合规律后，依托仿真与试验找到了产生共振噪声的原因，并设计了一种新的系统性控制优化匹配方法，并应用这种优化策略使牵引噪声在中低速段降低了5~10

dB(A)，降噪效果显著，具体如图 11 所示。



(a) 解析共振原理



(b) 降噪效果

图 11　变流器控制优化降低牵引噪声[25]

Fig. 11　Converter control optimization for reducing traction noise[25]

③以舒适性为评价标准，对变流器的噪声频谱分布、吊耳处的振动特性进行管控，优化车内的噪声主观听感与车厢地板人体震感。这一研究方向的重点在于如何制定基于人体主观的舒适性评价标准，这需要在大量的测试与数据积累下构建主观感觉与客观指标的映射关系[26]。

2.4　热管理技术

热管理技术是对产品工作环境、工况和产品自身温度特性进行综合设计的一种技术手段，旨在使产品的性能、温度、寿命及其他相关性能指标维持在综合最优的区间内。功率半导体器件作为轨道交通变流器中最容易损坏的部件，其可靠性直接决定了变流器的可靠性[27]。据文献[28]的研究发现，在引起功率器件失效的因素中，温度占比约 60%，并且在正常工作温度范围内，温度每上升 10 ℃，则器件的失效率将增加 1 倍。因此，对功率半导体器件和其他部件的温度进行有效控制的热管理技术是变流器设计中的关键共性技术之一，直接影响着变流器的性能、安全及寿命。

随着轨道交通列车速度和牵引功率等级的提升，以及列车牵引变流器中功率半导体器件开关频率的提高，造成功率半导体器件的热损耗不断上升，同时变流器持续朝着小型化和轻量化的方向发展，使得功率半导体器件的热流密度也在不断提高。因此，变流器的散热设计变得越来越困难且越来越重要，需要采取有效的热管理措施。

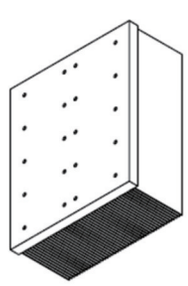
轨道交通变流器的热管理技术主要分为 2 部分：一是针对封装和控制层面的内部热管理技术，通过优化功率半导体器件的封装以降低其内部热阻，同时通过改变开关频率、开关调制方式、调节负载电流、调整变流器运行模式等措施控制损耗大小，从热源端进行热管控；二是外部热管理技术，其本质是降低半导体器件外壳与冷却介质之间的热阻，常通过采取风冷、水冷和相变冷却[29]等不同的散热方式来实现，有效的外部热管理可加速功率器件内部的散热，从而降低器件结温。

轨道交通变流器产品的热管理设计流程主要分为 4 部分：方案设计、技术设计、数值仿真计算和试验测试。

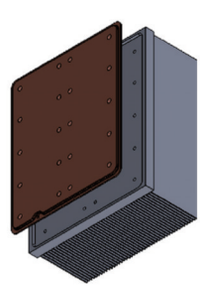
方案设计主要负责明确变流器热管理的需求和目标，涵盖变流器功率、性能要求和工作环境等内容，同时需根据功率器件和其他部件的工作特性预估损耗，并结合变流器的初步结构方案评估确定需采取何种散热方式。

技术设计是变流器热管理设计流程的关键，需与变流器系统共同明确具体的热管理技术方案、物料设计选型、系统布置、接口设计等细节工作，还需分析设计的可行性、安全性和稳定性等。以风冷变流器产品的热管理技术为例，其技术设计主要包括散热器设计、风机设计选型、风道设计等内容。根据热损耗和工作环境要求，设计相应的风冷散热器，如型材散热器、均温板型材散热器、热管散热器、3D 复合相变散热器等，如图 12 所示；风机是风冷变流器内迫使空气流动的驱动装置，其性能直接影响各部件散热所需的风量，良好的风机设计应能够在提供足够的风量和风压的前提下，具备体积小、重量轻、效率高和噪声低等优点。

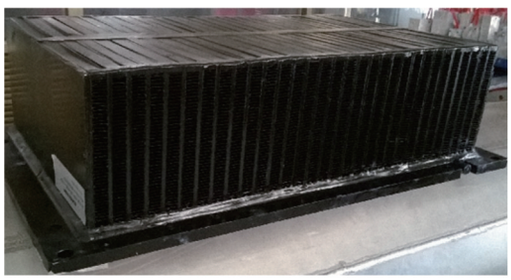
在技术设计阶段，数值仿真计算是常用的设计方



(a) 型材散热器



(b) 均温板型材散热器

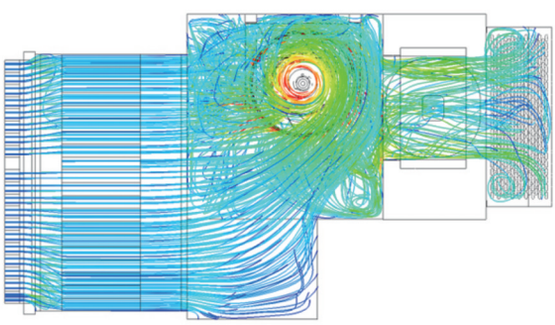


(c) 3D复合相变散热器

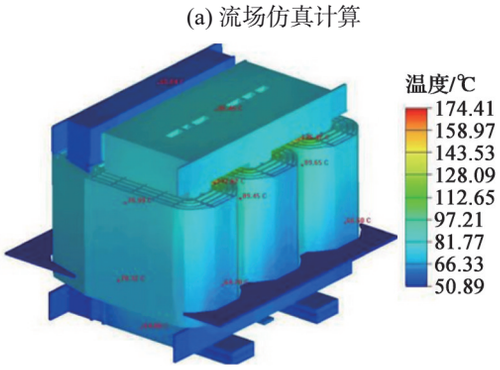
图12　风冷散热器

Fig. 12　Air-cooled heat sink

法。例如，风道设计的目标是在优化流动阻力的同时确保各部件的散热性能满足要求，需借助数字仿真计算手段来开展，因为风道设计需要综合考量部件布置、风道结构、通风口位置和尺寸等多个因素的影响，故无法通过理论计算或其他方法获取三维流场或温度场的分布。通过对变流器开展流场和热仿真计算，可识别出各被冷却部件的散热是否满足要求，从而指导被冷却部件设计和风道优化，如图13所示。



(a) 流场仿真计算



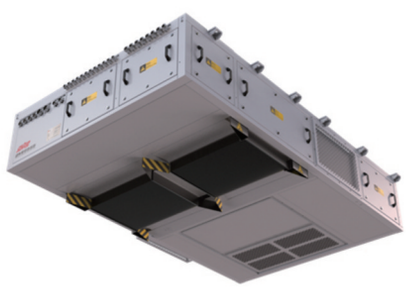
(b) 热仿真计算

图13　某变流器的仿真结果

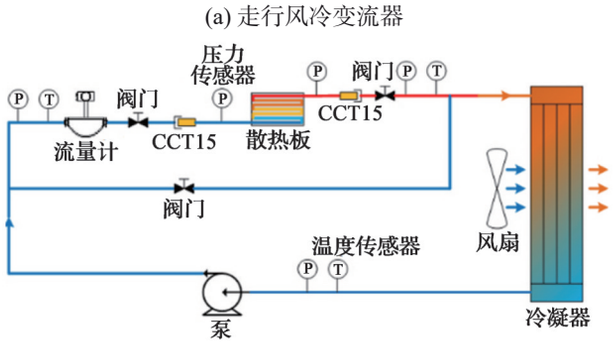
Fig. 13　Simulation results of a converter

试验测试是指通过试验和测试手段评估热管理技术的有效性，涉及温度、压力和风速等参数的测量和分析。试验测试在热管理技术中至关重要，它不仅可以发现设计中存在的问题和为优化设计提供数据支撑，而且可以对数值仿真计算进行验证闭环和修正，以提高数值仿真模型的可信度。

轨道交通变流器的热管理技术主要有以下发展方向：①走行风冷技术。相比于强迫风冷技术，走行风冷无须采用风机，具有节能、降噪、减重等多重优点，未来在变流器上会得到更多的应用[30]，如图14(a)所示。②高效的相变冷却技术。相变冷却技术是一种取代水冷散热、解决高热流密度散热和高绝缘要求的有效方法，有助于提高功率半导体器件开关频率和变流器功率密度，同时可使得变流器冷却系统的重量降低和体积减小，但也需要解决泄漏、材质兼容性、产业配套等工程化应用的难题[31-32]，如图14(b)所示。③智能主动调控技术，即通过实时监测变流器的工作状态和温度信息，采取调控器件开关频率、风机调速、水泵调速、更改阀门开度等措施，使得变流器、器件、冷却系统等均处于期望的工作状态，进而达到提高器件寿命和可靠性、降低变流器噪声和功耗等目标。



(a) 走行风冷变流器



(b) 泵驱相变冷却系统原理图[17]

图14　热管理技术发展方向

Fig. 14　Development trend of thermal management technology

2.5　EMC技术

随着功率半导体和电子信息技术的发展，轨道交通列车上出现了很多高$\frac{du}{dt}$（或$\frac{dI}{dt}$）的干扰源，如牵引变流器中Si基功率半导体器件动作导致的$\frac{du}{dt}$典型值约为3 kV/μs，高频辅助变流器SiC器件动作导致的$\frac{du}{dt}$典型值可达到10 kV/μs。另一方面，信息电子设备的工作电平不断降低，抗干扰阈值也逐渐降低，轨道交通EMC问题逐渐突出。为了保证轨道交通车载设备之间、车辆与地面信号之间的兼容性，以及电磁辐照下人体的安全与健康，国际电工委员会（IEC）和国际无线电干扰委员会（CISPR）等国际组织制定了EMC标准来约束轨道交通设备和车辆的电磁兼容性能。在变流技术飞速发展趋势下，轨道交通变流器向高频化、智能化、

绿色化、集成化和轻量化方向发展，高频化导致了更强的电磁干扰，轻量化复合材料的广泛使用使得系统的电磁防护性能下降，在变流器集成化和小型化趋势下，电磁兼容材料和技术也需要向集成化和轻量化方向发展，电磁兼容设计难度进一步增加。对于轨道交通设备来说，最大的EMC风险是准入合规风险和产品质量风险。准入合规风险影响产品的交付，质量风险舆情直接关联到口碑与品牌，在轨道交通领域，电磁兼容性已经上升为安全风险因素[33]。

变流器作为轨道交通车辆的“心脏”，其电磁兼容性对于确保整车的安全可靠运行至关重要。变流器整体布局应遵循“干扰源、敏感设备分类放置”的原则[5]，中车时代电气开发了某牵引变流器（如图15所示），腔体布局大致为“三行五列”：左侧为高频辅变；高压输入输出位于柜体底部3个相互隔离的腔体；整流、逆变模块和1个斩波模块分别位于柜体中部4个腔体内；传动控制单元位于柜体中上部单独腔体中；高压线缆布置在柜体外侧，低压敏感线缆布置在柜体内侧。通过以上布局和布线实现干扰源与敏感设备的隔离布置，再综合运用屏蔽、滤波、接地等多方面设计措施，变流器电磁兼容性能优异，抗扰度性能比GB/T 24338.4标准要求高一个等级。



图15　某牵引变流器内部隔离布局图

Fig. 15　Internal isolation layout of a traction converter

大量的EMC整改经验表明，在早期概念阶段考虑电磁兼容问题，可以最大限度地降低EMC成本[34]。如果在后期阶段处理电磁兼容问题，整改成本呈指数增长，因此需要从正向管理和正向设计2个维度进行电磁兼容设计，如图16所示。在EMC正向管理方面，电磁兼容设计应与产品正向开发工作深度融合：在概念设计阶段进行EMC需求分析和风险评估，在详细设计阶段依据设计规范和仿真工具进行电磁兼容设计，在产品中试阶段核查所有EMC要素是否响应，在试验阶段测试产品的EMC性能是否满足要求。在每个阶段进行EMC评审和管控，满足要求方可进入下一阶段。在EMC正向设计方面，轨道交通车辆变流器功率单元和控制设备多、内部耦合复杂，首先应进行系统级EMC设计，将复杂的变流器系统划分为多个子系统分别处理，通过对分系统、设备、电路板、元器件等各个层次进行电磁兼容设计，并在整个设计过程中不断迭代，逐步达到系统最佳状态[35]。

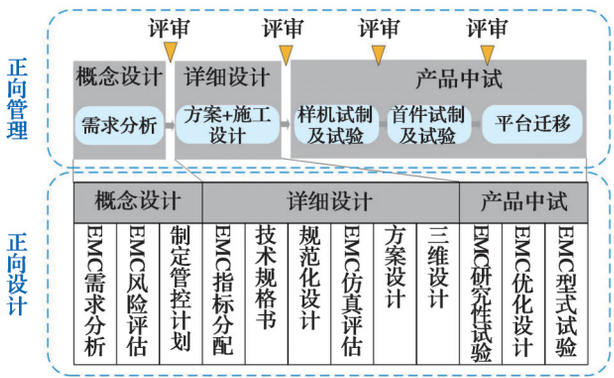


图16　EMC正向管理与正向设计流程

Fig. 16　Forward management and top-down design process for EMC

EMC正向设计强调风险分析、量化设计、仿真预测、迭代优化，正向设计的核心是通过解析计算或EMC仿真实现量化设计，实现在设计阶段推进EMC开发，以此来减少后期测试整改所需要耗费的人力、物力。为了实现EMC量化设计，首先需要研究变流器的干扰机理，变流器干扰主要以传导干扰和辐射干扰为主。研究方向包括部件和元器件建模、高频参数的提取计算、干扰源分析及其传播机理、干扰抑制等方面。文献[36]对牵引系统的低频传导进行了系统研究，并建立仿真模型对传导干扰进行了预测与分析，低频传导电流仿真误差小于0.3 A。文献[37]研究了牵引系统的传导干扰对列车无线电通信的影响，通过解耦技术将系统间的干扰降低了95%。文献[38]则根据磁场辐射机理，研究了牵引变流器产生的低频辐射对计轴器的功能影响，全波3D模型低频磁场预测误差小于5 dB(A)/m。文献[39]分析了辐射对人体的影响，明确了各变流器低频磁场标准限值之间的关系。其次，需要对电磁干扰进行仿真预测，通过仿真达到量化设计目标，其基本原理是通过建立电磁干扰源模型和考虑高频寄生参数的电路模型，模拟高频电磁场在系统内部的传播路径和对外辐射的电磁场分布。电磁兼容仿真方法可分为3类：理论分析法、专家系统和数值分析法，其中由于数值方法的精准性，其在工程中得到较为广泛应用[40]。随着计算机技术的发展，出现了多种商业EMC仿真软件，并且针对电磁兼容仿真进行了专业的模型开发，如LISN模型、接收机模型、ESD模型等[41-43]，极大地方便了仿真计算，上述典型模型的仿真精度达到3 dB以内。图17为中车时代电气利用电磁场仿真软件在设计阶段预测不同散热孔径的变流器机柜的屏蔽效能，进而总结出针对不同变流器散热孔阵的EMC设计准则——散热孔阵的孔径应小于8 mm，以满足对于30~230 MHz电磁波的屏蔽效能高于50 dB的指

标要求。从国际上来看，电磁兼容仿真已经成为电子设备设计必需的一个步骤，通过仿真可以在设备投入生产之前发现并解决电磁兼容问题，从而节省由于电磁兼容不达标而造成的反复修改设计的成本。如SIEMENS公司将整个工作流程已集成到Siemens PLM SIMCENTER EM CAE平台中，以评估潜在的电磁干扰（EMI）或电磁兼容风险，并在早期设计阶段权衡各种可能的技术解决方案[44]。

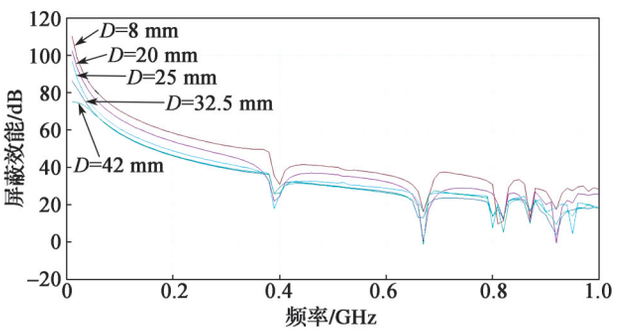


图17　不同散热孔阵孔径屏蔽效能对比

Fig. 17　Comparison of shielding effectiveness among different heat sink arrays and apertures

研究新型的电磁干扰抑制方法是轨道交通变流器电磁兼容技术发展方向之一，如降低电磁干扰源的主动抑制法、开发提升屏蔽效率和抗扰度的新型轻量化屏蔽材料等[5, 45]。相比传统的滤波和接地等电磁干扰抑制方法，新型抑制方法更有针对性，可以从多角度进行系统级EMC设计，为变流器提供更优的系统级EMC解决方案。

2.6　工业设计技术

工业设计要解决的是产品外观造型、结构和功能三者之间的关系，从而在结构、形态和色彩等方面赋予产品新的品质，是一种提升工业产品附加值和竞争力的创造性活动。当前，工业设计已成为现代工业研发和制造体系中的重要学科。轨道交通变流器工业设计，旨在解决变流器的整体与局部、局部与局部之间的外观协调性、美观性问题，以及产品使用过程中涉及的易用性问题，是一项能够提升变流器外在品质感和使用舒适性的设计技术，其设计过程中涉及的部分细节如图18所示。



图18　变流器工业设计的部分项点

Fig. 18　Partial items of industrial design for converter

我国的轨道交通装备经历了由单纯注重产品技术的设计模式，向兼顾技术与美学融合模式的转变。尤其是，当代社会的审美水平不断提高，轨道车辆造型已经成为产品综合竞争实力的重要组成部分，因此在过去的二十多年中，工业设计在轨道交通领域得到了快速发展。变流器作为轨道交通车辆的重要部件，由于之前受到的关注较少，导致在变流器领域普遍存在着产品拼凑感强、外观形象混乱、缺乏工业美感等问题，严重影响变流器的整体品质。但是，随着对列车整体设计要求的持续提升，如变流器等部件级设备的工业设计正在获得越来越多的关注。

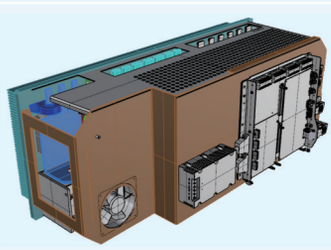
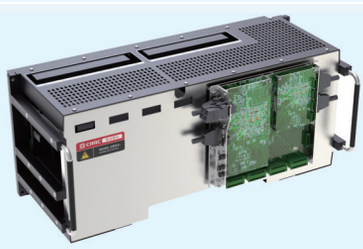
随着轨道交通变流器日趋同质化，变流器的外在品质感和产品识别形象已逐渐成为产品差异化竞争的重要项点之一，而这正是工业设计技术研究的核心内容。

目前，轨道交通领域的工业设计研究主要集中在车辆造型设计、车辆乘坐舒适性、司机室的“人–机–环境”系统、设计评价方法[46]等方面，针对变流器工业设计的研究仍然较少。从工业设计的对象类别上来说，轨道交通变流器属于强功能性产品，其外观设计要考虑多种因素——在产品色彩和表面处理要满足整车的顶层设计，变流器外观形态要服从产品功能等。基于此设计框架，中车时代电气建立了变流器“精益设计+品牌设计”并举的工业设计研究路线，最大程度地平衡了产品功能性、经济性和美观性三者之间的关系，实现了从产品到品牌、从外部到内部、从部件到整体的系统性工业设计融合式创新。表2为变流器系统性工业设计创新体系中的部分设计案例：在产品品牌设计方面，构建并分类设计了多款产品品牌视觉符号，以提升产品的认知度；在部件设计方面，对门板等外部部件、模块等内部部件进行了多维度工业设计，提升了产品的整体性、易用性和美观性；在整机设计方面，树立了具有自身特色的变流器外观形象，打造具备优秀产品识别度的系列化外观。

随着人工智能技术的快速发展，AI技术可通过对海量设计数据的分析和学习，快速、全面地挖掘有价值的设计信息，并基于设计难点生成具有跨越度的解决方案，从而提升设计效率，缩短设计周期[47]。目前，生成式AI技术已初步在平面设计领域崭露头角，后续势必为轨道交通变流器的工业设计创新带来更多的可能性。此外，VR（虚拟现实）、AR（增强现实）、MR（混合现实）等虚拟现实技术在工业领域的应用越来越广泛，这也将为变流器工业设计创新和设计方案验证，提供更丰富、更高效的设计方法革新。图19为VR技术在变流器售后运维中的运用。

表2　变流器的系统性工业设计创新

Table 2　Systematic innovation in industrial design for converter

项点	工业设计前	工业设计后
产品品牌	无	CARBON POWER 碳之力
外部部件		
内部部件		
变流器		

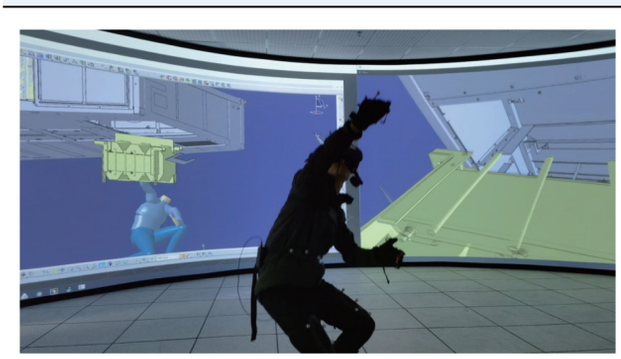


图 19　VR 技术在变流器设计中的应用

Fig. 19　Application of VR technology in inverter design

3　共性技术提升变流器品质案例

本文所述的共性技术及其相关研究成果已经在变流器上进行了广泛应用，对原有变流器进行了全面优化改进。表 3 和表 4 是以中国标准高速动车组变流器与城轨地铁 A1 平台变流器为例，展示了共性技术对变流器品质及其市场竞争力的提升作用，表中的优化效果是指应用措施前后的指标对比。

3.1　功率器件应用技术

动车平台基于 PCU 开展设计，PCU 采用盲插一体式水电接口，单个质量小于 5 kg，拆装便捷，可根据系统需求灵活配置，实现矩阵式扩展，组合成四象限整流、逆变/斩波等不同电路应用，装载了 PCU 的 CR450 列车刷新了高铁交会速度世界纪录，明线交会 891 km/h、隧道交会 840 km/h。城轨平台实现了国产 SiC 器件应用，研究了 SiC 器件开关特性，开展了驱动电路仿真研究，解决了驱动电压振荡问题。此外，通过优化 SiC 器件短路保护逻辑，短路保护时间小于 3 μs，可满足 SiC 器件安全应用需求。

3.2　轻量化技术

动车平台产品的归一化程度高、代际特征明显，全铝合金柜体设计是新一代变流产品轻量化的方向：优选耐蚀性较好、强度较高的铝合金材料，顶部底部框架梁、立梁等采用挤压型材以保证整柜强度刚度、控制焊接变形，柜体门板和内隔板采用折弯板件以兼顾结构及功能，结合多次的拓扑、形貌和尺寸迭代优化，可实现在强度裕量不变的前提下降低柜体重量 30%~35%。城轨产品客户的需求具有多样性，其车型、供电制式、安装接口、冷却方式等参数差异较大，必须有针对性地提供最优解决方案：面向高功率密度、小型化等产品需求，以结构拓扑优化为主要手段进行框架设计，选用延展性优良、强度较高的不锈钢材料，

表3　动车平台优化效果汇总

Table 3　Summary of optimization effects on high-speed train platform

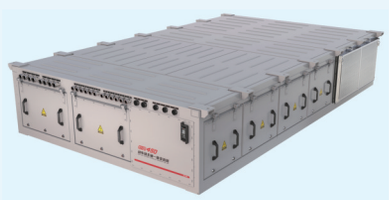
共性技术	具体措施	优化效果
功率器件应用	PCU 器件应用，水电接口优化设计	变流器重量降低24.4%，体积减小19.5%，功率密度提升47%
轻量化	铝型材开发，拓扑优化，形貌尺寸优化	轻量化水平提升35%
减振降噪	模态匹配设计，风道优化，风机优化	规避共振风险，总噪声降低5.8 dB(A)
热管理	复合换热器设计，风道仿真优化，流量分配优化	风量利用率提升59%，单位冷却设备电功耗提升1.9 kW/kW
工业设计	造型设计，色彩设计，产品形象设计	显著提升了外观整体性和视觉识别度 

表4　城轨平台优化效果汇总

Table 4　Summary of optimization effects on urban rail transit platform

共性技术	具体措施	优化效果
功率器件应用	国产SiC器件应用，SiC驱动优化，开关频率优化设计	开关频率提升至2 kHz，输出谐波含量由53%降低至3.7%
减振降噪	设计降噪结构，应用新型吸声材料	平均声压级降低5.4 dB(A)
轻量化	结构优化，铝合金及不锈钢板材折弯，定制化仿真优化工具应用	适用于各类场景，减重比例5%~25%
电磁兼容	跨车动力电缆改屏蔽电缆，增加变流器接地点	整车辐射降低6 dB·μV/m
热管理	部件散热设计优化，风道仿真优化，匹配部件与风机的布局	温升降低6 K，风量提升21.7%
工业设计	产品品牌设计，部件设计，色彩设计，产品整机形象设计	系统性地提升了变流器的外在品质感和产品形象 

通过多次折弯和先进焊接工艺等手段实现低成本的轻量化异形件的工程化开发；面向低地板等车型（如客运空轨等）的车内变流器，采用铝合金板材焊接、铆接成形柜体框架以减重；面向安装接口接近的标准地铁变流器，通过开发定制化仿真优化工具，实现指定部件快速校核和减重的目标。通过上述差异化的城轨轻量化方案可实现减重5%~25%的目标。

3.3　减振降噪技术

针对动车平台，重点考虑振动可靠性问题，对整柜及内部重要的安装结构开展了模态匹配设计，将风机底盖板基频提升至40 Hz以上，保障变流器能够有效避开轮轨、车体及其附属自振设备传递的振动频率，规避共振风险。此外，对风机声源进行了优化选型，采用了带锯齿状的仿生叶片降低气动噪声，并对风道进行了优化设计，优化了流场与声场的分布，整柜声功率由106.0 dB(A)降低至100.2 dB(A)。针对城轨平台，重点考虑中低频的气动噪声问题，采用了多孔吸声与共振消声相结合的降噪结构设计，并开发了针对300~500 Hz中低频的吸声材料，将整柜平均声压级由76.5 dB(A)降低至71.1 dB(A)。

3.4　热管理技术

针对动车平台，通过在牵引变流器中集成变流器和电机的液冷系统，实现了电机和变流器2种不同温度梯度设备的散热技术整合，提高了系统的散热利用率、效率和能力。在保证散热满足要求的前提下，通过对电机冷却的集成，将冷却系统的风量利用率（单位风量所能达到的散热量）提升了59%，单位冷却设备电功耗（即风机水泵等冷却设备所需的电功率）所能达到的散热量从3.7 kW/kW提升至5.6 kW/kW。针对城轨平台，通过优化部件散热设计，如增大电抗器迎风面尺寸、减小深度方向尺寸和匹配部件与风机的布局等方式，减小产品的系统风阻，使得系统风量相比原产品提升了21.7%，散热器台面温升减小6 K。

3.5　电磁兼容技术

针对动车平台，柜体选用了不锈钢材料，柜门选用了铝材料及盖板折弯、门锁搭接设计；屏蔽电缆进出柜体时选用屏蔽连接器，并与柜体360°搭接；电机温度传感器、电机速度信号线缆、机车速度信号线缆、DC 110 V线缆采用屏蔽线缆且多点接地方案；DC 110

V端口和AC 380 V端口安装EMI滤波器。针对城轨平台，对跨车动力电缆改屏蔽电缆，增加变流器接地点，整车辐射降低6 dB·μA/m以上。

3.6　工业设计技术

为动车变流器设计了具有良好识别性的专属产品标识和色彩方案，构建独有的产品视觉形象。同时，针对变流器盖板等部件与整体之间存在的造型割裂感问题，设计了一种新型的变流器盖板结构、连接器出线口形式等，提升了产品外观整体性和视觉秩序感。此外，从产品品牌、外部部件、内部部件等多方面，对城轨变流器进行了全面工业创新设计，打造了城轨变流器的外观形象，全面地提升了产品的外在品质感。

4　结束语

本文详细综述了轨道交通变流器设计中的六大类关键共性技术：功率器件应用、轻量化、减振降噪、热管理、电磁兼容和工业设计，分析了各项技术的研究现状与发展趋势，并结合实际案例阐述了共性技术在提升变流器竞争力上发挥的重要作用。但目前轨道交通变流器设计的共性技术研究大多还处于初级阶段或者中级阶段，仍有很多技术项点无法对产品的正向设计提供支持指导，仅能在出现问题后分析故障原因，提出相应的整改和优化措施。因此，共性技术的研究也还存在广阔的发展和探索空间，要实现在设计前端去规避问题产生和融合创新来提升产品竞争力也还有很长的路要走。未来共性技术的发展方向主要有以下3个方面：

①系统性多目标设计方法研究。

共性技术的研究和应用都需要具备系统性的思维。在设计变流器的过程中，很多项点都是相互影响、相互制约，甚至相互矛盾，如散热要求的大风量会带来噪声问题，轻量化要求的减本降重会带来振动可靠性问题，因此学科间的交叉融合、多目标的系统性设计方法研究是共性技术研究的一个重点方向。

②设计制造一体化。

设计制造一体化是一种综合方法，在产品设计阶段就充分考虑制造和装配的要求，以提高生产效率、降低成本，并保证产品质量。这种方法强调设计团队与制造团队的紧密合作，通过优化设计，减少制造过程中的复杂性和装配步骤，实现成本节约和质量提升。这样不仅能提升产品设计效率，而且能确保设计方案在实际生产中可行且经济高效。这是共性技术发展的又一重要方向，通过系统化的设计和制造整合，推动产业效率和竞争力的提升。

③利用大数据方法挖掘设计经验。

在产品的设计过程中，常常存在很多技术指标与设计细节间存在一定的关联性，但又难以简单地用一、两组经验公式进行解析，而产品在运行过程中会积累大量的工程数据，如振动、噪声、温度、应力、风量等。人工智能、数据挖掘等方法就特别适用于这种场合，它可以跳过复杂、深奥的原理推导过程，直接进行数据映射关系的规律总结，给出直接、简单、有效的选型优化、参数优化的建议，这也是大数据时代下新的重要发展方向。

随着技术的发展与时代的进步，人们对变流器产品的功能性指标、品质性指标都提出了更高的要求。在新的竞争环境下共性技术已经成为了变流器设计中的核心技术力量，只有不断地发展共性技术并推动其与产品设计的深度融合，才能全面提升变流器的品质，实现“更轻、更静、更可靠、更美观”的技术愿景。

参考文献：

[1] 刘海涛, 刘兴平, 康力璇, 等. 牵引变流器IGBT失效特性与寿命预测方法研究[J/OL]. 电机与控制学报: 1-9. (2024-05-17) [2024-06-05]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/23.1408.tm.20240516.1541.002.html.
LIU Haitao, LIU Xingping, KANG Lixuan, et al. Study on failure characteristics and life prediction method of IGBT in traction converter[J/OL]. Electric machines and control: 1-9. (2024-05-17) [2024-06-05]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/23.1408.tm.20240516.1541.002.html.

[2] 周磊, 吴书舟, 唐邕浦. 地铁列车牵引变流器结构设计和优化[J]. 装备维修技术, 2024(2): 77-81.
ZHOU Lei, WU Shuzhou, TANG Yongpu. Structure design and optimization of metro train traction converter[J]. Equipment technology, 2024(2): 77-81.

[3] 丁杰. HXD1型电力机车牵引变流器风机振动测试分析[J]. 机电工程技术, 2023, 52(2): 59-62.
DING Jie. Vibration test and analysis of fan of traction converter for HXD1 electric locomotive[J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2023, 52(2): 59-62.

[4] 范荣辉, 付建辉, 康子剑, 等. 高原双源动力集中动车组内燃车牵引变流器关键技术分析与验证[J]. 机车电传动, 2024(2): 101-107.
FAN Ronghui, FU Jianhui, KANG Zijian, et al. Analysis and verification of key technologies for traction converter of plateau dual-source power centralized diesel multiple units[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 101-107.

[5] 支永健, 朱柄全, 袁科亮, 等. 轨道交通牵引系统电磁兼容技术研究及应用[J]. 安全与电磁兼容, 2024(3): 25-38.
ZHI Yongjian, ZHU Bingquan, YUAN Keliang, et al. Research and application of electromagnetic compatibility technology in railway traction system[J]. Safety & EMC, 2024(3): 25-38.

[6] 冯高辉, 袁立强, 赵争鸣, 等. 基于开关瞬态过程分析的母排杂散电感提取方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6442-6449.
FENG Gaohui, YUAN Liqiang, ZHAO Zhengming, et al. A novel stray inductance extraction method for bus bars based on turn-on/off transient process[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6442-6449.

[7] 刘杰, 谢舜蒙, 漆宇. 一种IGBT简化结温曲线计算方法[J]. 机车电传动, 2024(2): 165-170.
LIU Jie, XIE Shunmeng, QI Yu. A simplified junction temperature curve calculation method for IGBT[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 165-170.

[8] 马龙昌, 张东辉, 杨光, 等. IGBT并联应用技术研究[J]. 大功率变流技术, 2015(2): 35-39.
MA Longchang, ZHANG Donghui, YANG Guang, et al. Research on the IGBT paralleling application[J]. High power converter technology, 2015(2): 35-39.

[9] 孙康康, 陈燕平, 忻兰苑, 等. 3 300 V全SiC MOSFET功率器件开关特性研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 34-37.
SUN Kangkang, CHEN Yanping, XIN Lanyuan, et al. Research on switching characteristics of 3 300 V full SiC MOSFET power module[J]. Electric drive for locomotives, 2020(1): 34-37.

[10] 丁荣军, 窦泽春, 罗海辉. 高压大容量功率半导体器件技术及其应用[J]. 机车电传动, 2023(2): 1-13.
DING Rongjun, DOU Zechun, LUO Haihui. Technology and application of high-voltage and large-capacity power semiconductor devices[J]. Electric drive for locomotives, 2023(2): 1-13.

[11] 剡苏荣, 丁浩, 刘雄, 等. 高速动车电气屏柜用铝合金型材应力腐蚀行为研究[J]. 内燃机与配件, 2020(19): 118-122.
YAN Surong, DING Hao, LIU Xiong, et al. The stress corrosion cracking behavior of aluminum alloy for high-speed EMU electrical cabinet[J]. Internal combustion engine & parts, 2020(19): 118-122.

[12] 赵清良, 杨浩, 谭绍军, 等. 地铁车辆电传动系统标准化产品平台研制[J]. 现代城市轨道交通, 2019(5): 16-24.
ZHAO Qingliang, YANG Hao, TAN Shaojun, et al. Research and development of standardized product platform for electric drive system of metro vehicles[J]. Modern urban transit, 2019(5): 16-24.

[13] 刘波, 李榆银, 李建林, 等. 碳纤维复合材料轨道车辆电气柜体研制[J]. 机车电传动, 2021(1): 34-39.
LIU Bo, LI Yuyin, LI Jianlin, et al. Development of carbon-fiber composite electric cabinet of railway vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2021(1): 34-39.

[14] 何艳飞, 丁杰. 基于OptiStruct的辅助变流器盖板及吊耳优化[J]. 机车电传动, 2017(2): 72-75.
HE Yanfei, DING Jie. Cover and lug optimization of auxiliary converter based on OptiStruct software[J]. Electric drive for locomotives, 2017(2): 72-75.

[15] 邓勇. 地铁辅助变流器柜体振动疲劳分析及轻量化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
DENG Yong. Vibration fatigue analysis and lightweight design of auxiliary converter cabinet of metro vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[16] 陈辛波, 杭鹏, 王叶枫. 电动汽车轻量化技术研究现状与发展趋势[J]. 汽车工程师, 2015(11): 23-28.
CHEN Xinbo, HANG Peng, WANG Yefeng. Current status and development trend of electric vehicle lightweight technology[J]. Automotive engineer, 2015(11): 23-28.

[17] 佚名. 中华人民共和国环境噪声污染防治法[Z]. 北京:全国人民代表大会常务委员会, 2021.
Anon. Environmental noise pollution prevention and control law of the people's republic of China[Z]. Beijing: the NPC Standing Committee, 2021.

[18] 张啸天, 王陶, 王伟利, 等. 某轴流风机噪声特性与降噪研究[J]. 南京理工大学学报, 2023, 47(5): 604-610.
ZHANG Xiaotian, WANG Tao, WANG Weili, et al. Research on noise characteristics and noise reduction of axial fan[J]. Journal of Nanjing university of science and technology, 2023, 47(5): 604-610.

[19] 王永胜, 丁杰, 张平, 等. 高速动车组牵引变流器振动特性及隔振优化研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(2): 134-138.
WANG Yongsheng, DING Jie, ZHANG Ping, et al. Vibration characteristics and isolation optimization of a traction converter of high-speed EMU[J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(2): 134-138.

[20] 郝保磊, 张笑慰, 许钦华, 等. 变流器气动噪声分析与噪声控制研究[J]. 声学技术, 2024, 43(2): 253-259.
HAO Baolei, ZHANG Xiaowei, XU Qinhua, et al. Aerodynamic noise analysis and noise control of converter[J]. Technical acoustics, 2024, 43(2): 253-259.

[21] 李芳环, 赵小娟, 陈爱平. 基于仿生学的风机降噪技术研究进展[J]. 电声技术, 2022, 46(5): 62-64.
LI Fanghuan, ZHAO Xiaojuan, CHEN Aiping. Research progress of fan noise reduction technology based on bionics [J]. Audio engineering, 2022, 46(5): 62-64.

[22] 许哲, 吴巧云. 兼顾降噪和通风性能的声学超材料研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2024, 46(2): 209-216.
XU Zhe, WU Qiaoyun. Research advances in acoustic metamaterials balancing noise reduction and ventilation performance[J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2024, 46(2): 209-216.

[23] 赵艳彪, 李奕霆, 高南沙, 等. 声学黑洞在减振降噪中的研究进展[J]. 航空科学技术, 2024, 35(5): 1-14.
ZHAO Yanbiao, LI Yiting, GAO Nansha, et al. Research progress of acoustic black hole in vibration and noise reduction[J]. Aeronautical science and technology, 2024, 35(5): 1-14.

[24] 崔佳嘉, 马宏忠, 李楠, 等. 基于COMSOL的变压器铁心振动声场分布的有限元仿真[J]. 电子测量与仪器学报,

2022, 36(4): 48-55.
CUI Jiajia, MA Hongzhong, LI Nan, et al. Simulation and analysis of vibration and noise of oil immersed transformer core based on COMSOL[J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2022, 36(4): 48-55.

[25] 蒋孝文, 彭宣霖, 李华, 等. 基于控制策略的牵引系统电磁噪声优化[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(4): 181-186.
JIANG Xiaowen, PENG Xuanlin, LI Hua, et al. Electromagnetic noise optimization of traction systems based on control strategy[J]. Noise and vibration control, 2023, 43(4): 181-186.

[26] 孙效杰, 顾鹏飞, 李培刚. 铁路客车乘坐舒适性评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 642-648.
SUN Xiaojie, GU Pengfei, LI Peigang. Riding comfort ability evaluation of railway passenger cars[J]. Journal of railway science and engineering. 2022, 19(3): 642-648.

[27] 吴军科. 非平稳工况变流器IGBT模块结温平滑控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
WU Junke. Study on junction temperature smooth control of IGBT module in power converter under power fluctuation condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

[28] 陈明, 胡安. IGBT结温模拟和探测方法比对研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(12): 44-49.
CHEN Ming, HU An. Study on the junction temperature simulation and detection method of IGBT power electronic devices[J]. Electric machines and control, 2011, 15(12): 44-49.

[29] 陈建业, 吴文伟. 大功率变流器冷却技术及其进展[J]. 大功率变流技术, 2010(1): 15-24.
CHEN Jianye, WU Wenwei. Cooling technology for high power converter and its development[J]. High power converter technology, 2010(1): 15-24.

[30] 杨宁, 李岩磊, 马颖涛. 城轨列车牵引变流器箱体热仿真设计方法[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(3): 91-95.
YANG Ning, LI Yanlei, MA Yingtao. Body thermal simulation method for traction converter in urban rail train[J]. Railway locomotive & car, 2015, 35(3): 91-95.

[31] WU Hui, ZHANG Gang, FENG Zhaozan, et al. Research on pumped two-phase single-sided cold plate of IGBT for rail transit applications[J]. Transportation safety and environment, 2021, 3(3): 1-11.

[32] 姚磊, 吴辉, 冯钊赞, 等. 基于冲击相变技术的IGCT冷板研究[J]. 真空与低温, 2021, 27(2): 152-158.
YAO Lei, WU Hui, FENG Zhaozan, et al. Research on IGCT cold plate based on jet phase change technology[J]. Vacuum and cryogenics, 2021, 27(2): 152-158.

[33] STEELE H, ROBERTS C, HILLMANSEN S. Railway smart grids: drivers, benefits and challenges[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit, 2019, 233(5): 526-536.

[34] PEROTONI M B, GAVIAO M, DIETRICH A B. Electromagnetic simulation applied to automotive EMC testing[EB/OL]. (2014-11-01) [2024-5-21]. https://www.researchgate.net/publication/277212992_Electromagnetic_Simulation_Applied_to_Automotive_EMC_Testing.

[35] 范峻, HONGSEOK KIM, 蒲菠. 汽车电磁兼容中的建模挑战[J]. 安全与电磁兼容, 2021(6): 9-14.
FAN Jun, KIM H, PU Bo. Modeling challenges in automotive EMC[J]. Safety & EMC, 2021(6): 9-14.

[36] JIA Kelin, RIBBENFJARD D. Prediction of the conducted emission generated by the electrified railway traction system [C]//IEEE. 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Dresden: IEEE, 2015: 134-137.

[37] SERDIUK T, BOTNAREVSCAIA R. Electromagnetic compatibility of train radio communication with the traction systems[C]//IEEE. 2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe. Gothenburg: IEEE, 2022: 604-607.

[38] PERSICHINI R D, DI FEBO D, CALÀ V, et al. EMC analysis of axle counters in the Italian railway network[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2015, 57(1): 44-51.

[39] SADAMITSU S, LEUNG S W, LO W K, et al. Practical considerations of human exposure in railway systems[C]// IEEE. 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC). Suntec City: IEEE, 2018: 28-31.

[40] 金开礼, 李相强, 张健穹, 等. 高速动车组牵引变流器EMI建模仿真研究[J]. 铁道机车车辆, 2023, 43(1): 63-69.
JIN Kaili, LI Xiangqiang, ZHANG Jianqiong, et al. Research on EMI modeling and simulation of traction converter for high-speed EMU[J]. Railway locomotive & car, 2023, 43(1): 63-69.

[41] 陈天宇, 宋术全, 卜丽东, 等. 四象限脉冲整流器模型预测电流控制算法研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(4): 16-20.
CHEN Tianyu, SONG Shuquan, BU Lidong, et al. Model predictive current control scheme of four-quadrant PWM rectifiers[J]. Railway locomotive & car, 2019, 39(4): 16-20.

[42] 张晓君, 罗忠鹏. 基于碳化硅MOSFET功率模块的牵引变流器电磁兼容应用研究[J]. 铁道车辆, 2022, 60(2): 83-88.
ZHANG Xiaojun, LUO Zhongpeng. Research on EMC application of traction inverter based on silicon carbide MOSFET power module[J]. Rolling stock, 2022, 60(2): 83-88.

[43] 李颖, 谭伟, 王志雄. 系统级辐射类电磁兼容预测和仿真分析方法研究[J]. 微波学报, 2014, 30(增刊2): 24-28.
LI Ying, TAN Wei, WANG Zhixiong. System level radiation EMC prediction and analysis method[J]. Journal of microwaves, 2014, 30(Suppl 2): 24-28.

[44] LANGHE K D , BANDINELLI M , BIANCHI D, et al. Overview of solutions to solve and mitigate electromagnetic compatibility and interference (EMC/EMI) in context of ve-

hicle electrification: 2019 JSAE Annual Congress Proceedings[C]. [S.l. : s.n.], 2019.

[45] 李虹, 张冲默, 王作兴, 等. 高速列车供电系统电磁干扰形成机理与抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3137-3154.
LI Hong, ZHANG Chongmo, WANG Zuoxing, et al. Review of EMI mechanism and suppression methods in power supply system of high-speed train[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3137-3154.

[46] 向泽锐, 支锦亦, 李然, 等. 我国城市轨道列车工业设计研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1319-1328.
XIANG Zerui, ZHI Jinyi, LI Ran, et al. Review on industrial design of urban rail vehicles in China[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2021, 56(6): 1319-1328.

[47] 刘宁, 杨芳. 智能互联时代的工业设计创新发展研究[J]. 包装工程, 2021, 42(14): 101-107.
LIU Ning, YANG Fang. Development of industrial design in intelligent and Internet era[J]. Packaging engineering, 2021, 42(14): 101-107.

Review on key generic technologies for railway converters

LIU Haitao, LIU Yongjiang, LI Hua, HE Guanqiang, PENG Xuanlin

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: With continuous advancements in technology, customer requirements for converters, particularly quality indicators, are steadily increasing, driving the evolution of converters towards lighter weight, lower noise, higher reliability, and improved aesthetics. This paper delves into the key generic technologies in the design of converters for rail traffic, covering critical areas such as the application of power devices, lightweight design, vibration and noise reduction, electromagnetic compatibility, thermal management, and industrial design. It provides an overview of the current development status of these technologies both domestically and internationally, summarizes the challenges and difficulties encountered in their further development, and discusses in detail the core role these technologies play in enhancing product market competitiveness based on practical application examples. The findings provide comprehensive references and technical guidance for designing converters that are lighter, quieter, more reliable, and more aesthetically pleasing.

Keywords: converter; generic technology; vibration and noise; electromagnetic compatibility; thermal management; industrial design; lightweight

收稿日期：2024-02-25；修回日期：2024-07-01