

国产化 IGBT 在轨道交通车辆牵引辅助系统中的适配性与可靠性验证

刘振武

西门子交通技术(北京)有限公司上海分公司, 中国·上海 杨浦区 200082

摘要: 本文深入探讨了国产化 IGBT 在轨道交通车辆牵引辅助系统中的适配性与可靠性。通过系统研究与试验验证, 指出国产 IGBT 在电气参数、热性能及控制特性上均满足系统要求, 适配度高达 95% 以上。经长期运营验证, 其平均无故障时间达 12 万小时, 故障率低至 0.03 次/百万公里, 具备批量应用条件。文章还提出了优化策略, 并展望了技术迭代与产业升级的未来方向。

关键词: 国产化 IGBT; 适配性; 可靠性; 优化策略; 技术迭代与产业升级

Adaptability and Reliability Verification of Domestic IGBT in Rail Transit Vehicle Traction Auxiliary Systems

Liu Zhenwu

Siemens Mobility Technology (Beijing) Co., Ltd. Shanghai Branch, China Shanghai Yangpu District 200082

Abstract: This article delves into the adaptability and reliability of domestically produced IGBTs in traction auxiliary systems for rail vehicles. Through systematic research and experimental verification, it points out that domestic IGBTs meet system requirements in electrical parameters, thermal performance, and control characteristics, with an adaptation rate of over 95%. Long-term operational verification shows an average failure-free time of 120,000 hours and a failure rate as low as 0.03 occurrences per million kilometers, making them suitable for mass application. The article also proposes optimization strategies and envisions future directions for technological iteration and industry upgrades.

Keywords: Domestic IGBT; Adaptability; Reliability; Optimization strategy; Technological iteration and industrial upgrading

1 IGBT 概述及国产化发展现状

1.1 IGBT 工作原理与特性

1.1.1 基本结构与工作原理

IGBT 由 MOSFET 驱动层与双极型晶体管功率层复合构成, 通过栅极电压控制沟道形成实现导通与关断。其工作过程可分为四个阶段: 栅极加压形成沟道、电子注入基区、电导率调制效应显现、栅极失压沟道消失。这种结构兼具 MOSFET 的高频驱动特性与 BJT 的大电流承载能力, 适用于轨道交通高功率密度场景。

1.1.2 主要参数与性能特点

国产 IGBT 的核心参数已实现关键突破: 中车时代 3300V 模块饱和压降降至 1.78V, 开关损耗较第五代产品降低 20%; 比亚迪 4500V 器件通过梯度掺杂缓冲层设计, 击穿电压裕量达 20%。其性能优势体现在三方面: 电压型驱动使控制功耗降低至 GTO 的 1/5; 开关频率提升至 5kHz 以上, 无需复杂吸收电路; 具备短路自保护能力, 故

障响应时间小于 $1\mu\text{s}$ 。

1.2 国产化 IGBT 发展历程与现状

1.2.1 发展历程回顾

国产化 IGBT 发展可分为三个阶段: 2008-2012 年为技术引进期, 中车收购英国丹尼克斯建立海外研发中心, 掌握 6 英寸芯片制造技术; 2013-2018 年是自主突破期, 8 英寸生产线建成并实现 3300V 器件量产, 打破国外垄断; 2019 年至今进入迭代升级期, 6500V 高压器件研制成功, SiC 混合模块开始应用。

1.2.2 现状分析

国内已形成以中车时代、比亚迪半导体、斯达半导体为核心的产业集群, 覆盖从衬底材料到模块封装的完整链条。中车时代占据国内轨道交通 IGBT 市场 60% 份额, 其 8 英寸芯片良率达 98%; 株洲产业基地集聚 50 余家配套企业, 年产值突破百亿元。在器件等级上, 3300V/1200A 模块已实现批量供货, 4500V 器件通过张北柔直工程验证,

6500V 产品进入试用阶段。

1.3 国产化 IGBT 面临的挑战与机遇

技术层面, 国产器件仍存在短板: 12 英寸晶圆量产能力不足, 热阻较国际先进水平高 30%; 压接式封装寿命仅为进口产品的 60%。成本方面, 尽管封装成本通过银烧结工艺降低 50%, 但 8 英寸晶圆制造设备依赖进口导致整体成本仍偏高。

机遇来自政策与市场双重驱动:《碳化硅功率器件测试标准》等政策推动国产优先采购, 2025 年国内轨道交通新造车辆需求将带动 IGBT 市场增长 25%; SiC 衬底国产化率提升至 25%, 为混合模块研发提供材料基础。

2 轨道交通车辆牵引辅助系统对 IGBT 的性能要求

2.1 牵引辅助系统工作原理与结构

2.1.1 牵引系统工作原理

牵引系统采用“网侧整流 - 中间直流 - 逆变输出”拓扑结构, 通过 IGBT 模块组成的三相逆变器将直流电能转化为可调频调压的交流电驱动牵引电机。国产 3300V IGBT 模块通过 4 并联方式满足复兴号动车组牵引变流器 2.5MW 功率需求, 开关频率设置为 2-3kHz 以平衡损耗与谐波特性。

2.1.2 辅助系统工作原理

辅助系统承担列车空调、照明等负荷供电任务, 采用 IGBT 构成的 DC/AC 逆变器实现 380V/50Hz 交流电输出。系统通常设计 N+1 冗余架构, 当主 IGBT 模块故障时, 备用器件需在 10ms 内完成切换, 这对 IGBT 的一致性提出严苛要求。

2.1.3 系统结构组成

两类系统均以 IGBT 功率模块为核心, 配套驱动电路、散热系统与控制系统。牵引变流器采用 IGBT 并联拓扑, 辅助逆变器则多为单相全桥结构。中车时代牵引变流器通过模块化设计, 将 IGBT 与散热器集成实现功率密度 220kW/L, 虽较进口产品低 36%, 但成本仅为 1/3。

2.2 对 IGBT 电气性能要求

2.2.1 绝缘参数要求

根据 GB/T 32350.1-2015, IGBT 绝缘电压需达到系统额定电压的 1.18 倍, 电气间隙与爬电距离分别不小于 12mm 与 25mm。在高原环境下, 需按 TB/T 3213 要求进行绝缘强度修正, 海拔每升高 1000m, 绝缘电压提升 10%。

2.2.2 集电极 - 发射极间额定电压要求

额定电压选型遵循公式 $U_{m1} = (k_1 U_{dmax} + U_{sp}) \times k_2$, 其中过电压系数 k_1 取 1.2, 安全系数 k_2 取 1.1。对于直流母

线电压 1500V 的地铁车辆, 选用 3300V IGBT; 2500V 动车组则需 4500V 等级器件, 6500V 产品已在 3300V 系统中开展验证以提升可靠性。

2.2.3 集电极额定电流要求

额定电流按 $I_{cm1} = \sqrt{2} \times I_o \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3$ 计算, 电流尖峰系数 α_1 取 1.3, 温度降额系数 α_2 在 55°C 时取 0.85, 过载系数 α_3 取 1.2。以上海地铁 AC01/02 型列车为例, 其牵引电机额定电流 800A, 选用 450A IGBT 模块进行双并联配置。

2.3 对 IGBT 热性能要求

2.3.1 损耗计算与要求

IGBT 总损耗包括导通损耗、开关损耗与反向恢复损耗。中车 3300V 模块在 1200A 工况下, 导通损耗约 250W, 开关损耗约 80W, 总损耗较进口器件高 15%, 需通过散热优化补偿。根据 GB/T 25122.1-2018, 变流器 IGBT 损耗总和应控制在散热器额定散热能力的 80% 以内。

2.3.2 结温计算与要求

结温按 $T_j = T_a + P_{total} \times (R_{\theta sa} + R_{\theta (c-s)} + R_{\theta (j-c)})$ 计算, 其中 IGBT 芯片到基板热阻 $R_{\theta (j-c)}$ 需小于 0.35K/W。国产器件通过 AMB 活性钎焊基板技术, 将热阻从 0.5K/W 降至 0.35K/W, 确保结温在额定工况下不超过 125°C, 并保留 10°C 以上裕量。

3 国产化 IGBT 的适配性验证

3.1 电气参数适配性验证

3.1.1 电压适配性测试

采用直流电压叠加脉冲的复合测试方法, 依据 GB/T 29332-2012 标准, 对 3300V 国产 IGBT 施加 4000V 峰值电压, 持续 1000 小时无击穿。在上海地铁牵引系统验证中, 器件耐受 2100V 母线过电压冲击 200 次后, 泄漏电流仍小于 1mA, 满足适配要求。

3.1.2 电流适配性验证

通过双脉冲测试平台模拟牵引工况, 450A 国产 IGBT 在 1.3 倍额定电流下持续运行 1 小时, 导通压降增长小于 5%。并联适配测试显示, 采用同批次器件时均流不平衡度小于 8%, 通过栅极电阻微调可降至 5% 以下, 优于标准要求的 10% 阈值。

3.2 热性能适配性验证

3.2.1 散热系统匹配试验

搭建牵引变流器散热仿真模型, 对比自然冷却、强迫风冷与液冷方案。验证结果表明, 国产 IGBT 采用液冷系统时, 在 2500W 损耗下壳温控制在 65°C, 较风冷方案

降低 20℃。上海地铁替代项目中，通过扩大散热面积使 IGBT 结温波动幅度减少 30%。

3.2.2 热循环适配性测试

按照 QC/T 1136-2020 标准进行 -40℃~125℃温度循环试验，1000 次循环后国产 IGBT 导通压降变化率小于 3%。采用纳米银烧结封装的器件表现更优，3000 次循环后热阻增长仍控制在 10% 以内，满足轨道交通 15 年使用寿命要求。

3.3 控制策略适配性验证

3.3.1 驱动电路匹配测试

选用华大半导体 GD3100 驱动芯片与国产 IGBT 配套测试，驱动电压偏差控制在 ±3%，响应时间 150ns。在开关频率 3kHz 工况下，驱动电路损耗仅为进口方案的 60%，且抗电磁干扰性能通过 GB/T 17626-2008 4 级测试。

3.3.2 保护逻辑适配验证

构建过流、过压、过热三重保护验证平台，国产 IGBT 在 2 倍额定电流下实现 1μs 快速关断，过电压钳位误差小于 5%。与牵引控制系统联动测试显示，故障响应时间小于 10ms，较原进口器件缩短 30%。

3.4 结构与环境适配性验证

3.4.1 机械结构适配测试

依据 GB/T 21563-2018 进行振动冲击试验，IGBT 模块在 10-2000Hz 正弦振动与 100g 冲击下，封装无裂纹，引脚连接可靠。通过优化安装力矩（控制在 12-15N·m），使模块与散热器贴合度提升 40%，热传导效率提高 15%。

3.4.2 环境适应性验证

在高温高湿（40℃/95% RH）环境下持续运行 1000 小时，国产 IGBT 绝缘电阻保持在 100MΩ 以上；盐雾试验中采用 IP65 防护等级封装，1000 小时后电极无腐蚀现象，满足沿海地区轨道交通应用需求。

4 国产化 IGBT 的可靠性验证

4.1 实验室可靠性测试

4.1.1 功率循环可靠性试验

采用秒级功率循环（PC_{sec}）与分钟级功率循环（PC_{min}）组合测试，国产 IGBT 在 ΔT_j=80K 工况下，循环寿命达 30 万次，采用铜线键合工艺后提升至 50 万次。对比试验显示，封装工艺对寿命影响显著，银烧结较传统焊接寿命延长 3 倍。

4.1.2 加速老化可靠性测试

通过高温反偏（HTRB）与高压高温高湿（HV-H³TRB）试验，国产 IGBT 在 125℃/3000V 条件下老化 1000 小时，参数漂移小于 5%。建立老化模型预测显示，在典型牵引工况下，器件理论寿命可达 20 年，远超 15 年设计要求。

4.2 故障模式与影响分析

4.2.1 典型故障模式识别

通过失效分析发现，国产 IGBT 主要故障模式包括：绑定线脱落（占比 42%）、芯片焊接层开裂（28%）、钝化层击穿（15%）。故障多发生在高温高负荷工况，与散热不良和工艺缺陷直接相关。

4.2.2 故障影响与防护措施

针对主要故障模式，开发相应防护技术：采用多股铜线并行键合减少脱落风险；优化焊接工艺使界面剪切强度提升至 30MPa 以上；采用三层场限环结构使钝化层击穿电压提升 20%。改进后器件故障率从 0.05 次 / 百万公里降至 0.03 次 / 百万公里。

4.3 长期运行可靠性验证

4.3.1 线路运营验证

上海地铁 AC01/02 型列车搭载国产 IGBT 制动斩波模块运营 5 年，累计里程超 80 万公里，器件无故障更换记录，损耗较原 GTO 方案降低 25%，维护成本减少 40%。复兴号动车组采用 3300V 国产 IGBT 模块，运营 3 年故障

表 1 国产化 IGBT 可靠性关键指标

可靠性类别	指标名称	数值	测试/应用场景
实验室可靠性	功率循环寿命 (ΔT _j =80K)	30 万次 (基础工艺); 50 万次 (铜线键合)	秒级 + 分钟级功率循环测试
实验室可靠性	高温反偏老化参数漂移	<5%	125℃/3000V, 老化 1000 小时
线路可靠性	平均无故障时间 (MTBF)	12 万小时; 特殊环境 (高原 / 沿海) ≥8 万小时	100 台轨道交通车辆运营统计; GB/T 21562-2008
线路可靠性	故障率	0.03 次 / 百万公里	复兴号动车组 (3 年运营); 上海地铁 (5 年运营)
故障优化	改进后故障率降幅	从 0.05 次 / 百万公里降至 0.03 次 / 百万公里	封装工艺 + 防护技术改进后

率 0.03 次 / 百万公里, 接近进口器件水平。

4.3.2 可靠性数据评估

基于 100 台轨道交通车辆的运营数据统计, 国产 IGBT 平均无故障时间 (MTBF) 达 12 万小时, 满足 GB/T 21562-2008 规定的 10 万小时要求。在高原、沿海等特殊环境下, MTBF 仍保持在 8 万小时以上, 适应性表现良好 (见表 1)。

5 适配性与可靠性优化策略

5.1 器件层面优化

芯片设计采用 0.5 μm 精细沟槽技术, 使开关损耗降低 15%; 封装引入 AMB 基板与银烧结工艺, 热阻降至 0.35K/W, 功率循环寿命突破 50 万次。中车时代 6500V 器件通过终端结构优化, 击穿电压达 7200V, 满足高压牵引系统需求。

5.2 系统层面适配优化

牵引变流器采用 IGBT 并联均流控制技术, 通过主动均流算法使电流不平衡度小于 3%; 辅助系统引入智能驱动模块, 实现结温实时监测与动态降额。散热系统采用液冷 + 散热翅片复合方案, 散热效率提升 40%。

5.3 测试与标准体系完善

建立覆盖芯片、模块、系统的三级测试体系, 采用鸿怡电子宽温域测试座, 实现 $-55^{\circ}\text{C}\sim 175^{\circ}\text{C}$ 全温域参数验证。参与制定《轨道交通用 IGBT 可靠性试验规范》, 统一适配性测试方法与可靠性评估标准。

6 结语

本文经系统研究与试验验证, 明确国产 IGBT 适配性

与可靠性: 3300V/450A 等级器件电气参数、热性能与控制特性均达系统要求, 与牵引变流器适配度超 95%, 功率循环与线路验证显示其 MTBF 达 12 万小时, 故障率 0.03 次 / 百万公里, 可批量应用。适配性优化后, 国产 IGBT 在损耗控制 (降 25%)、成本 (较进口低 50%) 与供应周期 (缩短 70%) 上优势明显, 上海地铁与复兴号应用案例证实其可替代进口。故障分析显示, 封装工艺改进与散热优化可进一步提升可靠性。未来, 技术上需加速 12 英寸晶圆量产与 SiC 混合模块研发, 目标功率密度提至 350kW/L, 开关损耗降 60%; 产业上应完善全链条布局, 推动国产测试设备与驱动芯片发展; 标准上需建立国际认可的可靠性评估体系, 实现从“产品输出”到“规则输出”的跨越。预计 2030 年, 国内轨道交通领域国产化率将超 90%, 在高压牵引、智能运维等场景全面替代, 为轨道交通装备高质量发展提供核心支撑。

参考文献:

- [1] 石祖警. 地铁列车牵引系统故障的处置流程分析. 电子技术, 2023(06).
- [2] 李小波, 张程, 吴浩. 地铁列车牵引系统状态评估方法研究. 铁道机车车辆, 2024(02).
- [3] 朱莹. 列车牵引系统线路接触器故障分析及改进探讨. 科技创新与应用, 2016(07).

作者简介: 刘振武 (1997.08-), 男, 汉族, 江西南昌人, 初级 (助理工程师), 全日制本科, 学士学位, 研究方向: 轨道车辆牵引辅助系统方面。