DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.500

高速列车永磁同步牵引系统仿真与 IGBT 结温分析

李　华[1]，李　政[2]，曾祥浩[1]，贺冠强[1]
（1.株洲中车时代电气股份有限公司，湖南 株洲 412001；
2.宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司，浙江 宁波 315000）

摘　要：针对高速列车永磁同步牵引系统在复杂工况下绝缘栅双极晶体管(IGBT)易受热应力影响、加速老化甚至失效的问题，文章建立了牵引传动系统仿真模型与 IGBT 热网络模型，分析了不同工况下系统的动态特性及 IGBT 结温变化规律。首先，根据高速列车牵引系统的结构和运行特点，构建了包括四象限整流器、中间直流环节、牵引逆变器和永磁同步电机在内的牵引传动系统仿真模型，并采用空间矢量脉宽调制技术，模拟列车在牵引与制动等典型工况下的动态响应和电热行为。然后，针对 IGBT 模块，建立了基于 Foster 热网络的结温分析模型，通过开关周期损耗计算方法，实现了 IGBT 及其续流二极管(FWD)在不同工况下结温的实时仿真与变化规律分析。仿真结果表明，在牵引阶段，IGBT 结温由环境温度升至 55 ℃，波动较小，FWD 结温则可达 100~110 ℃；在制动阶段，受高频开关损耗影响，IGBT 结温峰值升至 60 ℃，波动幅度显著增加。研究结果揭示了牵引与制动工况下 IGBT 及 FWD 模块的温升机理及热冲击特点，为关键部件寿命预测、维护策略优化及牵引变流器可靠性设计提供了理论支撑。

关键词：高速列车；永磁同步电机；电路仿真；IGBT 结温

中图分类号：U266　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2026)04-0024-10

0　引言

电力电子变流器是现代工业体系中实现电能变换与调控的核心装置，现已广泛应用于牵引机车、直流输电、工业自动化、航空航天、电动汽车及新能源发电等众多领域[1-4]。随着轨道交通装备向高速化、智能化方向迭代升级，变流器的电能高效转换与动态工况调节性能面临更为严苛的技术要求。绝缘栅双极型晶体管(insulated-gate bipolar transistor，IGBT)自 1985 年问世以来，凭借其高开关频率、高耐压和优异的电气性能，已成为现代大功率电力电子变流器的主流开关器件，尤其在高速铁路牵引系统中占据核心地位[5]。

近年来我国高速铁路建设跨越式发展，截至 2024 年底营业里程已突破 4 万 km，建成全球密度最高的高铁网络[6]。高速列车牵引系统变流器普遍搭载高压大电流 IGBT 模块，运行环境复杂、工况切换频繁，包括牵引、制动、惰行等多种工作状态。与其他工业领域相比，铁路牵引工况下的 IGBT 会经受更为频繁剧烈的电热应力冲击，大幅加快器件疲劳老化速率[7-10]，也是牵引变流器故障失效的主要原因。据对武广线、京沪线等主干高铁线路动车组牵引系统故障数据的统计[11]，IGBT 模块是引发变流器故障的最薄弱环节，对其健康状态进行有效监测与寿命预测已成为保障列车运行安全与可靠性的关键技术难题。

我国高速动车组牵引系统以交流-直流-交流的电力传动结构为主，主要由受电弓、牵引变压器、四象限整流器、中间直流环节、牵引逆变器及永磁同步牵引

基金项目：国家重点研发计划项目 (2022YFB4300100)
通信作者：曾祥浩，男，博士，高级工程师，主要研究方向为变流器设计及可靠性评价；E-mail: zengxh1991@126.com
引用格式：李华, 李政, 曾祥浩, 等. 高速列车永磁同步牵引系统仿真与 IGBT 结温分析[J]. 机车电传动, 2026(4): 24-33.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.500.
Citation：LI Hua, LI Zheng, ZENG Xianghao, et al. Simulation of permanent magnet synchronous traction systems and IGBT junction temperature analysis for high-speed trains[J]. Electric drive for locomotives,2026(4): 24-33.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.06.500.

电机构成[12-13]。其中，整流器多采用两电平四象限拓扑，逆变器则以三相电压型为主。IGBT是功率变换的核心器件，其热管控水平和服役寿命直接影响列车整车运行性能。伴随高铁自主化技术飞速发展，动车组运营速度已达350 km/h，所配备的IGBT模块耐压等级达6 500 V，额定电流达到750 A。器件频繁通断且承受大电流冲击，致使芯片结温大幅攀升[14-16]。长期热应力作用使器件内部材料和焊接结构发生累积性损伤，易引发器件性能退化和失效。

目前，国内外学者针对IGBT的疲劳失效与寿命评估主要依赖于功率循环试验，通过大电流反复加载加速器件老化，以此探究其性能退化规律[17-19]。然而，这类试验难以全面反映高速列车实际运行中复杂工况对IGBT结温及热应力的影响。特别是在牵引、制动等动态变工况下，IGBT结温的瞬态变化规律、热冲击及其累积性损伤效应难以通过常规试验手段充分揭示[20]。为此，结合典型工况开展理论建模与多物理场仿真，是评判牵引变流器核心器件服役安全性与可靠性的有效途径。

鉴于此，本文以高速列车永磁同步牵引系统为研究对象，针对牵引变流器中IGBT模块热特性及服役安全性开展研究。首先，搭建四象限整流器、中间直流环节及逆变传动系统的多物理场仿真模型，模拟不同工况下系统动态运行特性；然后，结合Foster热网络法建立IGBT结温预测模型，动态分析牵引、制动典型工况下器件结温波动与热应力分布规律。本文研究成果将为牵引变流器关键功率器件的寿命评估及优化设计提供理论支撑。

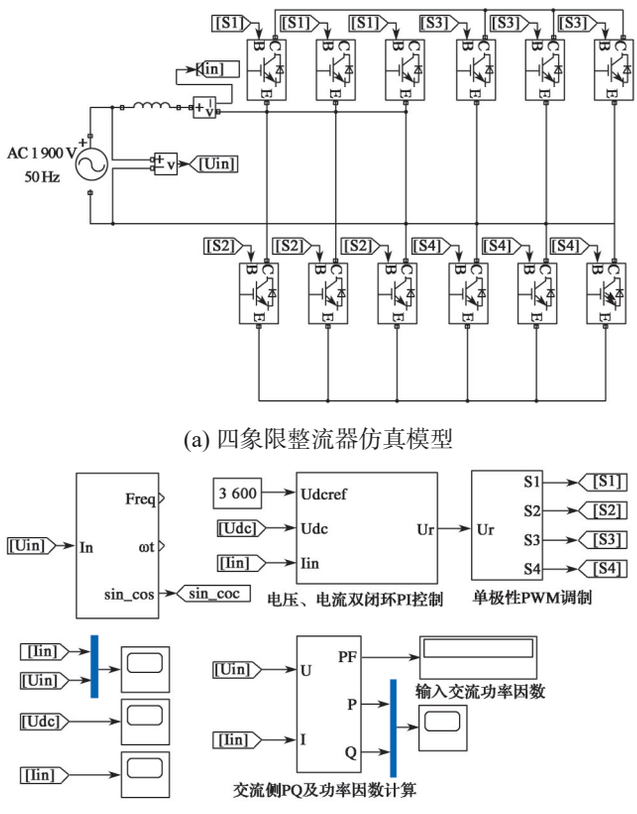
1　永磁同步牵引系统仿真

1.1　系统结构

高速列车牵引传动系统由受电弓、牵引变压器、四象限整流器、中间直流环节、牵引逆变器与永磁同步牵引电机构成。整流器采用两电平四象限拓扑，可实现牵引、再生制动工况下的双向功率传输；中间直流环节由大容量电容和滤波电感组成，起到平滑直流电压、支撑能量回馈的作用；逆变器为三相电压型结构，结合空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation，SVPWM)和磁链定向矢量控制策略，完成电机转矩和转速调控。

1.1.1　四象限整流器

四象限整流器模块主要由IGBT、二极管、滤波电容、电感等器件构成，辅以脉宽调制(pulse width modulation，PWM)控制策略，可实现四象限功率转换。建模中将网侧变压器等效为理想电压源，将变压器漏电感和整流器滤波电感统一等效为网侧电感L_g，参数取值为1 mH。四象限整流器仿真模型及其控制电路如图1所示。



(a) 四象限整流器仿真模型

(b) 整流器控制电路

图1　四象限整流器仿真模型及其控制电路

Fig. 1　Simulation model and control circuit of the four-quadrant rectifier

1.1.2　中间直流环节

中间直流环节衔接整流器和逆变器，是电能转换系统的枢纽。该单元具备能量存储、滤波和稳压功能，可为逆变器输出稳定直流电源，同时支持整流器与逆变器之间的能量双向流动。中间直流环节模型如图2所示。

1.1.3　逆变传动系统

逆变传动系统采用最大转矩电流比(maximum torque per ampere，MTPA)控制策略，以最小定子电流输出最大电磁转矩。牵引逆变器运用SVPWM调制技术，具体仿真模型如图3所示。

1.2　MTPA控制原理

在d-q坐标系中，永磁同步电机的数学模型可表示为：

$$\left.\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}i_{sd}}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{L_{sd}}\left(-R_{\mathrm{s}}i_{sd}+\omega_{\mathrm{r}}\psi_{sq}+u_{sd}\right)\\\frac{\mathrm{d}i_{sq}}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{L_{sq}}\left(-R_{\mathrm{s}}i_{sq}-\omega_{\mathrm{r}}\psi_{sd}+u_{sq}\right)\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中：t为时间；i_{sd}、i_{sq}分别为电机定子电流直轴分量和交轴分量；L_{sd}、L_{sq}分别为电机定子直轴电感和交轴电感；u_{sd}、u_{sq}分别为电机定子电压直轴分量和交轴分量；R_{s}为电机定子电阻；ω_{r}为转子角速度；Ψ_{sd}、Ψ_{sq}分

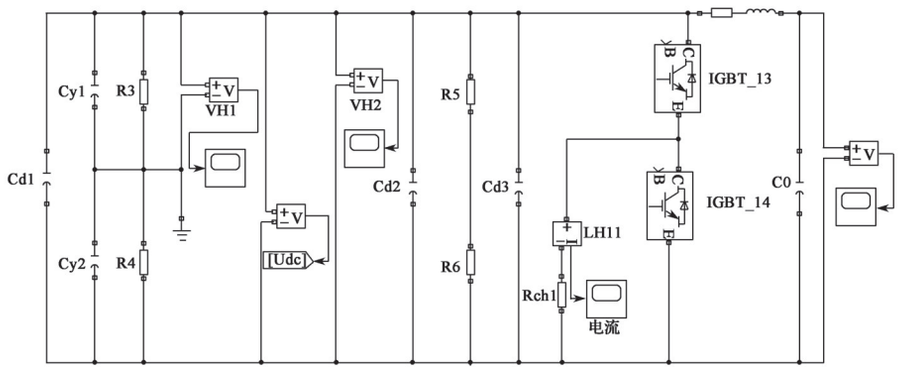
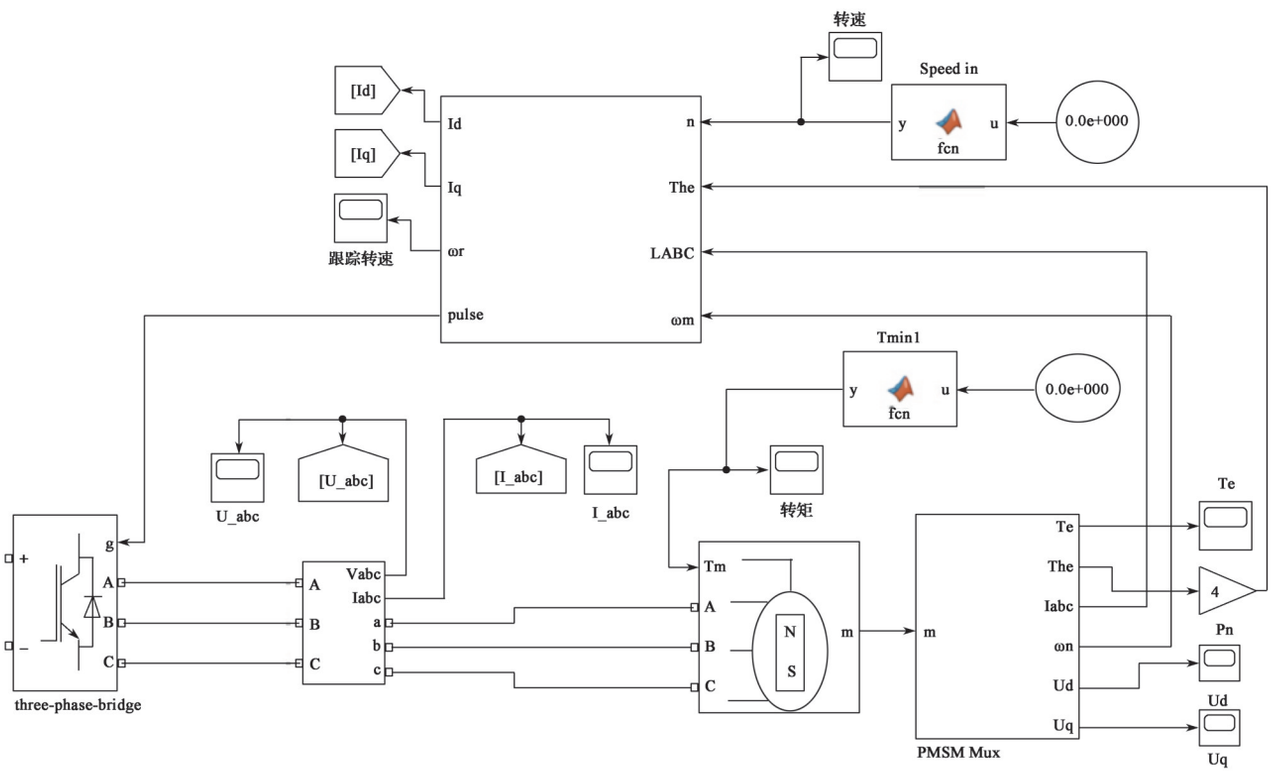
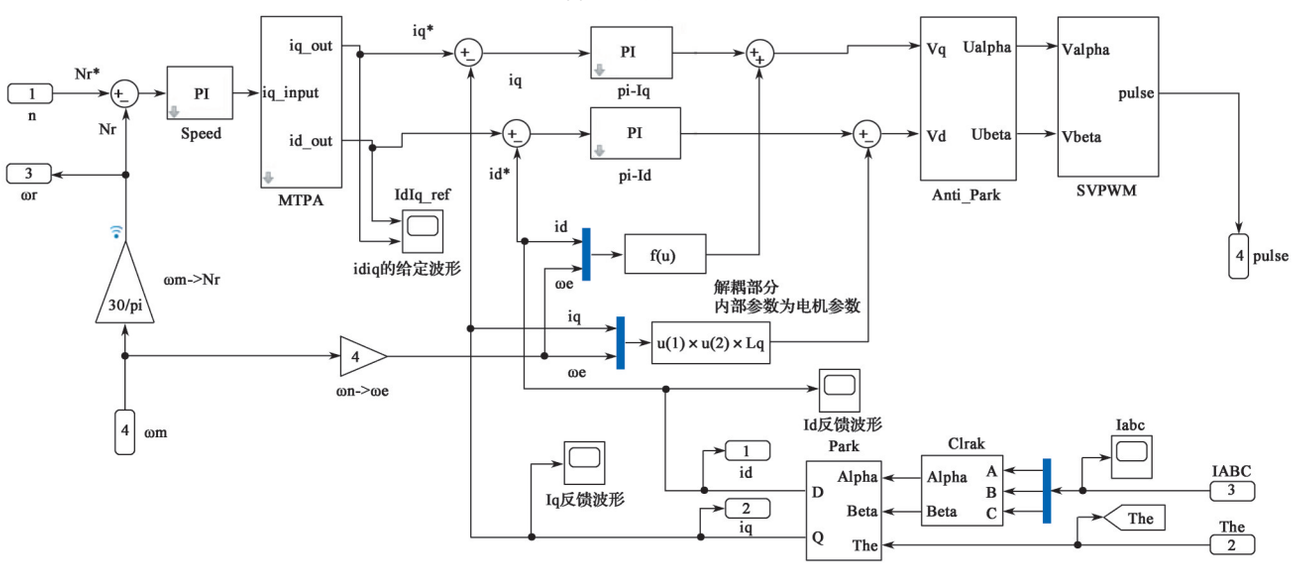


图2 中间直流环节

Fig. 2 Intermediate DC link



(a) 逆变传动系统



(b) MTPA 控制电路

图3 基于MTPA的逆变传动系统及其控制电路

Fig. 3 MTPA-based inverter drive system and its control circuit

别为直轴磁链和交轴磁链，其中，磁链方程由式(2)定义。

$$\left.\begin{aligned}\psi_{sd}&=L_{sd}i_{sd}+L_{md}I_{f}\\ \psi_{sq}&=L_{sq}i_{sq}\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中：L_{md}为定子与转子永磁体在直轴上的互感；I_{f}为转子永磁体的等效励磁电流。

把式(2)代入式(1)可得：

$$\left.\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}i_{sd}}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{L_{sd}}(-R_{s}i_{sd}+\omega_{r}L_{sq}i_{sq}+u_{sd})\\ \frac{\mathrm{d}i_{sq}}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{L_{sq}}[-R_{s}i_{sq}-\omega_{r}(L_{sd}i_{sd}+L_{md}I_{f})+u_{sd}]\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

电机的电磁转矩为：

$$\left.\begin{aligned}T_{e}&=n_{p}(\psi_{sd}i_{sq}-\psi_{sq}i_{sd})\\ T_{e}&=n_{p}[\psi_{f}i_{sq}+(L_{sd}-L_{sq})i_{sq}i_{sd}]\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

式中：n_{p}为电机极对数；ψ_{f}为永磁体磁链。

MTPA控制能使电机在相同的电磁转矩下定子电流最小，该问题可转化为定子电流I_{s}在式(4)下的数学极值。可表示为

$$\left.\begin{aligned}&\min I_{s}=\sqrt{i_{sd}^{2}+i_{sq}^{2}}\\ &\text{when } T_{e}=n_{p}[L_{md}I_{f}i_{sq}+(L_{sd}-L_{sq})i_{sq}i_{sd}]\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

采用拉格朗日乘数法构造辅助函数F如下：

$$F=i_{sd}^{2}+i_{sq}^{2}+\lambda[n_{p}(L_{md}I_{f}i_{sq}+(L_{sd}-L_{sq})i_{sq}i_{sd})-T_{e}]\tag{6}$$

式中：λ为拉格朗日乘子。

上式对d-q轴电流和λ求偏导可以得到：

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial F}{\partial i_{sd}}&=2i_{sd}+\lambda n_{p}(L_{sd}-L_{sq})i_{sq}=0\\ \frac{\partial F}{\partial i_{sq}}&=2i_{sq}+\lambda n_{p}[L_{md}I_{f}+(L_{sd}-L_{sq})i_{sd}]=0\\ \frac{\partial F}{\partial \lambda}&=n_{p}[L_{md}I_{f}i_{sq}+(L_{sd}-L_{sq})i_{sq}i_{sd}-T_{e}]=0\end{aligned}\right\}\tag{7}$$

求解上式，得

$$i_{sd}=\frac{L_{md}I_{f}}{2(L_{sq}-L_{sd})}+\sqrt{\left(\frac{L_{md}I_{f}}{4(L_{sq}-L_{sd})}\right)^{2}+i_{sq}^{2}}\tag{8}$$

在永磁同步电机的矢量控制中，q轴电流参考分量由速度环通过比例积分(proportional-integral, PI)得到，将其代入式(8)即可得到MTPA控制中的d轴电流分量。

1.3　仿真结果

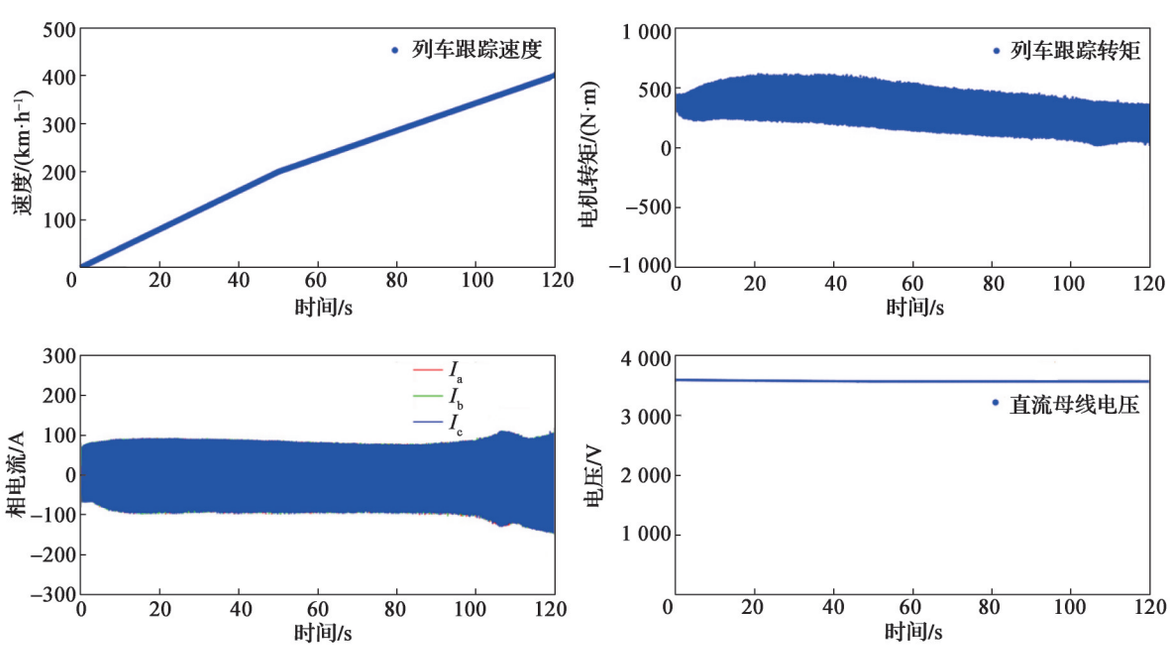
1.3.1　牵引特性

动车组的牵引特性主要包括牵引力、加速性能、稳态牵引特性、爬坡能力和牵引效率等。仿真针对该动车组两类牵引工况展开分析：特性1起动牵引力240 kN，该牵引力持续到40 km/h后线性下降到恒功区；特性2起动牵引力218 kN，可持续到193 km/h的恒功区。仿真结果如图4所示。

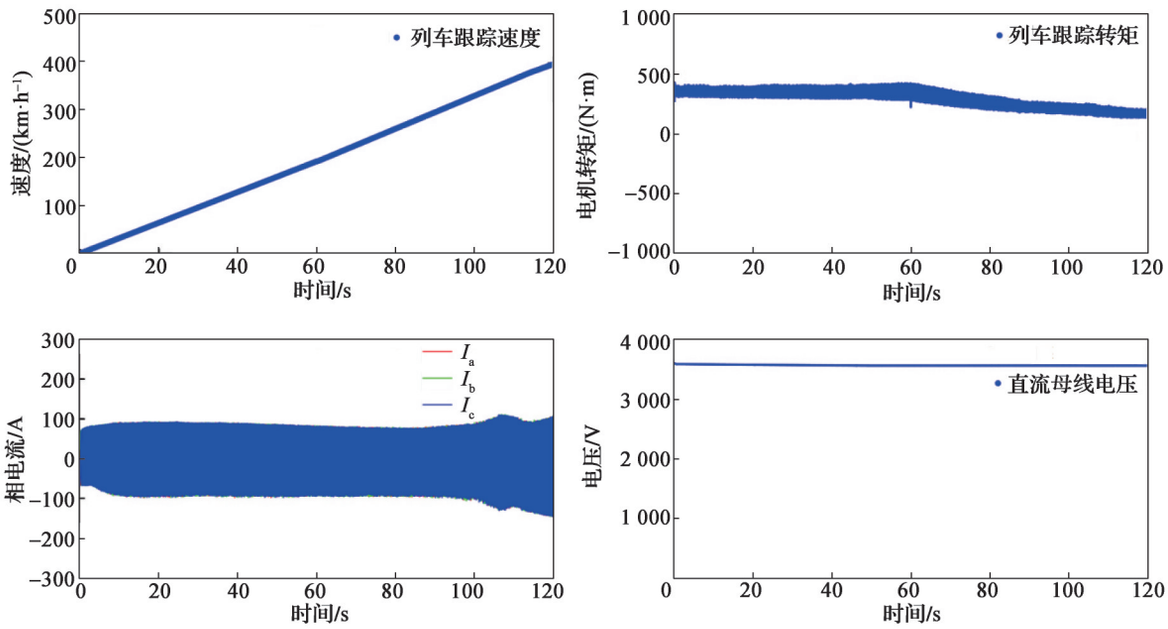
给定直流侧电压指令值为3 600 V，仿真时间为120 s，采用离散仿真环境，采样时间为10^{-6} s。为实现列车平稳启动与均匀加速，牵引系统通常采用恒定牵引力控制模式。受轮轨黏着特性约束，牵引力随车速提升小幅降低，列车趋近恒转矩运行状态。当运行速度高于200 km/h，电机转速超过基频，定子电压受限于额定值，系统进入恒功率控制阶段，牵引力随速度增加呈现逐步下降的趋势，实现动力系统能力的充分利用。

1.3.2　制动特性

动车组的制动特性包括制动力、制动距离、制动响应时间、制动效率、热衰减效应、制动平稳性和制动模式等。某动车组的制动特性计算结果如图5所示。



(a) 牵引特性1



(b) 牵引特性2

图4 牵引工况仿真结果

Fig. 4 Simulation results under traction conditions

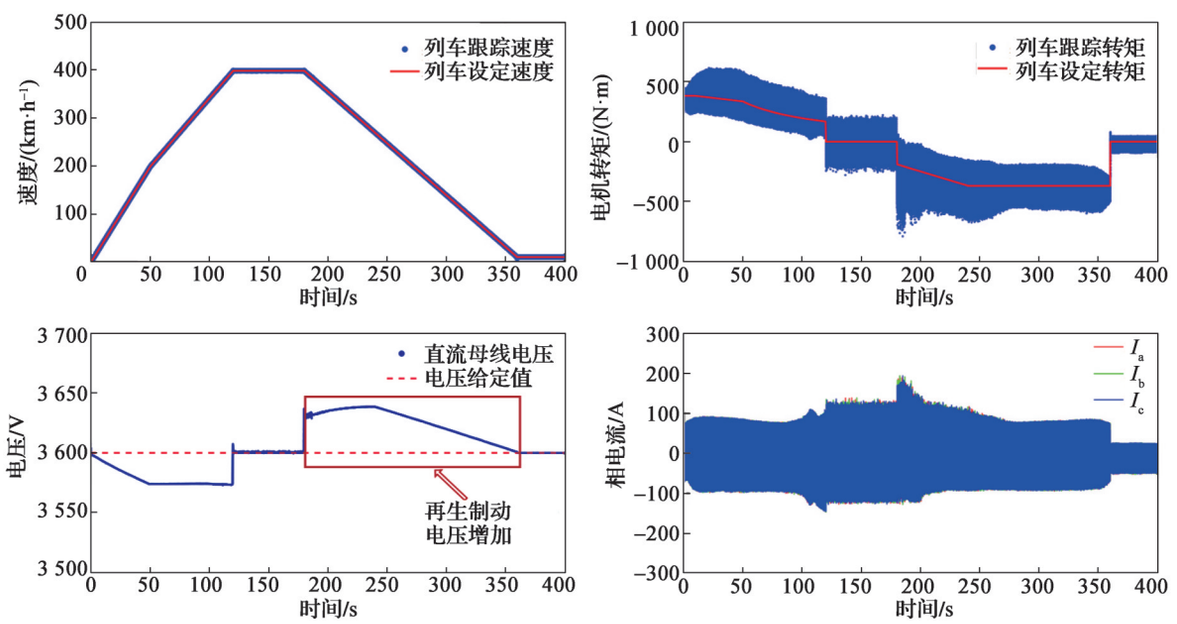


图5 制动特性仿真结果

Fig. 5 Simulation results of braking characteristics

对高速动车组的制动特性进行仿真的结果表明，电机控制模型动态响应与轨迹跟踪性能良好。在高速动车组牵引阶段，系统可稳定维持直流侧电压，各工作功率输出稳定。在高速动车组制动阶段，电压、电流随工况变化合理，特别是在工况切换时虽出现短暂振荡，但系统能够快速调整至设定值，验证了控制器的鲁棒性。仿真规律与理论分析一致，可为高速动车组牵引系统IGBT变流器电热特性仿真及优化设计提供可靠参考。

2 IGBT热网络模型与发热分析

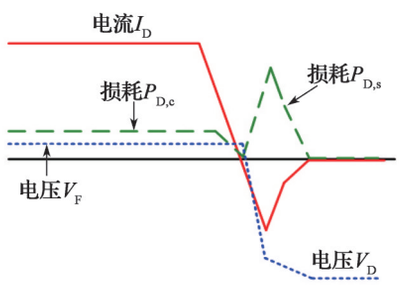
2.1 IGBT模块损耗与结温计算模型

IGBT结温难以直接测量，构建精准结温预测模型是评估器件热特性的有效方式。常用建模方式包含Foster热网络瞬态热模型、Cauer热网络层级热阻模型与有限元物理模型。研究团队基于某型号动车组的实际运行工况，进行牵引变流器的电热耦合仿真，并建

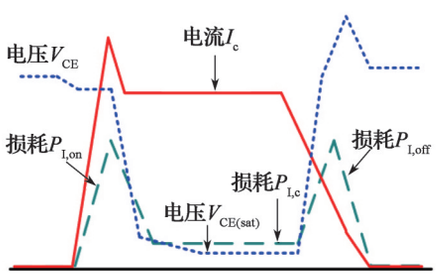
立基于Foster热网络瞬态热的计算模型，探究IGBT在运行过程中的结温变化，并分析其波动特性。

2.1.1　IGBT 模块损耗计算原理

IGBT及续流二极管(freewheeling diode, FWD)工作状态下的电压、电流和损耗变化波形如图6所示。图6(a)中，I_D为流过FWD的电流，$P_{D,c}$、$P_{D,s}$分别为FWD的反向恢复损耗和通态损耗，V_F、V_D分别为FWD的通态压降和截止压降。图6(b)中，I_c为流过IGBT的电流，$P_{I,on}$、$P_{I,off}$及$P_{I,c}$分别为IGBT的开通损耗、关断损耗及通态损耗，V_{CE}、$V_{CE(sat)}$分别为IGBT的截止压降和通态压降。



(a) FWD



(b) IGBT

图6　FWD及IGBT损耗构成[21]

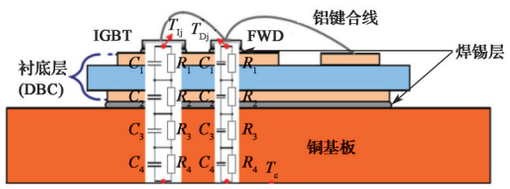
Fig. 6　Loss components of the FWD and IGBT[21]

2.1.2　IGBT模块结温计算模型

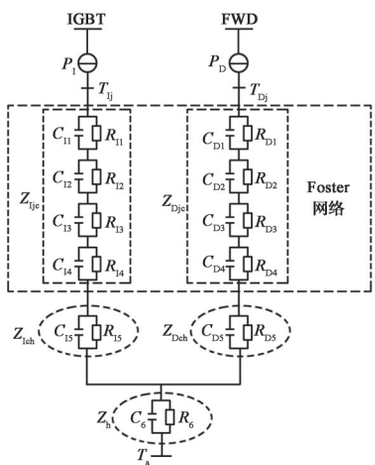
为描述IGBT及FWD芯片内部的瞬态传热过程，采用Foster热网络分别建立IGBT和FWD的结-壳热阻抗模型，如图7(a)所示。在此基础上，进一步考虑模块基板至散热器以及散热器至环境之间的传热过程，将IGBT和FWD的器件热网络与散热器热阻抗进行耦合，建立从芯片结温至环境温度的IGBT模块完整等效热网络模型，如图7(b)所示。其中，T_a为环境温度，Z_{Ijc}、Z_{Djc}分别为为IGBT、FWD的芯片至铜基板的热阻抗，Z_{Ich}、Z_{Dch}分别为IGBT、FWD的铜基板至散热器的热阻抗，Z_h为散热器的等效热阻抗。上述热阻抗分别由各自的等效热阻及热容构成，其具体参数可根据厂商提供的数据获取。

2.1.3　IGBT 模块结温仿真系统

利用基于开关周期损耗分析的IGBT模块结温计算方法，搭建出三相变流器IGBT模块的结温仿真系统，如图8所示。



(a) GBT模块热网络



(b) 等效热网络模型

图7　IGBT模块的Foster热网络[22]

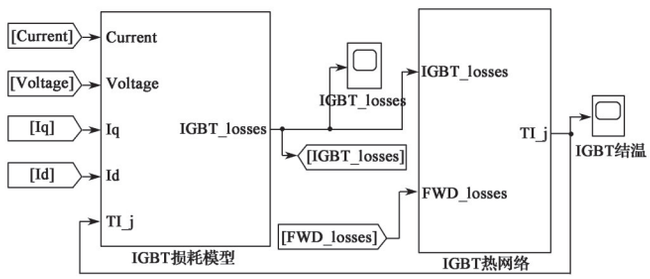
Fig. 7　Foster thermal network of the IGBT module[22]

2.2　IGBT发热分析

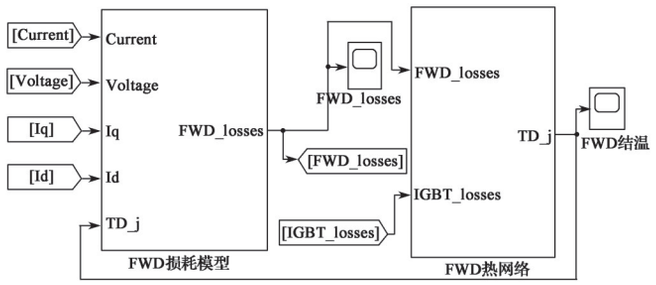
研究团队设定仿真时间为400 s，采用离散仿真模式，采样时间为10^{-5} s。0 ~ 120 s为牵引工况1启动阶段，120 ~ 180 s为列车惰行阶段，180 ~ 360 s为列车制动工况，360 ~ 400 s为列车停止工况。IGBT和FWD的结温均呈现出随时间变化的特征，如图9所示。

2.2.1　牵引工况

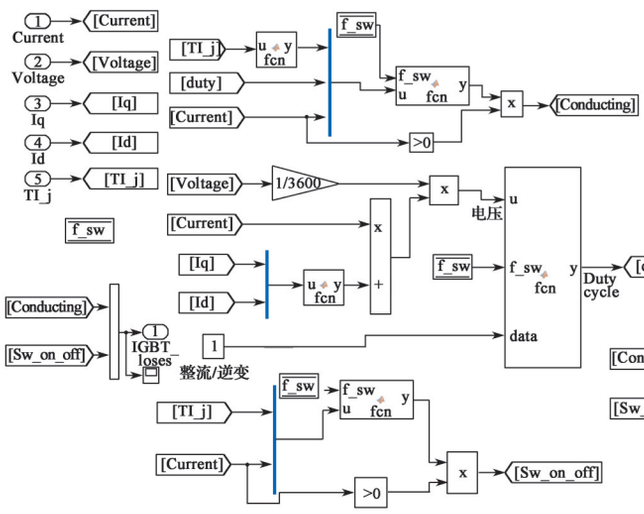
图10(a)为牵引工况下IGBT结温变化曲线。IGBT器件初始结温25 ℃，随着时间的推移，结温逐渐上升，并在120 s时稳定在55 ℃附近，伴随小幅温度波动。整体上，IGBT结温呈现出较为平滑的上升趋势，但在初始阶段（0 ~ 10 s）出现较大的温度波动，这是因为IGBT器件在启动瞬间承受较大电流冲击，IGBT的损耗显著，导致结温迅速升高。进入50 ~ 120 s的恒功率运行阶段后，IGBT的结温基本稳定，并呈现周期性波动，反映出系统在稳态运行时的热动态特性。图10(b)为FWD在相同牵引工况下的结温变化曲线。不同于IGBT结温的逐步上升，FWD结温在初始阶段迅速升高，并且FWD的结温变化幅度更大。随着时间的推移，最终温度稳定在100 ~ 110 ℃。这种现象与FWD在牵引工况下的工作模式密切相关：在启动阶段，FWD需要承受较大的反向恢复电流，导致瞬时功耗较高，因此其结温迅速升高；而在稳态运行阶段，FWD的通态损耗逐步降低，使得结温略有下降，并最终稳定在105 ℃左右。



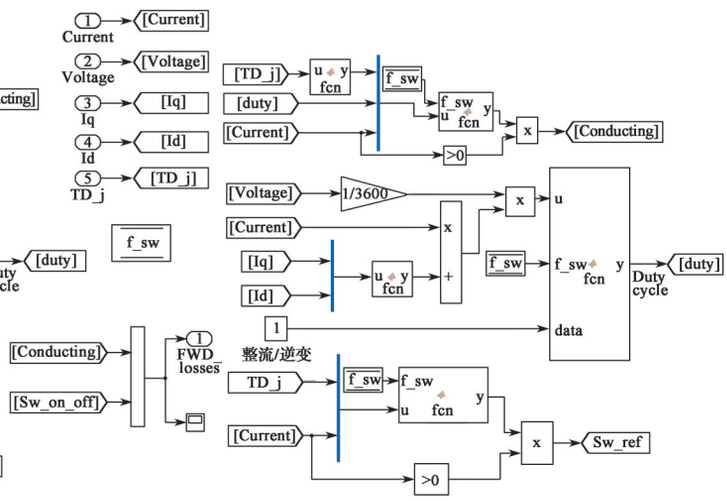
(a) IGBT损耗及结温计算模型



(b) FWD损耗及结温计算模型



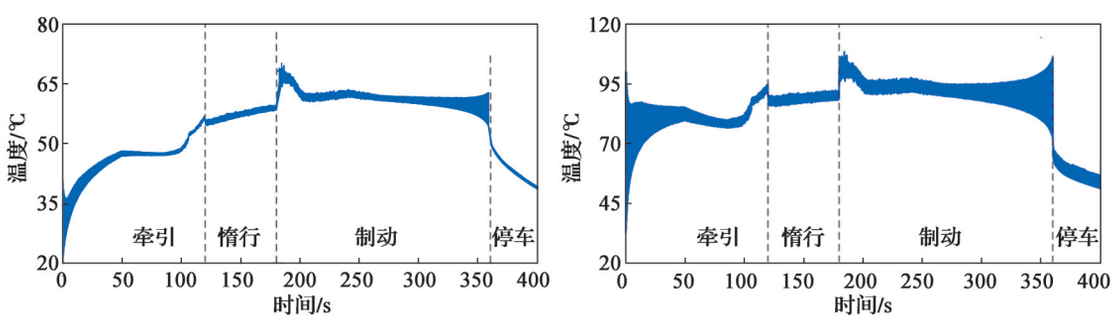
(c) IGBT损耗及结温计算子系统



(d) FWD损耗及结温计算子系统

图8 IGBT及二极管损耗结温计算仿真模型

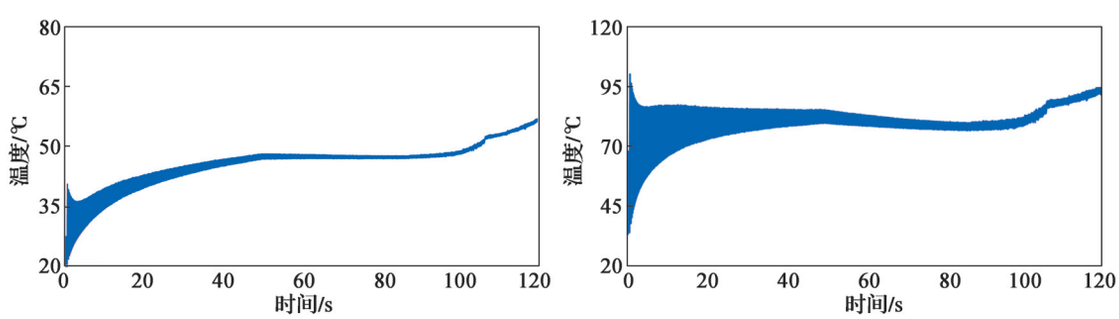
Fig. 8 Simulation model for loss and junction-temperature calculation of the IGBT and FWD



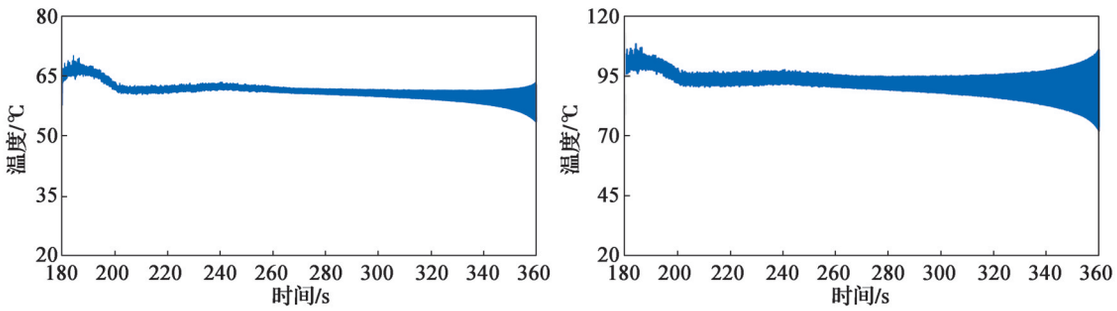
(a) IGBT结温 (b) FWD结温

图9 全工况IGBT与FWD结温

Fig. 9 IGBT and FWD junction temperatures under full operating conditions



(a) 牵引工况 IGBT结温 (b) 牵引工况FWD结温



(c) 制动工况IGBT结温　　(d) 制动工况FWD结温

图10　牵引和制动工况下IGBT与FWD结温

Fig. 10　IGBT and FWD junction temperatures under traction and braking conditions

2.2.2　制动工况

图10(c)为制动工况仿真期间，IGBT结温的动态变化特征曲线。在制动初始阶段（180～200 s）结温呈现快速上升趋势。这一现象主要源于制动过程中高频开关操作导致的显著开关损耗，包括开通损耗和关断损耗。随着制动过程持续，结温进入准稳态阶段，维持在60 ℃左右。值得注意的是，温度波动幅度可达15～20 ℃，峰值温度往往出现在电流突变时刻，这种瞬态热应力可能引发模块内部焊料层的热机械疲劳问题。图10(d)为制动工况下FWD的结温变化特征曲线。其温升变化过程相对平缓，但最终稳态温度在90～110 ℃。这种温度分布特征主要由FWD的工作机制决定：作为续流回路的核心器件，FWD在制动期间长期处于导通状态，其功率损耗主要来源于通态损耗。由于缺少开关损耗的贡献，FWD结温变化曲线表现出良好的平滑性。

3　结论

本文围绕高速列车永磁同步牵引系统，在复杂运行工况下对牵引变流器中IGBT模块的热特性进行了系统建模与仿真分析；通过构建牵引传动系统仿真模型，并结合Foster热网络方法，实现了对不同典型工况下IGBT及其FWD结温的动态仿真与变化规律分析，得出以下结论：

①在牵引工况下，IGBT模块结温由环境温度逐步升高至55 ℃左右，整体波动较小，FWD结温则可达90~110 ℃，表现出较为显著的温升特性。

②在制动工况下，由于高频开关损耗的影响，器件IGBT结温维持在60 ℃左右，结温波动幅度明显增加，热应力冲击更加突出，FWD结温亦在较大区间内波动。

③仿真分析揭示了高速列车牵引系统典型工况下IGBT及FWD模块温升的动态特性与热冲击机理，对关键功率器件的热管理与寿命评估具有理论参考价值。

本文研究结果可为高速列车牵引变流器服役安全评估、维护方案优化及系统可靠性提升提供理论依据。后续研究工作可结合实测运行数据修正模型开展试验验证，进一步优化PI控制器参数，以提升仿真预测的准确性和工程适用性。

参考文献：

[1] 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.
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.

[2] 黄柯勋, 吴松荣, 向碧楠, 等. 基于改进小波神经网络的IGBT时间序列预测算法研究[J]. 机车电传动, 2021(5): 161-166.
Huang Kexun, Wu Songrong, Xiang Binan, et al. Research on IGBT sequentially prediction algorithm based on improved wavelet neural network[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(5): 161-166.

[3] Wu D, Guo X, Ding Z, et al. 4H-SiC semi-superjunction IGBT with split-gate and back-side trench heterojunction for low loss and low EMI noise[J]. Microelectronics Journal, 2025, 159: 106671.

[4] Wei K X, Wang W B, Hu Z, et al. Condition monitoring of IGBT modules based on changes of thermal characteristics [J]. IEEE Access, 2019, 7: 47525-47534.

[5] 黄先进, 杜田倩, 王风川, 等. 基于列车运行图的CRH3牵引变流器IGBT模块寿命预测[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增刊1): 172-180.
Huang Xianjin, Du Tianqian, Wang Fengchuan, et al. Mission profiles-based lifetime prediction for IGBT modules applied to CRH3 traction converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 172-180.

[6] 王召杰. 我国高铁运营里程达到4. 5万公里[N]. 人民铁道, 2024-01-12(001).
Wang Zhaojie. The operating mileage of China's high-speed rail has reached 45, 000 kilometers[N]. People's Railway Daily, 2024-01-12(001).

[7] 胡雅丽, 何凯, 葛兴来. 热界面材料层空洞对有无基板IGBT模块芯片结温影响对比研究[J]. 机车电传动, 2023

(5): 113-118.
Hu Yali, He Kai, Ge Xinglai. Comparative study on effect of voids in thermal interface material layer on chip junction temperature of IGBT modules with and without baseplate [J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(5): 113-118.

[8] 叶峻涵, 杨平, 周荣斌, 等. 基于SVPWM调制方式的列车牵引逆变器功率器件寿命预测[J]. 机车电传动, 2021(5): 175-182.
Ye Junhan, Yang Ping, Zhou Rongbin, et al. Life prediction of power devices of train traction inverter based on SVPWM modulation[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(5): 175-182.

[9] 葛兴来, 张艺驰, 杨宁. 车载牵引变流器关键部件寿命评估综述[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 140-152.
Ge Xinglai, Zhang Yichi, Yang Ning. Overview of lifetime evaluation on key components in vehicular traction converter[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 140-152.

[10] 禹辉, 卢圣文, 陈彦, 等. 基于物理统计模型的车载IGBT振动疲劳寿命评估研究[J]. 控制与信息技术, 2023(3): 115-120.
Yu Hui, Lu Shengwen, Chen Yan, et al. Evaluation and research on vibration fatigue lifetime of on-board IGBT based on physical-statistical model[J]. Control and Information Technology, 2023(3): 115-120.

[11] 胡子浪. 高速列车牵引变流器IGBT可靠性评估[D]. 成都: 西南交通大学,2020.
Hu Zilang. Reliability evaluation of IGBT in high-speed train traction converter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[12] 张奕婕, 殷梓健. CRH3 型动车组牵引传动系统建模仿真研究[J]. 铁道机车与动车, 2024(8): 11-15.
Zhang Yijie, Yin Zijian. Research on modeling and simulation of traction transmission system for CRH3 EMUs[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2024(8): 11-15.

[13] 钟麦英, 王钦, 彭涛, 等. 高速列车牵引传动系统运行状态监测技术综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 88-97.
Zhong Maiying, Wang Qin, Peng Tao, et al. Review of running status monitoring techniques for traction drive systems of high-speed trains[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(2): 88-97.

[14] 王磊, 周明超, 郭梦雪, 等. 基于任务剖面的牵引变流器IGBT模块焊料层疲劳应力与剩余使用寿命的映射方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊1): 269-278.
Wang Lei, Zhou Mingchao, Guo Mengxue, et al. A mapping method of solder layer fatigue stress and remaining useful life for IGBT module in a traction converter based on the mission-profile[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 269-278.

[15] Eleffendi M A, Johnson C M. In-service diagnostics for wire-bond lift-off and solder fatigue of power semiconductor packages[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7187-7198.

[16] Voldoire A, Phulpin T, Alali M A E. Losses and efficiency evaluation of the shunt active filter for renewable energy generation[J]. Electronics, 2025, 14(10): 1972.

[17] 董超, 韦虎俊, 尹金良, 等. 基于EMR与VeE_peak组合电参数的IGBT模块封装老化监测[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 1-8.
Dong Chao, Wei Hujun, Yin Jinliang, et al. Packaging aging monitoring based on EMR and VeE_peak combined electrical parameters in IGBT module[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(11): 1-8.

[18] 鹿靖, 李游. 基于稳态集-射极饱和电压的IGBT功率模块疲劳失效模型的研究[J]. 应用科学学报, 2024, 42(6): 1078-1088.
Lu Jing, Li You. Research on fatigue failure model of IGBT power module based on steady-state collector-emitter saturation voltage[J]. Journal of Applied Sciences, 2024, 42(6): 1078-1088.

[19] 严庆, 杜明星, 胡经纬, 等. 基于改进双支耦合Cauer模型的逆变器中IGBT模块结温预测方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(10): 431-439.
Yan Qing, Du Mingxing, Hu Jingwei, et al. Junction temperature prediction of IGBT module in inverter based on improved two-branch coupling Cauer model[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(10): 431-439.

[20] 刘平, 李海鹏, 苗轶如, 等. 基于内置温度传感器的碳化硅功率模块结温在线提取方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2522-2534.
Liu Ping, Li Haipeng, Miao Yiru, et al. Online junction temperature extraction for SiC module based on built-in temperature sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2522-2534.

[21] 秦星. 风电变流器IGBT模块结温计算及功率循环能力评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Qin Xing. Calculation of junction temperature and assessment of power cycling capabilities of IGBT modules for wind power converter[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[22] 田晨曦. 基于工况仿真的动车组牵引变流器IGBT模块服役寿命研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
Tian Chenxi. Research on service life of IGBT modules in traction converter based on working condition simulation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

Simulation of permanent magnet synchronous traction systems and IGBT junction temperature analysis for high-speed trains

LI Hua[1], LI Zheng[2], ZENG Xianghao[1], HE Guanqiang[1]

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. Operation Branch, Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract: To address the issue that insulated gate bipolar transistors (IGBTs) in permanent magnet synchronous traction systems of high-speed trains are susceptible to thermal stress, accelerated aging and even failure under complex operating conditions, this study analyzes dynamic characteristics of the systems and IGBT junction temperature variations under different operating conditions. First, accounting for the structural and operational characteristics of the traction systems, a simulation model was constructed for the traction drive systems; it comprises a four-quadrant rectifier, an intermediate DC link, a traction inverter, and a permanent magnet synchronous motor. Space vector pulse width modulation (SVPWM) was adopted to simulate dynamic responses and electro-thermal behavior of the trains under typical operating conditions, such as traction and braking. Next, a junction temperature analysis model based on a Foster thermal network was established for IGBT modules. A switching cycle loss calculation method was introduced to enable real-time junction temperature simulations for IGBTs and their freewheeling diodes (FWD) and variation analysis under different operating conditions. Simulation results show that during traction, IGBT junction temperatures rise from the ambient temperature to 55 °C with minor fluctuations, while FWD junction temperatures can reach 110-120 °C. During braking, influenced by high-frequency switching losses, the peak IGBT junction temperature rises up to 60 °C with significantly increased fluctuations. The study reveals the mechanisms of temperature rise and thermal shock characteristics of IGBT and FWD modules under traction and braking conditions, providing theoretical support for service life prediction and maintenance strategy optimization of key components, and for reliability design of traction converters.

Keywords: high-speed train; permanent magnet synchronous motor; circuit simulation; IGBT junction temperature

收稿日期：2025-06-09；修回日期：2025-11-14
责任编辑：钟　锋