

基于任务剖面的牵引逆变器 IGBT 寿命预测*

林 帅, 方晓春, 林 飞, 杨中平
(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

学科分类与代码: 6203030(安全设备工程)

中图分类号: X924.2

文献标志码: A

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2019JBM061); 台达电力电子科教发展计划资助项目(DREG2019017)。

【摘 要】 为提高牵引变流器的可靠性, 进一步节省成本, 对牵引变流器的关键部件绝缘栅双极性晶体管(IGBT)进行基于任务剖面的寿命预测。首先, 构建城市轨道交通牵引传动系统电热模型, 分别采用基于电流开环和单电流闭环弱磁控制 2 种不同的异步电机全速域控制策略, 获取相应控制策略下绝缘栅双极性晶体管的结温; 然后, 采用雨流计数法提取绝缘栅双极性晶体管承受的热循环的结温信息(包括结温波动和结温最大值); 最后, 采用迈纳线性累积损伤理论计算每个热循环对绝缘栅双极性晶体管造成的损伤, 预测 2 种全速域控制策略下绝缘栅双极性晶体管的寿命。仿真结果表明: 基于单电流闭环弱磁控制的全速域控制策略, 能够有效提高绝缘栅双极性晶体管的寿命, 进而提高牵引变流器的可靠性。

【关键词】 绝缘栅双极性晶体管(IGBT) 模块; 寿命预测; 任务剖面; 牵引逆变器; 可靠性

Mission profiles-based lifetime prediction for IGBT modules in traction inverter application

LIN Shuai, FANG Xiaochun, LIN Fei, YANG Zhongping

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To improve reliability of traction converter and save cost, the mission profiles-based lifetime prediction was performed on the IGBT modules, the key component in traction system. Firstly, the electro-thermal model was built and the junction temperature of IGBT was obtained under two different full-speed range control schemes of induction motor (IM), which based on current open loop and single current close loop flux weakening control respectively. Then, the rain-flow counting method was adopted to extract the junction temperature information (including the fluctuation and maximum of junction temperature) of thermal cycles that IGBT suffered from. Finally, the Miner linear accumulation damage theory was employed to calculate the damage of IGBT caused by each thermal cycle, and the lifetimes of IGBT were predicted under two different control schemes. The simulation results show that the full-speed range control scheme based on single current close loop flux weakening control can effectively improve the lifetime of IGBT and thus improve the reliability of traction system.

Keywords: insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules; lifetime prediction; mission profiles; traction inverters; reliability

* 文章编号: 1003-3033(2019)S1-0052-06; DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.S1.011
收稿日期: 2019-03-28; 修稿日期: 2019-05-13

0 引言

在经济社会发展的强力推动下,我国轨道交通正处于快速发展的阶段^[1-2]。随着轨道交通运营里程不断增加,车辆部件发生故障的概率不断增大。牵引变流器作为轨道交通车辆的关键子系统,为轨道交通车辆提供动力,其可靠性会直接影响整个轨道交通车辆的稳定运行^[3]。因此,必须保证牵引变流器能在无故障的状态下长时间运行。在牵引变流器中,绝缘栅双极性晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)是最易受损的器件之一。因此,进行牵引变流器 IGBT 模块的可靠性研究是非常重要的。

可靠性是指功率器件在其生命周期中的指定时间内无故障工作的能力。传统的可靠性预测方法^[4]是利用可靠性手册来评估功率器件的可靠性。预测时均假设器件的故障率是恒定的。但功率器件的故障率是受实际运行条件影响的。因此,采用基于经验的可靠性手册进行预测是不合理的。近年来,功率器件的失效物理学研究取得了显著的进展,为功率器件的寿命预测提供了理论依据。文献^[5-7]采用了将基于任务剖面的功率器件寿命预测方法应用于风电逆变器中。在该方法中,变换器的可靠性预测与其应用密切相关,从而可以在变换器投入使用前,根据实际的运行工况条件,准确地验证、评估、改进变换器的设计和运行,从而达到相应可靠性要求,降低成本。

鉴于此,笔者拟采用基于任务剖面的方法进行牵引逆变器 IGBT 模块寿命预测。将牵引转矩和电机转速信号输入到牵引传动系统,从而产生相应的电信号,如电压和电流。这些信息用于 IGBT 和二极管的损耗计算。通过热模型将损耗转换为温度信号,通过雨流计数法和寿命模型预测 IGBT 模块的寿命,从而预先提供故障警告,最小化计划外维护,延长维护周期,保持系统可用性,以期降低生命周期成本。

1 城市轨道交通牵引传动系统建模

城市轨道交通牵引传动系统由中间直流环节、牵引逆变器和牵引异步电机(Induction Motor, IM)组成,其基本结构如图 1 所示。电机控制采用架控方式,即一台逆变器控制 2 台电机。牵引传动系统直流母线电压如图 2 所示。逆变器的输入是在一定范围内波动的直流电压。因此,在仿真中,采用实际的

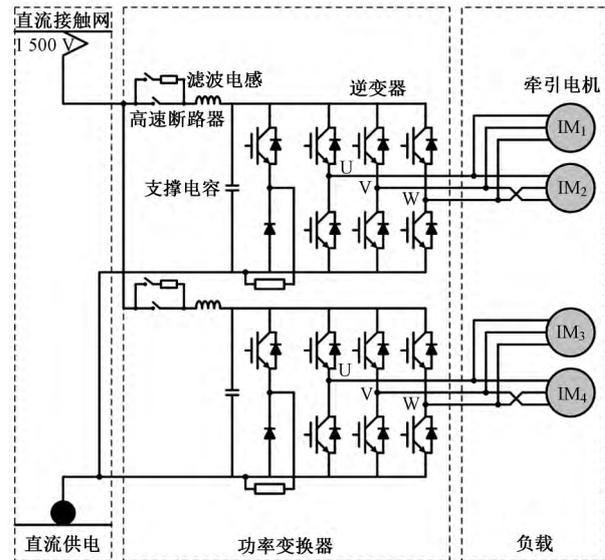


图 1 城市轨道交通车辆牵引传动系统基本结构

Fig.1 Basic structure of traction drive system in urban rail trains

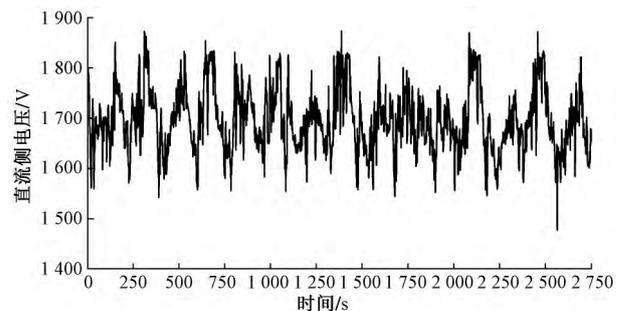


图 2 牵引传动系统直流侧电压

Fig.2 DC voltage of traction drive system

直流电压值作为牵引逆变器的输入。

1.1 牵引控制系统

城市轨道交通车辆普遍采用异步电机。牵引用异步电机的控制方式主要有 2 种,分别为矢量控制和直接转矩控制。仿真中采用矢量控制进行电机控制,通过磁场定向实现转矩和磁链的解耦控制。

在大功率牵引传动系统中,牵引电机主要包括 2 个运行区域。当异步电机运行于恒转矩区时,电机电压没有达到逆变器最大输出电压限制。此时采用双电流调节器控制。当牵引电机运行在方波工况时,采用弱磁控制。在方波工况下,电机电压幅值不变,只有电压相位一个自由度可调,传统矢量控制失效。目前,轨道交通车辆普遍采用的是电流开环控制,即在方波工况下切除双电流控制器^[8]。

但是,电流开环控制在一定程度上降低了电流的跟踪能力。文献^[9]提出了一种适用于方波工况

的单电流闭环控制策略,从而实现对电机电流的快速准确控制。

本文将基于上述2种方法进行牵引逆变器IGBT模块的寿命预测,并比较不同弱磁方法对IGBT寿命的影响。

1.2 城市轨道交通牵引传动系统电热建模

根据牵引传动系统的任务剖面条件,首先计算获得IGBT的功率损耗。然后通过构建牵引逆变器的热网络模型,从而计算获得IGBT的结温变化曲线。牵引传动系统采用的是某公司3300V/800A的IGBT模块。

功率损耗的计算是基于查表法实现的。IGBT的损耗主要分为2部分:通态损耗和开关损耗。从制造厂商给出的数据手册,可以根据开关次数计算开关损耗,根据瞬时电压和电流值乘积的积分计算导通损耗,如图3所示。其中 V_{CE} 为IGBT集电极-发射极电压, V_{GE} 为门极-发射极电压, R_C 为门极电阻, t_j 为结温, L_σ 为杂散电感。

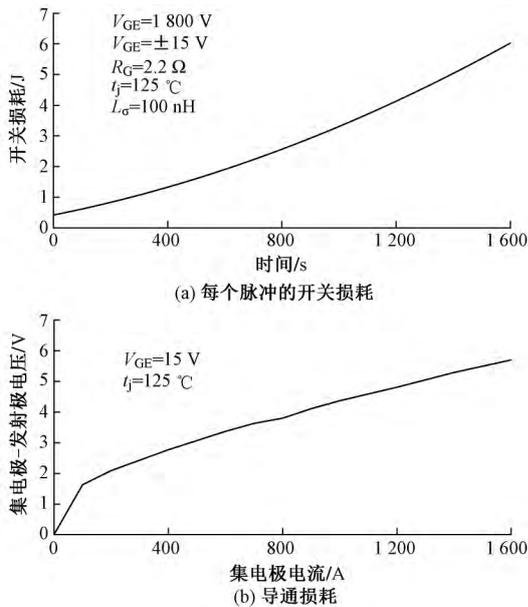


图3 IGBT模块的功率损耗
Fig.3 Powerlosses of IGBT modules

计算获得的牵引逆变器的功率损耗用于计算IGBT的结温 t_j 。通过构建热网络模型,从而根据损耗求得各部分的温度。映射热阻抗时,主要有2种等效热路如图4所示。一种是图4a所示的梯形结构的物理等效热路模型,即考尔(Cauer)模型,另一种是图4b所示链式结构的数值等效热路模型,即福斯特(Foster)模型。

Cauer网络模型基于热传导的物理过程,但是

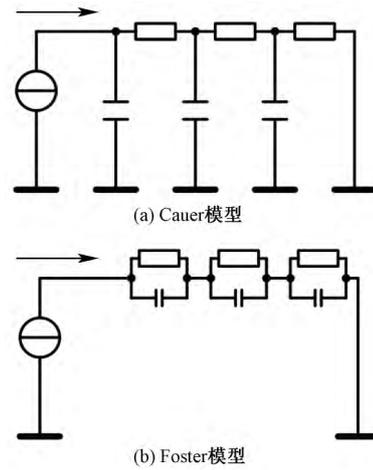


图4 等效热网络模型
Fig.4 Thermal equivalent network models

其数据测量困难,且需要功率器件的结构参数。Foster模型的电阻和电容不代表任何物理部件。但是Foster模型的参数在器件的数据手册中提供,分别见式(1)和表1。其中 Z_{j-c} 为IGBT的结到壳的热阻抗; R_i 为等效电路模型中的热阻参数; τ 为时间常数。

$$Z_{j-c}(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - \exp(-t/\tau_i)) \quad (1)$$

表1 热阻参数

Tab.1 Parameter of thermal impedance

参数	IGBT	二极管
$R_1 / (K \cdot W^{-1})$	0.008 78	0.017 1
τ_1 / s	0.207 4	0.203 6
$R_2 / (K \cdot W^{-1})$	0.002 06	0.004 28
τ_2 / s	0.030 1	0.030 1
$R_3 / (K \cdot W^{-1})$	0.000 961	0.001 92
τ_3 / s	0.007 55	0.007 53
$R_4 / (K \cdot W^{-1})$	0.000 948	0.001 92
τ_4 / s	0.001 57	0.001 57

计算获得功率损耗 P 之后,通过热阻 Z_{th} 计算温度。温度的计算是从外部的环境温度到内部IGBT的结温开始的,见式(2)。 t_a 为环境温度, Z_{c-h} 为IGBT的壳到散热器的热阻抗, Z_{h-a} 为散热器到环境的热阻抗。

$$t_j = t_a + P \cdot (Z_{j-c} + Z_{c-h} + Z_{h-a}) \quad (2)$$

对于IGBT,其使用寿命与温度密切相关。随着温度的升高,功率半导体器件的安全裕度或者可靠性会降低。因此,构建牵引传动系统的电热模型,根据任务剖面条件获得IGBT模块的温度循环曲线是进行寿命预测的基础。

2 牵引传动系统 IGBT 模块寿命预测

研究表明: 对于 IGBT 模块, 结温是导致失效的主要因素。大多数的寿命模型均是基于结温。目前主要有 2 种寿命模型, 一种是解析模型, 一种是物理模型。虽然物理模型可以反映失效机制, 但是很难获取参数。解析模型是通过数据拟合获得的, 便于实际应用。

目前大多数的解析模型均是将平均结温 t_{jmean} 和结温波动 Δt_j 作为影响寿命的主要因素。文献 [10] 提供了 IGBT 的键合线的 B_{10} 寿命(是指 10% 的 IGBT 模块失效时的循环周期数) 曲线。同时 B_{10} 寿命是 t_{jmax} 和 Δt_j 的函数。

由于寿命模型是 t_{jmax} 和 Δt_j 的函数, 因此进行 IGBT 模块的寿命预测必须获得精确的结温循环曲线。

文献 [10] 提供的寿命模型均是基于恒定结温波动 Δt_j 的功率循环测试获得的, 而牵引传动系统中 IGBT 的结温随着电机输出转矩的变化而变化, 导致结温波动 Δt_j 不是恒定的。因此, 需要使用循环计数方法从结温数据中计算每个热循环的结温最大值 t_{jmax} 和结温波动 Δt_j , 然后计算每个热循环 IGBT 的损伤程度。

在文献 [11] 中, 比较了常用的循环计数法: 半周计数法、最大沿计数法、上升沿计数法和雨流计数法。基于有限元分析的结果, 雨流计数法的结果更准确。因此, 选择雨流法进行循环计数。

雨流计数法可以从负载数据中提取循环, 其基本原理如图 5 所示。

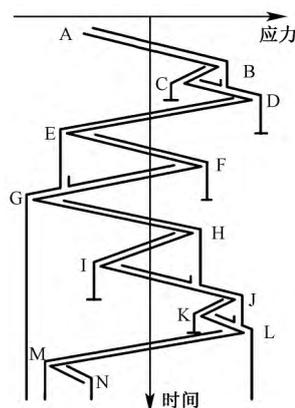


图 5 雨流计数法

Fig.5 Rain-flow counting algorithm

随着牵引逆变器输出功率的变化, IGBT 上的电热应力也会发生变化。IGBT 受到结温波动的影响,

从而导致持续的器件损伤。最终, 由于损伤的累积导致器件的失效。为了评估器件的累积损伤, 迈纳 (Miner) 线性累积损伤理论被提出 [12]。Miner 理论广泛应用于 IGBT 模块的寿命预测。Miner 线性累积损伤理论的寿命估算公式如下:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

式中: n_i 是该应力条件下承受的循环次数, N_i 是该应力条件下的失效循环次数。当 $D=1$ 时, 功率器件就会失效。而雨流计数法被用来计算循环次数。

3 寿命预测仿真结果

某地铁线路共有 13 站。考虑到复杂度, 仿真是基于地铁车辆单程的数据进行的。在仿真中, 牵引转矩指令, 电机转速和直流电压作为输入量。牵引转矩指令和电机转速的波形如图 6 所示, 直流电压的波形如图 2 所示。

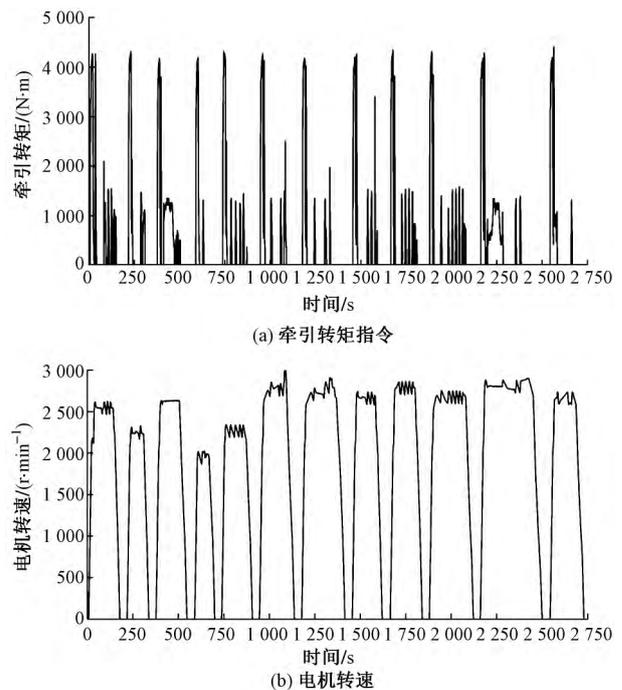


图 6 输入数据波形

Fig.6 The waveform of input data

基于 Matlab/Simulink 和 PLECS 联合仿真, 分别采用基于电流开环弱磁控制和基于单电流闭环弱磁控制的电机全速域控制策略, 从而得到 IGBT 模块的结温。在相同控制策略下, 不同 IGBT 模块的结温基本一致, 因此选择 IGBT1 的结温数据进行寿命预测。2 种控制策略下 IGBT1 的结温波形如图 7 所示。控制策略 1 为基于电流开环弱磁控制的电机全速域控制策略, 控制策略 2 为基于单电流闭环弱磁

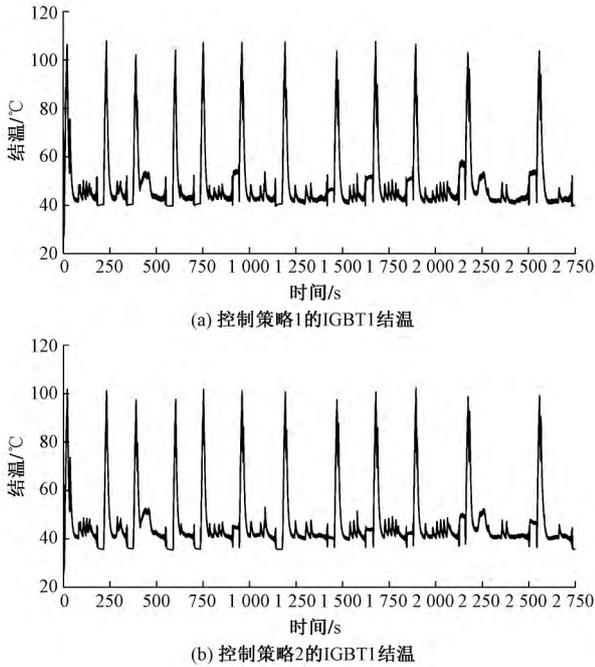


图7 IGBT1 模块结温仿真结果

Fig.7 Junction temperature of IGBT1 modules

控制的电机全速域控制策略。

对比 2 种控制策略 IGBT 模块的结温可以发现 采用基于单电流闭环弱磁控制的电机全速域控制策略下 IGBT 模块的结温最大值略低于采用基于电流开环弱磁控制的电机全速域控制策略。

从图 6 和图 7 可以看出,在加速过程中,IGBT 模块的结温快速上升,达到 100 °C 左右。在稳定运行过程中,IGBT 模块的结温下降到 40 °C 左右,并且在制动过程中,IGBT 模块的结温维持在 40 °C 左右。

对于 IGBT 结温的波动,低频分量主要与运行工况有关,中频分量主要与逆变器输入和输出功率功率的波动有关,高频分量主要与逆变器输出频率有关。因此,采用雨流计数法来计算仿真中的循环数。2 种控制策略下的计数结果如图 8 所示。

若采用基于电流开环弱磁控制的电机全速域控制策略,则根据 Miner 理论可得累积损耗为:

$$D = \sum_{i=1}^{288\ 594} \frac{n_i}{N_i} = 8.370\ 3 \times 10^{-6} \quad (5)$$

在 D 中,总计 288 594 种不同的负载循环。其中 t_{jmax} 在 100~110 °C, Δt_j 在 60 °C 以上的一共包括 11 个循环和 2 个半循环,这些循环与 13 个车站的运行工况相匹配,并且这些循环对 IGBT 造成了 $8.370\ 2 \times 10^{-6}$ 的损伤。因此,在牵引逆变器 IGBT 中,与运行工况有关的低频结温分量是造成 IGBT 损伤主要的负载循环。

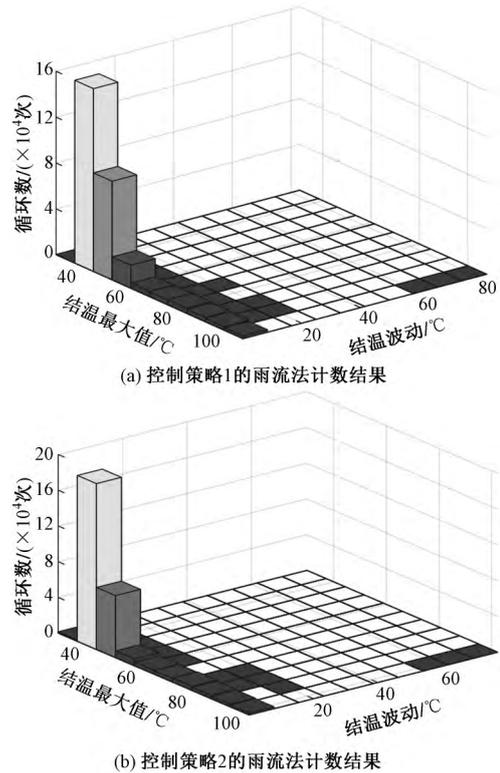


图8 雨流计数法结果

Fig.8 Results of rain-flow cycle counting

若车辆每天运行 20 次单程,则 IGBT 的寿命是 5 973 天,约 16.3 年。

若采用基于单电流闭环弱磁控制的电机全速域控制策略,则根据 Miner 理论可得:

$$D = \sum_{i=1}^{285\ 909} \frac{n_i}{N_i} = 6.271\ 6 \times 10^{-6} \quad (6)$$

在 D 中,总计 285 909 种不同的负载循环。其中 t_{jmax} 在 100 °C 附近, Δt_j 在 60 °C 以上的一共包括 11 个循环和 2 个半循环,这些循环与 13 个车站的运行工况相匹配,并且这些循环对 IGBT 造成了 $6.271\ 6 \times 10^{-6}$ 的损伤。

若车辆每天运行 20 次单程,则 IGBT 的寿命是 7 972 天,约 21.8 年。

与基于电流开环弱磁控制的电机全速域控制策略,采用基于单电流闭环弱磁控制的电机全速域控制策略,IGBT 的寿命能够延长 33.5%,有利于提高牵引逆变器的可靠性。

4 结 论

1) 采用任务剖面的方法进行功率变流器 IGBT 寿命预测,并将其应用于城市轨道交通牵引逆变器。该方法能够将 IGBT 的可靠性与实际运行工况相结合,能够为变换器的设计和优化提供基础。

2) 比较了采用基于电流开环弱磁控制的电机全速域弱磁控制策略和基于单电流闭环弱磁控制的电机全速域弱磁控制策略时牵引逆变器 IGBT 的寿命。第 2 种控制策略能够大幅度延长 IGBT 的使用寿命, 提高牵引逆变器的可靠性。因此, 牵引逆变器的控制方式能够很大程度地影响变流器的可靠性,

进行变流器控制策略的优化能够提高变流器的使用寿命, 保持系统可用性, 降低生命周期成本。

5 致谢

衷心感谢日本富士电机株式会社所提供的资料信息以及资助。

参考文献

- [1] 李冰玉, 秦孝敏. 城市轨道交通网络大客流拥堵传播机理研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 162-168.
LI Bingyu, QIN Xiaomin. Study on propagation mechanism of mass passenger flow congestion in urban rail transit network[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 162-168.
- [2] 熊智, 钟少波, 宋敦江, 等. 城市轨道交通客流量时间序列分段拟合方法[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 39-45.
XIONG Zhi, ZHONG Shaobo, SONG Dunjiang, et al. A method of fitting urban rail transit passenger flow time series[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 29-45.
- [3] 曹茜, 赵峰, 王开铭. CRH3 型动车组牵引传动系统可靠性分析[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(5): 41-46.
CAO Qian, ZHAO Feng, WANG Kaiming. Reliability evaluation of traction drive system for CRH3 electrical multiple units[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(5): 41-46.
- [4] PECHT M, GU Jie. Physics-of-failure-based prognostics for electronic products[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2009, 31(3/4): 309-322.
- [5] MA Ke, WANG Huai, BLAABJERG F. New approaches to reliability assessment: using physics-of-failure for prediction and design in power electronics systems[J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2016, 3(4): 28-41.
- [6] MA Ke, LISERRE M, BLAABJERG F, et al. Thermal loading and lifetime estimation for power device considering mission profiles in wind power converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(2): 590-602.
- [7] DE León-aldaco S E, CALLEJA H, CHAN F, et al. Effect of the mission profile on the reliability of a power converter aimed at photovoltaic applications: a case study[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 28(6): 2998-3007.
- [8] 汪志. 基于 CRH5 型动车组国产化 TCU 的牵引电机高速区运行控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
WANG Zhi. Research on high speed control schemes for traction motors based on domestic TCU of CRH5 high speed trains[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [9] 李华, 方晓春, 林飞, 等. 异步牵引电机方波单电流闭环控制策略及其参数鲁棒性分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2034-2043.
LI Hua, FANG Xiaochun, LIN Fei, et al. Single current loop control strategy of induction traction motor in square wave mode and its parameter robustness analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 2034-2043.
- [10] Berner J. Load-cycle capability of HiPak IGBT modules [EB/OL]. (2013-08-22). http://library.e.abb.com/public/1f4fb71e0af3356883257c8d00443ca1/Load-cycling%20capability%20of%20HiPak_5SYA%202043-04.pdf.
- [11] MAINKA K, THOBEN M, SCHILLING O. Lifetime calculation for power modules, application and theory of models and counting methods[C]. Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2011: 1-8.
- [12] WILKINS E W C. Cumulative damage in fatigue[C]. Colloquium on Fatigue/Colloque de Fatigue/Kolloquium über Ermüdungsfestigkeit, 1956: 321-332.



作者简介: 林帅 (1994—), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要研究方向为牵引传动系统的可靠性技术。E-mail: 18117013@bjtu.edu.cn。