

隧道效应对机车整流模块寿命的影响

刘 栋^{1,2}, 彭军华^{1,2}, 窦金龙^{1,2}, 朱 斌^{1,2}

(1. 新型功率半导体器件国家重点实验室, 湖南 株洲 412001; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 针对连续长隧道内机车整流模块因承受过大热应力, 发生热疲劳失效的问题, 以 HXN5 型内燃机车主变流器为例, 基于试验测试数据以及 Coffin Manson 方程, 研究了隧道效应对机车整流模块使用寿命的影响。Coffin Manson 方程反映了环境温差、循环频率、最高温度等因素对电力电子器件寿命的影响, 计算结果与实际情况接近, 可以作为电力电子器件热疲劳寿命预测、整流模块设计与维保的参考依据。

关键词: 隧道效应; 内燃机车; 整流模块; Coffin Manson 方程; 产品寿命

中图分类号: U264.3⁺7

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)01-0055-04

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.01.011

Influence of Tunnel Effect on Service-life of Locomotive Rectifier Module

LIU Dong^{1,2}, PENG Junhua^{1,2}, DOU Jinlong^{1,2}, ZHU Bin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Power Semiconductor Devices, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Aiming at the problem of thermal fatigue failure of power electronic devices in locomotive rectifier module due to excessive temperature stress from the continuous operation in long tunnel, it analyzed the influence of tunnel effect on the service life of locomotive rectifier module, taking the main converter of the HXN5 diesel locomotive as an example, and based on the test data as well as the Coffin-Mason equation. Coffin-Mason equation reflects the influence of temperature difference, cycle frequency and maximum temperature on the service life of power electronic device. The calculation result is closed to the actual condition, which can be used as references for thermal fatigue life prediction, rectifier module design and maintenance of power electronic device.

Keywords: tunnel effect; diesel locomotive; rectifier module; Coffin Manson equation; product life

0 引言

通过隧道时, 机车所消耗的能量转换为热传递到隧道空气中, 使隧道内热湿环境恶化^[1], 进而使机车整流模块温度迅速上升; 而出隧道后机车模块温度又迅速下降, 这种现象即为隧道效应。隧道效应会缩短机车中器件模块的使用寿命。因此, 准确地预测器件的热疲劳寿命, 在器件失效前及时进行替换^[2], 这对于降低机车故障率、避免由于器件失效造成更大的损失、保证行车安全具有实际指导意义。

加速寿命试验自美罗姆航展中心 1967 年首次提出

以来, 目前已广泛应用于军事、航空航天、材料生产等领域^[3], 但国内针对隧道效应对机车电力电子器件寿命影响的研究很少, 更缺乏实际数据的有效支撑。

本文以 HXN5 型内燃机车在库尔勒地区运行情况为例, 实际检测了机车通过隧道时模块的运行温度、风速等数据, 并开展器件温度循环试验, 计算和分析了隧道效应对机车整流模块使用寿命的影响。

1 HXN5 机车整流模块及其失效情况分析

1.1 HXN5 型机车整流模块

HXN5 型交流传动内燃机车(以下简称 HXN5)额定功率为 4 660 kW^[4], 在库尔勒地区采用主-副双车重联模式。图 1 为 HXN5 整流器电路图, 它由 3 个模

收稿日期: 2016-11-01

作者简介: 刘栋(1985-), 男, 工程师, 主要从事大功率半导体器件应用及测试技术研究。

块组成，为三相整流电路^[5]。每个模块采用2只DGP1型（3 900 A/3 200 V）整流二极管压装而成，采用风冷方式散热。

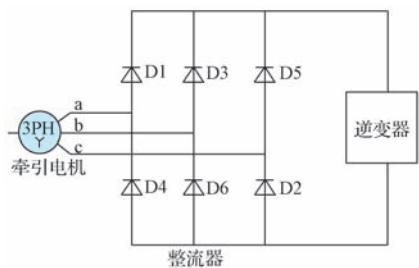


图1 HXN5型内燃机车整流器电路图
Fig. 1 Rectifier circuit of the HXN5 diesel locomotive

1.2 行车环境

在库尔勒地区，HXN5主要执行库尔勒—鱼儿沟铁路线的货运任务，该线路具有连续长隧道、大坡度、温差大等特征，沿线共29个隧道，其中最长隧道长度为6 168 m，最大坡度22.4‰，平均坡度接近20‰，最高海拔2 951 m。这种线路工况相当于温度循环试验条件，长期运行将缩短机车整流模块的使用寿命。

此外，库尔勒地区属于温带大陆性气候，季节交替温差很大，这种大温差加剧了隧道效应对整流模块工作的影响。该地区7、8月份最高温度超过40℃，而10、11月份最低温度达到-16.6℃，月极端温差达到36.7℃，模块失效也主要发生在这个时节。

1.3 整流模块失效现象

HXN5在北京、沈阳、哈尔滨、乌鲁木齐（库尔勒机务段）等铁路局均有配属，整流模块失效主要发生在运行时间为2年半左右的机车中，发生季节则集中为夏季。表1示出2013年整流模块失效情况。

表1 HXN5整流模块失效情况（2013年）
Tab. 1 Failure condition of HXN5 rectifier module (2013)

铁路局	机车数量	整流模块	故障次数	失效模块	模块失效率
哈尔滨局	105	315	2	2	0.63%
沈阳局	120	360	2	2	0.56%
北京局	65	195	1	1	0.51%
乌鲁木齐局	85	255	5	7	2.75%

从表1可以看出，库尔勒机务段机车整流模块失效率明显高于在其他几个铁路局的。失效多发生于副车（二机位），时间多半为夏秋季节交替时节。这是因为主车先经过隧道，释放大量热量到隧道空气中；副车经过时吸收隧道中的热量，加上自身运行产生的热量，二者叠加，使副车模块温度迅速升高，这种热应力导致其失效率偏高；而夏季温度高，秋季温度骤降，这种温度急剧变化也加大了隧道效应的影响。

为温度循环试验后元件芯片解剖图。



(a) 失效模块芯片 (b) 温度循环试验芯片
图2 元件芯片解剖分析图
Fig. 2 Anatomical analysis diagram of device chip

从图2可以看出，失效模块芯片解剖图与温度循环试验的芯片解剖图非常相似，芯片和管壳表面有很多细小纹路，呈放射状。这是由于长期的高低温循环应力所造成的，这种应力使得芯片与管壳铜盖之间发生了严重的电迁移现象，我们将这种失效模式称之为芯片表面电迁移。表面的电迁移加速了芯片的老化，使其性能下降，导致器件失效，甚至可能产生短路大电流将芯片烧毁（图2(a)），缩短了整流模块的使用寿命。

2 整流模块实时监测

为了找到模块失效的原因，我们设计了HXN5行车过程中的模块检测方案，对元件表面温度、风速进行实时检测，检测信号传输至记录仪，由计算机输出相关数据与曲线，检测点设置如图3所示。

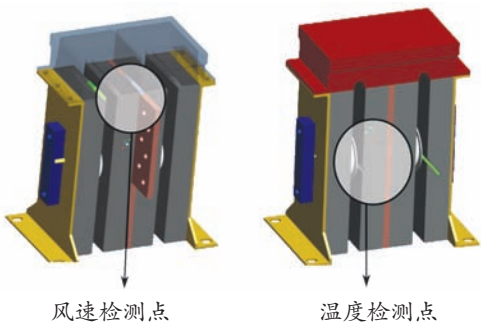
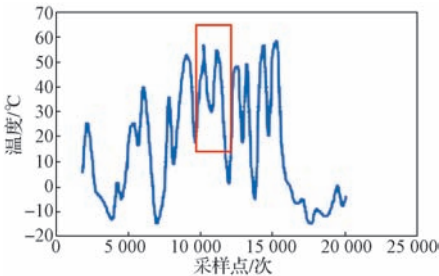


图3 模块检测点
Fig. 3 Testing point of the module

实测温度记录了近20 000个连续数据点，将这些数据拟合成温度曲线，如图4所示。通过比较出入隧道时刻机车模块的温度，发现其在进出隧道过程中发生了连续、急剧、大幅的变化，在环境温度为-25℃情况下，元件的表面最高温度接近60℃。



(a) A相

图2(a)为整流模块中失效元件芯片解剖图，图2(b)

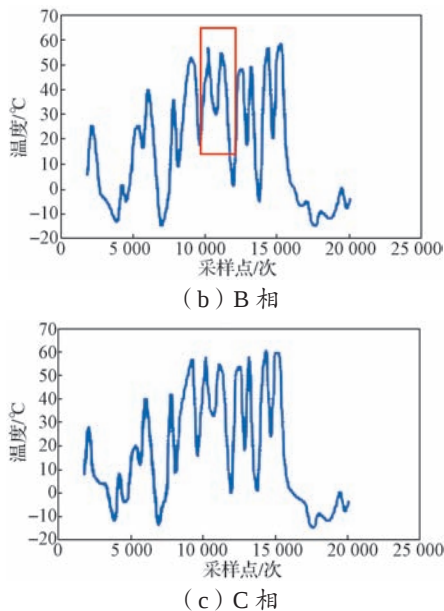


图 4 三相模块表面温度实测值

Fig. 4 Measured values of surface temperature of the three-phase module

记录仪同时记录了温度和风速曲线，取对应 B 相（图 4（b）方框中）两个连续隧道区间进行分析，如图 5 所示。

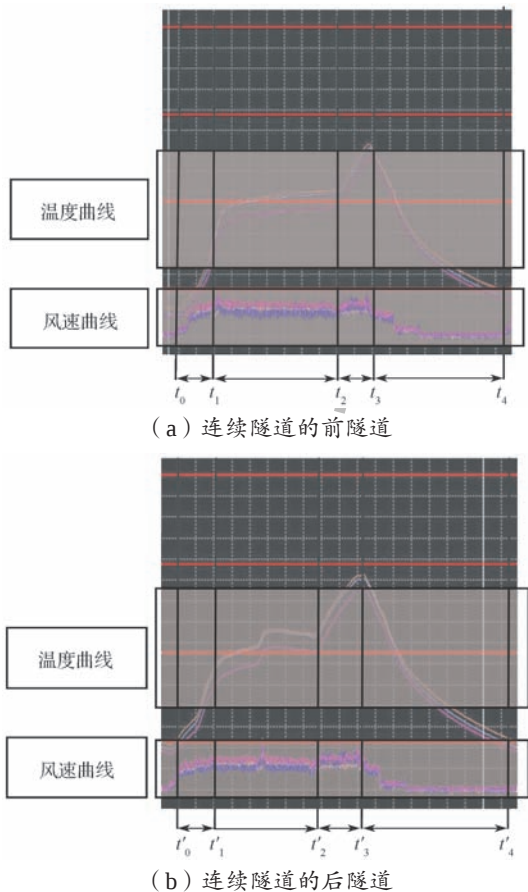


图 5 两个连续隧道模块温度和风速检测曲线

Fig. 5 Module temperature and the wind speed curves in two consecutive tunnels

机车通过隧道时，整流模块元件表面温度变化分为几个时间段：在 $t_0 \sim t_1$ 区间，温度迅速上升； $t_1 \sim t_2$ 区间，

温度到达平台期； t_2 时刻开始，温度开始急剧上升，这是机车长时间在隧道中运行，热量大量累积叠加所致； t_3 时刻机车开始驶出隧道，温度迅速下降，风速减慢。

在 $t_1 \sim t_3$ 区间，即平台期到急剧上升期，此时风速平稳，散热器等其他条件也无变化，但隧道中的热量却迅速积累，副车（2 机位）模块吸收的热量更多。热量增加，温度升高，但是散热状况却没有改善，这对模块是一种严苛考核。

在 $t_3 \sim t_4$ 区间，机车驶出隧道，温度骤降；之后再进入隧道，不断重复这个循环过程。这种急剧的温度变化造成的热应力加剧了模块的老化，缩短了其使用寿命。

3 整流模块实际寿命计算

为了计算连续长隧道、大坡度、大温差工况下整流模块的实际寿命，通过温度循环试验，结合 Coffin Manson 方程，可以得到实际工况不同温差下的加速系数以及实际工况对应的试验循环次数，从而估算出整流模块的实际寿命。

3.1 温度循环试验

功率半导体的温度循环试验曲线如图 6 所示。温度循环试验的关键参数包括最高温度（ $T_{\max}$ ）、最低温度（ $T_{\min}$ ）、温度范围（ ΔT ）和循环次数。温度循环试验实质上是一种加速寿命试验，通过改变温度应力、缩短试验时间、降低试验成本，可用于评估产品的使用寿命^[6]。

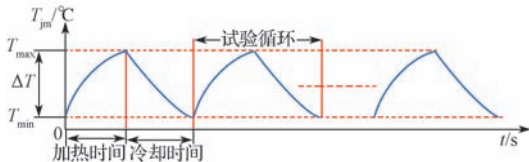


图 6 温度循环试验曲线

Fig. 6 Temperature cycling test curve

从图 4、图 5 实测曲线与图 6 试验曲线的比较可以看到，HXN5 在库尔勒机务段行车工况下运行，类似于进行了高低温循环试验。

3.2 Coffin Manson 方程

在电力电子产品可靠性试验中，温度循环试验遵循 Coffin Manson 定律，其简易方程如下：

$$N_f = \left(\frac{\alpha}{\Delta T} \right)^\gamma \tag{1}$$

式中： N_f ——循环次数； ΔT ——温差； α 、 γ ——常数，与器件的特性相关。

表示加速程度的加速因子为

$$A_f = \frac{N_{fT}}{N_{fA}} = \left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_T} \right)^\gamma \tag{2}$$

式中： N_{fT} 、 ΔT_T ——试验循环次数和试验温差； N_{fA} ，

ΔT_A ——实际工况循环次数和实际工况温差。

根据式（2），在相同的失效模式下，由加速试验的结果可推测出实际工况下的产品寿命。

3.3 循环次数

根据 DGP1 型整流二极管的设计要求，在 $\Delta T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度应力下，循环次数 N_f 应达到 50 万次。

选取两个温度应力、两组 DGP1 器件（每组 6 只）进行温度循环试验，至器件失效时试验结束。取器件失效时循环次数的平均值，如表 3 所示，结果达到设计要求。

表 3 温度循环试验数据
Tab. 3 Temperature cycling test data

序号	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$N_f/\text{次}$
1	80	25	105	1.61E+06
2	90	25	115	5.11E+05

由试验数据可以得到 N_f - ΔT 关系曲线（图 7），进行幂指拟合得 $\gamma=9.72$ ，由 γ 及式（2）可以算得不同实际温差下对应的加速因子 A_f 。

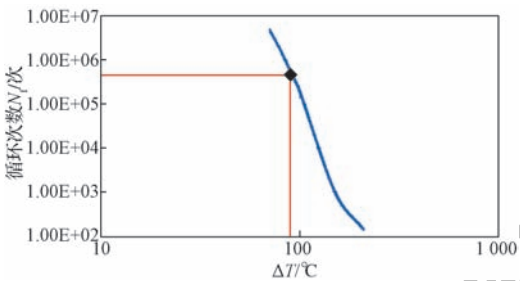


图 7 N_f - ΔT 关系曲线
Fig. 7 Relationship between N_f and ΔT

3.4 实际寿命计算

图 4、图 5 中机车运行数据曲线为冬季测得，其中环境温度为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，元件表面温度最高接近 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

夏季实际环境温度超过 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，为方便计算，假定 $T_{\min}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，经过隧道时热量叠加，二机位整流模块元件表面最高温度达到 $115\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，元件内部结温 $T_{j\max}$ 达到 $150\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

库尔勒线路单程共 29 个隧道，超过 3 000 m 的长隧道 2 个，行车工况对应模块循环次数见表 4。

表 4 模块温度循环次数
Tab. 4 Temperature cycle-index of the module

	$N_{fA}/\text{次}\cdot\text{天}^{-1}$	$T_{\min}/^{\circ}\text{C}$	$T_{j\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_A/^{\circ}\text{C}$
长隧道	4	40	175	135
短隧道	54	40	150	110

以器件设计要求的温度应力 $\Delta T=90^{\circ}\text{C}$ 为基准，由 γ 、 ΔT_A 及 $A_f=\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_T}\right)^{\gamma}$ 可以算得实际工况下不同温差对应的加速因子 A_f （表 5）。

由 A_f 、 N_{fA} 及式（2）可以折算出实际工况不同温差时对应的试验循环次数 N_{fT} （表 6）。

表 5 不同温差对应的加速因子
Tab. 5 Acceleration factors under different temperature differences

	$\Delta T_A/^{\circ}\text{C}$	A_f
长隧道	135	51.48
短隧道	110	7.03

表 6 不同温差对应的试验循环次数
Tab. 6 Relationship among A_f , N_{fA} and N_{fT}

	A_f	$N_{fA}/\text{次}\cdot\text{天}^{-1}$	$N_{fT}/\text{次}\cdot\text{天}^{-1}$
长隧道	51.48	4	205.92
短隧道	7.03	54	379.62
总计			585.54

设计循环次数为 $5.11\text{E}+05$ 次，则算得实际工况下的模块最小使用寿命 $LT_{\min}=872\text{ 天}\approx 2.38\text{ 年}$ ，此结果与模块实际失效时间（大多为运行后 2.5 年左右）相接近。

4 结语

本文采用实时监测机车模块运行温度和风速的方法，结合温度循环试验与 Coffin Manson 方程，较准确地计算了电力电子器件的热疲劳寿命，计算结果与实际使用情况相接近。隧道效应缩短了模块器件的使用寿命，其影响因素包括环境温差、最高温度、温度变化频率及风速等。后续将通过进一步试验研究，针对特定工况可以在整流器模块设计、器件工艺阶段进行优化，以提升器件的热疲劳能力，延长模块使用寿命，降低维保成本。

参考文献:

[1] 袁艳平,雷波,马国川,等. 特长铁路隧道全年运行热环境模拟分析[J]. 中国科技论文, 2013, 8(5): 441-444.
YUAN Y P, LEI B, MA G C, et al. Numerical simulations and analyses of the annual thermal environment in an extra long railway tunnel[J]. China Sciencepaper, 2013, 8(5): 441-444.

[2] 陈玉香,杨欢. 电力电子器件的热疲劳寿命预测[J]. 电源学报, 2013, 11(6): 79-83.
CHEN Y X, YANG H. Lifetime Prediction of Power Electronic Devices[J]. Journal of Power Supply, 2013, 11(6): 79-83.

[3] 赵帅帅,陈永祥,贾业宁,等. 基于修正 Coffin-Manson 模型的加速寿命试验设计与评估[J]. 强度与环境, 2013(4): 52-58.
ZHAO S S, CHEN Y X, JIA Y N, et al. Design and assessment of accelerated life testing based on modified Coffin-Manson model[J]. Structure & Environment Engineering, 2013(4): 52-58.

[4] 郝金伟. HXN5 型大功率交流传动内燃机车[J]. 机车电传动, 2009(2): 1-5.
HAO J W. HXN5 High-power AC Drive Diesel Locomotive[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009(2): 1-5.

[5] WU Bn. High-Power Converters and AC Drives[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

[6] 曹耀龙,黄杰. 电子组件温度循环试验研究[J]. 半导体技术, 2011, 36(6): 487-491.
CAO Y L, HUANG J. Research of Temperature Cycle Test for Electronic Assemblies[J]. Semiconductor Technology, 2011, 36(6): 487-491.