

四域法在和谐机车环境适应性中的应用研究

张开辉

(中国铁路兰州局集团有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 开展和谐机车环境适应性研究是提升机车产品质量和市场竞争力的重要手段, 针对以往机车工况测试和评估手段较为单一与零散的弊端, 构建了一种结合运行环境和实际工况的机、电、热、湿四域物理量一体化评估的新方法, 对和谐机车关键部件牵引变流器在兰新线的环境适应性进行了评估。实测数据表明, 机、电、热、湿各域现场实测点的数值均在规定的的设计值之内, 温度和振动对关键部件的影响较大。最后提出对变流柜内散热系统和减振方案做进一步的优化研究的建议。

关键词: 四域法; 和谐机车; 环境适应性; 应力; 可靠性; 变流器; IGBT

中图分类号: U260.14

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.06.015

Four Domain Model of Environmental Adaptability for HX Serial Locomotive

ZHANG Kaihui

(China Railway Lanzhou Bureau Group Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The study on environmental adaptability of HX serial locomotives is an important means of improving the quality and market competition. Aiming at the disadvantage of single and scattered means of locomotive working condition test and evaluation in the past, a new integrated evaluation method of the four-domain physical quantities, i.e. mechanical, electrical, thermal and wet was constructed, and the environmental adaptability of traction converter, the key component of HX locomotive in Lanxin line was evaluated. The measured data showed that the values of the measured points in the mechanical, electrical, thermal and wet fields were within the prescribed design values, and the temperature and vibration had a greater impact on the key components. Finally, suggestions for further optimization of cooling system and vibration reduction scheme in converter cabinet were put forward.

Keywords: four domain model; HX serial locomotive; environmental adaptability; stress; reliability; converter; IGBT

0 引言

产品环境适应性指在保证可靠实现产品规定任务的前提下, 考察产品对环境的适应能力, 即各种类型环境应力作用下产品能实现其所有预定功能、性能和(或)不被破坏的能力, 具体内容指产品能承受的若干环境参数的变化范围^[1-2]。

和谐系列机车是我国各大电气化铁路主干线的主力车型, 就其运用环境条件, 针对关键单元、零部件开展机车环境适应性研究, 对提升自主机车整体可靠

性水平具有十分重要的意义。机车产品环境适应性研究包括实验室研究和现场研究 2 部分。实验室研究偏重于考察产品承受环境应力的破坏极限和工作极限, 可用于对既有设计好的产品确定其可靠工作的环境应力范围; 现场研究部分, 偏重于产品实际工作环境应力的测试与调研, 比较与验证实验室关于产品环境适应性研究的结论。产品故障或失效是多个环境应力综合作用的结果, 一方面, 不同产品对各种应力敏感性是不一样的; 另一方面, 具体应用场景不同, 起主要作用的环境应力类型也不同。掌握产品在应用过程中承受的环境应力类型和强度, 对产品可靠性设计及运

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-08-31

用都是非常重要的^[3]。

文献[4-5]从热应力影响角度,对变流器可靠性进行了研究;文献[6]就振动机械应力对变流器件可靠性进行了研究;文献[7]研究了湿度因子对变流器系统部件的影响;文献[8]给出了不同功率应用条件对变流器运用可靠性的影响。毋庸置疑,热应力、机械应力、电应力等应力因素对机车牵引变流系统整体功能正常发挥有重要的影响。现场应用环境极其复杂多样,决定了仅单独考察一两个应力的影响存在局限性和片面性。

本文首先依照牵引变流器系统部件构成及对各应力敏感程度,对零部件进行了分类排序;为立体呈现变流器系统与环境应力的相互作用关系,同步考虑各应力对机车牵引变流器应用可靠性的综合影响,从机车实际应用环境测试角度,构建了机、电、热、湿四域物理量一体化可靠性评估的新方法;最后,选取运行条件相对严酷的典型线路,给出了四域法应用的研究案例。

1 牵引变流器部件应力敏感性分析

1.1 牵引传动系统组成

和谐机车牵引变流器采用交直交主电路拓扑结构。如图1所示,牵引传动系统主要由各高压设备、牵引变压器、变流器、电机及相应控制、通信、冷却系统组成^[3-4]。

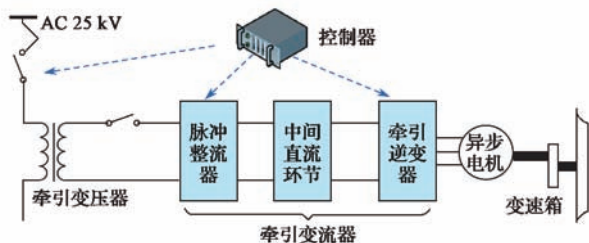


图1 牵引传动系统结构

牵引变流器作为和谐机车核心动力单元,其主要任务是承担传动系统所需电压的变换功能。从可靠性研究角度,和谐机车牵引变流器依照部件组成可分为功率器件、电容器、电子单板、传感器、接触器(继电器)、散热风机及母排线缆连接件等。

1.2 变流器部件作用应力分析

变流器可靠性研究,主要基于现场应用失效表现模式,从机械应力、电应力、热应力、湿度、海拔、化学因素等方面,揭示部件性能退化和故障发生机理。

1.2.1 应力作用模型

考察应力作用与部件可靠性关系,通过大量试验,可获得单应力或多应力作用定量分析数学模型^[1]。

目前,主要借助阿伦尼斯模型(Arrhenius)来分析热应力作用,具体如式(1)所示。

$$TF_{Arrhenius} = A \times \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

式中: A 为预定系数; k 为玻尔兹曼常数(8.65E-5 eV/K);

E_a 为材料失效的激活能; T 为绝对温度; TF 为平均寿命。

艾琳模型(Eyring)模型主要用于描述电、热联合作用,如式(2)所示。

$$TF_{Eyring} = A \times \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \times V^{-\beta} \quad (2)$$

式中: β 为预定系数; V 为工作电压。

湿、热联合应力作用主要借助Peck模型分析,如式(3)所示。

$$TF_{Peck} = A \times \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \times RH^{-n} \quad (3)$$

式中: n 为预定系数; RH 表示相对湿度。

同样地,热、振动应力联合作用可通过式(4)模型进行描述。

$$TF_{TG} = A \times \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \times G^{-\gamma} \quad (4)$$

式中: γ 为预定系数; G 为机械振动加速度均方根值。

对于3种及以上应力共同作用的情况,可定义多项式应力作用模型,典型的如广义阿伦尼斯模型,如式(5)所示。

$$TF_{E-Arrhenius} = \exp[c_0 + c_1\varphi_1(S_1) + \dots + c_n\varphi_n(S_n)] \quad (5)$$

式中: $S_1 \sim S_n$ 为多应力集合; $c_1 \sim c_n$ 为待估常数或加权系数; $\varphi_1 \sim \varphi_n$ 为已知作用函数。

根据式(1)~式(5),考虑机、电、热、湿4种应力同时作用,可得其数学表述模型关系式如式(6)。

$$TF_{四应力} = A \times \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \times (c_1 + c_2 \times V^{-\beta} + c_3 \times RH^{-n} + c_4 \times G^{-\gamma}) \quad (6)$$

通过式(6),根据室内试验结果预先分配对应系数,再根据现场具体应力作用情况,代入公式便可求得应力联合作用下器件的可靠性水平。

1.2.2 应力影响分析

牵引系统部件与应力敏感性对应关系如表1。

由于功率器件运行工作

表1 牵引系统部件及应力敏感性对应表

部件	敏感应力
功率器件	结温水平, 电压水平
电容器	电应力, 温度
电子单板	温度, 湿度, 振动
传感器	温度

环境复杂,高电压、大电流、高频开关动作使功率器件结温频繁波动,容易造成器件内部键合线、芯片焊层、DCB焊层以及主端子焊层等封装结构疲劳老化,在现场应用中出现失效,结温水平和电压水平是影响功率器件可靠性的主要因素^[9]。

电容器的性能参数退化与温度以及过电压水平密切相关,电容器内部的绝缘介质老化规律通常可以用Arrhenius方程来描述^[10]。

电子单板的性能参数退化是温度、湿度、振动等多应力的综合影响结果^[11]。

传感器发生故障最主要的原因是元器件的失效。从失效机理来看,一般是由元器件表面和内部的物理、化学变化(例如氧化、电化学作用、蒸发、疲劳等原因)而引发的。热应力(温度作用)对于霍尔电流传感器影响最为明显,会造成霍尔电流传感器参数测量值的漂移,严重影响传感器的精度与可靠性^[12]。

2 基于四域法的环境适用性评估方法

2.1 四域法分析原理

四域法是将影响牵引传动系统的机、电、热、湿四域物理量进行一体化分析,通过雷达图形象地展示各应力对各核心部件的影响,进而评估牵引传动系统对四域应力的适应程度。

2.2 案例分析

兰新铁路是国内客、货运最重要的铁路大干线之一,同是也是电力机车运行条件比较严苛的干线,货运繁忙,载重高,夏季环境温度高,冬季环境温度低,昼夜温差大,存在 12‰ 的持续长大坡道,这些因素都对电力机车运行带来了极大的挑战。以在兰新线运行的机车为实例,开展了某和谐机车现场测试工作,测试项点包括变流柜内环境温度、湿度、振动、电应力水平以及 IGBT 的温度水平等,基于四域法的可靠性评估方法,对自主和谐机车的环境适应性进行了评估,为以后机车更好地运营和做好可靠性设计奠定基础。

2.2.1 兰新线上机车实测数据

在变流柜内相应测点安装电流、电压、温湿度和振动传感器,实测了机车在整条兰新线运行时,变流系统变流模块和网络控制单元关键部件对应的振动、温湿度、电应力以及热应力水平,以下分别进行介绍。

1) 振动

电子单板振动水平如图 2。

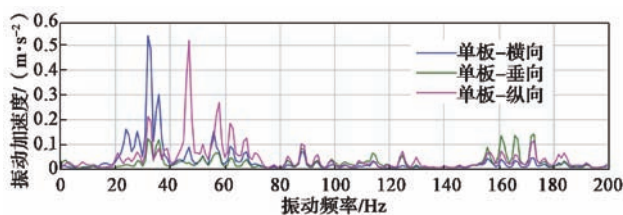


图2 电子单板振动水平

单板的振动主要集中在 200 Hz 以下的低频振动。提取单板 0~3 200 Hz 范围内有效值以及 5~150 Hz 范围内有效值与国标 GB 21563 标准值对比^[13]。

表2 单板振动有效值比较 m/s^2

方向	0~3 200 Hz 有效值	5~150 Hz 有效值	标准值
横向	0.436	0.448	0.45
纵向	0.692	0.649	0.70
垂向	0.382	0.337	1.0

从表 2 可以看出,变流模块和网络控制单元 0~3 200 Hz 范围内振动有效值以及 5~150 Hz 范围内振动有效值均位于国标 GB 21563 标准值以内。

2) 电应力水平

对在兰新线全线运行的和谐机车四象限侧和逆变侧的 IGBT 过电压水平进行了测试,并与器件的反偏安全工作区进行了比较,如图 3 所示。

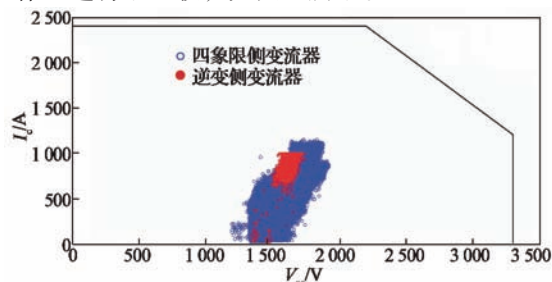
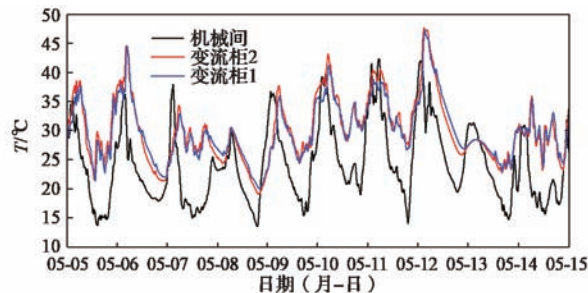


图3 过电压水平

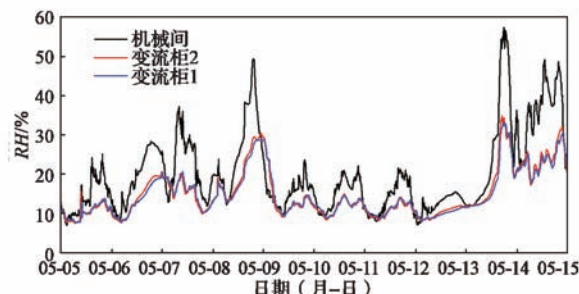
四象限侧 IGBT 关断尖峰电压峰值最高达 1 900 V, 逆变侧 IGBT 最高为 1 850 V, 但均未超过器件允许的 RBSOA。

3) 温湿度水平

测得和谐机车在 2017 年 5 月 5—15 日时间内变流柜内温湿度变化曲线如图 4。



(a) 温度水平



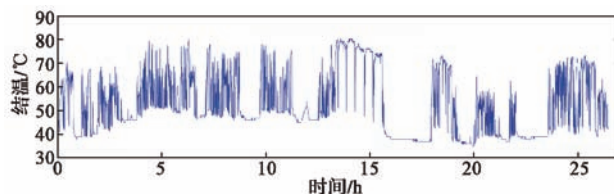
(b) 湿度水平

图4 变流柜内温湿度水平

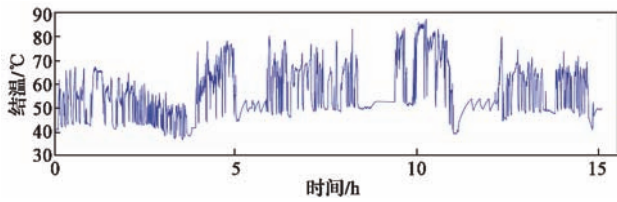
从图 4 可以看出,温度和湿度水平呈反比,柜内温度高时,湿度较低,实测环境温度为 25~30℃ 左右,柜内最高温度接近 50℃,柜内最高相对湿度为 60%。

4) 热应力水平

在变流模块散热器的台面、IGBT 的正下方布置了热电偶,实时监测台面基准温度,根据机车运行时 IGBT 的实时损耗计算了 IGBT 的实时结温水平,如图 5 所示。



(a) 乌鲁木齐至嘉峪关区间



(b) 嘉峪关至兰州区间

图5 兰新线 IGBT 结温水平

环境温度为 35℃时,和谐机车在乌鲁木齐至兰州全线运行时 IGBT 的最高结温不超过 90℃,低于器件允许的最高结温 125℃,结温最大温升为 50 K。

2.2.2 环境适用性评估

部件定额参数设计中,一般要求对应的实际应力不得超出额定设计范围,否则会对变流模块可靠性和寿命造成不利影响。

依照部件对作用应力类型的敏感程度,利用四域法多应力切面同步测试的优势,将各应力依照额定参数定标后,映射到一个环境应力水平状态空间,各应力维度连线形成一个闭合区间,利用雷达图,可直观考察各应力在状态空间的位置及综合作用水平。

根据实测变流系统关键部件对应的振动、温湿度、电应力以及热应力水平,利用四域法进行关键部件环境适应性的评估。将实测参数与关键部件额定参数归一化处理,得到电容器、单板、IGBT 以及传感器的雷达图分别如图 6~ 图 9。

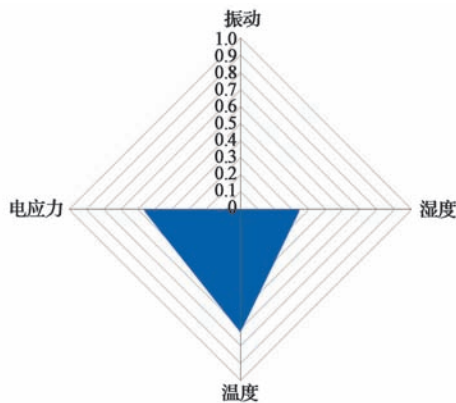


图6 功率器件各应力影响雷达图

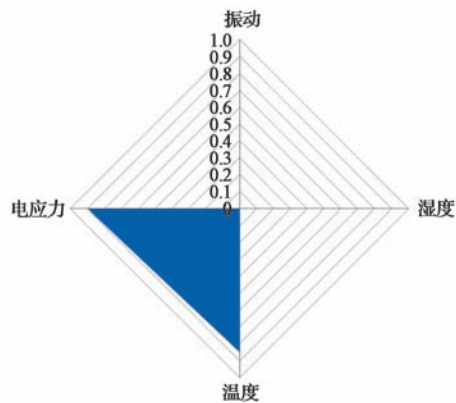


图7 电容器各应力影响雷达图

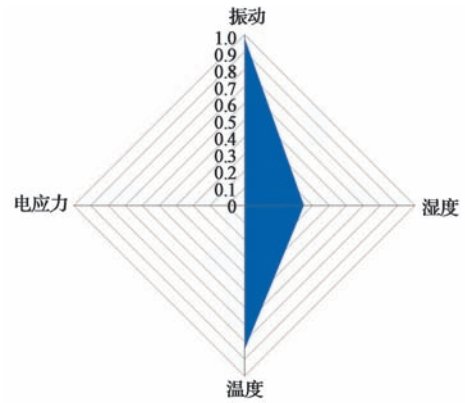


图8 电子单板各应力影响雷达图

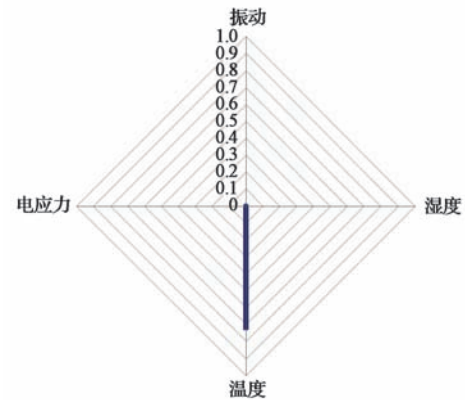


图9 传感器各应力影响雷达图

从图 6~ 图 9 可以看出,在兰新线全线运行的和谐机车各测点的参数均在规定的设计值之内,但温度和振动对各核心部件的影响较大,建议优化柜内散热系统和减振方案,使各核心部件能更加安全可靠工作。

3 结语

本文构建一种结合运行环境和实际工况的机、电、热、湿四域物理量一体化评估的新方法,应用该法对和谐机车关键部件功率器件、电容器、电子单板和传感器在兰新线的环境适应性进行了评估。对和谐机车在线运行实测参数进行研究分析,发现各测点的参数均在规定的设计值之内,但温度和振动对各核心部件的影响较大。为保证和谐机车适应严酷的路线条件,建议对变流柜内散热系统和减振方案做进一步的优化研究。

参考文献:

- [1] 赵宇. 可靠性数据分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 1-197.
- [2] 盖瑞, 沃瑟曼 S. 工程设计中的可靠性验证、试验与分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 188-209.
- [3] 陈艳平, 康劲松, 陈宇. 列车牵引变流器的加速寿命试验方法 [C] // 中国高校电力电子与电力传动学术年会 (SPEED2013). 上海: 上海交通大学出版社, 2013: 325-329.
- [4] 饶沛南. 大功率交流传动机车牵引变流器的研究与开发 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008: 9-20.
- [5] 黄先进, 候少敏, 孙湖, 等. 牵引变流系统热设计与温升仿真研究 [J]. 电力电子, 2011(2): 37-41. (下转第 79 页)

系统级的温度数据包括冷却塔进、出水温和环境温度。模块环境温度数据包括驱动板环温、电源板环温和换热器入口风温等,如图9所示。从图8、图9可知:

①冷却塔水温相对环境温度最大温升都在 15°C 左右;

②在变流器功率变化时,冷却塔水温均有大范围快速变化,波动较大 ($10^{\circ}\text{C}/\text{min}$);

③整流驱动板环温高出逆变驱动板环温,整流驱动板的最大温升约为 28K ;

④模块环温受机械间环温(外部环温)和变流器输出功率共同影响,受变流器输出功率的影响最大;

⑤系统级、模块级温升均在合理范围内。

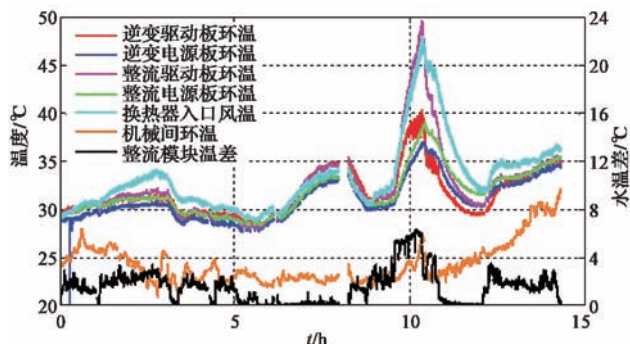


图9 模块环境温度曲线

4 结语

在遇到变流器内部温升过大问题后,根据原因分

析、方案制定以及试验验证三大步骤获得2种优化方案与优化前对比的完整试验数据,通过对试验数据分析,确认采用低感母排方案2较采用低感母排方案1在各部件温升及纹波电流方面都有所改善。在工程化实现方面,采用低感母排方案2在变流器模块组装、维护、维修方面工作量较大。综合考虑试验数据、可制造性和可维护性等因素,采用低感母排方案1基本能够满足变流器优化需求。采用低感母排方案1后,在后续装车试验中,变流器内部各部件的温度得到很好的控制。近几年,该型机车已成为我国干线货运的主力车型,该型变流器已累计装车近千台,总体运行状态良好。

参考文献:

- [1] 忻力.兆瓦级IGBT牵引逆变器的开发[J].机车电传动,2000(5):4-5.
- [2] 秦方方,李华,李鹏.几种主要的“和谐”型电力机车主变流器主电路对比[J].机车电传动,2012(5):43-46.
- [3] 陈燕平,忻力.变流器中电容器并联时的谐振现象及噪声研究[J].机车电传动,2008(5):19-22.
- [4] 荣智林.TGN10型地铁车辆用DC1500VIGBT牵引逆变器[J].机车电传动,2004(4):31-33.
- [5] 刘海涛.地铁车辆用DC1500VIGBT牵引逆变器[J].机车电传动,2008(5):42-44.

作者简介:宾 川(1984-),男,工程师,现从事机车电气牵引系统研发工作。

(上接第75页)

- [6] 王勋,李琳,高学敏,等.基于IGBT串联的电压源换流器的电动力计算及振动分析[J].电力科学与工程,2014(3):29-34.
- [7] ZORN C, PITON M, KAMINSKI N. Impact of humidity on railway converters [J]. PCIM Europe 2017, 2017: 715-722.
- [8] CIAPPA M, MALBERTI P, FICHTNER W, et al. Lifetime extrapolation for IGBT modules under realistic operation condition [J]. Microelectronics Reliability, 1999: 1131-1136.
- [9] 王彦刚, DINESH C, 李世平, 等. 功率IGBT模块的寿命预测[J]. 机车电传动, 2013(2): 13-17.
- [10] 谢超, 叶建铸, 石延辉, 等. 直流滤波电容器剩余预期寿命

的试验研究[J].电力电容器与无功补偿,2017(2):87-93.

- [11] 张国龙,蔡金燕,梁玉英,等.电子装备多应力加速退化试验技术及可靠性评估方法研究[J].航空学报,2013(12):2815-2822.
- [12] 魏星,方峻,王卫国.加速退化试验下电流传感器的可靠性评估[J].机械设计与制造,2017(8):69-72.
- [13] 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验:GB/T 21563—2008 [S].

作者简介:张开辉(1968-),男,硕士,高级工程师,长期从事轨道交通车辆的技术管理工作。