CRH2 及 CRH380A 系列动车组速度 传感器可靠性评估研究

梁爽', 贾步超', 孙卫平', 吴超云²

(1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111;2.广电计量检测(北京)有限公司,北京 100176)

摘要:提出了一种动车组列车速度传感器的寿命研究方法,通过对不同运行里程的速度传感器进行全寿命 周期的环境影响分析,设计三综合性能退化寿命试验,缩短试验周期,并根据试验过程中测试参数的退化 趋势,确定其寿命主要特征参数为线圈电阻。分析了不同里程速度传感器的特征参数试验结果,采用数据 拟合及寿命里程等效估算的方法,预测速度传感器的寿命。结果表明,随着运行里程的增加,相同的试验 时间,线圈电阻逐渐变大,绝缘电阻逐渐变小。经估算,三综合试验时间等效运行里程为每小时相当于 0.3278×10⁴ km。动车组速度传感器在正常运行条件下,其平均故障间隔时间(MTBF)可达到 1978×10⁴ km 的里程。此外,通过本项目研究也为快速评价同类型速度传感器寿命提供了参考方法。

关键词:速度传感器;动车组;可靠性;寿命。

中图分类号: U266 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)03-0106-06 **DOI**: 10.7643/issn.1672-9242.2022.03.016

Reliability Evaluation of Speed Sensor for CRH2 and CRH380A Series EMU

LIANG Shuang¹, JIA Bu-chao¹, SUN Wei-ping¹, WU Chao-yun²
(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, 266111, China;
2. Guangzhou Grg Metrology and Test Co., Ltd., Beijing 100176, China)

ABSTRACT: The life research method of the speed sensor of the EMU was proposed in this paper. Through the environmental impact analysis of the whole life cycle of speed sensors with different operating mileage, three comprehensive tests for performance degradation life were designed to shorten the test cycle, and according to the degradation trend of test parameters during the test, the main characteristic parameter of the life was determined as coil resistance. The life of speed sensors was predicted through analyzing the test results of characteristic parameters of different speed sensors and using a method of data fitting and life-mileage equivalent estimation. The result shows that with the increase of operating mileage, the coil resistance gradually increases and insulation resistance gradually decreases at the same test time. It is estimated that the equivalent operating mileage of the three comprehensive test time is equivalent to 32.78 thousand kilometers per hour. The MTBF of the EMU speed sensor

收稿日期: 2021-10-28; 修订日期: 2021-12-08

Received: 2021-10-28; Revised: 2021-12-08

作者简介:梁爽(1981-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为动车组制动系统设计与研发。

Biography: LIANG Shuang(1981-), Female, Master, Senior engineer, Research focus: design and development of EMU brake system.

通讯作者:吴超云 (1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为产品寿命。

Corresponding author: WU Chao-yun (1982-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus; product life.

引文格式: 梁爽, 贾步超, 孙卫平, 等. CRH2 及 CRH380A 系列动车组速度传感器可靠性评估研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 106-111. LIANG Shuang, JIA Bu-chao, SUN Wei-ping, et al. Reliability Evaluation of Speed Sensor for CRH2 and CRH380A Series EMU[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 106-111.

reaches 19.78 million kilometers in normal operation conditions. The research of this project also provides a method basis for rapid evaluation of speed sensor life.

KEY WORDS: speed sensor; EMU; reliability; life

随着我国高速铁路飞速发展,动车组测速定位 显得越来越重要,为确保列车的运行安全,并充分 发挥运输效能,只有时刻掌握动车运行的即时速度 及位置,才能保障动车正点达到及运行安全。速度 传感器是动车组测速和定位的关键产品,其作为一 种必备的测量仪器,监测并使动车组按规定速度运 行^[1]。速度传感器主要由外壳、电路板、感应探 头、电缆等组成,通过监测齿轮的转速,输出高低 电平信号,判定动车组的速度值。由于速度传感器 的工作环境极其复杂、恶劣,已成为动车组控制系 统中的最薄弱环节,目前主要故障有线圈电阻超 标、磁阻元件损坏、连接器接触不良等。

目前国内外对动车组速度传感器的研究很少, 多是从电磁干扰的角度去分析速度传感器的失效原 因^[2-3],尚未结合温湿度、振动应力等工况,且供应 商提供不了完整的可靠性数据。因此,针对速度传感 器类部件的检修,动车组上一般都是通过运行里程 来进行判断是否换修。动车组速度传感器类部件只 有当出现严重故障或达到标准所规定的强制报废年 限或里程时,才会进行检修。由于不清楚速度传感 器类部件在不同工况下的可靠性,只能进行统一换 修。一方面,一些速度传感器在比较恶劣的工况下 工作,在强制报废年限之前就出现了故障,一旦报 警,列车无法准确预估车速,为保证安全,列车将 低速行驶或直接临时停车,将导致列车晚点,耽误 旅客行程。另一方面,在相对较好的工况下工作的 速度传感器,经历强制报废年限换修下来后,仍可 以投入使用,这样很大程度上造成了资源浪费^[4]。

综上所述,从不同工况下分析速度传感器类部件的可靠性特征,研究传感器的可靠性曲线、特性退化曲线,可以最大程度上利用速度传感器,降低维修检修成本,减少维修检修过程中的浪费^[5]。

动车组速度传感器全寿命周期环 境影响分析

根据调研可知,动车组速度传感器在运行过程中 出现的故障主要包括线圈电阻性能超标、连接器脱 落、传感器磁极处磁头擦伤、传感器壳体腐蚀等^[6], 如图 1 所示。





图 1 传感器典型故障形貌 Fig.1 Typical fault topography of sensor

动车组在运行和使用过程中,主要经历的事件为 检修一出库—运行—车辆段检修—入库。在这一系列 的事件中,传感器主要遭遇的环境有温度、湿度、振 动、电磁及工作环境^[7]。对于电磁环境在传感器出厂 过程中,已经过相应的电磁环境形式试验考核,且表 现出的几种故障中,均与外界电磁环境的关系不大。 因此,在后续寿命试验的设计中,主要考虑的外界环 境包括温度、湿度和振动的综合环境,同时考虑其工 作状态下的性能衰减规律^[8-9]。此外,传感器的连接 器脱落、传感器磁极处磁头擦伤、传感器壳体腐蚀的 故障属于人为防护不当的偶发型非责任故障,因此不 作为特征寿命评估参数。线圈电阻的上升则是由于长 期的综合环境作用下,导致内部铜芯或连接处的氧化 而造成的,故本文中主要采用线圈电阻的退化作为寿 命评价的主要依据。

存在起包

根据前期的试验表明,线圈电阻的退化与接口处 的密封、焊接部位松动以及线圈铜芯本身的氧化相 关,而这3类故障的发生主要是由于温湿度和振动等 3种因素造成。因此,文中主要是通过监测三综合环 境下传感器线圈电阻的衰减趋势,从而评价传感器的 性能退化寿命。

2 高速动车组速度传感器寿命研究

2.1 样品说明

本次研究对象为 AG37 速度传感器, 源于日本进

口产品,其主要在拖车位置针对给制动控制装置 (BCU)提供速度信号,其基本性能见表1。

表 1 速度传感器基本性能

Tab.1 Basic performance of speed sensor					
型号	线圈 电阻/Ω	绝缘 电阻/MΩ	输出特性		
AG37D	60±6	≥100	安装间隙 1.3 mm, 额定转 速 1500 r/min 下输出电压 范围: 5~25.0 V		

为了为便于识别,对新品和运行 240×10⁴、 360×10⁴、480×10⁴ km 的速度传感器进行编号,其样 品编号规则见表 2。

送口炉口切回

夜 2 件 相 编 与 观 外						
Tab.2 Sample numbering rule						
序号	编号	含义				
1	AG37-0-1	AG37 速度传感器新品 1 号样品				
2	AG37-240-1	AG37 速度传感器 240×10 ⁴ km 1 号样品				
3	AG37-360-1	AG37 速度传感器 360×10 ⁴ km 1 号样品				

2.2 试验条件及过程检测

鉴于速度传感器属于长寿命产品,正常应力条件下,短时间内无法获取产品的寿命信息,因此采用加速寿命试验来预测正常应力水平下的寿命特征^[10]。根据其工作环境,采用三综合环境进行加速试验,其试验条件及过程检测参数见表 3^[11]。

表 3 三综合环境试验及检测参数

Tab.3 Three omprehensive environmental testing and testing parameters

测试项目	测试要求		
	温度为85℃,相对湿度为85%,振动条件		
三综合试验	依据 GB/T 21563—2008 中 3 类 车轴安装		
	的功能性振动试验		
外观检测	要求无变色、腐蚀、擦伤		
线圈电阻测试	通道1和2之间的线圈电阻要求为(60±6)Ω		
	各通道(包括电缆屏蔽层)与金属外壳		
绝缘电阻测试	之间施加 DC 500 V 电压,其绝缘电阻		
	≥100 MΩ		
检山柱杜拉洞	安装间隙为1.3 mm,测试传感器输出电压		
 而 石 行 性 位 测	特性		

2.3 结果与分析

2.3.1 速度传感器线圈电阻变化趋势分析

经过 1000 h 的三综合试验,新品和运行 240×10⁴、360×10⁴ km的速度传感器线圈电阻的变化 趋势如图 2 所示。总体来看,随着试验的不断进 行,AG37-0、AG37-240及AG37-360 传感器的线圈 电阻均呈现出增长的趋势,其中AG37-0 传感器线圈 电阻增长相对缓慢,而AG37-360 传感器则增长相对 较快。从不同运行里程的传感器纵向对比来看,运 行里程越长,则线圈电阻越大。其中,1 个 AG37-360-3 传感器在运行 576 h 后,线圈电阻达到 91.7 Ω,此时已经超出了规定线圈电阻(60±6)Ω的范 围,因此判定此时该传感器已经失效。根据文献资 料查阅及线路上实际运行故障的分析^[12-13],造成线 圈电阻增大的原因主要是由于线缆的老化及传感器 整体密封性能的下降,水汽侵入线缆内部,导致铜 芯的表面氧化,从而降低了传感器的线圈电阻。



Fig.2 Trend chart of coil resistance of speed sensor

2.3.2 速度传感器绝缘电阻变化趋势分析

同样对三综合试验过程中新品和运行 240×10⁴、 360×10⁴ km 的速度传感器的绝缘电阻进行检测,其 结果如图 3 所示。可以看出, AG37-0、AG37-240 及 AG37-360 传感器的绝缘电阻整体均呈现出下降的趋 势, AG37-0 传感器下降相对较慢, 而 AG37-360 传 感器下降较快。另外,运行里程越长的传感器,其绝 缘电阻也越小。从外观测试结果来看, AG37-240 及 AG37-360 传感器铁芯周围壳体均出现了熔化现象, 如图 4 所示。其中 1 个 AG37-240 传感器在 816 h 试 验后,首次出现壳体熔化,而AG37-360 传感器则有 3个均出现了壳体熔化。另外,在1000h试验后,有 AG37-360-2 传感器绝缘电阻下降到 56 MΩ, 已经不 满足≥100 MΩ的要求,因此判定为失效件。通过分 析可知,随着试验时间的延长,绝缘性能下降,在 机车运行过程中,产生了击穿电压,从而导致壳体 的烧蚀。

2.3.3 速度传感器输出特性变化趋势分析

试验过程中,监测不同运行里程的速度传感器输出特性的数值,其结果如图 5 所示。可以看出,3 种速度传感器的整体输出电压变化不大,能够符合产品规范要求,但是 AG37-360-3 传感器出现输出电压不稳定现象,这与前面的线圈电阻测试结果相吻合。此外,同样的1.3 mm安装间隙,在1500 r/min的



Fig.3 Variation trend of insulation resistance of speed sensor



图 4 速度传感器内部壳体熔化 Fig.4 Melting diagram of the inner shell of the velocity sensor



测试转速下,不同运行里程,其输出特性变化不大,可见该传感器综合环境对其输出特性影响不大。

2.3.4 数据分析与评估

1)运行里程等效估算。考虑到传感器的主要输 出性能电压值与线圈电阻的相关性较大,拟选用线圈 电阻为主要特征寿命参数^[14-16],通过不同里程的传感 器数据,拟合得到相应的拟合曲线,如图 6 所示。 AG37-0、AG37-240、AG37-360 线性曲线的斜率相似, 尤其是 AG37-240、AG37-360 约斜率同为 0.0018,可 见这 2 款速度传感器具有相同的线圈电阻增长速率。 由此可知,通过高温高湿及振动的外部环境进行加速 老化试验,没有改变其老化失效的机理。根据加速理 论为失效机理一致性^[17-18],因此该环境条件不会引入



Fig.6 Speed sensor coil resistance fitting curve

新的故障模式,可以作为试验的加速环境^[19]。因为新 品的样品量相对较少,故采用 AG37-240、AG37-360 加速传感器进行加速等效里程的估算。

从拟合曲线中可以看出。拟合优度偏低,说明产 品测试数据的离散性相对较大。分析其原因发现,线 圈电阻的阻值与外界测试温度有较大的关系。测试过 程中,虽空调房设置为 25 ℃,但细化到某一个时辰 或区域,实际温度会有所差异,因此引发了数据的不 稳定性。此外,从评估的角度来看,线圈电阻变大主 要是因为内部被氧化,而氧化的过程较为复杂。氧化 开始相对速率会较快,氧化膜达到一定厚度后,反而 起到保护作用,其氧化速率会变慢。采用比较保守的 线性退化模型,在评估的结果上会相对比较保守。因 此,可以采用该拟合模型进行后续的寿命计算。

根据图 6 显示, AG37-240、AG37-360 的线性拟 合公式分别见式(1)和式(2)。

<i>Y</i> =0.0018 <i>X</i> +60.585	(1)
Y=0.0018X+61.244	(2)

式中: Y 为线圈电阻; X 为试验时间

由式(1)、(2)可得三综合的试验时间为366.11 h, 可以理解为AG37-240 传感器需要经历366.11 h综合 试验时间,线圈电阻才会达到AG37-360的水平。相当 于366.11 h综合试验时间可以粗略等效为120×10⁴ km 的运行里程,即每小时相当于0.3278×10⁴ km。

2)速度传感器可靠性评估计算。不考虑速度传感器外观的变化情况下,共计7款不同类型的传感器进行了1000h三综合试验,其中AG37-360有2个分别在576、1000h试验后发生了失效,故记录故障数 r为2。因此,将时间等效为里程,可得总的无故障运行里程为3956×10⁴ km。由此可得,MTBF为1978×10⁴ km。

3 结论

1)速度传感器在三综合加速退化试验过程中发

生了性能衰减的现象,且随着运行里程的增加,相同 的试验时间,线圈电阻变大,绝缘电阻变小,而输出 特性则变化不大。

2)在576h和1000h试验后,2个AG37-360运 行 360×10⁴ km 的样品出现失效, 主要表现为线圈电 阻及绝缘电阻性能超标。

3) 经初步估计,可将三综合时间等效为运行里 程,每小时相当于 0.3278×10⁴ km,其 MTBF 评估为 $1978 \times 10^4 \text{ km}_{\odot}$

参考文献:

- 莫重明. 高原铁路信号系统列车自主定位方案选型研 [1] 究[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(7): 11-14. MO Chong-ming. Study on Solution Selection of Train's Autonomous Positioning for Signalling System of Plateau Railways[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(7): 11-14.
- 颜世旭. 电力机车速度传感器的电磁兼容性研究[D]. [2] 北京:北京交通大学,2018.

YAN Shi-xu. Research on Electromagnetic Compatibility of Speed Sensor of Electric Locomotive[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[3] 余飞, 唐辉, 张文耀, 等. CRH6A 型动车组 ATP 光电速 度传感器故障与解决措施研究[J]. 铁道机车与动车, 2019(12): 37-39.

> YU Fei, TANG Hui, ZHANG Wen-yao, et al. Faults and Solutions of ATP Photoelectric Speed Sensors of CRH6A EMUs[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2019(12): 37-39

- [4] 吕崇伟. HX_D1型机车霍尔速度传感器常见故障分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(6): 82-84. LV Chong-wei. Common Faults Analysis of Hall Speed Sensor on HX_D1 Locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2019, 42(6): 82-84.
- 王忠凯. 动车组运用检修计划优化方法的研究[D]. 北 [5] 京:中国铁道科学研究院,2012. WANG Zhong-kai. Research on the Optimization of Operation and Maintenance Schemes of EMUs[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2012.
- 孙向新.关于机车速度传感器的常见故障分析[J]. 哈 [6] 尔滨铁道科技, 2009(4): 23. SUN Xiang-xin. Analysis on Common Faults of Locomotive Speed Sensor[J]. Harbin Railway Science Technology, 2009(4): 23.
- 张亚伟. 列车运行环境监控系统的设计与应用分析 [7] [C]//第十届智能交通年会优秀论文集. [出版地不详]: 中国智能交通协会, 2020.

ZHANG Ya-wei. Design and Application Analysis of

Train Operation Environment Monitoring System[C]// Excellent Theses of the 10th Intelligent Transportation Annual Meeting. [s .1.]: ITS China, 2020.

- [8] 唐继秋. 基于性能退化的监测产品寿命评比方法应用 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019, 37(1): 23-27. TANG Ji-qiu. Application of Life Evaluation Method for Monitoring Products Based on Performance Degradation[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2019, 37(1): 23-27.
- 王静,陶孟仑,陈定方,等.谐波减速器双应力步降加 [9] 速寿命试验方法研究[J]. 机械传动, 2020, 44(10): 8-12. WANG Jing, TAO Meng-lun, CHEN Ding-fang, et al. Research of the Test Method of Double Stress Step-down Acceleration Life for Harmonic Reducer[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(10): 8-12.
- 于德伟, 岳刚, 王芹凤. 动车组速度传感器检测装置研 [10] 制[J]. 农业装备与车辆工程, 2014, 52(10): 68-70. YU De-wei, YUE Gang, WANG Qin-feng. Development of Bullet Velocity Sensor Testing Device[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2014, 52(10): 68-70.
- 张长青. CRH3C 动车组轴速度传感器检测原理及代码 [11] 分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(1): 15-18. ZHANG Chang-qing. Detection Principle and Code Analysis for Axle Velocity Sensor of CRH3C-EMU[J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(1): 15-18.
- 刘光辉,朱峰,邱日强,等. CRH380CL 型动车组速度 [12] 传感器故障诊断[J]. 电气化铁道, 2016, 27(6): 49-52. LIU Guang-hui, ZHU Feng, QIU Ri-giang, et al. Fault Diagnosis of Speed Sensor of CRH380CL Electric Multiple Unit[J]. Electric Railway, 2016, 27(6): 49-52.
- [13] 曾易寒. 基于输出电压特征的 DC-DC 变换器故障识别 与寿命预测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020. ZENG Yi-han. Research on Fault Identification and Life Prediction Method of DC-DC Converter Based on Output Voltage Characteristics[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- 谷广宇, 刘建敏, 乔新勇, 等. 基于特征评价的发动机 [14] 寿命预测方法研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(1): 108-113, 120.

GU Guang-yu, LIU Jian-min, QIAO Xin-yong, et al. Research on Engine Life Prediction Method Based on Characteristics Evaluation[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 108-113, 120.

[15] 邵力为, 王友仁, 孙权. 基于 Wiener 过程的功率变换 器剩余寿命评估方法[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(2): 196-201. SHAO Li-wei, WANG You-ren, SUN Quan. Remaining Useful Life Evaluation Method of Power Converter Based on Wiener Process[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(2): 196-201.

[16] 刘建. 钴酸锂电池加速寿命试验及模型研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.

LIU Jian. Accelerated Life Test and Model Study of Lithium Cobalt Battery[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.

[17] 司爽, 叶雪荣, 王淑娟, 等. 加速退化机理一致性判别 试验测试系统设计与实现[J]. 电器与能效管理技术, 2020(2): 84-88.

> SI Shuang, YE Xue-rong, WANG Shu-juan, et al. Design and Development of Accelerated Degradation Mechanism Consistency Discriminant Testing Measurement and Analysis System[J]. Electrical & Energy Management

Technology, 2020(2): 84-88.

[19] 郑莹莹,谢启源,罗圣峰,等. 基于 MTBF 的光电感烟 探测器可靠性研究[J]. 火灾科学, 2019, 28(1): 60-68.
ZHENG Ying-ying, XIE Qi-yuan, LUO Sheng-feng, et al. Reliability Research of Photoelectric Smoke Detector Based on MTBF[J]. Fire Safety Science, 2019, 28(1): 60-68.

^[18] 陈兵,李星.加速寿命试验技术在国内外的工程应用研究[J].强度与环境,2010,37(6):31-38.
CHEN Bing, LI Xing. Research of Accelerated Life Testing Technology Application at Home and Abroad[J]. Structure & Environment Engineering, 2010, 37(6): 31-38.