

文章编号: 1674—8247(2024)04—0030—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.04.006

## 基于实测载荷的动车组吊挂螺栓服役寿命评估

赵敏<sup>1</sup> 王维峰<sup>1</sup> 李孝勇<sup>1</sup> 谢劲松<sup>2</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111; 2. 中南大学, 长沙 410083)

**摘要:**针对动车组修程修制优化需求,本文提出了一种基于实测载荷和疲劳仿真的动车组吊挂设备螺栓服役寿命评估方法。以客室空调为典型设备开展了实车长期跟踪试验,利用雨流统计法获取不同里程下振动载荷谱,计算运营时间内不同加速度等级下的日均频次;构建 Ansys-nCode 循环寿命联合仿真模型,获取不同加速度等级下的疲劳寿命;针对不同加速度等级下的日均频次与疲劳寿命,基于 Miner 线性累积损伤理论,实现了螺栓的服役寿命评估。本文提出的模型和方法为吊挂设备螺栓的修程修制优化提供了指导意见。

**关键词:**服役寿命;联合仿真模型;线性累积损伤;吊挂螺栓

中图分类号: U269

文献标志码: A

## Assessment of Service Life for Hanger Bolts in Multiple Units Based on Measured Load Data

ZHAO Min<sup>1</sup> WANG Weifeng<sup>1</sup> LI Xiaoyong<sup>1</sup> XIE Jinsong<sup>2</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In response to the demand for optimizing maintenance regimes for multiple units, this paper proposed a method for evaluating the service life of hanger bolts in multiple units based on measured loads and fatigue simulations. A long-term, in-service tracking test was conducted on an air conditioning unit, as representative of typical cabin device, employing rainflow counting techniques to derive load spectra under varying mileage, subsequently calculating daily frequency counts for each acceleration level experienced during operation. An Ansys-nCode coupled cyclic life simulation model was established to determine fatigue life for the different acceleration levels. Leveraging the Miner linear cumulative damage theory, the service life of the bolts was assessed considering the daily frequency counts and corresponding fatigue lives at each acceleration level. The proposed model and approach provide guidance for the optimization of maintenance regimes for hanger bolts in multiple units.

**Key words:** service life; coupled simulation model; linear cumulative damage; hanger bolts

21 世纪以来,我国高速铁路技术发展迅速,预计到 2025 年,我国高速铁路运行里程将达到 3.8 万 km,运行速度和开行班次逐步提高<sup>[1-2]</sup>。在修程修制持续优化的大背景下,设备存在下车检修优化为状态检

修的可能。目前研究大多评估吊挂设备本身优化可行性,而缺少吊挂螺栓服役时间延长可行性的分析依据<sup>[3]</sup>。因此,亟需建立螺栓服役性能和疲劳寿命的评估模型。

收稿日期:2022-10-14

作者简介:赵敏(1983-),女,高级工程师。

引文格式:赵敏,王维峰,李孝勇,等. 基于实测载荷的动车组吊挂螺栓服役寿命评估[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4):30-35.

ZHAO Min, WANG Weifeng, LI Xiaoyong, et al. Assessment of Service Life for Hanger Bolts in Multiple Units Based on Measured Load Data[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4):30-35.

国内外学者针对螺栓寿命的评估开展了系列研究。在仿真方面,刘万川<sup>[4]</sup>等建立了振动激励下的载荷模型,根据测试条件给出了激励边界条件,对连接螺栓进行随机振动疲劳寿命估算;郝海舒<sup>[5]</sup>采用 ABAQUS 分析螺栓应力集中位置,通过 Fe-Safe 疲劳仿真模拟,拟合了高强度螺栓的  $S-N$  曲线;刘迪辉<sup>[6]</sup>等建立了取力器的疲劳仿真模型,分析了在不同转速时取力器螺栓的疲劳寿命;李兰<sup>[7]</sup>等建立了带精细螺纹的轴箱端盖螺栓连接结构有限元模型,基于 Brown-Miller 准则,应用多轴局部应力应变法估算螺栓的疲劳寿命。

在试验方面,刘勇<sup>[8]</sup>等利用 MTS LandMark 疲劳试验机对 35K8.8 级螺栓进行“轴心拉-拉”常幅疲劳试验,拟合了应力-循环次数曲线;有学者针对不锈钢螺栓开展了周期性载荷试验,获取各应力范围下的拉伸和剪切疲劳寿命,通过回归分析获取不锈钢螺栓的  $S-N$  曲线;还有学者对封闭螺栓进行静态、恒幅和变幅疲劳试验,并通过回归分析与 Miner 线性损伤理论评估封闭螺栓的疲劳寿命;王贤强<sup>[9]</sup>等借助 MTS 疲劳加载试验机,验证单边裂纹钢板高强螺栓止裂加固后的疲劳寿命是传统止裂孔加固的近 5 倍;张维<sup>[10]</sup>采用超声疲劳试验研究了核电站的 42CrMoE 螺栓材料的超高周疲劳性能,通过扫描电镜分析螺栓断裂原因,构建该螺栓的  $S-N$  曲线。

疲劳仿真试验并无实车载荷谱作为输入,难以准确评估螺栓服役寿命;疲劳寿命试验无法获得低循环载荷对应的高疲劳寿命,使得不同载荷下的循环次数计算困难。针对上述问题,本文提出了一种基于实车载荷和仿真模型的吊挂螺栓服役寿命评估方法。首先,开展了吊挂螺栓实车载荷谱测试试验,获取了吊挂螺栓运营时间内不同加速度等级的日均频次;随后,构建了吊挂螺栓连接结构模型,利用 ANSYS-nCode 构建了联合疲劳仿真模型,计算了不同加速度等级下的疲劳寿命;最后,通过吊挂螺栓不同加速度等级的日均频次和疲劳寿命,基于 Miner 线性累积损伤模型计算出吊挂螺栓的服役里程和服役寿命。

## 1 螺栓实车载荷谱测试

跟踪试验系统采用安装在客室空调螺栓附近的加速度传感器,测量实车运行时客室空调吊挂螺栓的加速度,并利用雨流计数法获取运营时间内吊挂螺栓日均载荷谱。

### 1.1 跟踪试验系统

以某高速动车组为载体,安装了跟踪试验系统,

长期监测客室空调吊挂螺栓在不同里程下的振动载荷谱。

跟踪试验系统由 4 个子系统组成:无线数据采集系统、列车级检测系统、地面数据处理系统、远程监控中心。跟踪试验系统组成结构如图 1 所示。

列车检测系统主要由采集器、交换机、车载电脑、3G 路由和 GPS(测速模块)构成。无线采集系统中,结构可靠性检测数据采集器负责采集客室空调螺栓的振动加速度信号,信号通过车内局域网和交换机传输至车载电脑。车载电脑利用无线局域网传输振动加速度信号至地面数据处理系统,通过 Internet 网络、路由器以及跟踪试验远程监控中心,将信号发送至其他试验室。

为了监测客室空调吊挂螺栓的振动加速度,需要将加速度传感器安装于吊挂螺栓附近。

### 1.2 数据获取

车下悬挂设备测试采用量程为 2 g 的加速度传感器,频率响应为 DC-1 000 Hz,采样率均为 2 500 Hz,车下设备滤波频率为 300 Hz。在每个旋修周期内取 3 次监测数据,每次 1 d,各次数据间隔 10 万 km,累计监测 120 万 km。采用雨流计数法获得每 d 监测数据中各振动量级加速度的频次。

雨流计数法基本计数规则:

(1)雨流依次从载荷时间历程峰值位置的内侧沿着斜坡往下流。

(2)雨流从某一个峰值点开始流动,当遇到比其起始峰值更大的峰值时要停止流动。

(3)雨流遇到上面流下的雨流时,须停止流动。

(4)取出所有全循环,记下每个循环的幅度。

(5)将第一阶段计数后剩下的发散收敛载荷时间历程等效为 1 个收敛发散型的载荷时间历程,进行第二阶段的雨流计数。计数循环的总数等于 2 个计数阶段的计数循环之和。

通过有效数据处理,获取运营时间内不同加速度等级的日均频次,结果如表 1 所示。

## 2 疲劳寿命联合仿真

根据获取的运营时间内不同加速度等级的日均频次,通过联合仿真模型获取吊挂设备螺栓在不同加速度等级下的疲劳寿命。首先构建了吊挂螺栓联接结构的三维模型,利用 Ansys 静力学分析计算吊挂螺栓在相同预紧力、不同加速度等级下的应力及应变;随后,向 nCode 软件中导入有限元模型、应力以及应变数据,结合吊挂螺栓材料特性以及载荷历程,获取

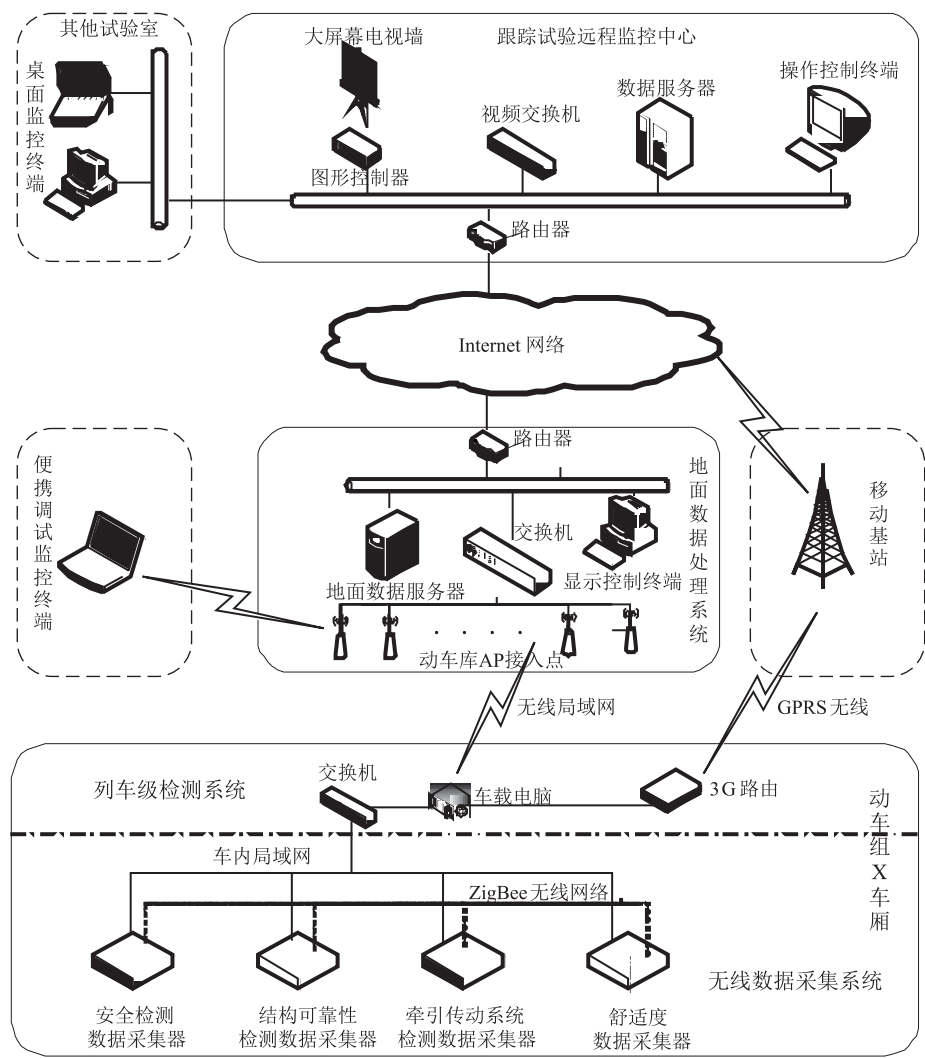


图1 跟踪试验系统结构图

表1 数据处理结果表

动载荷/g	频次/次
0 ~ 0.05	6.30e6
0.05 ~ 0.10	8.61e5
0.10 ~ 0.15	3.25e4
0.15 ~ 0.20	2.19e3
0.20 ~ 0.25	7.69e1
0.25 ~ 0.30	5.06e0
0.30 ~ 0.35	1.42e0
0.35 ~ 0.40	7.55e-1
0.40 ~ 0.45	1.78e-1
0.45 ~ 0.50	5.43e-3
0.50 ~ 2.00	5.43e-3

吊挂螺栓在不同加速度等级下的疲劳寿命。联合仿真具体流程如图2所示。

2.1 吊挂螺栓联接结构静力学分析

螺栓头为T型头结构,螺母为HARD LOCK 防松螺母。车载吊挂设备连接的三维模型如图3所示。

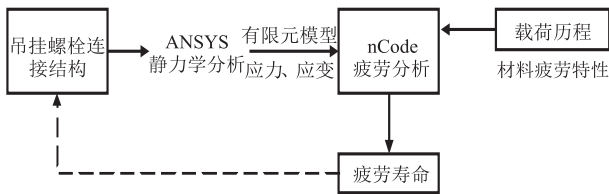


图2 疲劳寿命联合仿真流程图

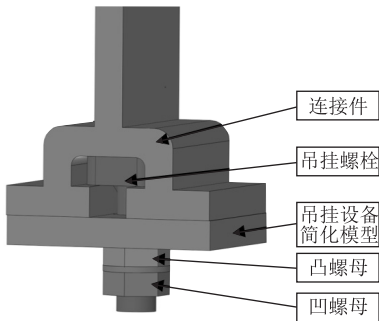


图3 吊挂螺栓连接结构简化三维模型图

螺栓和螺母材料为45钢;支撑件和吊挂设备材料为铝合金。各零部件材料属性如表2所示。

表2 吊挂设备螺栓连接结构各零件材料属性表

名称	材料	弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /(kg/m³)
螺栓 螺母	45 钢	206 000	0.3	7 850
连接件 吊挂设备	7N01S-T5 铝合金	71 900	0.3	2 700

动车组吊挂设备螺栓静态预紧力采用式(1)进行计算。

$$P_0 = \frac{M_t}{Kd}$$

(1)

式中: $M_t$ ——螺栓预紧力矩,取 170 N·m;

$K$ ——螺栓预紧力系数,取 0.22;

$d$ ——螺栓公称直径,取 20 mm;

$P_0$ ——螺栓静态预紧力,38 636 N。

基于吊装设备螺栓连接结构有限元模型,结合螺栓的吊挂设备重量、预紧扭矩,约束条件等,对模型分别施加边界条件约束和预紧力。支承件的4个侧面设置为固定约束;在螺栓杆上施加螺栓预紧力38 636 N,如图4所示。

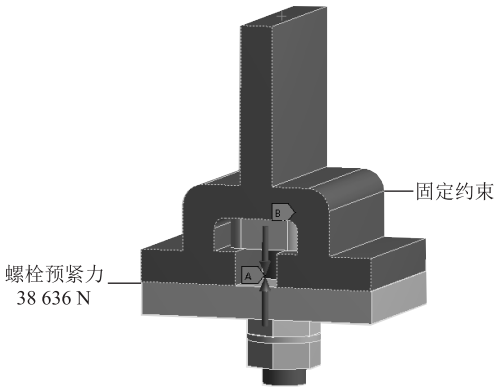


图4 边界条件约束和预紧力图

螺栓预紧力、惯性力相互之间的矢量之和等于螺栓轴向力,振动过程中施加于螺栓上的力按式(2)计算:

$$F = P + ma$$

(2)

式中: $F$ ——螺栓轴向力(N);

$P$ ——螺栓预紧力(N);

$m$ ——吊挂螺栓分均承受的质量(kg);

$a$ ——吊挂设备振动加速度(g)。

通过式(2)可将吊挂设备的振动加速度 $a$ 转化为螺栓的轴向力 $F$ 。考虑不同加速度等级下均值作为该加速度范围的参考标准,即:0.025 g、0.075 g、0.125 g、

0.175 g、0.225 g、0.275 g、0.325 g、0.375 g、0.425 g、0.475 g、1.25 g。振动频率选择5 Hz、10 Hz和30 Hz三个频率。吊挂空调质量 $M$ 为770 kg,吊挂螺栓数量为6个,那么单个吊挂螺栓的分均质量 $m$ 为128.3 kg。

2.2 静力学分析结果

在预紧力作用的基础上,不同振动加速度等级下螺栓动态应力如表3所示。

表3 不同振动加速度幅值下螺栓的变化范围表

加速度等级 /g	加速度 /g	动态轴向力 /N	动态应力 /MPa	总循环应力 /MPa
0 ~ 0.05	0.025	31.43	0.10	0.08
0.05 ~ 0.10	0.075	94.30	0.30	0.25
0.10 ~ 0.15	0.125	157.17	0.50	0.42
0.15 ~ 0.20	0.175	220.03	0.70	0.59
0.20 ~ 0.25	0.225	282.90	0.90	0.76
0.25 ~ 0.30	0.275	345.77	1.10	0.93
0.30 ~ 0.35	0.325	408.64	1.30	1.10
0.35 ~ 0.40	0.375	471.50	1.50	1.27
0.40 ~ 0.45	0.425	534.37	1.70	1.43
0.45 ~ 0.50	0.475	597.24	1.90	1.60
0.50 ~ 2.00	1.250	1 571.68	5.00	4.22

此外,分别对吊挂设备螺栓连接结构在15 Hz和30 Hz振动频率下进行准静力学数值仿真,计算结果表明振动频率对力学特性影响较小,即15 Hz、30 Hz振动频率下的等效应力和轴向力幅值变化与表3一致。

2.3 吊挂螺栓疲劳寿命分析

将静力学分析的有限元模型、应力、应变,以及吊挂螺栓的载荷历程、材料的疲劳特性导入至nCode软件,通过nCode软件进行疲劳分析求解出疲劳寿命。载荷谱和 $S-N$ 曲线设置如图5所示,其中通过疲劳软件设置8.8级螺栓的 $S-N$ 曲线为多平均应力曲线,动态载荷设置为正弦载荷。

在nCode疲劳软件中搭建疲劳仿真框图,通过仿真计算可得到螺栓的疲劳寿命,如图6所示。

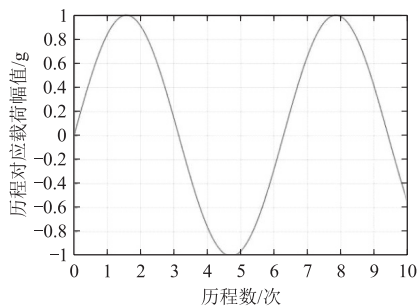
2.4 吊挂螺栓疲劳寿命分析结果

M20螺栓的预紧力为38 636 N,不同加速度等级下疲劳仿真结果如表4所示。

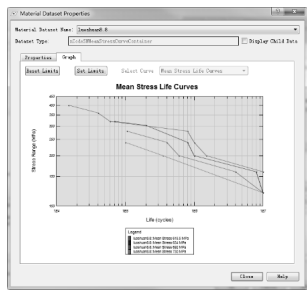
3 螺栓服役寿命评估

根据获取的运营时间内不同加速度等级的日均频次和疲劳寿命,运用线性累积损伤理论对吊挂螺栓的服役寿命以及服役里程进行预测。线性累积损伤理论认为疲劳载荷对结构的疲劳损伤是可以线性叠加的物理量,当损伤累积到一定程度时,材料发生





(a) 动态载荷历程



(b) 材料疲劳特性

图 5 疲劳仿真条件设置图

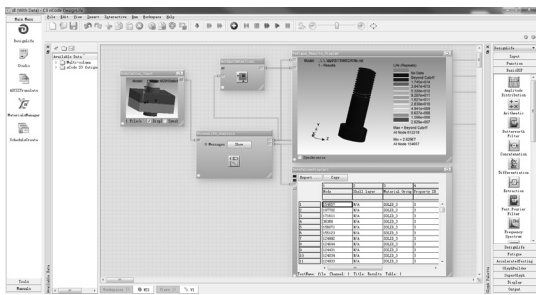


图 6 疲劳分析软件框图

表 4 M20 疲劳寿命分析结果表

加速度等级/g	加速度/g	循环次数/次
0 ~ 0.05	0.025	2.21e10
0.05 ~ 0.10	0.075	3.67e9
0.10 ~ 0.15	0.125	1.60e9
0.15 ~ 0.20	0.175	9.21e8
0.20 ~ 0.25	0.225	6.11e8
0.25 ~ 0.30	0.275	4.41e8
0.30 ~ 0.35	0.325	3.36e8
0.35 ~ 0.40	0.375	2.66e8
0.40 ~ 0.45	0.425	2.17e8
0.45 ~ 0.50	0.475	1.81e8
0.50 ~ 2.00	1.250	3.72e7

破坏。目前线性疲劳累积理论主要有 Miner 理论、Shanleg 理论、Lundberg 理论等。Miner 理论由于形式简单、使用方便被广泛应用于工程中。

已知在循环应力  $S$  的作用下, 构件发生破坏时该

应力的作用次数为  $N$ , 则在该应力作用  $n$  次时结构损伤程度  $D$  可表示为:

$$D = \frac{n}{N} \tag{3}$$

若  $n = 0$ , 表示构件没有收到疲劳载荷作用, 此时  $D = 0$ , 表示构件未受到疲劳损伤。当  $n = N$  时,  $D = 1$ , 此时构件的损伤程度为 100%, 构件发生破坏。

构件在正常状况下会受到不同大小的应力作用, 假设某一种应力水平为  $S_i$ ,  $N_i$  为该应力水平下的疲劳寿命,  $n_i$  为该应力的作用次数, 则该应力水平作用下结构的损伤程度为:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \tag{4}$$

假设共有  $k$  个不同应力水平  $S_i$ , 则构件总损伤程度为:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \tag{5}$$

根据 Miner 理论获取不同加速度等级下(取各等级的中值)造成的日均损伤当量, 结果如表 5 所示。

表 5 日均不同加速度等级造成的损伤当量表

振动加速度等级/g	加速度频次/次	疲劳寿命/次	损伤当量
0 ~ 0.05	6.30e6	2.21e10	2.72e-4
0.05 ~ 0.10	8.61e5	3.67e9	2.27e-4
0.10 ~ 0.15	3.25e4	1.60e9	1.97e-5
0.15 ~ 0.20	2.19e3	9.21e8	2.30e-6
0.20 ~ 0.25	7.69e1	6.11e8	1.22e-7
0.25 ~ 0.30	5.06e0	4.41e8	1.11e-8
0.30 ~ 0.35	1.42e0	3.36e8	4.09e-9
0.35 ~ 0.40	7.55e-1	2.66e8	2.75e-9
0.40 ~ 0.45	1.78e-1	2.17e8	7.93e-10
0.45 ~ 0.50	5.43e-3	1.81e8	2.91e-11
0.50 ~ 2.00	5.43e-3	3.72e7	1.41e-10

Miner 线性损伤理论规定:

$$D = \sum_{i=1}^{11} D_i = \sum_{i=1}^{11} \frac{n_i}{N_i} \tag{6}$$

当总损伤程度  $D \geq 1$  时, 构件发生破坏。那么, 车辆运营期间, 客室空调吊挂螺栓 1 d 的总损伤当量  $D_r$  为:

$$D_r = 5.21 \times 10^{-4} \tag{7}$$

客室空调吊挂螺栓有效服役寿命(运营天数)  $T$  为:

$$T = \frac{1}{D_r} = 1\,919\text{ d} \tag{8}$$

结合轨道车辆运营信息, 试验线全长  $L = 1\,318\text{ km}$ , 车辆单日行驶一个来回, 客室空调吊挂螺栓的有效服役里程  $S$  为:

$$S=2\times L\times T=506\text{ 万 km}$$

(9)

为给修程优化提供丰富参考信息,进一步计算吊挂设备螺栓各加速度等级范围内不同参考取值规则下的服役寿命。在振动加速度区间范围  $\min\sim\max$  内参考取值包括:最大值( $\max$ )、最小值( $\min$ )、以及区间等间隔点(Interval Value, IV)。等间隔点包含:1/4 间隔点(1/4 IV),3/4 间隔点(3/4 IV),其定义为:

$$1/4\text{ IV}=\min+\frac{1}{4}\times(\max-\min)$$

(10)

$$3/4\text{ IV}=\min+\frac{3}{4}\times(\max-\min)$$

(11)

在不同振动加速度取值规则下,螺栓的服役里程与有效服役寿命结果如表 6 所示。

表 6 不同参考标准值的服役里程表

加速度参考值/g	有效服役寿命/d	服役里程/万 km
max	810	213
3/4 IV	1 184	312
mean	1 919	506
1/4 IV	3 637	959
min	7 540	1 988

4 结论

本文提出了一种基于实测载荷和仿真模型的吊挂螺栓服役寿命评估方法,利用实车运行中测试的振动加速度数据和联合仿真模型完成吊挂螺栓的服役里程、服役寿命的评估,得到主要结论如下:

(1)开展了实车长期跟踪系统,获取了实车运行时吊挂螺栓的载荷谱,并利用雨流计数法将其处理为车辆运营期间的日均载荷谱,为吊挂设备螺栓的疲劳性能分析提供了重要数据基础。

(2)构建了 Ansys-nCode 循环寿命联合仿真模型,分析了不同振动加速度等级下设备的最大疲劳寿命,为实测载荷谱下螺栓服役寿命评估提供了模型基础。

(3)基于 Miner 线性损伤累积准则,利用仿真获取的不同动载荷水平下的循环次数与客室空调载荷谱数据计算,对吊挂设备螺栓的服役寿命进行了评估。研究成果为修程优化提供了决策数据支持。

参考文献:

[1] 范童柏. 高速动车组制动盘螺栓载荷及疲劳损伤研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.  
FAN Tongbai. Research on Load and Fatigue Damage of Brake Disc Bolt of High-speed EMU [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[2] 谢毅, 肖杰. 高速铁路发展现状及趋势研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 23-26.

XIE Yi, XIAO Jie. Research on High-speed Railway Development Status and Trend[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 23-26.

[3] 郭妍宇. 高速动车组高级修计划优化方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 1-2.  
GUO Yanyu. Optimization Method of High-speed Electric Multiple Units Advanced Repair Plan [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 1-2.

[4] 刘万川, 杨臻, 王国强, 等. 直升机振动环境下的螺栓疲劳寿命估算方法研究[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(2): 101-105.  
LIU Wanchuan, YANG Zhen, WANG Guoqiang, et al. Research on Fatigue Life Estimation Method for Bolts in Helicopter Vibration Environment [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(2): 101-105.

[5] 郝海舒, 刘勇, 刘丹, 等. 基于精细化有限元的端板连接高强螺栓疲劳寿命分析[J]. 中国科技论文, 2021, 16(8): 818-824, 848.  
HAO Haishu, LIU Yong, LIU Dan, et al. Fatigue Life Analysis of High-strength Bolt in End-plate Connection Based on Refined Finite Element [J]. China Sciencepaper, 2021, 16(8): 818-824, 848.

[6] 刘迪辉, 彭浩毅, 张宏亮, 等. 干混物料运输车取力器螺栓疲劳寿命分析[J]. 机械强度, 2022, 44(1): 245-249.  
LIU Dihui, PENG Haoyi, ZHANG Hongliang, et al. Fatigue Life Analysis of Power Take-off Box Bolts of Dry-mixed Mortar Transport Truck [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(1): 245-249.

[7] 李兰, 孙丽霞, 胡晓依, 等. 轴箱垂向振动加速度对轴箱端盖螺栓疲劳寿命影响仿真研究[J]. 中国铁路, 2021(4): 74-79.  
LI Lan, SUN Lixia, HU Xiaoyi, et al. Simulation Study on Influence of Vertical Vibration Acceleration of Axle Box on Fatigue Life of Axle Box End Shield Bolt [J]. China Railway, 2021(4): 74-79.

[8] 刘勇, 魏珍中, 张继亮, 等. 避雷针构架结构端板连接高强螺栓常幅疲劳性能试验研究[J]. 空间结构, 2022, 28(2): 79-86.  
LIU Yong, WEI Zhenzhong, ZHANG Jiliang, et al. Experimental Study on Constant Amplitude Fatigue of High-strength Bolts of End-plate Connection of Lightning Rod Structures [J]. Spatial Structures, 2022, 28(2): 79-86.

[9] 王贤强, 杨羿, 刘朵, 等. 平板贯穿裂纹高强螺栓止裂加固试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(3): 104-109.  
WANG Xianqiang, YANG Yi, LIU Duo, et al. Experimental Research on Crack Prevention and Reinforcement with High-strength Bolts for Flat Plate through Cracks [J]. Building Structure, 2022, 52(3): 104-109.

[10] 张维, 贾文清, 文杰, 等. 核电站用 42CrMoE 螺栓材料超高周疲劳性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(10): 39-42, 45.  
ZHANG Wei, JIA Wenqing, WEN Jie, et al. Research on Ultra-high Cycle Fatigue Behavior of 42CrMoE Bolt Material for Nuclear Power Station [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(10): 39-42, 45.