

基于有限元法的 U 型钢结构动态轴组秤疲劳寿命研究

陈威¹, 庄曙东^{1,2}, 陈天翔¹, 史柏迪¹, 唐春明¹, 成先明¹

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 南京航空航天大学 江苏省精密仪器重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要:设计一种基于 U 型钢结构的动态轴组秤, 并对其进行疲劳寿命计算。在中间载荷和偏载荷两种工况下, 对槽钢结构与 U 型钢结构秤体进行力学分析, 得到两种秤体结构的总变形、等效应力、等效应变; 基于名义应力疲劳损伤模型, 运用 nCode Designlife 疲劳分析软件计算秤体各工况下的疲劳寿命, 得到两种秤体结构的疲劳受伤云图和寿命云图。结果表明: 两种工况下, U 型钢结构秤体都具有良好的疲劳寿命。

关键词:公路称重; 动态轴组秤; U 型钢结构; 力学分析; 疲劳寿命

中图分类号:TH164 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)04-0012-05

Study on Fatigue Life of Dynamic Axis Group Scale of U-shaped Steel Structure Based on Finite Element Method

CHEN Wei¹, ZHUANG Shudong^{1,2}, CHEN Tianxiang¹, SHI Baidi¹, TANG Chunming¹, CHENG Xianming¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Precision Instruments, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A dynamic axis group scale based on U-shaped steel structure is designed and its fatigue life is calculated. The total deformation, equivalent stress and equivalent strain of channel steel structure and U-shaped steel structure are obtained by mechanical analysis under the two working conditions of intermediate load and partial load. Based on the nominal stress fatigue damage model, nCode Designlife fatigue analysis software is used to calculate the fatigue life of the scales under various working conditions, thus gaining the fatigue injury cloud chart and life cloud chart of the two scales. The results show that the U-shaped steel structure has better fatigue life under the two working conditions.

Keywords: highway weighing; dynamic axis group balance; U-shaped steel structure; mechanical analysis; fatigue life

0 引言

动态轴组秤在称重行业是常见的秤量设备, 一般布置在车流量较大的高速公路或者精确称重预检的港口码头。称重系统每天工作上百次甚至上千次, 工作条件也各有不同, 故秤的使用寿命显得特别重要。马智晖^[1]从传感器的制造、使用、维护 3 个方面对如何延长传感器的使用寿命进行了分析并且提出了解决方法; 李滢泽等^[2]从动态汽车衡的日常维护工作方向进行研究, 实践证明做好动态汽车衡运行期间的日常工作将有利于提高设备计量精度, 减少维修费用和工作量, 延长设备使用寿命以及降低用户损失。刘九卿^[3]从称重传感器弹性体的结构设计、材料选择、制造工艺、高精度的试验装备等方向分析了传感器的弹性体对于量测精度的影响。目前秤体大部分研究主要在传感器精度和寿命上。秤体结构寿命一般高于传感器的使用寿命, 但并不意味着秤体是不会疲劳损坏的,

故针对槽钢结构容易出现的疲劳损坏, 设计一种 U 型钢结构的动态轴组秤, 并且对两种结构进行疲劳计算。

1 秤体结构分析

1.1 槽钢结构动态轴组秤结构

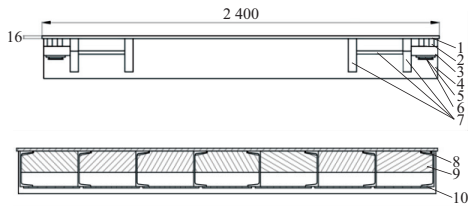
动态轴组秤秤体一般由单轴载的小秤台和双轴载的大秤台两部分组成。本文以梅特勒-托利多一款槽钢结构动态轴组秤的大秤台为模型, 提出 U 型钢结构支撑结构的动态轴组秤。分别对两种结构的秤体进行疲劳寿命计算。槽钢结构的组成零件由图 1 所示。

1.2 U 型结构动态轴组秤结构

U 型钢结构动态轴组秤秤体主要有面板、U 型钢、端板、限位结构等, 秤体截面布置方式如图 2 所示, U 型钢的尺寸如图 3 所示。

基金项目:江苏省高校实验室研究会立项资助研究课题项目(GS2019YB18);江苏省精密与微细制造技术重点实验室数学建模课题组项目(CZ520007812);中央高校基本科研业务费项目(2018B44614)

第一作者简介:陈威(1991—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为车辆衡器的结构优化设计与疲劳寿命仿真分析。



1—面板;2—支撑块;3—支撑板;4—端板;5—过渡板;
6—连接件;7—限位板;8—槽钢;9—加强筋;10—底板。

图1 槽钢结构剖视图

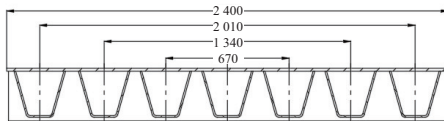


图2 U型钢截面布置示意图

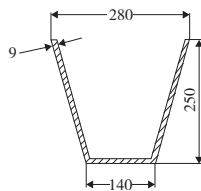


图3 U型钢截面尺寸

2 动态轴组秤的静力学分析

将大秤台车辆前进方向定义为秤体宽,垂直与前进方向的定义为长,由原槽钢结构可知,总长为4200mm,总宽为2400mm,设计的额定单轴载为20t,最大过载能力125%FS。

中间载荷:

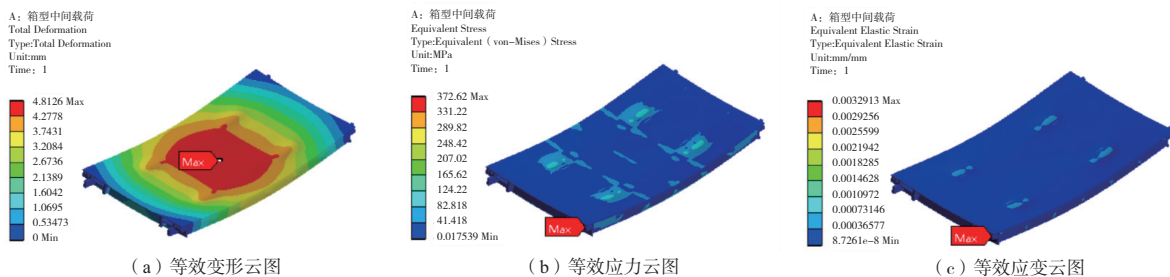


图5 槽钢结构秤体中间载荷静力学分析结果

偏载荷:

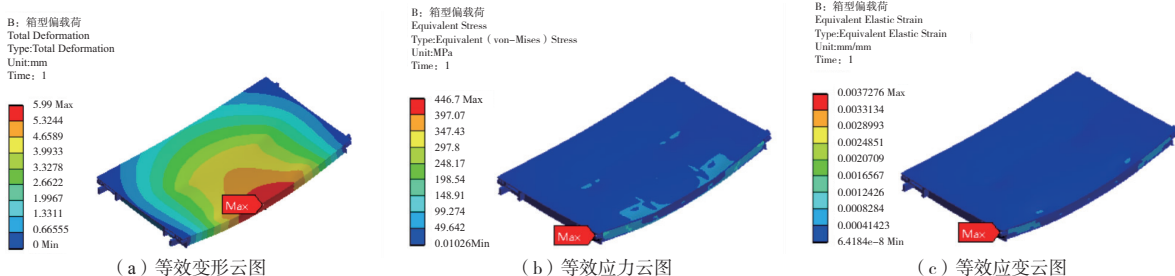


图6 槽钢结构秤体偏载荷静力学分析结果

由于动态轴组秤大秤台的过车方向尺寸为2400mm,最大通过双联轴,依据《JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范》^[4],双联轴的轮距一般为1800mm,轴距为1400mm。为确保一定的安全余量,取1250mm,单个轮胎承重在承台的接触面为(200×300)mm,工况分为中间载荷和偏载两种过秤状态,受力区域模型如图4所示。

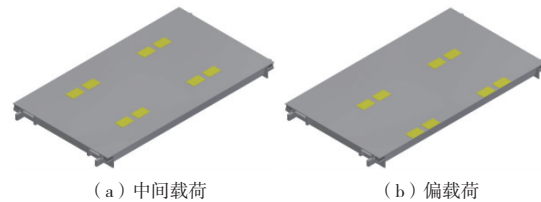


图4 载荷施加区域示意图

轴组秤秤体支撑部件如过渡板和上连接件采用2Cr13,秤体其余部件结构与限位装置均为Q235。由机械设计手册可知,Q235的材料属性为:抗拉强度375~500MPa,屈服强度235MPa,泊松比0.3,弹性模量 2.01×10^{11} Pa,密度 7.85 g/cm^3 ;2Cr13的材料属性屈服强度为440MPa,泊松比0.28,弹性模量 2.16×10^{11} Pa,密度 7.85 g/cm^3 。

2.1 槽钢结构的静力学分析

采用六面体单元对秤体结构进行网格划分,网格大小秤体设置为30mm,过渡板和连接件设置40mm,节点305677个,单元体47800个。

按最大承载能力施加载荷50t,方向垂直于称台面向下,4个上连接件的支撑面设置为固定约束。通过Workbench求得箱型结构秤台两种工况下的等效变形、等效应力、等效应变云图分别如图5、图6所示。

2.2 U 型钢结构的静力学分析

对 U 型钢结构秤体同样划分网格,节点 252 161 个,

单元体 37 260 个。通过 Workbench 求得 U 型钢结构秤台两种工况下的等效变形、等效应力、等效应变云图分别如图 7、图 8 所示。

中间载荷:

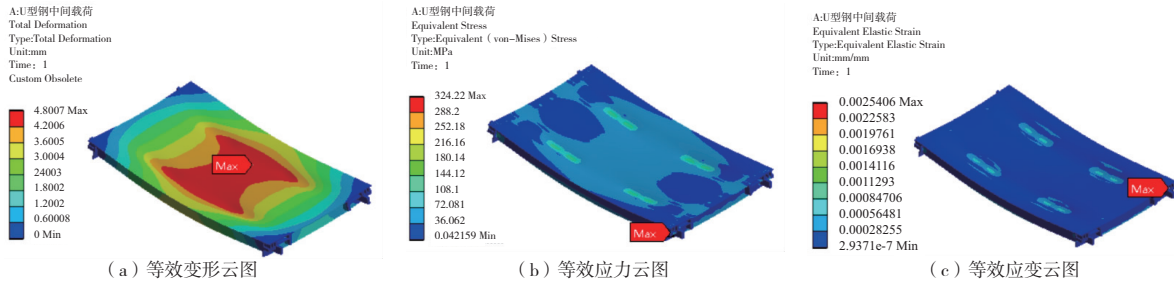


图 7 U 型钢结构秤体中间载荷静力学分析结果

偏载荷:

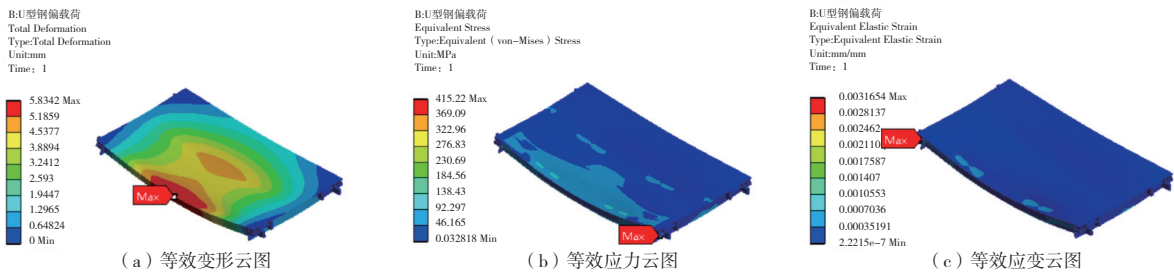


图 8 U 型钢结构秤体偏载荷静力学分析结果

由 2.1、2.2 节可知槽钢结构秤体与 U 型钢结构秤体的静力学分析结果及两种结构的质量对比,整理结果见表 1。

表 1 最大变形及应变

参数	槽钢结构		U 型钢结构	
	中间载荷	偏载荷	中间载荷	偏载荷
最大变形/mm	4.81	5.99	4.80	5.83
最大应力/MPa	372.62	446.7	324.22	415.22
最大应变	0.003 3	0.003 7	0.002 5	0.003 2
质量/kg	2 977.43		2 880.5	

由表 1 可得:

1) 箱型结构和 U 型钢结构施加中间载荷时,两种结构的变形相差不大,变形量均在 4.8 mm 左右。偏载荷施加时,U 型钢结构的变形量比箱型结构的变形量小 0.16 mm,变形量减小 3%,范围均在 5.8 mm~6 mm 之间。从安全角度考虑,参考《GB-T 7723—2008 固定式电子衡器标准》^[5] 中衡器承载器相对变形技术要求,取纵向方向 1/700 作为校核指标,即 6 mm,两种工况均满足。

2) 由有限元的分析结果可知,秤体最大应力在支撑部件连接件上;知连接件 2Cr13 的屈服极限为 440 MPa,在中间载荷工况下,U 型结构连接件处的最大应力相较于箱型结构连接件处的最大应力降低 12.9%。在偏载荷工况下,U 型结构连接件处的最大应力降低了 7%;从而降低了疲劳损伤的风险。

3 动态轴组秤的疲劳分析

3.1 应力疲劳分析理论

动态轴组秤体的疲劳为高周疲劳,采用名义应力^[6]疲劳分析方法。标准的应力疲劳分析过程需要通过实验获得材料的 S-N 曲线,nCode 软件中的材料 S-N 曲线如图 9 所示。其中 b_1 为第一疲劳强度指数; b_2 为第二疲劳强度指数; S_{R11} 为应力范围截距; U_{TS} 为材料疲劳极限强度; R_R 为应力比; N_{C1} 为过渡寿命,对应纵坐标 $\Delta\sigma = S_{R11}(N_f)^{b_1}$, N_f 为疲劳失效循环次数; N_{FC} 为疲劳极限寿命。根据理论推导,S-N 曲线到 N_{C1} 点就停止延伸, N_{C1} 点对应的 S-N 曲线上点的纵坐标值为材料的极限应力幅 $\Delta\sigma$,当工件受的应力小于 $\Delta\sigma$ 时,就理解为近似无损伤。但是在实际生产中,即使工件所受的应力小于 $\Delta\sigma$,工件仍受到损伤,只是损伤量较小,因此 nCode 在标准的 S-N 曲线中加上了 b_2 段,且 b_2 下降的速率变小,使加上 b_2 段后的 S-N 曲线更贴近实际。

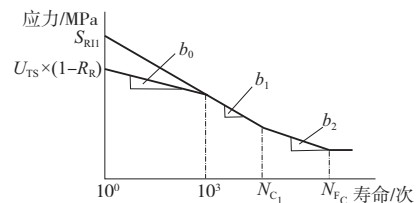


图 9 标准 S-N 曲线示意图

3.2 疲劳分析

通过 nCode Designlife 软件计算秤体使用寿命,需要建立五框图^[7],步骤如图 10 所示。

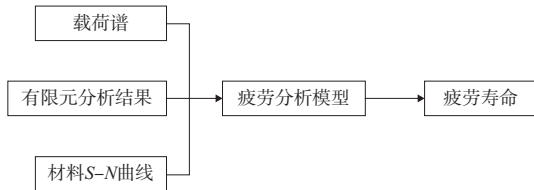


图 10 疲劳寿命计算步骤

以轴组秤中间载荷与偏载荷两种工况为例:

由于有限元中设定的静力学载荷为恒定 50t,故载荷谱设定为 Constant Amplitude 即恒定幅值载荷,载荷因子 Max Factor 为 1, Min Factor 为 0;秤体材料 S-N 曲线在 nCode Designlife 中进行设置;疲劳分析模型选择 Stress Life Analysis 求解器进行求解,两种工况下求得的疲劳寿命与疲劳损伤云图^[8]如下分析。

a) 槽钢结构中间载荷

由 nCode Designlife 求解得槽钢结构中间载荷的疲劳损伤云图和疲劳寿命云图分别见图 11、图 12。

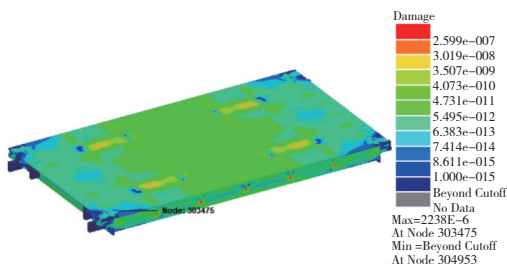


图 11 槽钢结构中间载荷的疲劳损伤云图

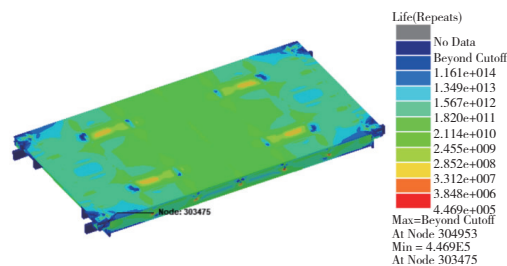


图 12 槽钢结构中间载荷的疲劳寿命云图

由图 11、图 12 可知,中间载荷工况下,槽钢结构疲劳损伤最大的部位、疲劳寿命最小的部位均在连接件处,在节点 303475 处,最大累积损伤为 0.00224,疲劳最小寿命为 446900 次循环。

b) 槽钢结构偏载荷

槽钢结构偏载荷的疲劳损伤云图和疲劳寿命云图分别如图 13、图 14 所示。

由图 13、图 14 可知,偏载荷工况下,槽钢结构疲劳损伤最大的部位、疲劳寿命最小的部位均在连接件处,在节点 306206 处,最大累积损伤为 0.005815,疲劳最小寿命为 172000 次循环。

c) U 型钢结构中间载荷

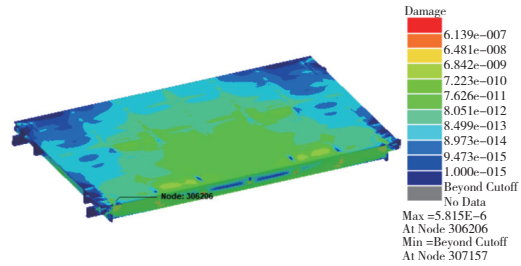


图 13 槽钢结构偏载荷的疲劳损伤云图

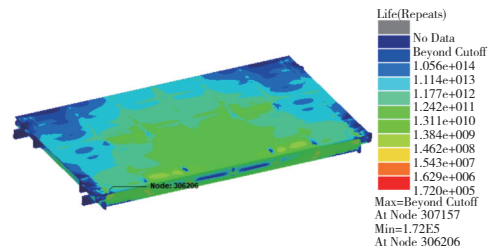


图 14 槽钢结构偏载荷的疲劳寿命云图

U 结构中间载荷的疲劳损伤云图和疲劳寿命云图分别如图 15、图 16 所示。

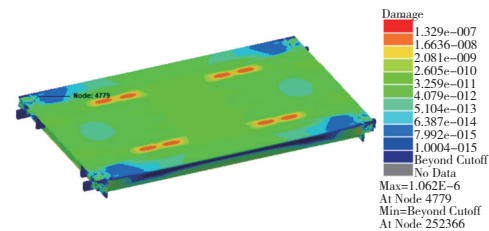


图 15 U 型钢结构中间载荷的疲劳损伤云图

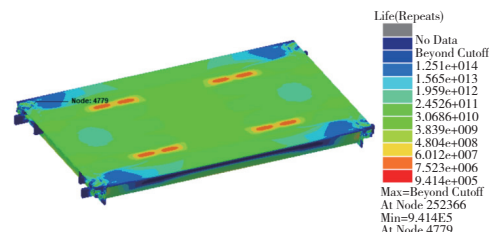


图 16 U 型钢结构中间载荷的疲劳寿命云图

由图 15、图 16 可知,中间载荷工况下,U 型钢结构疲劳损伤最大的部位、疲劳寿命最小的部位均在连接件,在节点 4779 处,最大累积损伤为 0.001062,疲劳最小寿命为 941400 次循环。

d) U 型钢结构偏载荷

U 结构偏载荷的疲劳损伤云图和疲劳寿命云图分别如图 17、图 18 所示。

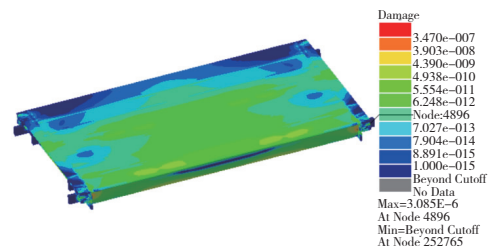


图 17 U 型钢结构偏载荷的疲劳损伤云图

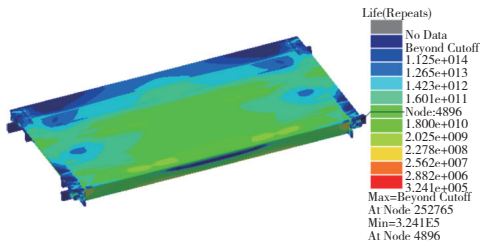


图 18 U 型钢结构偏载荷的疲劳寿命云图

由图 17、图 18 可知,偏载荷工况下,U 型钢结构疲劳损伤最大的部位、疲劳寿命最小的部位均在连接件,在节点 4896 处,最大累积损伤为 0.003085,疲劳最小寿命为 324100 次循环。

两种工况下的最大疲劳损伤值与最小疲劳寿命,整理结果见表 2。

表 2 疲劳损伤与寿命

项目	中间载荷		偏载荷	
	槽钢	U 型钢	槽钢	U 型钢
最大损伤	0.002	0.001	0.006	0.003
性能提升/%	50.0		50.0	
最小寿命/次	446 900	941 400	172 000	324 100
性能提升/%	52.5		46.8	

由图 14-图 18 及表 2 可得:

1) 两种结构疲劳损伤最大、寿命最小的部位均集中在连接件支撑传感器处。

2) 中间载荷工况下,U 型钢结构秤体最大疲劳损伤相较于槽钢结构秤体疲劳损伤降低了 50.0%;偏载荷工况下,U 型钢结构秤体最大疲劳损伤相较于槽钢结构秤体疲劳损伤降低了 50.0%。

通过 nCode Designlife 求解后可导出 U 型钢结构与槽钢结构两种工况下 10 组寿命最低的节点数据见表 3、表 4。

表 3 中间载荷疲劳寿命

序号	槽钢寿命/次	U 型钢寿命/次	寿命差值	寿命提升/%
1	446 900	941 400	494 500	53
2	734 600	1 343 000	608 400	45
3	822 000	1 408 000	586 000	42
4	1 025 000	1 473 000	448 000	30
5	1 025 000	1 701 000	676 000	40
6	1 071 000	1 920 000	849 000	44
7	1 073 000	1 954 000	881 000	45
8	1 115 000	2 021 000	906 000	45
9	1 177 000	2 059 000	882 000	43
10	1 206 000	2 167 000	961 000	44

表 4 偏载荷疲劳寿命

序号	槽钢寿命/次	U 型钢寿命/次	寿命差值	寿命提升/%
1	172 000	204 100	32 100	16
2	217 300	255 400	38 100	15
3	385 200	440 400	55 200	13
4	393 700	464 600	70 900	15
5	463 300	546 200	82 900	15
6	550 500	629 100	78 600	12
7	605 400	695 000	89 600	13
8	617 600	707 300	89 700	13
9	641 900	751 200	109 300	15
10	691 500	926 600	235 100	25

由表 3、表 4 可得,中间载荷工况下,U 型钢结构较槽钢结构最短寿命提高了 44%;偏载荷工况下,U 型钢结构较槽钢结构最短寿命提高了 15%。

4 结语

1) 由有限元静力学分析结果可知,U 型钢结构秤体较槽钢结构秤体在力学性能上有明显提高,有效降低疲劳损伤风险。

2) 由疲劳分析结果可知,U 型钢结构秤体疲劳寿命较槽钢结构秤体的寿命显著提高,对于秤体使用寿命设计具有一定的意义。

参考文献:

- [1] 马智晖. 如何延长电子汽车衡称重传感器的使用寿命[J]. 计量与测试技术,2009,36(2):25-26.
- [2] 李艳泽,李丰年. 动态汽车衡运行期间注意事项[J]. 科技咨询导报,2007,4(2):38.
- [3] 刘九卿. 提高称重传感器准确度和稳定性的若干问题[J]. 衡器,2013,42(5):1-6.
- [4] 林宇立,杨晓翔,韦铁平. SCS-100TU 型电子汽车衡秤体结构优化[J]. 机电工程,2014,31(3):346-349.
- [5] 张荣轩. 电子汽车衡秤体设计分析与计算[J]. 衡器,2011,40(11):33-35,38.
- [6] 陈科,王峰. 结构有限寿命设计法——名义应力法[J]. 中国重型装备,2010(2):1-3.
- [7] 李现春,胡晓兵,李毅,等. 基于 nCode Design-Life 的重型起重设备疲劳寿命预测研究[J]. 机械,2017,44(8):1-6.
- [8] 郭佳欢. 车轮弯曲疲劳与径向疲劳研究及寿命预测[D]. 镇江:江苏大学,2016.

收稿日期:2021-03-26