DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.03.103　　文章编号：1000-128X(2023)03-0141-09

受电弓强度参数灵敏度分析及疲劳寿命计算

张　巍[1]，祁文延[1]，罗　群[1,2]，陈　阳[1]，张程政[1]，梅桂明[1]

（1.西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室，四川 成都　610031；
2.西南交通大学 机械工程学院，四川 成都　610031）

摘　要：受电弓作为列车受流的关键部分，其强度及疲劳寿命对列车的稳定运行起关键作用，文章以某地铁线路搭载受电弓为例，展开了受电弓强度参数灵敏度及疲劳寿命的研究。首先，建立受电弓有限元模型进行静强度分析以及强度校核，并通过响应面法对其上框架展开了灵敏度分析；其次，基于准静态叠加法将线路实测数据转换为受电弓上框架的疲劳载荷应力谱；最后，结合疲劳分析软件nCode对受电弓上框架展开了疲劳分析预测。结果表明：该受电弓框架在额定工作高度下的最大应力满足材料强度校核要求，各参数对上框架最大应力的影响程度从大到小依次为上框架厚度a、上框架厚度b、泊松比、弹性模量，且受电弓上框架最小寿命值满足标准对疲劳寿命的规定要求。

关键词：受电弓；静强度；疲劳寿命；响应面法；准静态应力叠加法

中图分类号：U264.3^{+}4；U231　　**文献标识码：**A

Sensitivity analysis of strength parameters and calculation of fatigue life of pantograph

ZHANG Wei[1], QI Wenyan[1], LUO Qun[1,2], CHEN Yang[1], ZHANG Chengzheng[1], MEI Guiming[1]

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;
2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Pantograph is a critical part in the current receiving of trains, and its strength and fatigue life are of great importance to the stable operation of trains. This paper presents a research of the sensitivity and fatigue life of pantograph strength parameters taking a pantograph of a subway line as an example. Firstly, a pantograph finite element model was established to analyze the static strength and check the strength, and a sensitivity analysis of the upper frame was carried out using the response surface method. Secondly, the measured data was converted into the fatigue load spectrum of the upper frame based on the quasi-static superposition method. Finally, combined with the fatigue analysis software nCode, the fatigue analysis and prediction of the upper frame were carried out. The results show that the maximum stress of the pantograph frame at the rated working height meets the strength verification requirements of the material. The degrees of influence of the parameters on the maximum stress of the upper frame in the order from large to small are: the thickness of the upper frame *a,* the thickness of the upper frame *b*, the Poisson's ratio, the elastic modulus. In addition, the minimum life of the upper frame on the pantograph meets the specified requirements of the standard for fatigue life.

Keywords: pantograph; static intensity; fatigue life; response surface method; quasi-static stress superposition method

---

基金项目：四川省自然科学基金资助项目（2022NSFSC0468，2022NSFSC1937）
通信作者：梅桂明（1974—），男，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事受电弓–接触网系统动力学的研究；E-mail: 13880068468@163.com
引用格式：张巍, 祁文延, 罗群, 等. 受电弓强度参数灵敏度分析及疲劳寿命计算[J]. 机车电传动, 2023(3): 141-149.
Citation: ZHANG Wei, QI Wenyan, LUO Qun, et al. Sensitivity analysis of strength parameters and calculation of fatigue life of pantograph[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(3): 141-149.

0 引言

城市地铁列车通过车载受电弓从刚性接触网系统获取牵引电能，受电弓作为高压电流传输过程中的核心结构，其结构强度及疲劳寿命对列车稳定受流和安全运行有着至关重要的作用。受电弓与刚性接触网直接接触因而受到不同周期循环载荷作用，且服役环境恶劣，受电弓构件特别是上框架部分极易产生疲劳裂纹[1]，从而导致弓网受流质量降低并产生较大的安全隐患。因此，研究受电弓强度参数灵敏度及准确分析和预测周期循环载荷激励下的受电弓上框架疲劳寿命就十分重要。

近年来，受电弓因其结构强度不足或周期性疲劳而产生裂纹的现象引起了广泛关注，大量学者对受电弓进行强度分析、疲劳裂纹及疲劳寿命研究。文献[1]应用等效损伤准则提出一种受电弓疲劳试验载荷谱编制方法并用于疲劳台架试验。文献[2]基于疲劳裂纹扩展理论对带有裂纹的受电弓在常温、大气环境以及腐蚀环境下疲劳裂纹扩展寿命进行预测。文献[3]针对刚度和阻尼特性随时间变化的TSG19型受电弓，提出了基于Miner累积损伤理论的可靠性模型。文献[4]研究了冲击载荷对受电弓绝缘子组疲劳断裂的影响，并提出了一种改进后端绝缘子组设计结构的方法。文献[5]通过分析受电弓滑板实测形面数据，研究了滑板磨耗对受电弓抗疲劳性能的影响。文献[6]编制了具有加速性和简便性的一维程序加载谱，提出载荷反推方法并进行了台架试验验证。

综上所述，现有学者针对受电弓疲劳强度已做了大量研究，但载荷谱获取大多采用仿真数据或直接应用周期性载荷谱，与受电弓的实际工作状态存有差异。为提高载荷谱获取的真实性和疲劳寿命计算的准确性，本文对国内某地铁进行了线路实测，获得了受电弓准确的线路数据，并根据该实测数据，利用有限元软件对受电弓进行静强度计算及校核；同时为研究上框架各参数对受电弓上框架最大应力的影响，采用响应面法进行了上框架强度灵敏度分析；最后通过准静态应力叠加法得到上框架载荷谱，并结合nCode软件对受电弓上框架进行疲劳分析预测。

1 受电弓模型建立

1.1 受电弓三维模型

国内某地铁线路采用的某型号受电弓结构主要由以下部分组成：滑板、滑板托架、弓头悬挂装置、上框架、平衡杆、下臂杆、拉杆、底架。受电弓各杆件之间通过铰接连接在一起，底架用来支持框架部分并通过绝缘子固定在车辆顶部。结合实际线路运行情况，设置额定升弓高度为550 mm，受电弓底架、下臂杆、上框架与钢板弹簧设置为同种钢材，拉杆、滑板托架与平衡杆设置为同种铝合金材料，滑板设置为碳纤维材料，受电弓各部分具体材料参数见表1。

表1 受电弓材料参数

Table 1 Parameters of pantograph materials

类型	材料型号	质量密度/($t\cdot mm^{-3}$)	弹性模量/MPa	许用应力/MPa	泊松比
底架	钢	7.85×10^{-9}	2.09×10^{5}	235	0.3
下臂杆	钢	7.85×10^{-9}	2.09×10^{5}	235	0.3
上框架	钢	7.85×10^{-9}	2.09×10^{5}	235	0.3
钢板弹簧	钢	7.85×10^{-9}	2.09×10^{5}	235	0.3
拉杆	铝合金	2.70×10^{-9}	7.20×10^{4}	190	0.3
滑板托架	铝合金	2.70×10^{-9}	7.20×10^{4}	190	0.3
滑板	碳纤维	2.70×10^{-9}	2.30×10^{5}	190	0.1
平衡杆	铝合金	2.70×10^{-9}	7.20×10^{4}	190	0.3

1.2 受电弓有限元模型

有限元模型的建立不仅要充分考虑受电弓实际结构的力学特性，而且要在满足精度的前提下尽可能提高计算速度，最大可能地采用少且简单的网格单元。本文根据该受电弓的设计图纸进行三维实体建模，再利用有限元前处理软件Hypermesh对三维实体赋予材料属性和进行网格划分。由于受电弓实际模型较为复杂，在进行静力学计算时可以将对结果影响不大的结构进行适当简化，简化后的有限元模型可反映受电弓结构的力学特性，且具备较高的计算精度。本文对受电弓的底架、上框架、下臂杆及弓头部分杆件采用板壳单元网格划分，滑板、弓角和一些不规则部件则采用四面体网格细化处理，受电弓有限元模型如图1所示。

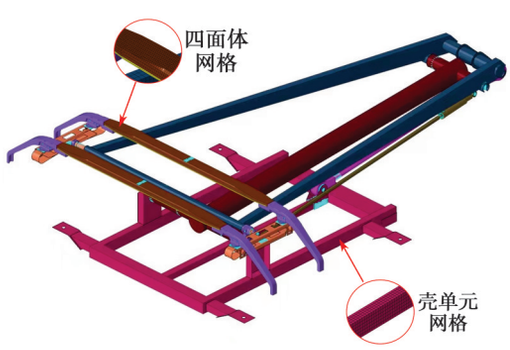


图1 受电弓有限元模型

Fig. 1 Finite element model of pantograph

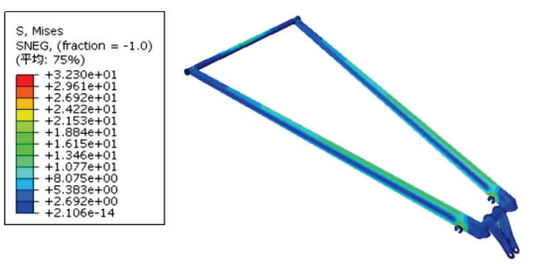
1.3 有限元模型边界设置

由于对受电弓进行静力学强度分析时，只考虑静态升弓状态，故弓网接触力可简化为施加在滑板上的集中力。根据TB/T 3271—2011标准[7]规定：直流系统中列车速度小于等于200 km/h时，接触力最大值为300 N。结合受电弓线路运行的实际情况以及实测数据，在静力学强度分析时，受电弓底架施加固定约束，

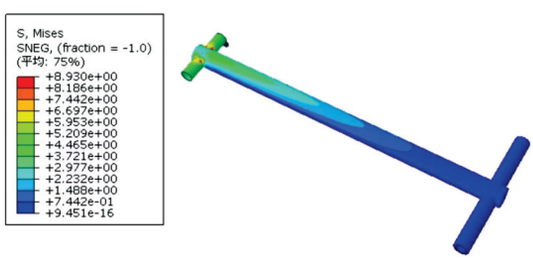
受电弓整体沿垂向方向施加重力加速度为 9.81 m/s^2，施加在弓头的静态总接触力设置为 200 N。

2　静力学仿真结果分析

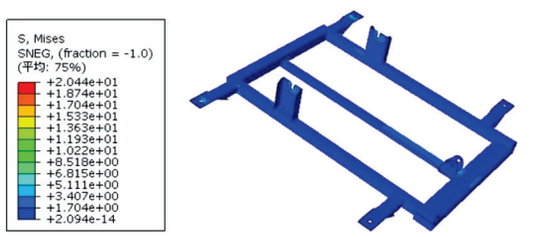
在 Hypermesh 软件中进行网格划分和赋予材料属性后，进而在 Abaqus 软件中设置载荷及边界条件，最终得到静力学仿真分析结果，受电弓的框架结构应力云图如图 2 所示。



(a) 上框架应力云图



(b) 下臂杆应力云图



(c) 底架应力云图

图 2　受电弓静力学仿真分析

Fig. 2　Statics simulation analysis of pantograph

受电弓在此工况下，底架受到的最大应力为 20.44 MPa，下臂杆受到的最大应力为 8.93 MPa，上框架受到的最大应力为 32.30 MPa，结构强度的评定标准[8]为

$$\sigma_r \leqslant [\sigma] \tag{1}$$

式中：σ_r 为相当应力；$[\sigma]$ 为材料许用应力。

对应不同的强度理论，σ_r 和 $[\sigma]$ 的计算公式不同，由于受电弓的金属材料都属于延性材料，故选用第四强度理论对其进行强度校核。

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]} \tag{2}$$

$$[\sigma] = \sigma_s / n_s \tag{3}$$

式中：σ_1 为第一主应力；σ_2 为第二主应力；σ_3 为第三主应力；n_s 为安全因子；σ_s 为材料屈服极限；σ_r 取有限元分析结果中的 von-Mises 等效应力。

受电弓静强度分析结果见表 2。由表 2 可知，该型受电弓框架在该载荷作用下满足强度校核要求。

表 2　受电弓静强度分析结果

Table 2　Static strength analysis results of pantograph

部件	材料	最大应力/MPa	许用应力/MPa	安全系数	校核结果
底架	钢	20.44	235	11.50	合格
下臂杆	钢	8.93	235	26.32	合格
上框架	钢	32.30	235	7.28	合格

3　受电弓强度影响参数灵敏度分析

受电弓强度参数灵敏度分析对于实现受电弓轻量化设计及提高受电弓有效使用寿命具有一定意义，而响应面法作为一种参数灵敏度分析方法及参数优化法已在多个学科中得到使用。响应面法的基本原理为：在结构的真实响应值 Y 未知的情况下，假定响应值 Y 与影响结构的随机参数矢量 $\boldsymbol{X}=(X_1, X_2, X_3, \cdots, X_N)$ 的关系可以用一个通过二次项拟合得到的多元二次方程描述。对随机参数矢量 $\boldsymbol{X}$ 进行取样，利用合理的试验设计方法并通过试验得到结构响应的样本 Y，在后续分析中用响应面二次回归方程来代替结构的真实响应[9]。

响应面方程二阶数学表达式为：

$$\hat{Y} = C_0 + \sum_{i=1}^{N} C_i X_i + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} C_{ij} X_i X_j \tag{4}$$

式中：$\hat{Y}$ 表示结构的真实响应值；C_0、C_i、C_{ij}(i =1, ⋯, N; j=i, ⋯, N)分别为常数项、一次项、二次项的待定系数；X 为输入变量；N 为输入变量个数，采用最小二乘法对样本点输入、输出变量拟合得到响应面函数中的待定因子。

Box-Behnen Design（BBD）适用于 2~5 个变量的参数设计，本文设计变量参数为 4 个，因此采用 BBD 响应面法对受电弓上框架强度参数进行灵敏度分析。每个变量因素取 3 个水平，以(−1,0,1)对其进行编码，设计表以 0 为中心点，1、−1 为立方体相对应的最高值与最低值。以各试验单因素最优取值点为中心，上、下区域各取一个水平值作为响应面试验设计水平，三变量(X_1, X_2, X_3)的 BBD 设计试验点分布如图 3。

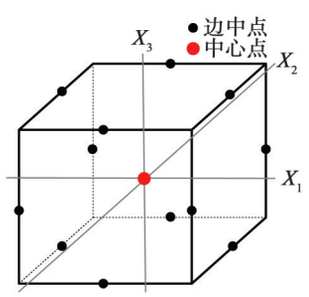


图 3　三变量 Box-Behnen 样本点

Fig. 3　Three-variable Box-Behnen sample point

3.1　受电弓上框架设计变量及试验设计

受电弓上框架是受电弓框架的重要组成部分，如

图4所示，其结构强度往往关系着受电弓–接触网系统的受流质量。

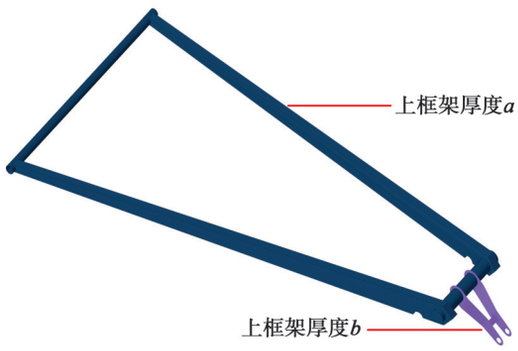


图4　受电弓上框架示意图

Fig. 4　Schematic diagram of pantograph upper frame

为研究受电弓上框架的材料厚度、材料属性对其结构强度的影响，本文选取受电弓上框架厚度a、上框架厚度b、泊松比、弹性模量这4个随机影响因素作为设计变量，研究受电弓上框架最大应力Y的响应情况。基于BBD复合设计原则，各设计变量编码值与水平值对应如表3所示，不同因子水平下受电弓上框架最大应力Y的试验设计及结果如表4所示。

表3　设计因素编码及水平

Table 3　Design factor codes and levels

因素	编码	水平		
		−1	0	1
上框架厚度a/mm	A	1.5	3	4.5
上框架厚度b/mm	B	6	8	10
弹性模量/MPa	C	2.0×10^5	2.1×10^5	2.2×10^5
泊松比	D	0.26	0.30	0.34

3.2　二次多项式回归模型建立及显著性分析

对表4中试验数据样本进行处理，采用数值分析方法拟合得到上框架最大应力Y与各参数之间的二次多项式回归方程如下：

$$\begin{aligned}Y=&101.93719-35.42417A-0.33229B+0.012417C+\\&1.17708D+0.020833AB-1\times10^{-3}AC-1.375AD+\\&1.72685\times10^{-16}BC-0.03125BD-6.3672\times10^{-15}CD+\\&3.99019A^2+0.011979B^2-2.08333\times10^{-5}C^2+\\&6.51042D^2\end{aligned}\tag{5}$$

式(5)的方差分析结果如表5所示，其中F值与P值为统计学指标，用以检验显著性差异，每一个F值都有与之对应的P值，F值越大对应的P值越小。结合相关RSM文献[10-15]对响应面模型的精度分析：二次多项式模型显著度检验值$P<0.05$时，模型关系显著；$P<0.01$时，模型关系高度显著。由表5可知，二次多项式模型的$P<0.000\,1$，说明二次多项式的响应面模型具有极显著差异性，响应值上框架最大应力Y与上框架厚度a、上框架厚度b、泊松比、弹性模量之间的回归关系十分显著，得到的响应面拟合方程具有统计学意义。通过对比模型中单变量项A、B、C、D的F值大小，F值越大表明参数对模型的影响程度越大，可得出各因素影响程度从大到小依次为上框架厚度a、上框架厚度b、泊松比、弹性模量。

表4　Box-Behnken试验设计及结果

Table 4　Box-Behnken test design and results

试验序号	A/mm	B/mm	C/MPa	D/	Y/MPa
1	1.5	6	2.1×10^5	0.30	58.08
2	4.5	6	2.1×10^5	0.30	22.11
3	1.5	10	2.1×10^5	0.30	57.57
4	4.5	10	2.1×10^5	0.30	21.85
5	3.0	8	2.0×10^5	0.26	30.89
6	3.0	8	2.2×10^5	0.26	30.89
7	3.0	8	2.0×10^5	0.34	30.88
8	3.0	8	2.2×10^5	0.34	30.88
9	1.5	8	2.1×10^5	0.26	57.57
10	4.5	8	2.1×10^5	0.26	21.94
11	1.5	8	2.1×10^5	0.34	57.93
12	4.5	8	2.1×10^5	0.34	21.97
13	3.0	6	2.0×10^5	0.30	31.07
14	3.0	10	2.0×10^5	0.30	30.74
15	3.0	6	2.2×10^5	0.30	31.08
16	3.0	10	2.2×10^5	0.30	30.75
17	1.5	8	2.0×10^5	0.30	57.72
18	4.5	8	2.0×10^5	0.30	21.94
19	1.5	8	2.2×10^5	0.30	57.78
20	4.5	8	2.2×10^5	0.30	21.94
21	3.0	6	2.1×10^5	0.26	31.10
22	3.0	10	2.1×10^5	0.26	30.77
23	3.0	6	2.1×10^5	0.34	31.09
24	3.0	10	2.1×10^5	0.34	30.75
25	3.0	8	2.1×10^5	0.30	30.87

3.3　响应面图参数灵敏度分析

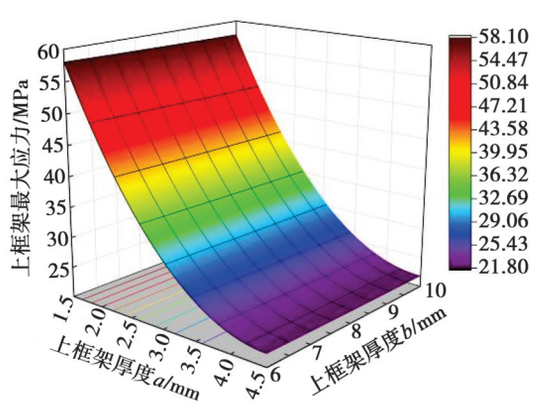
根据回归优化模型，分别绘制4个随机变量上框架厚度a、上框架厚度b、弹性模量、泊松比四者两两交互作用下的响应面图，并结合相关RSM文献[10-15]对响应面图进行分析。图5(a)表示上框架厚度a与上框架厚度b交互作用下对上框架最大应力Y的影响，当上框架厚度a取值从1.5 mm增加到4.5 mm时，上框架最大应力在58~21 MPa范围逐步减小且减小数值较大，上框架厚度b从6~10 mm这个方向上响应面图的变化较为平稳，由图5(a)可知当上框架厚度a与上框架厚度b交互作用时，上框架厚度a对上框架最大应力Y的影响是最为显著的。同理，由图5(b)、图5(c)可推出以下结论：当上框架厚度a分别与弹性模量、泊松比交互作用时，上框架厚度a对上框架最大应力Y的影响最为显著。图5(d)~图5(e)表示上框架厚度b分别与弹性模量、泊松比交互作用时对上框架最大应力Y的影响，当上框架厚度b取值为6~10 mm时，上框架最大应力在32~30

表5　上框架最大应力二次多项式回归模型的方差分析结果

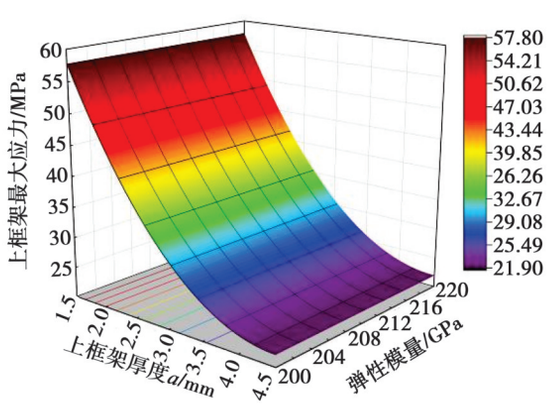
Table 5　ANOVA results of the quadratic polynomial regression model of the maximum stress upper frame

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著度
二次多项式模型	4 414.96	14	315.35	1.339×10^{5}	< 0.000 1	极显著
A	3 848.50	1	3 848.50	1.634×10^{6}	< 0.000 1	极显著
B	0.37	1	0.37	155.99	< 0.000 1	极显著
C	5.333×10^{-4}	1	5.333×10^{-4}	0.23	0.641 6	
D	9.633×10^{-3}	1	9.63×10^{-3}	4.09	0.062 7	
AB	0.016	1	0.016	6.63	0.022 0	显著
AC	9.000×10^{-4}	1	9.000×10^{-4}	0.38	0.546 5	
AD	0.027	1	0.027	11.56	0.004 3	显著
BC	0.000	1	0.000	0.000	1.000 0	
BD	2.500×10^{-5}	1	2.500×10^{-5}	0.011	0.919 4	
CD	0.000	1	0.000	0.000	1.000 0	
A^2	522.83	1	522.83	2.219×10^{5}	< 0.000 1	极显著
B^2	0.015	1	0.015	6.32	0.024 8	显著
C^2	2.815×10^{-5}	1	2.815×10^{-5}	0.012	0.914 5	
D^2	7.038×10^{-4}	1	7.038×10^{-4}	0.30	0.593 3	
残差	0.033	14	2.356×10^{-3}			
失拟	0.033	10	3.298×10^{-3}			
纯误差	0.000	4	0.000			
总值	4 415.00	28				

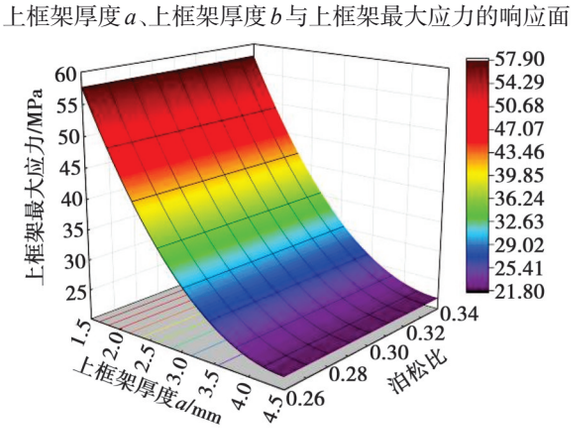
MPa范围逐步递减，弹性模量在200~220 GPa及泊松比在0.26~0.34这个方向上响应面的变化为平稳增加，结果表明当上框架厚度b分别与弹性模量、泊松比交互作用时，上框架厚度b对上框架最大应力Y的影响较为显著。图5(f)表示弹性模量与泊松比交互作用下对上框架最大应力Y的影响，结果显示泊松比与弹性模量相比较而言对上框架最大应力Y的影响较为显著，但影响程度较小。根据上述响应面图分析结果，4个参数对上框架最大应力的影响程度从大到小依次为上框架厚度a、上框架厚度b、泊松比、弹性模量，与二次多项式回归模



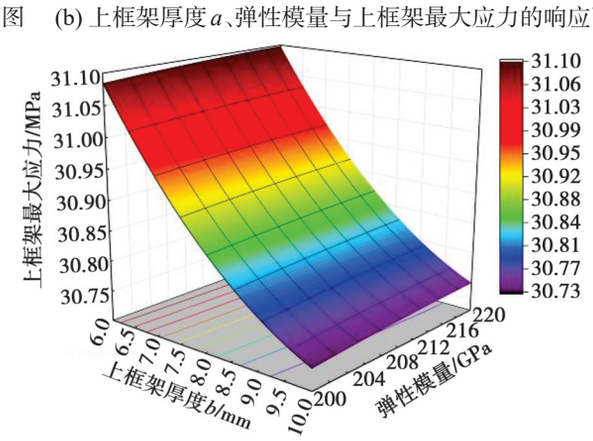
(a) 上框架厚度a、上框架厚度b与上框架最大应力的响应面图



(b) 上框架厚度a、弹性模量与上框架最大应力的响应面图

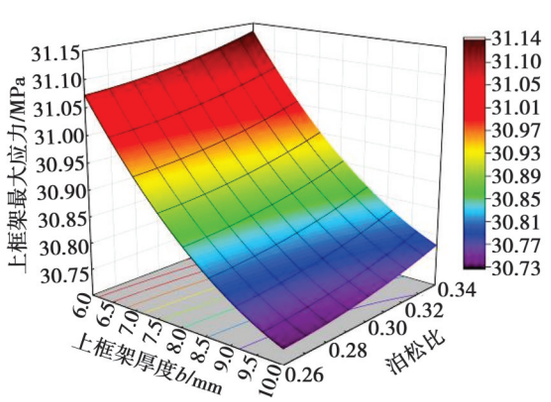


(c) 上框架厚度a、泊松比与上框架最大应力的响应面图

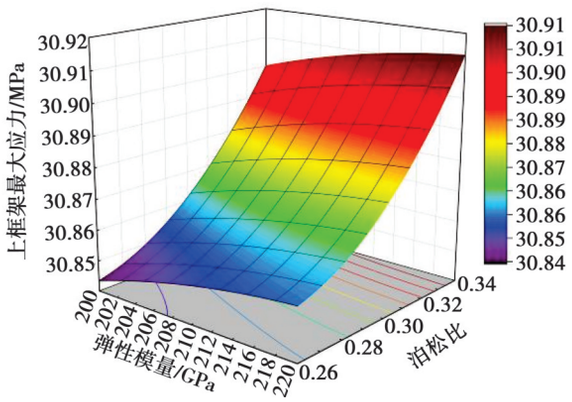


(d) 上框架厚度b、弹性模量与上框架最大应力的响应面图

型的方差分析中得到的结果一致。



(e) 上框架厚度b、泊松比与上框架最大应力的响应面图



(f) 弹性模量、泊松比与上框架最大应力的响应面图

图5 不同因素交互作用下对上框架最大应力的响应曲面图

Fig. 5 Response surface diagram of the maximum stress of the upper frame under the interaction of different factors

4 受电弓上框架疲劳寿命分析

4.1 受电弓载荷谱获取及应力谱转换

受电弓上框架的疲劳寿命分析需要准确获取载荷谱，载荷谱一般采用动力学仿真或线路实测的方式获取。动力学软件仿真计算可较为快速地获取载荷谱且成本较低，但相较于线路实测数据而言其准确性不足。为保证载荷谱获取的准确性，本文采取线路试验进行实测，并通过准静态应力叠加法转化为受电弓上框架载荷谱。具体测试方法是在受电弓滑板下方与弓头悬挂弹簧之间安装8个力传感器来采集弓–网实时接触力，并对这8个接触力数据进行修正求和得到总接触力，线路试验流程图如图6所示。

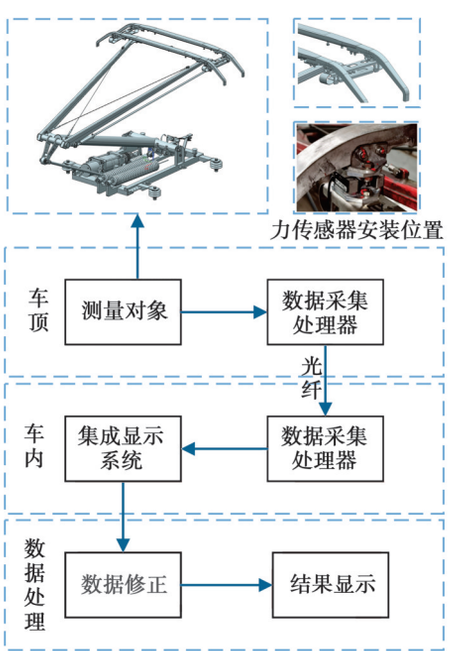


图6 线路试验流程图

Fig. 6 Flow chart of line test

由于线路试验实测数据文件较大，导入nCode软件中计算速度缓慢，因此本文选取线路中的一个站间数据，截取运行时间5 s，运行速度为120 km/h下的线路数据，如图7所示。

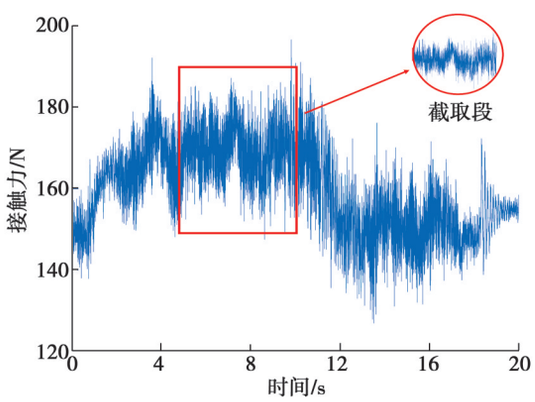


图7 实测弓–网接触力

Fig. 7 Measured pantograph-catenary contact force

将线路试验获取的载荷谱转换为应力谱，常见的处理方法有以下2个：①采用有限元软件进行瞬态动力学分析；②准静态应力叠加法。采用有限元瞬态动力学分析法能得到较为准确的疲劳应力谱，但由于其对计算机性能要求较高以及分析耗时较长，综合考虑后采用准静态应力叠加法[16]求解受电弓上框架疲劳应力谱，即在同一方向单位静载荷的作用下，计算特定载荷工况中任一时刻的相同结构位置的弹性应力应变状态，然后将其与对应的实测载荷谱或动力学仿真载荷谱按时间叠加后得到上框架应力谱，如图8所示。

4.2 上框架疲劳寿命分析

在地铁线路实际运行中，上框架是受电弓最易发生疲劳破坏的部分之一，其结构寿命关系着受电弓–接触网系统的受流质量，因此对受电弓上框架进行疲劳寿命分析及预测至关重要。根据转换的应力谱数据和受电弓结构的S-N曲线，采用合适的损伤累计原则可以较为准确地预测受电弓的疲劳寿命。本文基于名义

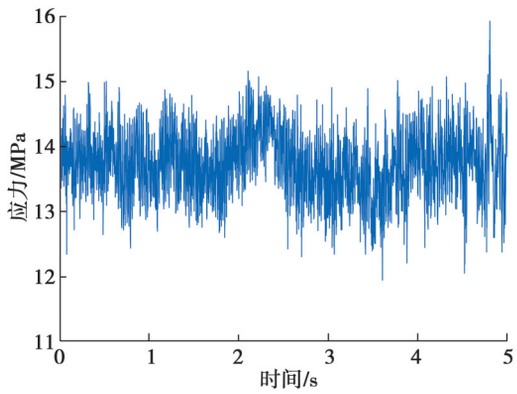


图8　受电弓上框架应力谱

Fig. 8　Stress spectrum of pantograph upper frame

应力法对受电弓结构的疲劳特性进行分析。首先，定义结构的名义应力和应力集中系数，以S-N曲线描述材料的疲劳特性，进而根据Miner线性累计损伤理论[17]计算出上框架的疲劳寿命。

累计的损伤为：

$$D=n/N \tag{6}$$

式中：n为变幅载荷；N为对应载荷作用下的疲劳寿命；D为结构的失效临界判据，当其等于1时，表示结构在经历N次循环后完全损伤，构件将会疲劳失效。

上述疲劳分析过程在nCode Design Life软件中实现，基本流程如图9所示。

首先导入受电弓的静强度有限元计算结果和线路实测疲劳应力谱，然后设置抗拉强度、弹性模量、泊松比、屈服强度、密度等材料参数生成S-N曲线并采用S-N Analysis模块进行疲劳分析，对分析结果进行后处理得到受电弓上框架疲劳累计损伤及寿命云图，分析流程如图10所示。

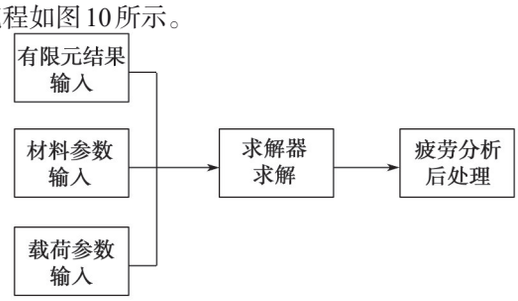


图9　疲劳分析基本流程

Fig. 9　Basic process of fatigue analysis

4.3　疲劳分析结果

在S-N应力疲劳分析引擎中，应力组合方法设置为Critical Plane，平均应力修正方法采用德国机械工程学会标准FKM，存活率设置为90%[18]，得到最终疲劳分析结果：受电弓上框架最大损伤值为2.674×10^{-10}，损伤云图如图11所示；对应的上框架疲劳寿命为2.011×10^{8}次，寿命云图如图12所示。

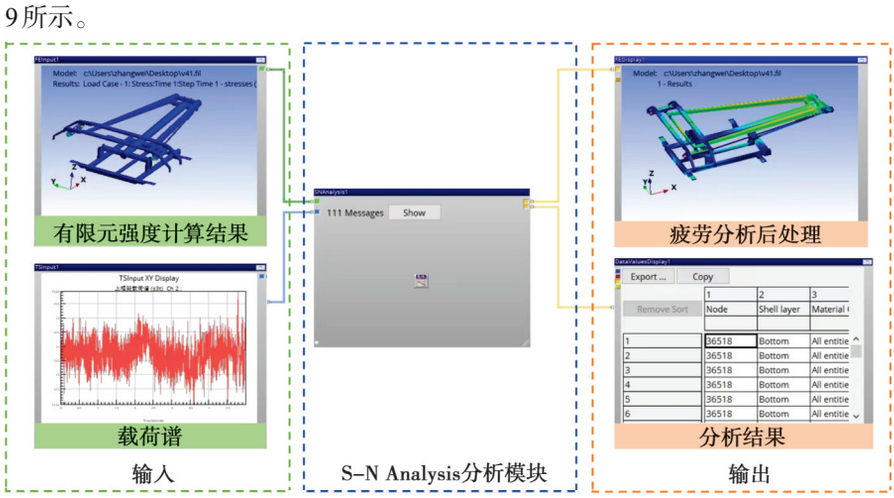


图10　nCode Design Life分析流程

Fig. 10　Process nCode Design Life analysis

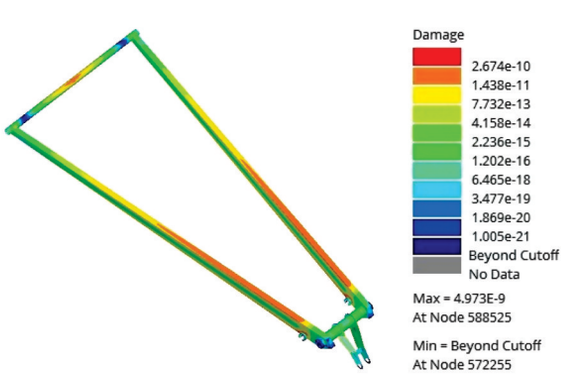


图11　受电弓上框架损伤云图

Fig. 11　Nephogram of damage of pantograph upper frame

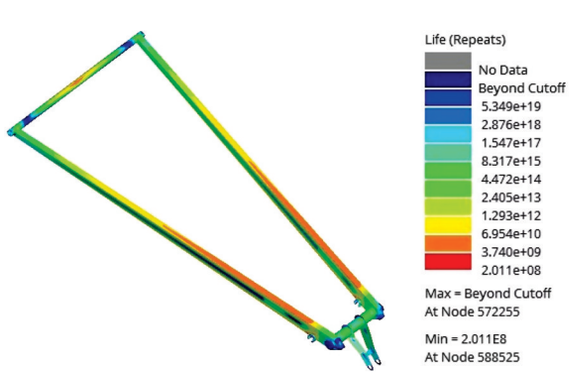


图12　受电弓上框架寿命云图

Fig. 12　Nephogram of life of pantograph upper frame

标准GB/T 26561.1—2018[19]中规定：受电弓框架的结构设计寿命为行驶里程大于1.2×10^7 km或使用年限超过30年，以两个结果中先到达的为准。地铁线路实际运营速度为120 km/h，截取的载荷谱时间长度为5 s，则地铁在5 s内的行驶距离为0.167 km，通过计算得到受电弓上框架的总体寿命为3.35×10^7 km，大于标准中规定的1.2×10^7 km，满足框架疲劳寿命要求。

5 结论

为实现受电弓轻量化设计，提高受电弓有效使用寿命，本文以国内某线路上搭载受电弓为研究对象，开展了受电弓强度参数灵敏度分析及受电弓疲劳寿命预测的研究。

结论如下：

① 在接触压力为200 N载荷工况下，对受电弓进行静力学仿真分析，受电弓框架部分最大应力为32.3 MPa均未超过其许用应力，满足强度校核要求。

② 应用响应面法对受电弓上框架最大应力影响参数进行灵敏度分析，影响程度从大到小依次为上框架厚度a、上框架厚度b、泊松比、弹性模量，这一结果对后续受电弓轻量化设计具有指导意义。

③ 采用Abaqus、nCode等软件进行有限元联合仿真可预测受电弓上框架寿命为3.35×10^7 km，满足标准设计要求。在设计阶段对受电弓疲劳寿命进行预估，有助于选取合理的设计参数，节约时间和人力成本。

④ 本文采用准静态应力叠加法得到的疲劳应力谱较为保守，后续研究可利用有限元软件进行瞬态动力学分析，以获取更准确的疲劳应力谱进行寿命预测。

参考文献：

[1] MEI Guiming, LUO Qun, QIAO Wei, et al. Study of load spectrum compilation method for the pantograph upper frame based on multi-body dynamics[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135: 106099.

[2] 景所立, 贾步超, 于延尊, 等. 受电弓疲劳裂纹扩展特性及寿命预测研究[J]. 机械强度, 2021, 43(5): 1191-1197.
JING Suoli, JIA Buchao, YU Yanzun, et al. Research on propagation characteristics of fatigue crack and life prediction for the pantograph[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(5): 1191-1197.

[3] SONG Dongli, ZHANG Weihua, HE Ping, et al. Reliability analysis of TSG19-type pantograph based on time-dependent parameters[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 35: 153-163.

[4] JIA Fang, XU Fengyu, XIA Zhijie, et al. Fatigue properties of the pantograph–insulator system of metro trains: experiments and the design for improvement[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(10): 4549-4558.

[5] 宋冬利, 江亚男, 张卫华. 滑板磨耗对受电弓系统服役性能的影响研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 450-457.
SONG Dongli, JIANG Yanan, ZHANG Weihua. Effects of contact strips wear on service performance of pantograph system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(3): 450-457.

[6] 乔维, 梅桂明, 王江文, 等. 高速受电弓上框架加速寿命试验载荷谱编制研究[J]. 机械强度, 2021, 43(6): 1422-1429.
QIAO Wei, MEI Guiming, WANG Jiangwen, et al. Study on compiling load spectrum of acceleration life test for high speed pantograph frame[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(6): 1422-1429.

[7] 南车株洲电力机车研究所有限公司. 轨道交通 受流系统 受电弓与接触网相互作用准则: TB/T 3271—2011[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
CSR Zhuzhou electric locomotive Research Institute Co., Ltd. Railway applications–Current collection systems–Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead contact line: TB/T 3271—2011[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.

[8] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
SUN Xunfang, FANG Xiaoshu, GUAN Laitai. Mechanics of materials[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2013.

[9] 闫明, 孙志礼, 杨强. 基于响应面方法的可靠性灵敏度分析方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 67-71.
YAN Ming, SUN Zhili, YANG Qiang. Analysis method of reliability sensitivity based on response surface methods[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(10): 67-71.

[10] 张宇, 李昌, 韩兴, 等. 基于nCode汽车后桥疲劳失效灵敏度评估方法[J]. 机械强度, 2021, 43(4): 936-944.
ZHANG Yu, LI Chang, HAN Xing, et al. Fatigue failure sensitivity evaluation method of automobile rear axle based on nCode[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(4): 936-944.

[11] HUANG Xinyu, YAO Shouguang, YANG Xiaohu, et al. Melting performance assessments on a triplex-tube thermal energy storage system: optimization based on response surface method with natural convection[J]. Renewable Energy, 2022, 188: 890-910.

[12] 唐政, 余越, 刘羽飞, 等. 田间作物表型获取无人车平台主体结构设计与优化[J/OL]. 浙江大学学报(农业与生命科学版): 1-13. (2022-05-19) [2022-12-23]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1247.S.20220518.2107.002.html.
TANG Zheng, YU Yue, LIU Yufei, et al. Design and optimization of main structures of unmanned vehicle-based field crop phenotyping platform[J/OL]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences): 1-13. (2022-05-19)

[2022-12-23]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/33.1247. S.20220518.2107.002.html.

[13] REN Fan, DU Jun, YANG Xiaohu, et al. Optimization on a novel irregular snowflake fin for thermal energy storage using response surface method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 200: 123521.

[14] LI Dong, CHEN Hao, GAO Xin, et al. Establishment and optimization of partial nitrification/anammox/partial nitrification/anammox (PN/A/PN/A) process based on multi-stage ammonia oxidation: using response surface method as a tool [J]. Bioresource Technology, 2022, 361: 127722.

[15] OMRANIAN S R, VAN DEN BERGH W, HE Liang, et al. Incorporating 3D image analysis and response surface method to evaluate the effects of moisture damage on reinforced asphalt mixtures using glass and polypropylene fibers [J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 129177.

[16] LUO R K, GABBITAS B L, BRICKLE B V, et al. Fatigue damage evaluation for a railway vehicle bogie using appropriate sampling frequencies[J]. Vehicle System Dynamics, 1998, 29(Suppl 1): 404-415.

[17] 姜朝勇, 赵鑫源, 魏苇, 等. 基于有效缺口应力的地铁构架疲劳损伤研究[J]. 机车电传动, 2022(2): 135-140.
JIANG Chaoyong, ZHAO Xinyuan, WEI Wei, et al. Research on fatigue damage of metro frame based on effective notch stress[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(2): 135-140.

[18] 付稣昇 . ANSYS nCode DesignLife 疲劳分析基础与实例教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
FU Susheng. ANSYS nCode DesignLife fatigue analysis basics and examples tutorial[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2020.

[19] 全国牵引电气设备与系统标准化技术委员会(SAC/TC 278). 轨道交通 机车车辆受电弓特性和试验 第1部分:干线机车车辆受电弓: GB/T 26561.1—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
National Technical Committee for Standardization of Traction Electrical Equipment and Systems (SAC/TC 278). Railway applications–Rolling stock pantographs characteristics and tests–Part 1: Pantographs for mainline vehicles: GB/T 26561.1—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

收稿日期：2023-01-16
修回日期：2023-02-06