

# 基于蛛网藻结构的轮毂仿生轻量化设计及优化

陈依婷<sup>a</sup>, 郭策<sup>b</sup>, 李龙海<sup>b</sup>, 马耀鹏<sup>b</sup>, 马玉秋<sup>a</sup>

(南京航空航天大学 a. 航天学院; b. 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**以典型的轻质高强蛛网藻硅质壳结构为仿生模板,设计一种仿生汽车轮毂结构,并建立有限元参数模型进行仿真分析,发现其较普通辐条式轮毂结构的弯曲与疲劳性能更好,且具有进一步优化的空间。采用响应面法进行优化设计,获得仿生轮毂最优结构方案,优化后的整体结构较优化前减重 8.4%,其中轮辐减重 25.6%。进一步利用 BP 神经网络提高结构最大等效应力及疲劳寿命的预测精度。计算结果表明,BP 神经网络对结构最大等效应力的预测精度与 Workbench 响应面法的预测精度相当,但对结构疲劳寿命预测精度则提高了 56.97%。

**关键词:**仿生轻质结构;轮毂;响应面方法;BP 神经网络

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0090-05

## Optimization Bionic Design of Wheel Inspired Based on Arachnoidiscus Structure and Its Mechanical Properties

CHEN Yiting<sup>a</sup>, GUO Ce<sup>b</sup>, LI Longhai<sup>b</sup>, MA Yaopeng<sup>b</sup>, MA Yuqiu<sup>a</sup>

(a. College of Astronautics; b. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A lightweight wheel inspired by the structure of the topical lightweight high-strength arachnoidiscus shell is designed. The finite element parameter model is established for the simulation analysis. It is found that the bionic wheel has better bending and fatigue performance than the conventional spoke wheel, and further optimization space. Sampling points are obtained using Latin hypercube sampling method. In addition, the design aims to not only lower its mass, but also maintain the remarkable mechanical properties. The results indicate that the mass of the optimized wheel is dramatically decrease by 8.4% and that of spoke is by 25.6%. The BP method is further used to improve the prediction accuracy of the maximum equivalent stress and fatigue life of the structure. The result shows that BP method after training has the high accuracy, and it is the same as the prediction accuracy of the maximum equivalent stress of the BP neural network was comparable to that of the Workbench response surface method, and the prediction accuracy of the structural the fatigue life is improved by 56.97%.

**Keywords:** bio-inspired structure; wheel; response surface method; BP neural network

## 0 引言

轮毂是汽车行驶系统中的重要旋转部件。钢制轮毂质量大概是汽车整车质量的 5%~9%。有资料显示,在降低汽车燃油消耗上,减少旋转部件质量的效果是减少静态部件质量的 3 倍<sup>[1]</sup>,因此汽车轮毂的轻量化有助于汽车整车的减重<sup>[2]</sup>。

目前,汽车轮毂轻量化研究热点主要包括轮毂结构轻量化与材料轻量化两部分。轮毂轻量化通过综合运用有限元分析方法与结构优化方法,改进轮毂结构。2007 年德国 Eckhard 采用试验方法和有限元方法优化钢制轮毂,最终实现每个钢轮减重约 250 g<sup>[3]</sup>。2013 年丁炜琦对某重卡轮毂利用拓扑优化方法,实现轮毂结构的减重设计<sup>[4]</sup>。2017 年王龙等人针对国内厂商采用传统手段设计汽车轮毂带来的材料冗余、轮毂质量重等问题,对轮毂进

行优化并减重 25%<sup>[5]</sup>。

本文以轻质高强的蛛网藻硅质壳为模板,设计了一种仿生轻质轮毂。采用响应面优化设计方法和 BP 神经网络对汽车轮毂进行了优化,为汽车轮毂的轻量化设计提供了仿生设计新思路。

## 1 基于蛛网藻硅质壳结构的轮毂仿生设计

硅藻是一类单细胞真核浮游生物,具有由无定形的水合二氧化硅构成<sup>[6]</sup>的刚性细胞壁结构,称之为硅质壳。在大约 2 亿年的时间里,其进化形成了超轻、具有防御性能的轻质壳体。硅质壳表面的脊分散了整个细胞所承受的机械压力,硅藻壳体机械强度高达 150~680 MPa<sup>[7-8]</sup>,是典型的轻质高强结构。图 1(a)为蛛网藻硅质壳,其表面分布的放射状径向脊和周向环形脊构成网状结构,在远

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51875282);国防基础科研计划资助项目(JCKY2018605C010)

**第一作者简介:**陈依婷(1994—),女,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为仿生轻质结构与材料、结构轻量化。

离中心的边缘区还会次生出径向脊和环形脊,可高效实现载荷的分割和分层传递。德国 HAMM C 等人根据硅藻结构特点,结合仿生原理和结构优化手段开展了汽车 B 柱、自行车支架等结构的轻量化研究,实现了结构的轻量化<sup>[9]</sup>。

在自然界中,硅藻常受到挤压、弯曲等载荷作用,这与汽车轮毂所受典型载荷工况类似。因此,本文以蛛网藻为仿生对象,根据其微观结构特征,设计出一种新型仿生轻质轮毂结构。

本文所设计的轮毂直径为 17 英寸,轮辋部分建模参考哈弗某车型轮毂,轮辐部分基于蛛网藻硅质壳进行初步设计,如图 1(b)所示。进一步根据轮毂弯曲应力的分布情况改进结构设计,可得仿生轮毂 II 如图 1(c)所示。图 1(d)是作为对比,具有 9 根径向辐条的普通辐条式轮毂。

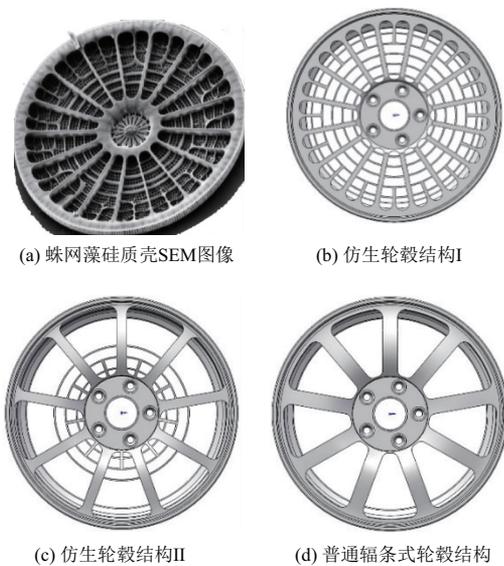


图 1 蛛网藻硅质壳与轮毂结构

## 2 仿生轮毂静力学分析

### 2.1 仿生轮毂有限元建模

对仿生轮毂结构及普通辐条式轮毂结构进行有限元建模,轮毂材料选择铝合金 A356,材料属性如表 1 所示。

表 1 材料参数表

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	强度极 限/MPa	屈服极 限/MPa	许用应 力/MPa
A356	2 670	72	0.33	290	229	152.7

### 2.2 轮毂结构弯曲工况下的性能对比

哈弗某车型轮毂所受弯矩为  $3\ 405\ \text{N} \cdot \text{m}$ ,加载方式如图 2 所示。车轮在行驶过程中做圆周运动,任意瞬时均受到指向圆心的弯曲载荷作用。结合本文中车轮的具体结构分两种情况讨论。如图 2 所示,工况 1 为轮毂受到通过辐条中心线且指向圆心的力  $F$ ,工况 2 为轮毂受到通过两

辐条中间的加强筋中心线且指向圆心的力  $F$ 。

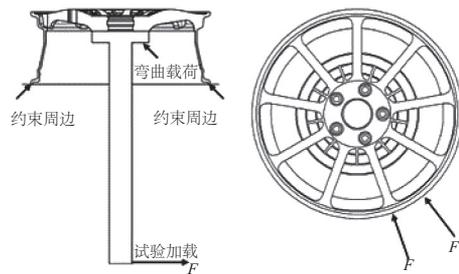


图 2 轮毂弯曲工况加载方式

仿生轮毂 II 与普通轮毂在不同的弯曲载荷工况下,应力云图如图 3 所示。两种轮毂结构在弯曲载荷下,最大应力位置均出现在轮辐靠近轮毂处。从表 2 中可以看出,与普通辐条式轮毂对比,仿生轮毂 II 的质量减少  $0.63\ \text{kg}$ ,而在对辐面施加相同的  $3\ 405\ \text{N} \cdot \text{m}$  弯矩载荷时,仿生轮毂的应力也有所下降,这表明在靠近轮毂的径向辐条处增加环向结构与加强筋结构,能有效提高轮辐根部的强度,并使结构应力分布更均匀。

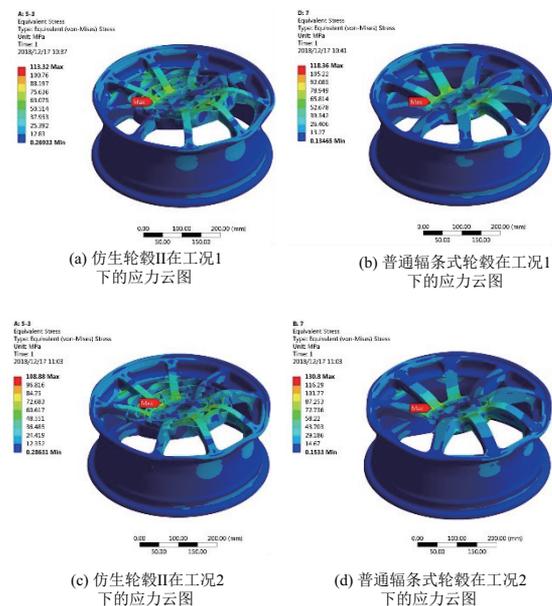


图 3 轮毂结构在不同弯曲工况下应力云图

表 2 两种轮毂结构弯曲静力学分析与对比

工况	质量/kg	最大等效 应力/MPa	最大位移/mm
普通辐条式轮毂工况 1	9.309	118.4	0.23
仿生轮毂 II 工况 1	8.679	113.0	0.28
普通辐条式轮毂工况 2	9.309	130.8	0.23
仿生轮毂 II 工况 2	8.679	118.2	0.28

### 2.3 两种轮毂结构的弯曲疲劳性能对比

由于弯曲疲劳是轮毂的主要破坏形式,因此本文对两种轮毂结构的疲劳性能进行了分析。根据国标 GB/T5334-2005 的要求,在强化实验系数  $S$  取 1.6、弯矩

3 405 N·m的工况下,疲劳循环次数至少在 $1 \times 10^5$ 以上。

通过仿真分析可知,在周期性弯曲载荷作用下,仿生轮毂Ⅱ在两种工况下疲劳寿命均在 $1 \times 10^6$ 次以上;而普通辐条式轮毂仅在工况1条件下寿命为 $1 \times 10^6$ 次,在工况2条件下寿命仅为 $4.976 4 \times 10^5$ 次。因此,仿生轮毂Ⅱ在质量减少0.63 kg的情况下,寿命较普通辐条式轮毂更高,环向结构及加强筋的存在提高了轮毂的弯曲疲劳寿命。鉴于仿生轮毂Ⅱ还存在一定的寿命余量,可以进一步进行结构的轻量化设计。

### 3 仿生轮毂结构优化设计

#### 3.1 仿生轮毂Ⅱ优化设计的变量、目标函数及约束条件

为了能够在满足基本力学性能要求的前提下设计出更加轻质的车轮结构,本文采用Workbench响应面方法进行结构优化设计。

如图4所示,定义了5个主要的轮辐尺寸参数,其初始值以及变化范围如表3所示。设计变量的表达式:

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T \quad (1)$$

式中 $x_1 \sim x_5$ 为设计变量。

由于弯曲工况2对应的轮毂最大等效应力大,因此在对轮毂进行优化设计时,以弯曲工况2作为载荷条件。具体地,以轮毂质量最小作为优化设计目标,以轮毂强度、刚度、疲劳寿命作为约束条件。

目标函数表达式:

$$f(x) \rightarrow \min \quad (2)$$

由于轮毂最大等效应力不应大于A356材料许用应力,轮毂最大位移 $\leq 0.6 \text{ mm}^{[4]}$ ,则约束条件表达式:

$$y_1(x) \leq 152.7 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$y_2(x) \leq 0.6 \text{ mm} \quad (4)$$

$$y_3(x) \geq 10^5 \quad (5)$$

式中: $f(x)$ 是车轮质量; $y_1(x)$ 、 $y_2(x)$ 、 $y_3(x)$ 分别是车轮弯曲工况下的最大应力、最大变形和弯曲疲劳寿命。

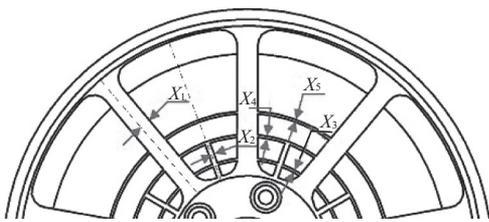


图4 轮辐设计变量的定义

表3 轮辐设计变量统计表

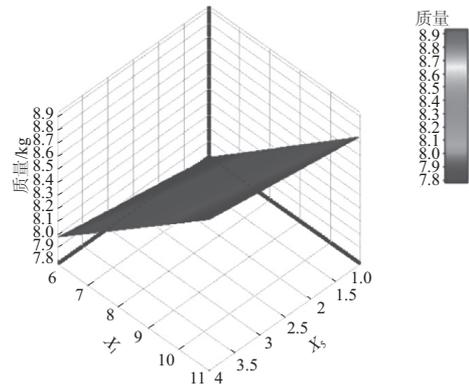
参数	参数描述	初始值/mm	参数变化范围/mm
$X_1$	1/2 轮辐筋条宽度	10.0	6.0~11.0
$X_2$	1/2 轮辐加强筋宽度	2.5	1.0~4.0
$X_3$	轮辐第一环向结构宽度	2.5	1.0~4.0
$X_4$	轮辐第二环向结构宽度	2.5	1.0~4.0
$X_5$	轮辐第三环向结构宽度	2.5	1.0~4.0

#### 3.2 响应面优化分析

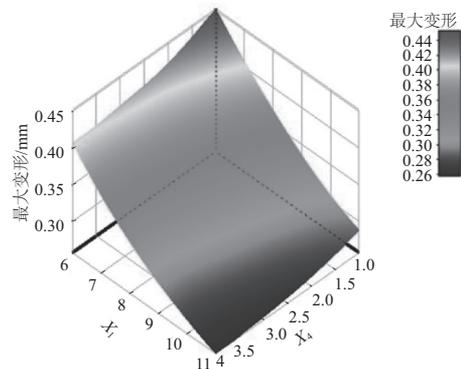
响应面方法是一种构建近似模型的方法,本文采用拉丁超立方方法进行试验设计,样本总数为40个,输出参数为 $y_1(x)$ 、 $y_2(x)$ 、 $y_3(x)$ 、 $y_4(x)$ 。图5为结构质量、最大变形、最大等效应力和疲劳寿命分别与对其影响较大的两个设计变量的响应面图。

在工况2条件下,获得3组优选点,如表4所示。综合考虑,选择优选点2的数据进行圆整,最终得到圆整后的数据 $X_1$ 为7.0 mm,  $X_2$ 为1.5 mm,  $X_3$ 为2.8 mm,  $X_4$ 为2.2 mm,  $X_5$ 为1.1 mm,优化后结构如图6所示。

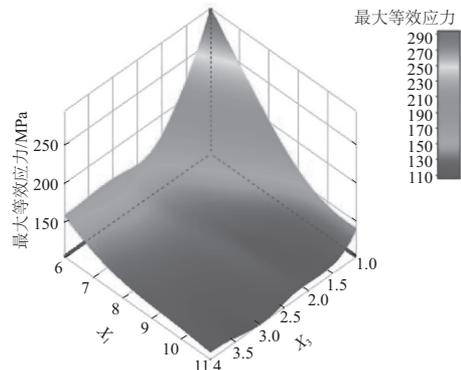
根据优化后的尺寸参数重新对轮毂结构进行有限元力学分析,如表5所示。由结果可知,优化后的轮毂质量减轻8.4%,辐面质量减少25.6%,强度、刚度和疲劳寿命均符合设计要求。



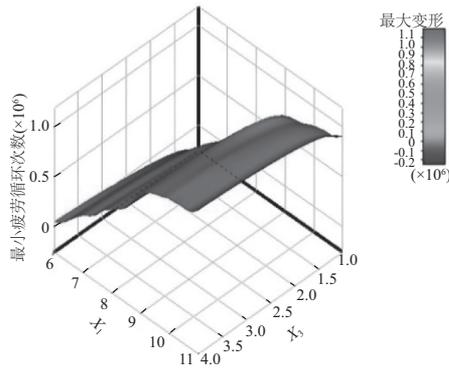
(a)  $X_1$ 、 $X_5$ 轮毂质量响应面图



(b)  $X_1$ 、 $X_4$ 与最大变形响应面图



(c)  $X_1$ 、 $X_3$ 与最大等效应力响应面图



(d)  $X_1$ 、 $X_3$ 与疲劳寿命响应面图

图5 各函数的响应面

表4 3组最优解

参数	优选点 1	优选点 2	优选点 3
$X_1$ /mm	6.43	6.98	6.46
$X_2$ /mm	2.99	1.41	3.56
$X_3$ /mm	2.35	2.73	2.13
$X_4$ /mm	1.31	2.13	2.03
$X_5$ /mm	1.74	1.04	1.38
质量/kg	7.86	7.90	7.90
最大位移/mm	0.43	0.38	0.41
最大等效应力预测值/MPa	150.28	146.57	149.59
疲劳寿命预测值( $\times 10^5$ )/次	1.031 4	1.712 8	1.922 2
有限元最大等效应力计算值/MPa	160.85	151.22	155.28
有限元疲劳寿命计算值/次	61 130	92 888	70 633



图6 优化后轮毂结构图

表5 轮毂优化前后性能对比

工况	总质量/kg	辐面质量/kg	最大应力/MPa	最大应变/mm	疲劳寿命/次
仿蛛网藻轮毂优化前工况 1	8.68	2.84	113.00	0.28	$1 \times 10^6$
仿蛛网藻轮毂优化前工况 2	8.68	2.84	118.20	0.28	$1 \times 10^6$
仿蛛网藻轮毂优化后工况 1	7.95 (-8.4%)	2.11 (-25.6%)	149.42	0.38	$1.059 \times 10^5$
仿蛛网藻轮毂优化后工况 2	7.95 (-8.4%)	2.11 (-25.6%)	144.29	0.37	$1.656 \times 10^5$

从表5的计算结果对比中还可以看出,对于优选点2,响应面法预测的应力值与有限元分析结果相差较小,约为3.1%,而轮毂的疲劳寿命预测值误差较大,约为84.3%。

由于轮毂最大变形远满足 $\leq 0.6\text{mm}$ 的约束条件,因此本文仅考虑用BP神经网络进一步提高对最大等效应力与疲劳寿命的预测精度。

## 4 BP神经网络预测仿生轮毂结构的力学性能

### 4.1 BP神经网络结构

BP神经网络是人工神经网络中应用最广泛的一种学习算法,本文利用响应面数据作为BP神经网络的训练样本,以 $X_1$ - $X_5$  5个参数作为神经网络模型输入层的5个神经元,中间含有1个隐含层,以轮毂最大等效应力与疲劳循环次数作为神经网络输出层,建立轮毂结构的BP神经网络模型<sup>[10]</sup>。

通过改变隐含层的神经元数比较不同网络训练模型的泛化能力,确定隐含层的最佳神经元个数,隐含层神经元数的范围根据公式(6)确定,采用“试错法”来调整隐含层神经元个数。训练样本的均方误差函数MSE和决定系数 $R^2$ 作为神经网络的性能指标,衡量网络对训练样本的学习程度。 $R^2$ 越接近1,则表示所建立的神经网络模型与实际模型的近似程度越高,其拟合精度也越高。

$$N = \sqrt{(n+m)} + a \quad (6)$$

式中: $n$ 为输入神经元的数目; $m$ 为输出神经元的数目; $a$ 为1~10之间的常数。

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i\text{exp}})^2 \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i\text{exp}})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中: $y_i$ 、 $y_{i\text{exp}}$ 分别为实验值和样本的预测值; $n$ 代表样本数量。

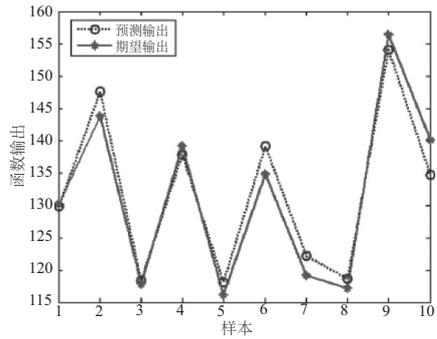
在经过多次神经网络训练之后,确定采用5-3-1结构的3层神经网络。

### 4.2 BP神经网络对仿生轮毂II最大等效应力的预测

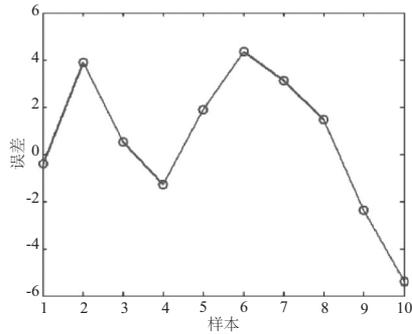
图7为采用BP神经网络对仿生轮毂II最大等效应力的预测输出、预测误差以及MSE曲线图,其预测误差为6MPa,预测相对误差为4%,经过4次迭代收敛,MSE为0.495590。可见,BP神经网络对轮毂最大等效应力的预测精度与Workbench响应面法的预测精度相似,均与有限元计算结果相近。

### 4.3 BP神经网络对仿生轮毂II的疲劳循环寿命预测

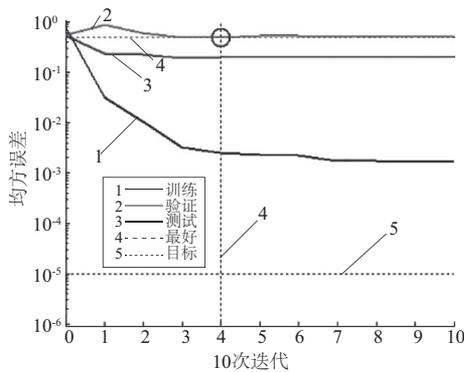
图8所示为BP神经网络对轮毂结构疲劳循环次数的预测。可以看出BP神经网络的预测输出值和期望输出值相差 $1.6 \times 10^4$ 次,预测误差为24%。BP网络经过58次迭代收敛,MSE为0.020095。因此,可以用此神经网络



(a) BP神经网络预测输出



(b) BP神经网络预测误差

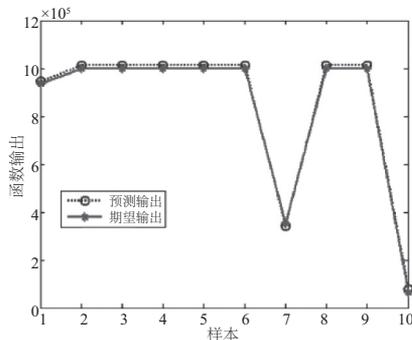


(c) BP神经网络MSE曲线图

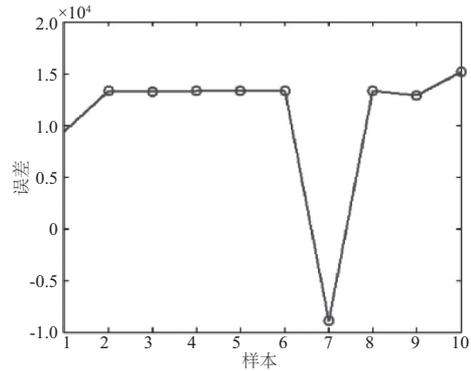
图7 最大等效应力BP神经网络的预测

模型对轮毂寿命进行预测,预测精度比 Workbench 响应面法的预测精度更高。

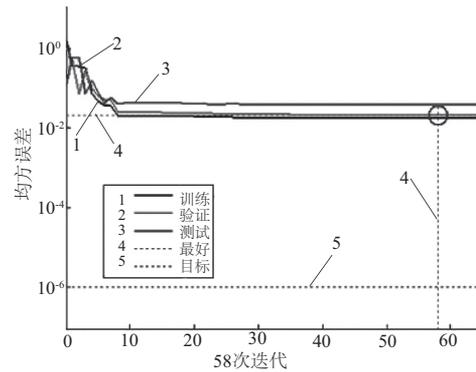
Workbench 响应面法对轮毂结构的最大应力预测精度较高,与BP神经网络预测效果相近;而BP神经网络对结构疲劳寿命的预测精度比 Workbench 响应面的预测精度高得多,如表6所示。



(a) BP神经网络预测输出



(b) BP神经网络预测误差



(c) BP神经网络MSE曲线图

图8 疲劳循环次数BP神经网络的预测

表6 BP神经网络误差与响应面误差对比

参数	Workbench 响应面法		BP神经网络		有限元计算值	
	最大等效应力/MPa	疲劳循环次数/次	最大等效应力/MPa	疲劳循环次数/次	最大等效应力/MPa	疲劳循环次数/次
优选点2数值	146.57	1.712 8×10 <sup>5</sup>	154.65	1.1×10 <sup>5</sup>	151.22	92 888
优选点2误差/%	3.07	84.39	2.26	18.42	—	—

## 5 结语

1) 结合蛛网藻径向脊和环形脊特殊的载荷分割和分层传递特点,将蛛网藻结构应用于轮毂结构的仿生优化设计中,为轮毂的轻量化设计提供了一种新思路。

2) 对比不同工况下的力学性能指标得出,仿生轮毂II得益于其环向和径向辐条高效的载荷分割和传递,其抗弯、疲劳性能较普通辐条式轮毂结构更好,应力分布更均匀。

3) 采用响应面分析法确定了轮毂最优的尺寸参数。对结构减重0.73 kg,减幅为8.4%,其中辐面减重为25.6%,优化效果显著。

4) 使用BP神经网络算法对对轮毂结构疲劳循环进行了预测,相较于响应面方法,预测精度提高了56.97%,优化了结果的准确性。

(下转第100页)

表 1 当量载荷谱

项目	载荷级									
	1	2	3	4	5	7	8	10	11	
载荷幅值/kN	2.43	1.83	1.58	1.20	0.89	0.70	0.52	0.24	0.05	
循环次数/次	1	1	2	6	15	26	43	136	245	

### 2.3 基于 FE-SAFE 的车体疲劳寿命分析

在 FE-SAFE 软件中,设定车体的表面粗糙度为  $1.6 < Ra < 4 \mu\text{m}$ ,选择铝合金材料的 S-N 曲线作为疲劳寿命评估依据,方法为 VonMises: Goodman<sup>[4]</sup>。地铁服役年限要求 30 年,在上述轨道上行驶 1 趟作为 1 个工作循环。线路全长 35.8 km,每天往返运行 15 趟,1 年运行 330 天,根据以上条件,地铁每年行驶公里数为  $3.54 \times 10^5 \text{ km}$ ,因此地铁车体寿命极限要求为  $7.934 \times 10^6$  次循环<sup>[5]</sup>。

依据雨流计数法获得载荷谱,按照累积损伤 Miner 理论对车体进行疲劳寿命分析。分析结果表明:车体疲劳寿命最小部位为车体枕梁腹板处,疲劳寿命约为  $1.320 \times 10^7$  次,寿命相对较小的部位为车轴座处,疲劳寿命约为  $2.230 \times 10^7$ ,均远大于极限寿命,因此车体疲劳寿命满足设计要求。仿真所得上述两处区域的疲劳寿命云图如图 11、图 12 所示。

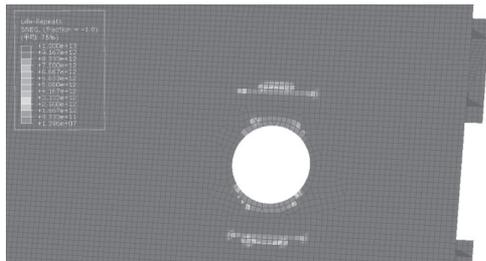


图 11 枕梁腹板疲劳寿命云图

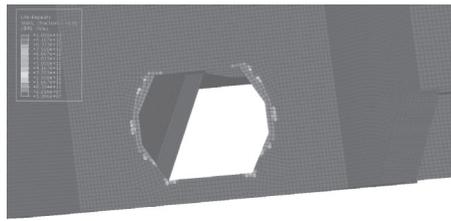


图 12 车轴座疲劳寿命云图

## 3 结语

本文依据《BS EN12663:2010 铁道应用—轨道车身的结构要求》,完成了车体满载工况下的强度校核;利用 SImpack 软件建立了车体多体动力学模型,并获得了枕梁处的载荷-时间历程;利用雨流计数法获得了循环载荷谱,根据 Miner 损伤理论对车体疲劳寿命进行分析。结果表明,A 型地铁的强度与疲劳寿命均满足设计要求。

下一步的工作是,考虑将实测载荷-时间历程计算得到的车体疲劳寿命与仿真计算得到的结果进行对比,同时考虑不同影响因素对车体疲劳寿命的影响,为车体结构疲劳寿命的预测提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 欧阳黎健. 车体疲劳强度设计及疲劳寿命预测方法研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2019(3): 42-45.
- [2] 郑军鹏. 基于概率断裂力学方法的钢吊车梁剩余疲劳寿命评估[J]. 陕西煤炭,2018,37(4): 5-8,23.
- [3] 杨培义. 地铁铝合金头车车体疲劳强度分析[J]. 现代计算机,2019(25): 18-21.
- [4] 夏常福. 基于 FE-SAFE 的造船门式起重机结构剩余寿命预测方法研究[J]. 中国设备工程,2018(23): 90-91.
- [5] 林文君,李伟. B120 型地铁铝合金车体疲劳寿命预测[J]. 电力机车与城轨车辆,2007(2): 30-33.

收稿日期:2019-11-12

(上接第 94 页)

#### 参考文献:

- [1] 李忱钊,郭永进,朱平,等. 钢制车轮弯曲疲劳寿命的影响因素[J]. 机械设计与研究,2011,27(2): 56-63.
- [2] FROES F H, ELIEZER D, AGHION E L. The science, technology and applications of magnesium [J]. Journal of the Minerals Metals & Materials Society, 1998, 50(9): 30-34.
- [3] 李家应. 重型汽车轮毂的有限元分析及优化设计[D]. 镇江: 江苏大学,2016.
- [4] 丁炜琦,储峰,孙超. 基于拓扑优化的某重卡轮毂轻量化设计[J]. 汽车实用技术,2013(10): 22-204.
- [5] 王龙,高辉,雷红亮,等. 轻型载货汽车轮毂轻量化设计[J]. 汽车工艺与材料,2017(11): 21-24.
- [6] 李琛. 基于圆筛藻硅质壳三维结构的纳米材料制备与表征[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.

- [7] HAMM C E, MERKEL R, SPRINGER O, et al. Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection[J]. Nature, 2003, 421: 841-843.
- [8] HAMM C E. The evolution of advanced mechanical defenses and potential technological applications of diatom shells [J]. Journal of Nanoscience Nanotechnology, 2005, 5(1): 108-119.
- [9] HAMM C. Evolution of lightweight structures: analyses and technical applications [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.
- [10] 钟君焜,邓朝晖,石洋东,等. 基于 BP 神经网络的槽类特征铣削加工方案决策和刀具优选[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3): 51-55.

收稿日期:2019-09-02