

纤维增强复合材料螺旋弹簧刚度预测模型

陈潇凯, 李超

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 建立了一种通用形式的复合材料螺旋弹簧刚度预测模型, 提出一种无需限定网格和节点的复合材料螺旋弹簧有限元建模方法. 基于复合材料层合板理论, 推导了复合材料层合板等效剪切模量, 并据此建立了纤维增强复合材料螺旋弹簧刚度预测模型, 该模型能够适用于任意铺层角度的纤维分布. 为了解决在有限元建模过程中复合材料螺旋弹簧单元方向设置的难题, 提出建立复合材料弹簧有限元模型的新方法, 可直接对铺层进行设计, 避免了划分网格时单元坐标系与簧丝螺旋线方向难以协调的问题. 刚度预测模型计算结果与文献实验结果的对比表明, 所建立的预测模型具有更好的计算精度. 针对复合材料类型和纤维铺层角度的不同组合形式, 利用所建立的有限元分析模型和刚度预测模型进行了对比分析, 结果表明两者之间的计算误差较小, 有效性较好.

关键词: 纤维增强复合材料; 螺旋弹簧; 刚度预测模型; 有限元仿真模型

中图分类号: U463.33

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2020)07-0725-06

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2019.046

A Stiffness Prediction Model for Fiber Reinforced Plastic Coil Spring

CHEN Xiao-kai, LI Chao

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A general form of stiffness prediction model was built for fiber reinforced plastic coil spring, and a finite element modeling method was presented for finite element without considering the mesh or node number. Based on the theory of composite laminates, the equivalent shear modulus of laminates was derived and used to establish a stiffness prediction model for fiber reinforced plastic coil spring, being applicable for arbitrary ply angle. In order to avoid the difficulties in coordinating the direction between the element coordinate systems and spring helix, a novel finite element modeling method was presented to design the laminating directly without considering the mesh. The comparison between stiffness prediction model and the experiment result in reference shows that the accuracy of the prediction model is better than the prediction model in the reference. Considering the various combination of composite material and ply angle, a comparative analysis between the prediction model and the finite element model was conducted. The results show that the error between the prediction results and the FEA results are small, which indicate the effectiveness of the proposed model.

Key words: fiber reinforced plastic; coil spring; stiffness prediction model; finite element simulation model

收稿日期: 2018-02-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0103704)

作者简介: 陈潇凯(1977—), 男, 博士, 副教授, E-mail: chenxiaokai@263.net.

汽车轻量化起到降低能源消耗,减少尾气排放的作用,汽车每减重 100 kg,每升油可多行驶 1 km^[1]. 复合材料高比强度、比模量的特点使其在实现汽车轻量化方面具有巨大的潜力,目前,复合材料已经在车身、传动轴、发动机壳体、刹车片、板簧等结构中得以应用. 复合材料螺旋弹簧的优势包括以下几个方面:首先,复合材料螺旋弹簧质量远小于传统钢制弹簧,由索格菲公司制造的玻璃纤维增强环氧树脂车用弹簧已用于奥迪 A6 前悬架,相较于所用的钢制弹簧减轻约 40% 的质量,降低了汽车非簧载质量,有利于操纵稳定性的改善. 同时,由于复合材料层合板具有渐进失效的特点,一旦发生某一单层的断裂,未破坏层仍可继续承受载荷,驾驶者可及时发现问题并更换弹簧,因此复合材料弹簧具有更安全的失效模式. 除此之外,复合材料螺旋弹簧还具有耐腐蚀、高阻尼和低噪音等优点. Choi 等^[2]推导了碳纤维复合材料圆柱螺旋弹簧刚度计算公式,并对纤维方向为 45° 的螺旋弹簧进行有限元分析,但只是针对单一铺层角度,没有涉及复合材料层合板的复杂性,并且其有限元模型的建立需考虑通过单元节点编号建立局部坐标系,建立过程较为复杂. Luger 等^[3]对纤维编织物复合材料螺旋弹簧进行研究,对复合材料在多尺度上建立有限元模型,并对复合材料螺旋弹簧刚度进行仿真计算,但未提及弹簧刚度预测模型的解析形式. 杨永宝等^[4]针对实心结构形式的碳纤维复合材料圆柱螺旋弹簧,推导了适用于 $\pm\theta$ 铺层弹簧静刚度的预测模型,其模型仍只适用于 $\pm\theta$ 铺层,其复合材料有限元模型建立方法^[5]需对每个单元的单元坐标系方向进行严格限定,在网格划分的处理方面不具灵活性. 金达锋等^[6]对 $\pm 45^\circ$ 铺层的空心复合材料压缩圆柱螺旋弹簧进行刚度分析,其刚度理论公式只适用于 $\pm 45^\circ$ 铺层,具有一定的局限性. 熊志远等^[7]采用文献^[6]中的刚度预测模型,对 $\pm 45^\circ$ 铺层的空心复合材料螺旋弹簧刚度的重要参数如纤维体积分数、弹性模量以及几何尺寸进行分析,但并未考虑复合材料铺层角度的影响. 詹博文等^[8]推导了 $\pm 45^\circ$ 铺层的复合材料螺旋弹簧刚度、强度预测模型,并基于响应面模型对螺旋弹簧几何结构进行优化,但并未给出任意纤维铺层角度的预测模型.

本文对纤维增强复合材料螺旋弹簧的刚度特性进行研究. 首先,基于复合材料细观力学的方法,对

复合材料单层板的宏观弹性常数进行预测,并基于经典层合板理论,对任意铺层方式层合板的等效剪切模量进行计算,再结合传统的弹簧刚度计算表达式,得到一般形式的复合材料螺旋弹簧的刚度预测模型. 其次,通过 FiberSIM 与 CATIA 软件,对弹簧进行铺层设计,再将铺层结果文件导入到 ANSYS workbench 中,建立较为精确的复合材料螺旋弹簧的有限元模型,无需考虑单元坐标系和节点编号. 由于预测模型具有一般性,弹簧可设置为空心或实心弹簧,实心弹簧即内径足够小时空心弹簧的特例,但是由于制造方法的局限性,对空心弹簧的制造较为容易,因此将有限元模型中的弹簧设置为空心弹簧. 然后,分别对不同型号的材料、不同铺层角度的弹簧刚度进行仿真计算,并与预测模型计算结果进行对比分析. 最后,在有限元模型中加入用于支撑空心弹簧的芯材,探索其对于弹簧刚度的影响.

1 刚度预测模型

复合材料层合板是由多层单层板粘合在一起组成的整体的结构板,其结构组成如图 1 所示,层合板的性能与各个单层的材料性能以及各层单层板的铺设方式有关. 对复合材料层合板进行分析时一般将各个单层看作均匀的各向异性的薄板,单层复合材料是由两种或多种组分材料构成,各个组分的含量和分布决定了单层板的宏观力学特性.

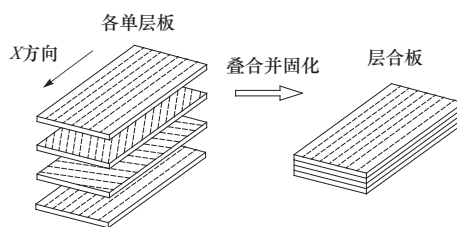


图 1 复合材料层合板

Fig. 1 Composite laminates

复合材料螺旋弹簧是先将单层纤维织物或预浸料卷成棒后再螺旋缠绕形成弹簧,最后进行固化. 螺旋弹簧中的铺层角即为纤维方向与弹簧螺旋线的夹角,如图 2 所示,螺旋弹簧可以制作成空心弹簧或带有轻质芯材的实心弹簧.

针对复合材料单层板,借助细观力学的方法对其力学性能进行分析,由于弹簧簧丝主要受扭转力,忽略其在厚度方向上的受力. 单层板有 4 个独立的弹性常数,分别为 1 方向弹性模量 E_1 、2 方向弹性

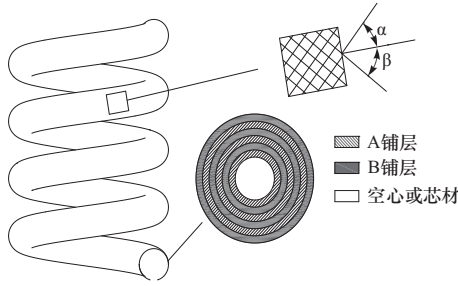


图2 复合材料螺旋弹簧铺层

Fig. 2 Composite laminate of coil spring

模量 E_2 、主泊松比 ν_{21} 和剪切模量 G_{12} , 如式(1)所示^[9],

$$\begin{cases} E_1 = E_f c_f + E_m (1 - c_f), \\ E_2 = \frac{E_m}{1 - c_f (1 - E_m/E_f)}, \\ \nu_{21} = (1 - c_f) \nu_m + c_f \nu_f, \\ G_{12} = \frac{G_m}{1 - c_f (1 - G_m/G_f)}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_f 为纤维体积含量; E_f 、 E_m 分别为纤维、基体的弹性模量; G_f 、 G_m 分别为纤维、基体的剪切模量。

根据经典层合板理论, 对任意铺层的层合板, 其广义力和广义中面应变的关系为^[9]

$$\begin{cases} \mathbf{N} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}^0 + \mathbf{B}\boldsymbol{\kappa}, \\ \mathbf{M} = \mathbf{B}\boldsymbol{\varepsilon}^0 + \mathbf{D}\boldsymbol{\kappa}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{N} = [N_x \ N_y \ N_{xy}]^T$; $\mathbf{M} = [M_x \ M_y \ M_{xy}]^T$; $\boldsymbol{\varepsilon}^0 = [\varepsilon_x^0 \ \varepsilon_y^0 \ \gamma_{xy}^0]^T$; $\boldsymbol{\kappa} = [\kappa_x \ \kappa_y \ \kappa_{xy}]^T$; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{D}$ 分别为面内刚度矩阵、耦合刚度矩阵和弯曲刚度矩阵。

假设层合板只受剪切力作用, 并忽略层合板中面曲率, 则:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}^0, \quad (3)$$

等式两边同时乘 $\mathbf{A}^{-1}$, 得:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^0 = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{N}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{A}^{-1} = (a_{ij})_{3 \times 3}$, $(i, j = 1, 2, 6)$ 。

又由 $N_x = N_y = 0$, 可以得到

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy}^0 = a_{66} N_{xy}. \quad (5)$$

则

$$\tau_{xy} = N_{xy}/t = \gamma_{xy}/(ta_{66}) = G_{xy} \gamma_{xy}. \quad (6)$$

得到等效剪切模量

$$G_{xy} = 1/(ta_{66}), \quad (7)$$

式中 t 为所建立层合板的厚度。

针对螺旋弹簧, 其刚度可由以下公式得到

$$k = G(d_o^4 - d_i^4)/(8nD^3), \quad (8)$$

式中: d_o 为弹簧外丝径; d_i 为内丝径; D 为弹簧中

径; n 为有效圈数。

当内丝径不为 0 时, 弹簧为空心弹簧, 当内丝径等于 0 时, 则为实心弹簧, 即实心弹簧为空心弹簧的一个特例。

将复合材料层合板的等效剪切模量代入式(8), 得到复合材料螺旋弹簧刚度的一般表达式为

$$k = (d_o^4 - d_i^4)/(8nD^3 ta_{66}). \quad (9)$$

当层合板为 $\pm\theta$ 反对称层合板时, 由于其剪切和拉伸之间耦合刚度系数 $A_{16} = A_{26} = 0$, 因此此时弹簧的刚度计算公式为

$$k = \left[Q_{66} + \frac{1}{4} \sin^2 2\theta (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 4Q_{66}) \right] \times (d_o^4 - d_i^4)/(8nD^3), \quad (10)$$

式中: $Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$; $Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$; $Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$; $Q_{66} = G_{12}$ 。

由上述公式可知当 $\theta = 45^\circ$ 时, 反对称铺层层合板的等效剪切模量最大, 因此这种弹簧的刚度最大, 此时:

$$k = \frac{(d_o^4 - d_i^4)(E_1 + E_2 - 2\nu_{12}E_1)}{32(1 - \nu_{12}\nu_{21})nD^3}. \quad (11)$$

基于所建立的刚度预测模型, 参考文献[7]中所采用的相关材料参数和结构参数, 对 $\pm 45^\circ$ 铺层碳纤维复合材料螺旋弹簧刚度进行计算, 并与文献中所得到的实验结果进行对比, 对比结果如表 1 所示。

表 1 与文献[7]中预测模型对比

Tab. 1 Comparing with the model inference [7]

文献[7]中 实验刚度/ (N·mm ⁻¹)	文献[7]预测模型		本文预测模型	
	预测刚度/ (N·mm ⁻¹)	误差/ %	预测刚度/ (N·mm ⁻¹)	误差/ %
30.30	27.00	10.89	32.30	6.60

由表 1 可知, 文献[7]中的预测模型刚度值比实验值小 10.89%, 而本文所建立的刚度预测模型比实验值大 6.60%, 更符合理想条件下的理论模型预测值较含有缺陷的实际被测物测试值大的一般性规律; 同时, 可以看出本文所建立的刚度预测模型具有更好的精度。

2 仿真模型

复合材料各向异性的特点使得复合材料螺旋弹簧有限元模型的建立相对复杂, 本文提出了一种简

单直观的建模方法. 首先在 CATIA 软件中建立空心螺旋弹簧的内部螺旋曲面模型如图 3 所示,然后将螺旋线投影到螺旋曲面上,通过与 CATIA 集成的 FiberSIM 软件以投影曲线为基准方向建立分布形式的坐标系,然后选取曲面和坐标系,在曲面上设置一系列铺层,设计完成后将铺层信息导出为 . h5 文件. 将导出的文件导入到 ANSYS workbench 的 ACP 模块中,其中某一单层铺层效果在 ANSYS 中显示如图 4 所示.

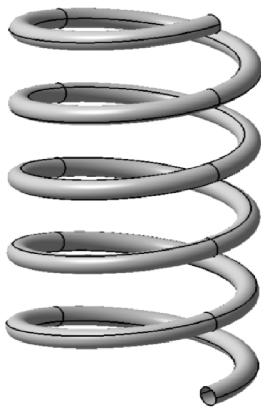


图 3 复合材料螺旋弹簧曲面图
Fig. 3 The curve surface of composite coil spring

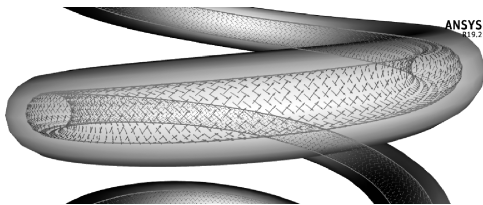


图 4 复合材料螺旋弹簧某一层
Fig. 4 A single layer of the composite coil spring

此模型在建立过程中只需对弹簧曲面网格进行自动划分,无需考虑单元坐标系以及单元节点编号. 为使载荷施加更为方便,在弹簧两端建立两个刚度极大可视为刚体的平板,下端平板施加固定约束,上端平板上方施加压力并约束除竖直方向外的自由度,所建立的仿真模型及施加约束如图 5 所示.



图 5 弹簧仿真模型及约束
Fig. 5 Simulation model and constraints of the spring

3 对比分析

为验证预测模型的准确性,设计多组仿真实验,除了弹簧的尺寸参数外,复合材料的物理性能以及铺层的设置成为影响弹簧刚度的重要因素. 弹簧的尺寸参数设置为:内丝径 d_i 为 10 mm,外丝径 d_o 为 18 mm,中径 D 为 100 mm,有效圈数 n 为 5 圈,弹簧高度 H 为 200 mm,将铺层角度都设置为 $\pm 45^\circ$. 表 2 列出不同纤维和基体复合材料工程常数的实验数据参考^[9],在 ANSYS 软件中分别计算其制成螺旋弹簧的刚度,并与本文预测理论刚度进行对比分析.

表 2 $\pm 45^\circ$ 铺层复合材料螺旋弹簧刚度理论值与仿真结果
Tab. 2 The theoretical values and simulation results of $\pm 45^\circ$ composite coil spring

材料	型号	E_1/MPa	E_2/MPa	ν_{21}	G_{12}/MPa	理论刚度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	仿真刚度/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	误差/%
碳/环氧	T300/5280	185 000	10 500	0.28	7 300	113.06	105.88	6.35
碳/环氧	A5/3501	141 000	9 100	0.30	7 200	86.36	81.81	5.27
碳/环氧	T700/5280	115 000	6 430	0.28	6 000	70.25	66.62	5.17
玻璃/环氧	S1002	39 000	8 400	0.26	4 200	25.92	25.14	3.01
芳纶/环氧	K49/EP	76 000	5 600	0.34	2 300	46.57	43.40	6.81

由表 2 可知,不同纤维增强的复合材料螺旋弹簧刚度相差较大,根据预测模型解析表达式, $\pm 45^\circ$ 铺层复合材料螺旋弹簧刚度主要受弹性模量的影响. 相同尺寸参数下,由于碳纤维弹性模量较大,碳纤维

增强的复合材料螺旋弹簧刚度可超过 100 N/mm,而玻璃纤维由于弹性模量较小,玻璃纤维增强的螺旋弹簧刚度只有 25.14 N/mm. 但无论是哪种材料,所建立模型的预测值与仿真刚度误差均未超过

10%,刚度预测准确性较高。

复合材料的铺层角度对弹簧的刚度也具有重要影响,针对玻璃纤维/环氧和碳纤维/环氧两种材料设计的螺旋弹簧,设置一系列铺层角度,并对其刚度进行仿真计算,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同铺层角度复合材料螺旋弹簧刚度理论值与仿真结果

Tab. 3 The theoretical values and simulation results of composite coil spring with different ply angles

铺层角度	玻璃/环氧(S1002)			碳/环氧(T300/5280)		
	理论刚度/ (N·mm ⁻¹)	仿真刚度/ (N·mm ⁻¹)	误差/%	理论刚度/ (N·mm ⁻¹)	仿真刚度/ (N·mm ⁻¹)	误差/%
±30°	21.93	21.55	1.73	89.13	84.79	4.87
±45°	25.92	25.14	3.01	113.06	105.88	6.35
±70°	16.56	16.22	2.05	56.89	54.14	4.83
45°/90°	14.89	14.00	5.98	31.21	29.32	9.26
−30°/70°	15.15	15.92	5.08	31.99	36.40	13.79
30°/−70°/20°/−40°	18.19	19.00	4.45	58.06	64.04	10.30
10°/30°/60°/80°	13.11	12.85	1.98	26.69	26.30	1.46

从表 3 中可以看出,使用相同体积的材料时,不同铺层的弹簧刚度相差较大,在设计复合材料螺旋弹簧时铺层角度的选取将成为一个重要环节。

从表 2、3 中可以看出,多数情况下仿真结果小于理论结果,造成这种情况的原因之一可能是空心弹簧的内径过大,弹簧中心没有物体支撑,从而导致簧丝的截面形状发生变形,影响弹簧的刚度。为了验证此猜测的合理性,考虑在空心弹簧中加入芯材对弹簧空心进行支撑。针对±45°铺层碳纤维/环氧树脂(T300/5280),选择芯材材料为环氧树脂或钢材,分别对无芯材的空心弹簧、只有芯材和复合材料加芯材的实心弹簧进行仿真计算,计算结果如表 4 所示。

表 4 加入芯材的弹簧刚度与空心弹簧的比较

Tab. 4 The comparison of the spring stiffness with and without core material

芯材材料	环氧树脂			钢		
	理论刚度/ (N·mm ⁻¹)	仿真刚度/ (N·mm ⁻¹)	误差/%	理论刚度/ (N·mm ⁻¹)	仿真刚度/ (N·mm ⁻¹)	误差/%
无芯材	113.06	105.88	6.35	113.06	105.88	6.35
只有芯材	0.28	0.28	0.00	18.26	18.67	2.22
复材+芯材		107.65			131.07	

通过对仿真结果进行的对比发现:在加入刚度为 0.28 N/mm 的芯材弹簧后,刚度提升了 1.77 N/mm;加入刚度为 18.67 N/mm 的芯材弹簧后,刚度提升了 25.19 N/mm. 这表明芯材对复合材料弹簧刚度有着一定的提升作用,且钢材提升效果大于环氧树脂,这可能是由于钢材刚度更大,对空心弹簧的支撑效果更好。因而在弹簧设计时,可通过加入轻质芯材进一步提升弹簧刚度。

4 结束语

基于复合材料细观力学方法,对单层复合材料的弹性常数进行理论计算,又根据经典层合板理论,推导了层合板等效剪切模量,结合传统螺旋弹簧刚度计算公式,得到纤维增强复合材料螺旋弹簧解析形式的刚度预测模型。利用 CATIA、FiberSIM 以及 ANSYS workbench,提出了一种复合材料螺旋弹簧的仿真建模方法,无需严格限制单元方向或考虑节点编号,建模方法更加简单直观,为复合材料弹簧的仿真计算提供借鉴。通过仿真实验与预测模型的对比分析,表明了该预测理论和仿真建模方法的可行性,为纤维复合材料螺旋弹簧的后续研究提供了参考。仿真结果小于理论结果,这可能是由于没有支撑的空心弹簧簧丝易发生截面变形,从而影响弹簧的刚度。采用在空心弹簧中加入芯材支撑的方

法,通过仿真实验验证误差产生的原因,并发现了芯材对弹簧刚度的提升效果远大于简单的数值叠加,这对具有芯材的复合材料弹簧的设计也有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 吕天佟,王登峰,王传青. 隐式参数化白车身多目标协同优化设计[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(5): 447 - 453.
Lü Tiantong, Wang Dengfeng, Wang Chuanqing. Multi-objective lightweight collaborative optimization and design for latent parametric BIW structure[J]. Transactions of Beijing Institute of technology, 2019, 39(5): 447 - 453. (in Chinese)
- [2] Choi B L, Choi B H. Numerical method for optimizing design variables of carbon-fiber-reinforced epoxy composite coil springs[J]. Composites Part B Engineering, 2015, 82: 42 - 49.
- [3] Luger M, Traxl R, Hofer U, et al. RUC-based multi-scale model for braid-reinforced polymers: Application to coil springs[J]. Composites Part B Engineering, 2018, 155: 431 - 443.
- [4] 杨永宝,金达锋,高希. CFRP 圆柱螺旋弹簧静刚度预测理论及仿真[J]. 汽车技术, 2013(7): 21 - 25.
Yang Yongbao, Jin Dafeng, Gao Xi. Static stiffness prediction theory and simulation of CFRP cylindrical coil spring[J]. Automobile Technology, 2013(7): 21 - 25. (in Chinese)
- [5] 杨永宝. 碳纤维复合材料圆柱螺旋弹簧的刚强度设计方法研究[D]. 北京:清华大学, 2013.
Yang Yongbao. Research on the design method of the stiffness and strength of CFRP cylindrical coil spring [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [6] 金达锋,熊志远,杨永宝. 复合材料圆柱螺旋弹簧的刚强度分析[J]. 汽车工程, 2013, 35(8): 755 - 758.
Jin Dafeng, Xiong Zhiyuan, Yang Yongbao. Stiffness and strength analysis of composite cylindrical helical springs [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(8): 755 - 758. (in Chinese)
- [7] 熊志远,宋瑞祥,康钟绪,等. 复合材料螺旋弹簧刚度及其影响因素分析[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 216 - 221.
Xiong Zhiyuan, Song Xiangrui, Kang Zhongxu, et al. Analysis on rigidity of composite helical spring and its influence factors[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 216 - 221. (in Chinese)
- [8] 詹博文,孙凌玉,黄彬城,等. 车用复合材料螺旋弹簧的设计与优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1520 - 1527.
Zhan Bowen, Sun Lingyu, Huang Bincheng, et al. Design and optimization of automotive CFRP helical spring[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1520 - 1527. (in Chinese)
- [9] 沈观林,胡更开,刘彬. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
Shen Guanlin, Hu Gengkai, Liu Bin. Mechanics of composite materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)

(责任编辑:孙竹凤)