

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.05.004

某型号汽车波纹管结构参数优化研究

刘超, 黄晓雨, 王召宇, 刘蕾, 薛克敏, 李萍

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为提高某型号汽车波纹管的服役性能,文章对波纹管的结构参数进行优化。建立波纹管的模态分析和静力学分析有限元模型,基于单因素法研究壁厚、波高、波谷曲率半径、内径对波纹管一阶固有频率及最大应力值的影响规律;基于正交试验设计原理并结合极差分析和方差分析,以一阶固有频率及最大应力值为目标函数,确定各因素对试验指标影响的主次顺序;通过综合平衡法获得最优的结构参数组合,并对优化结果进行验证。研究表明:一阶固有频率及最大应力值均随壁厚的增大而增大,随波高、内径的增大而减小,随波谷曲率半径的增大呈先减小后增大的趋势;极差分析和方差分析得出各因素对2个指标的影响主次顺序均为壁厚、波高、内径、波谷曲率半径;最优结构参数组合为壁厚0.25 mm、波高11.6 mm、波谷曲率半径1.30 mm、内径121.0 mm;优化后的波纹管固有频率提高,服役状态下的应力水平降低。

关键词:波纹管;模态分析;静力学分析;结构优化;正交试验;方差分析

中图分类号:TH113.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)05-0599-06

Optimization study of structural parameters of a certain type of vehicle bellows

LIU Chao, HUANG Xiaoyu, WANG Zhaoyu, LIU Lei, XUE Kemin, LI Ping

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming to improve the service performance of a certain type of vehicle bellows, the structural parameters of the bellows were optimized. The finite element model for modal analysis and static analysis of the bellows was established, and the effects of thickness, wave height, valley radius of curvature and inner diameter on the first-order natural frequency and maximum stress value of the bellows were studied based on the single-factor variable method. Based on the principle of orthogonal test design and combined with the range analysis and variance analysis, the first-order natural frequency and maximum stress value were used as the optimization indexes, and the order of influence of each factor on the test indexes was determined. The optimal combination of structural parameters was obtained by the comprehensive balance method and the optimization results were verified. The results show that the first-order natural frequency and maximum stress value increase with the increase of thickness, decrease with the increase of wave height and inner diameter, and show a trend of decreasing and then increasing with the increase of valley radius of curvature. Through the range analysis and variance analysis, it can be concluded that the order of influence of each factor on the two indexes are: thickness, wave height, inner diameter, valley radius of curvature. The optimal combination of structural parameters is: thickness of 0.25 mm, wave height of 11.6 mm, valley radius of curvature of 1.30 mm, and internal diameter of 121.0 mm. The optimized bellows has higher natural frequency and lower stress level in service condition.

收稿日期:2021-07-27; **修回日期:**2021-10-12

基金项目:长丰县-合肥工业大学产业创新引导资金重点资助项目(JZ2020YDZJ0121)

作者简介:刘超(1997—),男,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

薛克敏(1963—),男,安徽蚌埠人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

李萍(1973—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者,Email:li_ping@hfut.edu.cn.

Key words: bellows; modal analysis; static analysis; structural optimization; orthogonal test; variance analysis

0 引 言

金属波纹管是用多个横向波纹沿伸缩方向连接成的管状元件,是管道的连接和补偿装置,由于其所用材料具有耐高温、耐腐蚀、耐疲劳的特点^[1],并且结构上具有很好的柔性,能在管道任意方向上进行位移补偿、吸收管道振动,从而起到减振、降噪的作用,因此被广泛应用于汽车、机械制造、化工、电力、仪表等工业领域。经过不断发展,金属波纹管现已应用于航空、航天、船舶等尖端行业,具有广阔的应用前景^[2-4]。

近年来,国内外学者对金属波纹管的振动特性、疲劳寿命、结构刚度、成形工艺等进行了研究^[5-7]。波纹管在实际使用中,两端分别与发动机和排气管相连,当来自两端管路的激励力频率与波纹管本身固有频率相近时,会诱发结构间的共振,使波纹管结构产生振动损伤^[8]。此外,波纹管在进行位移补偿时,会在波谷位置产生应力集中,较大的应力会降低波纹管的服役寿命^[9]。而通过合理的结构参数优化能有效改善波纹管的振动特性和应力集中,延长波纹管的服役寿命。然而目前对于综合考虑波纹管振动损伤以及位移损伤的结构参数优化方面的研究还较少,结构优化设计方法也有待发展。因此,通过合理的优化设计方法对波纹管结构参数进行优化的研究十分必要。

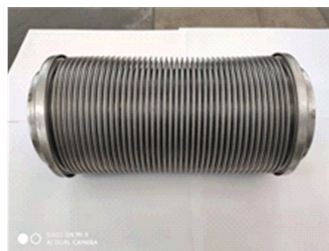
本文以某型号汽车波纹管为研究对象,建立波纹管的模态分析及静力学分析有限元模型,基于单因素法研究不同结构参数对其固有频率以及伸长变形时最大应力值的影响规律,从而为正交试验设计提供依据;通过正交试验设计、极差分析、方差分析对结构参数进行优化,通过提高波纹管的固有频率以及降低位移补偿时的最大应力值来提高其抗振性能以及位移补偿能力;最终获得最优的结构参数组合并进行模拟验证,从而为同类型的波纹管结构参数优化设计提供一定的参考。

1 有限元建模过程

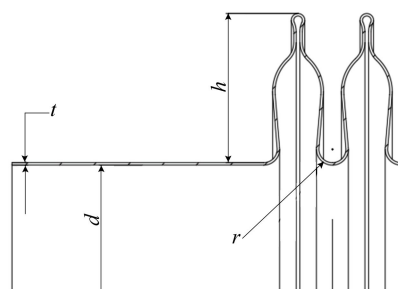
1.1 波纹管结构参数

某型号汽车波纹管及其主要结构参数如图 1 所示。该型号波纹管为单层波纹管,主要结构参数如下:波纹管内径 d 为 107.8 mm;波高 h 为 12.2 mm;波谷曲率半径 r 为 1.3 mm;厚度 t 为

0.2 mm。该波纹管所用材料为 321 不锈钢,其主要材料属性见表 1 所列。



(a) 实物图



(b) 结构参数

图 1 波纹管及其结构参数示意图

表 1 321 不锈钢材料属性

指标	杨氏模量/GPa	密度/(g·cm ⁻³)	泊松比
321 不锈钢	195	7.97	0.3

1.2 模型导入与网格划分

首先将在 UG 软件中建立的几何模型导入到 Ansys Workbench 软件中,采用 Modal 模块和 Static Structural 模块进行模态分析及静力学分析。采用软件的自划分功能进行网格划分,并对局部圆角区域进行网格细化,整体网格数量约为 1 546 680 个。

1.3 边界条件

在 Ansys Workbench 材料库中进行自定义材料并赋予完成材料属性定义,边界条件的定义参考波纹管的实际服役工况。在模态分析中,因为波纹管在实际使用中两端分别与管路相连,所以其边界条件设置为两端固定。在静力学分析过程中,波纹管在服役中会产生轴向伸长来进行位移补偿,因此其边界条件设置为一端固定,另一端施加沿轴向的 10 mm 位移。

模态分析及静力学分析的边界条件设置如图 2 所示。

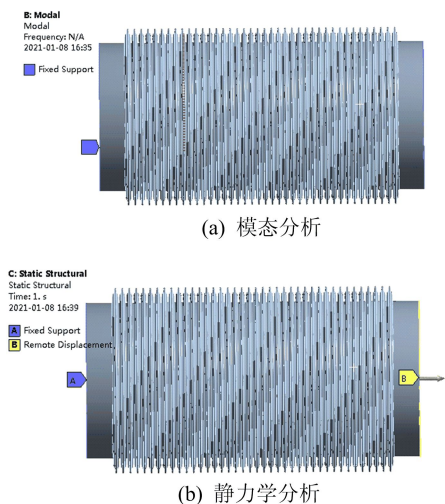


图 2 边界条件示意图

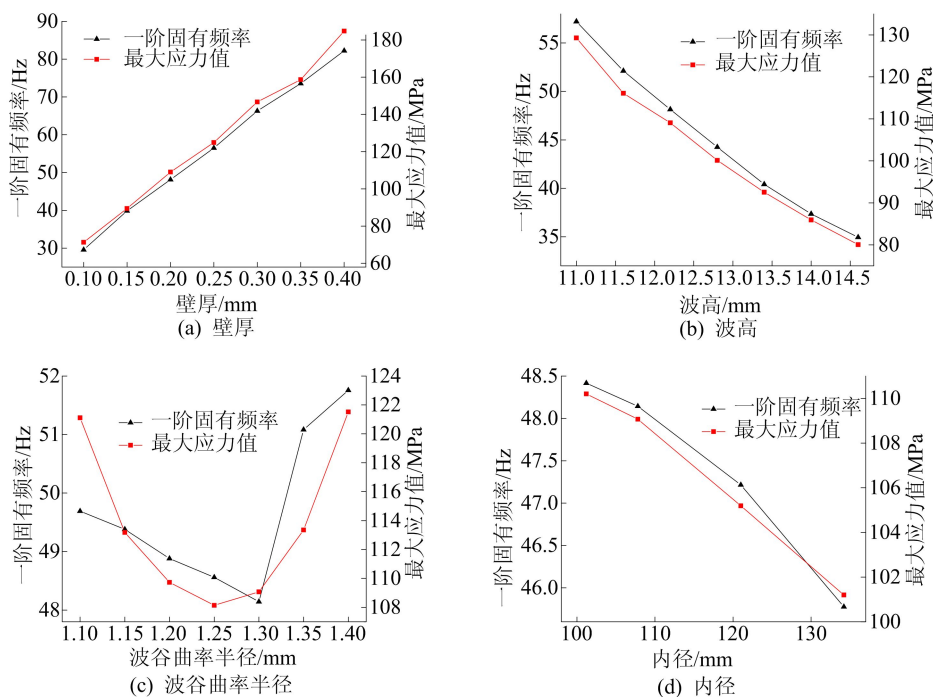


图 3 不同结构参数对一阶固有频率及最大应力值的影响

2.1 壁厚的影响

壁厚是影响波纹管性能的重要结构参数。从图 3a 可以看出,随着壁厚不断增加,波纹管一阶固有频率及最大应力值均呈近似线性递增的趋势,一阶固有频率由 29.90 Hz 增加到 82.23 Hz,最大应力值由 71.33 MPa 增加到 184.00 MPa,因此 2 个指标的变化幅度较大,说明壁厚对 2 个指标的影响较为显著。

由于结构的固有频率只受刚度分布和质量分布影响,增加刚度和减小质量均会使结构固有频率增加^[10]。而壁厚增加会增强波纹管的轴向、横向刚度^[11],从而使结构的固有频率提高;但壁厚

通过后处理中添加变形、等效应力等来提取相应结果。模态分析中提取一阶固有频率,静力学分析中提取模型最大等效应力数值。

2 结构参数的影响

因为波纹管具有薄壁结构且波形较为复杂,所以其关键结构参数会对波纹管在复杂工况下的振动特性和应力分布有着显著影响。本文运用单因素法研究壁厚(0.10~0.40 mm)、波高(11.0~14.6 mm)、波谷曲率半径(1.10~1.40 mm)、内径(101.2~134.2 mm)4 个主要结构参数对波纹管一阶固有频率及最大应力值的影响规律,结果如图 3 所示。

增加会增大最大应力值且降低波纹管的柔性,使波纹管的疲劳寿命下降^[12]。

2.2 波高的影响

从图 3b 可以看出,与壁厚的影响相反,随着波高不断增加,波纹管一阶固有频率及最大应力值均呈近似线性递减的趋势,一阶固有频率由 57.20 Hz 减小到 34.95 Hz,同时最大应力值由 129.28 MPa 减小到 80.05 MPa,因此 2 个指标的变化幅度较大,说明波高会显著影响波纹管的服役性能。

波高的增加会使波纹管轴向刚度减小^[13],因此当轴向产生相同的位移下,应力水平会更低,从

而能延长波纹管的使用寿命。但结构刚度的减小会导致波纹管固有频率减小,较小的固有频率使波纹管易受低频激励的影响,使其在服役条件下的抗振性能下降^[14]。

2.3 波谷曲率半径的影响

从图 3c 可以看出,随着波谷曲率半径的增加,波纹管一阶固有频率及最大应力值均先减小后增大。当波谷曲率半径为 1.30 mm 时,一阶固有频率取极小值 48.14 Hz;当波谷曲率半径为 1.25 mm 时,最大应力值取极小值 108.14 MPa。此外,随着波谷曲率半径的改变,2 个指标的整体变化幅度较小,因此波谷曲率半径对 2 个指标的影响程度较小。

原因在于局部曲率半径的改变并不能显著改变整体结构的刚度特性和质量分布,因此结构的固有频率变化较小。因为刚度变化较小,所以在相同位移下应力水平变化也较小,从而对波纹管服役寿命影响较小。

2.4 内径的影响

从图 3d 可以看出,随着内径的增加,波纹管一阶固有频率及最大应力值均不断减小,但整体变化幅度较小。一阶固有频率仅从 48.40 Hz 下降到 45.70 Hz,最大应力值从 110.20 MPa 下降到 101.20 MPa,这表明内径对服役性能的影响程度较小。

这是由于改变内径不会影响到波形的结构,无法显著改变整体刚度特性,但会增加波纹管的整体质量,从而使固有频率下降。同时,该结果说明改变内径并不能显著降低波纹管的最大应力值。

3 波纹管结构参数优化

3.1 正交试验设计

结构参数对固有频率及最大应力值的影响是多因素综合作用的结果,仅通过单因素法无法获得最优的结构参数组合。而正交试验设计是利用数理统计学和正交性原理的一种高效试验设计方法,能有效地得出最优水平组合。因此,取壁厚、波高、波谷曲率半径和内径为试验因素,各取 3 个水平,取波纹管一阶固有频率和最大应力值作为试验指标,不考虑因素间的相互作用。在实际中,一般希望有较大的一阶固有频率以及较小的最大应力值。

利用 L₉(3⁴),即 4 因素 3 水平标准正交表进行试验设计,因素水平表见表 2 所列。

表 2 因素水平表

单位:mm

因素	A	B	C	D
1	0.15	11.6	1.25	101.2
2	0.20	12.2	1.30	107.8
3	0.25	12.8	1.35	121.0

注:因素 A 表示壁厚;因素 B 表示波高;因素 C 表示波谷曲率半径;因素 D 表示内径。

3.2 正交试验结果及分析

3.2.1 极差分析

对不同结构参数组合的波纹管进行三维建模,并进行模态分析及静力学分析,得到的各组试验方案及结果见表 3 所列。

对 2 个试验指标进行极差分析,结果见表 4 所列。

表 3 试验方案及结果

试验号	因素				一阶固有频率/Hz	最大应力值/MPa
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	43.741	102.39
2	1	2	2	2	39.875	89.46
3	1	3	3	3	34.658	79.62
4	2	1	2	3	51.400	110.51
5	2	2	3	1	48.080	111.87
6	2	3	1	2	44.812	115.07
7	3	1	3	2	60.916	137.54
8	3	2	1	3	55.848	120.51
9	3	3	2	1	52.680	120.69

表 4 极差分析结果

指标	项目	因素			
		A	B	C	D
一阶固有频率	K_1	118.274	156.057	144.401	144.501
	K_2	144.292	143.803	143.955	145.603
	K_3	169.444	132.150	143.654	141.906
	k_1	39.425	52.019	48.133	48.167
	k_2	48.097	47.934	47.985	48.534
	k_3	56.481	44.050	47.885	47.302
	R	17.056	7.969	0.248	1.232
最大应力值	K_1	271.466	350.440	337.970	334.950
	K_2	337.450	321.838	320.658	342.068
	K_3	378.740	315.378	329.028	310.638
	k_1	90.489	116.813	112.657	111.650
	k_2	112.483	107.279	106.886	114.023
	k_3	126.247	105.126	109.676	103.546
	R	35.758	11.687	5.771	10.477

注: K_1 行的 4 个数分别是因素 A、B、C、D 的第 1 个水平所在试验中对应的指标值之和, K_2 、 K_3 行对应的数依次类推; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 K_1 、 K_2 、 K_3 除以水平数所得的值;极差 R 为 k_1 、 k_2 、 k_3 中最大者减去最小者所得的差。

由表 3 可知:一阶固有频率最大的为 7 号试

验,其水平组合为 $A_3B_1C_3D_2$;最大应力值最小的为 3 号试验,其水平组合为 $A_1B_3C_3D_3$ 。

由表 4 可知,对于一阶固有频率,最优的因素组合为 $A_3B_1C_1D_2$,根据极差 R 大小得出各因素影响的主次顺序为壁厚 A、波高 B、内径 D、波谷曲率半径 C;对于最大应力值,最优的因素组合为 $A_1B_3C_2D_3$,各因素影响的主次顺序为壁厚 A、波高 B、内径 D、波谷曲率半径 C。

3.2.2 方差分析

方差分析的结果见表 5 所列。从表 5 可以

看出:对于一阶固有频率,壁厚、波高、波谷曲率半径、内径的影响贡献值分别为 81.697 6%、17.835 2%、0.017 6%、0.449 6%,即对一阶固有频率的影响显著程度依次为壁厚、波高、内径、波谷曲率半径,与极差分析结果相一致;对于最大应力值,壁厚、波高、波谷曲率半径、内径的影响贡献值分别为 80.821 4%、9.612 0%、2.069 1%、7.497 5%,即对最大应力值的影响显著程度依次为壁厚、波高、内径、波谷曲率半径,也与极差分析结果相一致。

表 5 正交试验方差分析结果

指标	方差来源	离差平方和	自由度	均方和	贡献值/%
一阶固有频率	因素 A	436.436 48	2	218.218 24	81.697 6
	因素 B	95.277 51	2	47.638 75	17.835 2
	因素 C	0.094 17	2	0.047 08	0.017 6
	因素 D	2.401 80	2	1.200 90	0.449 6
最大应力值	因素 A	1 951.829 27	2	975.914 63	80.821 4
	因素 B	232.127 76	2	116.063 88	9.612 0
	因素 C	49.969 07	2	24.984 53	2.069 1
	因素 D	181.064 91	2	90.532 45	7.497 5

3.2.3 最优方案及试验验证

综上所述,因为对应 2 个指标各因素的优水平选择均相互矛盾,所以需通过综合平衡法来选出最优方案。

从试验结果可以看出,波纹管的最大应力值均远小于屈服强度,且波纹管在实际使用中主要受到来自振动的损伤,因此在进行优水平选择时应将一阶固有频率作为优先参考指标。从极差分析和方差分析可以看出,相对于最大应力值,因素 A、因素 B 对一阶固有频率的影响显著程度更高,因此因素 A、因素 B 的优水平组合应选择为 A_3B_1 。同时,相对于一阶固有频率,因素 C、因素 D 对最大应力值的影响显著程度更高,因此因素 C、因素 D 的优水平组合应选择为 C_2D_3 。综上,波纹管的最优结构参数组合应为 $A_3B_1C_2D_3$,即壁厚为 0.25 mm、波高为 11.6 mm、波谷曲率半径为 1.30 mm、内径为 121.0 mm。

由于最优方案不在 9 组试验中,需要追加验证试验。验证试验的结果以及优化前、后的试验指标对比见表 6 所列。从表 6 可以看出:结构参数优化后的波纹管一阶固有频率由 48.143 Hz 增加到 60.327 Hz,提升了 25.3%;最大应力值由 109.07 MPa 增加到 130.89 MPa,但其应力大小仍远小于屈服强度。因此,一阶固有频率的提高

意味着波纹管低阶固有频率能避开低频激励的频率范围(0~50 Hz),从而避免共振的产生,提高波纹管在服役条件下的抗振性能。

表 6 结构参数优化前、后试验指标对比

项目	参数组合	一阶固有频率/Hz	最大应力值/MPa
优化前	$A_2B_2C_2D_2$	48.143	109.07
优化后	$A_3B_1C_2D_3$	60.327	130.89

综上所述,基于正交试验的结构参数优化模型能有效地提高波纹管的服役性能,从而提高其使用寿命。

4 结 论

(1) 波纹管一阶固有频率及最大应力值随壁厚的增大而增大,随波高、内径的增大而减小,随波谷曲率半径的增大呈先减小后增大的趋势。

(2) 各因素对一阶固有频率及最大应力值的影响主次顺序均依次为壁厚、波高、内径、波谷曲率半径。

(3) 某型号波纹管的最优结构参数组合为:壁厚 0.25 mm,波高 11.6 mm,波谷曲率半径 1.30 mm,内径 121.0 mm。该结构参数下,一阶固有频率由 48.143 Hz 增加到 60.327 Hz,最大应力值相对较小,因此提高了波纹管的服役性能。

(下转第 645 页)

实现开漏功能的I²C接口电路。在传统的I²C接口电路的设计上加入自检测拉低时钟总线并进行自校准功能和自控制开漏使能电路,其较高的通信稳定性和性能以及高移植性可以灵活地应用在数字集成电路的设计中。测试结果表明,该I²C接口电路拥有较高的通信位速率和通信稳定性,与现有I²C接口电路相比,具有自检测并自校准时钟总线和可控的开漏功能,在当前主流的集成电路设计中具有非常大的优势。

[参 考 文 献]

- [1] NAOREM A, SHUMA A, LOITONGBAM S S. A review on bus protocols and conversion/translator between different protocols[J]. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 2019, 40(8): 1665-1682.
- [2] YOST B. Inter-integrated circuit (I²C) bus extender; US 20170168976B2[P]. 2017-06-15.
- [3] LAZARO J, ASTARLOA A, ZULOAGA A, et al. I²C_{Sec}: a secure serial chip-to-chip communication protocol[J]. *Journal of Systems Architecture*, 2011, 57(2): 206-213.
- [4] LEE T H, CHEN W L. Inter-integrated circuit bus arbitration system capable of avoiding host conflict; US10191883B2[P]. 2019-01-29.
- [5] SHIAU J K, HUNG W S, CHANG C M. Development of a distributed multi-MCU based flight control system for unmanned aerial vehicle[J]. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2015, 18(3): 251-258.
- [6] TAILLIET F, HASSANI C A E. Apparatus for inter-integrated circuit (I²C) clock transmission channel wherein each filtering modules cooperates with the resistive circuit; US10558609B2[P]. 2020-02-11.
- [7] ZHU J, WU Y F, SUN B, et al. Advanced peripheral bus based inter-integrated circuit communication device; EP3729285A1[P]. 2020-10-28.
- [8] ABHISHEK N P. PIC32MZ custom I²C master communication API library[J]. *Electrical and Electronic Engineering*, 2019, 9(2): 45-52.
- [9] CHAITHANYA A S, SINDHUJA D, BHAVANA D, et al. Design and interfacing of I²C master with register and LCD slaves[J]. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2020, 9(4): 2355-2360.
- [10] FU H L, ZHANG J, LU S J. Method and circuit for waking up I²C device; US20200065116A1[P]. 2020-02-27.

(责任编辑 张 镛)

(上接第 603 页)

[参 考 文 献]

- [1] 丁子祈,何乃辉,韩先洪. 金属波纹管热屈曲成形数值模拟研究[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(11): 109-114.
- [2] WEI S G, XU L P, HE K, et al. Experimental study on manufacturing metal bellows forming by water jet incremental forming[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(1/2/3/4): 129-133.
- [3] 张清波,马咏梅,邹晗阳,等. 焊接金属波纹管结构参数对平衡直径的影响[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(8): 47-52.
- [4] 周绍华,闫畅迪,黄永华. 波纹管结构尺寸及内芯对管内液氮流动的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(1): 107-113.
- [5] LIU J, LV Z Y, LIU Y, et al. Deformation behaviors of four-layered u-shaped metallic bellows in hydroforming[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33: 16-17.
- [6] JIANG L F, HE Y, LIN Y C, et al. Influence of process parameters on thinning ratio and fittability of bellows hydroforming[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(7/8): 3371-3387.
- [7] YANG J L, WANG G F, ZHAO T, et al. Study on the experiment and simulation of titanium alloy bellows via current-assisted forming technology[J]. *JOM*, 2018, 70(7): 1118-1123.
- [8] GAWANDE S H, PAGAR N D. A combined numerical and experimental investigation on the effect of dynamics characteristics of metal expansion bellows[J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2018, 6(5): 401-416.
- [9] PRSANNA N K J, JOHNS K S, SARATHI J R K, et al. Effect of design parameters on the static mechanical behaviour of metal bellows using design of experiment and finite element analysis[J]. *International Journal on Interactive Design & Manufacturing*, 2017, 11(3): 535-545.
- [10] 周炬,苏金英. ANSYS Workbench 有限元分析实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2017:13-14.
- [11] 高庆东. 航天用波纹管失稳、轴向刚度及结构优化设计研究[D]. 北京:北京化工大学,2020.
- [12] 刘春生. 波形参数对波纹管性能的影响[J]. *炼油设计*, 1996(1): 53-56.
- [13] 刘江. 管路用多层 U 形波纹管结构参数对性能影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [14] 田亚莉. 基于降噪的汽车进气波纹管基础研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2006.

(责任编辑 胡亚敏)