

# 基于BQGA的重型液氧/煤油发动机柔性波纹管波形优化研究

赵 剑<sup>1</sup>, 谭永华<sup>2</sup>, 陈建华<sup>1</sup>

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

**摘 要:**适用于高温、高压、富氧燃气的柔性摇摆组件是我国重型液氧/煤油发动机“泵后摇摆”总体布局的核心组件,也是首先需要攻克的关键技术之一。为了从多波形参数匹配的细观角度揭示波形参数之间的敏感度关系,以及波形参数对结构特性的影响机理,将波形优化问题提炼为多变量、多目标的最优化问题,基于参数化非线性有限元仿真程序和量子位 Bloch 球面坐标的量子遗传算法(BQGA)进行协同优化。同时,在优化流程中,采用多项式响应面模型代替直接有限元求解,提高了优化效率。研究结果给出了最优波形方案,相对于基准波形,优化波形的承压能力提高了8.6%,而变形补偿刚度减少了41.32%。

**关键词:**液氧/煤油发动机;量子遗传算法;柔性关节;波纹管优化

**中图分类号:**V434-34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2018)01-0015-07

## Research on waveform optimization of flexible bellows for heavy LOX/kerosene engine based on BQGA

ZHAO Jian<sup>1</sup>, TAN Yonghua<sup>2</sup>, CHEN Jianhua<sup>1</sup>

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** China's heavy LOX/kerosene engine will adopt a new overall layout which is named as "swing behind the pump", in which the flexible swaying assembly must bear high temperature, high pressure and oxygen enriched gas, and is one of the key technologies needing to be overcome first. The multi-layer bellows is a flexible joint which is used to compensate the deformation when the engine sways. In order to uncover the sensitivity relationship between waveform parameters of bellows from the microscopic view, as well as their effects on the structural characteristics, the waveform optimization of the flexible bellows is regarded as a multivariable and multi-objective optimal problem, and the collaborative optimization are conducted based on parametric nonlinear finite element program and Bloch quantum genetic algorithm (BQGA). In addition, the polynomial response surface model is also used in the optimization process instead of direct finite element solution, which is great helpful for improving the optimization efficiency. The optimal waveform of bellows was obtained. The results indicate that, compared to reference

收稿日期:2017-06-30;修回日期:2017-07-10

作者简介:赵 剑(1986—),男,博士,研究领域为液氧/煤油发动机总体设计与优化

bellows, the pressure-bearing capacity of optimal bellows is increased by 8.6%, while the deformation compensation stiffness is reduced by 41.32%.

**Keywords:** LOX/kerosene engine; quantum genetic algorithm; flexible joint; bellows optimization

## 0 引言

我国 500 吨级重型液氧/煤油发动机(简称发动机)将采用“泵后摇摆”的总体布局,即在涡轮出口与推力室入口之间设置柔性摇摆环节,仅通过摆动推力室控制推力矢量和调节火箭飞行姿态。采用“泵后摇摆”总体布局能有效减轻发动机质量、减小摇摆空间、降低摇摆力矩以及避免质心偏斜等,且发动机结构更紧凑、火箭构型更优化,但是难点在于研制适用于高温、高压、富氧燃气工况的柔性摇摆组件。

柔性 S 形波纹管是摇摆组件的补偿关节,为多层薄壁柔性壳体。对于该类结构,早期的研究多基于简单梁、近似圆柱体以及近似壳体假定而得到弹性理论解,后来钱伟长先生利用轴对称理论提出了细环壳的一般解<sup>[1]</sup>,开创了轴对称圆环壳的摄动求解方法。黄黔<sup>[2]</sup>建立了具有曲率突变和切向突变的轴对称波纹壳微分方程组,后来黄黔指导朱卫平<sup>[3-5]</sup>从 E. L. Axelrad 的柔性壳理论出发,分别给出了常用 U 形、C 形、 $\Omega$  形波纹管整体弯曲问题的一般解,分析了波纹管整体弯曲的非线性特性。时至今日,波纹管组件在一般工业领域中的应用已十分普遍,但研究对象多限于 U 形、C 形以及  $\Omega$  形波纹管<sup>[6-12]</sup>,对于 S 形波纹管的研究较为少见。

多层 S 形波纹管波形优化是一个本质多变量、多目标的最优化问题,影响波形结构的特征变量共 6 类。对于多变量、多目标的优化问题,传统优化算法如单纯形法、复合形法等,对目标函数和约束函数的形式要求严格,不利于寻优过程的组织和实施。因此,本文采用量子遗传算法进行波形优化,首先建立多层 S 形波纹管非线性有限元参数化仿真程序,并分析基于 Bloch 球面的量子遗传算法对波形优化问题的适用性;在此基础上,搭建基于该算法和响应面模型的波形优化平台,最终获得优化波形方案。

## 1 S 形波纹管组件结构特性

摇摆组件的变形补偿核心由多层波纹管、铠装环和铠装网罩组成(图 1),其中多层波纹管为柔性连接关节,主要补偿摇摆变形;铠装环贴合在波纹管身部,承担大部分的内压载荷,能显著提高波纹管的承压能力;铠装网罩包覆在铠装环外围,除了隔离外部杂质,还能进一步增强波纹管的承载能力和稳定性。

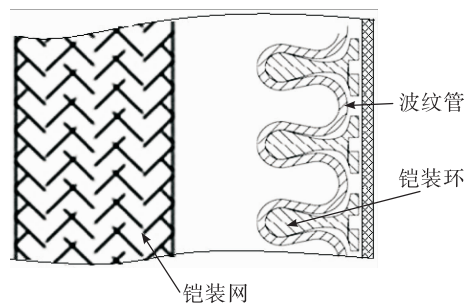


图 1 S 形波纹管组件结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of S shaped bellows

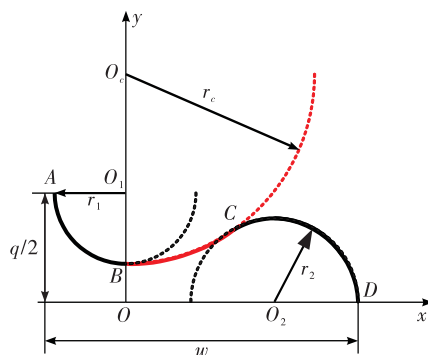


图 2 三段圆弧相切式波形

Fig. 2 Waveform structure of three tangency segment arcs

S 形波形特征截面由三段圆弧相切而成(图 2),使得 S 形波形平滑过渡,以最大限度减小由于形面不规整而引起的应力集中。波形几何分析发现,由于过渡圆弧较短且接近直线,使得整体波形呈现直线相切式特征,若要保持相切直线段存在和

保证波形为S形结构,波形参数必须满足:

$$\frac{q}{2} \leq r_1 + r_2 \leq \sqrt{(w - r_1 - r_2)^2 + \left(\frac{q}{2}\right)^2} \quad (1)$$

不满足要求的波形结构,分为波形不满足直线相切要求(图3)和波形不符合S形特征(图4)两种。在本文所研究的波形参数设计与优化的内容中,上述两种情况的波形组合都被排除在外。

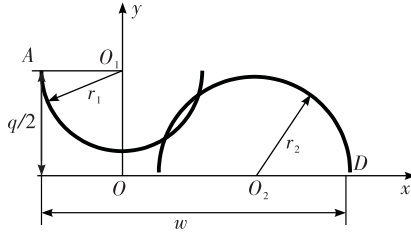


图3 波形不满足直线相切要求

Fig. 3 Example of non-straight line tangency waveform

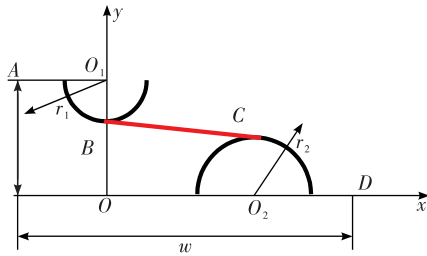


图4 波形不符合S形特征

Fig. 4 Example of non-S shaped waveform

综合波形几何特征分析,基于ANSYS平台APDL语言和Matlab平台,开发了包含多层S形波纹管、铠装环以及铠装网套的参数化有限元仿真程序。考虑到摇摆组件及其在内压和轴向载荷作用下结构变形的轴对称特性,采用了二维轴对称单元SHELL209进行分析,波纹管和铠装环材料都为1Cr18Ni9Ti。由于摇摆组件额定工况下的响应呈现出高应力、大变形以及接触作用等非线性特征,在有限元模型中也充分考虑了上述非线性效应。

## 2 基于BQGA的S形波形优化

### 2.1 BQGA算法的基本原理

基于Bloch球面坐标的量子遗传算法(Bloch Quantum Genetic Algorithm, BQGA)<sup>[13-14]</sup>是我国学者在基本量子遗传算法基础上发展的进化算法,

BQGA方法采用三链编码形式,将量子位的平面单元描述拓展到Bloch球面描述,使量子动态行为得以充分体现,并采用基于Bloch球面的旋转进化策略,实现了进化参数的自动最佳匹配,避免了不协同进化现象,因而可以更好地模拟量子行为。

#### 2.1.1 量子编码

采用基于Bloch球面描述的量子比特编码,种群中第*i*个染色体 $q_i$ 编码形式:

$$q_i = [|\varphi_{i1}\rangle, |\varphi_{i2}\rangle, \dots, |\varphi_{in}\rangle] (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中: $m$ 为种群规模; $n$ 为优化空间维度; $|\varphi_{ij}\rangle$ 表征第*i*个染色体的第*j*维变量:

$$|\varphi_{ij}\rangle = \cos(\theta_{ij}/2)|0\rangle + \sin(\theta_{ij}/2)e^{i\varphi_{ij}}|1\rangle \quad (3)$$

式中: $\theta_{ij} \in [0, \pi]$ ;  $\varphi_{ij} \in [0, 2\pi]$ ;  $e^{i\varphi}$ 称为相对相位因子,采用Bloch球面描述后<sup>[21]</sup>,量子比特属于由连续变量 $\theta$ 和 $\varphi$ 所刻画的矢量空间。在量子计算理论中,染色体观测的实质是 $|\varphi_{ij}\rangle$ 在基矢量泡利矩阵 $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ 和 $\sigma_z$ 下的投影变换,即:

$$\begin{aligned} x_{ij} &= (|\varphi_{ij}\rangle)^T \sigma_x (|\varphi_{ij}\rangle) \\ y_{ij} &= (|\varphi_{ij}\rangle)^T \sigma_y (|\varphi_{ij}\rangle) \\ z_{ij} &= (|\varphi_{ij}\rangle)^T \sigma_z (|\varphi_{ij}\rangle) \end{aligned} \quad (4)$$

#### 2.1.2 解空间变换

根据量子计算原理,一个染色体量子比特 $|\varphi_{ij}\rangle$ 包含三部分Bloch坐标,即对应着三个潜在最优解。由于Bloch坐标位于区间 $[-1, 1]$ ,需要进行解空间变换。即假定待优化问题中第*i*个染色体第*j*位置量子比特 $|\varphi_{ij}\rangle$ 变量取值区间为 $[A_j, B_j]$ ,则解空间变换关系:

$$\begin{cases} X_{ij} = \frac{1}{2}[A_j(1 - x_{ij}) + B_j(1 + x_{ij})] \\ Y_{ij} = \frac{1}{2}[A_j(1 - y_{ij}) + B_j(1 + y_{ij})] \\ Z_{ij} = \frac{1}{2}[A_j(1 - z_{ij}) + B_j(1 + z_{ij})] \end{cases} \quad (5)$$

#### 2.1.3 量子染色体进化策略

为了有效利用量子编码的叠加特性,在Bloch球面进行寻优搜索,假定当前进化代数内最优个体的第*j*个量子比特为 $|\varphi_{best,j}\rangle$ ,当前种群中第*i*个个体 $q_i$ 的第*j*维量子比特为 $|\varphi_{ij}\rangle$ 。

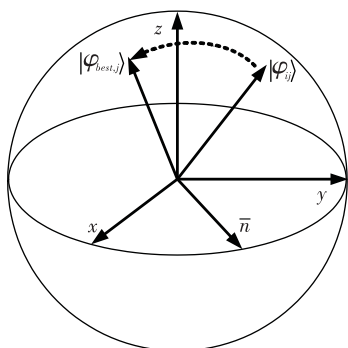


图 5 Bloch 量子位旋转示意图

Fig. 5 Diagrammatic sketch of Bloch quantum rotation

最优进化策略是在 Bloch 球面上将  $|\varphi_{ij}\rangle$  向着  $|\varphi_{best,j}\rangle$  旋转,如图 5 所示,定义旋转轴矢量:

$$\vec{n} = q_{ij} \times q_{best,j} \quad (6)$$

根据量子计算原理,在 Bloch 球面上,以  $\vec{n}$  为旋转轴,将  $|\varphi_{ij}\rangle$  向  $|\varphi_{best,j}\rangle$  旋转角度  $\delta$  的选择操作:

$$R(\delta) = \exp\left(-i \frac{\delta}{2} \vec{n} \cdot \vec{\sigma}\right) = \cos \frac{\delta}{2} I - i \sin \frac{\delta}{2} \left( \frac{\vec{n} \cdot \vec{\sigma}}{\|\vec{n}\|} \right) \quad (7)$$

式中:  $I$  为单位矩阵;  $\vec{n}$  为模为 1 的旋转轴向量;  $\vec{\sigma}$  为泡利分量。由此可知,相应的染色体进化方式为:

$$|\varphi_{ij}\rangle = R(\delta) |\varphi_{ij}\rangle \quad (8)$$

上述进化方式的实质为:当量子位在 Bloch 球面上向着目标位移动时,经过的路径为当前量子位和目标量子位 Bloch 球面大圆劣弧。同时,为了防止种群进化陷入局部最优,引入了基于 Hadamard 门的量子变异策略和量子灾变策略<sup>[12]</sup>。

## 2.2 波形优化流程

波形优化基于波纹管设计方案,假定总壁厚和波数不变,波形参数取值范围见表 1。为了保证最大摇摆角度下相邻波纹管不接触,取波节之间的静态间隙大于 8 mm。

表 1 结构参数分布范围

Tab. 1 Distribution range of structural parameters

影响因子	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$q/\text{mm}$	$w/\text{mm}$	$c$
最小值	8	8	38	40	8
最大值	14	14	48	50	14

波纹管组件在承受高温、高压燃气作用的同时,还要补偿摇摆变形,保证发动机可靠工作。因此承压性能和变形补偿性能是衡量波纹管组件结构特性的两个关键指标,具体而言,周向膜应力可衡量耐压强度指标,而轴向刚度可表征其补偿性能。波形优化数学模型为:

$$\begin{cases} \min F(x) = (f_s(x), f_k(x)) \\ \max(\sigma_{von}(x)) \leq \bar{\sigma}_s \\ \max(\sigma_m(x)) \leq \bar{\sigma}_m \\ \delta_s \geq 8 \text{ mm} \\ x \in X \subset R^n \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $f_s(x)$  和  $f_k(x)$  分别表示周向膜应力均值和轴向刚度;下标  $m$  表示膜应力。波形优化属于多目标优化,采用线性加权将其组合成单优化目标,并将轴向膜应力和轴向刚度分别进行归一化无量纲处理。同时,采用了基于响应面的近似代理模型技术替代直接有限元求解,避免在优化进程中采用直接有限元求解导致计算成本大、时间长等问题,波形优化流程见图 6 和表 2。

## 2.3 波形优化结果

分别采用遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、量子遗传算法 (Quantum Genetic Algorithm, QGA) 和 BQGA 进行波形优化,设定所有算法统一进化 500 代,每个算法分别进行 30 次独立的优化计算,优化结果的统计值如表 3 所示,典型寻优过程见图 7。

计算结果表明,基于三链基本编码形式的 BQGA 算法能够较快搜索到最优解,兼具寻优效率和寻优能力强的综合优势。优化进程中采用近似模型替代仿真程序,显著减少了仿真计算规模,降低了设计空间搜索的资源耗费,极大地提高了寻优效率。综合三种寻优算法得到的理论最优波形参数见表 4 和图 8。

相对于基准方案,理论优化方案的膜应力均值减少了 8.6%,轴向刚度减少了 41.32%,即在提高了多层波纹管承压能力的同时,还有效减少了变形补偿刚度。对比图 8 波形几何结构发现,基准方案波纹管与铠装环挤压接触间隙较小,且波形层数大于理论优化方案,从而导致轴向变形刚度增大。同时,理论优化方案的波高和波距都相对减小,从而缩短了波纹管组件的轴向和径向尺寸,可以从整体上减少燃气摇摆组件的外廓尺寸和总质量。

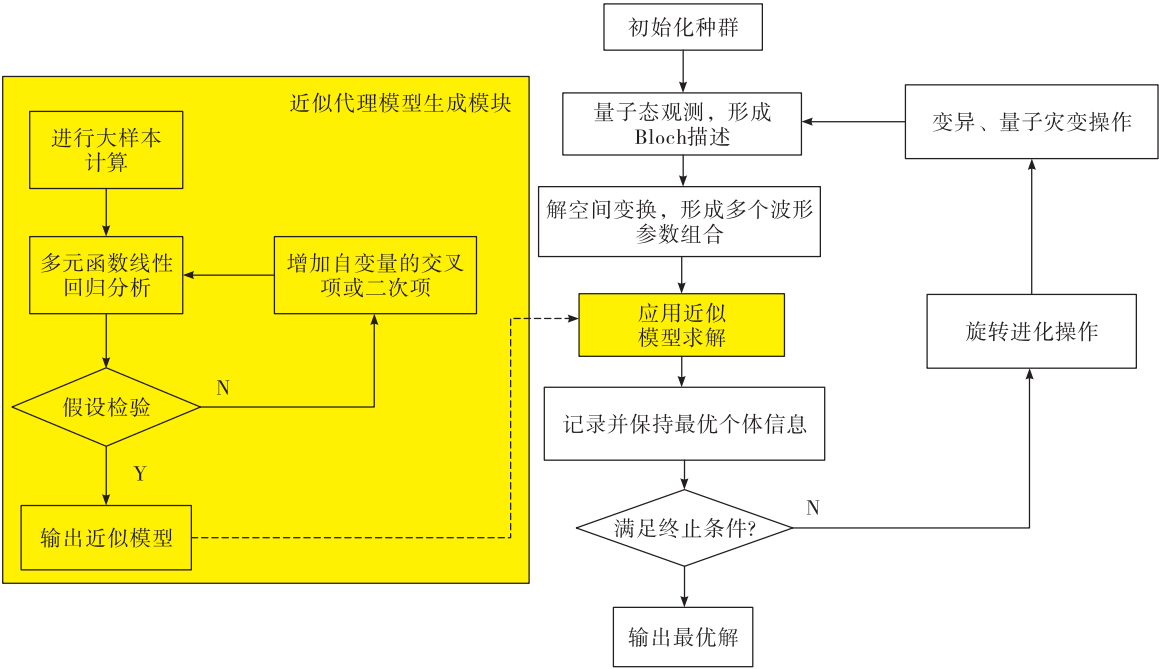


图 6 基于 BQGA 的波形优化流程

Fig. 6 Optimization processes of bellows based on BQGA

表 2 基于 BQGA 的波形优化步骤

Tab. 2 Optimization procedures of bellows based on BQGA

算法:波纹管波形优化步骤	
Step1:	初始化种群,随机生成单个以量子比特为编码的染色体种群。
Step2:	进行量子态观测,形成波形参数的 Bloch 描述。
Step3:	将上述多个二进制解转换为响应的十进制解,并映射到各个参数的取值区间,形成多个波形参数组合,并输出到波形参数文件。
Step4:	逐一读取波形参数文件,基于代理模型计算,输出目标解。
Step5:	记录并保留(更新)群体最优解,同时判断是否满足终止条件。如果满足,算法终止;否则,则进行 Step6。
Step6:	进行选择进化操作。
Step7:	进行量子变异、量子灾变操作,返回 Step2 并更新种群。

表 3 优化算法寻优结果比较  
Tab. 3 Comparison of optimization results for different algorithms

算法	种群规模	最优解	均值	计算时间/s
GA	100	0. 5585	0. 5647	10. 63
QGA	100	0. 5537	0. 5565	137. 67
BQGA	100	0. 5533	0. 5547	11. 23

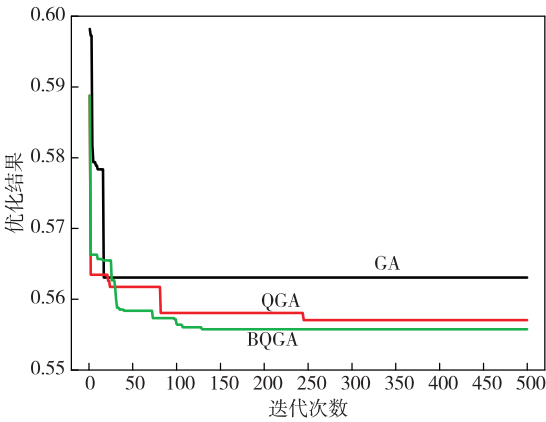


图 7 波形优化寻优过程比较

Fig. 7 Comparison of optimization processes for different algorithms



表 4 波形参数优化结果

Tab. 4 Optimization results of parameters of bellows

波形参数	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$q/\text{mm}$	$w/\text{mm}$	$c$	膜应力均值/MPa	轴向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
基准方案	11.50	9.50	49.00	50.50	12	131.01	10 823.47
理论优化方案	12.06	10.33	41.73	44.64	14	119.74	6 351.17

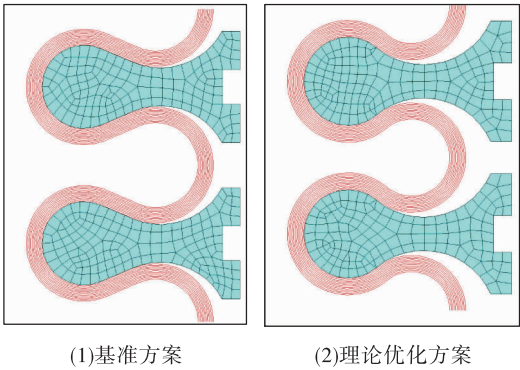


图 8 波纹管波形优化结果比较

Fig. 8 Comparison of optimization results of bellows

3 结束语

将多层 S 形波纹管组件的波形优化问题,处理为多变量、多目标的最优化问题,基于非线性有限元方法、近似代理模型技术以及 BQGA 寻优算法搭建了波形优化平台,并获得了最优波形方案。研究表明:

1)对于波纹管波形优化问题,BQGA 方法的寻优效率和寻优能力都强于遗传算法和量子遗传算法;

2)相对于基准波形,理论优化波形的膜应力均值减少了 8.6%;优化波形增加了波形的连续性,使得波纹管与铠装环的接触关系更为合理,轴向刚度减少了 41.32%。即优化波形不但增强了多层波纹管的承压能力,还有效减少了其变形补偿刚度。

3)理论优化方案的波高和波距都小于基准方案,可以减小波纹管组件的轴向和径向尺寸,进一步减少结构质量。

参考文献:

[1] 钱伟长,吴明德. U 型波纹管的非线性特性摄动法计算[J]. 应用数学和力学,1983,4(5): 595-608.

[2] 黄黔. 轴对称载荷下旋转壳弹性小应变的轴线任意打挠

度问题[J]. 应用数学和力学,1986,7(2):115-125.

[3] 朱卫平,黄黔. 中细柔性圆环壳整体弯曲的一般解及在波纹管计算中的应用—U 形波纹管的计算[J]. 应用数学和力学. 2002,10(23): 1035-1040.

[4] 朱卫平,黄黔. 中细柔性圆环壳整体弯曲的一般解及在波纹管计算中的应用—C 形波纹管的计算[J]. 应用数学和力学. 2002,23(10): 1025-1033.

[5] 朱卫平,黄黔. 中细柔性圆环壳整体弯曲的一般解及在波纹管计算中的应用—Ω 形波纹管的计算[J]. 应用数学和力学. 2002,23(8): 798-804.

[6] PANDA B, SUJATA M, MADAN M, et al. Stress corrosion cracking in 316L stainless steel bellows of a pressure safety valve [J]. Engineering failure analysis, 2014, 36 (1): 379-389.

[7] 闫松,谭永华,陈建华. 高压金属软管应力及参数敏感度分析[J]. 火箭推进,2013,39(5):60-64.

YAN Song, TAN Yonghua, CHEN Jianhua. Stress and parameter sensitivity analysis of high-pressure metal hose [J]. Journal of rocket propulsion,2013,39(5): 60-64.

[8] MUSTARI A P A, TAKAHASHI M. Metallurgical analysis of corroded bellows of bellow-sealed valve in lithium flow system [J]. Fusion engineering and design,2013,88(4): 202-208.

[9] KODAIRA T, NABATA A, IKEDA T. A new aluminophosphate phase, AlPO-NS, with a bellows-like morphology obtained from prolonged hydrothermal process or increased pH value of initial solution for synthesizing AlPO4-5 [J]. Microporous and mesoporous materials, 2012, 162 (9): 31-35.

[10] 张树强,王良,陈杰. 液氧泵机械密封用金属波纹管设计研究[J]. 火箭推进,2016,42(2):53-58.

ZHANG Shuqiang, WANG Liang, CHEN Jie. Design research of metal bellows for mechanical seal in liquid oxygen pump [J]. Journal of rocket propulsion,2016,42(2): 53-58.

[11] 韩燕,王淮维. 温度对机械密封金属波纹管力学性能的影响[J]. 润滑与密封. 2012,37(3): 85-88.

[12] HU H X, ZHENG Y G, LIU C B. Predicting the preferential sites to liquid droplet erosion of the bellows assemblies

- by CFD [J]. Nuclear engineering and design, 2011, 241 (6): 2295-2306.
- [13] FARAJI G, MASHHADI M M, NOROUZIFARD V. Evaluation of effective parameters in metal bellows forming process [J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(7): 3431-3437.
- [14] LI P C, LIS Y. Quantum-inspired evolutionary algorithm for continuous spaces optimization [J]. Chinese journal of electronics, 2008, 17(1): 80-84.
- [15] LI P C, LI S Y. Quantum-inspired evolutionary algorithm for continuous spaces optimization based on Bloch coordinates of qubits [J]. Neurocomputing, 2008, 72 (1-3): 591-851.
- [16] HAN K H, KIM J H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem [C]// Proceedings of the 2000 IEEE Congress on Evolutionary Computation. La Jolla, CA, USA: IEEE Press, 2000: 11-17.

(编辑:陈红霞)

(上接第7页)

- [3] WU P K. Qualification testing of 2nd generation high performance apogee thruster: AIAA 2001-3253 [R]. USA: AIAA, 2001.
- [4] HENDERSON S, STECHMAN C. Performance results for the advanced materials bipropellant rocket (AMBR) engine: AIAA 2010-6883 [R]. USA: AIAA, 2010.
- [5] 刘昌国, 张中光, 韩宏印, 汪允武, 孙得川. 高比冲双组元液体远地点火箭发动机研究. 上海航天, 2003(4): 30-33.
- [6] 周红玲, 姜文龙, 刘昌国. 国内外卫星用液体远地点发动机发展综述[J]. 火箭推进, 2011, 37(5): 1-8.
- ZHOU Hongling, JIANG Wenlong, LIU Changguo. Development of liquid apogee engine for satellite at home and abroad [J]. Journal of rocket propulsion, 2011, 37(5): 1-8.
- [7] 姜文龙, 杨成虎, 林庆国. 高性能卫星用490 N轨控发动机研究进展[J]. 火箭推进, 2011, 37(6): 9-13.
- JIANG Wenlong, YANG Chenghu, LIN Qingguo. Development of high performance 490 N apogee engine for satellites [J]. Journal of rocket propulsion, 2011, 37(6): 9-13.
- [8] 杨成虎, 林庆国, 刘昌国. 高性能液体远地点发动机技术发展[J]. 火箭推进, 2013, 39(4): 1-7.
- YANG Chenghu, LIN QINGguo, LIU Changguo. Technology development of high-performance liquid apogee engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(4): 1-7.

(编辑:马杰)