

# 卫星抖动对激光干涉测量影响的仿真分析

王璐钰<sup>1,2</sup>,李玉琼<sup>3\*</sup>,蔡榕<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094;

2. 中国科学院大学航空宇航学院,北京 101408;

3. 中国科学院力学研究所,北京 100190)

**摘要:**针对“太极计划”中由卫星抖动引起的影响激光干涉测量精度的两个主要噪声:激光指向抖动噪声、光程倾斜(tilt-to-length, TTL)耦合噪声,仿真分析了这两个噪声的抑制水平。采用差分波前传感技术,结合激光指向抖动噪声抑制系统的物理图像,求解了系统中各功能模块的传递函数,构造了抑制激光指向抖动噪声的 Simulink 仿真系统;针对 TTL 中常用的凹凸透镜组合技术手段,首次设计了由双凸透镜组成的 4f 成像系统,并采用 MATLAB 程序计算分析了 TTL 耦合噪声水平。仿真结果表明,激光指向抖动噪声、TTL 耦合噪声抑制效果均优于“太极计划”的要求,且 4f 成像系统具有设计调控简便、精度高、易操作等优点。

**关键词:**激光干涉;激光指向抖动噪声;光程倾斜耦合噪声

中图分类号:TP391 文献标识码:B

## Simulation Analysis of Influence of Satellites Jitter on Measurement of Laser Interferometer

WANG Lu-yu<sup>1,2</sup>, LI Yu-qiong<sup>3\*</sup>, CAI Rong<sup>1,2\*\*</sup>

(1. Aerospace Information Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. School of Aeronautics and Astronautic, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China;

3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the two main noises that affect the accuracy of laser interferometer caused by satellites jitter in the "Taiji mission": laser pointing jitter noise and tilt-to-length (TTL) coupling noise, the simulations analyzed the suppression levels of these two noises. Using differential wave-front sensitivity technology, combined with the physical image of the laser pointing jitter noise suppression system, the transfer function of each functional module in the system was solved, and a Simulink simulation system that suppressed the laser pointing jitter noise was constructed; for the common technical means of concave-convex lenses combination in TTL, a 4f imaging system composed of biconvex lenses was designed for the first time, which used MATLAB program to calculate and analyze the TTL coupling noise level. The simulation results show that the suppression effects of laser pointing jitter noise and TTL coupling noise are better than the requirements of "Taiji mission", and the 4f imaging system has the advantages of simple design and control, high precision, and easy operation.

**KEYWORDS:** Laser interferometer; Laser pointing jitter noise; TTL coupling noise

### 1 引言

中国科学院“太极计划”拟定于 2033 年左右发射三颗绕

基金项目:国家自然科学基金(61575209);中国科学院青年创新促进会(2018024);中国科学院战略重点研究计划(XDB23030200, XDA17020103)

收稿日期:2020-11-11 修回日期:2020-12-29

日轨道的卫星,其构型为星间距为 300 万公里的等边三角形<sup>[1]</sup>。针对星间的多普勒频移效应,“太极计划”采用外差式激光干涉方法学,并通过四象限光电探测器(four-quadrant photodetector, QPD)测量干涉信号相位的变化来反演引力波<sup>[2]</sup>。空间中,卫星受天体引力梯度、宇宙射线、太阳风和星际磁场等非保守力的影响而发生抖动<sup>[3-5]</sup>。一方面,远端卫星抖动导致激光器出射激光的传播方向发生抖动(激光器出

射光束自身的抖动考虑在内),同时本地卫星的接收望远镜受镜片平整度与打磨精度等因素的影响,使接收到的激光产生波前畸变,从而引起干涉信号的相位发生变化,导致激光干涉测量产生误差<sup>[4-8]</sup>。根据“太极计划”的方案设计,由远端卫星抖动所引起的激光指向抖动噪声应 $\leq 1\text{mrad}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1\text{mHz}-1\text{Hz}$ 。另一方面,本地卫星姿态抖动会引起该卫星上的测试质量(test-mass, TM)产生倾斜,导致从 TM 反射的本地激光光束发生角度倾斜,引入额外的光程差,并产生角度相干干涉效应,即所谓的 TTL 耦合噪声<sup>[9-14]</sup>。同理,根据“太极计划”的方案设计,由本地卫星抖动所引起的 TTL 耦合噪声应 $\leq \pm 25\mu\text{m}/\text{rad} @ \pm 300\mu\text{rad}$ 。

在激光指向抖动噪声抑制方面,Heinzel 等人通过采用由伺服系统控制的迈克尔逊干涉仪自动对准系统进行了激光指向抖动噪声抑制,实验研究结果表明指向抖动噪声低于 $10\text{nrad}/\sqrt{\text{Hz}}@0.1\text{Hz}-100\text{Hz}$ <sup>[6]</sup>;Hyde 等人设计了激光指向抖动噪声抑制的时域仿真系统,仿真结果显示指向噪声的抑制水平可达到 $4\text{nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[7]</sup>;本研究小组董玉辉等人通过利用差分波前传感技术(differential wave-front sensitivity, DWS),将幅值为 $5\mu\text{rad}$ 、频率为 $10\text{mHz}$ 的正弦激光抖动输入信号抑制到 $100\text{nrad}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{mHz}-1\text{Hz}$ 以下<sup>[8]</sup>。在 TTL 耦合噪声抑制方面,Tröbs、赵亚以及 Chwalla 等人,采用由凹凸透镜组成的成像系统进行了相关的研究,证明了 TTL 耦合噪声会导致光程变化,引入成像系统可有效抑制该噪声至 $\pm 25\mu\text{m}/\text{rad} @ \pm 300\mu\text{rad}$ 以内<sup>[10-14]</sup>。纵观国内外的研究成果,针对“太极计划”需求的宽、低频率范围( $0.1\text{mHz}-1\text{Hz}$ )的激光指向抖动噪声抑制效果尚需进一步改进;由于采用凹凸透镜组合成像系统抑制 TTL 耦合噪声的技术方案存在光路调控难度大、成像系统设计要求高等缺陷,因此需进一步优化该成像系统的设计方案。

本文研究了基于 DWS 技术的激光指向抖动噪声抑制仿真系统和基于费马原理的 TTL 耦合噪声抑制 4f 成像系统,根据现有的实验条件和器件水平,首次确立了这两个噪声可被抑制到的最低水平。同时,设计了一种易于搭建、测量精度高的新型 TTL 耦合噪声抑制成像系统。本文所阐述的激光指向抖动抑制仿真系统和 TTL 耦合噪声抑制技术将为未来“太极计划”激光干涉仪关键技术的研究提供技术参考。

## 2 激光指向抖动噪声抑制系统

如图 1 所示,基于 DWS 技术的激光指向抖动噪声抑制系统主要由比例-积分-微分(proportion integration differentiation, PID)控制器、QPD、快速控制反射镜(fast steering mirror, FSM)组成。在系统运行的过程中,首先,由 QPD 探测、相位计读出、DWS 技术计算得到远端传播激光和本地激光之间的相位差信号  $\Delta\theta$ ,并转换求出它们之间的偏角  $\alpha$  (计算方式如等式(1)),然后通过 PID 控制器调控 FSM 对  $\alpha$  进行角度补偿,使得本地激光平行于传播激光,降低激光指向抖动噪声对激光干涉测量精度的影响<sup>[5,15]</sup>。

$$\alpha = \frac{3\lambda}{16r}\Delta\theta = \frac{1}{K}\Delta\theta \quad (1)$$

其中, $r=0.5\text{mm}$  为 QPD 的光敏面半径, $\lambda=1064\text{nm}$  为激光波长, $K$  为  $\Delta\theta$  与  $\alpha$  之间的转化因子(由 FSM 特性可知,理论上,水平、垂直方向的转化因子  $K_{pitch}=K_{yaw}=K$ ),代入 QPD 及激光参数,由等式(1)可得  $K \approx 2506$ 。因为用相位计读出的  $\Delta\theta$  精度可达到  $\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$  量级,所以由等式(1)可知, $\alpha$  的测量精度可达到  $\text{nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$  量级<sup>[5]</sup>。

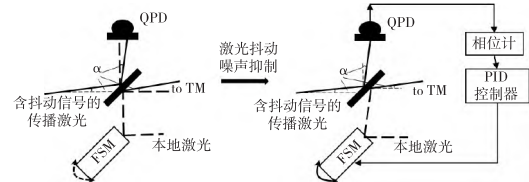


图 1 激光指向抖动噪声抑制系统原理图

### 2.1 系统建模

如图 2(a)所示,本系统中使用的 FSM 是由德国 PI 公司研制的二维反射镜平台 S-330,具有水平、垂直 2 个方向的偏转度,内部的精密位移检测传感器由压电陶瓷微位移器构成。该 FSM 输出位移信息转化为角度信息后的传递函数为

$$G_F(s) = \frac{k_x}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{12e6}{s^2 + 13440s + 9.216e7} \quad (2)$$

其中  $k_x = 12\text{N}^2/\mu\text{m}$ ,  $\zeta = 0.7$ ,  $\omega_n = 9600\text{rad/s}$ <sup>[16,17]</sup>。

如图 2(b)所示,系统中 QPD 是中国电子科技集团公司第四十四研究所开发的一款四象限弱光探测器。根据 QPD 的参数计算出其传递函数为

$$G_Q(s) = \frac{R_9 R_8 C_{24} C_{23} s^2}{R_9 R_5 C_{23} C s^2 + (R_9 C + R_5 C_{23}) s + 1} = \frac{6.48e - 9s^2}{1.377e - 15s^2 + 5.127e - 7s + 1} \quad (3)$$

其中  $R_9 = 27\text{k}\Omega$ ,  $R_8 = 2.4\text{k}\Omega$ ,  $R_5 = 51\Omega$ ,  $C_{24} = C_{23} = 10\text{nF}$ ,  $C = 0.1\text{pF}$ <sup>[18]</sup>。

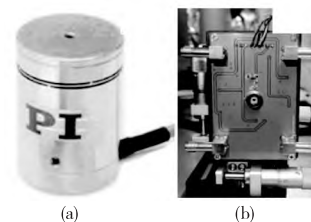


图 2 实物图 (a) S-330; (b) QPD

PID 控制器传递函数为<sup>[19]</sup>

$$G_C(s) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s \quad (4)$$

其中, $k_p, k_I, k_D$  是要确定的控制参数,需根据实际系统性能

进行调整确定。

如图 3 所示,基于以上构建的各模块系统传递函数并结合其功能,在 Simulink 中搭建了激光指向抖动噪声抑制系统。该系统以含抖动信号的传播激光入射到 QPD 的方向作为参考,对  $\alpha$  (系统输入量) 进行高精度测量,根据测量结果调整本地激光使其平行于传播激光以便产生稳定的干涉信号;系统输出量为噪声抑制水平。

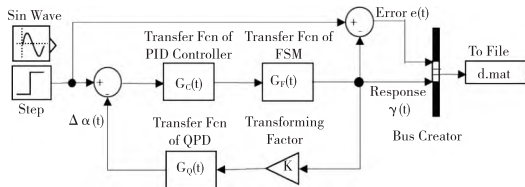


图 3 激光指向抖动噪声抑制系统仿真模型

## 2.2 仿真与分析

经多次调试后,确定了该系统的最佳 PID 参数:  $k_p = 7.68, k_i = 1 * 10^{-5}, k_d = 0$ 。如图 4(a) 显示了在  $\alpha(t) = 300\mu\text{rad}$  的阶跃输入响应(图中虚线)下系统的时域仿真结果,其中实曲线代表系统的输出响应曲线,点画线代表输入信号和输出信号之间的误差信号。从图 4(a) 可以看出:

- 1) 系统的稳态误差接近于零;
- 2) 稳态响应  $\gamma(\infty)$  可以达到  $300\mu\text{rad}$ ;
- 3) 调整时间为  $0.617\text{ms}$ ;
- 4) 计算得超调量为  $4.556\%$ 。

由此可知,控制系统工作状态良好,且调整时间短、超调量小、稳态误差小。

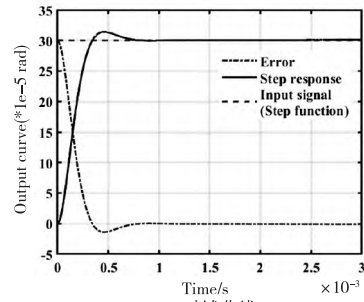
基于时域仿真确定的 PID 控制器参数,将输入信号设置为  $\alpha(t) = 5 * \sin(0.02\pi t) \mu\text{rad}$  的正弦信号模拟传播激光携带的抖动噪声大小,并用 MATLAB 程序对输出数据进行处理,得到频域内的噪声水平。为了准确评估结果,使用由德国马普协会爱因斯坦研究所开发的线性幅度谱密度(line amplitude spectrum density, LASD)方法处理输出数据<sup>[5]</sup>。图 4(b) 显示了频域噪声处理结果,由此可知,激光指向抖动噪声  $\leq 0.1\text{nrad}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1\text{mHz} - 1\text{Hz}$ ,该结果优于“太极计划”的要求,并为后期的物理实验提供了理论指导。

## 3 TTL 耦合噪声抑制系统

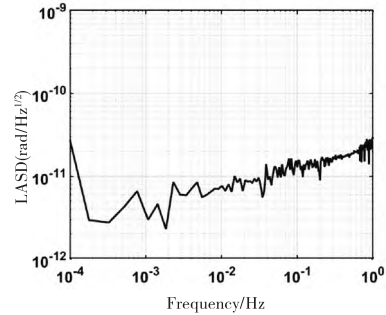
### 3.1 系统设计

如图 5 所示,使用  $4f$  成像系统(两个焦距为  $f$  的双凸透镜,间距为  $2f$ ,物距、像距均为  $f$ )来消除光程差,以抑制 TTL 耦合噪声。

在该系统中,将 TM 置于透镜系统的物方焦点上,QPD 置于其像方焦点上。图 5 中,绘制了 5 种不同倾斜程度的 TM 导致测量光束(由本地卫星上的激光器发出)在  $\pm 300\mu\text{rad}$  范围内倾斜,并与沿光轴方向传播的参考光束(由



(a)时域曲线



(b)频域数据处理结果

图 4 激光指向抖动噪声抑制仿真结果

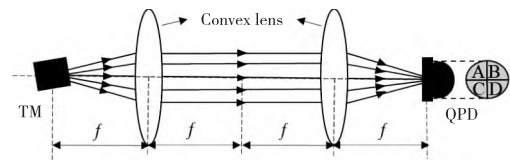


图 5 TTL 耦合噪声抑制系统原理图

远端卫星上的激光器发出)经过  $4f$  成像系统后到达 QPD 光敏面产生干涉信号的现象。由费马原理可知,该过程中,无论 TM 倾角为多大,测量光束经过  $4f$  成像系统后,所走过的光路长度均相等,因而减小甚至抑制了参考光束与测量光束之间的光程差,从而消除了 TTL 耦合噪声。

如表 1 所示为该系统中所使用的双凸透镜(两透镜完全相同)的参数,其型号为 Thorlabs LB1757-C,材质为 N-BK7,折射率为 1.50669,这款透镜是根据太极任务地基实验中使用的 QPD 孔径大小(半径为 0.5 毫米)和光学平台尺寸大小(半径为 29 厘米)设计的。

表 1  $4f$  成像系统中双凸透镜的参数

名称	值/mm
增透膜	1064
直径	25.4
曲率半径	29.5
前焦距	30
后焦距	27.3
中心厚度	7.7

### 3.2 仿真与分析

实验模拟了加入和不加入 4f 成像系统的两种情况下,测量激光和参考激光从 TM 到 QPD 光敏表面整个过程的传播路径,并计算了其相应的 TTL 耦合噪声:

1)如图 6(a)所示,仿真得到该过程中从  $-300\mu\text{rad}$  到  $300\mu\text{rad}$ ,增量为  $10\mu\text{rad}$  的测量激光和水平方向传播的参考激光的传播路径;

2)如图 6(b)所示,利用共轴球面光学系统成像计算公式求得测量激光与参考激光之间的光程差,即纵向光程信号;

3)如图 6(c)所示,加入 4f 成像系统后 TTL 耦合噪声得到了显著抑制,且该噪声  $\leq \pm 6\mu\text{m}/\text{rad}$  @  $\pm 300\mu\text{rad}$  (TTL 耦合噪声为纵向光程信号相对于激光倾角的一阶导数<sup>[10]</sup>)。

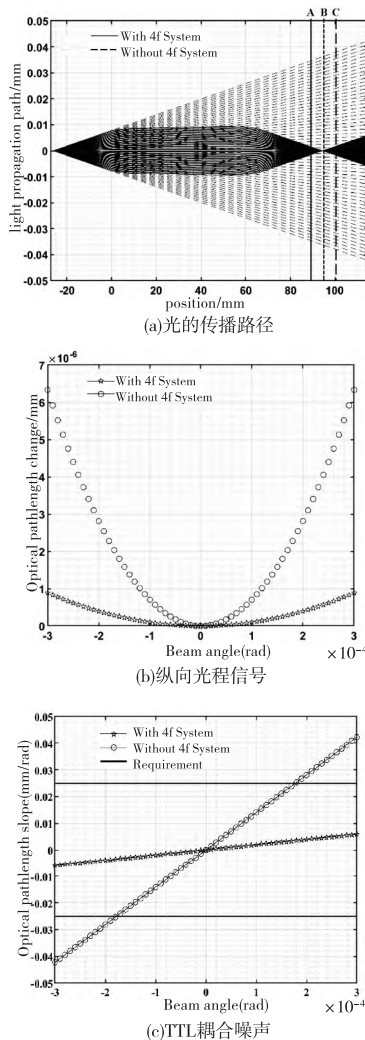


图 6 TTL 耦合噪声抑制仿真结果

分析结果可知,图 6(a)中, A、B、C 分别代表 QPD 光敏面在物理实验中的三个不同位置。其中 A 为本文仿真系统中 QPD 所处的位置(理论计算出的像方焦平面处), B 为使

得 TTL 耦合噪声为 0 的位置(实际成像系统的像方焦平面位置), C 和 A 关于 B 对称。由此可知,物理实验中将 QPD 放置于 A、C 之间(大约 12 mm 的距离)的任意位置时,都有  $\text{TTL 耦合噪声} \leq \pm 6\mu\text{m}/\text{rad}$  @  $\pm 300\mu\text{rad}$ 。由此可知,该设计相较于目前文献中所使用的由凹凸透镜组成的成像系统的优势是: TM、QPD 及凸透镜组的相对位置根据透镜焦距即可确定,且 QPD 的位置可调。

### 4 结束语

本文依据空间引力波探测“太极计划”中对激光干涉测量精度的要求,设计了两个仿真系统,研究了激光抖动和 TTL 耦合这两个影响干涉测量精度的噪声可被抑制到的水平。仿真结果可得:

- 1)激光指向抖动噪声  $\leq 0.1\text{mrad}/\sqrt{\text{Hz}}$  @  $0.1\text{mHz}-1\text{Hz}$ ;
- 2)TTL 耦合噪声  $\leq \pm 6\mu\text{m}/\text{rad}$  @  $\pm 300\mu\text{rad}$ ;
- 3)以上噪声水平不但可以满足“太极计划”的要求,而且为空间实验中可能存在的其它噪声留有足够的噪声裕量;
- 4)相应的物理实验搭建简便、数据测量精度高、稳定性好,为后期建立空间“太极计划”激光干涉测量系统奠定了一定的基础。

#### 参考文献:

- [1] 刘志国,朴云松,乔从丰. 多波段引力波宇宙研究和空间太极计划[J]. 现代物理知识,2016,(5):28-33.
- [2] G Jin. Program in space detection of gravitational wave in Chinese Academy of Sciences[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017,840:012009.
- [3] 高瑞弘,刘河山,罗子人,等. 太极计划激光指向调控方案介绍. 中国光学,2019,12: 425-431
- [4] 王小鸽,ERIC Lebigot,都志辉,等. 引力波数据分析[J]. 天文学进展,2016,34(1): 50-73.
- [5] 董玉辉. 面向空间激光干涉引力波探测的精密指向和弱光锁相控制技术的研究[D].中国科学院力学研究所,2015.
- [6] 罗子人,张敏,靳刚. 激光干涉引力波空间阵列核心问题的综合讨论[J]. 科学通报,2019,64(24):12-18.
- [7] K Numata, A W Yu, H Jiao, et al. Laser system development for the LISA (Laser Interferometer Space Antenna) mission [C]. Solid State Lasers XXVIII: Technology and Devices, 2019.
- [8] Y H Dong, H S Liu, Z R Luo, et al. Methodological demonstration of laser beam pointing control for space gravitational wave detection missions [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(7):074501.
- [9] M Chwalla, K Danzmann, G Fernández Barranco, et al. Design and construction of an optical test bed for LISA imaging systems and tilt-to-length coupling[J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(24).
- [10] M Tröbs, M Chwalla, K Danzmann, et al., Experimental demonstration of reduced tilt-to-length coupling by using imaging systems in precision interferometers [C]. ICSO, Biarritz, France, 2016: 18-21.

(下转第 78 页)



优化结果数据见表1,相比于初始翼型,优化翼型低头力矩大幅减小,阻力减小5.4%,升阻比提高5.7%,优化效果良好。

表1 优化结果

状态	$C_L$	$C_D$	$C_m$	L/D
Ori	0.39	0.0093	0.0412	41.9
Opt	0.39	0.0088	0.0161	44.3
增量	/	-5.4%	-0.0251	5.7%

#### 4 结论

本文基于FFD参数化方法结合NSGA-II遗传优化算法建立了飞翼布局飞机翼型多目标优化设计流程,实现了翼型高亚音速巡航状态下的优化设计目标,可得到如下结论:

1)通过建立的翼型多目标优化设计流程实现了多目标加约束的优化设计目标,优化效果良好,可广泛应用于工程实践中。

2)将基于初次优化的Pareto解集作为再次优化的初始种群可以获得更优的优化解分布,提升优化效果。

#### 参考文献:

[1] Li P F, Zhang B Q, Chen Y C, et al. Aerodynamic Design Methodology for Blended Wing Body Transport [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(4): 508-516.

#### (上接第48页)

[11] M Tröbs, S Schuster, M Lieser, et al. Reducing tilt-to-length coupling for the LISA test mass interferometer [J]. Classical & Quantum Gravity, 2018.

[12] Y Zhao, Z Wang, Y Li, et al. Method to Remove Tilt-to-Length Coupling Caused by Interference of Flat-Top Beam and Gaussian Beam [J]. Applied Optics, 2019, 58(19): 4112.

[13] Z Wang, T Yu, Y Zhao, et al. Research on Telescope TTL Coupling Noise in Intersatellite Laser Interferometry [J]. Photonic Sensors, 2019, (10).

[14] M Chwalla, K Danzmann, M Dovale Alvarez, et al. Optical suppression of tilt-to-length coupling in the LISA long-arm interferometer [J]. Physical Review Applied, 2020, 14(1).

[15] B Sheard, G Hezel, Danzmann, et al. Intersatellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission [J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(12): 1083-1095.

[16] 文江华, 赵创社, 姜粉娥, 等. 基于压电陶瓷的快速反射镜驱动与控制研究 [J]. 兵工自动化, 2015, 34(8): 59-64.

[2] 李晓勇, 张森, 鲁素芬, 等. 翼身融合飞机的空气动力学研究进展 [J]. 飞机设计, 2007, 27(2): 1-9.

[3] 党铁红. NASA 超临界翼型的发展 [J]. 民用飞机设计与研究, 2005, 2: 29-49.

[4] Sederberg T, Parry S. Free-form deformation of solid geometric models [R]. Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1986: 151-160.

[5] Jameson A, Schmidt W, Turkel E. Numerical Solution of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time Stepping Schemes [R]. AIAA Paper 81-1259, 1981.

[6] Roe P L. Approximate Riemann Solver, Parameter Vectors, and Difference Schemes [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 43(2): 357-372.

[7] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

[8] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 (第6册: 气动设计) [M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.



#### [作者简介]

周伟 (1989-), 男 (汉族), 四川省广安市人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 气动布局及气动优化设计。



#### [作者简介]

王璐钰 (1995-), 女 (汉族), 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 主要研究领域为面向空间引力波探测的激光干涉测量。

李玉琼 (1982-), 男 (汉族), 湖南省娄底市人, 博士, 副研究员, 中国科学院青年创新促进委员会会员, 主要研究领域为面向空间引力波探测的激光干涉测量 (通讯作者)。

蔡榕 (1964-), 男 (汉族), 福建省泉州市人, 研究员, 博士研究生导师, 主要研究领域为激光传输与临近空间环境探测 (通讯作者)。