

双光栅光谱仪光栅转轴的多目标优化

许典^{1,2}, 曹佃生¹, 林冠宇¹, 于向阳¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 双光栅光谱仪光栅转轴是用于固定和驱动两块共轴凹面光栅的重要零件, 其工作过程中出现的变形与振动现象均可能对双光栅光谱仪最终的波长测量结果带来影响。依据双光栅光谱仪的工作原理和实际工况, 确定其光栅转轴结构优化的主要目标为质心调整, 轻量化, 避免共振和减小凹面光栅的随机响应变形。为实现光栅转轴的多目标优化, 首先在 UG 中建立凹面光栅、光栅转轴及其固定结构的三维模型, 然后导入 ANSYS Workbench 进行模态分析与随机响应分析, 并针对其计算结果展开多目标优化。优化后, 光栅转轴回转部分的质心调整到回转轴上, 总质量由 0.606 30 kg 减轻到 0.539 43 kg, 二阶固有频率从 184.83 Hz 增大到 187.77 Hz, 凹面光栅 Z 轴方向最大随机响应变形从 33.394 μm 减小到 27.147 μm 。目前市面上常见的有限元分析软件均无法直接实现结构的质心调整, 作者将该目标的实现提前到三维建模过程当中, 并保证在后续优化过程中, 回转部分的质心只在其回转轴上移动, 从而使质心调整和轻量化等其他优化目标同时实现, 该处理方法具有广泛的借鉴意义。

关键词: 光栅转轴; 质心调整; 轻量化; 模态分析; 随机响应分析

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0320001

Multipurpose optimization for grating shaft of double grating spectrometer

Xu Dian^{1,2}, Cao Diansheng¹, Lin Guanyu¹, Yu Xiangyang¹

(1. Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Grating shaft of a double grating spectrometer is an important part which is used to fix and drive gratings, deformation and vibration of which both have effects on final measurement result. According to operating principle and working condition of the double grating spectrometer, centroid adjustment, light weight, avoid resonance and the decrease of the random vibration were chosen to be main goals in the optimization. First, three-dimension model of concave gratings, grating shaft and its fixture were built in UG. Then, they were imported into ANSYS Workbench, modal analysis and random vibration analysis were done. Finally, multipurpose optimization was done according to the result in last step. After the multipurpose optimization, centroid of the rotating parts was adjusted to the rotating axis.

收稿日期: 2016-07-10; 修订日期: 2016-08-20

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器设备研制专项(41527806); 国家自然科学基金(41504143)

作者简介: 许典(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光栅光谱仪器方面的研究。Email: xdfromzju@163.com

导师简介: 林冠宇(1976-), 男, 研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事空间紫外光学遥感仪器方面的研究。Email: linguanYu1976@163.com

Its mass reduced from 0.606 30 kg to 0.539 43 kg. Its second natural frequency increased from 184.83 Hz to 187.77 Hz, and the maximal random vibration deformation on Z axis of concave gratings reduced from 33.394 μm to 27.147 μm . Centroid adjustment of structure could be realized directly by common finite element analysis software, the author achieved this goal when building three-dimensional models, and guaranteed that centroid of the rotating parts moved only on their rotating axis in optimization, so that centroid adjustment and light weight can be realized at the same time, which can be widely used in many other projects.

Key words: grating shaft; centroid adjustment; light weight; modal analysis; random vibration analysis

0 引言

太阳辐射是地球最重要的外部能源,其能量变化具有波长依赖性。更准确地测量太阳辐射光谱,有利于改善痕量气体的反演精度,并实现不同地物特征下的气候效应评估。因此,国内外科研工作者一直致力于太阳光谱仪测量精度的提升。光栅转轴部分的设计对太阳光谱仪的测量精度有着显著的影响,近年来国内外科研工作者在光栅转轴部分的优化设计方面进行了不少研究^[1-3]。

双光栅光谱仪光栅转轴是用于固定和驱动两块共轴凹面光栅的重要零件,其工作过程中出现的变形与振动现象均可能对双光栅光谱仪最终的波长测量结果带来影响。目前,轴类零件的优化设计大体可分为两类:第一类,为了减小回转部分的转动惯量,保证其工作过程中的稳定性,对转轴进行质心调整,使回转部分的质心落在回转轴线上^[4-6];第二类,利用有限元分析软件进行轻量化设计,并结合实际工况展开模态分析和热力变化与重力耦合下的响应分析,以减小共振风险和各类响应变形^[7-9]。

上述两类优化所关注的角度分别是回转部分的质心位置和整体的固有频率与响应变形,两者之间常存在互相影响^[9-10],而目前市面上常见的有限元分析软件均无法直接实现结构的质心调整,故很少有同时实现这两类优化的先例。只有协调好两者之间的关系,才能同时从这两方面入手,减小光栅转轴在工作过程中的变形与振动,从而提升双光栅光谱仪的测量精度。作者将质心位置的调整提前到三维建模的过程当中,并保证在后续优化过程中,回转部分的质心只在其回转轴上移动,从而同时实现了上述两类优化,该处理方法具

有广泛的借鉴意义。

1 优化目标概述

双光栅光谱仪工作原理如图 1 所示,光线从入射狭缝进入光谱仪,在第一块凹面光栅处发生衍射后,经反射镜改变传播方向并通过中间狭缝滤光,在第二块凹面光栅处发生第二次衍射后,从出射狭缝中射出。

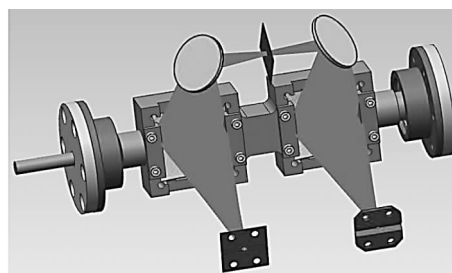


图 1 光谱仪工作原理

Fig.1 Operational principle of spectrometer

光栅转轴在工作过程中,主要用于固定和驱动两块共轴凹面光栅,以实现光谱扫描。首先,为保证双光栅光谱仪在光谱扫描过程中的稳定,应将回转部分的质心调整到其回转轴上。其次,该型号双光栅光谱仪多应用于航天领域,故其整体结构的轻量化也十分重要。为避免双光栅光谱仪在工作过程中发生共振现象,应使其约束模态的各阶固有频率远离其工作频率。最后,光栅转轴在工作过程中发生的各类变形均可能传递到凹面光栅之上,进而影响双光栅光谱仪的测量精度。因此,应具体分析所有可能引起凹面光栅发生变形的因素,将减小凹面光栅的最大变形量作为光栅转轴优化设计的另一目标。

2 三维建模与优化参数的确定

在非关键区域打孔,是实现质心调整和轻量化设计的常用方法^[11-13]。鉴于目前市面上常见的有限元分析软件均无法直接实现结构的质心调整,采用一种新思路,设法在三维建模过程中完成质心位置的调整,并保证在后续优化过程中,质心位置只在回转轴上移动。

为使光栅转轴在挖孔时具有更大的可调节度,将其三维模型做如图 2 所示的调整。建立空间直角坐标系,其原点位于转轴左端面中心(位于回转轴上),X 轴,Y 轴和 Z 轴分别指向底部矩形孔的长、宽、深方向。在转轴底部中心位置挖一个长为 $2a$ (以保证优化参数 a 时,矩孔在长度方向关于中线对称,

下文宽度同理),宽为 $2b$,深度为 h 的矩形孔,调整矩孔各尺寸参数可以实现质心位置的调整和结构整体的轻量化。

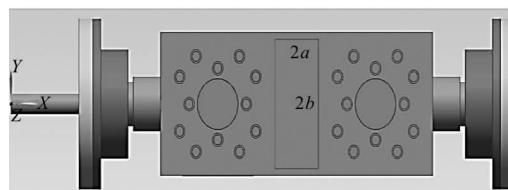


图 2 光栅转轴修改模型

Fig.2 Revised model of grating shaft

给各零件分配实际所用材料的密度参数后,在 UG 中可以查看回转部分整体(包括光栅转轴,凹面光栅及其固定结构)的质量属性。具体结果如表 1 所示。

表 1 回转部分质量参数

Tab.1 Mass parameters of revolution part

Parameters	Volume/mm ³	Mass/kg	X-coordinate	Y-coordinate	Z-coordinate
Value	61 419.416	0.411 281 290	103.609 287 023	0.000 000 021	0.314 141 304

其中,质心位置在 X 轴上的坐标并不影响回转部分的转动惯量,且其在 Y 轴上的坐标已经近似为 0,故只需要将其在 Z 轴上的坐标调整为 0 即可。为满足回转部分整体质心在 Z 轴上的坐标为 0,即挖孔后回转部分转动惯量为 0,只需满足挖去部分的转动惯量与原模型(未挖矩孔,下同)转动惯量大小相等,方向相反。光栅转轴的底面在 Z 轴上的坐标为 8,故只需满足公式(1)。

$$(2a \times 2b \times h) \times 10^{-9} \times 7\,850 \times \left(8 - \frac{h}{2}\right) = 0.411\,281\,290 \times 0.314\,141\,304 \quad (1)$$

化简后,可得挖孔深度 h 与孔长 $2a$,孔宽 $2b$ 之间的关系应满足公式(2)。

$$h = 8 \pm \frac{\sqrt{1\,024a^2b^2 - 131\,669.239ab}}{4ab} \quad (2)$$

公式(2)表明,对同一孔长和孔宽,总有两个孔

深能满足将质心位置调整到 Z 轴之上。其对应的物理意义可以这样理解:当挖孔深度取公式(2)中的减号时,质心位置已满足要求。而当挖孔深度取公式(2)中的加号时,可理解为在此基础上,再挖去一个矩形块。显然,此矩形块的起止位置关于深度 8 mm,即回转轴所在位置对称,故这一步骤将不再改变回转部分的质心位置。考虑到光栅转轴的轻量化要求,此处直接取加号,即:

$$h = 8 + \frac{\sqrt{1\,024a^2b^2 - 131\,669.239ab}}{4ab} \quad (3)$$

在三维建模时,直接将深度 h 设为公式(3)中的表达式, a 和 b 可设为任意满足模型物理意义的数值,此处先分别取 8 mm 和 18 mm,再次查看回转部分的质量属性加以验证,具体结果如表 2 所示。可以看到,回转部分的质心已经近似调整到 X 轴之上。

表 2 回转部分质量参数(挖孔后)

Tab.2 Mass parameters of revolution part(digged)

Parameters	Volume/mm ³	Mass/kg	X-coordinate	Y-coordinate	Z-coordinate
Value	54 646.288 059 897	0.358 112 232	103.402 807 340	0.000 000 024	0.000 000 000

将所挖矩孔的半长 a 和半宽 b 设为优化参数, 考虑原模型和所挖的矩孔部分均关于 XZ 平面对称, 故上述两个参数的变化, 并不会引起质心在 Y 轴方向的移动。而矩孔深度 h 与两参数 a 和 b 之间的关系, 即公式(3), 也保证了回转部分的质心不会在 Z 轴方向上移动。因此, 在建立三维模型的过程中, 已经实现了质心调整这一优化目标, 且在后续优化过程中, 回转部分的质心只在其回转轴上移动, 满足了质心调整的要求。

3 模态分析

为避免双光栅光谱仪在扫描过程中发生共振现象, 同时为后续各类响应分析做好准备, 将在 UG 中建立好的三维模型导入 ANSYS Workbench 进行模态分析, 其约束模态的前六阶固有频率如表 3 所示。

表 3 原模型各阶固有频率

Tab.3 Natural frequency of original model

Order	1	2	3	4	5	6
Frequency/Hz	6.483 6	184.83	193.36	1504.3	2 422.3	3 693.3

其中, 第一阶固有频率为光栅轴的转动, 仅有很小的摩擦限制, 所以其固有频率接近于 0, 振型如图 3 所示, 共振风险较低。

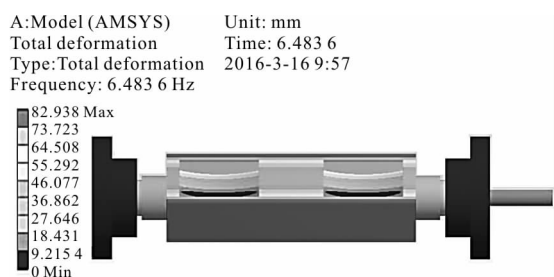


图 3 一阶振型

Fig.3 First vibration mode

其二阶固有频率为 184.83 Hz, 最接近光谱仪扫描时的工作频率, 故将其作为优化项, 追求该值的最大化, 以减小共振风险。

4 不同加载条件下的响应分析

该型号双光栅光谱仪多用于严格热控的航天领域, 故凹面光栅在热力变化和重力作用下的变形远小于各类力学加载下的响应变形。引起凹面光栅发生响

应变形的方式可分为随机响应和谐响应, 两者所对应的加载条件分别为随机振动载荷与正弦振动载荷。

随机振动和正弦振动的加载条件由卫星供货方提供, 如表 4 和表 5 给出, 加载方向均为三个主轴方向。

表 4 随机振动的加载条件

Tab.4 Load condition of random vibration

Frequency/Hz	[10,250]	[250,800]	[800,200 0]
Magnitude	6 dB/oct	0.14 g ² /Hz	-9 dB/oct

表 5 正弦振动的加载条件

Tab.5 Load condition of sinusoidal vibration

Frequency/Hz	[4,10]	[10,17]	[17,75]	[75,100]
Magnitude	22 mm	5.4 g	14 g	8.4 g

在两次响应分析中, 对凹面光栅, 光栅转轴及其固定结构整体分别施加上述两种载荷, 压盖两端共 12 个螺纹孔施加固定约束, 比例因子设为 3σ , 其对应概率为 99.737%。将两组响应变形的观察均集中在两片凹面光栅上, 凹面光栅在 3 个主轴方向的最大响应变形如表 6 所示。

表 6 原模型三主轴方向的最大响应变形

Tab.6 Maximum deformation in three axis directions of original model

Direction	Maximum deformation of random vibration/ μm	Maximum deformation of harmonic response/ μm
X-axis	1.226 6	0.113 4
Y-axis	8.439 6	0.976 3
Z-axis	33.394	2.321 7

凹面光栅总变形量要求控制在 50 μm 以内, 由表 6 可知, 其 X 轴与 Y 轴方向的最大随机响应变形及三主轴方向的最大谐响应变形均远小于此值, 故优化时只需考虑凹面光栅 Z 轴方向的最大随机响应变形。

5 多目标优化的数学模型

多目标优化设计一般由设计变量、约束条件、目标函数三部分组成, 要求所选择的设计变量使得目标函数值达到最大或最小值^[4]。

5.1 设计变量

根据上文分析, 选取矩孔半长 a 和半宽 b 为设计变量。

5.2 约束条件

约束条件的确定应结合三维模型的实际物理意义。如图 2 所示,修改后的三维模型,光栅转轴的宽度为 42 mm,光栅内侧边缘之间的距离为 24 mm。为保证光栅转轴的强度要求,任意结构的厚度均不能小于 2 mm。

矩孔深度 h 由参数 a 与 b 共同决定,三者满足公式(3)的关系,参数 a 与 b 的取值应保证公式(3)中的深度 h 有满足其物理意义的实数根。考虑到光栅转轴的总厚度为 16 mm,深度 h 的取值范围应在 0~14 mm 之间。

综合以上两点要求,将设计变量 a 和 b 的取值范围分别确定为 [7.5,10] 和 [17.5,19],单位为 mm。

5.3 目标函数

由于质心调整已在三维建模环节实现,故优化目标的数学描述简化为:

$$\text{Maximum } F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x)) \quad (4)$$

5.3.1 Minimum 总质量 $F_1(x)$

该光谱仪多应用与航天领域,轻量化设计是必要的优化环节

5.3.2 Maximum 二阶固有频率 $F_2(x)$

提高装置的低阶固有频率,使其远离双光栅光谱仪工作时的扫描频率,有助于避免双光栅光谱仪在扫描过程中发生共振现象。据上文分析,其约束模态二阶固有频率为共振风险项。

5.3.3 Minimum 凹面光栅 Z 轴方向随机响应变形 $F_3(x)$

凹面光栅发生变形将直接影响最终测量结果的准确性,据上文分析,凹面光栅的变形主要来源于 Z 轴方向的随机响应,优化目标定为将其最小化。

5.3.4 定义最优模型

如上文所述,在完成回转部分的质心调整后,光栅转轴的优化目标可描述为 Minimum 总质量 $F_1(x)$, Maximum 二阶固有频率 $F_2(x)$ 和 Minimum 凹面光栅 Z 轴方向随机响应变形 $F_3(x)$ 。

其中,总质量 $F_1(x)$ 并不直接影响双光栅光谱仪的测量精度,但考虑到卫星承载能力的限制,将其权重的分配为中等水平 5。二阶固有频率 $F_2(x)$ 为共振风险项,但考虑到原模型二阶固有频率为 184.83 Hz,已与双光栅光谱仪工作频率拉开一定的距离,故可将其权重分配为较小值 1。凹面光栅 Z 轴方向随机响应变形 $F_3(x)$ 直接影响双光栅光谱仪的测量精度,且原模型该值为 33.394 μm ,与凹面光栅允许的最大总变形量 50 μm 较为接近,故将其权重分配为最大值 10。综上所述,定义目标函数如下:

$$F(x) = 5 \times \left(1 - \frac{F_1(x)}{0.606\ 30} \right) + 1 \times \left(\frac{F_2(x)}{184.83} - 1 \right) + 10 \times \left(1 - \frac{F_3(x)}{33.394} \right) \quad (5)$$

在公式(5)中,每一项均为权重值与该项参数优化后放大或缩小倍率的乘积。这种处理方式能在实现量纲统一的同时,更准确地体现权重值的物理意义。定义使公式(5)取得最大值的优化模型为最优模型。

6 目标驱动优化

利用 ANSYS Workbench 中的“目标驱动优化”模块(Goal Driven Optimization),对光栅转轴进行多目标优化。挖孔时,将两个设计变量 a 和 b 分别初定为 8 mm 和 18 mm,进行第一次模态分析和随机响应分析。

然后将 a 和 b 的取值范围分别设为 [7.5,10] 和 [17.5,19],除原有目标参数外,依据公式(5)再添加一个输出参数 $F(x)$,用来描述光栅转轴的优化效果,优化目标设为使输出参数 $F(x)$ 取得最大值。将优化点的个数(Number of Initial Sample) 设为最大值 10 000,展开优化。从软件自动筛选的三个结果中,选择一个 $F(x)$ 取得最大值的结果,即为光栅转轴的最优模型。此时, a 和 b 的取值分别为 9.990 4 mm 和 17.538 mm。各阶段模型在三个优化目标及目标函数值上的对比如表 7 所示。

表 7 各阶段模型在三个优化目标及目标函数值上的对比

Tab.7 Comparison of each model in three optimization goals and objective function values

	Mass $F_1(x)$ /kg	Natural frequency of second order $F_2(x)$ /Hz	Maximum random vibration deformation of concave gratings in Z-axis $F_3(x)$ / μm	Objective function value $F(x)$
Original model	0.606 30	184.83	33.394	0.000 0
8×18 rectangular hole model	0.560 49	186.89	29.169	1.654 1
Optimized model	0.539 43	187.77	27.147	2.438 1

7 结 论

如表 7 所示, 当目标函数取得最大值 2.438 1 时, 光栅转轴的优化设计获得最优模型。此时, 设计变量 a 和 b 分别为 9.990 4 mm 和 17.538 mm, 对应的优化设计为在原模型底部正中挖去一个长、宽、深分别为 19.981 mm, 35.076 mm 和 12.127 mm 的矩形孔。

相较于光栅转轴的原模型, 最优模型将回转部分的质心调整到其回转轴上, 增强了双光栅光谱仪在工作过程中的稳定性。将总质量从 0.606 30 kg 减小为 0.539 43 kg, 质量减轻 11.03%, 更好地满足了航天领域对于太阳光谱仪的轻量化要求。将二阶固有频率从 184.43 Hz 增大到 187.77 Hz, 进一步降低了光谱仪在工作过程中的共振风险。将凹面光栅 Z 轴方向最大随机响应变形从 33.394 μm 减小到 27.147 μm , 减小了因光栅变形导致的测量误差。

目前市面上常见的有限元分析软件均无法直接实现结构的质心调整, 故很少有将上述多种优化目标同时实现的先例。作者将质心调整提前到三维建模过程当中, 并保证在后续优化过程中, 回转部分的质心只在其回转轴上移动, 从而使质心调整和轻量化等其他优化目标同时实现, 该处理方法具有广泛的借鉴意义。

参 考 文 献:

- [1] Huang Kaikai, Li Nan, Lu Xuanhui. 894 nm external cavity diode laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (11): 2129–2133. (in Chinese)
黄凯凯, 李楠, 陆璇辉. 894 nm 外腔半导体激光器 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2129–2133.
- [2] Liu Qimin, Ruan Ping, Li Fu, et al. Design and analysis of flexible support of the grating in space spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (9): 2457–2461. (in Chinese)
刘齐民, 阮萍, 李福, 等. 空间光谱仪光栅柔性支撑设计与分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2457–2461.
- [3] Tombul G S, Banks S P. Nonlinear optimal control of rotating flexible shaft in active magnetic bearings [J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2011, 54 (5): 1084–1094.
- [4] Ma Xin, Yang Xuan, Yang Chen, et al. Roll stabilizer bars' design for solar-sail spacecraft attitude control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S): 72–77. (in Chinese)
马鑫, 杨萱, 杨辰, 等. 太阳帆航天器姿态控制滚转轴稳定机设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S): 72–77.
- [5] Lu Zhenyong, Chen Yushu, Li Hongliang, et al. Reversible model-simplifying method for aero-engine rotor system [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(1): 57–64. (in Chinese)
路振勇, 陈予恕, 李洪亮, 等. 航空发动机转子系统动力学模型的可逆化简化方法 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 57–64.
- [6] He Xiaojun, Qu Hongsong, Zhang Guixiang, et al. Impact of scan mirror stability on TDI CCD system measure accuracy [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 665–671. (in Chinese)
贺小军, 曲宏松, 张贵祥, 等. 扫描镜稳定性对 TDI CCD 测量精度的影响 [J]. 中国光学, 2014, 7(4): 665–671.
- [7] Xue Chuang. Support structure design of space blazed reflection grating [J]. *China Science and Technology Information*, 2013, 24: 53–55. (in Chinese)
薛闯. 空间反射式闪耀光栅支撑结构设计 [J]. 中国科技信息, 2013, 24: 53–55.
- [8] Liu Wei. Design and analysis of structure of compact Offner spectral imaging system [J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(2): 157–163. (in Chinese)
刘伟. 小型 Offner 凸光栅光谱成像系统的结构设计及分析 [J]. 中国光学, 2010, 3(2): 157–163.
- [9] Wang Mo, Ma Jun. Influence of weight and center of gravity of superstructure on nature frequency [J]. *Ship Standardization Engineer*, 2015, 2: 25–29. (in Chinese)
王墨, 马骏. 船舶上层建筑重量重心对其固有频率的影响 [J]. 船舶标准化工程师, 2015, 2: 25–29.
- [10] Xia Tuo, Wang Lei, He Rongtao, et al. Seismic simulation analysis for 110 kV GIS [J]. *Journal of Xiamen University of Technology*, 2015, 23(5): 35–40. (in Chinese)
夏拓, 王蕾, 何荣涛, 等. 110 kV GIS 抗震仿真分析 [J]. 厦门理工学院学报, 2015, 23(5): 35–40.
- [11] Cao Diansheng. Topology optimization of scanning mirror of UV to near-infrared hyperspectral detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3814–3819. (in Chinese)
曹佃生. 紫外-近红外高光谱探测器扫描镜拓扑优化设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3814–3819.
- [12] Li Songyuan, Hu Penghao. Structure optimization of parallel CMM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2852–2859. (in Chinese)

- 李松原, 胡鹏浩. 并联坐标测量机的结构优化[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2852-2859.
- [13] Han Chunyang, Xu Zhenbang, Wu Qingwen, et al. Optimization design and error distribution for secondary mirror adjusting mechanism of large optical payload [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1093-1103. (in chinese)
- 韩春杨, 徐振邦, 吴清文, 等. 大型光学载荷次镜调整机构优化设计及误差分配 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1093-1103.
- [14] Qiu Guiyong. Research on performance simulation analysis and multi-objective optimization design technology of the EPB shield cutter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)
- 仇桂勇. 土压平衡式盾构机刀盘性能仿真分析与多目标优化设计技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.