

文章编号: 1001-5078(2021)09-1137-06

• 激光应用技术 •

激光传输通道动密封防尘结构设计

李冰^{1,2}, 韩光宇¹, 吴运寒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: 激光传输通道工作环境复杂, 为满足系统密封要求, 设计了一种磁流体动密封结构。主要由磁流体、极靴、永磁体、内筒、外筒和盖板组成。建立磁场仿真模型, 计算了不同密封间隙内磁场的大小及其分布。分析了 0.1~0.4 mm 间隙下的理论耐压能力, 根据工程要求选取了密封间隙 0.2 mm。耐压值可以达到 0.26 MPa。应用 Block Lanczos 法对内筒进行模态分析, 一阶固有频率 690.94 Hz, 远高于经纬仪固有频率, 满足动力学要求。最后进行试验并分析了离心力对密封的影响。结果表明密封结构的各项指标均满足可以要求。

关键词: 动密封; 磁流体; 激光传输通道; 磁场分析

中图分类号: TN243; TH703 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.09.004

Design of dynamic sealed and dustproof structure of laser transmission channel

LI Bing^{1,2}, HAN Guang-yu¹, WU Yun-han¹

(1. Changchun 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: The working environment of the laser transmission channel is complicated. In order to meet the requirements of system sealing, this paper designs a magnetic fluid dynamic sealing structure. It is mainly composed of magnetic fluid, pole shoe, permanent magnet, inner tube, outer tube and cover plate. The magnetic field simulation model was established, and the size and distribution of the magnetic field in different sealing gaps are calculated. The theoretical pressure resistance capacity under the gap of 0.1~0.4 mm was analyzed, and the sealing gap of 0.2 mm was selected according to engineering requirements. The theoretical calculation showed that the withstand pressure can reach 0.26 MPa. The Block Lanczos method was applied to the modal analysis of the inner cylinder. The first-order natural frequency is 690.94 Hz, which is much higher than the natural frequency of the theodolite and meets the dynamics requirements. Finally, experiments were carried out and the influence of centrifugal force on the seal is analyzed. The results show that all the indicators of the sealing structure meet the requirements.

Keywords: dynamic seal; magnetic fluid; laser transmission channel; magnetic field analysis

1 引言

光电经纬仪是为完成测验目标的弹道与物理等参数测量和飞行实况为目的, 运用光学、精密机械、

电控与计算机技术, 可以完成卫星测距、辐射特性测量和干扰目标等功能。主要是由光学分系统、轴系系统和电控分系统等组成^[1-2]。

作者简介: 李冰(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光传输通道动密封的研究。E-mail: libinghuludao@163.com
通讯作者: 韩光宇(1972-), 男, 硕士生导师, 主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: hanlamost@163.com
收稿日期: 2020-10-12; **修订日期:** 2020-11-20

激光发射设备是光电经纬仪的分支,发展趋势是发射功率越来越高,作用距离越来越远。如果在设备上没有有效的密封防尘措施,灰尘和水分等很容易进入通道中污染库德镜。当高能激光照射到沾染的库德镜时,能量的积累会使膜系受损,严重至镜子炸裂^[3-4]。水渍和灰尘还会影响镜面的反射率。以上因素严重限制激光功率提升。为了确保激光传输过程中通道洁净,密封是必须解决的问题。

目前国内激光通道密封集中在密封窗口,根据原理可分为晶体窗口和气动窗口两种^[5-6]。晶体窗口密封原理为采用吸收率较低的晶体制成光学玻璃,将其安装在激光传输通道出射端,气动窗口是在通道出射端安装多个高速气流的喷嘴,二者皆可以阻挡外界灰尘。两种窗口皆有优缺点。晶体窗口设计难度低,密封性能优良,可靠性好,但晶体窗口会吸收能量,当增大激光功率时,窗口温度升高产生热变形,使激光折射发生变化^[7]。气动窗口对光束影响很低,但在使用过程中需要打开卷帘,无法保证灰尘或水蒸气完全不进入激光传输通道,而且耗能大,成本很高。两种窗口仅仅密封了静止部分,轴系的转动部分的密封存在空白。

针对轴系的转动部分,本文利用磁流体的优良特性,设计了一种密封结构。利用有限元软件对间隙处的磁感应强度进行了分析。通过耐压公式可以得到密封能力值。理论分析了低速下离心力对密封几乎无影响。对结构中的长臂件进行模态分析,保证系统不会发生共振。最后进行气密、转矩、高低温和振动试验进行验证,证明了密封结构设计的合理性。本文在原有的窗口的设计基础上,第一次将磁流体动密封应用激光通道中上,大幅度增强激光通道的密封性能。

2 原理和设计要求

2.1 激光传输通道工作原理

如图 1 所示,激光传输通道内部耦合了七个库德镜。入射端和出射端安装了窗口,形成了静密封。激光器发出的激光经过准直系统,由入射窗口进入,在经过库德镜反射后,由出射窗口发出。在入射窗口到出射窗口之间形成激光传输通道,通道内部的库德镜一和库德镜二存在相对转动,同理库德镜四和库德镜五也存在相对转动。

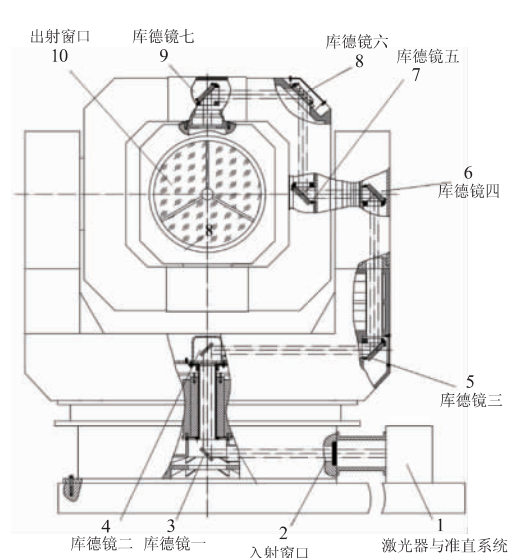


图 1 激光传输通道

Fig. 1 Laser transmission channel

2.2 磁流体工作机理

磁流体密封具有零泄漏、低磨损和长寿命等优点,广泛应用于防尘密封和真空密封^[8-9]。密封的基本就是磁场提供足够的彻体力。当介质内外有压差时,磁流体会沿着轴向或径向移动。磁场对磁流体产生的彻体力同内外压差相平衡的时候,磁流体处于平衡位置,阻止被密封介质泄漏,从而达到密封的目的。

2.3 设计要求

向激光传输通道内部输入氮气来置换出水蒸气。通道内部会形成微正压,来抵御外界杂质。由于激光发射设备的应用环境广泛,密封结构需要具备足够高的密封性能,并可以抵抗振动和高低温。其启动扭矩和匀速运转时所需力矩不应过大。根据上述要求,确定了密封结构的设计指标。如表 1 所示。

表 1 密封结构设计要求

Tab. 1 Sealing structure design requirements

	要求
密封压力/MPa	0.01 ~ 0.15
适应温度/℃	40 ~ 55
启动扭矩/(N · m)	< 15
转动扭矩/(N · m)	< 10
振动频率/Hz	0 ~ 500

3 结构设计

依据磁流体的密封原理,密封结构主要包含永

磁体,极靴,磁流体,内筒、外筒和盖板。如图 2 所示。

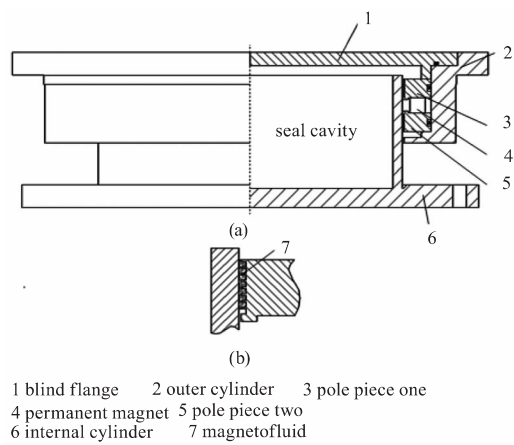


图 2 密封结构
Fig. 2 Sealing structure

密封结构包含两个极靴。每个极靴内壁有八个矩形极齿,一个极齿构成一级,构成十六级密封,从而增加密封可靠性。采用矩形齿,齿宽 0.3 mm,齿高 0.9 mm,槽宽 0.9 mm。永磁体由 68 个圆柱形的钕铁硼磁铁拼接而成。极靴接触永磁体的一侧设计一个凸台结构,方便径向固定住永磁体。极靴与外筒接触的端面加工一个矩形缺口,用来装密封圈,防止气体从极靴和外筒之间的缝隙泄漏。盖板用来将极靴和永磁体压入外筒中,设计成整体式。永磁体提供外加磁场。磁流体充满在齿槽中。外筒加上盖板后,盖板、内筒和极靴三者可形成封闭的空腔。

极靴和内筒起到导磁作用,采用 2Cr13,磁流体选择二脂基。外筒和盖板为 304 不锈钢,起到隔磁作用。

在试验环节,设计了一种转台,此转台可与密封结构完美结合。如图 3 所示。试验转台主要包括连接板、轴承、轴承座、传动轴、力矩电机、电机座、密封盖、若干螺钉和垫圈。连接板和内筒通过螺钉连接。力矩电机驱动连接板进而带动内筒旋转。极靴位置固定,进而内筒与极靴产生相对转动。向空腔内输入氮气,则空腔的气压会高于外界环境的气压,形成微正压,可通过气压表读出数值。驱动试验转台,观察气压表的数值变化。如果气压表数值长时间不变,则证明磁流体没有泄露,结构气密性良好。

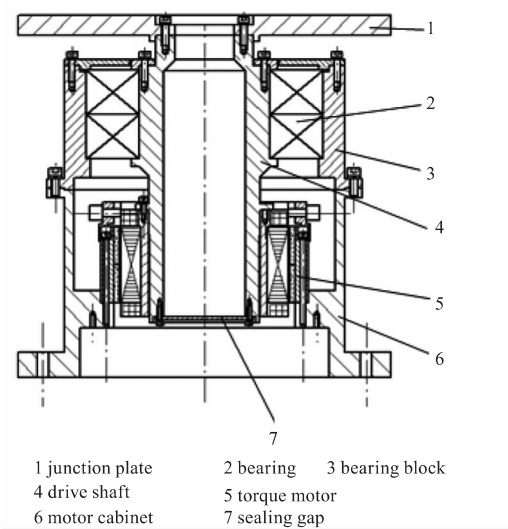


图 3 试验转台
Fig. 3 Experimental turntable

4 固有频率分析

工程应用的内筒为一个长臂件,为防止其转动过程中产生共振,有必要进行模态分析。主要目的是获得其固有频率和振型。因为内筒结构较为简单,直接输入命令流建立模型,忽略倒角和螺纹。材料选择 2Cr13,定义好材料属性后,选用 solid186 单元。扫描划分网格时注意了细化。共划分 25506 个六面体单元。如图 4 所示。

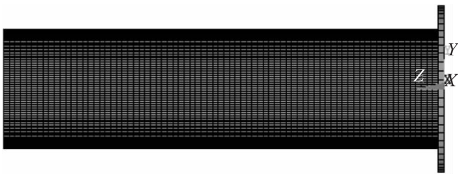


图 4 内筒有限元模型
Fig. 4 Finite element model of the internal cylinder

在内筒的法兰端面施加全位移约束。应用 Block Lanczos 法求解。内筒的前 5 阶固有频率如表 2 所示。图 5 展示了内筒的一阶振型,长臂部分绕 Y 轴进行摆动。激光发射设备的 1 阶固有频率约为 110 Hz^[10]。其一阶频率远小于内筒的固有频率,系统不会发生共振现象。较好满足车载要求。

表 2 内筒固有频率

Tab. 2 Natural frequency of internal cylinder

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
频率/Hz	690.94	690.96	1599.4	1599.4	2146.0

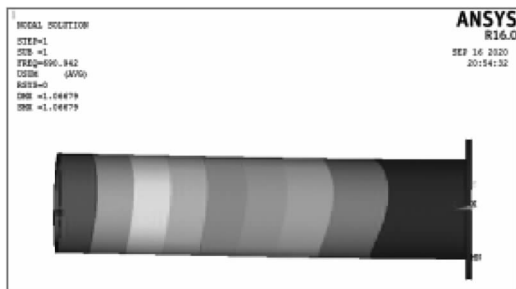


图5 内筒一阶振型

Fig. 5 The first-order mode of the internal cylinder

5 磁场仿真

5.1 密封耐压公式

在静止情况下,磁流体内部任意一点处的压强为^[6-8]:

$$p = \mu_0 \int_0^H M dH - \rho_m g h + C$$

实际极齿部位的磁感应强度比较强,磁流体一般达到饱和磁化状态,其饱和磁化强度为 M_s 。重力可忽略不计,则压强可以简化为:

$$p = \mu_0 M_s H + C = M_s B$$

磁流体密封压差为液膜双侧外表面上的压强差值。设磁性流体内部任意两点 1、2 处的磁感应强度分 B_1, B_2 。对于静止密封,其密封耐压公式为:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = M_s (B_1 - B_2)$$

5.2 有限元模型

外筒和盖板采用不导磁的 304 不锈钢,将其视为空气对待。磁流体的饱和磁化强度较低,可设定磁流体与空气的磁导率相同。内筒和极靴的材料为 2Cr13。永磁铁采用钕铁硼,矫顽力为 $8.9 \times 10^5 \text{ A/m}$,相对磁导率为 1.05,空气的相对磁导率为 1。

由于模型是轴对称结构,将三维问题转为二维平面问题。采用 plane53 单元,建立二维模型。简化的模型如图 6。A1 为空气,A2 为内筒,A3 和 A5 为极靴,A4 为永磁铁。

不同区域赋予相应的材料属性和网格精度,采用智能网格划分三角形网格,精度为 2 级。在间隙处单元划分较为紧密。给模型边界施加磁力线平行的边界条件。

5.3 磁场结果分析

本文研究的密封间隙在 0.1 ~ 0.4 mm。对 4 种间隙下的磁场分布进行求解。

0.2 mm 间隙下的磁力线分布图如图 7 所示。图中显示极齿附近磁力线最密集,极齿的极尖部位

磁场梯度最大。磁流体被吸附在磁场最强的极齿附近。空气中有少许磁力线,存在漏磁现象。

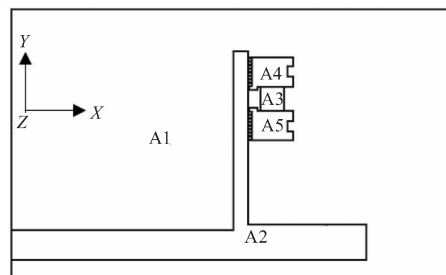


图6 磁场有限元模型

Fig. 6 Finite element model of magnetic field

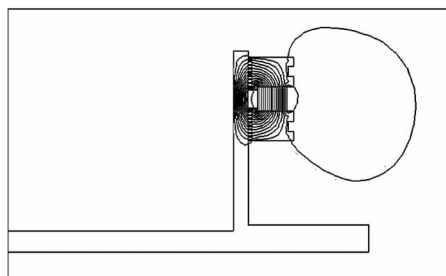


图7 0.2mm 间隙磁力线分布

Fig. 7 0.2mm gap magnetic field line distribution

在间隙的内筒一侧定义一条轴线轨线,将磁场强度映射到轴向轨线上。图 8 展示了四种间隙轴向轨线的磁场强度变化情况。由于整体结构呈对称分布,磁场强度分布也是关于 X 轴成对称分布。随着间隙的变大,波峰和波谷间的差值在变小。说明密封间隙越大,漏磁越严重。本文选取的磁流体为二脂基。饱和磁化强度为 36 kA/m。根据耐压公式 3 及不同间隙轴向轨线的磁场分布,计算得到耐压值如表 3。数据显示间隙每增加 0.1 mm,耐压值近乎减半。当间隙超过 0.3 mm,耐压值明显不够。考虑工程实际使用,本文选取密封间隙 0.2 mm。

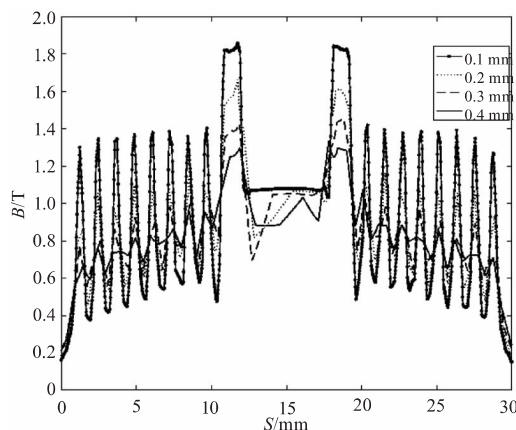


图8 轴向轨线磁场强度

Fig. 8 Axial trajectory magnetic field intensity

表3 理论耐压值

Tab.3 Theoretical withstand pressure value

间隙/mm	0.1	0.2	0.3	0.4
耐压值/Mpa	0.50	0.26	0.13	0.06

6 试验测试

任务要求设备在 $-40 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 能稳定工作。同时考虑车载环境下的影响和扭矩的要求。共安排四组实验。试验转台实物如图9所示。

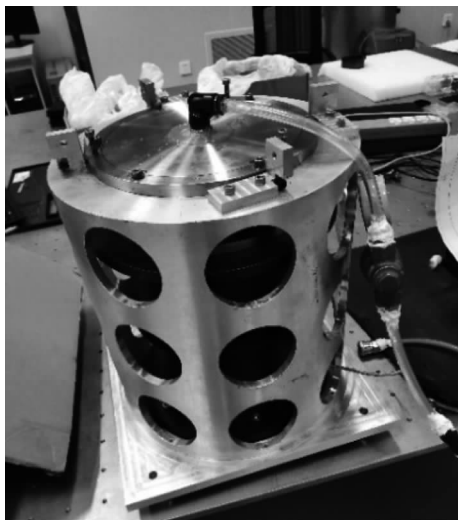


图9 试验转台实物图

Fig.9 Physical image of the experiment turntable

6.1 动密封压力测试

引入离心力的几何因子^[11]:

$$G = \frac{R_s^2}{(R_s - 1)^2} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R_s}{R} \right)^2 + \ln \left(\frac{R_s}{R} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_s}{R} \right)^{-2} \right] \quad (4)$$

其中, R_s 为内筒外径与外筒内径比; R 为磁流体半径:

$$\Delta p = \Delta p_{\max} + \rho (R_1 \omega)^2 G \quad (5)$$

外筒为旋转轴,在轴的表面上,离心力最大。带入已知参数,几何因子为 8.32×10^{-4} ,数值很小。证明低转速下离心力对密封几乎无影响,忽略不计。气压表最小量程 0.02 MPa 。从输入 0.03 MPa 微正压开始,一直增加到最大密封压力。在 0.03 MPa 压力下,一个月后气压表数值无明显变化。证明磁流体没有泄露,其密封结构气密性良好。

当内外气压达到 0.2 MPa 时,气压表数值突然降低,此时达到了密封结构的极限密封压力。测量结果显示,密封结构的密封能力与仿真基本一致。

6.2 扭矩测试

将测力计拉力测试头一端通过绳索套在内筒的螺钉处,拉动测力计,记下数值。力臂为 110 mm ,二者相乘即为力矩值。转台最大初始转动转矩为 $3\text{ N} \cdot \text{m}$,稳定运转所需的力矩在 $0.8 \sim 2.8\text{ N} \cdot \text{m}$ 波动,平均一圈所需力矩为 $1.1\text{ N} \cdot \text{m}$ 。二者的数值均小于设计要求。启动力矩大于稳定运转力矩是因为磁流体中胶体粒子产生聚集。需要加大扭矩来破坏聚集结构。

试验电机型号为 J160LYX06G3,主要技术参数有峰值转矩 $28\text{ N} \cdot \text{m}$,额定转矩 $11\text{ N} \cdot \text{m}$,工程项目使用的电机比试验电机的输出转矩高出数倍之多。转台运转过程中不会产生爬行,不会影响伺服跟踪精度。

6.3 高低温测试

光学设备正常工作温度在 $-40 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将试验转台放进高低温箱,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 多种温度情况下,驱动电机,待温度稳定后,保持一段时间。

实验测得,在极端温度下气压表数值略有浮动,这是气体热胀冷缩的结果。磁流体并没有发生泄漏,且试验台运转平稳,证明密封结构可以抵抗极端温度,达到使用要求。

6.4 振动试验测试

将实验转台装在振动试验台上,施加随机载荷,用于模拟长途运输对密封结构的影响。振动试验分为 X 、 Y 向振动和 Z 向振动。 30 min 的试验可等效 1000 km 公路运输里程。每个方向试验 10 min 。振动条件和功率谱如表4,5所示。

为了提高安全系数, X 、 Y 、 Z 向的低频段功率谱皆取其附近频段上的最大值。经过计算,均方根加速度 0.835 g 。峰值加速度为 3 倍均方根加速度,约为 2.5 g , 30 min 后,气压表数值并没有明显变化。证明气体没有泄露,密封结构符合要求。

7 结论

针对激光通道动密封的问题,本文设计了一种密封结构,结合仿真软件进行耐压数值分析。理论结果证明,随着密封间隙的增加,密封耐压能力逐渐下降。考虑工程应用选择了密封间隙,再根据公式得出理论密封能力为 0.26 MPa 。内筒的固有频率远大于工作频率,系统不会产生共振。实验测试表

明,低转速对密封性能几乎无影响。此密封结构密封压力值为 0.2 MPa,并可抵抗 $-40 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极端温度和 $0 \sim 500\text{ Hz}$ 振动的冲击。转台驱动平稳,不存在爬行问题。该密封结构简单,环境适应力强,可满足激光传输通道的动密封要求。

参考文献:

- [1] He Zhaocai, Hu Baoan. Photoelectric measurement [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
何照才,胡保安.光电测量. [M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] Han Guangyu, Cao Lihua, Zhang Wenbao, et al. Design and realization of spacing of electro-optic theodolite pitch axis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, (1): 91 – 96. (in Chinese)
韩光宇,曹立华,张文豹,等.光电经纬仪俯仰轴系限位的设计与实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, (1): 91 – 96.
- [3] Xie Qiming, Li Yiwei, Pan Shunchen. The development and application of the materials for infrared window and domes [J]. Infrared Technology, 2012, 34(10): 559 – 567. (in Chinese)
谢启明,李奕威,潘顺臣.红外窗口和整流罩材料的发展和应用 [J]. 红外技术, 2012, 34(10): 559 – 567.
- [4] Feng Feng, He Shaobo, Yuan Xiaodong, et al. Progress of study of damage characteristics caused by pollutants to optical components [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(10): 1098 – 1102. (in Chinese)
冯峰,贺少勃,袁晓东,等.污染物致光学元件损伤特性研究进展 [J]. 激光与红外, 2012, 42(10): 1098 – 1102.
- [5] Chen Wentao, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Dustproof method for large-diameter and wide-band laser emission pipe [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 2918 – 2925. (in Chinese)
陈文韬,高云国,邵帅,等.大口径宽波段激光发射通道的防尘方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2918 – 2925.
- [6] Ren Tianci, Shao Shuai, Meng Lingwu, et al. Analysis of sealing characteristics of rolling blinds window of large aperture laser emission system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 87 – 94. (in Chinese)
任天赐,邵帅,孟令武,等.大口径激光发射系统卷帘式窗口密封特性分析 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 87 – 94.
- [7] Liu Ju, Dong Deyi, Xin Hongwei, et al. Temperature adaptability of large-aperture mirror assembly [J]. Optical Precision Engineering, 2013, 21(12): 3169 – 3175. (in Chinese)
刘巨,董得义,辛宏伟,等.大口径反射镜组件的温度适应性 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3169 – 3175.
- [8] Chi Changqing. The physics foundation and application of ferrofluid [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011. (in Chinese)
池长青.铁磁流体的物理学基础和应用 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.
- [9] Xiao Longyang, Li Decai. Experimental investigation of diverging stepped magnetic fluid seals with large sealing gap [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 50(3): 407 – 415
- [10] Wang Tao, Tang Jie, Song Liwei. Harmonic frequency analysis for the azimuthal component of a large-sized itometer [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(10): 1093 – 1095. (in Chinese)
王涛,唐杰,宋立维.某经纬仪方位谐振频率分析 [J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1093 – 1095.
- [11] Wu Xiaojie. Research on high speed magnetic fluid sealing performance [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
吴晓杰.高速磁性流体密封性能研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2019.