

文章编号 1004-924X(2014)07-1834-08

大口径宽波段高能激光发射窗口的设计与测试

刘旭堂^{1,2}, 高云国^{1*}, 邵 帅¹, 江展洪^{1,2}, 薛向尧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 100039)

摘要: 由于大口径宽波段高能激光发射系统使用环境复杂、激光发射间歇时间长, 晶体窗口难于满足使用要求, 本文设计了一套用于发射系统的快门式机械窗口。该机械窗口由防尘罩压紧机构和防尘罩的驱动机构两部分组成。压紧机构通过丝杠、钢丝绳和同步带等传动方式实现单电机驱动多目标同步运动, 利用柔性铰链补偿安装误差。采用柔索的非线性分析法和积分原理求解了防尘罩的风压载荷与锁紧机构所需的压紧力间的解析关系, 通过逆推法建立了正压风载与电机负载扭矩间的解析表达式。根据电机的矩频特性计算了机构的转速范围和防尘罩能承受的最大风载。实际测试表明, 电机输出扭矩达到 0.34 Nm 时, 防尘罩可以抵御 10 m/s 风载作用, 开启与关闭的最小时间稳定在 3 s 左右, 正压风载与电机负载间表达式的计算误差不超过 15%, 窗口的运行可靠, 符合设备使用要求。

关键词: 激光发射系统; 激光发射窗口; 宽波段; 柔索; 正压风载

中图分类号: TN243 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1834

Design and test of launch window for large-caliber multi-band high power laser system

LIU Xu-tang^{1,2}, GAO Yun-guo^{1*}, SHAO Shuai¹, JIANG Zhan-hong^{1,2}, XUE Xiang-yao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: gaoyunhuo@163.com*

Abstract: An automatic shutter-type mechanical window was designed for the multi-band, high-power and large-caliber laser launch system to meet the requirements of complex service environment for long interval emission and crystal window. The window is composed of two parts of the dust cover: pressing mechanism and driving mechanism. By using transmission links, such as screw, wire rope, and time synchronous belt, the pressing mechanism realizes multi-task driving of a single motor synchronously and the flexible hinges compensate installation errors. Then the relationship between wind pressure forced on dust cover and pressing force of the pressing mechanism was analyzed by nonlinear analysis methods and integral principles. The expression of wind pressure and motor torque was established by inverse method. According to the relationship of motor torque and frequency, the rotating speed range of the mechanism and the largest wind pressure of the dust cover were calculated.

收稿日期: 2013-09-20; 修订日期: 2013-11-05.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 057X22C050)

Experimental results show when the motor output torque is $0.341 \text{ N} \cdot \text{m}$, the mechanism can resist the impact of wind of 10 m/s . The least intervals of the window are stably within 3 s no matter it is opened or closed. The relative calculation error of the expression between wind pressure and motor output torque is less than 15% , which satisfies working requirements of systems.

Key words: laser launch system; laser launch window; multi-band; flexible cable; wind pressure

1 引 言

窗口是保证光学系统能够正常工作的关键部件^[1]。其主要作用是保护内部光学元件免受外界环境的影响,增强系统的环境适应性,提高设备的使用寿命和可靠性^[2]。目前激光发射系统使用的窗口按工作原理大致可分为晶体窗口和气动窗口。国内许多研究机构都对晶体窗口做了相应的研究^[3-7],制备出了 ZnSe 、 ZnS 、 Ge 和 CaF_2 等一系列透过率高,性能较好的红外窗口材料。相比之下,国外对晶体窗口的研究^[1,8-9]较早,各种晶体的制备工艺也更加完善、晶体的性能更加稳定。但能够满足宽波段高能激光束发射要求的高性能晶体材料还是很少,且制备困难,晶体尺寸也受到限制。此外晶体窗口不可避免地会吸收激光束的能量,当输出激光功率很高,或长时间工作时,窗口就会产生热畸变、甚至炸裂或被击穿,严重影响激光发射系统的正常工作^[10-11],至使功率过高的激光发射系统无法使用晶体输出窗口。因此,国内外万瓦级以上激光器,尤其是宽波段的激光器多采用气动窗口。但气动窗口设计复杂,价格昂贵,氮气消耗量大,远不能满足激光器在工业生产和军事上的应用要求^[12]。

不难看出,设计一套密封性好、可靠性高、对光束质量影响小的激光发射窗口对提高激光发射系统的性能至关重要。基于此,针对许多大口径宽波段高能激光发射系统工作时间短、间歇时间长,晶体窗口无法满足使用要求等情况,本文提出了一套使用机械窗口与气动窗口相配合来代替晶体窗口的方案,以便减少能源、气体的消耗和对探测设备的影响。这种机械窗口不仅防风沙、耐雨雪、抗高温,而且启动时间短、机动性强。此外由于机械窗口不影响激光束质量,因此可以适应任意波段、任意能级、任意口径的激光发射系统,从而提高设备的环境适应能力。本文利用微积分原理和柔索的非线性分析法建立风压载荷与压环压

紧力间的解析关系式,并进一步通过逆推法建立电机负载与防尘罩风压载荷间的解析方程。最后利用该方程式和电机的矩频特性评估了窗口的耐风压等级和电机的转速范围。

2 窗口的基本结构

窗口的基本结构和尺寸如图 1 所示,它主要由防尘罩上方的压紧机构和下方的驱动机构等组成。

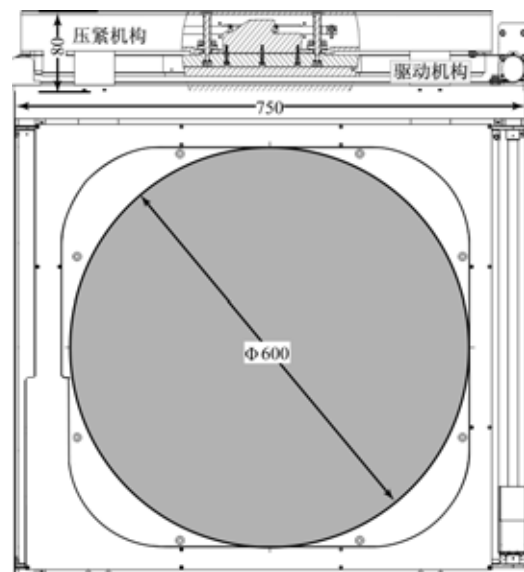


图 1 机构整体装配图

Fig. 1 Overall structure diagram of window

2.1 压紧机构的基本结构

压紧机构的基本结构如图 2 所示:

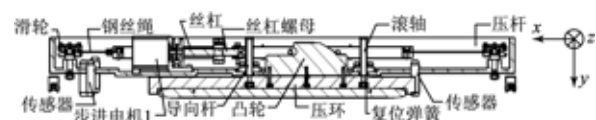


图 2 压紧机构结构图

Fig. 2 Planform for pressing mechanism

该机构主要由电机、丝杠、压杆、凸轮、压环、导向杆、复位弹簧、钢丝绳和滑轮等部件组成。压杆上装有滚轴,用于压动凸轮沿竖直方向运动。凸轮两侧配有导向杆和复位弹簧,主要用于顶起凸轮和压环。凸轮下方是压环,压环内嵌胶皮垫圈,用于增强防尘罩的密封,同时可以调节防尘罩所能承受的最大风载。连杆和压杆之间采用柔性铰链来补偿装配过程中的位置误差以及运行过程中压杆的变形和振动。压紧机构所有部件装在一个框架内,框架上装有霍尔开关。压紧机构采用全封闭设计,防止外部沙尘进入,以提高机构的使用寿命和运行的可靠性。

2.2 防尘罩驱动机构的基本结构

利用同步带传动精度高、运行平稳的特点^[13]设计了如图 3 所示的防尘罩驱动机构。

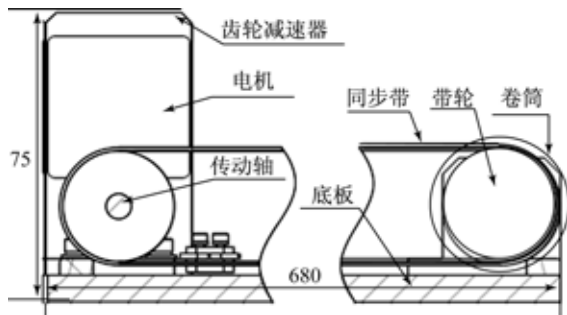


图 3 防尘罩驱动机构结构简图

Fig. 3 Drive mechanism of dust cover

该机构主要由底板、电机、减速器、传动轴、卷筒和同步带等部件组成的。传动轴和卷筒分别装在底板两端。传动轴和卷筒两端装有同步带和带轮,卷筒上装有防尘罩,同步带上固定有防尘罩的驱动杆。电机与传动轴间配有 2 : 1 的齿轮减速器。由于造成减速器齿轮传动偏差的主要误差源是齿轮间的安装定位误差^[14],因此齿轮外部增加齿轮箱,将电机和所有齿轮均安装在齿轮箱内,减少了齿轮间的安装定位误差,同时改善了传动环节的使用环境。

3 窗口工作原理

防尘罩的压紧机构主要用于压紧防尘罩抵御外界风沙侵袭,防尘罩的驱动系统用于防尘罩开启和关闭。在发射准备阶段和间歇阶段,防尘罩

关闭并利用压环将防尘罩压紧,防止外部灰尘和水汽进入;在激光束发射的短暂时刻,防尘罩打开并启动气动窗口。

3.1 压紧机构工作原理

压紧机构工作原理如图 4 和图 5 所示。窗口关闭时控制系统控制电机 1 通过丝杠带动压杆 1 沿 v_1 水平方向运动,压杆 2~4 通过钢丝绳与压杆 1 连接并同步运动。压杆上装有滚轴,滚轴两端装有滑轮,框架上装有滑道,滑轮在滑道中沿 v_1 方向运动。压杆沿 v_1 方向运动过程中,通过滚轴压动凸轮沿 v_2 方向运动。凸轮下方与压环固连并带动压环向下压紧防尘罩。窗口开启时,控制系统控制电机 1 通过丝杠带动压杆 1 和滚轴沿 v_1 反方向运动。滚轴沿 v_1 反方向运动过程中,压环和凸轮利用复位弹簧的推力升起。系统利用霍尔开关反馈机构运行的位置。传动机构通过单个步进电机同时驱动 4 个凸轮沿竖直方向直线运动,降低驱动环节的数目和复杂性,同时提高了 4 个凸轮间运动的一致性,防止传动过程中的卡死现象。

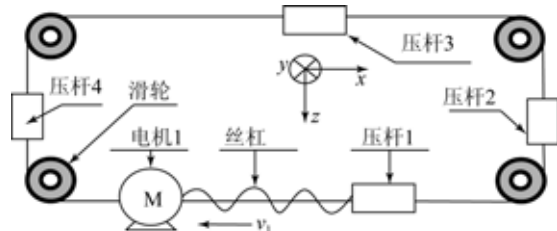


图 4 压紧机构结构简图

Fig. 4 Planform for pressing mechanism

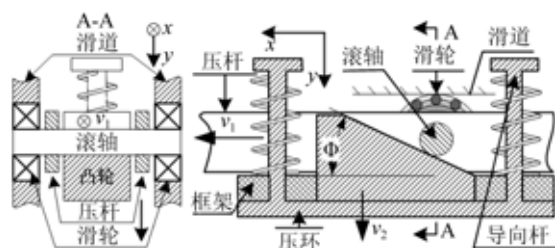


图 5 凸轮机构运动示意图

Fig. 5 Camming diagram

3.2 防尘罩驱动机构工作原理

防尘罩驱动机构的工作原理如图 3 所示。防尘罩开启过程中,控制系统控制电机 2 通过同步带带动防尘罩的驱动杆沿 x 轴方向运动。防尘罩关闭时,控制系统控制电机 2 通过同步带带动

防尘罩的驱动杆沿 x 轴的反方向运动。

4 窗口的设计分析和理论计算

设备在野外复杂环境中使用时,窗口的防尘罩要抵御不同程度的风沙侵袭。其能承受的风压载荷决定了窗口的密封和防护效果,是窗口最重要的设计指标。但由于尺寸空间和质量的限制,驱动电机所能提供的输出功率也受到限制。因此应在满足窗口使用要求的前提下,尽可能选用小功率的驱动电机。

为了恰当地选取驱动电机,建立了电机负载扭矩与风压载荷间的解析关系式。首先利用有限元思想将防尘罩等效为若干个柔性单元体,然后利用微分原理取极限获得等效的柔索力学模型,根据柔索的非线性分析法和曲线积分法解出柔索的纵向张力,再对柔索的纵向张力取积分获得防尘罩的张力。通过逆推法建立各传动环节负载与电机输出扭矩间的解析式;最后将各传动环节的参数带入解析式,获得正压风载与电机最大输出扭矩间的解析式,并根据电机的矩频特性曲线计算机构转速范围及防尘罩所能承受的风压载荷。

4.1 防尘罩的风载计算

假设防尘罩承受风压载荷为均布正压载荷,忽略防尘罩厚度、弯曲刚度对弯曲变形的影响。由于防尘罩拉伸刚度大,风压载荷相对较小,因此忽略防尘罩的弹性变形的影响,得到图 6 所示的力学模型:

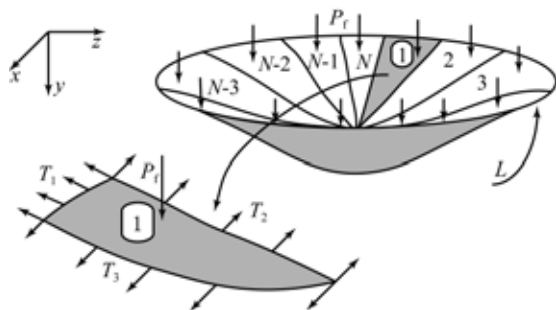


图 6 防尘罩风载变形示意图

Fig. 6 Structure diagram of flexible hinge

将防尘罩有效受力部分分为 n 等分,其中 P 为正压风载、 L 为防尘罩受风载作用的边界线、激光发射口径的有效半径为 r 。由于风载为均布载

荷,因此每个微分单元的受力是相同的。忽略防尘罩沿 y 轴方向的刚度作用,防尘罩的每个柔性单元除承受均布风压载荷外,还承受 3 个方向拉力 T_1 、 T_2 和 T_3 。其中, T_2 和 T_3 为防尘罩内力,防尘罩单元积分一周过程中 T_2 和 T_3 会相互抵消,不影响防尘罩径向拉力和沿 y 方向变形,因此可以忽略不计。当 $n \rightarrow \infty$ 时,微分单元等效为图 7 所示的柔索。

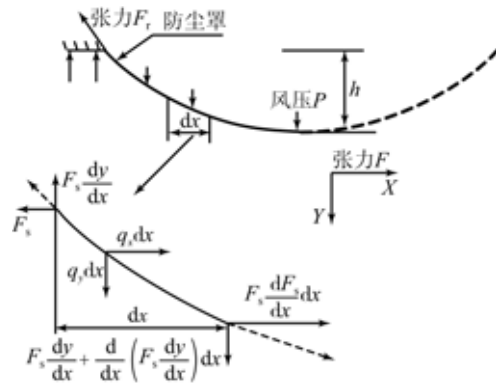


图 7 柔性铰链力学模型

Fig. 7 Mechanical model of flexible hinges

静态风压计算公式为^[15]:

$$P_f = 0.5 C_D \rho v_m^2, \quad (1)$$

式中: C_D 是风阻系数, v_m 为平均风速, ρ 为空气密度。防尘罩满足以下两点假设:一、柔索为理想柔索只承受拉力,不承受压力和弯矩。二、柔索的应变是小应变,柔索的应力和应变关系满足胡克定律^[16]。柔索单元的力学平衡方程为:

水平方向:

$$\sum x = 0, \frac{dF_s}{dx} dx + q_x dx = 0. \quad (2)$$

竖直方向:

$$\sum y = 0, \frac{d}{dx} \left[F_s \frac{dy}{dx} \right] dx + q_y dx = 0. \quad (3)$$

利用曲线积分原理求得到柔索两端的张力:

$$T_1 = F_s \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} = F_s \sqrt{1 + \left[\frac{q}{F_s} x + \left(\frac{h}{r} - \frac{qr}{2F_s} \right) \right]^2}, \quad (4)$$

式中: $F_s = \frac{qr^2}{2}$ 是柔索张力的水平分量。

将柔索的张力 F_f 沿曲线 L 求积分得到防尘罩周边的张力:

$$T = \int T_1 dL = \pi q r^2 \sqrt{(h-1)^2 + r^2}. \quad (5)$$

将风载压强 P_f 和表达式(4)代入表达(5)得到压环所需的锁紧力:

$$F_{sj} = \frac{T}{\mu_i} = \frac{\pi C_D \rho v_m^2 r^2}{2\mu_i} \sqrt{(h-1)^2 + r^2}, \quad (6)$$

式中: μ_i 是压环与防尘罩间的摩擦系数。依据防尘罩的挠曲变形建立了有限元模型,取不同的风压载荷送交 Nastran 分析。有限元计算结果和式(6)的计算结果如表 1 所示。由表 1 可知,式(6)的计算结果与有限元计算偏差不得超过 15%。

表 1 解析解与有限元计算结果偏差

Tab. 1 Deviation of analytical and finite element calculations

风速 $v/m \cdot s^{-1}$	解析计算 T/N	有限元计算结果/ N	偏差/%
6	7.056	6.896	1.559
7	9.604	10.665	-11.05
8	12.544	13.443	-7.17
9	15.876	16.556	-4.91
10	19.60	18.395	6.15

4.2 凸轮受力计算

凸轮在压紧机构的传动过程中是运动转换的中心环节,它将丝杠产生的水平方向的拉力转化成压环沿竖直方向的锁紧力。

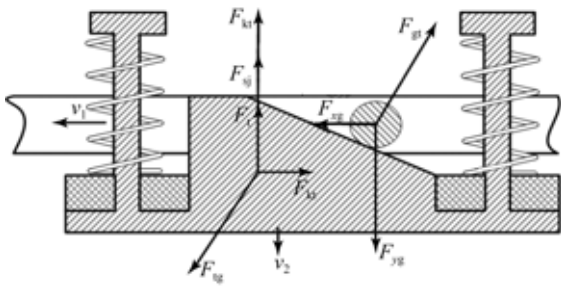


图 8 凸轮受力示意图

Fig. 8 Diagram of cam force

首先以凸轮作为受力分析对象,受力情况如图 8 所示,凸轮沿 v_2 运动过程中竖直方向承受的作用力主要有弹簧的压力 F_t 、导杆与框架间的摩擦力 μF_{kt} 、压环的锁紧力 F_{sj} ;水平方向受框架对凸轮水平推力 F_{kt} 。然后以滚轴为受力分析对象,竖直方向受压杆压力 F_{yg} ,水平方向受压杆水平

压力 F_{yg} 。 F_{gt} 和 F_{tg} 是凸轮与滚轴间的相互作用力,大小相等方向相反。将凸轮与滚轴视为一个整体受力系统,由于系统受力平衡可以得出以下结论:

$$F_{kt} = -F_{yg}. \quad (7)$$

$$F_{yg} = -(\mu F_{kt} + F_{sj} + F_t). \quad (8)$$

又已知凸轮的倾斜角 $\Phi = 26.5^\circ$,由凸轮的受力平衡可知:

$$\tan \Phi = \frac{|F_{kt}|}{F_t + F_{sj} + \mu F_{kt}} = \frac{|F_{yg}|}{F_t + F_{sj} + \mu F_{kt}} = \frac{1}{2}, \quad (9)$$

式中: Φ 为凸轮的倾斜角, μ 为凸轮与框架间的摩擦系数。根据胡克定律可得:

$$F_t = k(25 + y) \quad (0 \leq y \leq 15), \quad (10)$$

式中: y 是弹簧沿 y 轴方向的位移, k 为弹簧刚度。

将式(10)和(1)带入式(9)得滚轴受到水平方向的拉力为:

$$F_{yg} = -F_{kt} = -\left[\frac{1}{2-\mu} (F_t + F_{sj}) \right] = \frac{1}{\mu-2} \left[k(25 + y) + \frac{\pi C_D \rho v_m^2 r^2}{2\mu_i} \sqrt{(h-1)^2 + r^2} \right]. \quad (11)$$

设滚轴对压杆的水平拉力为 F_{gx} ,丝杠对压杆的水平拉力为 F_{sy} ,压杆水平方向只受到滚轴和丝杠的拉力,且受力平衡。根据丝杠和压杆的受力平衡关系可得到压杆对丝杠沿水平方向的拉力为:

$$F_{ys} = -F_{sy} = F_{gx} = -F_{yg} = \frac{1}{2-\mu} \left[k(25 + y) + \frac{\pi C_D \rho v_m^2 r^2}{2\mu_i} \sqrt{(h-1)^2 + r^2} \right]. \quad (12)$$

4.3 丝杠设计计算

丝杠与电机直接相连,将电机的输出扭矩转化为对凸轮的水平拉力。求出丝杠的负载扭矩可近似等效为电机的负载扭矩。丝杠负载扭矩为:

$$M_l = F_{ys} \frac{d_2}{2} \tan(\gamma + \rho_v) = \frac{d_2}{2(2-\mu)} \cdot \left[k(25 + y) + \frac{\pi C_D \rho v_m^2 r^2}{2\mu_i} \sqrt{(h-1)^2 + r^2} \right] \tan(\gamma + \rho_v), \quad (13)$$

式中: γ 为丝杠的螺纹升角, ρ_v 为丝杠的当量摩擦角, d_2 是丝杠中径。

将各参数代入表达式(13)可以得到风速与电

机负载扭矩间的解析关系:

$$M_d = 0.98 \times 10^{-3} v_m^2 + 0.2. \quad (14)$$

利用表达式(13)和(14)计算压紧机构的有效载荷,充分利用步进电机的有效扭矩范围,合理设计弹簧的刚度和各传动环节的参数。依据式(14)建立风压载荷与电机负载扭矩间的变化曲线如图 9 所示。

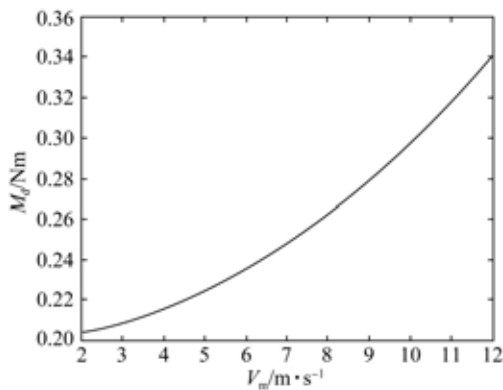


图 9 电机输出扭矩与风压关系对应图
Fig. 9 Motor output torque corresponding to wind pressure

最终设计制造的实物如图 10 所示。

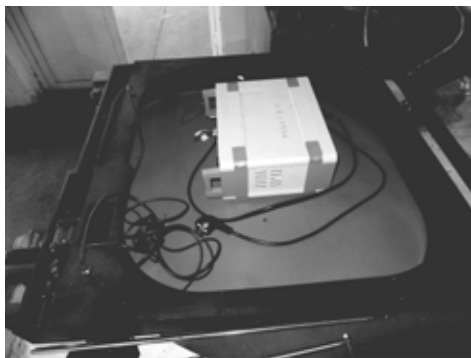


图 10 实物图
Fig. 10 Physical renderings

5 实验测试

考虑到尺寸空间和设备质量,在满足窗口使用要求的前提下,尽可能选用小功率的驱动电机。窗口最重要的设计指标是防尘罩所能承受的最大风载和窗口的开启时间。依据设计结果最终选取电机的矩频特性如表 2 所示。为检测以上指标,安排了以下 2 组实验。

表 2 电机的矩频参数

Tab. 2 Torque-frequency parameters for motor

电机的输出扭矩/Nm	电机的输出转速/(r · s ⁻¹)
0.34	2.45
0.32	5.02
0.30	8.66
0.28	10.20
0.26	11.01

5.1 机构风载测试

防尘罩所能承受的风压载荷决定了窗口的密封和防护效果。由于各种误差因素的影响,机构运动规律与设计结果会存在一定偏差^[17]。为准确测量防尘罩所能承受的最大风载,选用苏州艾美乐公司的特种净化送风机来模拟正压风载。该风机的出风风速可以在 1~12 m/s 内调控;通过调节风机的参数可以获得所需要的输出风速和送风量。另一方面通过调节电机的输出扭矩使防尘罩获得不同的密封压力。重复测试,记录电机输出扭矩一定时,防尘罩所能承受最大风速的平均值 v_c 。同时利用传感器的反馈信息测量窗口的开启时间 t 。利用测试所得最大风速 v_c 与表达式(14)计算所得的最大风速 v_j 来计算式(14)的计算误差。表达式的计算偏差 $d(v)$ 为:

$$d(v) = \frac{|(v_c - v_j)|}{v_c} \times 100\%, \quad (15)$$

式中: v_c 是测试风速, v_j 是计算风速。检测和计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知式(14)的计算误差不超过 15%。防尘罩所能承受的最大风压的风速为 10.9 m/s,高于设备要求的 10 m/s,此时电机的负载扭矩为 0.34 Nm,窗口开启时间的范围是 3 s 左右,满足设备使用要求。实际测试值低于表达式(14)计算的结果。造成计算误差的主要原因是:各传动环节都存在摩擦阻力,而表达式(14)无法全部涵盖其中。

表 3 风载测试结果

Tab. 3 Test result of wind load

测试平均最大风速 $v_c/(m \cdot s^{-1})$	计算最大风速 $v_j/(m \cdot s^{-1})$	风速偏差 $d(v)/\%$	电机负载扭矩/Nm	窗口开启时间 t/s
7.2	8	10.5	0.26	
8.1	9	11.1	0.28	
9.2	10	8.7	0.3	<2
10.2	11	7.8	0.32	
10.9	12	10.1	0.34	2~4

5.2 机构转速测试

为了准确计算窗口的开启时间,利用霍尔开关检测拉杆的位置。通过测量拉杆运动的时间 t 和行程 s ,来获得电机输出的平均转速 $v_i = s/t$ 。调节控制系统使电机输出转速 v 在 $2 \sim 18 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 内变化。将电机输出转速 v_i 和 v 分别代入表达式(16)和(17)中,得出实际转速与理想转速的偏差 $\Delta(v)$ 以及重复运动过程中转速的波动值 $s(v_i)$:

$$\Delta(v) = \frac{|v - \bar{v}|}{\bar{v}} \times 100\% \quad (16)$$

$$s(v_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (17)$$

式中: \bar{v} 是多组转速测量结果的平均值。

测量和计算结果如表 4 所示。

表 4 转速偏差测试结果

Tab. 4 Test results of speed deviation

理想转速 $v/(\text{r} \cdot \text{s}^{-1})$	转速偏差 $\Delta(v)/\%$	转速的波动 $s(v_i)/\%$
2~16	0.8	1.3
17~18	3	5
>18	机构运转出现卡滞,无法持续工作	

参考文献:

- [1] 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]. 红外技术,2012,34(10): 559-567. XIE Q M, LI Y W, PAN SH CH. The development and application of the materials for infrared windows and domes [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(10):559-567 (in Chinese)
- [2] EDANEES A. *Optomechanical Engineering Handbook* [M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [3] 吴清文,卢泽生,等. 空间遥感器中窗口的热光学特性研究[J]. 光学技术,2001,27(3): 260-265. WU Q W, LU Z SH, et al.. Study on the thermal optics property of a window applied on a space remote sensor [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(3):260-265. (in Chinese)
- [4] 张亚萍,范志刚,刘金强. 红外末制导中的气动光学效应分析[J]. 红外与激光,2006,36(6): 487-490. ZHANG Y P, FAN ZH G, LIU J Q. Study on aero-optical effect in the terminal guidance [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(6): 487-490. (in Chinese)
- [5] HAN W, ZHAO Y J, HU X Q. Study on aero-optical effect of a hypersonic missile infrared image guide [J]. *Proc. SPIE*, 2009, 7513(16):1-9.
- [6] YU F P, ZHAO X S, HU Z, et al.. Influence of thermal deformations of the output windows of high-power laser systems on beam characteristics [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(35):6465-6472.
- [7] 幺艳平,刘景和. ZnSe 红外窗口材料的性能及其制备[J]. 人工晶体学报,2006,35(1):183-187. YAO Y P, LIU J H. Property and fabrication of ZnSe infrared window material [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, 35(1):183-187. (in Chinese)
- [8] VITALY E G, MICHELLE D. Shinn laser damage [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(12):121801-1.
- [9] PAUL R Y. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 2006.
- [10] 刘天华. 高能激光器自由旋转情动窗口的工程设计及其相关研究[D]. 长沙:国防科技大学,2002.

根据表 4 的检测结果可知:当电机的输出转速在 $2 \sim 16 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,电机输出转速的偏差和波动值不超过 2%。窗口开启时间不超过 3 s,满足设计要求。当转速高于 $17 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,随转速的提高输出转速的偏差 $\Delta(v)$ 和波动值 $s(v_i)$ 都明显增加,这是由于实际负载已经接近电机的最大承载能力,在起步和停车过程中产生了丢步现象。

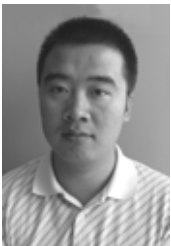
由以上结果可知,2 项设计指标均满足设计使用要求。选取的步进电机满足设备使用要求。

6 结 论

本文针对大口径多波段高能激光发射系统使用环境复杂,工作间歇时间长,晶体窗口无法满足使用要求等情况,设计了一套全自动机械窗口。实验测试表明,该机构实际运转顺畅、可靠性高,电机负载扭矩与风压载荷间的解析表达式的计算误差不超过 15%;窗口最大可以抵御 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风载作用,此时机构启动与关闭的时间不超过 3 s,符合设备使用要求。该窗口成本低、运行可靠、环境适应能力强,可以满足多种口径的宽波段高能激光发射系统的使用要求,应用前景广泛。但窗口的结构比较复杂,质量大,有待进一步优化改进。

- LIU T H. *Engineering Design and Related Studies on the Free Vortex Aerodynamic Windows of High Energy Lasers* [D]. Hunan: National University of Defense Technology. 2002. (in Chinese)
- [11] 郭建增,刘铁根,王振华,等. 转动窗口在高能激光器中的应用[J]. *强激光与离子束*, 2011, 23(9): 2309-2313.
GUO J Z, LI T G, WANG ZH H, *et al.*. Application of rotating window to high-energy laser [J]. *High Power laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2309-2313(in Chinese)
- [12] 黎建明,王岩,钱嘉裕. 超万瓦高功率 GaAs 红外激光窗口材料的研制[J]. *稀有金属*, 1997, 21(3): 161-163.
LI J M, WANG Y, QIAN J Y. Develop CaAs as infrared windows for super million watt highpower laser [J]. *Rare Metals*, 1997, 21(3): 161-163. (in Chinese)
- [13] 张雷,丁亚林,张洪文,等. 基于正时带的帘幕式快门设计与精度分析[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 380-387.
ZHANG L, DING Y L, ZHANG H W, *et al.*. Design and precision analysis of curtain type shutter based on timing belt [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 380-387(in Chinese)
- [14] 宋洪侠,赵苏苏,姜志峰,等. 降低齿轮齿距累积偏差的方法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1797-1801.
SONG H X, ZHAO S S, LOU ZH F, *et al.*. Reduction of cumulative pitch deviation for gears in grinding machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1797-1801. (in Chinese)
- [15] 周超,杨洪波,吴小霞,等. 1.2 m 望远镜风载作用分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 889-893.
ZHOU CH, YANG H B, WU X X, *et al.*. Influence of wind loading on the 1.2 m telescope [J]. *Infrared and laser engineering*, 2011, 40(5): 889-893(in Chinese)
- [16] 周琛. 柔索非线性变形的静力分析[D]. 宁波: 宁波大学硕士论文, 2010.
ZHOU CH. *Nonlinear deformation of flexible cable by static analysis* [D]. Ningbo: Ningbo University, 2010(in Chinese)
- [17] 王恒坤,张国玉,郭立红,等. 高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J]. *光学精密工程*, 2012, 21(2): 336-341.
WANG H K, ZHANG G Y, GUO L H, *et al.*. High performance fast-steering mirror for beam control of vehicular high energy laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 336-341. (in Chinese)

作者简介:



刘旭堂(1986—),男,山东滨州人,博士,2010年于东北林业大学获学士学位,主要从事光学精密机械机构设计研究。E-mail: liuxutang220@163.com

导师简介:



高云国(1955—),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,主要从事光电仪器总体设计的研究。E-mail: gaoyunhuo@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)