

引用格式:赵翔,郭岩,张鹏,等.基于双层衍射元件的红外双波段光学系统设计[J].电光与控制,2017,24(10):85-89. ZHAO X, GUO Y, ZHANG P, et al. Design of infrared dual-band optical system with double-layer diffraction optical element[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):85-89.

基于双层衍射元件的红外双波段光学系统设计

赵翔^{1,2}, 郭岩³, 张鹏², 罗金平²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471023; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000; 3. 中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室, 沈阳 100850)

摘要: 利用红外双波段成像能够获得更多的信息, 从而提高探测和识别能力。将多层衍射光学元件应用到红外双波段光学系统中, 可以校正色差、简化结构。讨论了多层衍射光学元件的成像特性, 相比于单层衍射光学元件, 多层衍射光学元件可在宽波段范围内获得高衍射效率, 给出了多层衍射光学元件设计方法。基于此, 设计了一种红外双波段混合成像光学系统。其中, 双层衍射光学元件在 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 和 $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 工作波段上的衍射效率达 98.5% 以上。仿真结果表明, 系统像质良好, 满足要求。

关键词: 折/衍混合光学系统; 光学设计; 衍射效率; 双层衍射光学元件; 红外双波段

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.017

Design of Infrared Dual-Band Optical System with Double-Layer Diffraction Optical Element

ZHAO Xiang^{1,2}, GUO Yan³, ZHANG Peng², LUO Jin-ping²

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471023, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

3. Military Delegate Office of PLA in Shenyang Aircraft Corporation Ltd., Shenyang 100085, China)

Abstract: The detection and recognition capability can be improved by using infrared dual-band imaging to obtain more information. The application of multi-layer Diffractive Optical Elements (DOEs) in infrared dual-band optical system can correct the chromatic aberration and simplify the system structure. Compared with the single-layer DOEs, the multi-layer DOEs have higher diffraction efficiency in wide wave bandwidths. In this paper, the imaging characteristics of multi-layer DOEs are presented, and the design method is given. Based on which, an infrared dual-band hybrid diffractive-refractive optical system is designed. The diffraction efficiency of the double-layer DOE is higher than 98.5% in the working bands of 3.7 to $4.8 \mu\text{m}$ and 7.7 to $9.5 \mu\text{m}$. The simulation result shows that the system has fine imaging quality, and the performance meets the optical system requirements.

Key words: hybrid diffractive-refractive optical system; optical design; diffraction efficiency; double-layer diffraction optical element; infrared dual-band

0 引言

红外成像光学系统在军事上有着广泛的应用, 单一波段的红外探测已难以满足各种需求, 随着光电探测技术的发展, 双波段探测技术在识别伪装、消除干扰等方面的优势越来越明显^[1]。衍射光学元件的概念首

先由英国物理学家 RAYLEIGH 提出, 20 世纪 80 年代美国麻省理工学院提出二元光学后, 衍射光学元件的技术迅速发展, 随着加工技术的进步, 衍射光学元件逐渐从台阶非连续面形向连续面形转变, 利用多个衍射光学元件提高宽波段衍射效率技术这一关键技术 2002 年由日本首次提出, 目前世界各国都在研究, 国内长春理工大学分析了多层衍射光学元件的设计方法, 搭建了衍射光学元件衍射效率的测量装置, 对于衍射元件在各种光学系统中的应用做了大量工作。

单层衍射光学元件的衍射效率只能在某一波长处

收稿日期: 2016-08-09

修回日期: 2016-08-25

基金项目: 中航工业技术创新基金(2010D61313)

作者简介: 赵翔(1991—), 男, 河南洛阳人, 硕士生, 研究方向为衍射光学与光学设计。

达到 100%，对于其他的波长来说，衍射效率下降明显，双层衍射光学元件在整个波段内不同波长处都有很高的衍射效率。红外双波段光学系统的色差和热差难以校正，由于衍射光学元件有负的阿贝数和与常规光学材料相反的热膨胀系数，所以衍射光学元件是实现消除色差和无热化设计的可靠选择^[2]。衍射光学元件的应用有利于减小体积、减轻重量，简化光学系统的结构，实现小型化宽波段的目的。根据俄罗斯国家光学研究中心的成果，衍射光学元件的应用可以使镜头片数减少 20%~30%，成像质量提高 15%~20%^[3]。为此，本文给出一种基于带宽积分平均衍射效率的双层衍射光学元件优化设计方法，设计了一种透射式红外双波段混合成像光学系统。

1 双层衍射光学元件的衍射效率分析

1.1 双层衍射光学元件的结构形式

双层衍射光学元件由 2 个单层衍射面组成，单层衍射面由普通透镜的一个表面加工出微结构。双层衍射光学元件是把 2 个单层衍射面相对精确啮合，并且紧密组合而构成的，具有相同的周期；相比于单层的元件来说，双层元件有 2 个设计波长^[4]。双层衍射光学元件的结构如图 1 所示。

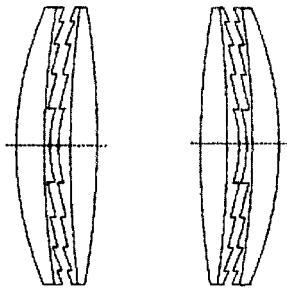


图 1 双层衍射光学元件结构图

Fig. 1 The structure of double-layer DOE

1.2 双层衍射光学元件的衍射效率公式

衍射效率关系着衍射光学元件的使用价值，也决定着衍射光学元件的制造是否合格、能否在系统中使用。因此，可以从位相光栅的衍射效率入手，来推导衍射光学元件的衍射效率^[5]。

$n_1(\lambda)$ 、 $n_2(\lambda)$ 和 $n_M(\lambda)$ 分别代表 2 个单层衍射元件的介质折射率和 2 个单层衍射光学元件之间的介质折射率， y_1 和 y_2 分别为 2 条光线在第 1 个单层衍射光学元件表面传播的距离， y_3 和 y_4 为 2 条光线在第 2 个单层衍射光学元件表面传播的距离。如图 2 所示，2 条光线入射到同一个单层衍射光学元件相邻子周期上，产生的位相差为

$$\phi(\lambda) = \frac{[n_M(\lambda)y_1 - n_1(\lambda)y_2] + [n_2(\lambda)y_3 - n_M(\lambda)y_4]}{\lambda} \quad (1)$$

得到最大位相延迟函数，即

$$\phi(\lambda) = N\phi(\lambda) \quad (2)$$

式中， N 为衍射光学元件的位相级数。光线垂直入射时，衍射效率为

$$\eta_M = \sin^2(m - \phi(\lambda)) \quad (3)$$

与单层衍射光学元件类似，双层衍射光学元件在第 1 个衍射面的基础上加入了第 2 个衍射面的位相改变。当光线的角度为 90° 入射时，衍射效率可以表示为

$$\eta_M = \sin^2 \left\{ m - \left[\frac{d_1}{\lambda} (n_M(\lambda) - n_1(\lambda)) + \frac{d_2}{\lambda} (n_2(\lambda) - n_M(\lambda)) \right] \right\} \quad (4)$$

在通常情况下，中间介质为空气，极少数情况下为其他介质，当介质为空气时，取 $n_M(\lambda) = 1$ 。

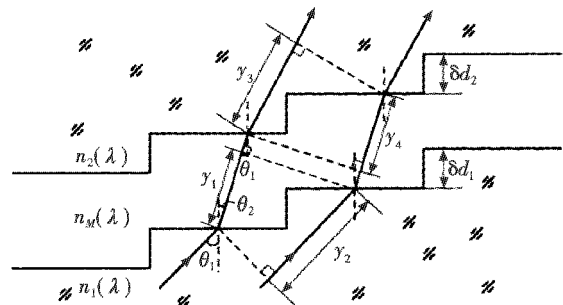


图 2 光线在双层衍射光学元件介质中的传播

Fig. 2 Refraction of incidence beam in double-layer DOE

1.3 带宽积分衍射效率

在一定波段内的带宽积分平均衍射效率为

$$\bar{\eta}_m = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \sin^2[m - \phi(\lambda)] d\lambda \quad (5)$$

式中： λ_{\min} 、 λ_{\max} 分别为工作波段的起始波长和终止波长； m 为衍射级次。实际上，应用于各平台的成像光学系统，其对工作波段的要求都不是单一的波长，而是一个宽波段，甚至是双波段，所以，对某个波段上各个波长处的衍射效率进行积分，然后再求平均衍射效率是一个必要可行的步骤^[6]。

2 双层衍射光学元件的设计实例

在双波段红外系统中，使用单层衍射光学元件无法达到衍射效率的要求，因此，考虑使用多层衍射光学元件进行双波段红外光学系统的设计。

给出 2 个不同的波长可以计算出不同的积分平均衍射效率，对于双层衍射光学元件来说，波长和积分平均衍射效率是彼此对应的关系，则衍射效率终会在 2 个不同波长处达到最大值，此时的 2 个不同波长即为所需要的系统波长，从而可以实现积分平均衍射效率的最大化设计^[7-9]。

首先对多层衍射光学元件的衍射效率进行设计,得到的双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率与波长关系如图 3 所示。

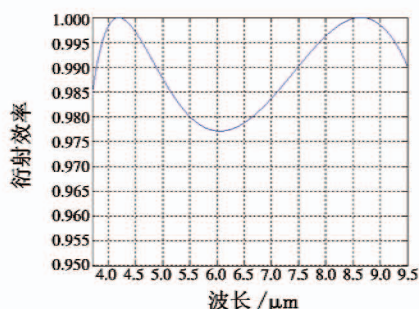


图 3 双层衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率曲线

Fig. 3 The polychromatic integral diffraction efficiency of double-layer DOE

图 3 表示选择以硫化锌、硒化锌为基底材料时,双层衍射元件的衍射效率与工作波长的对应关系。当工作波长确定后,双层衍射光学元件的最大带宽积分衍射效率即可确定。选择带宽积分衍射效率取最大值时所对应的 2 个波长为设计中心波长,相应的设计中心波长分别为 $4.2 \mu\text{m}$ 和 $8.7 \mu\text{m}$ 。由结果可知,在 $3.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 整个红外工作波段,双层衍射光学元件的最大带宽积分平均衍射效率为 99.93%, $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波段的平均衍射效率为 99.61%, $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 波段的平均衍射效率为 99.83%。

通过衍射微结构高度与波长以及衍射级次的关系可以计算得到双层衍射光学元件的相关结构参数。设计的双层衍射光学元件中,2 个单层衍射面的微结构高度分别为 $215 \mu\text{m}$ 和 $-243 \mu\text{m}$,在中波红外 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 的衍射级次分别为 $m_1 = 74, m_2 = -73$;在长波红外 $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 的衍射级次分别为 $m_1 = 35, m_2 = -34$,满足 $m_1 + m_2 = 1$,表示可以把双层衍射光学元件看成 2 个单层衍射光学元件。

3 红外折/衍混合光学系统设计

3.1 光学系统指标要求

1) 探测器参数。工作波段分别为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 和 $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$;F 数为 2;面阵为 320×256 ;面元间隔为 $30 \mu\text{m}$;制冷方式为斯特林制冷方式。

2) 光学系统参数。工作波段分别为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 和 $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$;光学系统工作 F 数小于等于 2;光学系统焦距为 100 mm ;无热化, $-55 \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内无需调焦;半视场为 3.5° ;调制传递函数 MTF 为 16 lp/mm 处大于等于 0.5。

3.2 光学系统设计

光学系统共 5 片透镜,第 1,3,5 片透镜使用硒化

锌,第 2 片使用锗,第 4 片透镜使用硫化锌;共有 2 个非球面,分别第 2 片和第 5 片透镜上,其余为球面;双层衍射光学元件选择第 3 片和第 4 片为基底。镜筒材质采用铝,探测器安装在钢筒上,钢筒与铝镜筒部分重叠,与光学系统配合实现消热差,光学系统的孔径光阑与双波段焦平面探测器前的冷光阑位置重合,实现 100% 的冷光阑效率^[10]。采用 CODEV 进行优化,最终得到光学系统结构如图 4 所示,作为基底的第 3、第 4 片透镜理论上应精确啮合,间隔不宜过大,否则会影响衍射效率,考虑到衍射微结构高度以及镀膜的影响,取间隔为 0.5 mm 。

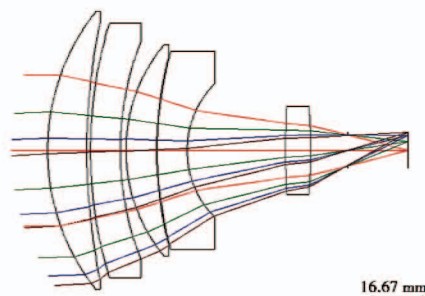


图 4 光学系统结构图

Fig. 4 The layout of infrared optical system
光学系统结构参数如表 1 所示。

表 1 光学系统结构参数

Table 1 The parameters of infrared optical system

类型	半径/mm	厚度/mm	材料	口径/mm	
1	Sphere	74.6	13.21	ZNSE	44.27
2	Sphere	217.3	1.00		42.97
3	Sphere	151.2	8.43	SCGERM	40.86
4	Asphere	98.4	1.81		36.77
5	Sphere	54.9	12.52	ZNSE	34.74
6	Sphere	197.5	0.5		33.03
7	Sphere	197.5	9.99	ZNS	32.61
8	Sphere	32.0	30.67		22.41
9	Asphere	231.5	8.63	ZNSE	16.20
10	Sphere	-199.9	16.99		15.02
11	Sphere	Infinity	0		5.18
stop	Sphere	Infinity	20		5.17
13	Sphere	Infinity	0		6.18

非球面矢高方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + \dots \quad (6)$$

式中: c 为表面曲率; k 为二次曲面系数; r 为透镜径向坐标; a_1, a_2 等系数为非球面系数。

表面 4 的非球面系数为: $a_1 = 1.1675 \text{ E} - 7, a_2 = 2.2785 \text{ E} - 11, a_3 = 6.5532 \text{ E} - 17, a_4 = 2.7786 \text{ E} - 18$ 。表面 9 的非球面系数为: $a_2 = -1.7018 \text{ E} - 7, a_3 = 8.8557 \text{ E} - 10, a_4 = 3.4481 \text{ E} - 13$ 。

各温度离焦量和系统焦深的对比如表 2 所示。

表2 离焦量与系统焦深的比较

Table 2 The defocus and depth of focus

焦深 ±33.6 μm, λ = 4.2 μm	焦深 ±69.6 μm	λ = 8.7 μm	
中波 20 °C	2.1	长波 20 °C	0.7
中波 -55 °C	45.5	长波 -55 °C	43.3
中波 70 °C	-29.7	长波 70 °C	-31.2

由表2可知,只有在中波-55 °C时,离焦量超过焦深,成像的清晰度有所下降,其他温度条件下离焦量均小于焦深。在-55 ~ +70 °C的温度范围内,双波段系统能够得到较好的成像质量。

3.3 光学系统性能分析

中波红外波段光学系统在20 °C, -55 °C和70 °C时的MTF如图5所示。

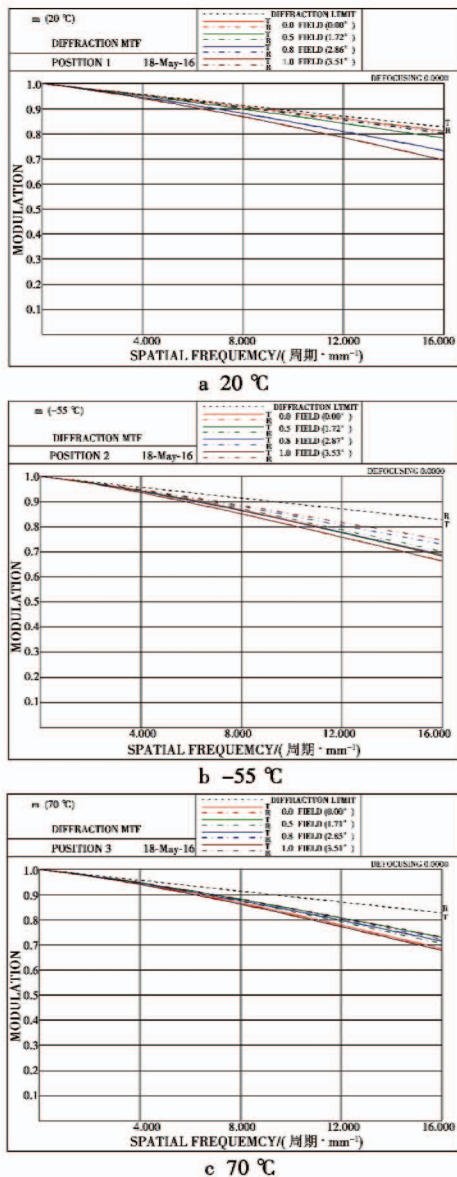


图5 中波红外波段光学系统的MTF
Fig. 5 MTF of MWIR optical system

长波红外波段光学系统在20 °C, -55 °C和70 °C时的MTF如图6所示。

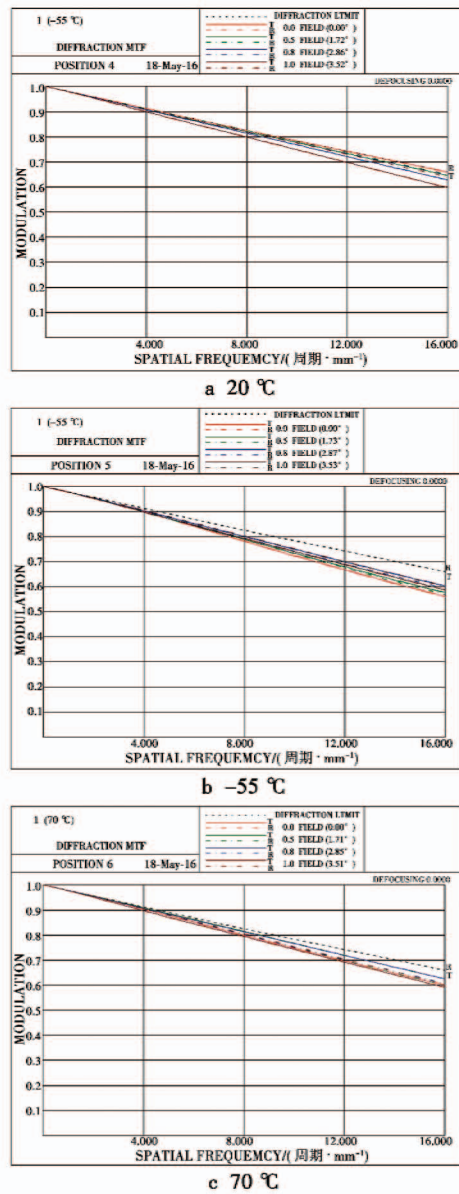


图6 长波红外波段光学系统的MTF
Fig. 6 MTF of LWIR optical system

图5、图6分别给出了系统在-55 ~ 70 °C范围内16 lp/mm空间频率的调制传递函数(MTF)曲线,成像质量在两个波段范围内都接近衍射极限,-55 ~ +70 °C范围内无需调焦,并为公差分析留有宽松的条件。

3.4 公差分析

双层衍射光学元件的加工工艺软件分析如图7所示,考虑公差之后的MTF值如表3所示。由结果可知,双层衍射光学元件的第1个环带周期宽度大于8 mm,最小环带周期宽度大于2 mm,环带的周期宽度较大,便于实际加工。考虑公差之后的MTF仍满足要求,

双层衍射光学元件具有工艺可行性。

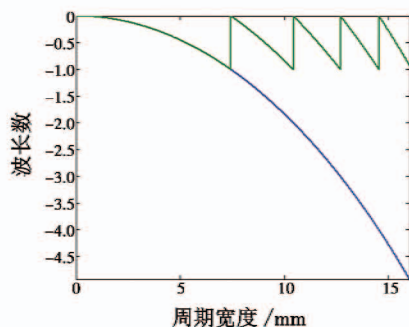


图 7 工艺软件分析图

Fig. 7 The processing analysis of DOE

加入公差后的光学系统 MTF 对比如表 3 所示,采用 Code V 默认公差分析,对比结果表明,加入公差后 MTF 值仍满足设计要求,公差的大小适度,符合加工和装配条件。

表 3 考虑公差之后的光学系统 MTF

Table 3 The MTF of optical system

MTF		轴上点		0.8 视场	
		设计值	加公差	设计值	加公差
20 °C	中波	0.811	0.798	0.733	0.713
	长波	0.659	0.644	0.628	0.603
-55 °C	中波	0.685	0.627	0.688	0.631
	长波	0.561	0.511	0.603	0.550
70 °C	中波	0.685	0.615	0.715	0.615
	长波	0.601	0.516	0.626	0.532

4 结论

双层衍射光学元件克服了单层衍射光学元件随偏离设计波长而衍射效率下降的问题,利用双层衍射光学元件有利于校正光学系统的色差。本文研究了双层

衍射光学元件的设计方法,并设计了一种红外双波段折/衍射混合光学系统,成像质量良好。双层衍射光学元件的平均衍射效率大于 98.5%,因此衍射效率对 MTF 的影响很小,设计和实际传递函数之间的误差可以忽略,在 -55 ~ +70 °C 温度范围内,传递函数值均大于 0.5。

参考文献

- [1] 潘枝峰,刘莎,张鹏. 红外双波段/双视场望远系统设计[J]. 电光与控制,2014,21(9):71-75.
- [2] 刘环宇,张良,刘玉,等. 红外双波段衍射光学系统设计[J]. 电光与控制,2011,18(5):50-53.
- [3] PETROVSKY G T. Fundamental of IR optics and optical industry[C]//SPIE,2001,4369:43-49.
- [4] 董辉,崔庆丰,冷家开. 多层衍射光学元件成像特性的研究[J]. 光子学报,2009,38(3):694-698.
- [5] 裴雪丹,崔庆丰,冷家开. 多层衍射光学元件设计原理与衍射效率的研究[J]. 光子学报,2009,38(5):1126-1131.
- [6] 杨亮亮. 多层衍射光学元件衍射效率的研究[D]. 长春:长春理工大学,2013:28-29.
- [7] 孙婷. 红外宽波段双层衍射光学系统的设计[J]. 红外与激光工程,2013,42(4):951-954.
- [8] 刘瑞奇,陈星明,赵家琪. 衍射光学元件在红外成像光学系统中的应用[J]. 红外技术,2009,31(6):327-330.
- [9] 范长江. 红外双波段双层衍射光学系统设计[J]. 光学学报,2007,27(7):1266-1270.
- [10] 罗金平,王合龙,刘欣,等. 二次成像光学被动无热化设计[J]. 电光与控制,2012,19(4):85-88.
- [9] KRUG M, SAAT S, NGUANG S K. Robust H_{∞} static output feedback controller design for parameter dependent polynomial systems; an iterative sums of squares approach [J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 350: 318-330.
- [10] TAVAKOLPOUR A R, MATDARUS I Z, TOKHI O, et al. Genetic algorithm-based identification of transfer function parameters for a rectangular flexible plate system [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(8):1388-1397.
- [11] 贺磊,孙秀霞,李晓东,等. 基于遗传算法的输出反馈动态面优化控制[J]. 控制工程,2013,20(5):948-952.

(上接第 58 页)

- [5] FU R, ZHOU Y R, ZENG J P. Disturbance-observer-based nonlinear stabilization control of flexible spacecraft attitude system [C]//Proceedings of the 34th Chinese Control Conference, 2015:1212-1216.
- [6] 何朕,孟范伟,王广雄,等. 卫星大角度姿态机动控制的 SOS 设计[J]. 中国空间科学技术,2013,33(5):69-75.
- [7] 何朕,王广雄,孟范伟. 非线性 H_{∞} 控制的 SOS 设计 [J]. 电机与控制学报,2015,19(1):82-88.
- [8] 马清亮,邓会选,吕康文,等. 基于平方和优化的多项式模糊系统 H_{∞} 控制[J]. 电光与控制,2014,21(10):80-84.