

双波段红外光学系统无热化设计

张卓¹, 蔡猛²

(1. 海军装备部飞机办, 北京 100841; 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)

摘要: 针对制冷型 320×256 双色焦平面阵列探测器, 设计了一套双波段红外光学系统, 用于机载光电探测设备。光学系统采用锗、硒化锌和硫化锌组合实现了无热化设计; 通过引入非球面和谐衍射元件, 很好地校正了系统的色差和轴外像差, 简化了系统结构。光学系统仅由6片镜子构成, 工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ / $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 波段, F数为2, 满足100%冷光阑效率。像质评价结果表明, 光学系统在 $-60 \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$ 全温度范围内, 双波段成像质量良好。

关键词: 光学设计; 红外光学; 双波段; 连续变焦

中图分类号: V271.4; TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)05-0063-05

Athermalization Design of Dual-Wavelength Infrared Optical System

ZHANG Zhuo¹, CAI Meng²

(1. Aircrafts Office of NED, Beijing 100841, China;

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

Abstract: A set of dual-wavelength infrared optical system was designed for airborne photoelectric detection equipment, based on dual-wavelength 320×256 element cooled thermal IR focal plane arrays (FPA) detector. The system adopts the combination of three kinds of material of Ge, ZnSe and ZnS to achieve athermalization design. By introducing harmonic diffractive surface and aspheric surface, the chromatic aberration and the off-axis aberration are well corrected, and the system structure is simplified. The system, working in the wave band of $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ / $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ and with the F/number of 2, is consisted of 6 elements, and has 100% cold shield efficiency. The image quality evaluating results show that: the performance of the dual-wavelength infrared optical system is very well in at temperature from $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ to $+70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Key words: optical design; infrared optics; dual-wavelength; continuous zooming

0 引言

普朗克辐射定律分析表明, 接近环境温度的物体在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外波段时辐射较强, 其探测信息主要反映地物的发射率及温度; 而温度较高的物体, 例如目标的发动机或尾焰部分, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 红外波段时红外辐射较强^[1]。长波红外在复杂背景辐射或强辐射源存在的情况下具有较好的探测能力, 缺点是在高湿度地区衰减较大、探测困难, 此时中波红外探测优势明显, 但同样也存在光谱辐射度较低的问题。双波段红外成像系统利用目标在中、长波红外两个波段的辐射特性进行融合探测, 提高了武器装备的作战效能, 在隐身与反

隐身、真伪识别、光谱分析、信息融合等多个方面起到了重要的作用^[2]。

用于机载的红外光学系统的升空范围约为 $0 \sim 20 \text{ km}$, 随着升空范围的变化, 外部环境温度也会发生剧烈的变化。受外部温度环境及内部发热元件等因素的影响, 机载红外光学系统环境温度的典型变化温度范围约为 $-55 \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$, 这将使光学系统产生很大的热离焦, 从而影响系统的成像质量^[3]。为了消除温度变化对光学系统的影响, 需要采用无热化设计, 目前常用的无热化方式主要有主动式温补调焦, 被动式光学无热化设计和被动式机械无热化设计3类。其中, 被动式光学无热化设计具有可靠性高、结构简单、体积紧凑的优点^[3-4]。

传统的设计方法对于宽波段透射式光学系统必须依靠具有大色散的负透镜来消除色差, 但由于用于中、长波红外双波段的透射元件材料种类较少, 因此这样的系

收稿日期: 2014-07-08

修回日期: 2015-01-26

作者简介: 张卓(1980—), 女, 陕西咸阳市人, 学士, 研究方向为航空装备研制。

镜往往透镜数目多、体积大、透过率较低。谐衍射元件可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度,具有特殊的负色散、负热差效应和良好的复消色差特性。谐衍射元件的热常数与折射元件相比较小,消热差效果较差,但由于其负色散的性质且性质与基底材料无关,因此大大减小了系统同时校正色差和热差的难度^[1,5-7]。文献[1]针对一次成像系统设计了基于谐衍射光学元件(Harmonic Diffractive Optical Element, HDE)的 MWIR/LWIR 双波段成像光谱系统,二次成像系统相比于一次成像系统,优点是满足冷光阑效率 100% 的同时使得光学系统的第一块透镜尺寸最小。本文通过引入谐衍射元件及采用光学被动无热化设计方法,设计了一套双波段红外光学系统,该光学系统采用二次成像光学构型,在 3.7~4.8 μm 和 7.7~9.5 μm 波段工作,在 -60~+70 °C 全温度范围内,双波段成像质量良好,光学系统具有轻量化、小型化、高分辨率的特点。

1 设计要求

光学系统采用 320 × 256 制冷型中长波双色红外探测器,像元大小 30 μm。系统的设计要求见表 1。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

参数	值
焦距/mm	200
Γ 数	2
波段/μm	3.7~4.8/7.7~9.5
视场/(°)	3.4
探测器像素数	320 × 256
像元尺寸/mm	0.030
无热化设计温度范围/°C	-60~+70

2 设计思想

2.1 光学构型

为满足冷光阑效率 100% 的同时光学系统的第一块透镜尺寸最小,光学系统采用二次成像光学构型,前组物镜主要用来消除系统的初级像差并承担主要的光焦度,后组为放大倍率约为 1 的中继成像镜组,主要用来消除高级像差和实现前后光瞳之间的衔接。光学系统如图 1 所示。

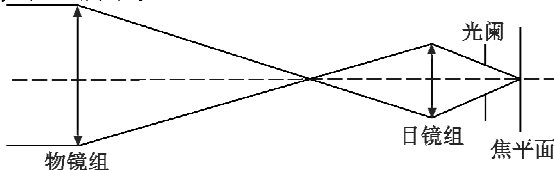


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Sketch map of the optical system

2.2 消热差设计

采用被动式光学无热化技术实现消热差设计,该技术是利用不同光学元件材料之间不同的色差与热差特性,通过合理分配不同光学元件的光学材料、光焦度与间隔,使得系统在要求的范围内,其热离焦满足要求^[3]。

空气中由 j 个薄透镜组成的系统采用被动式光学无热化技术消热差无热化应满足

$$\begin{cases} \phi = \frac{1}{f} = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i \\ \omega = \frac{1}{h_1^2 \phi} \sum_{i=1}^k h_i^2 \omega_i \phi_i = 0 \\ \theta = \frac{1}{h_1^2 \phi} \sum_{i=1}^k h_i^2 \theta_i \phi_i = -\alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: h_i 为近轴边缘光线在第 i 个透镜上的入射高度; α 为镜筒结构件的热膨胀系数; ω 和 θ 分别为色散系数和热差系数^[3-4]。

为消除色差,利用不同值材料,为消除热差,需要不同的值。通过合理的组合,就可以实现消色差和消热差设计。本文采用锗、硒化锌和硫化锌 3 种材料组合搭配实现了无热化设计。

2.3 谐衍射元件设计

传统的设计方法对于宽波段透射式光学系统,常利用色散系数相差较大的两种材料制成正、负透镜的组合方式来消色差。由于加入了负透镜使得系统单块透镜光焦度绝对值大,单色像差校正困难,特别是用于中长波红外双波段的透射元件材料种类较少,使得消色差更困难。衍射面具有很大的负色差特性,可以在正光焦度光学元件表面刻蚀衍射面方便地实现消色差,这样系统的单色像差校正也很容易。衍射元件仅在中心波长处衍射效率为 100%,随着偏离中心波长衍射效率会逐步下降,为了使得在中、长波红外波段上均有较高的衍射效率,采用谐衍射光学元件。

在设计谐衍射光学元件时,通常取相邻环带间的位相差为设计波长 λ_0 的整数倍,即相邻环带间的光程差为 $p\lambda_0$, p 为大于 1 的整数。

谐衍射元件的焦距可表示为

$$f(\lambda) = p\lambda_0 / m\lambda \cdot f_0 \quad (2)$$

式中:当 λ 为 λ_0 的 p/m 倍时, λ 与 λ_0 的焦点在同一位置; p 代表最大位相调制 (2π) 的整数倍; m 取一系列整数,将对应一组分立的波长,在这些波长处衍射效率均为 100%。对于整个波段上的衍射效率为

$$\eta(\lambda) = \text{sinc}^2(m - d_H/\lambda \cdot [n(\lambda) - 1]) \quad (3)$$

红外光学系统设计波段为 3.7~4.8 μm 和 7.7~9.5 μm,为了实现最大的衍射效率,相位调制因子 $p = 2$,谐衍射元件设计波长取 4.25 μm,衍射级 $m = 2$,对应长波红外波段的谐衍射波长为 8.5 μm,对应的衍射

级 $m=1$, 经计算整个波段上的衍射效率如图2所示, 3.7~4.8 μm 波段的平均衍射效率为92.6%, 7.7~9.5 μm 波段的平均衍射效率为98.6%。

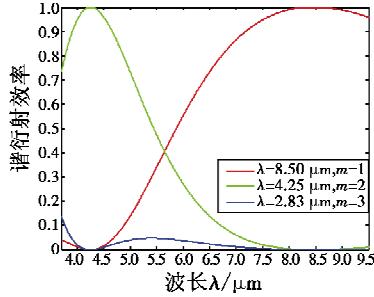


图2 衍射元件衍射效率分布

Fig.2 Diffraction efficiency distribution of the diffractive element

轴对称衍射光学元件的位相分布表达式为

$$\phi(r) = 2\pi(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots) \quad (4)$$

式中: A_1, A_2, A_3, \dots , 为衍射元件的位相系数; r 为径向坐标。在衍射光学元件的位相表达式中, A_1 可用于校正光学系统的色差, A_2 可以用来校正光学系统的三级单色像差, A_3, \dots , 能够用来校正光学系统的高级像差。本文采用 A_1, A_2, A_3 优化, 用于校正光学系统的色差, 最终优化后的衍射元件位相分布如图3所示。

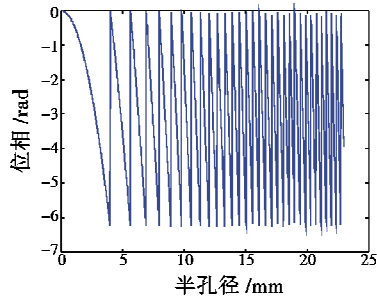


图3 衍射元件位相分布

Fig.3 Phase distribution of the diffractive element

3 设计实例

3.1 优化设计

最终优化得到的光学系统结构如图4所示。通过在镜筒壁上加工合适高度、形状和间隔的螺纹, 在一次

像点处加入孔径光阑, 以抑制杂散辐射; 引入非球面和衍射面减少镜子数目, 降低系统复杂性, 提高系统透过率。非球面分别在第2元件的前表面、第3元件的后表面、第4元件的前表面和第6元件的前表面; 衍射面在第4元件的后表面, 元件材料为锗。镜筒结构采用铝, 热膨胀系数为 23.6×10^{-6} 。光学系统总长小于400 mm, 具体设计参数如表2所示。

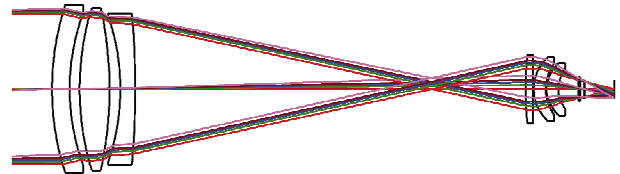


图4 光学结构图

Fig.4 Optical system layout

表2 光学系统参数

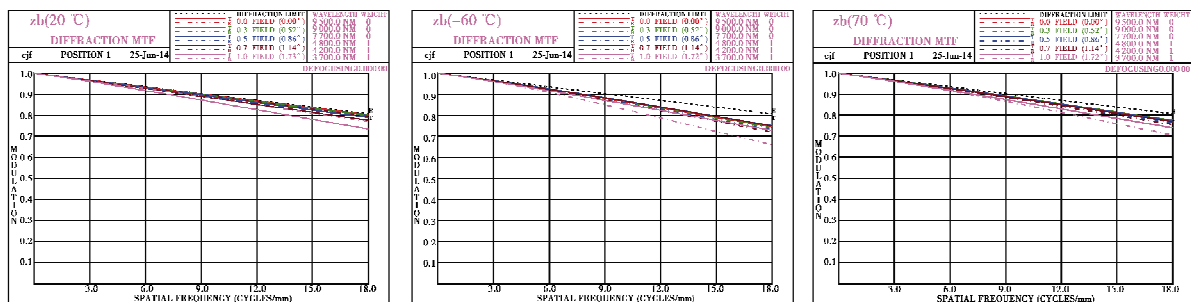
Table 2 Parameters of optical system

面序号	面型	半径/mm	玻璃	口径/mm
1	球面	180.60	锗	107
2	球面	146.30		102
3	非球面	182.02	硒化锌	104
4	球面	-256.36	硫化锌	103
5	球面	-151.24		97
6	非球面	-704.32	锗	96
7	非球面	209.92		45
8	衍射面	无限	硒化锌	44.5
9	非球面	29.00		41
10	非球面	29.76	硫化锌	35
11	球面	20.22		32
12	球面	17.67	24	

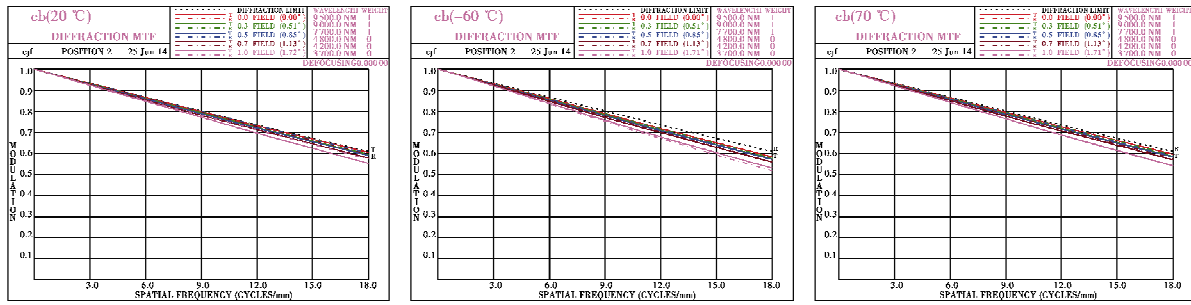
3.2 设计结果

双波段红外光学系统在不同温度下的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 如图5所示。全温度范围内 ($-60 \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$), 中波和长波时光学系统边缘视场的 MTF 在 18 lp/mm 处, 均在 0.5 以上, 满足系统性能要求。

系统色差分析如图6所示, 系统色差得到了很好的校正, 中波初级色差最大值为 $0.98 \mu\text{m}$, 二级光谱最大值为 $3.94 \mu\text{m}$; 长波初级色差最大值为 $0.37 \mu\text{m}$, 二级光谱最大值为 $2.92 \mu\text{m}$ 。



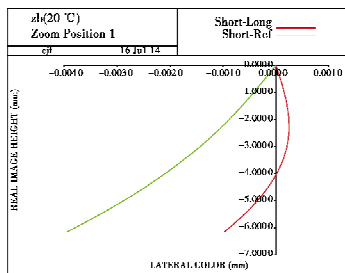
a 温度分别为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $-60 \text{ }^\circ\text{C}$, $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的中波系统



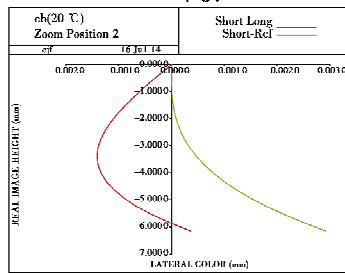
b 温度分别为 20 °C, -60 °C, 70 °C 时的长波系统

图 5 系统 MTF 图

Fig. 5 MTF curves of the system



a 中波



b 长波

图 6 光学系统色差图

Fig. 6 Lateral color of the optical system

系统畸变如图 7 所示,中波最大畸变小于 2.3%,长波最大畸变小于 2.4%,满足光学视场拼接的需求。

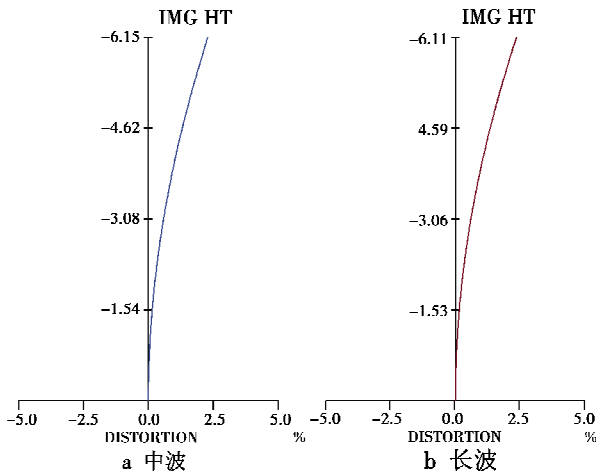


图 7 光学系统畸变图

Fig. 7 Distortion of the optical system

采用制冷型探测器的红外光学系统必须考虑冷反

射的问题。本文对冷反射的处理方法为设计过程中采用逆向光线追迹评估每个面的冷反射程度,控制冷反射的表面上入射光线的近轴光线高度 Y 和入射角度 I、尽量使得近轴光线高度、折射率、入射角度之积 (YNI) 绝对值大于 1 或近轴边缘光线入射角与主光线入射角之比 (I/IBAR) 大于 1,此时系统的冷反射就可以接受。最终光学系统的逆向光线追迹结果如图 8 所示。

```
CODE V > ver n
Sur 2 * height cir VUX VLX VUY VLY Distance
1 12.00 10.85 0.94 0.94 0.94 0.94 16.50
2 12.00 10.88 0.96 0.96 0.96 0.96 16.89
3 12.00 10.86 0.96 0.96 0.96 0.96 16.74
4 12.00 10.89 0.97 0.97 0.97 0.97 17.87
5 12.00 10.91 0.98 0.98 0.98 0.98 17.72
6 12.00 11.11 0.93 0.93 0.93 0.93 18.55
7 12.00 11.96 0.82 0.82 0.82 0.82 31.31
8 12.00 7.55 0.30 0.30 0.30 0.30 42.19
9 12.00 12.12 0.90 0.90 0.90 0.90 34.61
10 12.00 12.20 0.80 0.80 0.80 0.80 29.03
11 12.00 12.23 0.88 0.88 0.88 0.88 32.03
12 12.00 12.31 0.69 0.69 0.69 0.69 24.24
CODE V > ver n
```

图 8 逆向光线追迹冷反射分析数据

Fig. 8 The data of narcissus analysis with inverse raytracing

由图 8 数据可知,第 8 面冷反射在探测器上所成光斑最小,其冷反射程度最为严重,光线追迹如图 9 所示,其最终聚焦的像点在像面约 42 mm 处且反射的光线中约有 30% 被拦掉,经计算,该面的冷反射信噪比小于 1,不会对系统造成严重的影响。

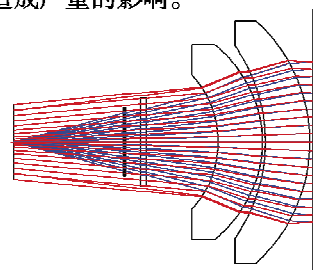


图 9 面 8 的逆向光线追迹冷反射分析

Fig. 9 Narcissus analysis on surface 8 with inverse raytracing

4 结论

谐衍射元件不但具备衍射元件的负色散特性优点,还克服了衍射元件在宽波段平均衍射效率低的缺点。利用谐衍射元件与非球面,仅采用6个透镜设计了一套机载红外双波段的光学系统,该系统工作在 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 和 $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$ 波段,工作温度范围 $-60\sim +70\ ^\circ\text{C}$,光学系统成像质量良好、结构紧凑。通过引入非球面和谐衍射元件,大大简化了传统双波段红外光学系统设计的复杂性,在提高系统透过率、简化结构、小型化、轻量化、无热化方面具有很大的优势,其将在红外宽波段光学系统设计中得到广泛应用。

参考文献

- [1] 刘英. 基于 HDE 的 MWIR/LWIR 双波段成像光谱系统的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2010. (LIU Y. Study on MWIR/LWIR dual-band staring hyper spectral imaging system based on HDE[D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010.)
- [2] 张兴德, 李荣刚, 刘琳, 等. 红外双波段成像系统的研究与发展[J]. 激光与红外, 2010, 40(8): 801-804. (ZHANG X D, LI R G, LIU L, et al. Research and development of dual-band infrared camera system [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(8): 801-804.)
- [3] 陈建发, 王合龙, 刘欣. 中波红外光学系统光学被动无热化设计[J]. 电光与控制, 2013, 20(12): 88-91. (CHEN J F, WANG H L, LIU X. Passive optical athermalization design of middle-wavelength infrared optical system[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(12): 88-91.)
- [4] RAYCES J L, LEBICH L. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials [C]// Proceedings of SPIE, Intl Lens Design Conference, 1990, 1354: 752-759.
- [5] 沈良吉, 冯卓祥. $3.7\ \mu\text{m}\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段折/衍混合红外光学系统的无热化设计[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 683-687. (SHEN L J, FENG Z X. Athermal design of refractive/diffractive hybrid infrared optical system working at $3.7\ \mu\text{m}\sim 4.8\ \mu\text{m}$ [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(4): 683-687.)
- [6] BURALLI D A, MORRIS G M. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses [J]. Optica Applicata, 1992, 31(22): 4389-4396.
- [7] 娄迪. 谐衍射光学设计理论和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (LOU D. Application and research of harmonic diffractive optical [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.)
- (上接第 57 页)
- Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Canada, 2005: 216-221.
- [7] 张邦楚, 王少锋, 韩子鹏, 等. 飞航导弹分数阶 PID 控制及其数字实现[J]. 宇航学报, 2005, 26(5): 652-656. (ZHANG B C, WANG S F, HAN Z P, et al. Using fractional-order PID controller for control of aerodynamic missile [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(5): 652-656.)
- [8] 齐乃明, 秦昌茂, 宋志国. 导弹鲁棒分数阶 PID 自动驾驶仪设计[J]. 控制工程, 2011, 18(5): 715-718. (QI N M, QIN C M, SONG Z G. Robust fractional PID missile autopilot design [J]. Control Engineering of China, 2011, 18(5): 715-718.)
- [9] 史金光, 王中原, 常思江, 等. 制导火箭分数阶控制系统[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 52-56. (SHI J G, WANG Z Y, CHANG S J, et al. Fractional-order control systems for guided projectiles [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 35(1): 52-56.)
- [10] 王海涛, 董新民, 王建刚. 分数阶控制理论及其在飞机俯仰控制中的应用[J]. 飞行力学, 2011, 29(5): 44-48. (WANG H T, DONG X M, WANG J G. Fractional order control theory and its applications in aircraft longitudinal control [J]. Flight Dynamics, 2011, 29(5): 44-48.)
- [11] 徐俊, 曹军义, 曹秉刚, 等. 空空导弹分数阶三回路自动驾驶仪的分析与参数优化[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(12): 33-38. (XU J, CAO J Y, CAO B G, et al. Fractional three-loop autopilot of air-to-air missile with parameter optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(12): 33-38.)
- [12] 赵艳辉, 刘忠, 李海峰. 气动力/直接力复合控制导弹的线性二次型最优控制设计[J]. 航空兵器, 2011(6): 41-46. (ZHAO Y H, LIU Z, LI H F. Linear quadratic optimal control solution for dual-controlled missile with tails and reaction jets [J]. Aero Weaponry, 2011(6): 41-46.)
- [13] MRACEK C P, RIDGELY D B. Missile longitude autopilots; Comparison for multiple three loop topologies [C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, San Francisco, 2005, AIAA-2005-6380.
- [14] 曹军义, 曹秉刚. 分数阶控制器离散方法的评估策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 842-846. (CAO J Y, CAO B G. Evaluation strategies of fractional order controllers' discretization methods [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(7): 842-846.)