

光电稳定平台的 MDO 总体设计

曾钦勇^{1,2}, 秦开宇¹, 邓 键², 尹彦东², 王 茜²

(1. 电子科技大学 航空航天学院, 四川 成都 611731; 2. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 针对小窗口大扫描角要求的光电成像导引头, 在总体设计时按照多学科协同设计与优化 (Multidisciplinary Design Optimization, MDO) 的设计原则, 通过并行的子空间多方案快速概念设计及排列组合优化, 转化为工程设计的约束条件, 进而指导分配光机系统和伺服稳定系统的设计权重, 并在电子样机上对设计方案进行综合性能动态评估和迭代优化, 最终确定了基于陀螺稳定反射镜物方扫描的方案, 实现了设计指标: 扫描范围 $-20^{\circ}\sim 10^{\circ}$ (俯仰)/ $\pm 15^{\circ}$ (方位), 窗口面积不超过通光孔径的 2 倍, 且具有高精度和高动态的稳像能力。挂飞试验获得的图像与地面静态图像一致, 证明了基于 MDO 对光电稳定平台快速开发的有效性和优越性。

关键词: 光电稳定平台; 总体设计; 多学科集成设计与优化; 光学设计

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0918003

Overall design of electro-optical stabilization platform based on MDO

Zeng Qinyong^{1,2}, Qin Kaiyu¹, Deng Jian², Yin Yandong², Wang Qian²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The special requirements of an Electro-Optical (EO) image seeker for large scanning angle of small window, and the Multidisciplinary Design Optimization (MDO) design method was used in the overall design to get the optimum solution. The subspace parallel design with multi-scheme rapid conceptual design was carried out, and through the permutation, combination, and optimization, these schemes could be transferred to the constraints of engineering design, and distributed the design weight of opto-mechanical structure and servo stabilization system. Then the design schemes were dynamically assessed and iteration optimized, and got the final scheme of gyro stabilized mirror objective space scanning: the scanning range is $-20^{\circ}\sim 10^{\circ}$ (pitch)/ $\pm 15^{\circ}$ (azimuth), the window area is no more than 2 times of the entrance pupil aperture, and satisfied the dimensional requirements and the image stabilization ability with high-precision and high dynamic range. The image obtained by flying test is almost the same as the ground static test image, and proves that MDO has the effect and superiority of rapid development of the EO stabilized platform.

Key words: EO stabilization platform; overall design; MDO; optical design

收稿日期: 2018-04-11; 修订日期: 2018-05-18

作者简介: 曾钦勇(1970-), 男, 研究员, 博士生, 主要从事光电成像与稳定平台系统方面的研究。Email: zengqy209@163.com

导师简介: 秦开宇(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间信息与控制工程方面的研究。Email: kyqin@uestu.edu.cn

0 引言

传统的光电成像导引头^[1]通常置于制导弹药头部视野最开阔的位置,基本组成包括:球罩、光电成像系统、框架式伺服稳定平台、信息处理器和综合控制器,以及二次电源、接口和机械结构等。其中,光电成像系统置于框架式伺服稳定平台上以隔离振动,保证稳定成像;伺服稳定平台一般为俯仰/方位两轴两框架平台,旋转中心为球罩的曲率中心(即便为共形头罩,经补偿器后亦可等效为球罩)。

这种布局对于高速飞行有较大局限性,例如在 $4\text{ Ma}@10\text{ km}$ 高度时,位于导弹顶部的气动驻点温度可达到 $1\ 000\text{ K}$ ^[2-3],常用的中波/长波红外成像系统均无法正常工作;除此之外,还要考球罩材料的抗热冲击品质因子、抗气动力冲击的力学性能,以及球罩变形对成像质量的影响。加制冷系统的侧窗是一种解决途径,例如美国“萨德”导弹的中波红外成像导引头,即是在弹头锥斜面采用了蓝宝石侧窗,在发射和低空飞行阶段有绝热整流保护罩,在 20 km 以上高空抛罩工作。

侧窗布局可以避免气动热的温度驻点和气动压力驻点,而超高空的稀薄空气也降低了气动热效应影响,再通过窗口的主动制冷,能够保证“萨德”在临近空间以 6 Ma 的高速机动飞行。但这种布局至少带来两个不利影响:侧窗需要与锥面尽量平齐,内部成像系统视线受到影响;窗口轴向和径向的热梯度对热成像非均匀性造成影响^[4-6]。

如何在较小的窗口下实现大框架角,同时还需要保证导引头内的光电成像系统足够简单可靠(毕竟导弹是消耗品而非奢侈品),是总体设计时必须面对的难题。

文中基于一个工程项目,通过多学科协同设计与优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)的设计理念,在多方案择优的概念设计基础上选择了合适的技术途径,实现了简单构型小窗口大框架扫描角的技术要求。

1 光电稳定平台的 MDO

MDO 通过充分利用复杂系统各学科或子系统之间的相互作用产生的协同效应获得系统的整体最

优解,通过并行设计缩短设计周期^[7-9]。但对于光电成像制导,涉及到光、机、电、伺服平台控制等多个专业,而这些专业相互独立,难以在统一的尺度下量化定义设计权重和参数。一般而言,其设计流程主要根据从业经验,采用模块化设计方式将系统分成平台和光电载荷两大部分,或由平台约束光电载荷,或由光电载荷提出对平台的要求,首先确定采用何种组成构架和设计路线(即需要多少子空间,以及子空间如何组合形成产品),然后采用串行或并行的开发模式。串行的开发模式如图 1 所示。

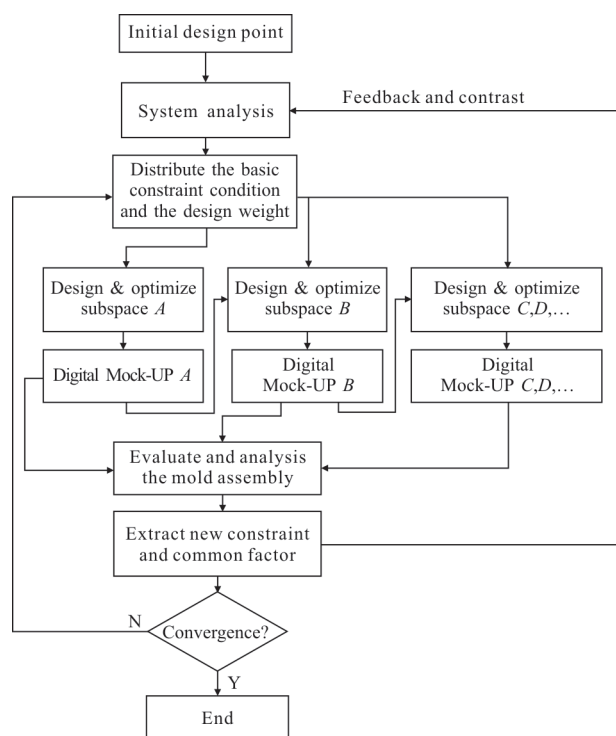


图 1 传统光电稳定系统的串行设计流程图

Fig.1 Serial design flow chart of traditional EO stabilization system

图 1 中,在事先确定好组成构架的前提下,总师组需要根据总体输入和经验提取共要素的设计约束,再确定主从关系,并由此分配设计权重,选择主从子空间,再通过串行的设计方法先解决主要矛盾,然后逐次对子空间进行优化。例如,在以光机探测性能为主要矛盾的系统,先设计的子空间 A 为光机系统,则子空间 B 为伺服稳定系统,之后为图像处理、跟踪、综合控制等其他子空间。在系统分析阶段,总师组根据输入条件,首先对 A 提出设计约束,除了光学性能,还需要考虑 B 对质量、质心、惯量、体积、布局等要素的初步要求;之后对 B 提出设计约束,需

重点考虑 A 可能给予的设计资源;之后是 C、D 等子空间。完成 A 的电子样机后, B 获得 A 提供的确切设计资源, 以此为另一个约束进行优化设计; 然后是 C、D 等其他子空间。完成各子空间的电子样机后可进行模装评估, 回应总师组在系统分析时提出的约束条件; 总师组也可根据设计结果提出新的约束, 迭代形成针对各子空间的最小公约数(共要素提取)作为每个设计子空间都必须遵守的准则, 并判断是否收敛; 或完成总体设计; 或在完成 A 却无法按要求完成 B(或 C、D)时也坚持完成电子样机, 并完成模装评估, 获得新的约束, 让总师组重新定义共要素约束条件, 再次进入各自子空间进行设计优化, 如此迭代, 直至满足使用要求。

这种串行的设计流程属于大闭环系统, 反射弧较长且较迟钝, 因此要求总师组对每个子空间的设计约束均有足够准确的判断, 尽量减少循环迭代的次数, 否则难以控制研制进度。

当总师组经验较为丰富、或系统构成相对简单、或各子空间相对独立时, 图 1 的优化设计流程可进化为子空间自主式优化, 从子空间的串行优化变为并行优化, 其设计流程如图 2 所示。

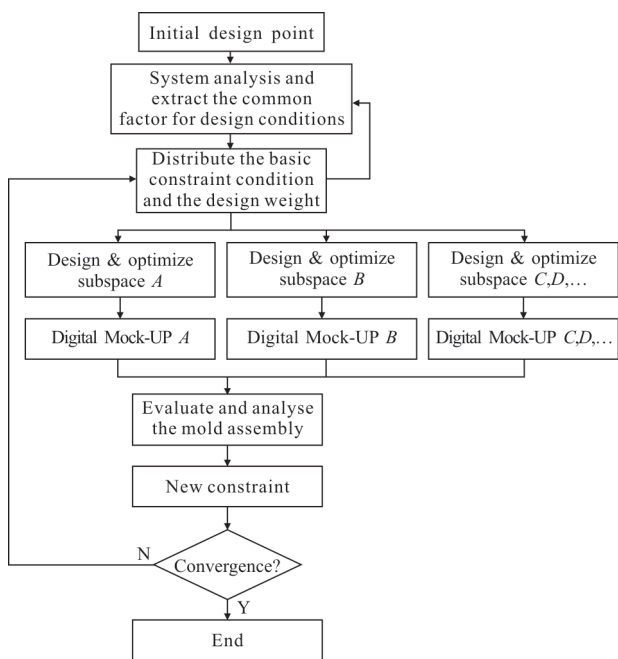


图 2 子空间自主式优化流程图

Fig.2 Flow chart of sub-space self optimizing design

图 2 中, 为了降低反射弧的反应时间, 对图 1 的流程进行了调整: 在对独立子空间进行基本约束条件

设定和设计权重分配时尽量提取全系统的共要素, 然后按照子空间并行设计和优化的方式进行设计。

显然, 并行优化效率更高, 但要求总师组下达的共要素约束条件和子空间基本约束条件更加精确, 否则会顾此失彼。比如: 对主要矛盾的子空间 A 和 B 更严格的要求可能导致次要矛盾的子空间 C 或 D 难以实现, 进而演变为主要矛盾。因此这种开发模式一般用于相对熟悉和简单的系统开发。

但还有另外一种情况, 即面临全新或非传统的设计任务, 总师组无法确定采用何种技术路线, 也无法确定哪个子空间的权重更高, 可采取一种发散再收敛的方法让各自子空间先进行并行设计和优化, 以确定最优方案, 减小主从矛盾转换的概率。此时, 每个子空间可扩展进行多方案择优, 即按照一定的约束让各子空间优化出多种设计, 供总师组进行选择 and 排列组合, 进而选择最合适的组合方案, 并实时调整设计权重, 可称为一种变形的二级集成系统综合法^[9], 基本流程如图 3 所示。

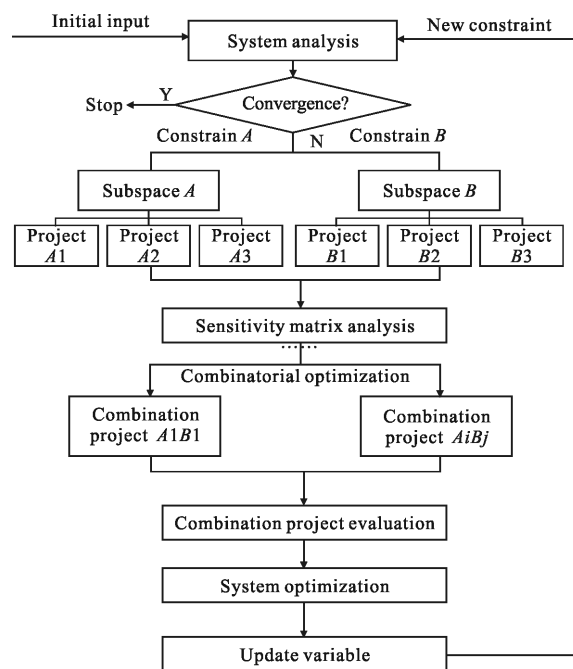


图 3 基于二级集成系统综合法的 MDO 流程图

Fig.3 MDO flow chart based on two stage integration method

该方法将所需开发产品分为系统级优化和几个自主的、可并行的子空间优化, 而每个子空间分别提出各种满足使用要求的方案, 通过灵敏度矩阵分析选择出最合适的排列组合, 然后对组合方案进行对

比评测, 此时的组合方案可按图 1 或图 2 的优化方式进行优化、电子样机模装, 之后对优选方案在系统级进一步优化, 直至完成设计。这种 MDO 的优化方法每一次迭代都有两次优化来改进设计: (1) 在固定共享的设计变量前提下, 各子空间满足约束条件的各方案进行局部设计变量优化; (2) 在完成多方案择优后系统级对共享设计变量进行的优化。

一般只需经过图 3 所示的一个设计流程即可找到最优解, 同时可较为精确地确定共要素约束条件和各子空间基本的设计约束条件, 并且可获得较为精确的设计结果。

这种 MDO 的优化方法更适用于探索性的全新产品, 需要总师组有足够广的知识面、足够深的分体(子空间各方案)设计水平, 以及知识工程支持的设计方案数据库。

2 基于多方案择优的 MDO 设计举例

小窗口大扫描范围的输入要求有别于传统球罩和框架平台式光电导引头。从需求看, 应将回转中心尽量靠近窗口, 当回转中心在窗口上时窗口面积最小。从共要素的角度而言, 光机布局和结构是制约方案选择的关键, 但不确定由此给伺服控制系统附加多少难度, 因此难以确定光机和伺服控制系统的设计权重孰重孰轻。此时可采用图 3 的开发流程, 先让光机和伺服控制两个子空间进行发散设计: 光机系统有多种截然不同的结构形式, 包括像方平行光扫描、像方汇聚光扫描、显微成像扫描、像旋扫描、物方扫描等; 对应的伺服稳定平台包括稳反系统、后驱圆弧运动扫描系统、步进旋转系统等。总师组在初始设计时对光学设计师系统和伺服控制设计师系统同时下达了各自的设计要求, 并行设计: 当光机系统提出新概念后伺服控制系统进行评估, 同时从知识工程库里调用各种伺服控制方案, 交由光机系统进行评估。这种基于快速概念设计的多方案择优(如图 3 所示)可通过排除法获得最优解。

中国专利 CN102506612A 为哈尔滨工业大学申请的基于平行光路的像方扫描系统方案, 如图 4 所示: 通过前置望远系统(2)将入瞳置于窗口(1)上; 入射光通过前置望远系统(2)后形成准平行光, 其出瞳位置(8)有一块陀螺稳定(4)的二维扫描反射镜(3)进行扫描; 然后进入后置二次成像光学系统(5), 并在探测器(6)上成像。

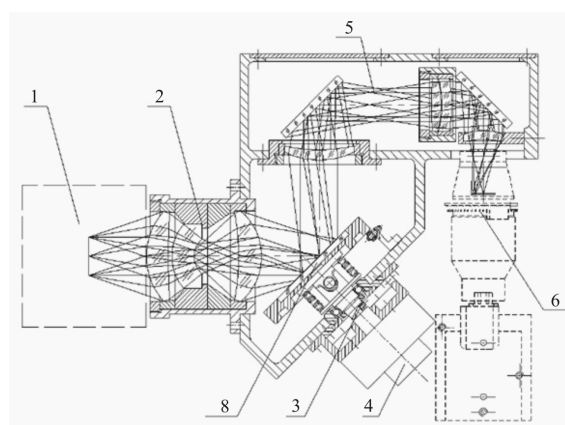


图 4 像方平行光扫描方案

Fig.4 Image scanning scheme based on parallel beam

该方案的结构紧凑, 所需窗口尺寸最小, 但存在以下几个问题:

(1) 入瞳置于窗口上, 无法设置消杂光阑, 杂散光现象较为严重;

(2) 前置望远系统会产生附加像差, 尤其是在大角度时, 不可避免有较大畸变, 在系统扫描时会带来失真, 需要通过标定予以解决;

(3) 稳定反射镜扫描机构置于光路中, 其反射光路上加上前置望远系统的放大倍率, 无法用陀螺直接驱动稳定, 必须采取 $N/2$ 机构(N 为前置望远系统的放大倍率, 可以为数字机构, 也可以为机械结构), 而 N 是视场的函数, 也需要标定;

(4) 镜片太多, 透过率、冷发射、装配误差等因素均会对像质产生影响;

(5) 系统装配复杂, 造价高, 有违于消费品的初衷。类似的, 还有基于汇聚光路的像方扫描系统, 如图 5 所示。该系统为三次成像系统, 在前置的大视场二次成像系统出瞳处放置二维稳定反射镜进行扫描; 系统的入瞳位于第一片透镜附近, 可保证具有较小的光学窗口; 伺服稳定系统的控制方案与图 4 类似, 但口径较小; 光机结构没有运动部件, 可保证结构相对紧凑; 因为汇聚光束的光焦度影响, 该设计对装调的精度要求较高; 该系统光学镜片达到 13 片, 不利于透过率、冷反射的控制; 前置大视场二次成像系统的畸变甚至比图 4 的方案更大。

从光机结构和伺服控制的设计难度而言, 以上方案均可利用现有成熟技术, 工程性可以得到保证, 其中图 4 方案优于图 5 方案, 可满足总体设计的要

求,但为此要付出像质、定标、装配等代价,可以认为:图 4 的方案优点明显,缺点也很突出,但不失为一种可能实现工程化的选择。

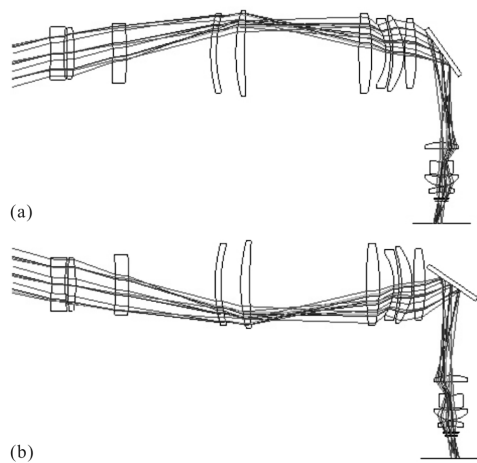


图 5 基于汇聚光路的像方扫描方案

Fig.5 Image scanning scheme based on convergent beam

图 6 为基于显微成像^[10]的像方扫描系统,其原理是通过控制二次成像系统的中间像面,使之成为一个圆弧;中继透镜组的运动轨迹为该圆弧,旋转中心在第一片透镜附近,实质上是对一次像面的圆弧实像面再次成像。这个设计也能保证具有较小的窗口,且从光学设计角度看该方案较为简单,仅有九片透镜;但不可避免大视场的畸变较为严重;伺服稳定系统需要带动中继透镜组和探测器,且其旋转中心在第一片透镜附近,如果采用传统的框架平台式方案,电机体积、位置、配重等问题较为突出;采用后驱方案,中继透镜组和探测器的圆弧面运动需要较大的空间体积,且由于显微成像原理,对中继透镜组的位置精度要求极高,伺服稳定系统的仿真设计结果并不理想。

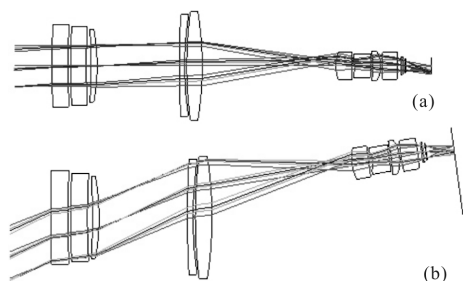


图 6 基于显微成像的像方扫描方案

Fig.6 Image scanning scheme based on micro-imaging

图 7 是像旋扫描方案^[11],即利用别汉棱镜或 K 镜等消像旋元件的消旋原理和偏置视场,可获得两倍

探测器像面的视场。虽然该方案光机结构较为简单,伺服控制也有一定的可实现度,但扫描象限固定,视场增加有限,且当采用面阵探测器时还需要别汉棱镜骤停骤起,而稳像还需要其他手段。综上所述,该方案实用性有限。

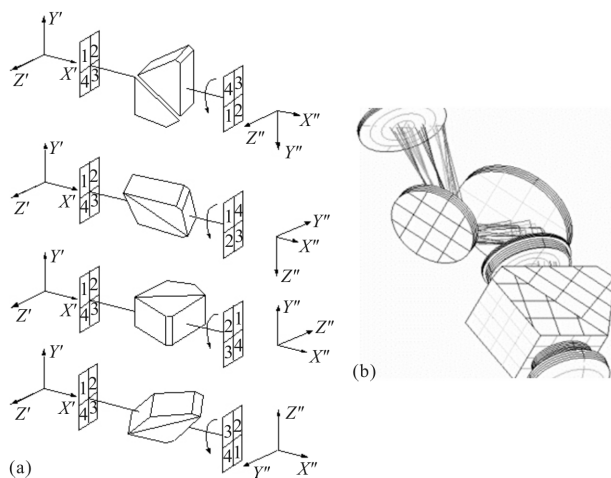


图 7 基于别汉棱镜的像旋扫描方案

Fig.7 Image rotation scanning based on Pechan prism

为实现小窗口大扫描视场,通过查旧,从坦克火控系统的上反式稳像火控系统中得到灵感,即瞄准镜镜体刚性安装在基座上,离窗口最近的上反射镜为方位/俯仰陀螺稳定系统,通过该二维稳反直接扫描物空间,即物方扫描,此时的旋转轴中心距离窗口也较小,因此也可获得像方扫描的效果,其原理如图 8 所示。

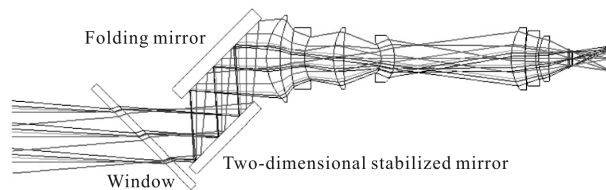


图 8 基于二维稳反的物方扫描方案

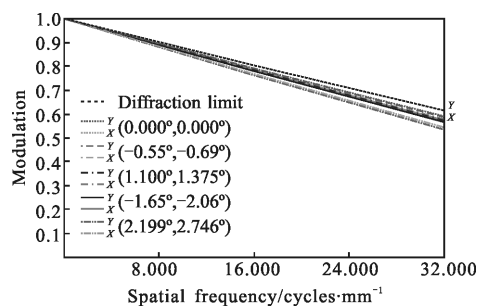
Fig.8 Objective scanning based on two-dimensional stabilized mirror

这种上反稳像式系统除了广泛应用于坦克的观瞄系统外,还用于法国“魔术”、“米卡”红外成像导引头上,因此无论对于光机还是伺服控制系统,均可采用常规的成熟设计。

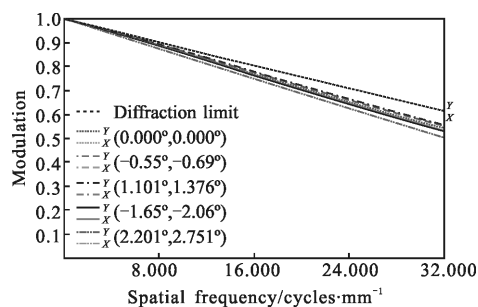
该方案与图 4 方案相比,由于二维稳反置于窗口附近,会受到结构制约,对小型化有较高的要求;为避免图 4 方案杂光的问题,需要尽可能地将入瞳置于二

维稳反而非窗口上,因此窗口比图 4 方案稍大。尽管如此,由于是平行光扫描,所有扫描范围均为线性区,可以最简化伺服控制系统,且避免了对图像的标定,降低了图像处理难度;同时还避免了图 4 方案的杂光、畸变、像质下降和较高装调精度等问题,具有较高的性价比,虽然从原理上相对以上几种方案了无新意,但却最能满足导引头作为消耗品的初衷。

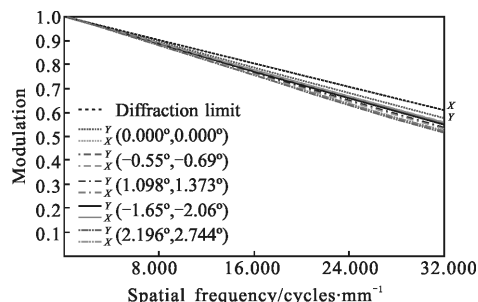
基于以上分析,最终选择了图 8 的物方扫描方案。与图 4 方案相比,除了窗口制约对二维稳反造成一定工程难度,其余主要性能指标均超过图 4 方案。系统采用了国产 320×256 面阵,30 μm 像元的中波红外斯特林制冷探测器, $F\#2.5$,焦距 100 mm,温度范围 -20~80 °C,波段 3.4~4.2 μm,视场 4.4°×5.5°,扫描范围 -20°~10°(俯仰)/±15°(方位),窗口为 45°倾斜的平行平板。采用二维稳反设计后,窗口尺寸近似为 60(上底)×70(下底)×80(高)的梯形,相对图 4,窗口面积不超过 2 倍,但光学系统和控制系统均为常规成熟技术,其中:光学系统为硅、锗、硒化锌等常规材料,七片透镜两个高次非球面;为防止温度冲击,采用线膨胀系数为 $9.9 \times 10^{-6}/K$ 的不锈钢为镜筒材料,且镜筒外壁增加了隔热层;设计完成后冷光阑效率 100%,渐晕不超过 10%,冷反射等效温差小于 0.31 °C,传函接近衍射限,畸变小于 0.5%,如图 9 所示。



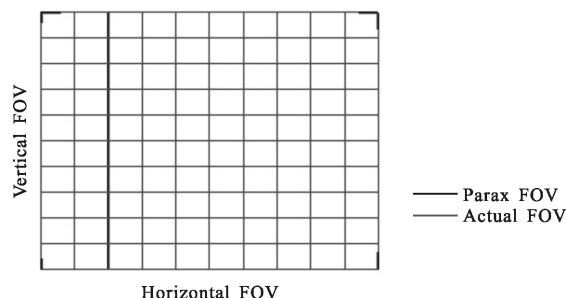
(a) 20 °C 时 MTF 曲线
(a) MTF curve of 20 °C



(b) -20 °C 时 MTF 曲线
(b) MTF curve of -20 °C



(c) 80 °C 时 MTF 曲线
(c) MTF curve of 80 °C



(d) 畸变网格
(d) Distortion grid

图 9 传函曲线及畸变网格

Fig.9 MTF curve and distortion grid

二维陀螺稳定反射镜采用了传统的机械 1/2 机构,普通挠性陀螺可实现最大 30 (°)/s 的稳定跟踪精度和一个像素的视线稳定跟踪精度。

通过实物样机及吹风和挂飞试验(图 10)达到了设计要求。

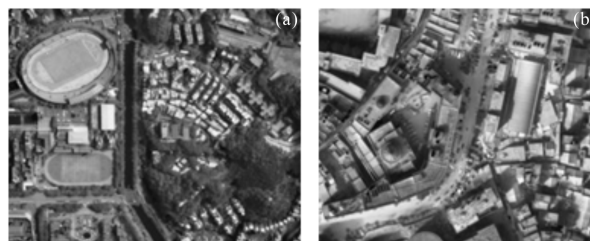


图 10 挂飞图像

Fig.10 Images of flying test

3 结论

在复杂光机系统的总体设计中,应对比迭代提取各专业的关键技术和瓶颈技术,明确技术极限,并将其作为共要素设计基准以分配各专业的设计权重。

文中的主要矛盾为光机结构布局,因此将小窗口大扫描角作为超系统的共要素约束条件,通过基于二

级集成系统综合法的MDO设计流程在子空间内并行设计,通过查新和查旧让各主要子空间先发散后收敛,实现了基于快速概念设计的多方案择优,获得了最佳工程设计方案。这类基于MDO的综合设计原则对于今后的类似系统设计具有借鉴意义。

以上设计实例也表明,总师组需要具有较宽的知识覆盖面,各专业总师也需要较广的涉猎和较多的设计方案。为面对日益复杂的设计要求,更需要体系化的知识工程数据库予以支持。

参考文献:

- [1] Liu Songtao, Zhou Xiaodong, Wang Chenggang. The present status and prospect of infrared imaging seeker techniques[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(9): 623-629. (in Chinese)
- [2] Chen Anhong, Cao Ju, Gao Xiaoying, et al. Key technologies of infrared imaging terminal guidance for surface-to-surface missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 15-19. (in Chinese)
- [3] Yang Xiaoying, Liu Chunsheng, Gu Yongqi. Design of the hypersonic vehicle infrared cooling dome [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(6): 576-579. (in Chinese)
- [4] Tholl H D, Krogmann D, Giesenberg O. New infrared seeker technology[C]//SPIE, 1998, 3436: 484-493.
- [5] Han Zhiping, Yin Xingliang. Overview of study methods for aero-optic effect of hypersonic missiles [J]. *Modern Defense Technology*, 2003, 31(3): 13-18. (in Chinese)
- [6] Wang Yahui, Wang Qiang, Zhang Bochuan, et al. Measurement method for thermal radiation characteristics of IR window materials [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(7): 1269-1274. (in Chinese)
- [7] Kodiyalam S. Evaluation of methods for multidisciplinary design optimization(MDO),Phase I[R]. Hampton, Va. USA: NASA Langley Research Center, 1998.
- [8] Fan Qinman, Wu Yonghai, Xu Cheng. [J]. *Journal of Machine Design*, 2009, 26(8): 6-11. (in Chinese)
- [9] Zhao Ming, Cao Anxi, Cui Weicheng. A comparison of multidisciplinary design optimization methods [J]. *Shipbuilding of China*, 2008, 49(3): 68-78. (in Chinese)
- [10] Deng Jian, Li Ruigang, Zheng Changsheng. Technology of image space scanning [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 284-287. (in Chinese)
- [11] Deng Jian, Li Ruigang, Zheng Changsheng. Applied research of infrared image system by using image rotator scan principle[J]. *Infrared*, 2011, 32(9): 5-9. (in Chinese)