

再议军用热像瞄准具结构设计

张红宇, 浦恩昌, 杨林, 董海翔, 贺仕伟, 陈忠
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 介绍了军用热瞄具光学系统各光学元件, 包括窗口、反射镜、透镜和总体机械结构设计、加工和装配要点; 基于美国《红外与光电手册》设计中提出的原理和准则, 给出了作者 10 余年的工程实践和经验。

关键词: 军用热瞄具; 光学系统; 机械结构设计

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)06-0505-04

Rethinking the Structure Design of Thermal Sights

ZHANG Hongyu, PU Enchang, YANG Lin, DONG Haixiang, HE Shiwei, CHEN Zhong
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Thermal sights for military applications and various optical components of this optical system, including windows, mirrors, lens and mechanical structure design, were introduced. Based on principles from *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, combined with more than 10 years of engineering practice and experience, key points of processing and assembling were discussed.

Key words: military thermal sights, optical system, mechanical structure design

0 引言

军用热瞄具光学系统的质量取决于各光学元件(窗口、反射镜和透镜)的表面和保证这些表面位置、形态的机械结构设计、加工和装配。它们不同于一般机械工程强调应力, 而是更加注重变形。本文借鉴参考文献[1-5], 结合作者工程经验^[6], 简要探讨红外光学系统设计遇到的较普遍的机械结构问题。

本文档是参考文献[6]的姊妹篇, 前者论述军用热瞄具光学系统各光学元件, 包括窗口、反射镜、透镜和总体机械结构设计、加工和装配要点, 而后者论述观瞄具结构的功能特性、设计程序、设计要领。

1 窗口

窗口是零光焦度的最简单光学元件, 是安装在整个光学系统外端的突前元件, 承受严酷多变的环境应力。

1.1 变形和断裂

热梯度和压力差都可导致窗口变形, 热梯度取决于窗口材料特性; 压力差引发窗口应力。

对易碎的红外材料, 压力差引发的最大抗拉应

力不应超过:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_F}{SF} \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为最大允许抗拉应力; σ_F 为窗口材料的折断应力; SF 为安全系数, 工程中通常取为 4。

1) 简单支撑的圆形窗口, 由压力差、材料折断应力和泊松比决定的最大直径厚度比为:

$$\frac{d_w}{h} = 2 \left[\frac{8\sigma_F}{3\Delta P(3+\nu)SF} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: d_w/h 为窗口直径厚度比; ν 为泊松比; ΔP 为窗口压力差。

2) 简单支撑的矩形窗口, 最小厚度为:

$$h = b \left\{ \frac{\Delta P}{\sigma_F} \frac{3}{4 \left[1 + (b/L)^4 \right]} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

式中: h 为窗口最小厚度; b 为无支撑窗口宽度; L 为无支撑窗口长度。

1.2 强度

多数窗口材料是易碎的, 且因断裂而损坏。在外力作用下, 窗口断裂概率维伯尔分布为:

$$P_F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_o} \right)^m \right] \quad (4)$$

或:

$$\sigma_a = \sigma_o \left[-\ln(1 - P_F) \right]^{1/m} \quad (5)$$

式中: P_F 为破裂概率; σ_a 为外加应力; σ_o 为断裂模量; m 为维伯尔模量。

列举强度计算范例如下: 300 mm 直径 ZnSe 窗, 用于高度 12 km 飞机, 设备承压和温度分别为 27 kPa 和 300 K; 环境条件为: 大气压力 19 kPa、气温 217 K; 要求故障率 10^{-4} , 安全系数 4。

$$\begin{aligned} \sigma_a &= 23 \times 10^6 [-\ln(1 - 10^{-4})]^{1/6} = 7.27 \text{ MPa} \\ d_w h &= 2 \{ 8 \times 7.27 \times 10^6 / [3 \times (27 - 19) \times 10^3 \times \\ &\quad (3 + 0.28) \times 4] \}^{1/2} = 27.2 \end{aligned}$$

最小厚度约为: $h = d_w / 27.2 = 11 \text{ mm}$ 。

1.3 装配

1) 消冷反射: 窗口应在较小视场方向, 倾斜不小于半视场角, 以避免冷反射。

2) 柔性粘结: 窗口边缘与安装座间宜采用如光学硅胶粘结, 以减小应力变形; 必要时可加挠性挡圈, 如坦克瞄镜、机载稳瞄窗口。

2 透镜装配

透镜安装应确保光学变形不超标, 因而要求其安装设计必须低应力。

1) 对心^[6]

透镜对心就是利用定心仪, 使透镜光轴与镜筒机械轴重合达标。透镜径向调整通常可用镜筒上对准透镜边缘的 3 个均布的细小工艺螺钉。

2) 粘接

透镜边缘与镜筒间预留间隙甩光学硅胶粘接; 最佳粘合剂厚度为:

$$h_r = \frac{D_g (\alpha_m - \alpha_g)}{2 (\alpha_r - \alpha_m)} \quad (6)$$

式中: h_r 为粘合剂厚度; D_g 为透镜外径; α_g 为透镜的热膨胀系数 (锗为: $6 \times 10^{-6}/\text{K}$); α_m 为镜框的热膨胀系数 (ZL101A 铸铝合金为: $21.5 \times 10^{-6}/\text{K}$); α_r 为粘合剂的热膨胀系数 (常用硅胶为: $200 \times 10^{-6}/\text{K}$)。

例如, 对于口径 100 mm 的透镜, 硅胶厚度为 4.3 mm。

3) 座和压圈

较小尺寸的透镜, 通常采用配合的镜座和压圈

装配。优点是精确、稳定, 不足之处为座镜接触面存在较高应力。

自由装配所需最小间隙一般为 25 μm 。带凹面透镜, 凹边都留有平台, 与镜座面接触; 双凸透镜可取尖角接触。两者均可保证弧高精度, 镜筒工艺简洁。

压圈用于透镜预加载, 保证镜与座接触; 建议的预加载力至少为透镜质量的 2~4 倍。要求螺纹 1 级松配合。转动压圈力矩为:

$$T \equiv 0.2dF \quad (7)$$

式中: F 为期望的轴向预加载力; T 为压圈的力矩; d 为压圈直径。

例如, 转动 50 mm 锗透镜压圈力矩为: $T = 0.12 \text{ Nm}$ 。

4) 装配引起的透镜内热应力

因透镜和镜筒材料间的热膨胀系数差异, 温度变化在透镜内部会产生应力, 特别是温度下降会使透镜内产生严重应力, 这会影响透镜光学性能, 在最坏情况会导致机械断裂。

为避免温度变化使镜座收缩时在透镜内产生径向引力, 透镜和镜座之间需预留一定的初始间隙, 对温度下降要求的最小径向间隙为:

$$h_r \equiv \frac{1}{2} \Delta T d_G (\alpha_m - \alpha_G) \equiv \frac{1}{2} \Delta T (d_m \alpha_m - d_G \alpha_G) \quad (8)$$

式中: h_r 为最小径向间隙; ΔT 为温度下降量; d_G 为透镜外径; d_m 为镜座内径; α_G 为透镜材料热膨胀系数; α_m 为镜座材料热膨胀系数。

锗透镜在 233 K 工作, 装配在 298 K 进行; 透镜直径 40 mm:

$$h_r \equiv 0.5 \times (298 - 233) \times 0.04 \times (23 - 6) \times 10^{-6} \equiv 22 \mu\text{m}$$

在预留初始间隙不足时, 温度下降产生的径向压力由下两方程估算为:

$$\sigma_r = \frac{K \Delta T (\alpha_m - \alpha_G)}{(1/E_G + r_G/E_m h_m)} \quad (9)$$

$$K_r = 1 - \frac{h_r}{r_G \Delta T (\alpha_m - \alpha_G)} \quad (10)$$

式中: σ_r 为透镜内产生的径向压力; r_G 为透镜半径; h_r 为初始径向间隙; h_m 为镜座壁厚; E_G 为透镜材料的弹性模量; E_m 为镜座材料的弹性模量。

例: 锗透镜在 233 K 工作, 装配在 298 K 进行; 铝合金镜座, 壁厚 2.5 mm, 径向初始间隙 2.5 μm , 压圈和镜座有 40 mm 公共直径, 温差应力估算如下:

$$K_r = 1 - \frac{2.5 \times 10^{-6}}{0.02 \times 65 \times (23 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6})} = 0.887$$

$$\sigma_r = \frac{0.887 \times 65 \times (23 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-6})}{1/(83 \times 10^9) + 0.02 / [(69 \times 10^9) \times 0.0025]} = 7.66 \text{ MPa}$$

3 透镜筒

透镜安装应确保光学变形不超标,因而要求其安装设计必须低应力。

3.1 镜筒材料

镜筒材料特性要求:

①热膨胀与透镜匹配;②低密度轻质量;③高弹性模量低变形;④尺寸稳定;⑤抗腐蚀;⑥易加工处理;⑦低成本。

可选常用材料有^[6]:

①铝合金:轻质易加工,尺寸稳定;②镁合金:更轻质易加工,抗腐蚀差;③钛合金:轻质,抗腐蚀,热膨胀匹配,成本高。

3.2 镜筒设计

1) 共膛装配

镜筒最简结构是共膛装配 (Common bore assembly)。在共膛装配中,所有元件包括透镜、压圈和隔圈均加工成相同外径,然后置于镜筒单一共腔内。元件间的间隔由隔圈保证,用一个压圈给整个装配提供预加载力。由于各元件与镜筒膛的摩擦力,需很高的预加载力方能保证所有元件良好接触。中继镜和探测器透镜可采用这类设计。

2) 单透镜装配

通常各个透镜的直径是渐变的,沿光轴朝向或远离光阑方向均匀递减或递增。这种情况下,每个元件有各自的镜座和压圈。镜座可与实测透镜尺寸配作。为保证良好对心,相关部位应一次装夹加工。物镜应采用这类设计^[6]。

3) 滑座装配

调焦变倍镜和补偿镜通常需滑座装配。透镜座与滚动丝杠滑轨副的载物座定位连接从动。两者接口提供光轴定心基准。镜组重心应尽量放低并落在滑座形心。

3.3 镜筒密封

镜筒应预留通气孔道,以便随系统充氮密封^[6];也可在两端采用半挠性粘结装配,独立密封。

4 折转反射镜设计和装配

折转反射镜^[6]尺寸较小,但对变形和定位精度

要求高。因尺寸小,可忽略增重和自重偏心,采用较大厚宽比和强度高变形小的材料铝合金;金属母基合金铝/硅碳化物是有望用于红外的加强材料。镜面采用钻石切(磨)削加工。

为达到镜面位置精度,多采用镜背三点靠座修切装配,螺钉固定。

5 光学平台

光学平台^[6]是系统总体结构 (System Structure),它承载光学、电子和机械全部总成,形成要求的内外接口和刚性包络外形;独立使用形态,又构成为环境屏障,提供全部性能及物理特性和内部设置及外部操控功能。

光学平台是安装全部光学部件、探测器/制冷机组合的刚性机械架构,它保障光学元件动态表面及探测器入瞳位置精度和稳定度;周边立壁加强结构刚度,又构成完整三维箱体。

光学平台也可预装光学系统,构成整装结构 (Equipped Structure)。

光学部件间隙及周边安装电子部件,在满足系统安装及维修可达、散热、电磁兼容和安全性条件下,布局应尽量紧凑,尤其对配装稳瞄转塔用系统。

5.1 布局与协调

1) 布局与协调的基本条件

项目组内部:

确定了探测器/制冷机组合选型;

完成了光学设计;

已提供电路板外形尺寸与机电接口;

选定可得或可继承重要机电元部件,如电机、丝杠导轨。

稳瞄系统:

取得了配装系统接口和外形包络要求;

配装网络节点。

2) 布局与协调的基本内容和程序

绘制探测器/制冷机组合、光学系统元件和电机、丝杠导轨部件及电路板三维图;

以主光轴为基准,将部件三维图组合为系统三维图;

依各部件接口和定位,绘制光学平台接口框架三维图;

确定安装程序,有效利用空间交错,提高空间利用率;

将电路板布置在光学系统周边,选取最佳拟合外部外形包络,形成系统外形包络。

无论系统外形包络与外部要求外形包络有无差

异, 均提交外部协调;

按反馈协调结果, 或认可或再修改协调, 直至认可。

5.2 结构设计

1) 初步设计

依协调认可外形包络, 设计光学平台内外接口三维详图, 设计应遵循保证结构强度^[2-3]及可靠性^[4]的前提下, 进行合理的减重及人机工程设计;

确定部件外形接口要求;

确定加工基准。

2) 初样设计

设计完成总体结构三维详图, 必要时采用有限元分析软件进行结构应力分析^[5];

完成工艺匹配设计;

完善细节设计。

5.3 加工和装配

1) 加工

选择加工中心低应力装夹;

严格时效工序;

设计一致加工基准。

2) 装配

完成驱动程序预调;

确定装配工序;

安装电机、丝杠导轨部件;

按光学工艺装配光学部件;

安装电路板和连接器。

6 结论

笔者遵循本文论述的设计原理和准则完成的三代红外焦平面三视场连续变焦瞄具, 体小量轻可

靠性高。

参考文献:

- [1] Dudzik M C. Electro-optical system design, analysis and test[M]//*The infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [2] 王步瀛. 机械零件强度计算的理论和方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986.
WANG Buying. *Theory and methods of strength calculation for mechanical parts*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986.
- [3] 陈庆生. 冲击振动理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
CHEN Qingsheng. *Shock Vibration Theory and Application*[M]. Beijing: National Defense Industry Press.
- [4] 总装备部技术基础管理中心. 装备可靠性工作通用要求: GJB 450A-2004[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.
General Equipment Department Technology Base Management Center. General requirements for reliability of equipment: GJB 450A-2004[S]. Beijing: Department of General Equipment Department of Military Standard Publishing, 2004
- [5] ABAQUS 有限元分析软件在机械行业中的应用[J]. 机械工业信息与网络, 2006(2): 44-45.
ABAQUS. The application of finite element analysis software in the machinery industry[J]. *Machinery Industry Information and Network*, 2006(2): 44-45 .
- [6] 张红宇. 军用热像观瞄具结构设计[J]. 红外技术, 2009, 31(10): 594-597.
ZHANG Hongyu. Design of thermal imaging sights structure for military[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(10): 594-597.