

文章编号:1007-1180(2010)12-0068-05

# 航空侦察相机设计与镜头结构分析

辛宏伟

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 航空战术侦察是各种战术侦察中最为有效的手段之一。在现代化信息化武器中, 航空侦察系统是必不可少的。本文具体介绍了光电型画幅式垂直相机的光学系统与机械结构的设计过程。对相机镜头结构进行模态分析, 在分析模态时发现其前两阶固有频率低于用户所给指标, 且其振型易对镜片成像产生影响。以提高刚度为目标改进结构, 对改进后的结构做模态分析, 满足要求。对镜头进行热环境分析, 考察相机镜头在热环境下工作对成像的影响, 结果满足要求。

**关键词:** 航空侦察相机; 动力学; 热分析

**中图分类号:** V447.3; TH703

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20102712.0068

## Aviation Reconnaissance Camera Design and Analysis on Camera Lens Structure

XIN Hong-wei

(Changchun Institute of optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** The aviation tactical reconnaissance is one of the most effective means in various tactical reconnaissances. The aviation tactical system is necessary in all of the moden weapons. The optical system and mechanical design process of the optical frame vertical camera is introduced in this paper. After analyzing the camera lens mode, the analysis results show that the first two mode frequencies are higher than the user's requirements. In order to increase the camera lens stiffness, the structure is modified. Then analyzing the modified structure, the results meet requirement. In the thermal condition analyzing the camera lens, the results meet requirement.

**Keywords:** aviation tactical camera; dynamics; thermal analysis

## 1 引言

航空侦察相机是伴随着军用飞机的发展而发展起来的,至今已有近百年的历史。如今,光电型画幅式相机因具有宽光谱范围广、数字化程度高、时效性好等特点,同时又具有高速机动能力、几何精度高、高分辨率及立体成像等优点<sup>[1]</sup>,成为现代侦查相机发展的方向。

## 2 航空侦察相机结构设计

航空侦察相机的结构设计主要是针对光学成像质量而言。作为相机的光学镜头,其像质要保证相机一定的成像精度。因此,光学设计首先要校正影响判读精度的垂直像差,其次校正影响拍摄能力的轴向像差,以控制像点能量分布既对称又有可允许的尺寸<sup>[2]</sup>。

### 2.1 光学系统组成

在折射系统诸多种结构中,选用奥泽麦特与双高斯的联合型结构作为相机光学镜头的光学系统<sup>[3-5]</sup>,并且有较短的光学筒长,以减少相机的体积与重量,表1为光学系统设计参数。

表1 光学系统设计参数

焦距 (mm)	口径 (mm)	相对孔径 $D/f$	视场 $2\omega$	像面 (mm <sup>2</sup> )
$F=300$	130	5.6	$21.8^\circ$	$\phi 160$

根据光学系统要求共设计了8个透镜,光路图如图1所示。

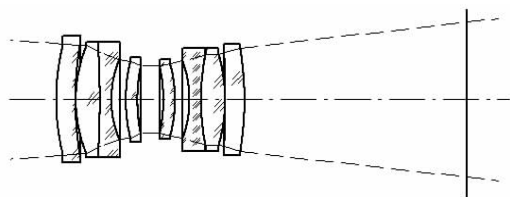


图1 相机镜头光路图

### 2.2 相机结构

相机结构主要由镜头镜筒部件组、相机壳体壳盖部件组、CCD像移补偿及成像电路支撑结构组件、快门传动和布帘部件组等组成,结构总重15 kg。

相机上部是像移补偿和CCD成像盒部分;相机

的中间部分是相机的机身,机身的腹部安有相机的固定机件,与飞机上相机座架相连接,并依靠固定机件的毡垫起减振作用;相机的下部是镜头部分,主要由可变光阑装置、透镜组、滤光片玻璃组件、镜头保护盖等组成。

镜头部分结构尺寸如下:

高340 mm,最大外径 $\phi 210$  mm,内透镜 $\phi 90 \sim \phi 120$  mm。

安装在飞机上的相机整体结构如图2所示。

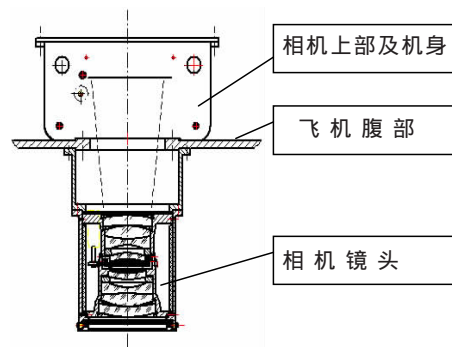


图2 相机安装结构图

航空相机镜头结构设计是航空相机设计的关键技术之一,光学镜头的镜头结构需确保在载机飞行、起落等条件下,光学系统中各镜片的准确定位。

#### 2.2.1 镜筒设计

相机镜筒主要包括外上镜框与外下镜框、内上镜框与内下镜框。采用高稳定性、高比刚度与高强度的铝合金LC9复合材料做镜筒,光学镜筒轻质高性能的复合材料,既保证强度又能减轻重量。

#### 2.2.2 可变光阑设计

可变光阑是用来调整通过光学镜头的能量的大小,也就是用于控制光束宽度的装置,用它来改变像面的照度(能量)。

## 3 镜头结构有限元分析

航空相机镜头包括光、机和热三大部分,只有光、机和热三者相结合,综合考虑,才会使相机呈现良好的性能。分析过程具体包括以下两方面的内容:

第一：计算系统自身的动力学特性，即固有频率和振型。

第二：热载荷分析。因为相机是在几万米高空工作，从地面到高空温度的变化对镜头的成像影响也是必须要考虑的。

### 3.1 结构几何模型

镜头结构形状较为复杂，依据等效原理在建几何模型时，对镜头进行了必要的简化。

### 3.2 镜头结构模态分析

#### 3.2.1 模态分析

模态分析法可分为时域法和频域法两大类。时域法是直接将结构在时域中的自由响应通过计算机处理，求得模态参数。这种方法能直接利用某些实际工况下的随机振动数据，是一种很有发展前途的方法。频域法是先把测试数据变换成频域数据，然后进行模态识别，工程中常用此种方法进行模态

分析。

对于  $n$  个自由度系统可用如下方程描述<sup>[6-7]</sup>：

$$[M]\{\ddot{X}\}+[C]\{\dot{X}\}+[K]\{X\}=\{F(t)\} \quad (1)$$

式中  $\{X\}$  为响应向量； $\{F(t)\}$  为激励向量； $[M]$  为结构的质量矩阵； $[K]$  为结构的刚度矩阵； $[C]$  为结构的阻尼矩阵。

对 (1) 式进行傅式变换，则有

$$\{(jw)^2[M]+jw[C]+[K]\{X(w)\}=\{F(w)\} \quad (2)$$

这是一组耦合方程，为解方程先解耦。

$$\text{令} \quad \{X\}=[\phi]\{q\} \quad (3)$$

式中  $[\phi]$  为转换矩阵； $\{q\}$  为变换后的新坐标列阵，称模态坐标向量。

模态分析中采用固有振型矩阵作为坐标转换矩阵，因此称为固有振动模态矩阵，简称矩阵。它的每一列代表新坐标系中的一个向量基。

将(3)式代入(2)式，并左乘，由正交条件可得

$$\begin{cases} \{[K]-w^2[M]+jw[C]\}[\phi]\{q\}=\{F(w)\} \\ \{[\phi]^T[K][\phi]-w^2[\phi]^T[M][\phi]+jw[\phi]^T[C][\phi]\}\{q\}=[\phi]^T\{F(w)\} \\ \{[K_i]-w^2[M_i]+jw[C_i]\}\{q\}=[\phi]^T\{F(w)\} \end{cases} \quad (4)$$

显然， $[K]$ 、 $[M]$ 和 $[C]$ 已变为对角矩阵，方程组 (4) 中的每一个方程式都是单自由度系统的运动方程。

可见，模态分析的基本出发点是许多工程结构的复杂振动，在一定条件下都可以看成是一些最简单、最基本的振动的迭加。基于这种认识，即可将工程结构的复杂振动问题变成简单振动来处理，从而为解决工程中复杂振动问题找到了一条捷径。

#### 3.2.2 模态分析结果

划分有限单元时，不考虑 6 个螺栓的破坏，只对螺孔的内面进行约束，所以在考虑此边界条件时对 6 个螺孔内面实施全约束。

对结构的模态分析结果如表 2 所示，由其振型可以看出，其一阶和二阶振型中相机镜头的外下镜框部分发生大幅度的左右摇晃且均是镜头下端面向倾斜，其中一阶为  $z$  向，二阶为  $x$  向，这会对成像造成很大的影响，同时在外上镜框与载机连接处的根部发生大幅度的摆动，易产生局部应力，因此，

需要改进结构。同时，从模态分析结果看出，第一、二阶模态的固有频率（573 Hz、576 Hz）过低（低于用户要求的 600 Hz 以上），所以也需要在提高刚度方面对结构进行改进。三阶以上的振型对镜头影响最大的主要是内上、下镜框和镜片部分，其中三、四、五阶振型中受影响最大的部分是内上镜框及其镜片，所以内上镜框的结构改进也是需要考虑的，第六阶振型中各构件均向外侧胀，这种情况对成像影响不是很大。

### 3.3 相机镜头结构改进

从  $f_n=\sqrt{K/m}$  可知，若提高固有频率，可通过增加系统刚度、减少质量达到要求。因此，在外上镜框与载机 6 个紧固螺钉连接的基础上增加两个紧固螺钉紧固，同时其上端面加厚 2 mm，以提高系统刚度，且在外上镜框与载机连接根部增加了  $\phi_3$  的圆角，以避免长期工作发生根切。在外下镜框局部减少 1 mm 厚度，内下框底部减少 2 mm 厚度以减少系统

表2 镜头结构前六阶固有频率计算值

阶数	1	2	3	4	5	6
频率 (Hz)	573	576	638.6	912.5	1 036.4	1 304.4
振型	外下镜框 $z$ 向倾斜	外下镜框 $x$ 向倾斜	内上镜框上下摆动	内上镜框 $x$ 向倾斜	内上镜框 $z$ 向倾斜	各镜框向外膨胀

表3 镜头结构改进后前六阶固有频率计算值

阶数	1	2	3	4	5	6
频率 (Hz)	621	628.5	700.6	1 274.6	1 354	1 403.7
振型	外下镜框上下摆动	外下镜框上下摆动	内上镜框上下摆动	内上镜框 $x$ 向倾斜	内上镜框 $z$ 向倾斜	各镜框向外膨胀

质量。在内下镜框与内上镜框间的连接点从原有的6个增加到8个。

表3给出了相机镜头结构改进后的前六阶固有频率与振型。

由上述分析结果可知,系统的一阶和二阶固有频率分别提高到621 Hz、628.5 Hz,达到用户要求,且在上镜框转角处不再发生大幅度的摆动,明显优于前面的结果。因此,此结构改进是合理的。

## 4 热分析

因相机从地面到高空工作,其热环境有很大的变化,所以也要尽量使相机在较大的温差(本相机要求 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下工作,保证其光学元件成像质量的要求。

### 4.1 热控方案

为确保光学镜头在各个方向尽量受热均匀,避免因单方向温度变化较大而造成成像质量下降,采用隔热层、电加热装置等加热方法<sup>[8]</sup>。

### 4.2 热变形分析结果

在此工作状态下,镜头系统的热控要求在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,所以需计算最大温差在 $16\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时镜片的热变形情况。所得热变形云图如图3所示。

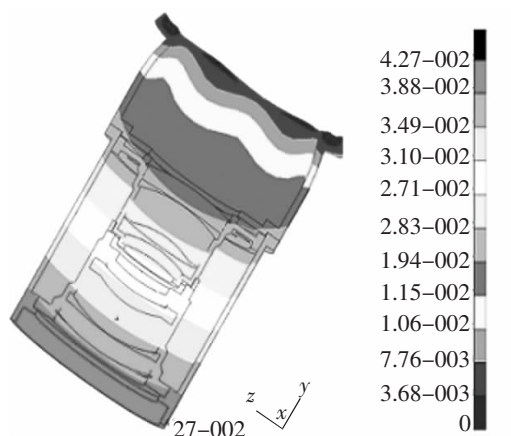


图3 镜面热变形云图

将分析所得节点位移导入用VC编制的面形质量评价程序软件,计算得到镜面变形结果,可知各透镜的面形精度指标均处于未超差状态(PV值不大于63.2 nm)。

## 5 结 论

本文对航空相机镜头结构的设计过程作了详细的介绍与分析,并对其所处的动力学环境与热环境问题进行了深入的研究,镜头在动力学与热环境下系统的响应分析结果满足要求。

## 参考文献

- [1] 钱义先,贾远林,梁伟,等. 航空 CCD 相机可见光光学系统消热差设计[J]. 光子学报, 2009, 38(9): 2279-2282.
- [2] 辛宏伟,赵思宏. CAE 在超薄反射镜多点调节中的应用[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 459-496, 498.
- [3] 辛宏伟. 空间遥感器结构稳定性分析[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位论文, 2003.

- [4] 孙宝玉. 轻型大视场光学遥感器动态稳定性研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位论文, 2004.
- [5] 高明辉. 空间光学遥感器超薄反射镜及其支撑结构研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位论文, 2004.
- [6] 刘巨, 孙宝玉, 辛宏伟, 等. 实体模型位移场与应力场收敛速度及分析精度的研究[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(z2): 143-148.
- [7] 吕清涛. 航空侦察相机镜头结构动力学分析[D]. 长春: 长春工业大学硕士学位论文, 2007.
- [8] 关英俊, 辛宏伟, 赵贵军, 等. 空间相机主支撑结构拓扑优化设计[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1157-1163.

作者简介: 辛宏伟 (1970-), 男, 汉族, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 2003年于中科院长春光机所获得博士学位, 2005年从长春光机所博士后工作站出站, 主要从事空间遥感器结构优化设计与工程分析。

E-mail: xinhwciomp@sina.com

## 新玻璃薄膜可反射各种波长光线

加拿大不列颠哥伦比亚大学成功开发出可反射各种波长光线的玻璃薄膜, 使普通透明玻璃能够呈现包括紫外光、红外光以及可见光在内的各种斑斓颜色。研究项目负责人、该大学化学教授马克·麦克马兰表示, 该项成果既有助于节约能源, 又可美化建筑外观。相关文章发表在最新出版的《自然》杂志上。

研究团队使用一种被称为纳米晶体纤维素的物质制成了这种玻璃薄膜, 这种纳米晶体纤维素是纸浆和纸的主要成分。

该玻璃薄膜制造工艺由多步骤构成。首先将水、纤维素和硅等物质加以混合, 待混合溶液干燥后, 纤维素就变为由许多微柱形晶体组成的螺旋状图形。麦克马兰形象地介绍说, 想象一下, 在一个层面上这些微柱形晶体基本都朝向相同的方向, 而在另一个层面上的微柱形晶体布局与之相似, 但朝向略有差别, 以此类推, 每一层微柱形晶体方向都与其紧邻的层面有所不同。然后, 研究人员将多层晶体纤维素烧制到一张事先打上微细小孔的玻璃薄膜上, 小孔的尺寸与排列同晶体一致。由于这些小孔具有螺旋结构, 玻璃薄膜就可反射不同波长的光线, 颜色美妙绝伦。

研究人员表示, 玻璃薄膜光线反射“调节”技术类似甲虫翅膀反射出七彩光的原理, 产生的光线就像钻石反射出的璀璨光芒。他们可以非常容易地调节玻璃薄膜的反射波长, 范围从红外光到可见光直到紫外光。建筑窗户如果覆上该玻璃薄膜, 窗户就可以反射红外光, 而夏天红外光正是加热建筑的“元凶”。这种玻璃薄膜还能用作墙体涂料, 当人们路过时, 可以在不同角度看见各种颜色的反射光。

目前, 已经成熟的玻璃光反射技术是通过在玻璃中掺入化学物质为玻璃上色而反射光线, 但这种方式使建筑内部光线暗淡, 需要增加照明; 另外, 玻璃中掺入的化学物质在阳光的长期照射下会退化失效, 而新研发的玻璃薄膜则不存在这些问题。