

〈测量技术〉

## 轻小型红外成像稳定平台质心测量方法探究

王磊, 林宇, 张若岚

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 质心测量对于红外成像稳定平台十分重要, 而针对轻小型稳定平台的测量技术并不成熟。介绍了质心测量技术发展概况, 分析了轻小型红外成像稳定平台的结构特点和测试需求。根据平台特点和测试需求, 经分析指出力矩平衡法比较适合平台质心位置的测量, 并通过实验验证了这一观点。最后总结了在质心测量过程中需要注意的关键点。

**关键字:** 轻小型稳定平台; 力矩平衡法; 质心测量

中图分类号: TH113 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)07-0434-05

## Exploratory Research on the Measurement of Centroid about Lightweight Infrared Imaging Platform

WANG Lei, LIN Yu, ZHANG Ruo-lan

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** The measurement of centroid is very important for infrared imaging platform. The method for lightweight platform is not mature. In this paper, the development about the measurement of centroid is described. The structure and the requirement in testing of the lightweight infrared imaging platform are analyzed. According to the analysis, torque balance method is considered to be the best choice of testing the centroid of the platform, and it is proved right by the experiment. At last, the key points of the testing process are summarized.

**Key words:** lightweight platform, torque balance method, measurement of centroid

### 0 引言

红外成像稳定平台是红外成像导引头的核心组成部分, 其伺服性能的好坏直接决定了导引头稳定和跟踪功能的优劣<sup>[1]</sup>。稳定平台的伺服性能取决于对其干扰力矩的分析和处理, 其干扰力矩一般包括摩擦力矩、导线牵拉力矩和质量不平衡力矩3种。其中摩擦力矩与负载重量等因素有关, 导线牵拉力矩与导线的柔性、粗细和数量多少有关, 质量不平衡力矩与负载、质偏距及环境加速度有关。而针对应用于红外成像导引头的稳定平台, 质量不平衡力矩对稳定平台伺服性能的影响更为突出, 原因有二: 一是因为导引头体积小、重量轻, 则其稳定平台必须以轻小型化为设计原则<sup>[2]</sup>, 再加上平台本身结构复杂、零部件众多, 且材料不均、形状各异, 则在设计阶段很难保证其质心处

在理想位置, 故容易产生质偏; 二是因为红外成像导引头的工作环境十分复杂, 经常处于高强度瞬时冲击的状态, 比如导引头在运输过程中的颠簸振动、在发射瞬间的加速度冲击等, 而质量不平衡力矩与环境加速度成正比关系, 则在高强度冲击下, 质偏点必将对稳定平台的旋转轴产生很大的过载力矩, 进而影响稳定平台的伺服性能。解决质量不平衡问题的关键在于精确获取其质心位置, 以利于配平或对干扰模型进行准确建模和分析。而目前针对轻小型稳定平台的质心测试方法并不成熟, 因此研究这种特殊机构的质心测量方法具有十分重要的意义。

### 1 质心测量技术概述

随着测试需求的不断提高和测试手段的不断改进, 质心测量技术在测量对象上经历了由简单到复杂

收稿日期: 2013-03-01; 修订日期: 2013-04-07。

作者简介: 王磊 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为红外成像整机系统伺服控制。

基金项目: 国防预研项目。

的过程, 在测量精度上经历了由低到高的过程。纵观各种测试方法, 按原理不同可大致分为4类, 即基于重力效应的原理、基于理论分析的原理、基于力矩平衡的原理和基于转动惯量的原理, 图1展示了原理和由其衍生的测试方法的关系。

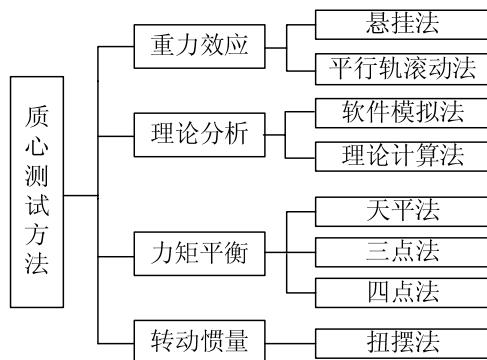


图1 原理分类图 Fig.1 Classification of principles

### 1.1 基于重力效应的原理

基于重力效应的原理主要是利用物体在重力作用下表现出的现象而对质心位置进行估计的, 比如悬挂法是利用竖直悬挂线过重心的现象<sup>[3]</sup>, 平行轨滚动法是利用在水平光滑导轨上, 旋转体的重心总会通过滚动转至竖直面最下方的现象<sup>[4]</sup>。这种方法测量精度低, 一般用于对被测物体质心位置的估计。

### 1.2 基于理论分析的原理

基于理论分析的原理主要根据物体的材料性质和几何尺寸, 通过一定的简化条件和计算方法得出物体的质心位置的。对于外形规则、密度均匀的简单构件, 由于其质心与形心重合, 则通过形心计算公式即可求得质心位置。对于外形不规则的复杂结构件, 计算的基本思路是首先将复杂结构件分解成多个外形规则的简单构件, 待求出各简单构件质心位置后, 再通过等效质心计算公式求出整体质心位置<sup>[3]</sup>。等效质心计算公式如下:

$$x_t = \frac{\sum x_{it}m_i}{\sum m_i} \quad (1)$$

式中:  $m_i$ 是各简单构件的质量;  $x_{it}$ 是各简单构件相对于总体坐标系在  $t$  方向的距离;  $x_t$ 是总体构件  $x$  方向的等效质心位置。后来随着计算机技术的发展, 将上述原理用计算机平台来实现, 则产生了软件模拟法<sup>[5]</sup>, 软件模拟法能够大大提高质心位置的计算效率。

### 1.3 基于力矩平衡的原理

基于力矩平衡的原理主要是利用物体在静止状态下的力矩平衡方程和传感器给出的物理量, 通过求解方程而得出物体的质心位置的。在此类方法中涉及的关键参量是重量和距离, 设计的难点在于如何构建

测量平台以获取平衡方程组中的已知参量。基于该原理的方法有天平法、三点法和四点法<sup>[6-10]</sup>。其中天平法的被测物重量由专门称重仪器给出, 距离由天平上的刻度给出; 三点法和四点法的被测物重量都由压力传感器给出, 距离由专门的测距仪器给出, 三点法和四点法的区别在于平衡方程组的变量不同。

### 1.4 基于转动惯量的原理

基于转动惯量的原理是利用物体转动惯量的理论计算值和实验测量值来建立等式关系, 从而求取物体的质心位置的。该测试过程需要在扭振转台上进行, 将被测物放置在扭振台上, 通过扭振台上的刻度可以读出被测物形心的位置, 然后以被测物相对于自身形心的质心偏移量为未知量, 可以得出转动惯量的理论值表达式, 同时被测物的转动惯量又可以通过扭振实验获得, 二者建立等式关系即可得出方程。由于等式中的未知量较多, 可以改变被测物在扭振台上的位置, 建立多个等式最后组成方程组以求得被测物的质心位置<sup>[11-15]</sup>。

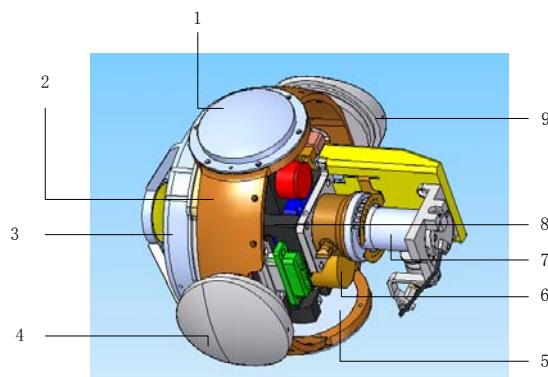
## 2 测量对象分析

本文的测量对象是轻小型红外成像稳定平台, 是红外成像导引头的核心组成部分, 其上承载着导引头的光电成像系统、伺服系统, 在导引头锁定和跟踪目标的过程中发挥着重要的作用。由于红外成像导引头的体积和重量的限制, 该稳定平台一般以两轴框架类型居多。下面将对其结构和测试需求做具体分析。

### 2.1 结构分析

被测对象的结构复杂、零部件众多且材料各异。如图2所示, 红外成像导引头稳定平台的结构主要由承载基体、光电探测系统组件、伺服系统组件组成。其中承载基体主要为内框架和外框架, 内框架是光电成像系统组件和伺服系统组件的主要载体, 并通过电机和旋变安装在外框架之上, 外框架又通过电机和旋变安装在导引头壳体之上, 内外框架配合电机和旋变共同实现俯仰和偏航两个方向的运动。光电探测系统分为光学系统和探测器2部分, 光学系统由一系列镜片及其工装组成, 其功能是将光路聚焦到探测器的焦平面上, 探测器最终将光信号转换为电信号。伺服系统的主要部件是电机、旋变和陀螺, 其中电机是伺服系统的执行机构, 旋变和陀螺是伺服系统反馈环节的传感器, 三者共同实现内外框架的精确运动控制。如此复杂的结构为稳定平台的设计过程带来了很大的难度, 再加上加工误差和装配误差的影响, 很容易导致平台的实际质心位置与理论值不符, 因此只有通过实验测量才能准确获得平台的质心位置。由于这种结

构的外形轮廓以环形或弧形为主,不利于稳定放置,所以在测试时还要针对其结构特点设计相应的测试工装。此外因为内框相对于外框可以转动,在测量内外框整体质心位置时,为了保证测试状态的唯一性,需要通过一定措施将内框固定在某一位置再进行测量。



1. 内框架电机 2. 外框架 3. 光学系统 4. 外框架电机  
5. 内框架旋变 6. 陀螺 7. 探测器 8. 内框架及其附属  
组件 9. 外框架旋变

图2 稳定平台示意图 Fig.2 The structure of platform

## 2.2 测试精度分析

被测对象的测量精度要求比较高。因为该稳定平台有轻小型化的要求,这就对其零部件的尺寸和重量进行了限制。电机作为伺服系统的执行机构,尺寸的限制对其驱动力矩有一定影响,从而导致其抗干扰能力下降。这种情况下为了保证稳定平台具有良好的性能,则一方面要尽量减小外界干扰,另一方面要对干扰进行精确建模以便伺服系统控制算法的改进。而对干扰力矩精确建模的前提就是准确测量出其质心位置,因此该稳定平台的质心测量精度要求较高。普通运动机构的工作环境最大加速度不超过30g,而红外成像导引头工作时的瞬时加速度要比普通情况下至少大一倍,这就要求稳定平台的质心测试精度更高才能对干扰力矩进行精确建模,经计算红外成像导引头稳定平台的质心测量精度要达到0.1 mm量级。

## 3 实验测量

### 3.1 测量方法选择

针对红外成像稳定平台结构复杂、测量精度高的特点,基于重力效应的方法由于测量精度不高,所以不适合使用;基于理论分析的方法常用于设计指导,且得出的质心位置由于加工误差等原因与实际质心位置存在差异,所以也不适合使用;剩余的力矩平衡法和扭摆法仅从测量对象和测量精度来考虑是比较适合的,原因有二:一是它们的测量过程与被测物的

外形结构无关,这就避免了结构复杂对测量带来的不便;二是它们的测量精度相对较高,只要设计合理,可以满足0.1 mm级测量误差的需求,比如文献[6]和文献[15]采用力矩平衡法能使测量结果的相对误差到0.1%,文献[10]采用扭摆法对动能拦截器的质心位置测量误差可达0.1 mm的数量级。但是从测量的操作过程来看,扭摆法操作过程繁琐,测量前准备工作较多,所以力矩平衡法最适合轻小型红外成像稳定平台的质心位置测量。

### 3.2 测量平台组成与原理

测量中采用的测量平台是根据力矩平衡法研制而成,其原理模块如图3所示。平台结构由支撑工装、传感器和数据采集及处理系统组成。支撑工装的作用是承载传感器及被测物体,传感器为压力传感器和距离测试仪,分别提供被测物体的重量和位移信息,测试数据采集及处理系统集成在计算机平台内,用于实时采集和处理传感器信号并输出质心位置。

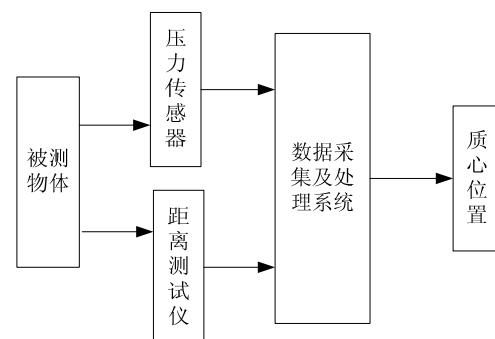


图3 仪器原理模块图

Fig.3 The composition of instrument

由于稳定平台的内外框架都是旋转机构,故其质心按柱坐标系表示比较方便,即轴向位置、径向偏心角和偏心距。其中,轴向位置用普通三点法原理即可得出,径向偏心角和偏心距的测量原理略有不同,但仍然是基于力矩平衡的原理。如图4所示,首先将被测物轮廓圆周以四等分标注记号,分别定义为0°,90°,180°,270°,以利于质心偏心角基准的确定。假设稳定平台的质心位置在黑点处,其距中轴线距离为E,与水平位置夹角为A,支承座到压力传感器的距离为L<sub>e</sub>,支承座到中心线的距离为B,稳定平台重力值为P(单独测出),空载时压力传感器读出压力值为F<sub>0</sub>,加载时压力传感器读出压力值为F<sub>1</sub>,则根据力矩平衡可建立平衡关系如下:

$$(E \cos A + B)P = (F_1 - F_0)L_e \quad (2)$$

式中E、A、B、L<sub>e</sub>是未知数,同理将稳定平台分别旋转90°、180°和270°时按照式(2)的平衡关系列出方程,求解以上4个等式组成的方程组即可获得E、

A 的值。

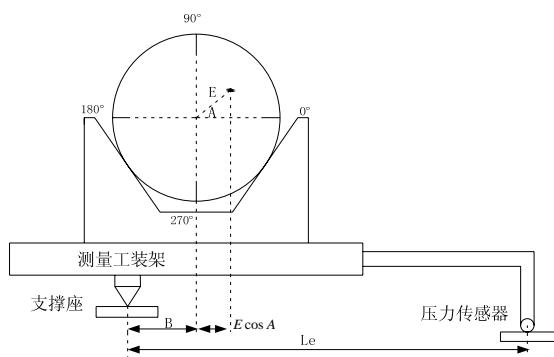


图 4 偏心角和偏心距原理示意图

Fig.4 Theory of the eccentricity and eccentric angle testing

### 3.3 测量结果

为了便于稳定平台质心位置的测量,设计了特殊的工装,如图 5 所示。在测量时,首先测量工装的质心位置,然后测量工装和平台的总体质心位置,最后利用等效质心公式(1)除去工装的影响即可得出平台本身质心位置。在测量整体质心位置时,通过对称放置垫片将内框架固定在其光学系统轴线与外框架旋转轴线垂直的位置,以便于测量。

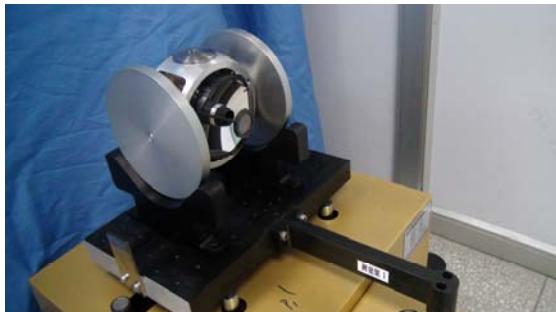


图 5 测量工装图 Fig.5 The picture of testing process

利用上述仪器对红外成像稳定平台进行测量,得出结果见表 1 和表 2。

通过表中各组数据的对比可知,内框架轴向质心位置误差的最大为 0.082 mm,最大径向质偏位置误差为 0.028 mm,整体结构最大轴向质心位置误差为 0.06 mm,最大径向质偏位置误差为 0.034 mm,在测量精度上基本满足需求。

表 1 内框测量结果 Table 1 The result of the inside frame

测量序号	轴向质心/mm	径向质偏/mm	偏心角/(°)
1	-0.064	1.378	26
2	-0.105	1.391	24
3	-0.027	1.375	21
4	-0.037	1.403	25
平均值	-0.05825	1.3860	24.007

表 2 整体测量结果 Table 2 The result of all the frames

测量序号	轴向质心/mm	径向质偏/mm	偏心角/(°)
1	0.846	1.346	309
2	0.813	1.369	305
3	0.873	1.375	303
4	0.869	1.380	304
平均值	0.8502	1.3665	305.23

### 3.4 关键点分析

#### 3.4.1 传感器的选用

由力矩平衡法的测量原理可知,测量结果的精确度取决于参与公式计算的参数的精确度,而这些参数往往通过传感器获得,也就是说,传感器的测量精度决定了最终测量结果的精度,所以传感器要在成本允许的情况下选择高精度的传感器。另外鉴于人工读数的随机性,建议传感器的读数应尽量采用电子读出方式。在所用仪器中压力传感器的精度为 0.1 g 量级,测距传感器的精度为 0.02 mm 量级。

#### 3.4.2 工装的设计

工装的主要功能是承载被测物体,它是联系被测物体和测试仪器的纽带。在对轻小型稳定平台进行工装设计时,主要考虑以下因素:

1) 工装的重量要根据压力传感器的量程和被测物的重量而定,一般而言工装的重量不宜大于被测物的重量,且工装和被测物重量的总和不宜超过传感器量程的 80%。

2) 工装的结构设计要遵循以下原则:首先要利于被测物的装卡,这是工装最基本的功能;其次工装上要有明确的测量基准和装卡基准标志,以利于重复装卡和测量时使用同一参照;最后工装要具备一定的通用性,在测量同类型不同尺寸的物体时,无需更换工装或只需要更换部分装卡件即可达到测量目的,这样能够使测量仪器物尽其用。

## 4 总结

红外成像导引头的质量不平衡力矩是影响其稳定平台伺服性能的主要因素之一,为了利于配平或对力矩进行建模和分析,必须对其质心位置进行测量。而由于该类型的稳定平台结构复杂、测量精度要求高,再加上轻小型化的设计要求,故对其质心测试方法提出了难题。本文首先概述了质心测量技术的各种方法,并对这些方法进行了对比分析。然后对轻小型稳定平台的结构特点和测试需求进行了阐述,根据其结构特点和测试需求,建议采用力矩平衡法对其质心位置进行测量,并给出了测量结果。从测量结构来看,

力矩平衡法能够胜任轻小型稳定平台质心位置的测量。最后本文对测量过程中的关键点进行了分析，并提出了几点建议。通过本文的分析和阐述，希望能对相关领域的工程设计人员提供一定的参考帮助。

## 参考文献

- [1] 徐全元, 鲁莹, 张聘义, 等. 基于遗传算法的红外成像导引头伺服控制系统设计与仿真[J]. 红外技术, 2012, 34(11): 657-662.
- [2] 王富国, 杨飞, 陈宝刚, 等. 大口径主焦点式光学系统轻量化结构设计、分析与实验[J]. 红外技术, 2011, 33(1): 4-8.
- [3] 邓学才. 怎样确定构件的重心位置[J]. 建筑工人, 2000(10): 16-17.
- [4] 张蔚峰. 轴系多校正面动平衡测试技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- [5] 张可强. 复杂回转体零件简易质心测量装置的设计[J]. 机械工程师, 2008(12): 157-158.
- [6] 于治会. 棒形轴对称构件轴向质心位置的测定[J]. 计量与测试技术, 1999(5): 15-16.
- [7] 施晓云. 回转体质量特性参数精密测量研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [8] 丛大成, 姜洪洲, 韩俊伟, 等. 大型特种车辆质心测试系统[J]. 机床与液压, 2005(3): 26-27.
- [9] 郑宾, 侯文, 杨瑞峰. 大尺寸柱状结构质量质心测量方法[J]. 测试技术学报, 2002, 16(2): 108-111.
- [10] 丁军辉, 郑建辉, 梁明. 导弹质心测量设备测量误差分布研究[J]. 战术导弹技术, 2011(1): 72-75.
- [11] 贝超. KKV 质心、质量、转动惯量一体化测量方法研究[J]. 现代防御技术, 2000, 28(6): 12-18.
- [12] 唐文彦. 扭摆法测量飞行体转动惯量[J]. 南京理工大学学报, 2008, 32(1): 69-72.
- [13] 王文周, 于治会. 小型弹体转动惯量的测定[J]. 宇航计测技术, 2002, 22(2): 40-50.
- [14] 吴斌, 杨全洁. 用扭摆法测量导弹惯性积的误差分析[J]. 弹箭与制导学报, 2005(4): 153-155.
- [15] 余卓平, 左建令, 陈慧. 复杂形状构件转动惯量的测量方法及误差分析[J]. 机械设计, 2005(10): 38-39.