

基于力矩平衡原理的物体重量重心 测量系统的研究及应用

中航电测仪器股份有限公司 贾恒信, 李明波, 吕江涛

【摘要】 本文通过对基于力矩平衡原理物体的重量重心测量系统的组成、原理详细的阐述,并对影响系统精度的因素进行了分析,根据力矩平衡原理的要求以及实际应用中存在的问题,给出了在应用中注意的事项和解决问题的方法和措施,为基于力矩平衡原理的物体重量重心测量系统应用领域的进一步拓展具有借鉴作用。

【关键词】 力矩平衡;重心;测量系统;测力传感器;应用

一、概述

确定物体重量及重心的位置在工程上有着非常重要的意义,特别是在有安全要求的物体应用上尤显其重要性。如在飞机的飞行过程中、飞机重心必须限定在一个相当小的设计要求范围内,尤其是飞机的起飞和降落飞机重心的准确度直接影响着飞机的飞行安全;在汽车、火车的机车的重心关系到汽车、机车的牵引的运动性、运行的稳定性和转向的安全性;在机载各种机器设备的研制过程中,各种机器设备重量重心的确定是设计减震系统必不可少的一项工作;在机车、船舶、坦克等重型工程装备中,重心的检测和测定也是一项必不可少的步骤。由于重心的测量原理已经特别明确,针对不同的被测对象可以采用不同的测量方法;目前测量物体重心坐标方法有引力法、悬挂法、力矩平衡法、质量矩守恒法等多种,对于重量较大的物体重心测量,力矩平衡法是现在最常用的一种,利用力矩平衡原理测量物体重量及重心的方式目前有三种方式:称重平台式、悬挂式、千斤顶式。无论何种方式都是通过3点、4点或多支撑点的测力传感器感知力值的大小,再通过采集系统对传感器感知力值数据信号的采集,通过计算机软件对该信号的解算,便得到物体重心的位置值,这便是本文将要介绍的基于力矩平衡原理的物体重量重心测量系统。

二、系统的基本原理和组成

1、系统组成和原理

系统由多套测力传感器(或称重平台)、一套称重仪表箱(含有数字模块、电源模块、RS232连接器等)、一台笔记本电脑(含相应的软件)等部件组成。

从各测力传感器(或称重平台)感知的力信号通过数字模块进行采集、A/D转换、处理,然后

通过信号线与笔记本电脑连接，由笔记本电脑中的相关软件对仪表采集传输的信号进行处理解算得到物体重心数据。系统组成原理图如图 1 所示。

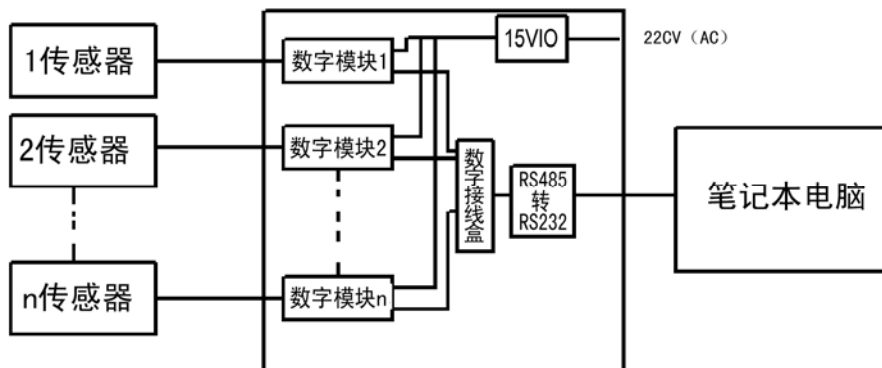


图 1 系统组成原理图

2、系统的支撑操作组合方式

利用力矩平衡原理测量物体重量及重心的方式目前有称重平台式、悬挂式、千斤顶式三种，因系统支撑操作不同而有多种组合。其一，单一的称重平台式是在每一测力的支撑点下放置一台称重平台，通过称重平台感受被测物体施加的力；其二，悬挂式是通过多套拉式测力传感器将被测物体以一定的要求悬挂起来，由拉式测力传感器感知被测物体施加的力；其三，千斤顶式是在每一支撑点下的千斤顶部配装一压式测力传感器，通过千斤顶顶推测力传感器，测力传感器顶起被测物体进行测力；其四，在每一称重平台上放置一千斤顶，将称重平台作为千斤顶的底座平台，由千斤顶支撑被测物体，通过称重平台感知所测力；以上这四种组合形式可根据被测物体的实际，需灵活组合和使用。

三、基于力矩平衡原理物体重心的计算及应用

1、力矩平衡原理及物体重心计算

力矩可以使物体向不同的方向转动，如果这两个力矩的大小相等，杠杆将保持平衡，这是初中课本中的杠杆平衡条件，是力矩平衡的最简单的情形。如果把物体向逆时针方向转动的力矩规定为正力矩，向顺时针方向转动的力矩规定为负力矩，则有固定转动轴的物体的平衡条件是力矩的代数和为零，即作用在物体上多个力的合力矩为零的情形叫做力矩的平衡。

在工程实际中，人们一般根据力矩平衡原理以及静态力系平衡方程，通过多个测力传感器支撑物体处平衡状态，以确定各个支撑点力的大小，根据力矩的方向（逆时针或顺时针）以确定力的方向，通过测量以确定各个支撑点力作用线的位置。如设各个支撑点力值为 $(\bar{F}_1, \bar{F}_2 \cdots \bar{F}_n)$ 且是平行力系，令坐标系 z 轴与力的作用线平行。各力作用点 $A_1(x_1, y_1, z_1) \cdots A_i(x_i, y_i, z_i) \cdots A_n(x_n, y_n, z_n)$ 假定物体的重心 C 的坐标为 (x_c, y_c, z_c) ，则由力矩平衡原理可知

对 ox 轴取矩

$$M_x(\bar{F}) = \sum_{i=1}^n M_x(\bar{F}_i) \quad \text{得} \quad -Fyc = -\sum_{i=1}^n F_i y_i$$

$$\text{对 } oy \text{ 轴取矩 } M_y(\bar{F}) = \sum_{i=1}^n M_y(\bar{F}_i) \quad \text{得} \quad Fxc = \sum_{i=1}^n F_i x_i$$

$$\text{同理得} \quad Fzc = \sum_{i=1}^n F_i z_i$$

由上三式可得

$$\left\{ \begin{array}{l} x_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i x_i}{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i x_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \\ y_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i y_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \\ z_c = \frac{\sum_{i=1}^n F_i z_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \end{array} \right.$$

在实际应用中，物体重心的测量并非如此简单，因物体结构、外形纷繁多样、空间条件所限等因素的影响，各个力点的坐标无法实际测量得到，如 Z 轴的坐标；一般均在物体表面设一固定点作为坐标原点，如飞机的机头顶点或千斤顶的顶窝点，或也有在物体上一虚拟点作为坐标原点等，将空间坐标系转换为二维平面坐标系，再通过运用倾斜法，根据力矩平衡原理求得相应的重心坐标。

2、基于力矩平衡原理的物体重量重心计算应用

(1) 飞机重量、重心的测量

飞机的重量、重心测量一般有三点支撑测量和四点支撑测量，本文以三点支撑测量为例进行飞机重心计算。图 2 为飞机三点支撑示意图，建实际支撑点坐标系如图 2 所示。

将三维坐标系简化为二维平面坐标系 XOZ，设三个支撑点 A、B、C 称重传感器受受力值为 F_1 、 F_2 、 F_3 ，飞机重心在 XOZ 坐标系坐标 D (X、Z) (如图 3 所示飞机水平状态时的 XOZ 坐标系)，飞机总重量为 W，AO=L；根据静力学原理，则有 $W = F_1 + F_2 + F_3$ ；

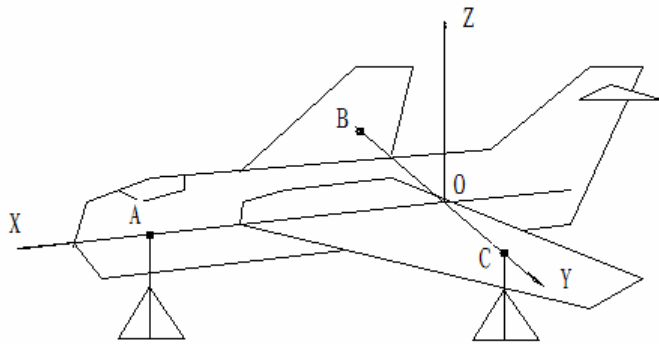


图2 飞机三点支撑示意图

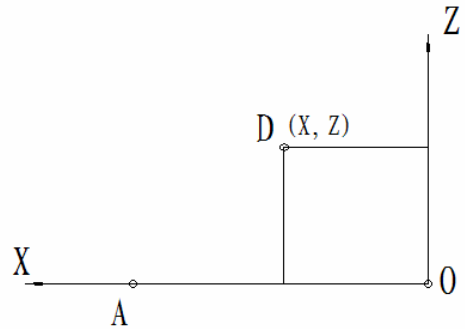


图3 飞机水平状态简图

将重心投影到OX轴，并对O点取矩，根据力矩平衡原理，则有 $F_1 \times AO = W \times X$

所以
$$X = \frac{F_1}{F_1 + F_2 + F_3} L \quad (1)$$

运用倾斜法求Z坐标，保持B、C支撑点的状态不变，抬高A点支撑（一般抬高200mm，然后再抬高400mm），设此时飞机产生的俯仰角为 α ，A、B、C称重传感器受力力值为 F_{11} 、 F_{22} 、 F_{33} ，XOZ坐标系变为图4形式。

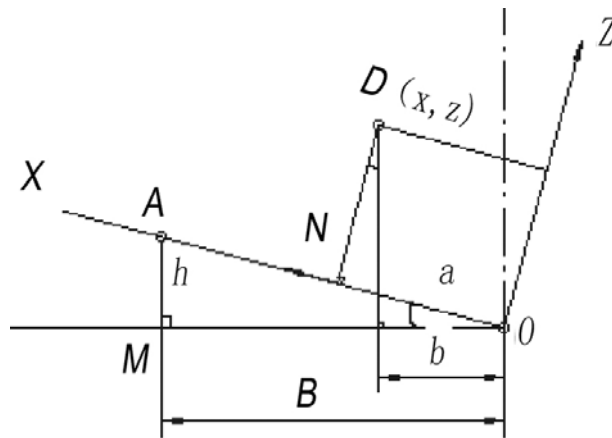


图4 飞机俯仰状态简图

将A、D点投影到水平线MO上，对O点取矩，根据力矩平衡原理，则有 $F_{11} \times B = W \times b$
而 $B = L \cos \alpha$ ， $b = X - Z \text{tg} \alpha$

即
$$F_{11} \times L \cos \alpha = W \times (X - Z \text{tg} \alpha) \quad (2)$$

式(1)代入式(2)得

$$Z = L(F_1 - F_{11} \cos \alpha) / (F_1 + F_2 + F_3) \text{tg} \alpha \quad (3)$$

式(1)和(3)组成了飞机支撑点坐标系的飞机重心坐标 X、Z 值的公式；应用同样的方法可以求出 Y 坐标值。

在飞机设计中，均以飞机机体坐标系为主，一般飞机重心计算和测量结果要求在飞机机体坐标系中给出，因此根据以上公式测量的飞机实际重心位置，最后需要通过几何方法转换到飞机机体坐标系上表示。

(2) 汽车重量、重心的测量

汽车重量、重心的测量以两轴四轮汽车为例，采用四点支撑测力的方法来求取重心，其受力示意简图如图 5 所示，由于汽车为对称性设计，即 $AB=DC$ ， $AD=BC$ ，故四支撑点成一成方形，设 $AB=DC=a$ ， $AD=BC=b$ ，汽车的重心坐标为 (X, Y, Z) ，A、B、C、D 四点称重传感器或称重平台所测力值分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ，则有汽车总重 $W = F_1 + F_2 + F_3 + F_4$ 。

根据力矩平衡原理，分别对 X、Y 轴取矩，

则有：

$$X \times W = AB/2 \times (F_1 + F_4) - AB/2 \times (F_2 + F_3)$$

$$Y \times W = AD/2 (F_2 + F_1) - AD/2 (F_3 + F_4)$$

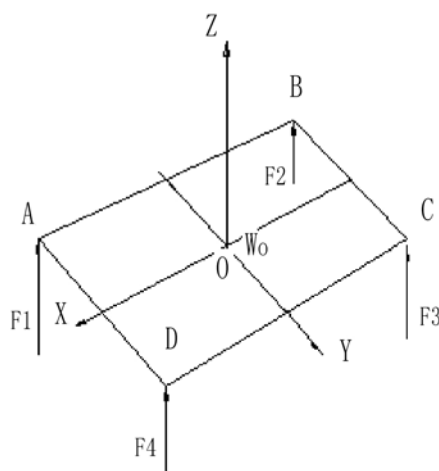


图 5 汽车受力示意简图

得：

$$X = [(F_1 + F_4) - (F_2 + F_3)]a/2 \times (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (1)$$

$$Y = [(F_2 + F_1) - (F_3 + F_4)]a/2 \times (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \quad (2)$$

Z 坐标的求解与飞机重心测量 Z 坐标方法相同，也采用倾斜法，其二维平面简图如图 6 所示，设此时 A、B、C、D 四点称重传感器或称重平台所测力值分别为 F_{11} 、 F_{22} 、 F_{33} 、 F_{44} ，对 B 取矩，根据力矩平衡原理，求得 Z 坐标公式最终结果为：

$$Z = \left\{ 1 + \frac{[(F_1 + F_4) - (F_2 + F_3)] - [(F_{11} + F_{44}) - (F_{22} + F_{33})]}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \right\} a/2 \tan \alpha \quad (3)$$

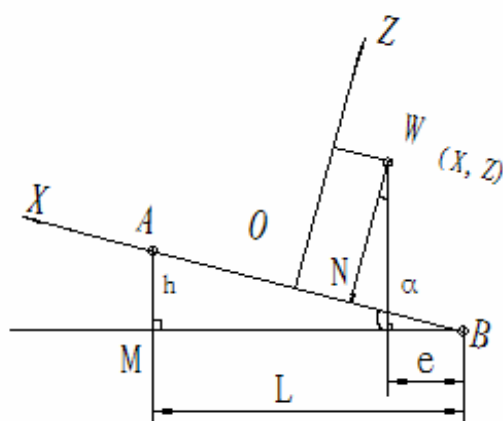


图6 汽车平面示意简图

四、系统软件的设计

基于力矩平衡原理的物体重量重心测量系统的软件按一定的规范进行了设计，并充分吸收国外先进物体重心测试系统软件的通用性、模块化、工程化的设计理念，采用模块化、开放式结构设计，通用性、移植性强，易于维护和使用，通过设计动态密码，很好的防止非法用户的进入本系统；采用Visual C++的高级编程语言进行了窗口界面设计，使人机交互方便、直观，并设计了物体重心坐标测量的程序代码，该程序不仅能够计算出实际的物体重心三维坐标，而且还能在屏幕上实时显示出物体重心的具体位置。

因此该软件具有数据显示、手动采集、自动采集、统计、计算、数据存储、自动采集时间间隔、手动设置、人工置零、查询及报表打印等功能。能实时显示各支撑点的重量及物体总重量，特别在飞机重心的测量中除根据给定的方法计算飞机重心位置并显示外，还可绘制飞机放油时的重心变化曲线，分析结果及打印各项数据。三点支撑式飞机称重界面如图7所示。

五、影响因素的分析和解决方法

1、影响因素分析

(1) 运用力矩平衡原理测量物体的重量和重心位置，对物体的要求是刚体的或物体受力变形小的，同时对物体的重心要求是不变的或者变动非常小，但在实际应用上，如飞机机翼刚性较差，受支撑力后变形较大，飞机空机以及油罐车、汽车等设备，都或多、或少都有油料或液体的存在，这将都会影响重心的测量精度。

(2) 基于力矩平衡原理测量物体的重量和重心位置，采用的是多个单支撑独力受力测量或称重测量，物体受支撑力变形或因采用倾斜法测量时所产生的侧向力，均由支撑传感器或称重平台承担，因此影响称量精度。



图7 三点支撑式飞机称重界面图

(3) 一般电子衡器在称重时时间很短，国标要求仅为 30min，而物体重心测量如飞机称重时要做各种姿态调整、放油等试验，用时在 6 小时以上，因此重量、重心测量系统所用仪表、传感器的温度性能、传感器的蠕变性能、传感器的抗侧向力要求、以及称重平台的传力结构、平台架的结构形式等要求都将影响着测量结果。

(4) 该系统一般为移动使用，如飞机称重所用（除固定式称重平台外）测量方法一般为可移动式的，因此地域变化较大，很难保证物体水平，同时其支撑传感器或称重板使用状态与标定状态不一致，影响着测量精度。

(5) 对于大型设备重心测量时，其安全性要求较高，如飞机、1200 吨海工平台、汽车等设备的称重，因此在物体重量、重心系统的前期设计时，对其结构设计结构、软件设计、闭环控制设计以及重要的原材料选用和使用要求等方面都要进行慎重考虑和严格要求，以保证物体安全测量。

2、解决方法和措施：

(1) 为保证系统的精度要求和长时间（大于 6 小时）连续称重，在设计称重平台结构时，保证称重平台中心绕度在最大载荷作用下不大于传感器支撑点长度的 1/1000，并要求称重平台的高度尽可能的低，以便降低系统称重平台重心，保证测量稳定、可靠、准确。

(2) 为了减小或消除传感器在物体称重时的侧向力，保证系统的标定状态与使用状态一致，使称重系统误差符合要求，在设计称重系统的结构时，除传感器采用四柱式和双膜盒结构外，传感器附件采用了可滑移回位传力机构，该机构在称重平台组称重时可进行 360 度方向滑移 30mm，当

称重结束后附件自动回到原位,采用千斤顶式支撑形式时,在千斤顶座下的可回位滑板也是采用此原理设计的。

(3) 为保证大于 6 小时的长时间加载稳定性要求,传感器弹性体采用优质合金钢 40CrNiMoA 或优质不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb,经专门、成熟的机加工工艺加工和热处理工艺处理;传感器所用应变计须经过同批挑选、老化、去应力等处理,以及进行温度性能筛选,同时传感器进行用高性能、高精度检测设备严格的检测等措施,以保证传感器的长期稳定性要求,并从中再挑选性能指标优者(特别是温度、蠕变、滞后优者)。

(4) 为了保证系统精度,该系统采用了 FLINTEC 高精度数字模块,其非线性精度高达 0.001%,内部精度为 ± 1050000 (A/D20bit),使用温度范围为 -10 到+50,采集速度优于 100 次/s;并对仪表或模块逐个进行了温度性能试验和筛选,以保证称重系统长期稳定性好、精度高。

(5) 为保证安全性,在设计该系统用传感器时,除通过选择弹性体合理科学的结构外,并对传感器的安全负载能力(150%F.S)和极限负载能力(300%F.S),进行合理计算和严格保证;在称重平台上设计有阻轮挡条,在千斤顶式的称重系统中,在装有滑板的千斤顶与滑板之间设计有连接锁紧机构;在控制方面,除严格设计液压举升同步要求外,还通过采用位移传感器进行闭环控制以保证安全,可靠要求。

六、结语

基于力矩平衡原理的物体重量重心测量系统,经普遍使用,其测量准确,重复性好,抗干扰、抗侧向力强,适合多种物体的重量重心测量;我们公司已经先后成功的应用到国内多家航空主机厂、维修厂、研究所如陕西飞机工业(集团)有限公司、成都飞机工业(集团)有限责任公司、中国飞行试验研究院(630所)、601所、611所等多家单位研制生产的歼击机、运输机、无人机、轰炸机、教练机、直升机等多机型以及螺旋桨叶、雷达机载等多种零部件的重心测量中;同时应用到我国自主研发的 1200 吨海工平台重心测量中,应用到我国汽车以及机车的重心测量中,为向我国诸如导弹、鱼雷、弹射椅、靶机、坦克等军工领域、民用飞机、汽车、火车机车等领域的产品、设备以及零部件的重心测量进一步拓展应用提供可靠的技术保障。

参考文献:

1. 陈柯行. 新一代便携式飞机称重系统的研究及应用. 新技术新仪器, 1999, 19(5); 45-48.
2. 潘若刚. 高精度全机重心测量方法的探讨. 飞机设计, 2010, 4, Vol.30 NO.2.
3. 王洪业. 传感器技术. 湖南: 湖南科学技术出版社, 1985.
4. 于亚非. 重量反应法在汽车重心高度测试中的应用. 福建技术监督, 1996.2.