

基于数字式智能飞机称重系统原理准确 测量飞机机轮轮距

中航电测仪器股份有限公司 贾恒信 张展

【摘 要】 本文通过对数字式智能飞机称重系统原理和力矩平衡原理的介绍和分析，提出了采用数字式智能飞机称重系统和运用力矩平衡原理对飞机机轮轮距（即飞机在秤台上的实际力作用点位置）准确测量的方法，并给出了该方法应注意的事项，从而保证了准确、快捷、方便的测量飞机机轮轮距。

【关键词】 数字式；飞机称重；力矩平衡；轮距测量

引 言

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，力矩平衡法是现在最常用的一种。近年来，随着测力传感器从模拟到数字化的发展，研究与实践不断完善数字式智能化电路，数字补偿技术与数字补偿工艺，开发整体型数字式智能测力传感器和数字式智能称重系统技术已经成熟；同样，飞机称重系统也随着数字式传感器和数字式称重系统智能化的发展而发展。虽然飞机机轮轮距的测量从传统的皮尺测量到目前高精度、高成本的激光三维测量，但无论其所测得轮距如何精确，其结果仅仅为飞机机轮的几何中心点的连线长度，而非飞机机轮作用地面（或秤台面）时的实际力作用点的连线长度，这必然影响了飞机重心的测量结果。本文通过对数字式智能飞机称重系统原理和秤台结构进行介绍和分析，提出了采用数字式智能飞机称重系统结构特点和运用力矩平衡原理对飞机机轮轮距（即飞机在秤台上的实际力作用点位置）准确测量的方法，并给出了该方法应注意的事项，从而保证了准确、快捷、方便的测量飞机机轮轮距。

一、飞机机轮轮距测量的现状和数字式智能飞机称重系统的特点

1.1 飞机机轮轮距测量现状

测量飞机机轮轴中心两点连线长度的工作，通常需要测定其水平距离，即飞机机轮轴中心两点连线投影在某水平基准面上的长度。目前飞机机轮轮距测量从最早的钢卷尺、皮尺等传统的测距工具向光学、磁波测距仪、电子全站仪、电子水准仪以及全能型和激光智能化方向发展，测量精度也越来越高。但再高的测量精度也仅仅是飞机机轮轮距的几何位置尺寸，而不是飞机机轮实际作用在地面或称重平台上力的作用点的位置尺寸，飞机进行重量重心测量时采用的力矩平衡原理，其需要

的是实际力的作用点的位置尺寸，因此目前的测量方法影响了飞机重量以及重心测量的精度。

2. 力矩平衡原理

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方程，通过多个测力传感器支撑物体处于平衡状态，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。飞机重量重心测量就是采用力矩平衡原理进行测量，本文也将论述采用力矩平衡原理和采用实际应用的数字式智能飞机称重系统的称重平台对飞机机轮轮距进行测量的方法，该方法所测得的轮距为飞机机轮在各称重平台上力的作用实际点的相对位置尺寸，符合飞机重量重心测量的要求。

3. 数字式智能飞机称重系统的特点

飞机重量重心测量就是采用力矩平衡原理进行测量。利用力矩平衡原理测量飞机重量及重心的方式目前有三种方式：平台式测量方式、悬挂式测量方式和千斤顶式测量方式。无论何种测量方式都是通过 3 点（见图 1）、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的力值数据信号进行采集，通过计算机软件对该信号的解算，便得到飞机重心的坐标值。

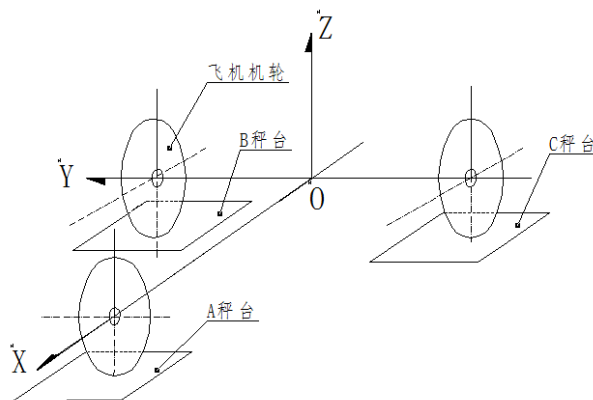


图 1 平台式飞机称重示意图

平台式测量系统是通过测量飞机起落架或支撑飞机千斤顶的受力情况来完成对飞机的称重，进而确定飞机的重心；平台式测量系统是在每一机轮或千斤顶下独立的秤体进行测量，即为轮重测量，每一秤台采用四只传感器支承秤台台面是最常见的结构形式。

数字式飞机称重系统是在称重传感器内部采用高集成化和高智能化的处理单元，将模拟信号进行 A/D 转换、滤波等预处理并进行数字化补偿后，输出数字信号。数字式称重仪表或所用电脑实时采集各传感器输出数据并进行处理后，进行显示；其主要特点是：（1）数字式飞机称重系统，可对该系统内的每一只传感器单独寻址，从而可对每只传感器进行监控、故障辨认，以及可以单独处理

每只传感器的称重信息，大大提高了称重系统的控制能力、灵活性和更加智能，该特点为采用力矩平衡原理和使用实际的飞机称重系统，对飞机机轮轮距的测量创造了条件；（2）秤台标定后，每个传感器的零点值和满载（净输出）值存储在仪表或电脑软件中，对秤台进行再次校正时，可与前次标定的数值进行比较，这个特点使飞机称重系统中传感器的稳定性监控变的简单；（3）数字称重系统可以直接处理每一只传感器提供的原始称重数据，每只传感器可提供高于 20bit 的分辨力，相当于 1,000,000 个计数，四支传感器的系统就可提供 $4 \times 1,000,000$ 个计数供分析，就飞机称重系统而言，这样高的分辨力的传感器再结合对传感器高精度的补偿（如：温度补偿、线性补偿等），用一套称重系统对多型号飞机的测量非常有利。

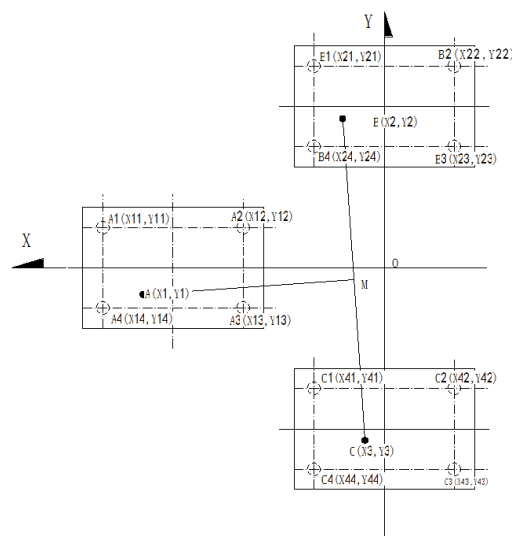


图 2 飞机称重秤台平面二维坐标系示意图

二、飞机机轮轮距测量原理和注意事项

1. 飞机机轮轮距测量原理

飞机机轮轮距的测量原理是利用数字式智能飞机称重系统的秤台特点，采用静力平衡方程和力矩平衡原理可以很方便的准确测量出秤台上的受力点的位置。

以三点式飞机重量重心测量系统为例（见图 1），对飞机机轮轮距的测量进行说明，取飞机称重秤台平面二维坐标系（见图 2），可以将该坐标系与飞机称重系统所用的坐标系在水平平面的二维投影很容易进行变换，保证了飞机重量重心测量系统与飞机机轮轮距测量软件的融合创造了条件。

假设 A 秤台飞机机轮施加的力值为 F_A ，坐标为 $A(X_1, Y_1)$ ，四只传感器的受力分别为 F_{Ai} ($i=1, 2, 3, 4$)，坐标分别为 $A_i(X_{1i}, Y_{1i})$ ($i=1, 2, 3, 4$)；B 秤台飞机机轮施加的力值为 F_B ，坐标为 $B(X_2, Y_2)$ ，四只传感器的受力分别为 F_{Bi} ($i=1, 2, 3, 4$)，坐标分别为 $B_i(X_{2i}, Y_{2i})$ ($i=1, 2, 3, 4$)；C 秤台飞机机轮施加的力值为 F_C ，坐标为 $C(X_3, Y_3)$ ，四只传感器的受力分别为 F_{Ci} ($i=1, 2, 3, 4$)，坐标分别为 $C_i(X_{3i}, Y_{3i})$ ($i=1, 2, 3, 4$)；

对于 A 秤台，以静力平衡原理得：

$$F_A = F_{A1} + F_{A2} + F_{A3} + F_{A4}$$

根据力矩平衡原理，分别以 X、Y 轴取矩（见图 2），得：

$$F_A \bullet X_1 = F_{A4} \bullet X_{14} + F_{A3} \bullet X_{13} - F_{A2} \bullet X_{12} - F_{A1} \bullet X_{11} \quad F_A \bullet Y_1 = F_{A4} \bullet Y_{14} + F_{A3} \bullet Y_{13} + F_{A2} \bullet Y_{12} + F_{A1} \bullet Y_{11}$$

$$X_1 = \frac{F_{A4} \bullet X_{14} + F_{A3} \bullet X_{13} - F_{A2} \bullet X_{12} - F_{A1} \bullet X_{11}}{F_{A1} + F_{A2} + F_{A3} + F_{A4}}$$

$$Y_1 = \frac{F_{A4} \bullet Y_{14} + F_{A3} \bullet Y_{13} + F_{A2} \bullet Y_{12} + F_{A1} \bullet Y_{11}}{F_{A1} + F_{A2} + F_{A3} + F_{A4}}$$

同样的方法，求得 B 秤台、C 秤台受力点的坐标分别为：

$$X_2 = \frac{F_{B4} \bullet X_{24} - F_{B3} \bullet X_{23} - F_{B2} \bullet X_{22} + F_{B1} \bullet X_{21}}{F_{B1} + F_{B2} + F_{B3} + F_{B4}}$$

$$Y_2 = \frac{F_{B4} \bullet Y_{24} + F_{B3} \bullet Y_{23} + F_{B2} \bullet Y_{22} + F_{B1} \bullet Y_{21}}{F_{B1} + F_{B2} + F_{B3} + F_{B4}}$$

$$X_3 = \frac{F_{C4} \bullet X_{34} - F_{C3} \bullet X_{33} - F_{C2} \bullet X_{32} + F_{C1} \bullet X_{31}}{F_{C1} + F_{C2} + F_{C3} + F_{C4}}$$

$$Y_3 = \frac{F_{C4} \bullet Y_{34} + F_{C3} \bullet Y_{33} + F_{C2} \bullet Y_{32} + F_{C1} \bullet Y_{31}}{F_{C1} + F_{C2} + F_{C3} + F_{C4}}$$

飞机称重系统装配调试完成，在飞机上秤台调水平后， F_{Ai} 、 F_{Bi} 、 F_{Ci} （ $i=1, 2, 3, 4$ ）以及相对应坐标 $A_i (X_{1i}, Y_{1i})$ 、 $B_i (X_{2i}, Y_{2i})$ 、 $C_i (X_{3i}, Y_{3i})$ （ $i=1, 2, 3, 4$ ）均为已知；

因此，飞机机轮主轮距根据两点坐标求线段长度公式得：

$$BC = \sqrt{(X_2 - X_3)^2 + (Y_2 - Y_3)^2}$$

同理，得：

$$AB = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}$$

$$AC = \sqrt{(X_1 - X_3)^2 + (Y_1 - Y_3)^2}$$

假设 $BC=c$ ， $AC=b$ ， $AB=a$

根据已知三边长求三角形面积的海伦公式得：

$$S = \frac{1}{4} \sqrt{(a+b+c)(a+b-c)(a+c-b)(b+c-a)}$$

根据三角形面积公式求得飞机前轮力作用点至主轮力作用点连线的垂直距离为：

$$AM = \frac{1}{2c} \sqrt{(a+b+c)(a+b-c)(a+c-b)(b+c-a)}$$

根据以上原理以及所得的 BC 和 AM 值，可以很方便的测得飞机机轮轮距，即飞机各轮在飞机秤台上的实际力作用点的距离，保证了飞机重心的测量更加准确。

2. 飞机机轮轮距测量注意事项

在设计飞机秤台时，除过考虑秤台的刚度、传感器的传力结构等要合理以外，还需注意以下几点：

(1) 平台秤结构一般为秤台通过 4 只传感器或多只传感器浮动支撑，浮动支撑采用的是钢球和球窝或者“不倒翁”结构，这两种结构都是滚动摩擦，而飞机在上秤台以前，机轮与地面摩擦系数大于该两种结构的滚动摩擦系数，飞机起落架的约束在秤台上进行了释放，其向外侧变形使得秤台与传感器支撑点发生移位，影响了飞机机轮轮距的测量精度；为此，须在秤台平面的 X、Y 方向上下台面之间各装一位移传感器进行补偿，如图 3 所示，以保证飞机轮距的测量精度。

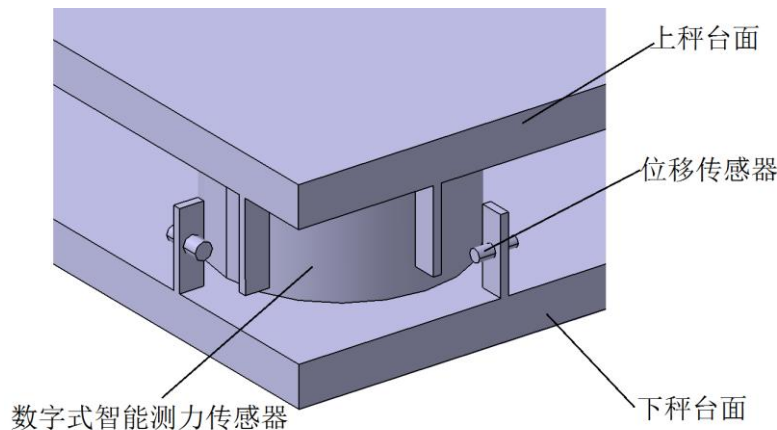


图 3 位移传感器补偿示意图

(2) 如果采用在平台秤台面上使用千斤顶顶升飞机进行飞机重量重心测量，因飞机机翼、机身的支撑受力变形和飞机支撑姿态的调整，使得秤台受侧向力，直接影响着系统的测量精度；除采用在秤台的上下台面之间加装一位移传感器进行补偿外，也可在千斤顶每一支脚下加装中航电测仪器股份有限公司研究的抗侧向力滑板以补偿因飞机顶升或飞机姿态调整而产生的位移偏差（侧滑板外形见图 4），抗侧向力滑板由上滑板、下滑板和弹性回位体等部件组成，上下滑板接触面使用摩擦系数非常小的材料，使用中当上滑板受横向力时，上滑板可压缩弹性回位体，实现在 360° 范围内 $\pm 30\text{mm}$ 滑移，测量结束后，其自动回位。



图 4 侧滑板

(3) 飞机机轮轮距测量所用仪表与测量软件, 采用飞机重量重心测量所用仪表, 其软件与飞机重量重心测量所用软件进行融合统一编制, 软件按一定的规范进行设计, 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。

三、结语

随着飞机飞行速度和高度的不断提高, 相应的飞机重心安全范围也在缩小, 随之对飞机重量重心的测量系统准确度的要求也相应提高, 因此为保证飞机重心的测量精度更高, 准确测量飞机机轮轮距也显得非常重要, 本文所介绍的测量飞机机轮轮距的方法简单、方便、成本低, 其技术可行, 特别是其所测得的飞机轮距实为飞机机轮实际力的作用点的位置, 更能保证飞机重心数据准确、可信, 笔者认为该方法也可向诸如汽车、火车等其它物体的轮距或力的作用点位置的测量发展, 同时也使飞机称重向数字化、智能化、自动化和高精度的发展成为可能。

参考文献

1. 刘九卿. 数字式智能称重传感器的发展与应用. 衡器, 2004.5.
2. 潘若刚. 高精度全机重心测量方法的探讨. 飞机设计, 2010.4.
3. 贾恒信 基于力矩平衡原理的物体重量重心测量系统的应用, 衡器, 2012.8.
4. 周祖濂 巧妙、准确测定重心测量装置的方法, 第十届全国称重技术研讨会论文集, 2011年.

作者简介

贾恒信 (1964 -) , 男, 学士, 中航电测仪器股份有限公司 技术专家/研究员级高工。

Tel : 13891619565 ; E-mail : hxjia@zemic.com.cn。

张展 (1986 -) , 男, 学士, 中航电测仪器股份有限公司 工程师。

Tel : 15109278550 ; E-mail : 15109278550@163.com。