

文章编号: 1000-582X(2011)12-023-06

飞行器质量特性参数测量

王秋晓, 王 迎

(重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 质量特性参数(质量、质心、转动惯量、惯性矩)是飞行器重要飞行技术参数,传统的测量质心和转动惯量分别采用质心台和扭摆台测量,一次只能获取安装方向上的质心和转动惯量。由于飞行器结构上的原因,要求物体在一次装夹下高精度获取所有物理参数。为解决这一问题,将质心台和扭摆台合并为一质量特性参数综合试验台,并在台面上安装了可旋转和水平倾斜的斜台,将试件在斜台一次装夹下,测量试件在不同状态下的转动惯量,利用坐标转换法计算出物体三轴转动惯量和惯性矩等质量特性参数方法。阐述了一次装夹下物体质量质心及转动惯量测量原理,讨论了产生测量误差主要原因,分析了斜台倾角误差对测量精度的影响。

关键词: 质量特性参数;质量;质心;转动惯量;扭摆;坐标转换;

中图分类号: TB936

文献标志码: A

A new measurement method for mass property parameters

WANG Qiu-xiao, WANG Ying

(College of Mechanical Engineering of Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Mass property parameters (mass, center of mass, moment of inertia) are important technology parameters of aircraft. The traditional mass and center of mass measurement uses centroid units, and the moment of inertia measurement torsion units, which can only get results in installing direction. Because of the structural reasons, there is a need to get all high accurate physical parameters in clamping once. To solve this problem, this study merges centroid units and torsion units into one composite unit, installs a table which can tilt and rotation to measure the moment of inertia in different conditions. The moment of inertia and product of inertia relative to three axis are calculated by the method of coordinate transformation. Measurement theory of mass, center of mass and mass moment of inertia are described, the main reason of causing measurement errors is discussed, and the measurement accuracy affected by tilt error is analyzed.

Key words: mass property parameters; mass; center of mass; moment of inertia; torsion; coordinate transformation

物体质量特性参数(质量、质心、转动惯量、惯性矩)是飞行器重要飞行技术参数,由于飞行器结构上的原因,往往要求在一次装夹下^[1]获取所有物理参数。研究高精度测量物体的质量特性^[2-5]参数受到广泛的重视。美国 Space Electronics 公司在质量特性参数测量方面拥有核心技术,推动了美国空间技

术的进步,其转动惯量测量设备采用气浮轴承结构,测量精度达到 0.2%,研制的称重传感器测量精度达十万分之三,居世界领先地位。

国内的质量特性参数测量方法和手段都比较落后,一般采用质心台测量质量、质心;用扭摆台测量转动惯量。质心台一次只能测量试件在水平面的质

收稿日期: 2011-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175529)

作者简介: 王秋晓(1963-),男,重庆大学副教授,博士,研究方向为机电工程,(Tel)023-65429037;(E-mail)wqxiao1963@163.com。

心位置,在垂直方向的质心位置需要将物体转动 90° 放置进行测量。扭摆台一次也只能测量出垂直方向上的转动惯量,且测量精度比较低。

几何形状规则的试件如圆盘、圆柱、球体等,根据外形可以直接计算或使用简单设备测量出转动惯量,但对外形不规则、内部质量分布不均匀试件的转动惯量,则只能通过专门的测量设备测得。测量方法有复摆法^[6]、三线扭摆法^[7-8]和扭杆扭振法^[9-10]等。复摆法所用设备结构简单、制造容易,但当摆角达 60° 时,其周期误差达 $\pm 6.8\%$,转动惯量误差达 $\pm 40\%$;三线扭摆法操作简单、精度高,但不适于测量大质量物体;扭杆扭振法是测量大质量、大尺寸物体转动惯量最常用的方法,其关键技术是无阻尼扭摆周期的测量,但这种方法受测量环境和被测件形状的影响较大,当系统阻尼较大时,其测量精度较低。在扭摆台中采用了气浮结构,减少了阻尼对转动惯量测试精度的影响。

卫星、导弹等飞行器由于外形结构上的原因,不允许放倒安装,只能通过一次安装获取所有质量特性参数,显然传统的质心台和扭摆台不能满足要求。为解决这一问题,将质心台和扭摆台合并为一个质量特性参数综合试验台,能同时测量试件在水平面质心和垂直方向上转动惯量。为测量出垂直方向上质心坐标和其他方向的转动惯量,在试验台上增加一斜台,其能够在水平面倾斜一定角度,同时又能绕自身轴旋转角度。通过一次倾斜,测量出试件在垂直方向上的质心位置。通过测量试件在不同位置和状态的转动惯量,建立联立方程,计算出试件的转动惯量和惯性矩。

1 质量、质心测量

1.1 测量原理

质量、质心测量采用平面三点静态测量法。如图 1 所示,在 A、B、C 3 点安装 3 个称重传感器,设测量物质量为 m 、质心坐标为 (x, y, z) ,在试件水平时,3 个传感器的测量值分别为 m_A 、 m_B 、 m_C 。则有

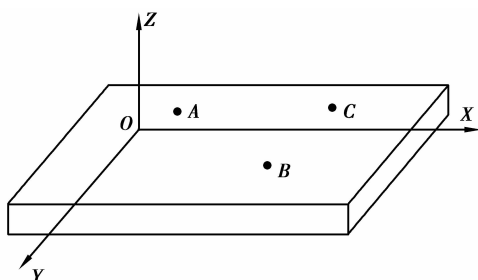


图 1 质量、质心测量原理图

$$\left. \begin{aligned} m &= m_A + m_B + m_C \\ mx &= m_A x_A + m_B x_B + m_C x_C \\ my &= m_A y_A + m_B y_B + m_C y_C \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当试件在 xOz 面绕 x 轴旋转 α 角时,3 个传感器的测量值分别为 m_{A1} 、 m_{B1} 、 m_{C1} 。则

$$\left. \begin{aligned} m &= m_{A1} + m_{B1} + m_{C1} \\ mz \cos \alpha &= m_{A1} z_{A1} (1 - \cos \alpha) + \\ & m_{B1} z_{B1} (1 - \cos \alpha) + m_{C1} z_{C1} (1 - \cos \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(1)、(2)得

$$\left. \begin{aligned} x &= (m_A x_A + m_B x_B + m_C x_C) / m \\ y &= (m_A y_A + m_B y_B + m_C y_C) / m \\ z &= [(m_{A1} z_{A1} (1 - \cos \alpha) + m_{B1} z_{B1} (1 - \cos \alpha) + \\ & m_{C1} z_{C1} (1 - \cos \alpha))] / m \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

1.2 质心误差分析

在质心、质量测试系统中质量测量误差主要来自称重传感器精度误差和测量用二次仪表误差,两者均为随机误差^[11]。质心误差主要有传感器测量、安装位置误差、试件安装轴线和理论基准线不一致造成的定位误差和测试平台转角误差等。从实际应用中知, x 与 y 值测量精度很高,而 z 值精度受转角误差影响相对较大。

对 z 求导得

$$\frac{dz}{d\alpha} = \frac{(m_{A1} z_{A1} + m_{B1} z_{B1} + m_{C1} z_{C1}) \sin \alpha}{m \cos^2 \alpha} \quad (4)$$

若设 α 的误差为 $\Delta\alpha$,则 $\Delta z \approx \frac{dz}{d\alpha} \Delta\alpha$,由图 2 知,当 α 值很小时, z 值测量误差 γ 变化很小,即 z 值受 α 误差影响较小;但当 α 值很大时, γ 值也随着变大。例如当 $m = 300 \text{ kg}$, $\Delta\alpha = \pm 30'$, $\alpha = 5^\circ$ 和 $\alpha = 45^\circ$,得 γ 值分别为 0.02% 和 1.8% ,因此在质心、质量测量中

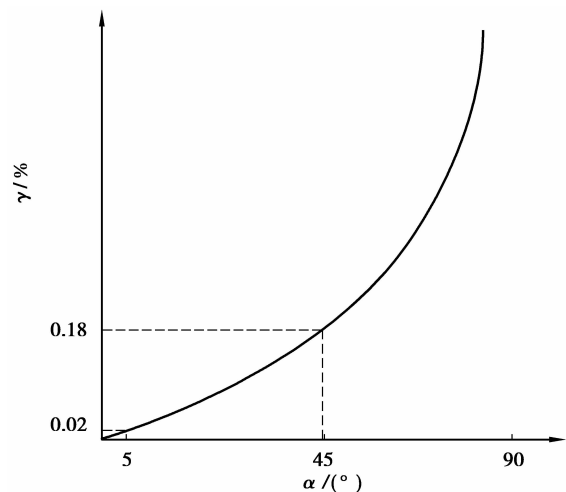


图 2 γ 与 α 函数关系图

应使 α 值尽可能的小。

2 转动惯量测量原理

2.1 扭杆扭矩法转动惯量测量原理

如图 3, 设扭杆摆动角为 θ , 转台转动惯量为 J , 空气阻力系数为 F , 扭杆刚度系数为 K , 则扭摆台的的振动方程为^[12-16]

$$\ddot{\theta} + 2\xi\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = 0. \quad (5)$$

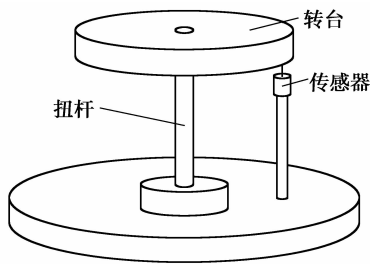


图 3 扭摆台工作原理图

其中: $\omega_n = \sqrt{K/J}$ 为无阻尼自振频率, $\xi = F/2\sqrt{KJ}$ 为阻尼比, $\omega_d = \sqrt{1-\xi^2}\omega_n = 2\pi/T_d$ 为阻尼振动频率; T_d 为阻尼振动周期, 为直接测量量。转动惯量的计算公式为

$$J = \frac{K}{\omega_n} = \frac{K}{(2\pi)^2} T = \frac{K}{(2\pi)^2} (1 - \xi^2) T_d^2 = \lambda T_d^2, \quad (6)$$

其中 $\lambda = \frac{K}{(2\pi)^2} (1 - \xi^2)$ 。

在气浮扭摆台中, 阻尼比 ξ 非常小, 为常数, 因此, 转动惯量与振动周期的平方成线性关系, 这是测量周期法的基础。

测量初始状态为

$$\left. \begin{aligned} \theta(0) &= \theta_0 \\ \dot{\theta}(0) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

则方程(5)的解为

$$\theta(t) = e^{-\xi\omega_n t} \theta_0 \cos(\omega_d t - \varphi). \quad (8)$$

其中 $\tan\varphi = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$, 即扭摆台的振动是一衰减的余弦曲线。

2.1.1 转动惯量测量方法

1) 测量转台空摆周期 T_0 , J_0 为转台和夹具的转动惯量, 则有

$$J_0 = \lambda T_0^2. \quad (9)$$

2) 测量转台与标准样件的共同摆动周期为 T_s , 标准样件的转动惯量为 J_s , 则

$$J_s + J_0 = \lambda T_s^2. \quad (10)$$

联合式(9)、(10)求解得

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{J_s}{T_s^2 - T_0^2} \\ J_0 &= \frac{J_s T_0^2}{T_s^2 - T_0^2} \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

3) 测量转台与被测体的共同摆动周期为 T_d , 被测体的转动惯量为 J_d , 则

$$J_d = \lambda T_d^2 - J_0. \quad (12)$$

2.1.2 阻尼误差分析^[17-18]

假设两个相邻测量振动周期测量误差为 Δt_i , 实际扭摆周期为 T 则

$$t_{i+1} = t_i + T + \Delta t_i. \quad (13)$$

将(13)式代入(8)有

$$\frac{\cos(\omega_d t_i)}{\cos[\omega_d(t_i + \Delta t_i)]} = e^{-\xi\omega_n(T + \Delta t_i)}. \quad (14)$$

由于(14)式等号右边小于 1, 所以在区间 $2K\pi \sim 2K\pi + \frac{\pi}{2}$ 有 $\Delta t_i < 0$ 。即摆动周期的测量值总小于实际值, 并且随着时间的延续, 测量误差也越来越大。

2.2 转动惯量坐标转换测量

2.2.1 测量原理

如图 4, 被测物体置于转台上, 转台相对斜台转动, 斜台可以倾斜一定的角度。设通过工件质心的工件坐标系 z 轴与大地坐标系 x', y', z' 轴夹角分别为 α, β, γ , 则转动惯量为

$$\begin{aligned} I &= I_x \cos^2 \alpha + I_y \cos^2 \beta + I_z \cos^2 \gamma - \\ &2I_{xy} \cos \alpha \cos \beta - 2I_{yz} \cos \beta \cos \gamma - 2I_{zx} \cos \gamma \cos \alpha. \end{aligned} \quad (15)$$

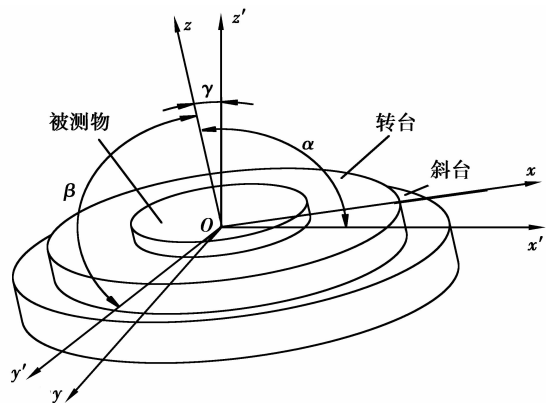


图 4 测量原理图

实际测量的转动惯量为测量物体在 z 轴方向的转动惯量,考虑以下几种状况

1) 当斜台为水平、转台在 0° 时,工件坐标系相对大地坐标系平行,即工件 z 轴的方向角为 $(90^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$, 质心坐标为 (x_c, y_c, z_c) , 根据(15)式和惯量平移

定理, z 轴的实际惯量为 $I'_{z(0^\circ, 0^\circ)}$ 则

$$I_z = I'_{z(0^\circ, 0^\circ)} - (x_c^2 + y_c^2)m \quad (16)$$

2) 在斜台绕 x 转动 α_1 、转台在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, \gamma_1^\circ$ 时, z 轴方向的实际惯量为

$$\left. \begin{aligned} I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)} &= I_y \sin^2 \alpha_1 + I_z \cos^2 \alpha_1 - I_{yz} \sin 2\alpha_1 + (x_{c1}^2 + y_{c1}^2)m \\ I'_{z(\alpha_1, 90^\circ)} &= I_x \sin^2 \alpha_1 + I_z \cos^2 \alpha_1 - I_{xz} \sin 2\alpha_1 + (x_{c2}^2 + y_{c2}^2)m \\ I'_{z(\alpha_1, 180^\circ)} &= I_y \sin^2 \alpha_1 + I_z \cos^2 \alpha_1 + I_{yz} \sin 2\alpha_1 + (x_{c3}^2 + y_{c3}^2)m \\ I'_{z(\alpha_1, 270^\circ)} &= I_x \sin^2 \alpha_1 + I_z \cos^2 \alpha_1 + I_{xz} \sin 2\alpha_1 + (x_{c4}^2 + y_{c4}^2)m \\ I_{z(\alpha_1, \gamma_1)} &= I_x \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha_1 + I_y \cos^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha_1 + I_z \cos^2 \alpha_1 - I_{xy} \sin 2\gamma_1 \sin^2 \alpha_1 \\ &\quad - I_{yz} \cos \gamma_1 \sin 2\alpha_1 - I_{xz} \sin \gamma_1 \sin 2\alpha_1 + (x_{c5}^2 + y_{c5}^2)m \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

整理式(17)得通过质心的转动惯量和惯性矩为

$$\left. \begin{aligned} I_x &= [I'_{z(\alpha_1, 90^\circ)} + I'_{z(\alpha_1, 270^\circ)} - 2I_z \cos^2 \alpha_1 - (x_{c2}^2 + y_{c2}^2)m - (x_{c4}^2 + y_{c4}^2)m] / 2\sin^2 \alpha_1 \\ I_y &= [I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)} + I'_{z(\alpha_1, 180^\circ)} - 2I_z \cos^2 \alpha_1 - (x_{c1}^2 + y_{c1}^2)m - (x_{c3}^2 + y_{c3}^2)m] / 2\sin^2 \alpha_1 \\ I_{yz} &= [-I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)} + I'_{z(\alpha_1, 180^\circ)} + (x_{c1}^2 + y_{c1}^2)m - (x_{c3}^2 + y_{c3}^2)m] / 2\sin 2\alpha_1 \\ I_{xz} &= [-I'_{z(\alpha_1, 90^\circ)} + I'_{z(\alpha_1, 270^\circ)} + (x_{c2}^2 + y_{c2}^2)m - (x_{c4}^2 + y_{c4}^2)m] / 2\sin 2\alpha_1 \\ I_{xy} &= \frac{I_x \sin^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha_1 + I_y \cos^2 \gamma_1 \sin^2 \alpha_1 - I_{yz} \cos \gamma_1 \sin 2\alpha_1 - I_{xz} \sin \gamma_1 \sin 2\alpha_1 - I'_{z(\alpha_1, \gamma_1)} + I_z \cos^2 \alpha_1 + (x_{c5}^2 + y_{c5}^2)m}{\sin 2\gamma_1 \sin^2 \alpha_1} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中 $x_{c1}, y_{c1}, x_{c2}, y_{c2}, x_{c3}, y_{c3}, x_{c4}, y_{c4}, x_{c5}, y_{c5}$ 分别为转台在时工件的质心坐标。

2.2.2 误差分析

其测量误差有质量、质心的测量误差、传感器精度误差、试件安装轴线和理论基准线不一致造成的定位误差和测试斜台倾角误差等。其中斜台的倾角误差对测量精度影响最大。

对测量值 $I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}$ 求得

$$D = \frac{d[I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}]}{d\alpha_1} = (I_y - I_z - 2I_{yz}) \cos 2\alpha_1 \quad (19)$$

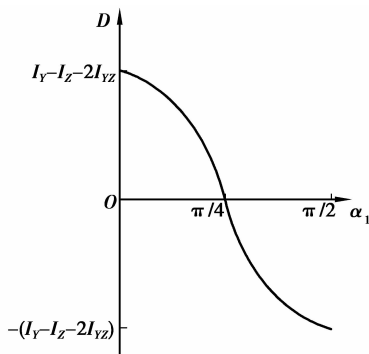


图 5 D 与 α_1 关系图

由图 5 知,若 α_1 的误差为 $\Delta\alpha_1$, 则 $\Delta I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)} \approx \frac{d[I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}]}{d\alpha_1} \Delta\alpha_1$, 当 α_1 值在 $\frac{\pi}{4}$ 附近时, $\Delta I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}$ 值变化很小,即转台的倾斜误差对 $I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}$ 值测量精度影响较小;但 α_1 值偏离 $\frac{\pi}{4}$ 较大时, $\Delta I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}$ 值也随着变大,即 $I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}$ 值测量误差变大。所以在测量中应使 α_1 值尽可能接近 $\frac{\pi}{4}$ 。

同理分析其他测量值,其结果是一样的。由于结构上的限制,实际设计中 α_1 值不能够接近 $\frac{\pi}{4}$, 例如当 $\alpha_1 = 15^\circ, \Delta\alpha_1 = \pm 0.2^\circ$, 解得 $I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}$ 的测量相对误差 $\gamma = \frac{\Delta I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}}{I'_{z(\alpha_1, 0^\circ)}} = 0.3\%$ 。

3 实验分析

图 6 为根据这一方法研制的质量特性参数试验台,转台在 $\varphi 410$ 圆周上均布的安装了三个称重传感器,其量程为 500 kg,精度 0.3%,用于质量质心测量。在中轴上装有扭杆,用于转动惯量测量。试验台面上装有一斜台,斜台面水平方向可倾斜 15° ,且绕中轴可旋转定位到 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, 利用

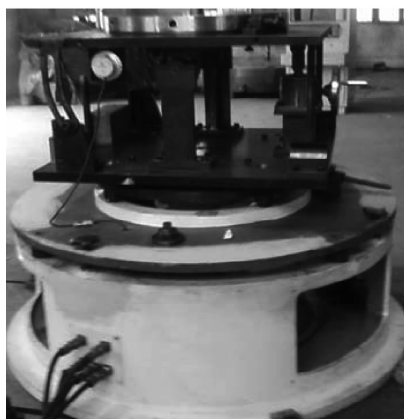


图 6 质量特性参数试验台

斜台可构成试件不同的位置状态的质心位置和转动惯量。试验砝码质量为 300 kg,直径为 360 mm,厚度为 375 mm,测量数据如表 1,由表可知所有的质量特性参数的相对误差都小于 0.5%,满足高精度的测量要求。物体的质量、质心坐标值测量相对误差较小,转动惯量 I_x 、 I_y 测量相对误差较大,主要原

因是其值是通过转台多次转动一定角度间接计算得到,不可避免的存在转角误差,而 I_z 可直接测得,精度相对较高。为了进一步提高测量精度,应尽可能得减小转角误差。

4 结 论

将质心台和扭摆台合为一体,构成质量特性实验台,通过可旋转和水平倾斜的斜台,试件一次装夹下可构成不同的位置坐标状态,通过测量其在不同状态下转动惯量,通过联立方程组,可求出通过质心的转动惯量 I_x 、 I_y 、 I_z 以及惯性矩 I_{xy} 、 I_{yz} 、 I_{zx} 等。这种方法可以在试验台上通过一次装夹,测量出物体的质量、质心、转动惯量惯性矩,为解决飞行器等仅能一次安装试件质量特性参数的测量提供了一种新的方法和手段,同时避免了试件多次安装基准不重合造成的测量误差。随着传感器精度的提高,可进一步提高这种方法的测量精度。这种一次装夹下获取物体全部质量特性参数的新方法,在空间技术等领域具有广泛的应用前景。

表 1 质量、质心及转动惯量数据

测量均值 计算值	质量/kg	质心/mm	转动惯量测量数据/(kg·m ²)					
	m	x, y, z	$I'_{z(0^\circ,0^\circ)}$	$I'_{z(15^\circ,0^\circ)}$	$I'_{z(15^\circ,90^\circ)}$	$I'_{z(15^\circ,180^\circ)}$	$I'_{z(15^\circ,270^\circ)}$	$I'_{z(15^\circ,45^\circ)}$
	299.96	0.021,0.019,187.21	4.861 4	4.935 6	4.933 5	4.935 2	4.932 7	4.934 4
			I_x	I_y	I_z	I_{xz}	I_{xy}	I_{yz}
			5.931 7	5.966 1	4.861 4	0.000 4	0.000 8	-0.000 1
理论值	300	0, 0, 187.5	5.945 6	5.945 6	4.86	0	0	0
相对误差/%	0.012	0.01,0.01,0.02	0.23	0.34	0.03	0.04	0.08	0.01

参考文献:

[1] 贝超. KKV 质量、质心、转动惯量一体化测量方法研究 [J]. 现代防御技术, 2000, 28(6): 21-25.
BEI CHAO. An approach to the integrated measurement of mass, center of mass and rotary inertia of KKV [J]. Modern Defense Technology, 2000, 28(6): 21-25.

[2] 张根保, 曾海峰, 王国强, 等. 复杂机电产品质量特性解耦模型 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 7-15.
ZHANG GEN-BAO, ZENG HAI-FENG, WANG GUO-QIANG, et al. Decoupling model of quality characteristics for complicated electromechanical products [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 7-15.

[3] ZHAO J, GUAN Y Z, QI N M. Analysis of method for determining azimuth of principal axis of inertia based on dynamic balance measurement [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering Scientific instrument, 2006, 19(4): 530-533.

[4] XU H, LIU S Q, YU L. Study on electro-magnetic suspend system damping of a test rig for measuring moment of inertia [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2001, 35(12): 1288-1291.

[5] HOU W, ZHENG B, YANG R F. A measuring method on moment of inertia of large-scale ammunition [J]. Journal of China Ordnance Society, 2005, 1(1): 41-45.

[6] 刘守法. 改进的复摆法测复杂零件转动惯量及仿真分析 [J]. 煤矿机械, 2009, 30(12): 53-55.
LIU SHOU-FA. Measurement of rotational inertia of complex parts with improved compound-pendulum theory and simulation [J]. Coal Mine Machinery, 2009,

- 30(12):53-55.
- [7] 宋超,潘钧俊.用三线摆方法测试物体转动惯量的误差问题[J].力学与实践,2003,25(1):59-61.
SONG CHAO,PAN JUN-JUN. The error in measuring the moment of inertia using three-string pendulum[J]. Mechanics In Engineering,2003,25(1):59-61.
- [8] 邹莹,夏阳.一种通用的设备转动惯量测量方法[J].航天控制,2008,26(5):74-76.
ZOU YING,XIA YANG. A universal measurement method for apparatus moment of inertia in hardware-in-the-loop simulation [J]. Aerospace Control, 2008, 26(5):74-76.
- [9] 唐文彦,李慧鹏,张春富.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.
TANG WEN-YAN,LI HUI-PENG,ZHANG CHUN-FU. Measurement of flight object's moment of inertia using torsion pendulum [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2008, 32(1):69-72.
- [10] 李彤华,朱占刚,尚春民,等.扭摆法测弹体转动惯量的误差分析[J].长春理工大学学报,2007,30(3):63-65.
LI TONG-HUA,ZHU ZHAN-GANG,SHANG CHUN-MIN,et al. Error analysis of measuring bullet rotary inertia with torsional vibration method [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology,2007,30(3):63-65.
- [11] 吴斌,张波,许苏海.导弹质量特性测量装置设计[J].上海航天,2001,18(3):41-44.
WU BIN,ZHANG BO,XU SU-HAI. Mass property instrument design for missile system [J]. Aerospace Shanghai,2001,18(3):41-44.
- [12] LYONS D P. Obtaining optimal results with filar pendulums for moment of inertia measurements [N]. SAWE Paper,2002-07-01(3237).
- [13] MA Z M,SHI Y B,MENG M Y,et al. Design and dynamic analysis of single-axis integrated inertia measurement device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2007,28(9):1588-1563.
- [14] BOYNTON R. A new high accuracy instrument for measuring moment of inertia and center of gravity[N]. SAWE Paper,1988-05-23(1827).
- [15] ARMSTRONG B,DUPONT P,CAUDES DE WIT C. A survey of models: analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. Automatica,1994,30(7):1083-1138.
- [16] TORBEN A. The servo system of the EISCAT svalbard antenna[J]. Spie,1995,2479:301-312.
- [17] 穆继亮.基于扭摆法的弹体转动惯量测量系统及误差分析[J].机械工程自动化,2009(1):103-105.
MU JI-LIANG. Error analysis of an inspecting system based on torsion pendulum for measuring the rotational inertia of projectile [J]. Mechanical Engineering & Automation,2009(1):103-105.
- [18] 李化义,张迎春,李葆华,等.高精度转动惯量测量仪分析与设计[J].计量学报,2009,25(33):250-253.
LI HUA-YI,ZHANG YING-CHUN,LI BAO-HUA,et al. Analysis and design of the moment of inertia measuring instrument with high accuracy [J]. Acta Metrologica Sinica,2009,25(33):250-253.

(编辑 张小强)