

水上飞机俯仰转动惯量测量试验的不确定度分析

史圣哲^{1,2,*}, 李新颖^{1,2}, 王明振^{1,2}, 吴彬^{1,2}

1. 中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门, 448035

2. 高速水动力航空科学技术重点实验室, 湖北 荆门, 448035

摘 要: 为了与在其他试验水池进行模型试验的结果精度进行比较, 提高拖曳水池的模型试验水平, 对水上飞机模型俯仰转动惯量进行了6次测量试验, 并对测量不确定度进行了分析。结果表明, 延长摆动时间、增长悬挂钢索、提高水平杆两悬挂点间距的一半的测量精度, 及增加摆动时间测量结果的稳定性, 可降低水上飞机俯仰转动惯量的不确定度。

关键词: 水上飞机; 转动惯量; 不确定度分析; 模型试验; 双线法

中图分类号: V216.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2016) 02-0075-04

水上飞机着水模型试验^[1-2]、水上迫降模型试验^[3-4]、漂浮特性模型试验^[5-7]是飞机水动力性能的重要模型试验, 在保证几何相似、运动相似、动力相似的前提下, 对模型公差均有所要求, 如尺寸误差要求为 0.5%, 重量公差为 0.5kg, 转动惯量公差要求为 10%^[5]。

转动惯量是物体转动惯性的量度, 测量转动惯量常用的方法有三线摆法、扭矩法和复摆法。金玉玲^[8]、万志龙^[9]对基于三线摆法的转动惯量测量试验进行了不确定度分析, 马亚林^[10]则对基于扭摆法的转动惯量测量试验进行了不确定度分析, 但这些试验对象重量、惯量相对较小且形状规则。测量双线法是三线摆法的一个变种, 其用水平杆替代了圆盘, 以便固定物体。本文基于双线法测量水上飞机模型俯仰转动惯量, 并对测量试验的不确定度进行分析, 提出了降低水上飞机俯仰转动惯量不确定度的方法。

1 试验设计

水上飞机俯仰转动惯量的测量基于物理双线摆的原理, 将模型按照图1要求悬挂, 模型的重心与水平铝管中心处于同一铅垂线上, 且距水平杆两悬挂点距离相等, 使模型在系统中产生稳定的扭摆运动, 利用秒表测量其摆动周期,

然后按照物理扭摆公式计算出模型的转动惯量, 最终通过调整模型配重分布使模型转动惯量模拟实机转动惯量。



图1 悬挂模型转动惯量测量试验图

Fig.1 Hanging model moment of inertia measurement test

利用式(1)计算转动惯量:

$$I_y = \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{k^2}{L} \cdot (m_{\text{模}} + m_{\text{杆}}) \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2 - \frac{m_{\text{杆}} l^2}{12} \quad (1)$$

收稿日期: 2015-11-05; 退修日期: 2015-12-20; 录用日期: 2015-12-28

基金项目: 航空科学基金(2013A60505R)

*通讯作者. Tel.: 13477579605 E-mail: shishengzhe05011232@126.com

引用格式: Shi Shengzhe, Li Xinying, Wang Mingzhen, et al. Uncertainty analysis in seaplane pitch moment of inertia measurement test[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(02): 75-78. 史圣哲, 李新颖, 王明振, 等. 水上飞机俯仰转动惯量测量试验的不确定度分析[J]. 航空科学技术, 2016, 27(02): 75-78.

式中: I_y 为水上飞机俯仰转动惯量, 单位 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; L 为悬挂钢索长, 单位 m ; $2k$ 为水平杆两悬挂点间距, 单位 m ; $m_{\text{杆}}$ 为水平杆重量, 单位 kg ; $m_{\text{模}}$ 为悬挂模型重量, 单位 kg ; l 为水平杆全长, 单位 m ; t 为摆动时间, 单位 s ; a 为摆动次数。

2 不确定度分析

用方和根法 (root-sum-square) 对 A 类不确定度和 B 类不确定度进行合成, 求出 I_y 的合成标准不确定度 $u_c(I_y)$ 。

$$(u_c(I_y))^2 = (u_A(I_y))^2 + (u_B(I_y))^2 \quad (2)$$

俯仰转动惯量 I_y 的 A 类不确定度可根据端-端的原则计算得到。首先, 对转动惯量进行独立重复观测; 其次, 通过所得到一系列测得值, 利用统计分析方法获得试验标准偏差 $S(I_y)$; 最后, 当用算术平均值 $\bar{I}_y$ 作为被测量估计值时, 俯仰转动惯量 I_y 的 A 类不确定度 $u_A(I_y)$ 如下:

$$u_A(I_y) = \frac{s(I_y)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

式中: n 为试验次数。

I_y 的 B 类不确定度根据不确定度传播律经合成得到, 每一测量分量的 B 类不确定度是根据有关信息或经验, 判断被测量的可能区间, 假设被测值的概率分布, 根据概率分布确定扩展因子 k , 则 I_y 测量分量的 B 类不确定度 $u_B(X)$ 如下:

$$u_B(X) = \frac{\Delta}{k} \quad (4)$$

I_y 的 B 类不确定度 $u_B(I_y)$ 如下:

$$\begin{aligned} (u_B(I_y))^2 = & \left(\frac{\partial I_y}{\partial m_{\text{模}}} u_B(m_{\text{模}}) \right)^2 + \left(\frac{\partial I_y}{\partial m_{\text{杆}}} u_B(m_{\text{杆}}) \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial I_y}{\partial k} u_B(k) \right)^2 + \left(\frac{\partial I_y}{\partial L} u_B(L) \right)^2 + \left(\frac{\partial I_y}{\partial l} u_B(l) \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial I_y}{\partial t} u_B(t) \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

2.1 标准不确定度的 A 类评定

本文共进行了 6 次测量, 每次测量模型摆动次数为 10 次。试验结果如表 1 所示。

表 1 水上飞机转动惯量测量试验结果

Table 1 Seaplane moment of inertia measurement test result

试验次数	1	2	3	4	5	6	平均值	标准偏差
摆动时间	32.4	32.6	32.9	33.0	33.0	32.7	32.77	0.24
俯仰惯量	8.50	8.63	8.83	8.89	8.89	8.70	8.74	0.16

根据式 (3), 水上飞机俯仰转动惯量 I_y 的 A 类不确定度 $u_A(I_y) = 0.064 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

2.2 标准不确定度的 B 类评定

在物理实验中, 可以简化约定一些仪器的误差限, 即取最小分度值或分辨率。

(1) 悬挂模型质量

悬挂模型的质量 $m_{\text{模}}$ 是采用数字分辨力为 0.02 kg 的数显式悬挂测力仪获得的, 假设可能值在区间内为均匀分布, 则悬挂模型质量 $m_{\text{模}}$ 的 B 类不确定度 $u_B(m_{\text{模}}) = 0.02/\sqrt{3} = 0.0115 \text{ kg}$ 。

(2) 水平杆质量

水平杆的质量 $m_{\text{杆}}$ 是采用数字分辨力为 0.001 的数显式台式测力仪获得的, 假设可能值在区间内为均匀分布, 则水平杆质量 $m_{\text{杆}}$ 的 B 类不确定度 $u_B(m_{\text{杆}}) = 0.001/\sqrt{3} = 0.0006 \text{ kg}$ 。

(3) 水平杆两悬挂点间距的一半

水平杆两悬挂点间距的一半 k 是采用刻度值为 0.001 m 的米尺获得的, 假设可能值在区间内为均匀分布, 则水平杆两悬挂点间距的一半 k 的 B 类不确定度 $u_B(k) = 0.001/\sqrt{3} = 0.0006 \text{ m}$ 。

(4) 悬挂钢索长

悬挂钢索长 L 测量方法同 (3), 但由于使用条件的限制, 测量误差限要远大于仪器的误差限, 其测量可能区间为 0.02 m , 则悬挂钢索长 L 的 B 类不确定度 $u_B(L) = 0.02/\sqrt{3} = 0.0115 \text{ m}$ 。

(5) 水平杆全长

水平杆全长 l 测量方法同 (3), 则水平杆全长 l 的 B 类不确定度 $u_B(l) = 0.001/\sqrt{3} = 0.0006 \text{ m}$ 。

(6) 摆动时间

摆动时间 t 是采用分辨力为 0.1 秒的电子秒表获得的, 假设可能值在区间内为均匀分布, 则摆动时间 t 的 B 类不确定度 $u_B(t) = 0.1/\sqrt{3} = 0.0577 \text{ s}$ 。

(7) 转动惯量

为了计算转动惯量的 B 类不确定度, 必须计算以下几个灵敏度系数:

$$\frac{\partial I_y}{\partial m_{\text{模}}} = \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{k^2}{L} \cdot \left(\frac{t}{a} \right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial I_y}{\partial m_{\text{杆}}} = \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{k^2}{L} \cdot \left(\frac{t}{a} \right)^2 - \frac{l^2}{12} \quad (7)$$

$$\frac{\partial I_y}{\partial k} = 2 \cdot \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{k}{L} \cdot (m_{\text{模}} + m_{\text{杆}}) \cdot \left(\frac{t}{a} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial I_y}{\partial L} = -\frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{k^2}{L^2} \cdot (m_{\text{模}} + m_{\text{杆}}) \cdot \left(\frac{t}{a} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{\partial I_y}{\partial l} = -2 \cdot \frac{m_{\text{杆}} l}{12} \quad (10)$$

$$\frac{\partial I_y}{\partial t} = 2 \cdot \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{k^2}{L} \cdot (m_{\text{模}} + m_{\text{杆}}) \cdot \frac{t}{a^2} \quad (11)$$

已知: $m_{\text{模}}=34.44\text{kg}$, $m_{\text{杆}}=1.414\text{kg}$, $k=0.700\text{m}$, $L=4.400\text{m}$, $l=4.030\text{m}$, $t=32.77\text{s}$ 。

根据式(5), 则水上飞机俯仰转动惯量 I_y 的B类不确定度为 $u_B(I_y)=0.0501\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

每一项包含灵敏度系数的B类不确定度分量的平方, 与合成之后的 I_y 的B类不确定度的平方之比则为每一测量分量的不确定度贡献, 其结果可以用百分数来表示, 如图2所示。

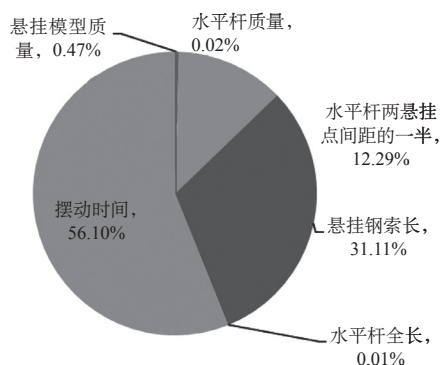


图2 水上飞机转动惯量的B类不确定分量图

Fig.2 Type B uncertainty ponderances of seaplane moment of inertia

由图2可知, 摆动时间 t 、悬挂钢索长 L 、水平杆两悬挂点间距的一半 k 分别贡献了水上飞机俯仰转动惯量 I_y 的B类不确定度 $u_B(I_y)$ 的56.10%, 31.11%, 12.29%, 提高以上三者的测量精度, 可以有效降低水上飞机俯仰转动惯量 I_y 的B类不确定度 $u_B(I_y)$ 。

2.3 合成标准不确定度

根据式(2), 则水上飞机俯仰转动惯量 I_y 的合成标准不确定度为 $u_c(I_y)=0.0815\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。合成标准不确定, 分量图如图3所示。

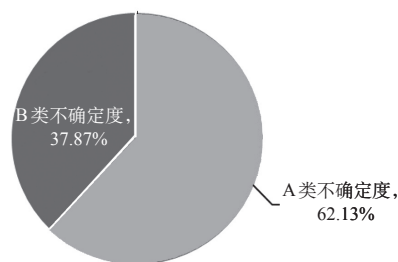


图3 水上飞机转动惯量的合成标准不确定分量图

Fig.3 Combined standard uncertainty ponderances of seaplane moment of inertia

由图3可知, A类不确定度和B类不确定度分别贡献了 I_y 合成标准不确定度的62.13%和37.87%。提高摆动时间测量结果稳定性和摆动时间、悬挂钢索长、水平杆两悬挂点间距的一半的测试仪器精度同样重要, 均可降低 I_y 的合成标准不确定度。

2.4 扩展不确定度

取包含因子为2, 则扩展不确定度为 $U=2u_c(I_y)=0.1629\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

相对扩展不确定度为 $\text{Er}(I_y)=1.86\%$ 。

水上飞机转动惯量 的最终结果表达形式为:

$$\begin{cases} I_y = (8.7400 \pm 0.1629) \text{kg}\cdot\text{m}^2 \\ \text{Er}(I_y) = 1.86\% \end{cases}$$

文献[9]采取三线摆测量刚体转动惯量的相对扩展不确定度为8.4%, 对比表明: 双线法测量水上飞机转动惯量精度比较高。

3 结论

采用双线法对水上飞机俯仰转动惯量进行测量, 并分析测量结果不确定度, 得到以下几点结论:

(1) 摆动时间、悬挂钢索长、水平杆两悬挂点间距的一半分别贡献了水上飞机转动惯量的B类不确定度的56.10%, 31.11%, 12.29%, 提高以上三者的测量精度, 可以有效降低水上飞机俯仰转动惯量的B类不确定度。

(2) A类不确定度和B类不确定度分别贡献了水上飞机转动惯量的合成标准不确定度的62.13%和37.87%。提高摆动时间测量结果稳定性和摆动时间、悬挂钢索长、水平杆两悬挂点间距的一半的测试仪器精度同样重要, 均可降低水上飞机俯仰转动惯量的合成标准不确定度。

(3) 水上飞机转动惯量的相对扩展不确定度为1.86%, 双线法测量水上飞机俯仰转动惯量精度比较高。 AST

参考文献

- [1] 罗琳胤, 杨仕福, 吕继航. 水陆两栖飞机着水响应模型与数值分析[J]. 机械设计, 2013, 30(8): 86-89.
LUO Linyin, YANG Shifu, LV Jihang. Analysis and numeral simulation of water landing response for amphibian[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(8): 86-89. (in Chinese)
- [2] 吴彬, 王明振, 杨阳, 等. 水陆两栖飞机着水载荷试验研究[R]. 第十七届中国国际船艇展暨高性能船学术报告会, 2012: C10-1-5.
WU Bin, WANG Mingzhen, YANG Yang, et al. Experimental investigation of water impact of amphibious aircraft[R]. The 17th China International Boat Show & High Performance Marine Vessel (HPMV) Conference, 2012: C10-1-5. (in Chinese)
- [3] 徐文岷, 李凯. 民用飞机弹性结构水上迫降试验载荷研究[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 1012-1018.
XU Wenmin, LI Kai. Research on civil aircraft elastic structure ditching test load[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4): 1012-1018. (in Chinese)

- [4] 曾毅,吕继航.运输类飞机海浪迫降试验技术[J].沈阳航空航天大学学报,2015,32(1):18-22.
ZENG Yi, LV Jihang. Wave landing experiment for transport category airplanes[J].Journal of Shenyang Aerospace University, 2015,32(1):18-22. (in Chinese)
- [5] 王敏,张越.民用飞机水上迫降漂浮特性模型试验研究[J].航空工程进展,2012,3(3):294-299.
WANG Min, ZHANG Yue. Research on the model test for the ditching floatation characteristics of the civil airplanes[J].Advances in Aeronautical Science and Engineering,2012,3(3):294-299. (in Chinese)
- [6] 黄淼,吴彬,蒋荣,等.水上飞机在波浪上运动响应特性试验研究[J].实验流体力学,2015,29(3):41-46.
HUANG Miao, WU Bin, JIANG Rong,et al. Experimental study on motion response of a seaplane on waves[J].Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2015,29(3):41-46. (in Chinese)
- [7] 王明振,吴彬,江婷,等.直升机水上漂浮特性试验与计算分析[R].第六届中国航空学会青年科技论坛,2014:75-79.
WANG Mingzhen, WU Bin, JIANG Ting,et al. The analysis of experimentation and calculation for the characteristic of helicopter floatage on the water[R]. The 6th China Aviation Conference Youth Science Forum, 2014:75-79. (in Chinese)
- [8] 金玉玲,杨广武.转动惯量测定实验中的不确定度[J].天津城市建设学院学报,2009,15(4):317-320.
JIN Yuling, YANG Guangwu. Uncertainty in experiment for measuring moment of inertia[J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction,2009,15(4):317-320. (in Chinese)
- [9] 万志龙.三线摆测量缸体转动惯量实验的不确定度分析[J].长春师范学院学报(自然科学版),2010,29(5):28-31.
WAN Zhilong. Uncertainty analysis on the rotational inertia experiment of rigid body with three-wire pendulum[J].Journal of Changchun Normal University(Natural Science),2010,29(5):28-31. (in Chinese)
- [10] 马亚林,陈建新.扭摆法测物体转动惯量的不确定度分析[J].大学物理实验,2011,24(1):93-96.
MA Yalin, CHEN Jianxin. Analysis on uncertainty of rotation inertia by method of torsion pendulum[J]. Physical Experiment of College,2011,24(1):93-96. (in Chinese)

作者简介

史圣哲(1985—) 男,硕士,工程师。主要研究方向:测量不确定度分析、水动力回归分析、正弦拟合和失真度分析。

Tel:13477579605 E-mail: shishengzhe05011232@126.com

李新颖(1987—) 男,学士,工程师。主要研究方向:水动力性能。

Tel:0724-2329198 E-mail: hshl_605@163.com

王明振(1983—) 男,硕士,工程师。主要研究方向:水动力性能。

Tel:0724-2329198 E-mail: hshl_605@163.com

吴彬(1981—) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:水动力性能。

Tel:0724-2329198 E-mail: hshl_605@163.com

Uncertainty Analysis in Seaplane Pitch Moment of Inertia Measurement Test

SHI Shengzhe^{1,2,*}, LI Xinying^{1,2}, WANG Mingzhen^{1,2}, WU Bin^{1,2}

1. China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China

2. Key Aviation Scientific and Technological Laboratory of High-Speed Hydrodynamic, Jingmen 448035, China

Abstract: In order to compare the precision of model test results with other experimental tank, and raise the level of towing tank model test, 6 measure tests of seaplane pitch moment of inertia were conducted, and uncertainty of test results were analyzed. The result show that, increasing the measurement accuracy of swing time, length of hanging rope, half of distance of plane pole hanging point and stability of swing time measure result, can reduce the uncertainty of seaplane moment of inertia.

Key Words: seaplane; moment of inertia; uncertainty analysis; model test; two-wire method

Received: 2015-11-05; Revised: 2015-12-20; Accepted: 2015-12-28

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2013A60505R)

*Corresponding author. Tel.: 13477579605 E-mail: shishengzhe05011232@126.com