

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.06

# 静不稳定机械式衡重台力学分析和校准方法

席勇辉, 陈发银, 李文涛, 齐斌, 徐炜东

(昆明船舶设备研究试验中心, 云南昆明 650000)

**摘要:** 为解决机械式衡重台因静不稳定性难以校准的问题, 分析机械式衡重台的测量原理和力学特点, 提出机械式衡重台校准方法, 通过减少机械式衡重台非平衡状态下载重架的最大偏转角度, 实现校准时的测量不确定度控制, 保障校准结果的准确性。利用该方法对机械式衡重台进行校准, 并开展测量不确定度分析, 结果表明扩展不确定度  $U = 84 \text{ g} (k = 2)$ , 验证了该方法的有效性。研究成果对于促进水下航行体产品力学计量领域的发展具有积极作用, 为水下航行体产品试验研究提供了有力支撑。

**关键词:** 衡重台; 静不稳定; 校准; 测量不确定度

**中图分类号:** TB938.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2023) 06-0054-06

## Mechanical analysis and calibration method of statically unstable mechanical weighing table

XI Yonghui, CHEN Fayin, LI Wentao, QI Bin, XYU Weidong

(Kunming Shipborne Equipment Research and Test Center, Kunming 650000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that mechanical weighing table is difficult to calibrate due to static instability, we have analyzed the measuring principle and mechanical characteristics of the mechanical weighing table and proposed the calibration method of the mechanical weighing table in this paper. By reducing the maximum deflection angle of the weight frame of the mechanical weighing table under non-equilibrium state, the measurement uncertainty can be controlled during calibration and the accuracy of calibration results can be guaranteed. The method is used to calibrate the mechanical weighing table and analyze the measurement uncertainty. The results show that the extended uncertainty  $U = 84 \text{ g} (k = 2)$ , which verifies the effectiveness of the method. The research results have a positive impact on promoting the development of the mechanical metrology of underwater vehicle products, and provide a strong support for the experimental research of underwater vehicle products.

**Key words:** weighing table; statically unstable; calibration; measurement uncertainty

### 0 引言

重心位置作为重要的物理参数, 直接影响在水下或空中行驶的各类长柱状航行体产品的姿态控制性能<sup>[1-3]</sup>。该类产品在设计定型时, 研发人员会对其重心位置给出规定范围, 但实际应用中,

该类产品需要搭载不同组件、测试段或测试系统, 其重心位置会发生一定偏移<sup>[4-6]</sup>。为使不同应用工况下航行体产品重心位置偏移量在设计要求范围内, 以符合姿态控制要求, 保证产品航行安全, 需要在总装完成后对产品重心位置进行测量。

衡重台是用于测量各类水下或空中航行体产

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-09-12

引用格式: 席勇辉, 陈发银, 李文涛, 等. 静不稳定机械式衡重台力学分析和校准方法[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 54-59.

**Citation:** XI Y H, CHEN F Y, LI W T, et al. Mechanical analysis and calibration method of statically unstable mechanical weighing table[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 54-59.



品纵向重心位置的专用装置。衡重台按工作方式可分为电子传感器式和机械式两类。电子传感器式衡重台可一次完成承重和重心测量，操作过程更加便捷，但成本更高<sup>[7-9]</sup>。机械式衡重台测量原理简单、易于维护、制造成本低，其一般结构形式如图1所示。目前从事长柱状水下航行体科研、生产、试验等相关业务的单位，大多配备机械式衡重台用于产品重心测量。为使机械式衡重台计量受控，保证产品在各类活动中的可靠性，需要定期对机械式衡重台进行校准<sup>[10-12]</sup>。

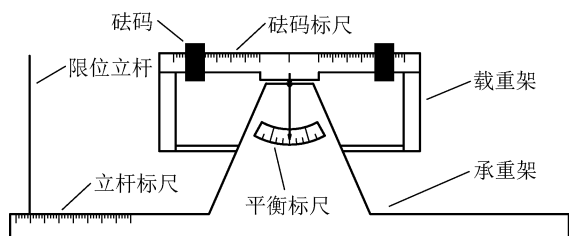


图1 机械式衡重台一般结构示意图

Fig.1 General structure diagram of mechanical weighing table

机械式衡重台的校准，目前没有可依据的国家或行业计量技术规范，只能部分参考砝码和天平检定规程，针对标尺的几何尺寸以及砝码的质量进行计量。标尺在未发生严重磕碰等机械损坏的情况下，其几何尺寸计量较为便捷。机械式衡重台的校准难点为砝码质量计量，部分机械式衡重台由于承重架重心水平位置高于其支撑点，导致机械式衡重台未放置产品且平衡标尺指示值为0 mm时无法处于静平衡状态<sup>[13-15]</sup>。

为解决静不稳定机械式衡重台的校准问题，本文分析机械式衡重台的工作原理及受力特点，提出机械式衡重台校准方法，通过减小机械式衡重台非平衡状态时载重架的最大偏转角度，降低校准时的测量不确定度。开展静不稳定机械式衡重台校准实验，并对测量不确定度进行分析计算，验证所提出方法的可行性。

## 1 静不稳定机械式衡重台力学分析

### 1.1 机械式衡重台测量重心原理

在测量产品重心前，先调整机械式衡重台上4个砝码位置，使载重架达到平衡状态(即平衡标尺指示值为0 mm)。4个砝码的质量分别为 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$ ，砝码与载重架中轴点位置的距离分别为

$l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ ，如图2所示。此时，整个载重架在砝码的作用下，相对2个支撑点组成的中轴线力矩平衡。

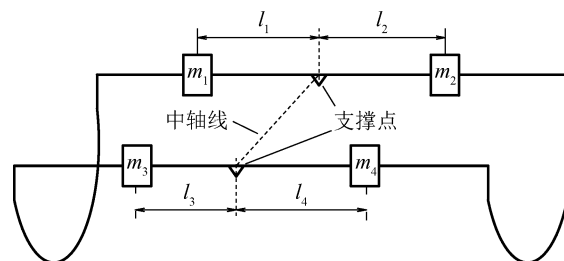


图2 机械式衡重台测量产品重心计算简图

Fig.2 Calculation diagram for measuring product gravity center using mechanical weighing table

利用专用台秤测量产品质量 $m$ ，然后将产品放置于载重架上，此时产品重心与载重架中轴线存在一定偏移量 $l$ 。由于重力作用，产品在支撑点对载重架产生额外的力矩，使载重架失去平衡，需要再次调整砝码的位置，使载重架恢复平衡状态。调整后4个砝码与载重架中轴点位置的距离分别为 $l'_1$ 、 $l'_2$ 、 $l'_3$ 、 $l'_4$ ，如图3所示。

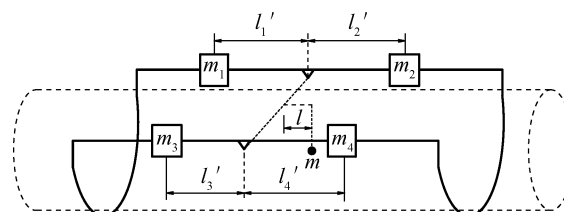


图3 放置产品后机械式衡重台力学状态简图

Fig.3 Mechanical state diagram of mechanical weighing table after product placement

根据力矩平衡关系，各变量之间的关系为

$$m \cdot l + (l_1 - l'_1) \cdot m_1 + (l_3 - l'_3) \cdot m_3 = (l_2 - l'_2) \cdot m_2 + (l_4 - l'_4) \cdot m_4 \quad (1)$$

可计算得到产品重心位置 $l$ ，即

$$l = [(l_2 - l'_2) \cdot m_2 + (l_4 - l'_4) \cdot m_4 - (l_1 - l'_1) \cdot m_1 - (l_3 - l'_3) \cdot m_3] / m \quad (2)$$

### 1.2 机械式衡重台的静不稳定状态

部分机械式衡重台在设计时为提高承重钢臂的刚度，保证在放置产品状态下不产生影响测量准确度的变形，将承重钢臂截面积加大，并将支撑点置于承重钢臂下方，使得未放置产品状态下整个承载架的重心位于支撑点上方，载重架调整

平衡(即承重钢臂保持水平)后处于静不稳定状态。当载重架发生微小扰动,重心偏移导致的力矩作用会使载重架产生更大偏移,直至完全失去平衡。

质量为 $m_c$ 的载重架重心距离支撑点垂直高度为 $h_c$ ,当载重架从平衡位置绕支撑点偏移小角度 $\alpha$ 后,载重架重心在水平方向上偏移距离为 $\Delta l$ ,如图4所示。

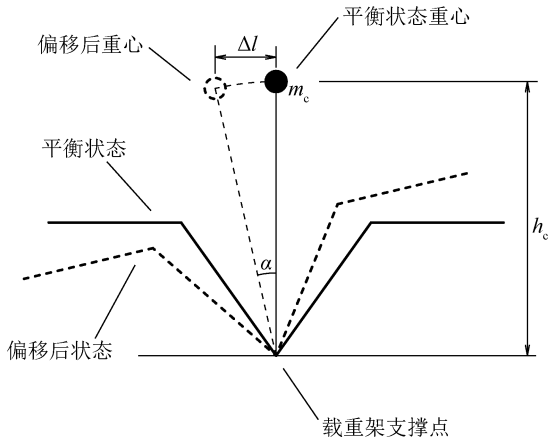


图4 载重架发生偏移时重心情况

Fig.4 Center of gravity when the load frame is offset

载重架偏移角度与重心偏移距离之间的关系为

$$\alpha \cdot h_c = \Delta l \quad (3)$$

在此状态下,重心对支撑点产生的作用力矩 $T$ 的计算公式为

$$T = m_c \cdot g \cdot \Delta l \quad (4)$$

以上计算分析均针对载重架支撑点为V字形刀口的情况。为提升静稳定性,部分机械式衡重台的支撑点设计为圆面,载重架在平衡状态下受到扰动并发生微小偏角后,因支撑点位置发生移动产生回复力矩 $T_b$ 而重新回正,达到静稳定效果,如图5所示。但若载重架重心过高,扰动产生的力矩仍会使载重架无法达到静稳定。

若载重架偏转角度过大导致支撑接触面产生滑动摩擦,载重架再次回到平衡状态时,接触面处的滑动量不会完全消失,导致平衡状态的支撑点不在载重架中轴线上。此状态会造成4个砝码作用力臂改变,从而引入重心测量误差。在校准此类机械式衡重台时,需要考虑力臂改变所引入的测量误差。

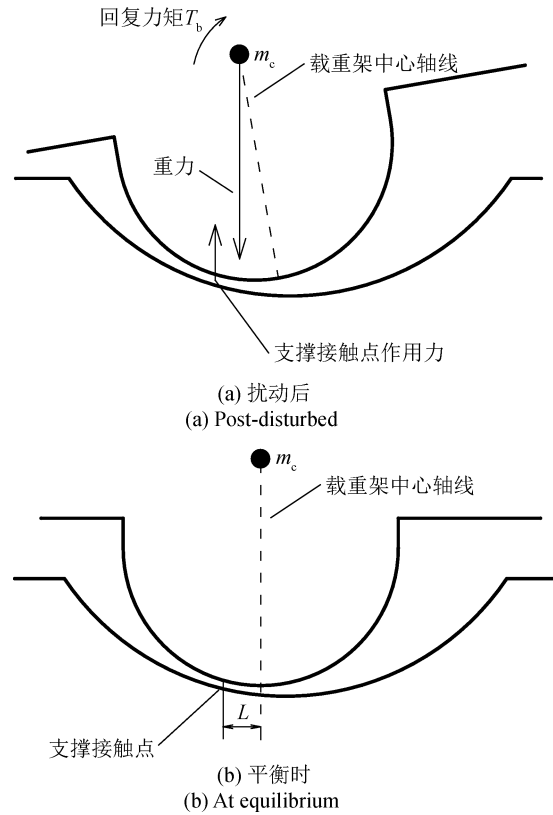


图5 圆形支撑点的扰动和平衡状态

Fig.5 Disturbance and equilibrium state of the circular support point

## 2 机械式衡重台静不稳定状态下的校准

进行机械式衡重台校准时,需要分别对安装在钢臂上的砝码进行校准。在空载状态下,将砝码置零位并调平载重架,再调整砝码 $m_1$ 使其在悬臂上向外移动距离 $L_1$ ,载重架失去平衡状态。然后在距离载重架中心轴 $L_0$ 位置处加载标准砝码。当标准砝码质量达到 $m_0$ 时,载重架再次恢复平衡状态,此时满足平衡关系

$$m_0 \cdot g \cdot L_0 = m_1 \cdot g \cdot L_1 \quad (5)$$

静不稳定机械式衡重台空载和加载标准砝码时载重架均不易达到平衡状态,因此校准时需要在机械式衡重台非平衡状态下计算测量值,并控制校准时的测量不确定度。本文提出一种较为简便的方法,在定量控制测量不确定度的情况下,对静不稳定机械式衡重台进行校准。

### 1) 添加限位垫块

如图6所示,在载重架两端下方添加相同高度的限位垫块,使载重架在非平衡状态时偏转角度

减小。载重架平衡状态下，限位垫块顶端距离载重架两端底部的距离为  $d$ ，则载重架产生的最大偏转角度  $\alpha_{\max}$  为

$$\alpha_{\max} = \frac{d}{L_0} \quad (6)$$

2) 空载调平

在空载状态下，将4个悬臂砝码位置归零，再通过微调使载重架接近平衡。此时载重架由于静不稳定性，会产生偏转角度  $\alpha_{\max}$ 。在悬臂翘起端逐步添加标准砝码，直至悬臂偏转方向刚好发生改变；再逐步减少刚才添加的标准砝码，直至悬臂偏转方向再次刚好发生改变。此时所减少的砝码质量为  $m_d$ ，砝码  $m_1$  一侧悬臂翘起。

3) 砝码校准

将被校准砝码  $m_1$  向悬臂外侧移动距离  $L_1$ ，载重架悬臂向砝码移动侧偏转角度为  $\alpha_{\max}$ 。在悬臂翘起端逐步添加标准砝码，直至悬臂偏转方向刚好发生改变。此时添加的砝码质量为  $m_0$ 。

4) 校准调平

逐步减少步骤3)中添加的标准砝码，直至悬臂偏转方向再次刚好发生改变。设此时所减少的砝码质量为  $m_{d0}$ ，悬臂砝码  $m_1$  校准完成。

5) 按照上述步骤分别校准其他3个砝码。

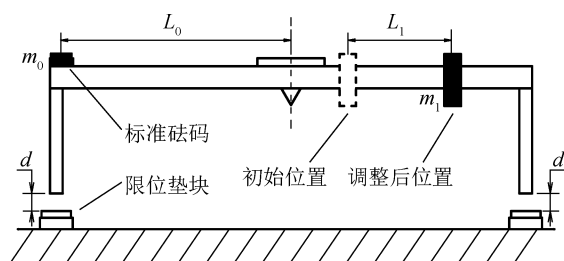


图6 机械式衡重台校准示意图

Fig.6 Calibration diagram of mechanical weighing table

悬臂砝码质量  $m_1$  的实测值计算公式为

$$m_1 = \frac{(m_0 - m_{d0}/2 + m_d/2) \cdot L_0}{L_1} \quad (7)$$

### 3 测量不确定度分析

按照上述方法校准某静不稳定机械式衡重台，原始校准数据如表1所示。

表1 某静不稳定机械式衡重台校准原始数据

Tab.1 Raw data of calibration of a statically indeterminate mechanical weighing table

$d/mm$	$L_1/m$	$L_0/m$	$m_0/kg$	$m_{d0}/g$	$m_d/g$
12	1.5	1.7	20.016	12	9

测量不确定度评定的主要分量为①标准砝码准确度引入的测量不确定度分量  $u_1$ ；②机械式衡重台悬臂几何尺寸误差引入的测量不确定度分量  $u_2$ ；③标准砝码加载位置偏差引入的测量不确定度分量  $u_3$ ；④标准砝码加载分辨力引入的测量不确定度分量  $u_4$ ；⑤悬臂不平衡引入的测量不确定度分量  $u_5$ 。计算各不确定度分量<sup>[16-18]</sup>，结果如表2所示。

表2 各不确定度分量计算结果

Tab.2 Calculation results of uncertainty components

不确定度分量	不确定度输入量 $u_x$	不确定度输出量 $u_y$	$\frac{\partial u_y}{\partial u_x}$
$u_1$	0.6 g	0.68 g	1.13
$u_2$	0.6 mm	8.0、9.1 g	13.3、15.1
$u_3$	3 mm	39.9 g	13.3
$u_4$	29 mg	32.8 mg	1.13
$u_5$	1.4 g	1.6 g	1.13

表2中，所有  $u_y$  按不相关计算合成标准不确定度，包含因子取2，则扩展不确定度  $U$  为

$$U = k \cdot \sqrt{\sum u_i^2} = 84 \text{ g} \quad (8)$$

### 4 结论

对机械式衡重台进行了力学分析，在此基础上，研究并提出了静不稳定机械式衡重台校准方法。利用该方法对某机械式衡重台进行了校准，并进行测量不确定度评定，结果表明扩展不确定度  $U = 84 \text{ g} (k = 2)$ ，符合校准不确定度要求。提出的机械式衡重台校准方法无需使用复杂工装或测量设备即可实现对衡重台的准确校准，具有操作便捷、测量效率高等优点，为推动长柱状航行体产品重心计量领域发展提供了重要支撑，具有技术借鉴价值。

## 参考文献

- [1] 申良生, 齐晓璐, 王爱民, 等. 鱼雷过靶距离测试方法[J]. 计测技术, 2008, 28(1): 28-30.  
SHEN L S, QI X L, WANG A M, et al. Study of ranging torpedo hitting [J]. Metrology & Measurement Technology, 2008, 28(1): 28-30. (in Chinese)
- [2] 王凡瑜, 魏海鹏, 孔德才, 等. 衡重参数对水下航行体铅垂面机动特性影响[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(3): 274-278.  
WANG F Y, WEI H P, KONG D C, et al. Effects of weighing parameters on vertical-plane maneuver property of an underwater vehicle [J]. Digital Ocean & Underwater Warfare, 2023, 6(3): 274-278. (in Chinese)
- [3] 李世雄. 一种新型鱼雷衡重设备及测量方法[J]. 鱼雷技术, 2013, 21(1): 10-14.  
LI S X. A new torpedo weighing equipment and measurement method [J]. Torpedo Technology, 2013, 21(1): 10-14. (in Chinese)
- [4] 古鉴霄, 党建军, 黄闯, 等. 衡重参数对超空泡射弹有效射程的影响[J]. 兵工学报, 2022, 43(6): 1376-1386.  
GU J X, DANG J J, HUANG C, et al. Influence of weight parameters on the effective range of supercavitation projectile [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(6): 1376-1386. (in Chinese)
- [5] 许三祥, 舒旭光. 水下航行体无陀螺静稳姿态测试技术研究[J]. 水雷战与舰船防护, 2008(3): 20-22, 50.  
XU S X, SHU X G. Study on testing technology for static stability attitude of underwater vehicle without gyroscope [J]. Mine Warfare & Ship Self-defence, 2008(3): 20-22, 50. (in Chinese)
- [6] 刘凯, 孙炯, 文钢. 鱼雷衡重特性对初始弹道的影响分析[J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(6): 76-79.  
LIU K, SUN J, WEN G. Analysis of effects of torpedo's weighing property on initial trajectory [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2009, 21(6): 76-79. (in Chinese)
- [7] 王新平, 朱泓臣, 赵志草. 基于SolidWorks的衡重参数测试台设计[J]. 机械设计, 2012, 29(1): 77-80.  
WANG X P, ZHU H C, ZHAO Z C. Design of SolidWorks weight parameter test bench [J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(1): 77-80. (in Chinese)
- [8] 云南昆船电子设备有限公司. 一种类圆柱体衡重设备及衡重方法: CN202110002112.0[P]. 2021-05-14.  
Yunnan Kunchuan Electronic Equipment Co., LTD. The invention relates to a cylinder weight weighing equipment and a weight weighing method: CN202110002112.0[P]. 2021-05-14. (in Chinese)
- [9] 云南昆船电子设备有限公司. 一种类圆柱体下移量和位移量衡重设备: CN202120003763.7[P]. 2021-11-16.  
Yunnan Kunchuan Electronic Equipment Co., LTD. The utility model relates to a cylinder downward and displacement weight measuring device: CN202120003763.7[P]. 2021-11-16. (in Chinese)
- [10] 方昭. 衡器计量检定中的技术问题分析[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2021(5): 172-173.  
FANG Z. Analysis of technical problems in measuring verification of weighing instruments [J]. Management & Technology of SME (Last week's issue), 2021(5): 172-173. (in Chinese)
- [11] 刘冬悦, 赵易彬, 李忠. 浅谈非自动衡器的型式评价[J]. 衡器, 2021, 50(5): 31-33.  
LIU D Y, ZHAO Y B, LI Z. Shallowly talking about pattern evaluation of non-automatic weighing instrument [J]. Weighing Instrument, 2021, 50(5): 31-33. (in Chinese)
- [12] 刘娜. 衡器检定中的问题及解决措施分析[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(10): 96-97, 100.  
LIU N. Analysis of problems and solutions in the verification of weighing apparatus [J]. Metrology & Measurement Technique, 2018, 45(10): 96-97, 100. (in Chinese)
- [13] 刘明使, 杨壮志. 两类临界静不稳定姿态控制系统设计[J]. 国防科技大学学报, 1996(4): 31-35.  
LIU M S, YANG Z Z. Two designs of critical statically unstable attitude control system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 1996(4): 31-35. (in Chinese)
- [14] 李娟, 蔡校蔚, 李伟达, 等. 基于重心稳定约束的下肢外骨骼助行机器人静稳定步态规划方法[J]. 机电工程, 2017, 34(9): 1075-1080.  
LI J, CAI X W, LI W D, et al. Static stable gait planning based on center of gravity stability constraint for lower limb exoskeleton walking aid robot [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(9): 1075-1080. (in Chinese)
- [15] 刘东辉, 王丹, 黄子龙, 等. 静稳定跨步机构等高步态规划及稳定性分析[J]. 科技创新与应用, 2016(13): 48.  
LIU D H, WANG D, HUANG Z L, et al. Gait planning and stability analysis of statically stable stride mechanism [J]. Technology Innovation and Application, 2016(13): 48.

48. (in Chinese)
- [16] 席勇辉, 杨冲. 频闪仪的脉冲频率法校准[J]. 工业计量, 2020, 30(2): 12-14, 17.  
XI Y H, YANG C. Pulse frequency method calibration of stroboscope[J]. Industrial Metrology, 2020, 30(2): 12-14, 17. (in Chinese)
- [17] 席勇辉, 肖滢盈. 某水下发射系统水平运动机构速度校准[J]. 宇航计测技术, 2021, 41(3): 102-106.  
XI Y H, XIAO Y Y. Speed calibration of horizontal motion mechanism of underwater launching system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2021, 41(3): 102-106. (in Chinese)
- [18] 席勇辉. 高低转速下频闪式转速表的校准[J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(3): 79-82, 87.  
XI Y H. The calibration of the stroboscopic tachometer for

high and low speed[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2020(3): 79-82, 87. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



**第一作者:** 席勇辉 (1986—), 男, 高级工程师, 工学硕士, 主要研究方向为水中兵器计量与测试技术。