

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412492

能量天平中砝码真空传递装置设计研究*

张邱¹, 白洋², 曾涛¹, 李正坤², 王健²

(1. 中国计量大学机电工程学院 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要:能量天平是我国自主研发的千克量子化复现装置,千克重新定义后如何实现基于能量天平的质量量值传递就显得尤为重要。然而,能量天平在质量量值传递过程中存在标准砝码暴露于空气环境中影响量值传递准确性的问题。为了解决该问题,基于能量天平结构特点,设计提出一种组合式砝码传递方案,并研制出对应的砝码真空传递装置,能够实现标准砝码在真空环境下从能量天平传递至真空容器,确保质量量值传递的准确性。然后,根据能量天平悬挂系统建立了传递装置传递准确性模型,并基于该模型得到了砝码传递 x 、 y 轴的传递误差分别为 $0.0116\ \mu\text{m}$ 、 $0.0092\ \mu\text{m}$,论证了砝码传递过程的准确性。最后通过实验验证了砝码真空传递装置给能量天平引入小于 10^{-9} 量级的准直误差,不会影响能量天平精密准直状态。

关键词:能量天平;质量量值传递;标准砝码;真空容器

中图分类号: TH715 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Design and research on weights vacuum transfer device for joule balance

Zhang Qiu¹, Bai Yang², Zeng Tao¹, Li Zhengkun², Wang Jian²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Joule balance is a self-developed device for quantized reproducing the kilogram in China. It is particularly important to achieve mass value transfer based on the joule balance after the kilogram is redefined. However, there is a problem with the accuracy of joule balance measurements due to the exposure of standard weights to the air environment during the transfer of mass values. To address this problem, based on the structural characteristics of the joule balance, a combined weight transfer scheme is designed and proposed, and a corresponding weight vacuum transfer device is developed, which can transfer standard weights from the joule balance to the vacuum container in a vacuum environment, ensuring the accuracy of mass value transfer. Then, based on the joule balance suspension system, a transfer accuracy model of the transfer device is formulated. Based on this model, the weight transfer x is obtained. The transmission errors of the y -axis are $0.0116\ \mu\text{m}$ and $0.0092\ \mu\text{m}$, respectively, demonstrating the accuracy of the weight transmission process. Finally, it is verified through experiments that the weight vacuum transfer device could introduce an alignment error of no more than 10^{-9} orders of magnitude to the joule balance, and does not affect the precision alignment state of the joule balance.

Keywords: joule balance; mass value transfer; standard weight; vacuum container

0 引言

根据国际质量及其相关量咨询委员会 (consultative committee for mass and related quantities, CCM) 于 2013 年

起草的千克重新定义指南^[1-3] (<http://www.bipm.org/utils/common/CC/CCM/CCM15.pdf>), 质量单位千克的重新定义涉及两方面工作: 首先是质量单位千克量子化复现方法研究, 其次是质量量值传递研究。

经过 10 余年的研究, 我国已经研制成型号为 NIM-2

收稿日期: 2024-02-08 Received Date: 2024-02-08

* 基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFF0603803, 2023YFF0612501)、国家自然科学基金项目 (52175527)、国家市场监督管理总局科技计划项目 (2022MK176)、中国计量科学研究院基本科研业务费项目 (AKYRC2311, AKYZD2103) 资助

的能量天平千克复现装置,该装置实现在真空环境下基于普朗克常数复现质量单位千克以及其他范围内的量值^[4-5]。具体复现过程为,采用能量天平原理、基于普朗克常数对被测的砝码进行测量,然后将被测砝码取出后送至质量校准实验室,由该实验室采用高精度质量比较器向下进行量值传递。然而,能量天平测量完成后,若被测标准砝码暴露于空气环境,将会影响质量量值的准确性^[6-7],进而影响后续的质量量值传递。因此,如何实现被测标准砝码“真空至真空”的传递,是保证质量量值传递体系连续性的一项非常重要的研究内容。

相较于原有的质量量值传递过程,新的过程会有下列变化:首先由普朗克常数传递至标准砝码,然后再将标准砝码传递至高精度质量比较仪(M-one)中,从而进行下一步的量值传递。对于前者,我国自主研发了千克量子化复现装置——能量天平(NIM-2),其基本原理是在真空环境下构建通电悬挂线圈磁力做功量和激励磁体磁场能量变化量之间的能量平衡等式^[8-11],建立砝码质量 m 和普朗克常数 h 之间的数学关系,可用 h 直接表征砝码质量 m ,最终将质量量值传递至标准砝码。对于后者,中国计量研究院提出了一种“真空容器+真空传递腔体”的方案^[12],该方案分别设计了连接M-one外侧法兰接口的真空传递腔体和真空环境下储存标准砝码的真空容器。其具体实现过程是:首先将NIM-2在真空环境下测定的标准砝码在空气环境放置于真空容器中,然后将真空容器手动放置于真空传递腔体中,最后利用真空传递腔体在真空环境下将标准砝码从真空容器中传递至M-one中。另外,中国计量研究院通过实验验证了该方案中真空传递腔体和真空容器不会对M-one中标准砝码的质量测量准确性造成影响。虽然该方案实现了标准砝码在真空环境下传递至M-one,但标准砝码从NIM-2中传出时仍然是在空气环境下进行的。所以,标准砝码在传递过程中仍然会产生质量变化。综上,如何将NIM-2中传出的标准砝码继续在真空环境下传递至真空容器,从而实现标准砝码“真空至真空”的传递,成为了目前亟待解决的问题。

本文在充分考虑NIM-2内、外部空间结构特点基础上,设计提出并搭建了可实现标准砝码从NIM-2“真空至真空”传递至真空容器的方法与装置。该装置分为内、外两部分传递机构,分别搭建在NIM-2内部花岗岩支架及NIM-2地基上,通过内、外传递机构之间的联合传递实现上述传递过程。在此基础上,根据能量天平悬挂系统建立了传递装置传递准确性模型,分析了标准砝码传递的准确性;并基于能量天平准直误差模型^[13-15],采用实验的方法证明了该装置不会干扰破坏能量天平精密准直状态。

1 砝码真空传递方案设计与分析

1.1 组合式砝码传递方案

能量天平测定的砝码置于其中心的砝码托盘上,距离能量天平边缘接近1 m。若仅在能量天平外部搭建砝码传递装置,则从能量天平法兰口伸入取出砝码的机械臂长度须达1.5 m。此时为保证机械手满足挠度要求,需对砝码传递装置进行配重设计,但配重设计会大幅增加传递装置的总质量,使传递装置对能量天平产生较大力矩。该力矩将导致NIM-2地基倾斜,进而影响能量天平精密准直状态。

结合能量天平结构特点,充分考虑能量天平内、外部空间,本文提出了一种组合式砝码传递设计方案,并研制出对应的砝码传递装置,包括内、外两部分传递机构,砝码在该装置中的传递过程如图1所示。

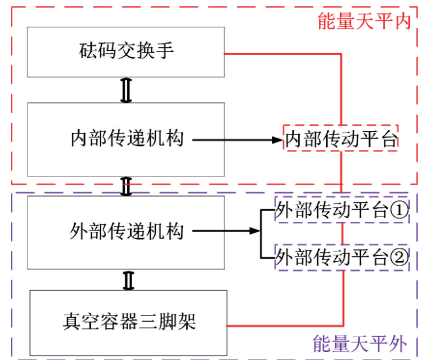


图1 砝码传递过程

Fig. 1 Weight transfer process

砝码依次通过砝码交换机械手、内部传递机构、外部传递机构传递至真空容器三脚架上。其中,外部传动平台①用于实现砝码从内部传动平台向外部传动平台的传递。

1.2 传递装置准确性模型

砝码真空传递装置用于实现标准砝码在真空容器和能量天平之间的相互传递。当砝码真空传递装置将标准砝码传递至能量天平内部砝码交换手后,然后通过能量天平内部三轴运动平台将标准砝码传递至砝码托盘上。砝码托盘通过陶瓷三角架、碳素杆与悬挂线圈连接在一起,如图2所示。

图中陶瓷三角架、砝码托盘和悬挂线圈保持同心,而砝码托盘上三个砝码支撑柱为直径30 mm的圆周阵列,并与砝码托盘同心。悬挂线圈底部安装了3个120°对称分布角锥棱镜,同时能量天平外部安装了3个120°对称的激光干涉测量系统,用于实时测量3路角锥棱镜的竖向位移,从而测量悬挂线圈的水平姿态。

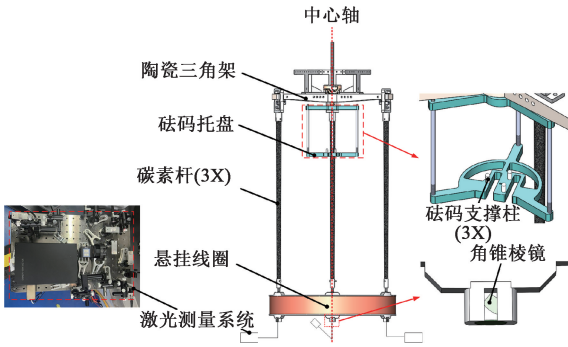


图 2 能量天平悬挂系统图

Fig. 2 Suspension system of joule balance

理想情况下,标准砝码从砝码交换手传递砝码托盘时,标准砝码应与砝码托盘同心。但实际情况下,由于砝码真空传递装置传递过程中的传递误差不可避免,因此当标准砝码传递至砝码托盘时,两者将会产生偏心,如图 3 所示。

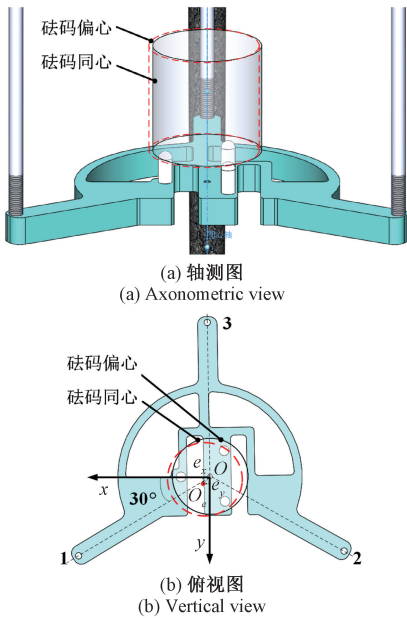


图 3 砝码与托盘同心、偏心示意图

Fig. 3 Diagram of concentric and eccentric weight and tray

当标准砝码与砝码托盘同心时,3 个角锥棱镜的竖向位移应该保持一致;而当标准砝码与砝码托盘偏心时,砝码托盘将会因砝码重力不经过其重心,从而受到额外转矩,最终使得 3 个角锥棱镜的竖向位移不一致。

当标准砝码重心与砝码托盘重心在 x 、 y 方向的偏心距分别为 e_x 、 e_y 时,标准砝码与砝码托盘的偏心距为:

$$e = \sqrt{(e_x)^2 + (e_y)^2} \quad (1)$$

砝码托盘沿着标准砝码偏心方向与 x 轴的偏角为:

$$\eta_e = \frac{e_y}{e_x} \quad (2)$$

砝码托盘对应悬挂线圈上 3 个角锥棱镜与标准砝码偏心方向的偏角为:

$$\begin{cases} \eta_1 = \frac{\pi}{12} - \eta_e \\ \eta_2 = \frac{5\pi}{12} - \eta_e \\ \eta_3 = \frac{3\pi}{4} - \eta_e \end{cases} \quad (3)$$

砝码托盘受到标准砝码偏心产生的转矩为:

$$M = m_{\text{砝码}} g \cdot e \quad (4)$$

砝码托盘在标准砝码偏心距 e 位置时转动惯量为:

$$J = m_{\text{托盘}} \cdot e^2 = m_{\text{托盘}} e^2 \quad (5)$$

因此,砝码托盘由标准砝码偏心产生的转角为:

$$\Delta\eta = \frac{MR}{EJ} \quad (6)$$

式中: R 为砝码托盘半径, E 为砝码托盘材质的弹性模量。由转角 $\Delta\eta$ 引起砝码托盘竖向位移为:

$$H = \Delta\eta \cdot R \quad (7)$$

而转角 $\Delta\eta$ 引起砝码托盘在 3 个角锥棱镜的竖向位移为:

$$\begin{cases} H_1 = H - (\eta_1 \cdot R) \cdot \eta_1 \\ H_2 = H - (\eta_2 \cdot R) \cdot \eta_2 \\ H_3 = H - (\eta_3 \cdot R) \cdot \eta_3 \end{cases} \quad (8)$$

另外,结合式(1)~(7),可以得到标准砝码与砝码托盘偏心时 3 路角锥棱镜竖向位移的数学模型:

$$\begin{cases} H_1 = \frac{m_{\text{砝码}} g R^2}{m_{\text{托盘}} E e} - R \left(\frac{\pi}{12} - \frac{e_y}{e_x} \right)^2 \\ H_2 = \frac{m_{\text{砝码}} g R^2}{m_{\text{托盘}} E e} - R \left(\frac{5\pi}{12} - \frac{e_y}{e_x} \right)^2 \\ H_3 = \frac{m_{\text{砝码}} g R^2}{m_{\text{托盘}} E e} - R \left(\frac{9\pi}{12} - \frac{e_y}{e_x} \right)^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $R=47.8 \text{ mm}$ 、 $m_{\text{托盘}}=0.107 \text{ kg}$ 、 $E=71 \text{ GPa}$ 。

基于该模型,可以在砝码真空传递装置和砝码交换手将标准砝码传递至砝码托盘后,通过 3 路角锥棱镜竖向位移的数值,计算出标准砝码与砝码托盘的偏心距。根据每次传递标准砝码计算出的偏心距,评估标准砝码在砝码真空传递装置的传递过程的准确性。因此,该模型也称为砝码真空传递装置传递准确性模型。根据能量天平团队给出的需求,当 e_x 、 e_y 均小于 $1 \mu\text{m}$,将会给能量天平测量结果引入小于 10^{-9} 量值的准直误差,可忽略不计。

2 砝码支撑臂设计

实现标准砝码从能量天平到真空容器的传递,其本质是实现砝码在能量天平中的砝码交换手和真空容器中的三角架之间的传递。根据砝码交换手和真空容器中三角架的结构特点,并考虑到砝码传递过程中的安全性,本文设计了内部砝码支撑臂、外部砝码支撑臂和旋转砝码支撑臂,如图4所示。三者分别安装于内部传动平台、外部传动平台①和外部传递平台②。

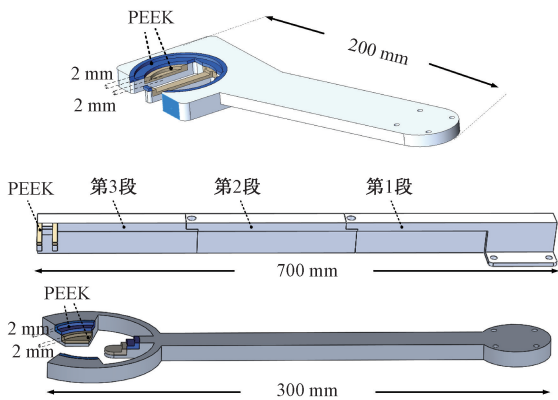


图4 依次为内部砝码支撑臂、外部砝码支撑臂和旋转砝码支撑臂

Fig. 4 The internal weight support arm, external weight support arm, and rotating weight support arm arranged in sequence

3个支撑臂均为凹陷式支撑臂,即支撑臂头部中心接收砝码部分设置4 mm厚度圆形凹槽,以防止砝码在传递过程中发生侧翻而意外掉落。此外,在凹陷处增加了2 mm厚的聚醚醚酮薄板,以减小砝码在传递时与其相互接触磨损引起的微小质量损失。支撑臂圆槽中心直径分别为56 mm和41 mm,以适配标准砝码的尺寸(直径为54 mm和39 mm,质量均为1 kg),并留有1 mm的余量间隙。

3 内部传递机构设计与分析

为了兼容能量天平内部结构及无磁真空环境,并实现砝码在砝码交换机械手、内部砝码支撑臂和外部砝码支撑臂之间的相互传递,本文采用了美国 Mirconix 公司的压电陶瓷直线导轨(PPS-110-14306,重复定位精度0.02 μm)及压电陶瓷转台(PR-50-11206,重复定位精度3.5 μrad)作为内部机构的驱动部件。

砝码通过砝码交换手的上下运动实现在砝码交换手和内部砝码支撑臂之间的传递。理想状态下,砝码交换手和内部砝码支撑臂进行砝码传递时,砝码交换手右侧

边缘与内部砝码支撑臂圆槽中心右侧边缘应有1 mm间隙。但当内部砝码支撑臂加载砝码后产生了角度为 θ 形变时,砝码交换手与砝码支撑臂之间会产生运动干涉,进而导致砝码传递失败。

综上,须对内部传递机构中砝码支撑臂平面进行角度调节,以保证砝码的安全传递,因此内部传递机构整体如图5所示。

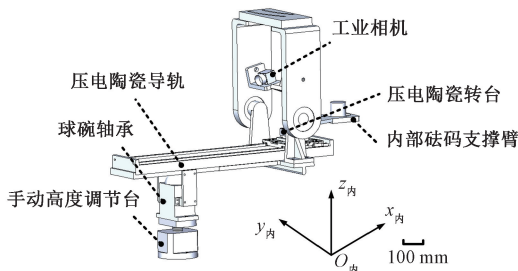


图5 内部传递机构

Fig. 5 Internal transmission mechanism

内部传递机构通过花岗岩支架上转接板和花岗岩支架下转接板安装于能量天平装置内部,如图5所示。整体尺寸约为600 mm×150 mm×700 mm,质量约为20 kg,主要包含压电陶瓷导轨、压电陶瓷转台、内部砝码支撑臂、球碗轴承、手动高度调节台和相机等部件。组成部件均适用于真空,并且材质为无磁不锈钢、航空级铝合金或者陶瓷,以确保内部传递机构适用于能量天平装置内部环境。该传递机构通过压电陶瓷导轨平台、转台和内部砝码支撑臂接收砝码交换手传递的砝码,并将砝码运移至指定位置,等待与外部传递机构进行砝码交换。

为了实现对内部砝码支撑臂平面的角度调节,首先根据该机构的固定方式,选用陶瓷深沟球轴承承担径向载荷,并且考虑到导轨运动过程中产生冲击和振动,选用具有抗冲击和抗振动能力的球碗轴承,两种轴承相互配合实现对 $\varphi_{x_{内}}$ 方向自由度的初步调节;然后通过内部砝码支撑臂上4个螺纹连接处添加不同厚度的高精度垫片,对 $\varphi_{x_{内}}$ 、 $\varphi_{y_{内}}$ 进一步精密调节,从而实现 $x_{内}$ 、 $y_{内}$ 平面的角度调节,即实现对内部砝码支撑臂平面的角度调节。

4 外部传递机构结构设计与分析

4.1 真空腔体设计与分析

为避免标准砝码吸附空气中的水蒸汽和颗粒而产生质量变化,外部传递机构的传动部件须处在真空环境中。为了满足砝码从外部砝码支撑臂到真空容器三角支架的传递空间要求,真空腔体的外形被设计为如图6所示。

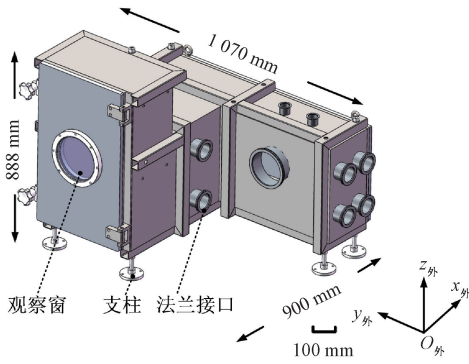


图 6 真空腔体
Fig. 6 Vacuum chamber

根据能量天平团队的需求,外传递机构(包含铝型材支架)总质量须小于 300 kg。减去铝型材支架及真空腔体内部传动机构的质量,真空腔体的质量须控制在 200 kg 以内。外传递结构的质量主要集中于真空腔体,为保证标准砝码在外传递机构中的顺利运动,并且与能量天平装置的外部空间无任何干涉,真空腔体的外形尺寸难以改变。因此,须改变真空腔体的薄板厚度或选择合适的材料来降低其质量。在诸多材料中,304 不锈钢具有强度高、外观美观的优点,本文采用 304 不锈钢作为真空腔体的材料。选用不同薄板厚度时,真空腔体的质量如表 1 所示。

表 1 不同薄板厚度下真空腔体的质量

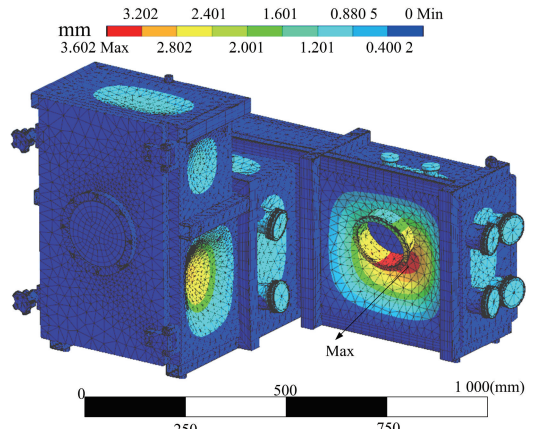
Table 1 Mass of vacuum chamber under different thicknesses

厚度/mm	2	3	4	5
质量/kg	147	164	182	199

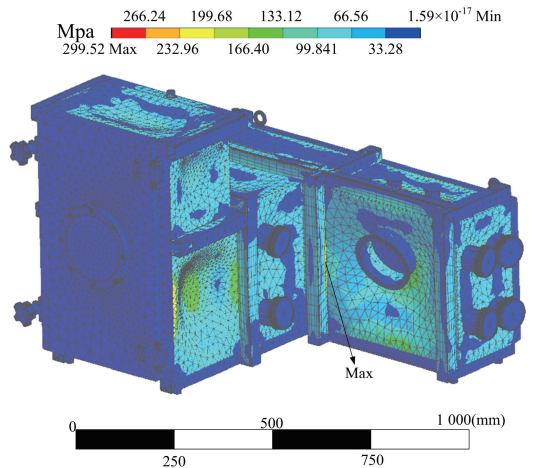
考虑到真空腔体是由不同薄板焊接组成,并且为了增强其整体强度,在表面上布置了部分加强筋,这些措施会增大真空腔体的质量。为保证真空腔体的质量不超过 200 kg,结合表 1,本文选择薄板厚度为 3 mm,真空腔体总质量约为 164 kg。

真空腔体最终被设计为大尺寸薄板结构,材质为 304 不锈钢(密度为 7930 kg/m^3 、杨氏模量 193 GPa、泊松比 0.3、屈服强度 515 MPa、抗拉极限强度 1035 MPa),并且在焊接处均布置了加强筋以增强整体强度。为了预测该腔体在工作环境下的变形情况,利用有限元仿真对该腔体在内部压强为 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 、外部为一个大气压的环境下进行形变分析,网格尺寸选择 30 mm,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,真空腔体最大形变为 3.602 mm,位于真空腔体连接泵的法兰口附近。最大应力为 299.52 MPa,小于材料的屈服强度,因此真空腔体不会



(a) 真空腔体变形仿真
(a) Deformation simulation of vacuum chamber



(b) 真空腔体应力仿真
(b) Stress simulation of vacuum chamber

图 7 真空腔体仿真分析

Fig. 7 Simulation analysis of vacuum chamber

产生塑性变形。真空腔体重量约为 175 kg,满足不超过 200 kg 的设计要求。

4.2 外部传递机构设计

外部传递机构主要由 $x_{外}$, $z_{外}$ 运动平台、 $y_{外}$, $z_{外} + \theta z_{外}$ 运动平台及 $z_{外}$ 运动平台组成,如图 8 所示。

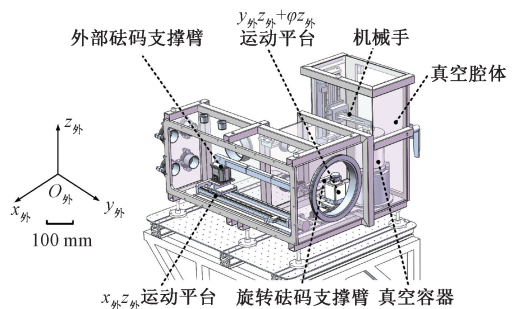


图 8 外部传递机构

Fig. 8 External transmission mechanism

$x_{外}$ 、 $z_{外}$ 运动平台由步进电机直线导轨及升降台组成,用于实现砝码从内部砝码支撑臂到外部砝码支撑臂的传递; $y_{外}$ 、 $z_{外}+\varphi z_{外}$ 运动平台由步进电机直线导轨、升降台和压电陶瓷转台组成,用于实现砝码在外部砝码支撑臂、砝码旋转支撑臂和真空容器三脚架之间的传递。 $z_{外}$ 运动平台通过开合真空容器机械手实现真空容器的开合,以配合旋转砝码支撑臂完成砝码的传递。砝码在上述2个支撑臂和真空容器间三脚架的传递都是通过上下运动实现的,因此也须在2个支撑臂上的4个螺纹连接处添加不同厚度的高精度垫片来对 $x_{外}$ 、 $O_{外}$ 、 $y_{外}$ 面进行角度调整,以保证砝码的安全传送。外传递机构整体质量约为230 kg,尺寸约为1 070 mm×900 mm×888 mm,通过插板阀及其转接件与能量天平真空罩上法兰接口连接,放置于铝型材支架上,其安装图如图9所示。

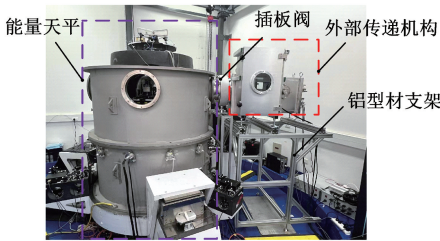


图9 外部机构安装图

Fig. 9 Installation diagram of external mechanism

5 分析与实验

5.1 传递装置传递准确性实验

为了验证砝码真空传递装置传递过程的准确性,使用直径54 mm、高度54 mm的砝码(质量约为1 kg)通过该装置进行砝码传递实验,实验系统结构如图10所示。

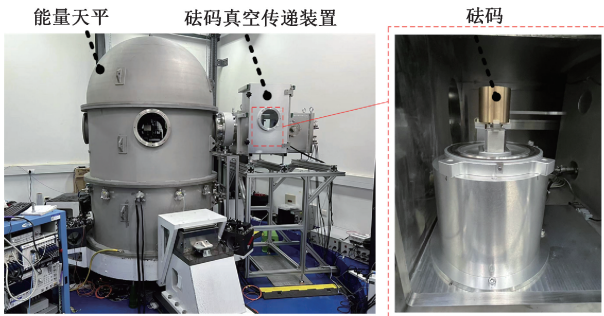


图10 砝码传递过程准确性实验系统

Fig. 10 Experimental system for accuracy of weight transfer process

将砝码通过砝码真空传递装置重复传递至砝码托盘上,通过悬挂线圈上3路被测角锥位移变化量,并基于砝码传递准确性模型,计算出砝码传递至砝码托盘后的偏

心距,从而得到了该装置的实际传递误差。首先,通过实验得到了砝码托盘空载时悬挂线圈上3路被测角锥位移,实验结果如图11所示。

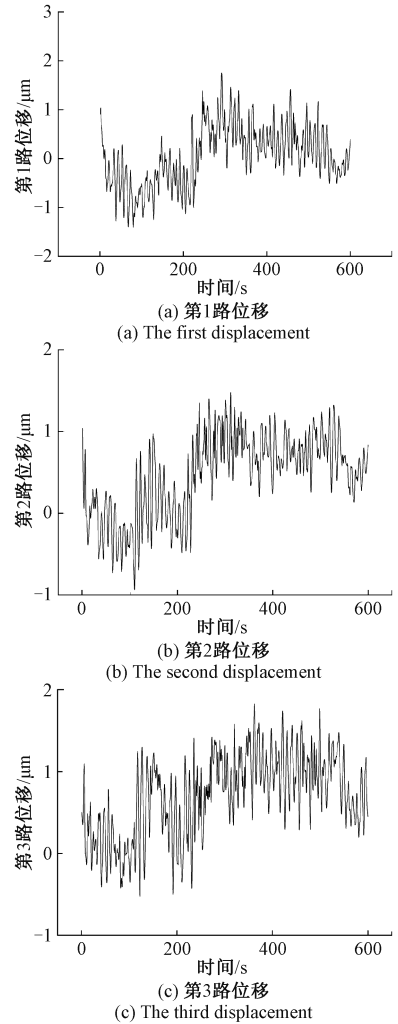


图11 砝码托盘空载时3路位移

Fig. 11 Three way displacement

结合图11,取3路位移的平均值,分别为:0.5 μm、0.5 μm和0.75 μm。

其次,重复10次砝码通过砝码真空传递装置传递至砝码托盘的过程,通过相同的实验方式得到3路位移的平均值,实验结果如表2所示。

由表2的数据可得砝码加载到砝码托盘上的3路位移平均值分别为:-2.508 μm、-2.449 μm和-2.223 μm,那么能量天平中悬挂线圈上3路被测角锥的位移变化量分别为-3.008 μm、-2.949 μm和-2.973 μm,即 $H_1 = -3.008 \mu\text{m}$ 、 $H_2 = -2.949 \mu\text{m}$ 、 $H_3 = -2.973 \mu\text{m}$,结合式(9)可得:

$$\begin{cases} e_x = 0.0116 \mu\text{m} \\ e_y = 0.0092 \mu\text{m} \end{cases} \quad (10)$$

表 2 砝码加载到砝码托盘上的 3 路位移

Table 2 Three way displacement of weight loaded onto weight tray

序号	第 1 路位移/ μm	第 2 路位移/ μm	第 3 路位移/ μm
0(空载时)	0.5	0.5	0.75
1	-2.34	-2.25	-2.33
2	-2.58	-2.18	-2.33
3	-2.73	-2.12	-2.12
4	-2.70	-2.49	-2.03
5	-2.48	-2.56	-1.96
6	-2.06	-2.95	-2.00
7	-2.24	-3.08	-2.09
8	-2.51	-2.42	-2.35
9	-2.59	-2.17	-2.54
10	-2.85	-2.27	-2.48

结合能量天平准直误差模型, e_x 、 e_y 将会给能量天平测量结果引入小于 10^{-9} 量值的准直误差, 因此砝码真空传递装置可以实现标准砝码的准确传递。

5.2 对能量天平准直状态的影响实验

能量天平测量过程中, 悬挂线圈姿态与激励磁体姿态保持一致。当激励磁体与水平面存在倾角 η 时, 悬挂线圈也与水平面存在倾角 η 。

激励磁体与磁体运动系统的升降台上板安装在—起。升降台上板上安装了双轴倾角传感器, 可实时测量激励磁体与水平面之间的倾角 η , 如图 12 所示。

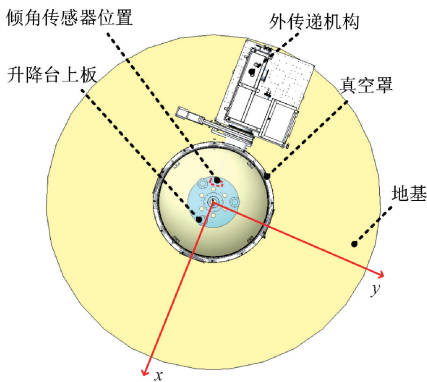


图 12 能量天平激励磁体倾角测量系统

Fig. 12 Joule balance excitation magnet inclination measurement system

本实验对能量天平安装砝码真空传递装置后的倾角进行测量, 并与未安装砝码真空传递装置的情况进行对

比分析, 结果如图 13 所示。

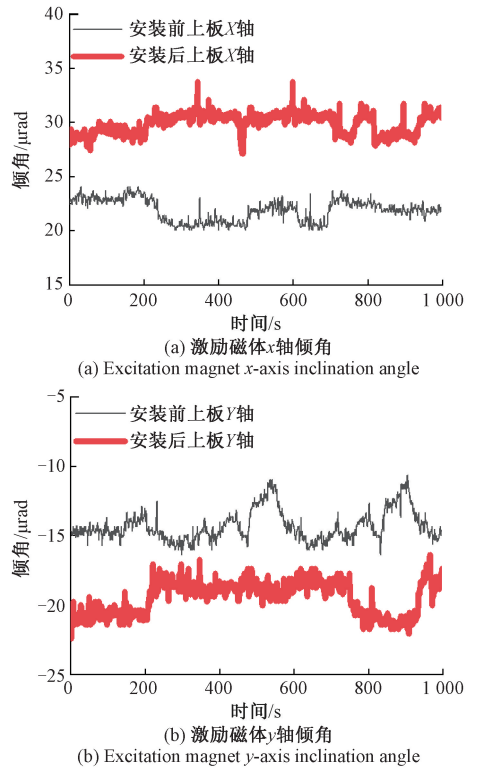


图 13 不同情况下的激励磁体倾角

Fig. 13 The inclination angle of the excitation magnet under different conditions

由图 13 可知, 砝码真空传递装置安装完成后, 激励磁体 x 、 y 方向倾角从原来的 $22 \mu\text{rad}$ 、 $-15 \mu\text{rad}$ 分别增大至 $30 \mu\text{rad}$ 、 $-18 \mu\text{rad}$ 。结合能量天平准直误差模型, 该倾角变化对能量天平测量结果的影响小于 10^{-9} 量级, 所以砝码真空传递装置不会影响能量天平准直状态。

6 结 论

针对能量天平质量量值传递过程中标准砝码暴露在空气中影响测量准确性的问题, 本文结合能量天平内外结构特点, 提出了一种组合式传递方法, 设计了对应的砝码真空传递装置, 实现了标准砝码“真空至真空”的传递。建立了传递装置传递准确性模型, 验证了该装置砝码传递过程的准确性。最后, 通过实验验证了该装置不会对能量天平精密准直状态产生影响。能量天平中砝码真空传递装置的成功研制可为质量量值传递方案的进一步研究提供重要技术支撑。

参考文献

[1] 李正坤, 张钟华, 王健. 质量单位——千克的重新定义[J]. 中国计量, 2018(7): 8-9, 16.

- LI ZH K, ZHANG ZH H, WANG J. Redefine of mass unit-kilogram [J]. China Metrology, 2018(7):8-9,16.
- [2] 王越, 白洋, 李正坤. 能量天平高灵敏度力传感装置研究[J]. 计量科学与技术, 2023, 67(4): 11-17.
WANG Y, BAI Y, LI ZH K. Research on a high sensitivity force sensing device of the joule balance[J]. Metrology Science and Technology, 2023, 67(4): 11-17.
- [3] 任孝平, 蔡常青, 张跃, 等. 质量单位重新定义后的量值传递研究[J]. 中国计量, 2016(9): 77-78.
REN X P, CAI CH Q, ZHANG Y, et al. Research on quantity transfer after redefining quality units[J]. China Metrology, 2016(9): 77-78.
- [4] 李正坤, 张钟华, 鲁云峰, 等. 能量天平及千克单位重新定义研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 68-81.
LI ZH K, ZHANG ZH H, LU Y F, et al. Research progress on Joule balance and redefinition of kilogram unit[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 68-81.
- [5] 甘伟, 曾涛, 白洋, 等. 能量天平悬挂线圈姿态调整方法研究[J]. 计量学报, 2023, 44(11): 1639-1645.
GAN W, ZENG T, BAI Y, et al. Research on attitude adjustment method of suspension coil in joule balance[J]. Acta Metrology Sinica, 2023, 44(11): 1639-1645.
- [6] 韩志, 王健, 罗哉. 质量基准量值传递过程中空气浮力影响的研究[J]. 计量学报, 2018, 39(2): 151-154.
HAN ZH, WANG J, LUO Z. Research on the influence of air buoyancy during the transmission of quality reference values [J]. Acta Metrology Sinica, 2018, 39(2): 151-154.
- [7] 王肖磊. 高准确度质量标准测量中空气浮力修正的研究[D]. 北京:中国计量科学研究院, 2011.
WANG X L. Research on air buoyancy correction in high accuracy quality standard measurement [D]. Beijing: National Institute of Metrology, 2011.
- [8] DAVIDSON S, STOCK M. Beginning of a new phase of the dissemination of the kilogram[J]. Metrologia, 2021, 58(3): 033002.
- [9] LI ZH K, BAI Y, XU J X, et al. The upgrade of NIM-2 joule balance since 2017[J]. Metrologia, 2020, 57(5): 055007-055021.
- [10] LI ZH K, XU J X, BAI Y, et al. The recent progress of the NIM-2 joule balance [C]. 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2020:1-2.
- [11] LI ZH K, ZHANG ZH H, LU Y F, et al. The first determination of the planck constant with the joule balance NIM-2 [J]. Metrologia, 2017, 54(5): 763-774.
- [12] 王健, 蔡常青, 胡满红, 等. 千克重新定义后的量值传递工作[J]. 计量科学与技术, 2019(5): 24-28.
WANG J, CAI CH Q, HU M H, et al. The transmission of measurement values after the redefinition of kilograms[J]. Metrology Science and Technology, 2019(5): 24-28.
- [13] 白洋, 王大伟, 李正坤, 等. 能量天平悬挂系统初始位姿识别方法[J]. 计量学报, 2020, 41(3): 273-278.
BAI Y, WANG D W, LI ZH K, et al. Initial pose recognition method for joule balance suspension system[J]. Acta Metrology Sinica, 2020, 41(3): 273-278.
- [14] 白洋, 鲁云峰, 廖福剑, 等. 能量天平激光干涉测量系统闲区长度测量方法研究[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 34-39.
BAI Y, LU Y F, LIAO F J, Research on dead-path measurement in interferometer system of joule balance [J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(4): 34-39.
- [15] BAI Y, LIU Y M, LU Y F, et al. Stability improvement for coil position locking of joule balance[J]. Metrologia, 2017, 54(4): 461-467.

作者简介



张邱, 2019年于江汉大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为精密机械设计。

E-mail: 541526402@qq.com

Zhang Qiu received his B. Sc. degree from Jianghang University in 2019. He is currently a master student at China Jiliang University. His main research interest is precision mechanical design.



白洋(通信作者), 2011年, 2013年和2017年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为质量量子基准和精密仪器技术。

E-mail: baiyang@nim.ac.cn

Bai Yang (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Harbin Institute of Technology in 2011, 2013, and 2017, respectively. He is currently an associate researcher at the National Institute of Metrology. His main research interests include quantum mass standard and precision instrument technology.