

静重式洛氏硬度标准机主试验力砝码组件质心测量方法研究

□徐广益¹ 苏晶晶² 阙鹏峰³

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司; 2. 宏光空降装备有限公司;
3. 福建省计量科学研究院)

【摘要】砝码组件的晃动对静重式洛氏硬度标准机的试验力准确性有很大的影响。本文介绍了一种三点法测量砝码质心的方法,设计了一种适用于静重式洛氏硬度标准机主试验力砝码组件的质心测量装置。该装置可准确地测量主试验力砝码组件的质心,并可以便捷地对砝码质心进行调整。经试验验证,运用该方法调整质心后的砝码组件可有效地减小静重式洛氏硬度标准机试验力加载时产生的晃动,从而提高了总试验力的准确性。

【关键词】三点法;质心;静重式洛氏硬度标准机

文献标识码: B

文章编号: 1003-1870 (2024) 01-0036-05

引言

静重式洛氏硬度标准机是采用实物砝码进行力值加卸载的洛氏硬度计,用于洛氏硬度的量值传递和溯源。因其力值准确度高、力值加载平稳、硬度测量准确,通常用于建立工作基准,甚至是国家基准。由于其力值加载结构的特殊性,砝码组件的质心与硬度机主轴的同轴度成了影响静重式硬度标准机力值准确的关键因素之一。硬度标准机上的砝码结构较为特殊,除了在中间有调整腔之外,在四周往往也会均布调整孔。并且,砝码在实际加工生产中,由于材料的不均匀性以及加工的不确定性,导致硬度标准机上砝码组件的质心往往不在中心。为了进一步提高静重式硬度标准机的力值准确性,本文结合研制中的静重式洛氏硬度标准机,设计了便于调整砝码质心的砝码,并且设计了采用三点法质心测量原理的质心测量调整装置对每级主试验力砝码的质心进行了测量并调整。通过试验验证,砝码组件的质心调整后,静重式洛氏硬度标准机的总试验力最大偏差相较于调整前有明显下降。

1 静重式洛氏硬度标准机

静重式洛氏硬度标准机的主试验力的砝码结构示意图如图1所示,其结构有:1. 初试验力反力架; 2. 主轴; 3. 硬度块; 4. 试台; 5. 定心球头; 6. 升降机构; 7. 主试验力砝码; 8. 主试验力反力架; 9. 机架平台。其工作原理为:升降机构拖着主试验力反力架做上升下降运动,主试验力反力架用于承载各级砝码,主试验力反力架与初试验力反力架之间通过定心球头使得主试验力的砝码加载至初试验力反力架上,从而完成主试验力的加载。通过其工作原理可知,主试验力砝码和主试验力反力架组成的砝码组件的质心是否在中心是影响试验力加载的关键因素。如果主试验力砝码组件的质心不在中心,产生较大的偏差时,反力架和砝码组成的试验力加载结构就会发生倾斜,发生晃动,造成试验力不稳,影响硬度试验的准确性。所以,需要对主试验力砝码组件的径向质心进行测量,通过调整其径向质心,使其达到一个相对平衡稳定的状态,从而提高试验力的准确性。

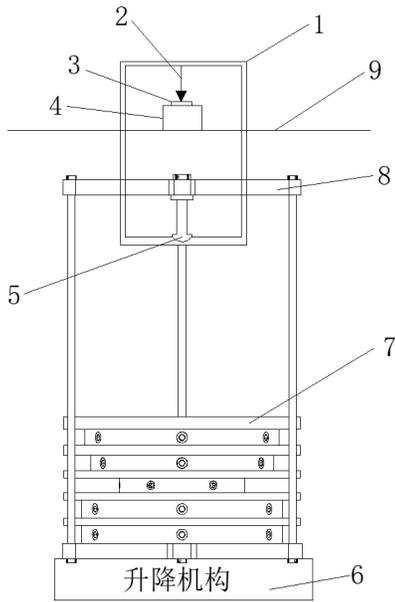


图1 静重式洛氏硬度标准机主试验力砝码结构示意图

2 三点法质心测试原理

三点法测量主试验力砝码组件质心的测试原理如下：采用3个高精度称重传感器搭建测量平台，3个高精度称重传感器安装在测量平台下方，呈等边三角形分布^[1]。以等边三角形的中心点为中心，三角形的外接圆的圆周半径为R，如图2所示。测量平台通过底部的地脚螺栓进行调平。测量砝码质心时，对三个称重传感器（S₁、S₂、S₃）先清零，然后将砝码放在测量平台上的设定位置上进行测量。砝码的质量m的计算公式如（1）所示：

$$m=P_1+P_2+P_3 \quad (1)$$

式中：m为被测物体质量，P₁、P₂、P₃为S₁、S₂、S₃三个压力传感器分别测得的重量值。

以测量平台中心为原点，轴向(Y向)竖直向上，纵向(X向)在水平面内由测量背面指向正面，横向(Z向)在水平面内，由右手法则确定^[2]。

从图2可以看出，若以坐标原点O为力矩支点，由横向(Z向)和纵向(X向)力矩平衡，有公式（2）成立：

$$\begin{cases} mx_0 - P_1x_1 - P_2x_2 - P_3x_3 = 0 \\ mz_0 - P_1z_1 - P_2z_2 - P_3z_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

计算得到横向和纵向质心坐标如式（3）所示：

$$\begin{cases} x_0 = \frac{P_1x_1+P_2x_2+P_3x_3}{m} \\ z_0 = \frac{P_1z_1+P_2z_2+P_3z_3}{m} \end{cases} \quad (3)$$

式中：Z₀为横向(Z向)质心坐标值，x₀为纵向(X向)质心坐标值。

本坐标系中，将P₁放置X轴上，Z₁=0。进一步的，将X、Z坐标用R表示，从而得到径向质心测量公式（4）：

$$\begin{aligned} x_0 &= \frac{R}{m}(P_2 + P_3 - 2P_1) \\ z_0 &= \frac{\sqrt{3}R}{2m}(P_3 - P_2) \end{aligned} \quad (4)$$

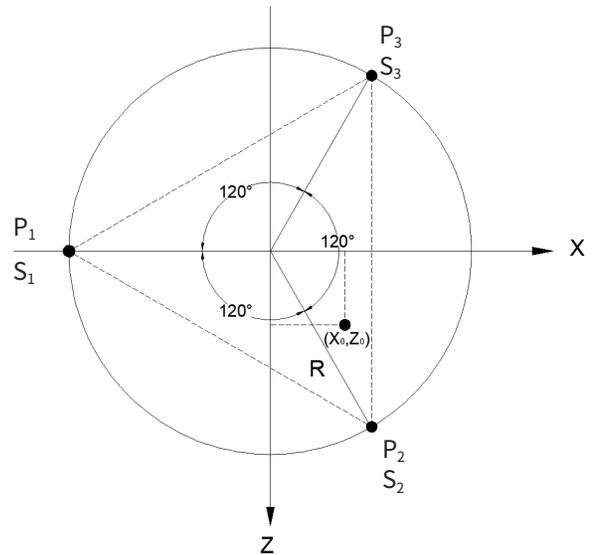


图2 三点法径向质心测量原理图

3 质心测量装置及砝码结构优化

3.1 质心测量装置

根据上述的三点法质心测试原理以及静重式洛氏硬度标准机的主试验力砝码组件的结构特点，对静重式洛氏硬度标准机的主试验力砝码组件质心测试装置进行研制。设计应遵循便于技术人员操作、质心测量准确的原则，同时应合理考虑装置的自动化，降低技术人员的劳动强度。

本文设计的质心测量装置的结构如图3、图4所示，图3结构有：1.高精度称重传感器；2.测量平台；3.被测砝码；4.砝码升降装置；5.导轨组件。其中，测量平台的底部具有高度调节螺栓，便于测量平台的调平。砝码升降装置采用伺服电机驱动滚珠丝杆进行升降，该结构可以实现升降平稳无冲击^[3]。底部的导轨组件可以使砝码升降装置根据被测砝码的大小进行调整，从而满足不同直径砝码的测量需求。

在装置进行测量砝码质心前，应先用标准样块

进行测量，比较试验测量值和实际值。测得的标准样块质量和质心位置只有在最大允许误差范围内才能投入使用，进行砝码的质心测量。该装置的运行原理为：首先调整好三个称重传感器的位置以及测量平台的水平，然后砝码通过升降装置，平稳地加载至测量平台上。分别读取三个称重传感器的示值，

代入公式（4），得到砝码的质心位置。接着，升降装置将砝码升起，砝码脱离测量平台。根据获得的砝码质心位置，在砝码的相应位置增加或减少配重块。然后再将砝码下降至测量平台进行测量，直至将质心调整至砝码的中心位置。

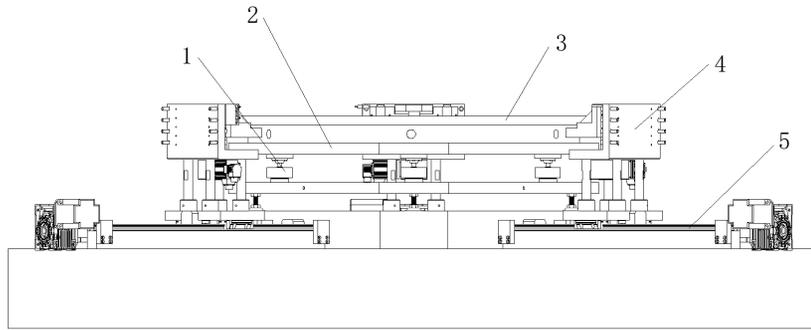


图3 洛氏硬度标准机砝码组件质心测量装置结构示意图

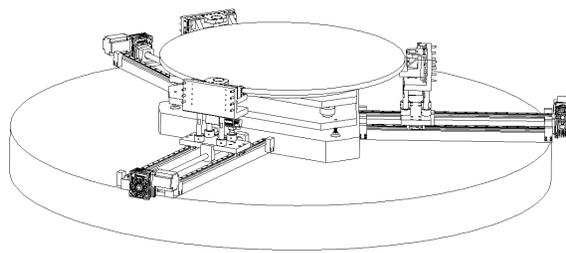


图4 洛氏硬度标准机砝码组件质心测量装置立体图

3.2 装置验证

本装置的测量对象最大质量为200kg，允许误差为0.2kg，径向（X、Z）质心允许误差 $\leq 5\text{mm}$ ，轴向（Y）质心允许误差 $\leq 10\text{mm}$ 。为初步验证该装置的准确性，参考JJF 2030-2023《多点称重法质心测量

仪校准规范》^[4]，用该装置对质量为200kg的标准样块进行测量，比较测量值和实际值。经过试验，测量结果如表1和表2所示，质量和质心位置测量值均在最大允许误差范围内，初步验证了该装置达到设计目的。

表1 质量测量结果

标准值/kg	实测值/kg					最大误差/kg	最大允许误差/kg
	1	2	3	4	5		
200.000	199.923	199.926	199.902	199.897	199.911	-0.103	0.200

表2 质心位置测量结果

质心标准质量	质心标准 测量设备定义坐标系下质心标准值 (,) mm	示值 (,) mm	示值误差 (,) mm
200kg	x=0mm	x=3.58mm	$\leq 5\text{mm}$
	z=0mm	z=2.78mm	$\leq 5\text{mm}$
	y=101.59mm	y=108.12mm	$\leq 10\text{mm}$

3.3 砝码结构优化

静重式洛氏硬度标准机的主试验力砝码组件不同于常规的砝码，它是一种特殊结构的砝码，通常设置有砝码调整腔，其位置一般在砝码的中心位置，或者在砝码的四周均布有调整孔，如图5-a所示。该结构便于调整硬度标准机的试验力。但是，该砝码结构因为其调整腔的位置是固定的，当要在砝码圆周上的某个特定位置进行增加或减少配重块

时，不便于质心的调整。因此，在原有的静重式洛氏硬度标注机砝码的结构基础上对砝码的结构进行了改进，其结构如图5-b所示。在其圆周的一圈设置有一个凹槽，配重块可以在圆周上的任意位置固定在凹槽上。在调整砝码质心时，配重块通过锁紧螺钉固定在需要的位置。该结构成功地使砝码质心的调整变得更加便捷、高效。

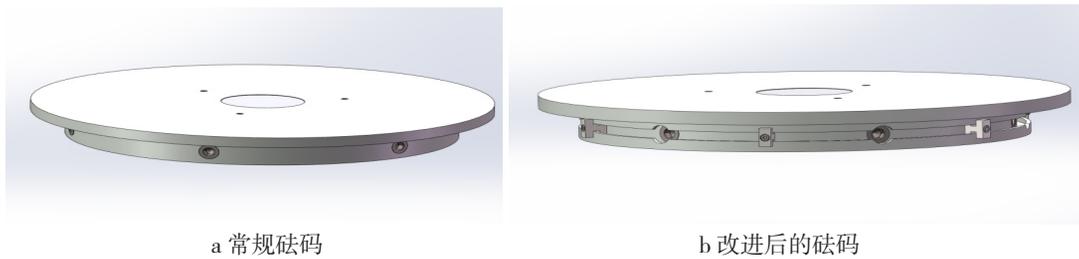


图5 砝码三维图

4 试验验证

本文主要研究静重式洛氏硬度标准机主试验力砝码组件通过三点法测量质心并调整后，使其加载在初试验力反力架上时减小由于偏心引起的晃动，从而提高试验力的准确性。试验除了通过三点法测量主试验力砝码组件的质心外，还需对比砝码组件质心调整前后洛氏硬度标准机试验力最大偏差的变化。试验步骤为：①在调整砝码组件质心前，依据《JJG 112-2013 洛氏硬度计检定规程》对静重式洛氏硬度标准机的各级总试验力进行测量，取下压头，将标准测力仪放置在试台上，对准主轴轴线，预压3次，保持5s读数，测量3次，通过分析最大偏差并观察主试验力砝码的晃动情况，分析主试验力砝码组件晃动带来的影响。②拆下砝码，通过三点法测量每块砝码的质心，并且通过测量的结果在质心测量装置上调整砝码质心，使其质心靠近其轴心。③将

质心调整后的砝码重新装回洛氏硬度标准机，按①的方法再次测量各级总试验力的力值。④分析试验数据。

其中，试验力最大偏差按公式(5)计算：

$$W = \frac{K - K_0}{K_0} \times 100 \quad (5)$$

式中：W——试验力误差；

k_0 ——试验力对应的标准测力仪示值；

k——3次读数中与 K_0 相差最大的读数。

砝码组件质心调整前，各级总试验力的测量结果如表3所示。从表3可以看出，随着总试验力的增大，其最大偏差随着减小。说明试验力较小时，砝码组件的稳定性反而越差。通过观察发现，砝码晃动明显。试验力越小，砝码晃动对力值的影响就越明显。

表3 砝码质心调整前各级总试验力最大偏差

测试点 (N)	示值(N)			最大偏差
	第1遍	第2遍	第3遍	
147.1	146.9	147.3	146.8	0.20%
294.2	294.5	294.6	294.1	0.14%
441.3	440.9	440.8	441.8	0.11%
588.4	588.2	588.9	588.3	0.08%
980.7	980.1	981.3	980.5	0.06%
1471	1471.5	1471.8	1470.6	0.05%

各级砝码的质心首次测量的结果如表4所示,从表4可以看出,第一级和第四级的砝码质心偏离轴心较大。在质心测量装置上进行调整后的质心坐标如

表3所示。通过调整,砝码的质心坐标最大值的绝对值均不大于5mm。

表4 各级砝码质心调整前后坐标

砝码	调整前		调整后	
	x (mm)	z (mm)	x (mm)	z (mm)
第一级	40.2	-11.8	-2.6	1.8
第二级	-15.6	29.3	1.1	2.2
第三级	25.6	38.8	-1.9	3.2
第四级	53.3	-5.6	-2.1	-1.7
第五级	13.5	35.2	1.8	-2.5

砝码组件的质心调整后,对各级总试验力再次测量,测量结果如表5所示。从表5可以看出,总试验力的最大偏差整体都有减小的趋势,其中第一级砝码的减小幅度最大。并且通过观察,主试验力砝

码组件的晃动有所减小。通过砝码质心的调整,成功地减小了静重式洛氏硬度标准机主试验力砝码组件的晃动,减小了总试验力的最大偏差。

表5 砝码质心调整后各级总试验力最大偏差

测试点 (N)	示值 (N)			最大偏差
	第1遍	第2遍	第3遍	
147.1	147.1	147.1	147	0.07%
294.2	294.3	294.3	294.1	0.03%
441.3	441.2	441.5	441.4	0.05%
588.4	588.1	588.5	588.4	0.05%
980.7	980.3	980.7	980.6	0.04%
1471	1471.5	1471.4	1471.0	0.03%

5 结语

本文介绍了基于三点法测量砝码质心的原理,设计了一种用于静重式洛氏硬度标准机主试验力砝码组件质心测量的装置。该装置由高精度称重传感器、测量平台、升降装置和导轨组件等部件组成。在研制静重式洛氏硬度标准机的过程中,运用该质心测量调整装置进行主试验力砝码组件的质心测量和调整。经试验验证,该装置成功地将各级砝码组件的质心调整至轴心附近。质心调整后的主试验力砝码组件有效地减小了加载时的晃动幅度,从而减小了静重式洛氏硬度标准机的不确定度。

[2] 周念. 小质量不规则物体质心测量方法研究[J]. 载人航天.2017,(03): 409-413.

[3] 阙鹏峰. 大质量砝码检定装置的设计[J]. 衡器, 2021(10):41-46.

[4] JJF 2030-2023《多点称重法质心测量仪校准规范》[S].

[5] JJG 112-2013《洛氏硬度计检定规程》[S].

作者简介

徐广益, 工程师, 国家一级注册计量师, 主要研究方向: 力学计量。

参考文献

[1] 刘明勇. 质量质心测量方法及实例分析[J]. 制造技术与机床.2019,(04): 138-141.