

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.04.10

# 砵码磁性测量过程中几何形状修正因子的计算与影响

戴艳梅, 蔡岩, 常建奎, 李冰

(河北省计量监督检测院, 河北 石家庄 050051)

**摘要:** 通过一系列实验和数据, 讨论用磁化率计法测量砵码磁性时各测量分量对砵码磁化率测量结果的影响, 并着重分析了砵码几何形状修正因子的测量与确定, 比较不同测量方式的特点, 以求减少砵码磁性测量时的误差。

**关键词:** 砵码; 体积磁化率; 几何形状修正因子

中图分类号: TB931

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)04-0037-04

## Calculation and Effect of Geometry Correction Factor in the Magnetic Properties Measurement of Weights

DAI Yanmei, CAI Yan, CHANG Jiankui, LI Bing

(Measurement Supervision and Testing Institute in Hebei Province, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** Through a series of experiments and data, the article discussed the effect of each measurement component on the measurement results of weight magnetic susceptibility when measuring the magnetic properties of weights with the susceptometer method, and analyzed the measurement and determination of geometry correction factor of weights emphatically and compared the characteristics of different measurement methods to reduce the error of magnetic properties measurement of weights.

**Key words:** weight; volume magnetic susceptibility; geometry correction factor

## 0 引言

JJG 99-2006《砵码检定规程》中, 明确规定了检定  $F_2$  等级及以上砵码时对磁性的要求。随着砵码体积磁化率和永久磁化强度测量工作在全国范围内全面开展, 越来越多的计量检定机构和实验室开展了此项工作。在检测过程中发现: 不同的测试方法或相同方法不同的操作习惯造成测量结果的差异。本文就此问题展开探讨, 并着重从砵码的几何修正因子的测量与确定方面, 比较不同测量方式的特点以及对计算结果的影响。

## 1 砵码磁性测量方法概述

国际建议 OIML111-2004 中, 推荐表 1 中几种砵码磁性测量方法。<sup>[1-3]</sup>

表 1 OIML111-2004 中推荐的磁性测量方法及特点

测量方法	测量项目	适用范围	测量不确定度
高斯计法 (Gaussmeter)	磁化强度	1 g 及以上各等级砵码	扩展不确定度约为 30% ( $k=2$ )
磁化率计法 (the susceptometer method)	磁化率和磁化强度	2 g~50 kg 弱磁性 ( $x<1$ ) 砵码	磁化率的测量扩展不确定度为 10%~20% ( $k=2$ ), 对小砵码的测量不确定度更大
吸引法 (the attracting method)	磁化率	100g 以上 $E_2$ 等级砵码, 20g 以上 $F_1$ 等级、 $F_2$ 等级砵码, 磁化率测量范围为 $0.01 \leq x \leq 1.5$ (磁导率 $1.01 \leq \mu r \leq 2.5$ )	测量扩展不确定度为 30% ( $x=0.01$ 时) 到 13% ( $x=1.5$ 时) ( $k=2$ )
磁通法 (the fluxgate method)	磁化率	100g 以上砵码, 磁化率测量范围为 $0.0001 \leq x \leq 1.00$ (磁导率 $1.0001 \leq \mu r \leq 2.00$ )	测量扩展不确定度为 40%~4% ( $k=2$ ) (在 $0.005 \leq x \leq 0.05$ 时)

收稿日期: 2016-05-27

作者简介: 戴艳梅 (1965-), 女, 正高级工程师, 主要从事力学计量的研究和检测工作。

以上几种方法中,磁化率计法是JJG 99-2006《砝码检定规程》中推荐的方法,也是我国各计量检定机构和相关实验室普遍使用的测量方法。这其中的具体形式以国际计量局(BIPM)设计的磁化率计(如图1)和Sartorius生产的YSZ02C(YSZ01C)系列磁化率计(如图2)最常见。

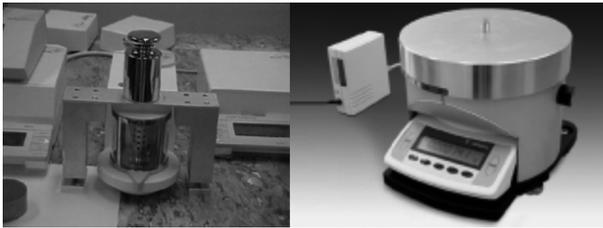


图1 BIPM设计的磁化率计 图2 YSZ02C系列磁化率计

虽然这两种磁化率计具体结构不同,但却使用了相同的测量原理:使用圆柱体标准磁体、标尺分度值为 $1\mu\text{g}$ 或 $0.1\mu\text{g}$ 的微量质量比较仪、无磁工作台(放置被测砝码)加以组合,通过测量弱磁砝码在磁场梯度(由永久强磁铁产生)中所受的力,用公式(1)计算砝码的磁化率( $x < 1$ )和永久磁化强度。<sup>[4]</sup>

$$x = \frac{F_a}{I_a \cdot F_{\max} - 0.4F_a} = \frac{-(\Delta m_1 + \Delta m_2)g}{I_a \frac{3\mu_0 m_d^2}{32\pi Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g}$$

$$\mu_0 M_z = \frac{F_b}{\frac{m_d}{Z_0} \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot I_b} - \frac{x}{1 + 0.23x} B_{Ez}$$

$$= -\frac{2\pi Z_0 (\Delta m_1 - \Delta m_2)g}{I_b m_d} - \frac{x}{1 + 0.23x} B_{Ez} \quad (1)$$

式中: $x$ 为砝码的(体积)磁化率; $F_a$ 为用于磁化率的平均力值; $F_{\max}$ 为用于磁化率的最大力值; $F_b$ 为用于磁性的平均力值; $\Delta m_1, \Delta m_2$ 为衡量仪器显示的质量变化的平均值; $g$ 为当地重力加速度; $I_a, I_b$ 为砝码的几何修正因子; $\mu_0$ 为磁常数(真空中的磁导率); $m_d$ 为磁铁磁矩; $Z_0$ 为磁铁中心高度到砝码底面的距离; $M_z$ 为(永久)磁化强度; $B_{Ez}$ 为实验室内大气中磁场强度的垂直分量。

从公式(1)中可以看出,在测量磁化率 $x$ 时,对测量结果产生影响的分量有:质量变化量 $\Delta m_1, \Delta m_2$ ;砝码底部到磁铁中心的距离 $Z_0$ ;磁铁磁矩 $m_d$ ;砝码的几何修正因子 $I_a$ 以及当地的重力加速度 $g$ 。在2010年《砝码磁性测量国内比对报告》中,有以下结论:“在对砝码磁化率不确定度分析中发现,对测量结果影响较大的分量依次为质量变化量 $\Delta m_1, \Delta m_2$ ,磁铁中心到

砝码底部距离 $Z_0$ ,永久磁铁磁矩 $m_d$ 及OIML形状的砝码底凹部分高度 $h$ ”。<sup>[4]</sup>

对于以上几个影响因素,在对砝码磁化率进行测量时,可做如下分析:砝码底部到磁铁中心的距离 $Z_0$ 和磁铁磁矩 $m_d$ 作为已知数据使用(以磁化率计生产商提供的数据或靠标准样块的测量校准获得),测量地点的重力加速度 $g$ 取自当地重力加速度数值。这三项数据一经确定,在测量过程中便不需改变,不同操作人员带来的偏差可忽略不计。质量变化量 $\Delta m_1, \Delta m_2$ 通过电子比较仪的示值得到,也可通过多次测量取平均值的方法减小测量误差。砝码的几何修正因子 $I_a$ 通过公式求得。

$$I_a = 1 - \left(\frac{Z_0}{Z_1}\right)^4 \frac{1 + \frac{(R_w/Z_0)^2}{3}}{[1 + (R_w/Z_0)^2]^3} + \left(\frac{Z_0}{Z_1}\right)^4 \frac{1 + \frac{(R_w/Z_1)^2}{3}}{[1 + (R_w/Z_2)^2]^3} \quad (2)$$

式中: $Z_0$ 为砝码底部到磁铁中心的距离; $Z_1$ 为砝码顶部到磁铁中心的距离; $R_w$ 为砝码的半径。此公式只适用于正圆柱体砝码,对于常见的提钮式形状砝码和OIML形状砝码需要进一步修正才能使用。

BIPM的方法是通过“inner”圆柱体和“outer”圆柱体获得几何修正因子 $I_a$ 的数值,如图3所示;Sartorius YSZ系列磁化率计通过自带的配套软件,将砝码分割为底面下凹部分、砝码主体部分、颈部收缩部分、颈部放大部分和提手部分,对其分别进行测量,依靠软件的几何趋近算法获得与被测砝码高度拟合的砝码模型并由此计算出几何修正因子( $I_a$ ),如图4所示。

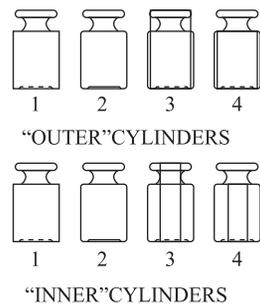


图3 BIPM几何形状修正因子算法<sup>[6]</sup>

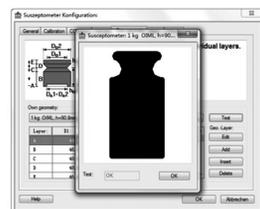


图4 Sartorius YSZ系列磁化率计的几何形状修正因子算法<sup>[6]</sup>

因为算法的不够完善以及几何测量时存在的误差，完全准确的  $I_a$  值是无法得到的。以上两种几何修正因子的计算方法不同，加上操作人员对砝码的测量习惯也不尽相同，因此有必要对以上几种计算方法和实际测量时可能出现的情况进行比较，供砝码磁性测量工作参考。

## 2 几种测算方法的比较

选择一个质量为 1 kg 的 OIML 形状砝码(此砝码是 2010 年全国比对所用)，其外形主要几何参数为：直径 47.9 mm；高 58.5 mm；凹底最大直径 33.5 mm；凹底最小直径 27.2 mm；凹底深度 0.76 mm；提钮端部直径 42.9 mm；提钮颈部直径 27.0 mm；砝码总高度 80.8 mm。

根据实测，当  $Z_0 = 20.13$  mm 时， $\overline{\Delta m_1} = -0.239$  mg， $\Delta m_2 = -0.223$  mg，该磁化率计永久磁矩  $m_d = 0.0904$  Am<sup>2</sup>，测量地点的重力加速度  $g = 9.7997$  m/s<sup>2</sup>，此时磁场强度为  $H = 1764$  Am<sup>-1</sup>。测量时环境温度为 20℃，相对湿度为 40%。

该砝码在全国比对时，使用各参比实验室测量结果的平均值作为参考值，其体积磁化率参考值为  $x = 0.0030$  ( $U = 0.0004$ ,  $k = 2$ )

1) 在以上已知条件下进行计算，并比较不同算法测量结果的区别，如表 2。

表 2 两种几何修正因子算法测量结果比较

序号	计算方法	求得 $I_a$ 值	求得 $x$ 值	所描述的形状
1	几何趋近	0.77999	0.00311	
2	外模圆柱体	0.77528	0.00313	
3	内模圆柱体	0.77496	0.00313	

以上算法 1“几何趋近”使用 Sartorius 磁化率计配套软件计算，操作人员测量并输入砝码各部分直径及

层高，由计算机计算出  $I_a$  的值。

算法 2 和算法 3 依据以下公式计算求得：

$$I_{a外} = I_a(r_{圆柱体}, h_{圆柱体}) + I_a(r_{提钮顶部}, h) - I_a(r_{提钮顶部}, h_{圆柱体}) - I_a(r_{凹底部分}, h_{凹底部分})$$

$$I_{a内} = I_a(r_{圆柱体}, h_{圆柱体}) + I_a(r_{提钮颈部}, h) - I_a(r_{提钮颈部}, h_{圆柱体}) - I_a(r_{凹底部分}, h_{凹底部分})$$

其中凹底部分直径使用其底面最大直径计算。

以上三种算法中，“几何趋近法”所描述的砝码形状最贴近于砝码的真实形状，随着操作者对砝码几何测量及砝码各层描述更加细致，此算法的准确度将进一步提高。“外模”和“内模”两种算法所描述的形状与砝码的真实形状相差略大，但与第一种算法所求得的  $I_a$  和  $x$  值相差很小：外模法和内模法相对于几何趋近算法求得的  $I_a$  和  $x$  值均相差 0.6%，远远小于该砝码在此种测量方法下的相对扩展不确定度 ( $U = 13\%$ ,  $k = 2$ )。可见，三种计算方法虽然不同，尤其是外模、内模算法所描述的形状与砝码的真实形状有一定的差别，但其计算结果均可接受，测量结果也得到了参考值的验证。

2) 以下实验以“几何趋近法”为基础，比较在适当简化砝码几何形状的描述时，数据上的差别，如表 3。

表 3 对砝码描述适当进行简化后的比较

序号	描述方法	求得 $I_a$ 值	求得 $x$ 值	所描述的形状
1	几何趋近 按照原砝码形状描述	0.77999	0.00311	
2	几何趋近 按照原砝码形状描述，但没有底部凹部分	0.89414	0.00272	
3	几何趋近 从软件数据库中任选一同质量 OIML 形状砝码 ( $h = 90.8$ mm)，并加入底下凹面部分的描述	0.78085	0.00311	
4	几何趋近 从软件数据库中任选一同质量 OIML 形状砝码 ( $h = 90.8$ mm) 但没有底部凹部分的描述	0.89447	0.00271	

从以上数据中可以看出,第1组与第3组描述所得  $I_a$  和  $x$  值极为相近,其数值差别不超过 0.2%;第2组与第4组结果也极为相近,其数值差别不超过 0.1%;但第1组与第2组描述所得  $I_a$  和  $x$  结果却相差很大,在数值上分别相差 14.6%和 12.5%;第3组与第4组分别相差 14.6%和 12.9%。可见,对于此 1 kg 砝码,其底部凹面的几何尺寸对  $I_a$  的影响远大于砝码其他部分的影响。事实上,我们从数据库中选择  $h = 90.8$  mm 的 OIML 砝码是与被测砝码高度和直径相差较大的一款,但只需修改被测砝码凹底的数据,其测试结果便与按照原砝码形状描述的极为接近。

3)将砝码反向放置后再进行测量,实测得知  $\Delta m_1 = -0.245$  mg,  $\Delta m_2 = -0.233$  mg,  $Z_0$ ,  $m_d$ ,  $g$  值不变,结果如表 4。

表 4 将砝码反向放置后的比较

序号	描述方法	求得 $I_a$ 值	求得 $x$ 值	所描述的形状
1	几何趋近 倒放,按照原砝码 形状描述	0.80370	0.00313	
2	几何趋近 倒放,按照原砝码 形状描述,但去掉 了对底面下凹部分 的描述	0.80321	0.00313	
3	几何趋近 倒放,从软件数据 库中任选一同质量 OIML 形状砝码 ( $h = 90.8$ mm), 并加入 地下凹面部分的 描述	0.80332	0.00313	
4	几何趋近 倒放,从软件数据 库中任选一同质量 OIML 形状砝码 ( $h = 90.8$ mm) 但没有底 部下凹部分的描述	0.80333	0.00313	

将砝码倒置后,质量变化量  $\Delta m_1$ ,  $\Delta m_2$  与几何修正因子  $I_a$  同时变化,其他参数则没有改变。在砝码制造

材质均匀一致的前提下,四次测量体积磁化率  $x$  的结果均为 0.00313,与第1组测量时的结果仅差 0.6%。只是因为砝码原来下凹的底面变成了砝码的顶端,所以此时底部凹面存在与否对测量结果的影响非常小。

### 3 结论

通过以上几个方面的实验及分析可知:在砝码磁化率测量过程中,砝码的几何修正因子是比较重要的影响因素,同时因砝码形状的复杂性,求得砝码的几何修正因子的方式较为复杂。在对砝码形状描绘的实际操作中,砝码底面凹陷部分的重要性高于砝码直径和高度,因此这一部分不可忽略;从以上几种测量方法的比较中可以看出,靠近标准磁体方向的几何形状对测量结果的影响,远大于远离标准磁体部分几何形状的影响。

在砝码的日常检定过程中,繁复的求解过程会带来较大的工作量和较低的工作效率,在保证测量准确性的前提下,可适当简化其求解方法:对于没有底面凹底的砝码,可直接从软件数据库中选取同质量,高度接近的砝码模型进行计算;对于有凹底的 OIML 形状砝码,在从软件数据库中选取砝码后必须对其进行修改,增加底面凹陷部分的形状描述,或者直接对其进行翻转测量。若缺少砝码凹底的描述,会带来较大的误差,使体积磁化率的测量结果数值偏小,尤其是对处在临界值下的砝码,可能会对合格与否的判断结果产生影响。

### 参 考 文 献

- [1] OIML R 111 - 1 Edition 2004 INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY[Z]. 2004.
- [2] 李占宏,王健. 砝码磁性测量国内比对报告[R]. 2010.
- [3] J Nava, R S Davis and J Moran. Intercomparisons between CEN-AM, BIPM and TROEMNER to determine the volume magnetic susceptibility of a 100 g weight, 2001.
- [4] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 99-2006 砝码检定规程[S]. 北京:中国计量出版社, 2006.
- [5] 托马斯费林,托马斯弗勒利希,德特勒夫海登布卢特,砝码件的磁性能检验[J]. 衡器, 2006(2): 48-50.
- [6] Davis RS, Breteuil PD. Determining the Magnetic Properties of 1 kg Mass Standards[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1995, 100(3): 209-225.