

基于磁化率计法的砝码磁性测量结果及自动化分析

□上海市计量测试技术研究院 李媛 张莉莉 金悦

【摘要】目前砝码磁性测量主要依靠人工操作磁化率计完成，工作效率较低。本文主要对METTLER TOLEDO的XPR6U和Satorius的YSZ02C两台磁化率计的磁性测量结果进行对比分析其一致性和准确性，并基于这两种形式的磁化率计的结构特点分别分析它们实现自动测量砝码磁性时的技术重点，为实现砝码磁性测量自动化提供一些参考。

【关键词】砝码；磁化率计法；磁性测量结果；自动化

引言

随着现代电子科学技术的发展，电子天平和质量比较仪已广泛应用于各行各业，由于其工作原理是电磁力平衡补偿原理，即在失衡情况下，通过内部线圈中电流大小的改变使天平重新达到平衡，这会在其周围产生一个较强的电磁场，测量过程中因砝码带有磁性，与这种磁场会不可避免产生相互作用力，而这种力在质量测量中无法与重力相区分，从而使测量结果出现偏差，影响其准确度^[1]，因此为保证砝码质量测量的准确度，需要重视砝码的磁性测量。当砝码的磁化率和永久磁化强度满足规程的要求时，可确保磁作用可以忽略^[2]。目前砝码磁性测量主要依靠人工操作，为避免磁性测量结果受人为因素影响，提高测量结果的准确度和可靠性，磁性测量的自动化已成趋势，本文对基于现有磁化率计进行自动化改造的可行性进行分析，以实现砝码磁性测量的自动化。

1 砝码磁性测量

JJG 99-2006《砝码检定规程》中给出的磁性测

量方法是磁化率计法。目前，国内机构采用的主要是瑞士的METTLER TOLEDO公司研制的和德国的Satorius公司生产的两种磁化率计测量砝码磁性。这两种磁化率计的测量原理是相同的，只是计算砝码几何参数时采用了不同的方法。瑞士METTLER TOLEDO公司研制的磁化率计采用的是最基本的正圆柱体测量方法，将两组砝码的正圆柱体几何参数分别组合为“inner”圆柱体和“outer”圆柱体^[2]；而德国Satorius研制的磁化率计则采用将砝码分为五个部分的圆柱体和圆锥台形，通过测量数据得到砝码的模拟图形。

1.1 磁化率计法

磁化率计法是通过测量弱磁砝码在永久强磁铁产生的磁场梯度中所受的力，来确定砝码的磁化率（ $\chi < 1$ ）和永久磁化强度^[3]，如图1所示。

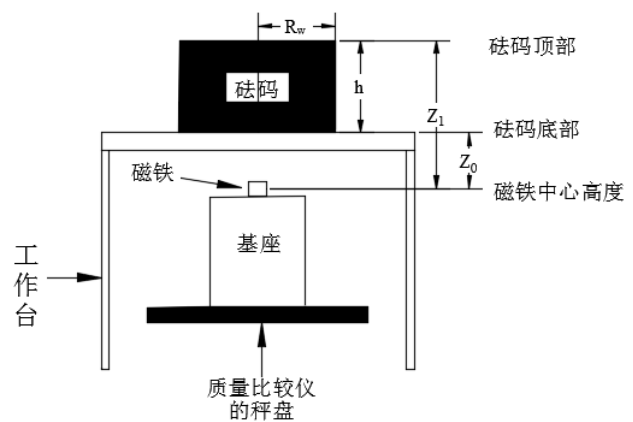


图1 磁化率计法

1.1.1 被检砝码

目前国内使用的砝码材料主要为不锈钢和合金

材料，常用的有无磁不锈钢、普通不锈钢、JF-1 无磁不锈钢和铜合金等^[4]。本文选取F₁ 等级圆柱体砝码 1kg 和 500g 各一只作为被检砝码，材料为不锈钢，密度为7.90kg/dm³，圆柱体砝码形状如图2 所示。用游标卡尺测量被检砝码的几何尺寸参数，数据见表 1。

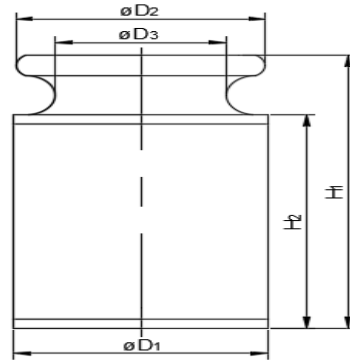


图2 被检砝码形状

表1 被检砝码几何参数 (mm)

标称值	主体直径D ₁	提钮最窄处直径D ₂	提钮最宽处直径D ₃	总高度H ₁	主体高度H ₂
1kg	47.96	26.94	42.88	80.78	58.56
500g	37.82	22.36	33.85	63.95	46.82

1.1.2 测量仪器

本文选用Satorius 公司的YSZ02C 和METTLER TOLEDO 公司的XPR6U 两种形式的磁化率计分别测

量被检砝码的磁性，两台磁化率计分别如图3 和图4 所示，并分析测量结果判断两台磁化率计测量结果的一致性和可靠性。



图3 YSZ02C (Satorius)



图4 XPR6U (METTLER TOLEDO)

1.1.3 测量程序

首先使用游标卡尺测量出被检砝码的三个参数即砝码的高度h，砝码底部到磁铁中心的距离Z₀，砝码的半径R_w，测量结果见表2，之后将被检砝码放在工作台上分别读取在磁铁的N 极向下和向上时衡量仪器的示值，再通过公式 (1) (2) 分别计算得到磁铁对上面的砝码产生的引力和斥力，最后代入下列公式计算得到被检砝码的磁化率和极化强度。

两种形式的磁化率计调节砝码底部到磁铁中心距离的方法不同，Satorius 的磁化率计是通过转动称盘使其升高或降低，从低到高共有Z₁-Z₅ 五个位置可调节，不同规格的砝码需设置合适的高度。METTLER TOLEDO 的磁化率计是通过在称盘下叠加特定高度的量块调节称盘高度，测量同一等级砝码所需设置的高度相同。

表2 被检砝码的测量参数 (mm)

标称值	h	R _w	Z ₀ (YSZ02C)	Z ₀ (XPR6U)
1kg	80.78	23.98	27.16	43.53
500g	63.95	18.91	27.16	43.53

$$F_1 = -\Delta m_1 \times g \quad (1)$$

$$F_2 = -\Delta m_2 \times g \quad (2)$$

$$\text{磁化率: } \chi = \frac{F_a}{I_a \times F_{\max} - 0.4 \times F_a}$$

$$\text{其中: } F_{\max} = \frac{3\mu_0}{64\pi} \times \frac{m_d^2}{Z_0^4}, \quad F_a = \frac{F_1 + F_2}{2}$$

$$\text{磁极化强度: } \mu_0 M_z = \frac{F_b}{\frac{m_d}{Z_0} \times \frac{1}{4\pi} \times I_b} - \frac{\chi}{1 + 0.23\chi} B_{EZ}$$

$$\text{其中: } F_b = \frac{F_1 - F_2}{2}$$

$$\text{几何修正因子: } I_a = 1 - \left(\frac{Z_0}{Z_1}\right)^4 - \frac{1 + \frac{(R_w/Z_0)^2}{3}}{\left[1 + (R_w/Z_0)^2\right]^3} + \left(\frac{Z_0}{Z_1}\right)^4 \times \frac{1 + \frac{(R_w/Z_1)^2}{3}}{\left[1 + (R_w/Z_1)^2\right]^3}$$

$$I_b = 2\pi \times \left\{ \frac{\frac{(R_w/Z_0)^2}{\left[1 + (R_w/Z_0)^2\right]^{3/2}} - \frac{(R_w/Z_0)^2 / (Z_1/Z_0)^3}{\left[1 + \left(\frac{R_w/Z_0}{Z_1/Z_0}\right)^2\right]^{3/2}}}{\left[1 + \left(\frac{R_w/Z_0}{Z_1/Z_0}\right)^2\right]^{3/2}} \right\}$$

1.1.4 砝码几何参数计算方法

METTLER TOLEDO 研制的磁化率计的砝码几何参数的计算方法如图5所示, 采用的是最基本的正圆柱体测量方法, 通过两组砝码的正圆柱体几何参数组合为“INNER”圆柱体和“OUTER”圆柱体^[5]。而 Satorius 研制的磁化率计采用图6所示的方法计算砝码的几何参数, 将砝码分为五个部分的圆柱体和圆锥台形, 通过测量数据得到砝码的模拟图形, 得到

的1kg被检砝码的模拟图形如图7所示。砝码分割的越精细, 砝码的模拟图形就越逼真, 测量结果也更加准确。

表3是被检砝码在两种形式的磁化率计中所对应的几何修正因子, 可以看出Satorius的几何修正因子均大于METTLER TOLEDO的几何修正因子, 这两种计算方法的结果相差较大。

表3 被检砝码几何修正因子

标称值	XPR6U				YSZ02C	
	I _a		I _b		I _a	I _b
	I	O	I	O		
1kg	0.4999	0.5013	1.1659	1.1940	0.77299	1.95504
500g	0.3651	0.3669	0.8129	0.8363	0.64365	1.59105

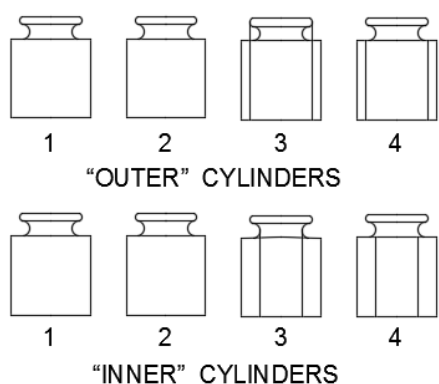


图5 METTLER TOLEDO几何参数计算方法

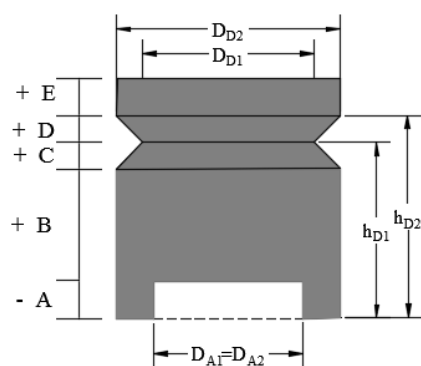


图6 Satorius几何参数计算方法



图7 Satorius被检砝码的模拟图形

1.2 磁性测量结果分析

表4和表5分别是Satorius的YSZ02C和METTLER TOLEDO的XPR6U两台磁化率计对被检砝码进行磁性测量的结果，多次测量取平均值作为最终测量结果，十次测量结果的平均值和标准偏差见表6，可以看出XPR6U的测量结果比YSZ02C的整体偏小，这可能是由于XPR6U配备的比较仪的分辨率高于YSZ02C配备的比较仪。两台磁化率计的磁化率平

均值的差值最大为0.000386，极化强度的差值最大为0.0164 μT ，由砝码检定规程可知F1等级1kg和500g砝码的最大磁化率和最大极化强度分别为0.2和25 μT ，最大差值与极限值相比几乎可以忽略不计，因此两种形式的磁化率计的磁性测量结果具有较高的一致性。对比两台磁化率计的测量结果的标准偏差，可以看出YSZ02C磁化率计测量极化强度和XPR6U磁化率计测量磁化率的重复性较好。

表4 被检砝码的磁化率和极化强度 (YSZ02C)

测量次数	1kg		500g	
	磁化率 χ	极化强度 (μT)	磁化率 χ	极化强度 (μT)
1	0.00273	0.07	0.00252	0.04
2	0.00273	0.13	0.00275	0.16
3	0.00262	0.13	0.00268	0.14
4	0.00275	0.18	0.00265	0.10
5	0.00269	0.13	0.00286	0.21
6	0.00255	0.05	0.00247	0.27

测量次数	1kg		500g	
	磁化率 χ	极化强度 (μT)	磁化率 χ	极化强度 (μT)
7	0.00275	0.12	0.00260	0.15
8	0.00227	0.30	0.00260	0.22
9	0.00273	0.07	0.00268	0.14
10	0.00258	0.08	0.00252	0.16

表5 被检砝码的磁化率和极化强度 (XPR6U)

测量次数		1kg		500g	
		磁化率 χ	极化强度 (μT)	磁化率 χ	极化强度 (μT)
1	I	0.00236	0.084	0.00219	0.164
	O	0.00235	0.081	0.00218	0.158
2	I	0.00194	0.169	0.00246	0.094
	O	0.00193	0.164	0.00245	0.089
3	I	0.00200	0.115	0.00201	0.138
	O	0.00200	0.111	0.00200	0.132
4	I	0.00217	0.167	0.00183	0.164
	O	0.00217	0.161	0.00182	0.158
5	I	0.00266	0.147	0.00237	0.145
	O	0.00265	0.142	0.00236	0.139
6	I	0.00239	0.075	0.00207	0.193
	O	0.00238	0.072	0.00206	0.186
7	I	0.00213	0.111	0.00263	0.126
	O	0.00213	0.106	0.00261	0.120
8	I	0.00229	0.156	0.00230	0.145
	O	0.00228	0.151	0.00229	0.140
9	I	0.00223	0.156	0.00220	0.175
	O	0.00222	0.150	0.00219	0.169
10	I	0.00237	0.097	0.00269	0.082
	O	0.00236	0.093	0.00268	0.078

表6 被检砝码十次磁性测量结果的平均值和标准偏差

标称值	YSZ02C				XPR6U			
	磁化率 χ		极化强度 (μT)		磁化率 χ		极化强度 (μT)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
1kg	0.00264	0.00015	0.126	0.073	0.002254	0.00021	0.1277	0.035
500g	0.00263	0.00012	0.159	0.064	0.002275	0.00027	0.1426	0.035

2 砝码磁性测量自动化可行性分析

目前国内机构主要是人工测量砝码磁性，为避免磁性测量结果受人为主观因素影响，提高测量结果的准确度和可靠性，砝码磁性测量的自动化已成趋势，基于现有磁化率计进行自动化改造是目前实现磁性测量自动化的一个可行方案。由上述磁性测量结果的分析可知，两种形式的磁化率计的测量结果相差很小，仅需考虑磁化率计本身的结构特性是否可实现磁性测量自动化。

两台磁化率计均采用磁化率计法测量砝码磁性，但二者在实际操作上存在一些区别，在测量一套1g~500g砝码的磁性时，METTLER TOLEDO的磁化率计可先分别测量这一套砝码在磁铁N极向下时与磁铁之间的相互作用力，之后将磁铁翻转为N极向上，再测量这一套砝码在磁铁N极向上时与磁铁之间的相互作用力，最后通过软件计算得到这一套砝码的磁化率和极化强度。而Satorius的磁化率计在测量成套克组砝码的磁性时，需先根据砝码规格转动称盘调节至合适的高度，再依次测量单只砝码在磁铁N极向下和向上时的磁力值，最后生成该只砝码的磁性测量结果，测量一套克组砝码磁性时需重复操作12次。

若基于METTLER TOLEDO的磁化率计实现砝码磁性自动化测量，由于其在整个测量过程中只需翻转一次磁铁方向即可完成一套克组砝码磁性测量，而且在测量同一等级砝码磁性时不需要改变称盘高度，但磁铁体积很小，所以只需考虑如何实现磁铁翻转的自动控制。如果选择基于Satorius的磁化率计，由于其每测量一只砝码都需要翻转一次磁铁方向，而且在测量同一等级不同规格的砝码时需转动称盘调整高度（Z1-Z5）以满足测量要求，除了考虑磁铁翻转，还需考虑称盘高度如何实现自动调节。Satorius的磁铁是旋转仪器侧面的旋钮调整磁铁的位置，该旋钮通过一套机械结构与磁铁连在一起，无需打开称盘和直接接触磁铁即可翻转磁铁，操作简单，更容易实现自动化控制。

3 结论

对比分析YSZ02C和XPR6U两台磁化率计的磁

性测量结果后发现，磁化率和极化强度的最大差值与极限值相比几乎可以忽略不计，磁性测量结果具有较高的一致性，YSZ02C磁化率计测量极化强度和XPR6U磁化率计测量磁化率的重复性较好。在实现砝码磁性测量自动化可行性方面，METTLER TOLEDO的磁化率计的重点在于如何实现磁铁翻转的自动控制，而Satorius的磁化率计除了考虑磁铁翻转，还需考虑称盘高度如何实现自动调节。如果上述问题都能找到合适的技术解决，那么基于这两种形式的磁化率计均能实现自动测量砝码磁性，并确保砝码磁性测量结果具有一定的准确性和可靠性。

参考文献：

- [1] 李占宏, 郭锐. 砝码磁性检测问题的探讨[J]. 中国计量, 2009(08):79-80.
- [2] JJG 99-2006, 砝码检定规程[S].
- [3] International Organization of Legal Metrology. OIML R111-Edition 2004, 2004.
- [4] 劳柳清. 砝码磁性测量值的评定与分析[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(12):3.
- [5] 姚弘, 丁京安, 曾波. 关于砝码磁性测量装置的研究[J]. 中国计量, 2005(10):54-56.
- [6] 徐峰. 砝码磁性检测与分析[J]. 中国计量, 2011, 000(002):105-107.
- [7] 戴艳梅, 蔡岩, 常建奎, 等. 砝码磁性测量过程中几何形状修正因子的计算与影响[J]. 计测技术, 2016, 36(4):4.
- [8] 姚弘, 丁京安, 曾波. 关于砝码磁性测量装置的研究[J]. 中国计量, 2005(10):54-56.
- [9] 杜丽雯. 砝码的磁性检测与分析[J]. 中国新通信, 2015, 17(4):1.
- [10] 姚弘, 丁京安, 柳建明, 等. 浅析砝码的磁性[J]. 中国计量, 2004(12):68-69.

作者简介：李媛，女，江苏扬州人，硕士研究生，目前就职于上海市计量测试技术研究院，主要研究领域：质量计量。