

# 砵码磁性测量 计量比对总结报告

组织单位：全国质量密度计量技术委员会

主导实验室：中国计量科学研究院

## 目 录

一.概述

二.实验室及样品情况

三.各实验室结果汇总

四.比对总结

附录 1 PTB 及奥地利计量院出具的检测报告

附录 2 砝码体积磁化率和磁化强度不确定度计算

附录 3 砝码磁性测量不确定度分量说明

## 一.概述

砝码作为质量量值传递系统中的实物量具，对其物理特性和计量特性的控制会影响到质量计量的准确度，随着 JJG99-2006《砝码》检定规程的颁布实施，我国对于砝码的各项性能指标要求已经逐步与国际建议 R111 保持一致。

目前随着各种质量比较仪和电子天平在国内量值传递系统中的应用逐渐增多，由于其衡量装置的结构采用电磁力补偿原理实现平衡，因此由补偿线圈泄漏的磁场与砝码的磁性之间不可避免的会产生力的作用，从而影响了高准确度质量测量工作。因此对砝码磁性（包括磁化率和永久磁化强度两项指标）计量性能的控制显得尤其重要。在实施的《砝码》规程中已经包括有对各个等级砝码的磁化率和永久磁化强度的要求，用来确定砝码的这些磁性参数的测量方法和测量设备也已被国内很多实验室配备。

目前我国约有数十家省级计量机构已经拥有不同的测量砝码磁性装置并开展测量工作。目前国内的砝码制作材料分为 JF1 无磁不锈钢、无磁不锈钢和普通不锈钢，铜合金等，根据积累的测量经验，发现有些普通不锈钢制作的高准确度等级如 E<sub>2</sub>、F<sub>1</sub> 等级砝码磁性指标不能够满足砝码规程的要求，有些砝码在经过一定的使用时间后做周期检定时检测的砝码磁性超出相应准确度等级砝码磁性指标。

因此 2008 年 9 月全国质量密度计量技术委员会决定在全国范围内开展一次砝码磁性测量的比对工作；由于砝码磁性测量在国内属于刚刚开展时间不长的项目，大家对磁性测量装置的认识和使用方法以及磁性测量数据处理方法、不确定度分析的理解有所不同，为确保砝码磁化率等指标的测量量值准确、一致、可靠，也有必要进行一次全国范围内的砝码磁性测量国内量值比对工作。

通过此次砝码磁性测量比对工作，检验国内各计量机构目前对砝码磁性测量能力，保证我国砝码磁性技术指标的测量准确一致，统一国内各计量机构对磁性测量方法和不确定度评定的认识，总结适合我国目前质量计量现状的砝码磁性测量手段，尽量减小砝码磁性对衡量结果的影响，同时也为高精度质量计量研究工作积累经验和奠定基础。

为了使比对工作顺利进行，19 个参比单位于 2009 年 09 月在厦门召开了比对方案论证会，详细讨论了砝码磁性测量比对工作的计划和方案，对

于测量过程及不确定度评估（涉及砝码体积磁化率和磁化强度两项指标）中的各个分量计算进行了统一的认识，并制订了比对的详细时间表。

## 二. 实验室及样品情况

本次砝码磁性测量比对工作的主导实验室为中国计量科学研究院力学与声学计量科学研究所质量密度研究室。实验室内配备有两套砝码磁性测量装置，工作人员对砝码的磁性测量的开展工作时间较长，已经对国内大量的 E<sub>2</sub>、F<sub>1</sub> 等级和不同材料的砝码磁性进行了大量的测试，积累了比较丰富的经验。另外随着中国计量院在昌平院区的建设完成，质量实验室的测量环境获得了极大的提升改善。鉴于只有配备砝码磁性测量装置的实验室才能够参加比对工作，此次参比实验室数目为 19 个，详见表 1。

表 1 参比实验室信息汇总

参比实验室	地址	负责人
中国计量科学研究院	北京市北三环东路 18 号	李占宏
北京市计量检测科学研究院	北京市安外小关安苑东里 1 区 14 号	陈 雪
上海市计量测试技术研究院	上海市张衡路 1500 号	程丽苑
中国测试技术研究院	四川省成都市玉双路 10 号	薛 靛
广东省计量科学研究所	广东省广州市广园中路松柏东街 30 号	李春燕
江苏省计量科学研究院	江苏省南京市光华东街 3 号	胡 强
浙江省计量科学研究院	浙江省杭州市天目山路 222 号	葛 锐
河北省计量科学研究所	河北省石家庄市友谊南大街 175 号	常建奎
山东省计量科学研究院	济南市千佛山东路 28 号	车丽娜 史莉
福建省计量科学技术研究所	福州市屏东路 9 号	高建斌
蓬莱市水玲砝码厂	山东省大辛店电子工业园	王 遥
吉林省计量科学研究院	长春市卫星路 7440 号	姜 成
辽宁省计量科学研究院	沈阳市和平区文化路三巷 9 号	孙 达
广西计量检测研究院	南宁市星湖路南一里一巷 16 号	蒙爱东
常州市富月砝码有限公司	江苏省溧阳市绸缪镇建设北路 8 号	孔 磊
新疆计量测试研究院	乌鲁木齐市北京南路 40 号附 9 号	徐秋莎
广州市计量检测技术研究院	广州市广仁路 11 号	傅忆宾
云南省计量测试技术研究院	昆明市滇池路 566 号	黄 坚
安徽省计量院	合肥市包河工业园延安路	王 力

由于砝码磁性属于易被环境改变的参数，为保证比对样品在传递过程中的性能稳定一致，在比对过程中验证传递标准示值的变化情况，比对计划采用了花瓣式比对方式。按环式进行了几个参比实验室的比对后，将传

递标准返回主导实验室进行复校。利用同一传递标准，将参比实验室分为3组。具体分组及传递时间如表2。

表2 参比实验室传递时间

组别	代码	参比实验室	起始时间
C1	N	中国计量科学研究院	2009.11.20~2009.12.01
	S	山东省计量科学研究院	2009.12.01~2009.12.16
	P	蓬莱市水玲砝码厂	2009.12.16~2009.12.26
	G	广东省计量科学研究所	2009.12.26~2010.01.04
	L	辽宁省计量科学研究院	2010.01.04~2010.01.15
	H	河北省计量科学研究所	2010.01.15~2010.01.24
	J	江苏省计量科学研究院	2010.01.24~2010.02.04
	N	中国计量科学研究院	2010.02.04~2010.03.05
C2	N	中国计量科学研究院	2010.02.04~2010.03.05
	Z	浙江省计量科学研究院	2010.03.05~2010.03.15
	B	吉林省计量科学研究院	2010.03.15~2010.03.24
	D	北京市计量检测科学研究院	2010.03.24~2010.04.06
	C	中国测试技术研究院	2010.04.06~2010.04.15
	A	安徽省计量院	2010.04.15~2010.04.28
	X	新疆计量测试研究院	2010.04.28~2010.05.09
	N	中国计量科学研究院	2010.05.10~2010.05.19
C3	N	中国计量科学研究院	2010.05.10~2010.05.19
	Y	云南省计量测试技术研究院	2010.05.19~2010.05.29
	U	广西计量检测研究院	2010.05.29~2010.06.07
	E	广州市计量检测技术研究院	2010.06.07~2010.06.13
	M	上海市计量测试技术研究院	2010.06.13~2010.06.25
	F	福建省计量科学技术研究所	2010.06.25~2010.07.07
	K	常州市富月砝码有限公司	2010.07.07~2010.07.27
	N	中国计量科学研究院	2010.07.27~2010.08.10

比对样品采用了三个质量值为 1kg 的砝码，因为砝码的体积磁化率和磁化强度都与砝码的几何形状有关，而且目前各单位使用的不同准确度等级及不同质量的砝码（毫克组砝码除外）形状基本上都与这三个砝码类似，它们分别为圆柱体、OIML 形状和一等砝码形状，为便于区分，三个砝码代码为 C1、O1 和 D1，砝码详见图 1。为尽量降低各参比实验室测量工作强度，本次比对工作中由主导实验室对三个砝码的几何尺寸进行测量，统一给出了计算中所需要的砝码直径和高度等数据，见表 3。

表 3 砝码主要几何参数

主要部分几何尺寸	一等形状砝码 D1	圆柱体砝码 C1	OIML 形状砝码 O1
圆柱体部分			
直径(mm)	51.5	54.1	47.9
高(mm)	51.2	55.8	58.5
凹底部分			
最大直径(mm)	/	/	33.5
最小直径(mm)	/	/	27.2
深度(mm)	/	/	0.76
提钮部分			
提钮端部直径(mm)	35.1	/	42.9
提钮颈部直径(mm)	15.9	/	27.0
砝码总高度(mm)	85.1	55.8	80.8

说明：砝码几何尺寸测量扩展不确定度  $U=0.1\text{mm}$ ， $k=2$ 。



图 1 比对样品砝码 (D1、C1、O1)

砝码采用不锈钢加工制造，圆柱体砝码和 OIML 形状砝码由德国 Sartorius 公司提供，一等形状砝码由国内生产，三个砝码均送到国外检测机构测试，配有砝码磁化率测试数据和不确定度证书；为防止砝码在运输及测量过程中（持续时间约为 9 个月）发生意外情况，如被磁化从而影响比对工作正常进行，本次比对还备有三个与比对样品相似的砝码。

### 三.各实验室结果汇总

各实验室分别用本单位的磁化率计对样品进行了测量，在参比实验室中有七个实验室设备的实际分度值为 0.001mg，另外的实验室设备实际分度值为 0.0001mg；表 4 为参比实验室仪器信息汇总。

表 4 参比实验室仪器信息汇总

组别	参比实验室	实验室磁化率计设备信息		
		参数	磁场强度HO ( $\text{Am}^{-1}$ )	磁场强度HD ( $\text{Am}^{-1}$ )
C1	N	2594	311	0.1201
	S	1897	191	0.085
	P	1146	173	0.085
	G	716	178	0.08909
	L	1473	197	0.085
	H	1764	179	0.09040
	J	1486	197	0.08452
	N	2594	311	0.1201
	C2	N	2594	311
Z		715	175	0.08579
B		1495	199	0.0850
D		1471	197	0.0849
C		1746	177	0.08936
A		1670	166	0.09306
X		1487	197	0.085
N		2594	311	0.1201
C3	N	2594	311	0.1201
	Y	744	192	0.085
	U	1488	198	0.085
	E	1762	178	0.08934
	M	1393	192	0.085
	F	1145	173	0.085
	K	185	185	0.085
	N	2594	311	0.1201

所有参比实验室均提交了三个砝码的磁化率和磁化强度的测量结果，主导实验室的多次测量结果为对传递砝码磁性的稳定性进行观测的结果。由于 OIML 形状的砝码以及一等的 1kg 砝码的磁化率和磁化强度按照计算公式存在内模与外模两个测量结果，但在实际工作中我们最后判断砝码磁性



合格与否是按照内、外模测量结果的最大值作为最终判定依据的，所以本次比对的磁性测量结果汇总按照各参比单位提供的最大测量值。表 5 为主导实验室在比对过程中的不同时间对 3 个不同形状的砝码磁性测量结果及扩展不确定度 ( $k=2$ )。

表 5 砝码磁性稳定性数据

项目 序号	体积磁化率 $c$			磁化强度 $m_0M$ ( $mT$ )		
	C1	O1	D1	C1	O1	D1
1	0.0039 $\pm 0.0004$	0.0031 $\pm 0.0008$	0.0413 $\pm 0.0050$	-0.05 $\pm 0.06$	-0.03 $\pm 0.04$	77.7 $\pm 4.0$
2	0.0039 $\pm 0.0004$	0.0031 $\pm 0.0008$	0.0400 $\pm 0.0048$	-0.03 $\pm 0.06$	-0.02 $\pm 0.06$	76.1 $\pm 4.0$
3	0.0039 $\pm 0.0004$	0.0031 $\pm 0.0008$	0.0390 $\pm 0.0048$	-0.03 $\pm 0.06$	-0.02 $\pm 0.06$	75.0 $\pm 3.8$
4	0.0039 $\pm 0.0004$	0.0031 $\pm 0.0008$	0.0445 $\pm 0.0054$	-0.02 $\pm 0.06$	0.00 $\pm 0.06$	76.3 $\pm 4.0$

表 6、表 7 及表 8 为圆柱体砝码 C1 和 O1ML 形状砝码 O1 及一等砝码 D1 的磁化率测量结果汇总。

表 6 砝码 C1 磁化率  $c$  及不确定度汇总

组别	参比实验室	磁性测量结果 (圆柱体砝码 C1)		
		体积磁化率 $c$	合成标准不确定度	扩展不确定度 ( $k=2$ )
C1	N	0.0039	0.0002	0.0004
	S	0.0039	0.0004	0.0008
	P	0.0040	0.0002	0.0004
	G	0.0040	0.0002	0.0004
	L	0.0038	0.0002	0.0004
	H	0.0040	0.0002	0.0004
	J	0.0039	0.0002	0.0004
	N	0.0039	0.0002	0.0004
C2	N	0.0039	0.0002	0.0004
	Z	0.0040	0.0002	0.0004
	B	0.0036	0.0002	0.0004
	D	0.0037	0.0002	0.0004
	C	0.0039	0.0002	0.0004
	A	0.0037	0.0002	0.0004
	X	0.0038	0.0002	0.0004
	N	0.0039	0.0002	0.0004



C3	N	0.0039	0.0002	0.0004
	Y	0.0037	0.0002	0.0004
	U	0.0037	0.0002	0.0004
	E	0.0039	0.0003	0.0006
	M	0.0037	0.0002	0.0004
	F	0.0037	0.0002	0.0004
	K	0.0037	0.0002	0.0004
	N	0.0039	0.0002	0.0004

表 7 砵码 01 磁化率  $c$  及不确定度汇总

组别	参比实验室	磁性测量结果 (OIML 砵码 01)		
		体积磁化率 $c$		
		体积磁化率 $c$	合成标准不确定度	扩展不确定度 ( $k=2$ )
C1	N	0.0031	0.0004	0.0008
	S	0.0030	0.0003	0.0006
	P	0.0031	0.0002	0.0004
	G	0.0031	0.0002	0.0004
	L	0.0030	0.0002	0.0004
	H	0.0031	0.0003	0.0006
	J	0.0030	0.0003	0.0006
	N	0.0031	0.0004	0.0008
C2	N	0.0031	0.0004	0.0008
	Z	0.0031	0.0002	0.0004
	B	0.0029	0.0002	0.0004
	D	0.0029	0.0002	0.0004
	C	0.0030	0.0002	0.0004
	A	0.0029	0.0002	0.0004
	X	0.0029	0.0002	0.0004
	N	0.0031	0.0004	0.0008
C3	N	0.0031	0.0004	0.0008
	Y	0.0029	0.0002	0.0004
	U	0.0029	0.0002	0.0004
	E	0.0031	0.0002	0.0004
	M	0.0029	0.0002	0.0004
	F	0.0029	0.0002	0.0004
	K	0.0033	0.0002	0.0004
	N	0.0031	0.0004	0.0008

表 8 砝码 D1 磁化率  $c$  及不确定度汇总

组别	参比实验室	磁性测量结果（一等砝码 D1）		
		体积磁化率 $c$		
		体积磁化率 $c$	合成标准不确定度	扩展不确定度 ( $k=2$ )
C1	N	0.0413	0.0025	0.0050
	S	0.0385	0.0039	0.0058
	P	0.0386	0.0020	0.0040
	G	0.0400	0.0030	0.0060
	L	0.0382	0.0029	0.0058
	H	0.0404	0.0026	0.0052
	J	0.0389	0.0023	0.0046
	N	0.0400	0.0024	0.0048
C2	N	0.0400	0.0024	0.0048
	Z	0.0390	0.0026	0.0052
	B	0.0360	0.0019	0.0038
	D	0.0380	0.0020	0.0040
	C	0.0395	0.0025	0.0050
	A	0.0436	0.0027	0.0054
	X	0.0404	0.0021	0.0042
	N	0.0390	0.0024	0.0048
C3	N	0.0390	0.0024	0.0048
	Y	0.0380	0.0020	0.0040
	U	0.0369	0.0019	0.0038
	E	0.0406	0.0022	0.0044
	M	0.0370	0.0028	0.0056
	F	0.0370	0.0022	0.0044
	K	0.0438	0.0031	0.0062
	N	0.0445	0.0027	0.0054

图 2 为各参比实验室的测量（1kg 圆柱体砝码磁化率  $c$ ）比对结果图

图 3 为各参比实验室的测量（1kg OIML 形状砝码磁化率  $c$ ）比对结果图

图 4 为各参比实验室的测量（1kg 一等形状砝码磁化率  $c$ ）比对结果图

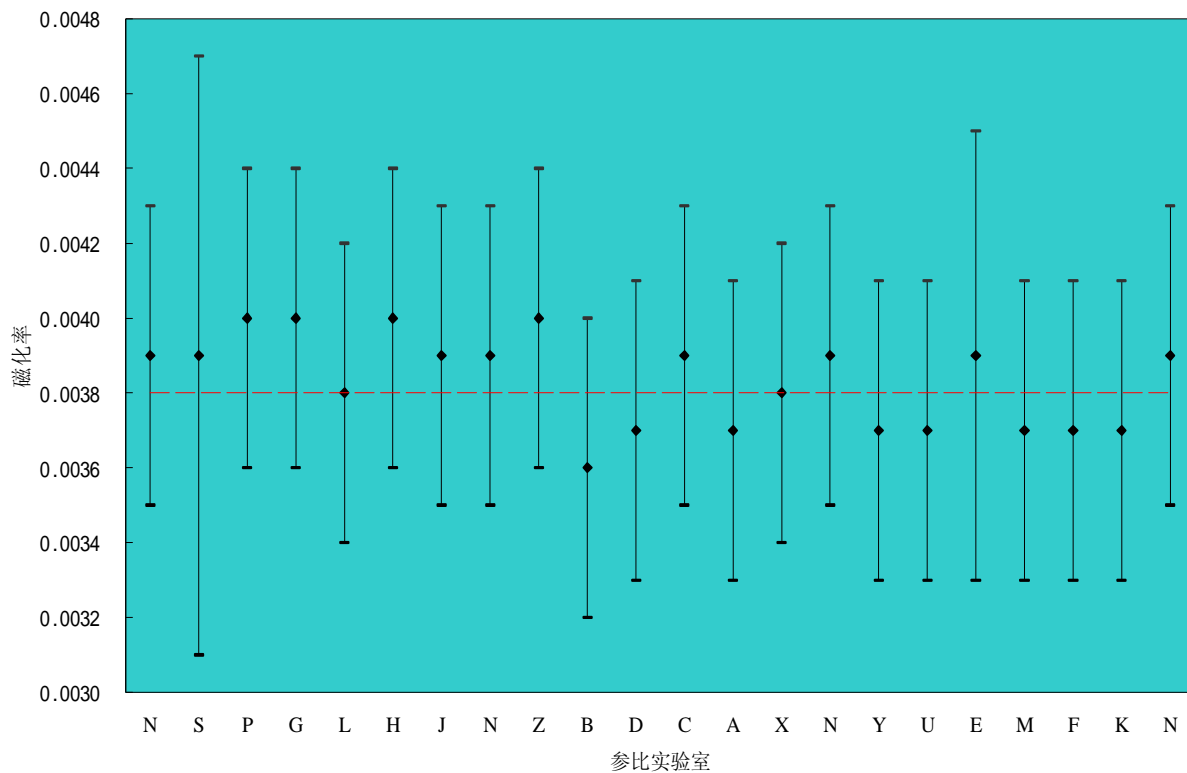


图 2 实验室（1kg 圆柱体砝码 C1 磁化率  $c$ ）比对结果图

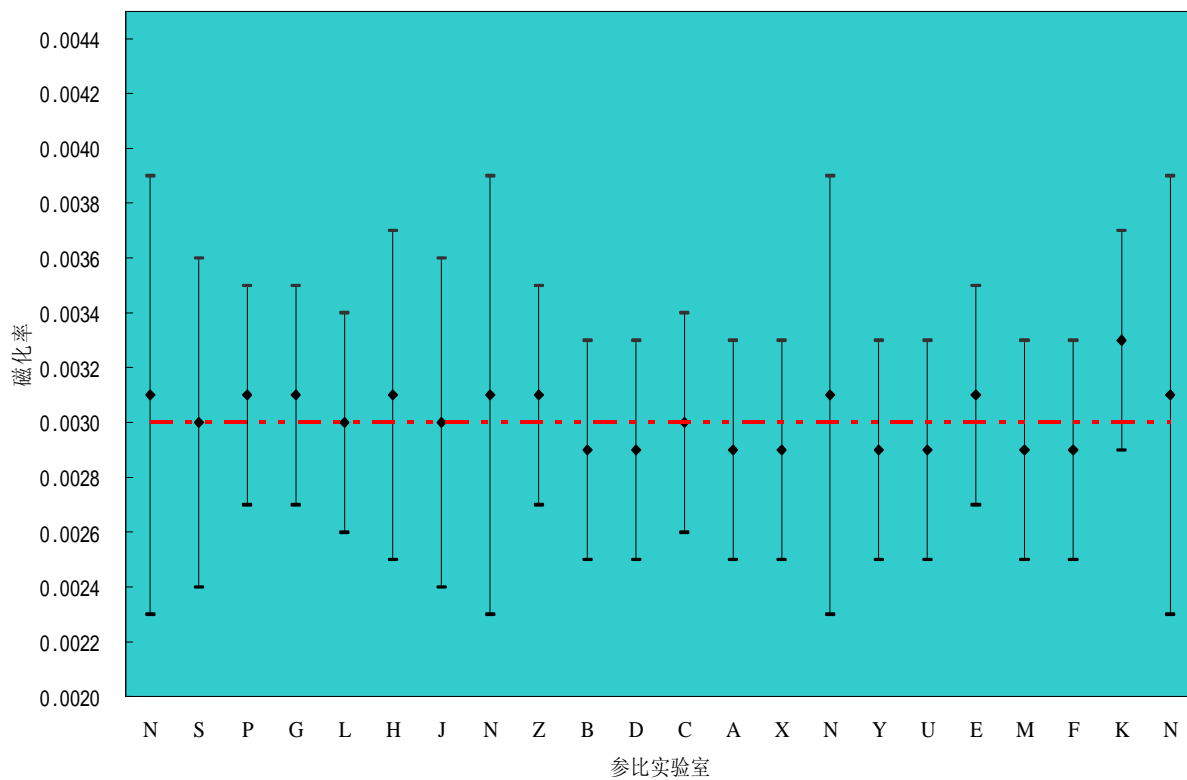


图 3 参比实验室（1kg 国际建议砝码 01 磁化率  $c$ ）比对结果图

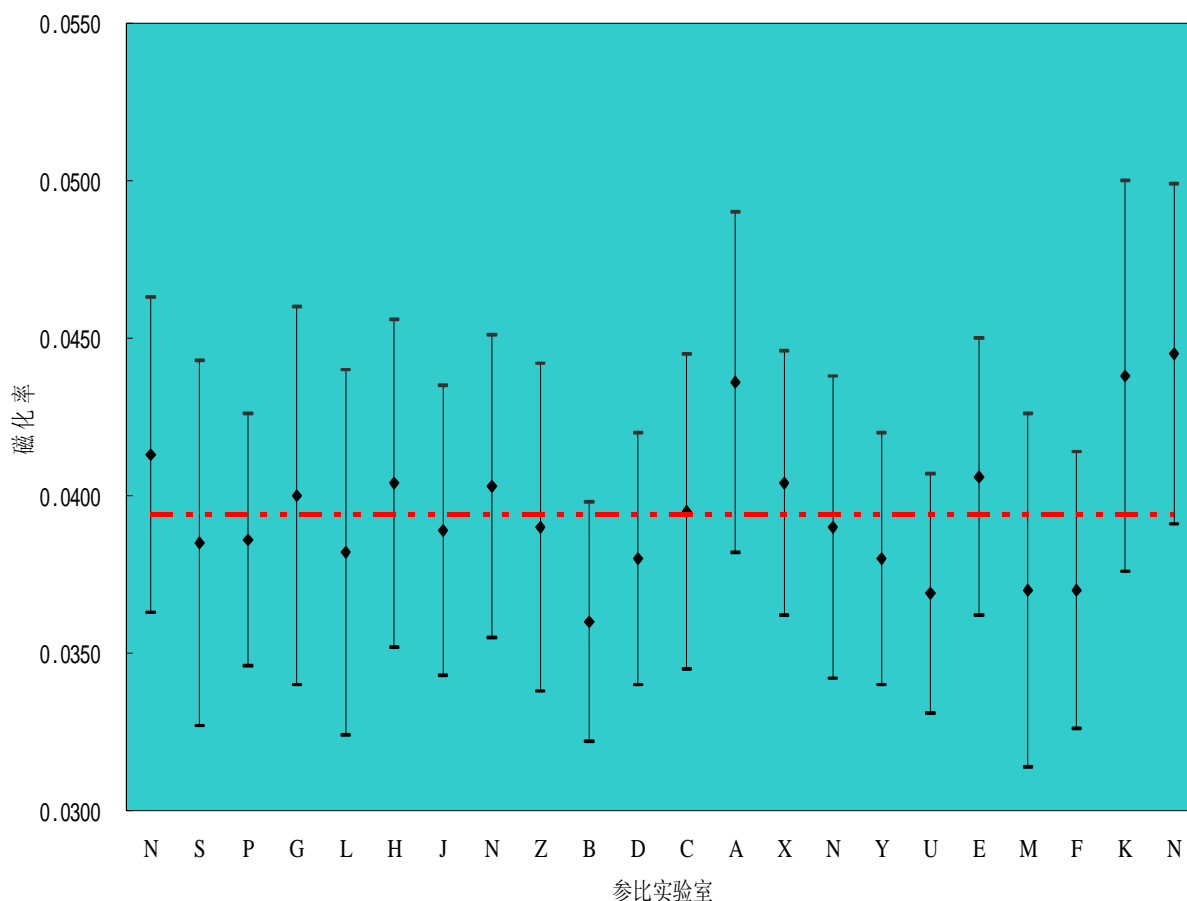


图 4 参比实验室（1kg 一等体砝码 D1 磁化率  $c$ ）比对结果图

表 9 为国外检测机构出具的三个砝码的磁化率证书中的数据汇总结果。德国 PTB 和奥地利计量院对比对砝码的磁性出具了测量结果证书，圆柱体砝码 C1 的磁化率测量方法（采用了螺线管测量磁性方法）与国内各实验室测量方法不同，砝码 O1 和 D1 的测量方法国内与国外的实验室均采用了磁化率计方法测量。

表 9 证书中砝码磁化率值

砝码代码	编号	磁化率 $c$	扩展不确定度 ( $k=2$ )
C1	23929366	0.003892	0.000040
O1	24029798	0.00308	0.00031
D1	/	0.0509	0.0051

此次比对结果计算采用了各参比实验室测量结果的平均值作为参考值。表 10 为三个砝码的体积磁化率参考值。

表 10 砝码磁化率参考值

砝码代码	编号	磁化率 $c$	扩展不确定度 ( $k=2$ )
C1	23929366	0.0038	0.0004
O1	24029798	0.0030	0.0004
D1	/	0.0394	0.0047

本次测量比对工作采用  $E_n$  值评判各参比实验室结果：

$$E_n = \frac{y - y_0}{\sqrt{U^2 + U_0^2}} \quad (1)$$

式中：针对同一样品， $y$  是各参比实验室的测量结果， $y_0$  是参考值。 $U$  是参比实验室获得认可能力的不确定度， $U_0$  是参考不确定度。

若  $|E_n| \leq 1$ ，则表明实验室的结果为满意，否则为不满意。表 11 为各参比实验室对圆柱体砝码、OIML 形状和一等砝码的砝码磁化率测量结果  $E_n$  值。

表 11 参比实验室  $E_n$  绝对值

参比实验室	$E_n$ 值		
	C1	O1	D1
N	0.18	0.11	0.26
S	0.11	0.00	0.12
P	0.35	0.18	0.13
G	0.35	0.18	0.08
L	0.00	0.00	0.16
H	0.35	0.14	0.14
J	0.18	0.00	0.08
Z	0.35	0.18	0.06
B	0.35	0.18	0.56
D	0.18	0.18	0.23
C	0.18	0.00	0.01
A	0.18	0.18	0.59
X	0.00	0.18	0.16
Y	0.18	0.18	0.23
U	0.18	0.18	0.41
E	0.14	0.18	0.19
M	0.18	0.18	0.33
F	0.18	0.18	0.37
K	0.18	0.53	0.57

从上表可以看到各参比实验室的  $E_n$  的绝对值均小于 1，表明参比的各实

验室都具备了测量常见的不同形状砝码磁化率的能力。

从上述数据和实验结果图中可以发现，对于圆柱体砝码 C1 和 OIML 形状砝码 01，由于其内部磁性为各向同性，磁性稳定性好，各参比实验室的测量结果一致性较好。由于一等砝码 D1 的内部磁性表现为各向异性，在测量过程中砝码围绕中心轴转动一定角度后测量磁化率变化较大，但按照砝码检定规程的要求，对于 E<sub>2</sub> 等级砝码的磁化率最大允许误差为 0.07，各个参比实验室对砝码 D1 的磁化率测量结果最大变化为 0.0085，相当于最大允许误差的 12%。

由于砝码的磁化强度测量属于弱磁性物质测量，结果受测量点的地球磁场梯度、测量环境以及被测物体测量位置等因素影响较大，往往难以获得满意的精确测量结果。OIML-R76 中对 E<sub>1</sub> 和 E<sub>2</sub> 准确度等级砝码的磁化强度给出的最大允许误差分别为 2.5 mT 和 8 mT。本次比对砝码送至国外检测机构只是出具了砝码体积磁化率数据而未提供砝码的磁化强度。

本次比对将砝码磁化强度测量结果仅作为参考项，根据各参比实验室提交的结果作为关于砝码磁性测量的相关研究和探讨。表 12、表 13 和表 14 为参比实验室的对圆柱体砝码 C1、OIML 形状砝码 01 及一等砝码 D1 的磁化强度测量结果汇总。

表 12 砝码 C1 磁化强度  $m_0M$  及不确定度汇总

组别	参比 实验室	磁性测量结果（圆柱体砝码 C1）		
		磁化强度 $m_0M$ ( mT )	合成标准不确定度 ( mT )	扩展不确定度(k=2)( mT )
C1	N	-0.05	0.03	0.06
	S	-0.29	0.03	0.06
	P	-0.31	0.03	0.06
	G	-0.04	0.03	0.06
	L	-0.06	0.03	0.06
	H	-0.06	0.01	0.02
	J	-0.02	0.03	0.06
	N	-0.03	0.03	0.06
C2	N	-0.03	0.03	0.06
	Z	-0.03	0.03	0.06
	B	-0.04	0.02	0.04
	D	-0.07	0.03	0.06
	C	-0.04	0.03	0.06
	A	-0.01	0.02	0.04
	X	0.01	0.02	0.04
	N	-0.03	0.03	0.06

C3	N	-0.03	0.03	0.06
	Y	-0.03	0.02	0.04
	U	0.05	0.02	0.04
	E	-0.07	0.03	0.06
	M	0.02	0.03	0.06
	F	-0.03	0.02	0.04
	K	0.05	0.03	0.06
	N	-0.02	0.03	0.06

表 13 砵码 01 磁化强度  $m_0M$  及不确定度汇总

组别	参比 实验室	磁性测量结果 (OIML 砵码 01)		
		磁化强度 $m_0M$ ( $mT$ )		
		外模磁化强度 $m_0M$ ( $mT$ )	合成标准不确定度 ( $mT$ )	扩展不确定度 ( $mT$ ) (k=2)
C1	N	-0.03	0.02	0.04
	S	-0.25	0.10	0.20
	P	-0.24	0.02	0.04
	G	-0.02	0.02	0.04
	L	-0.04	0.02	0.04
	H	-0.04	0.01	0.02
	J	-0.01	0.02	0.04
	N	-0.02	0.03	0.06
C2	N	-0.02	0.03	0.06
	Z	-0.03	0.02	0.04
	B	-0.03	0.02	0.04
	D	-0.01	0.03	0.06
	C	-0.03	0.02	0.04
	A	0.00	0.02	0.04
	X	-0.02	0.02	0.04
	N	-0.02	0.03	0.06
C3	N	-0.02	0.03	0.06
	Y	0.01	0.02	0.04
	U	0.04	0.02	0.04
	E	-0.05	0.02	0.04
	M	0.00	0.02	0.04
	F	-0.01	0.02	0.04
	K	0.02	0.03	0.06
	N	0.00	0.03	0.06



表 14 砝码 D1 磁化强度  $m_0M$  及不确定度汇总

组别	参比 实验室	磁性测量结果（一等砝码 D1）		
		磁化强度 $m_0M$ ( $mT$ )		
		外模磁化强度 $m_0M$ ( $mT$ )	合成标准不确定度 ( $mT$ )	扩展不确定度 ( $mT$ ) (k=2)
C1	N	77.7	2.0	4.0
	S	74.7	3.7	7.4
	P	76.4	1.9	3.8
	G	72.3	1.9	3.8
	L	71.6	1.9	3.8
	H	73.0	1.3	2.6
	J	72.0	1.9	3.8
	N	76.1	2.0	4.0
	C2	N	76.1	2.0
Z		71.9	1.9	3.8
B		68.6	1.8	3.6
D		71.1	1.8	3.6
C		70.1	1.9	3.8
A		71.3	1.8	3.6
X		69.1	1.9	3.8
N		75.0	1.9	3.8
C3	N	75.0	1.9	3.8
	Y	70.7	1.8	3.6
	U	71.2	1.8	3.6
	E	72.4	1.9	3.8
	M	70.9	1.9	3.8
	F	69.8	1.8	3.6
	K	72.9	1.9	3.8
	N	76.3	2.0	4.0

图 5、图 6 及图 7 为参比实验室对圆柱体砝码 C1 和 OIML 形状砝码 O1、一等砝码 D1 的磁化强度测量结果图。

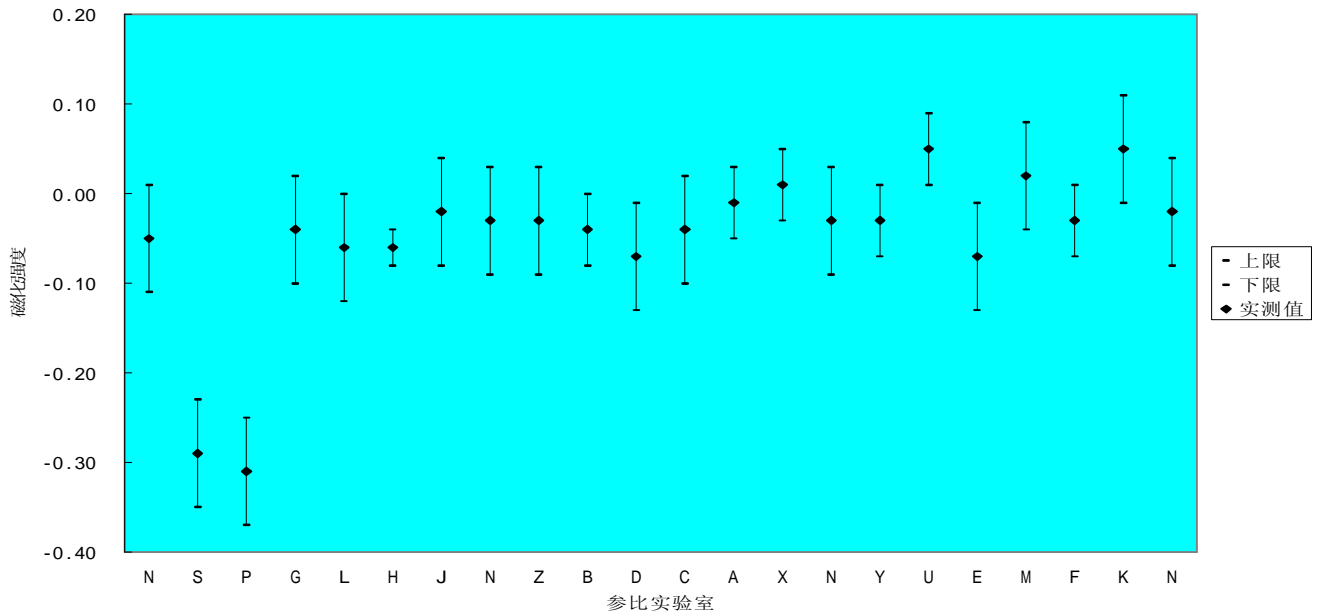


图 5 参比实验室（1kg 圆柱体砝码 C1 磁化强度  $m_0M$ ）比对结果图

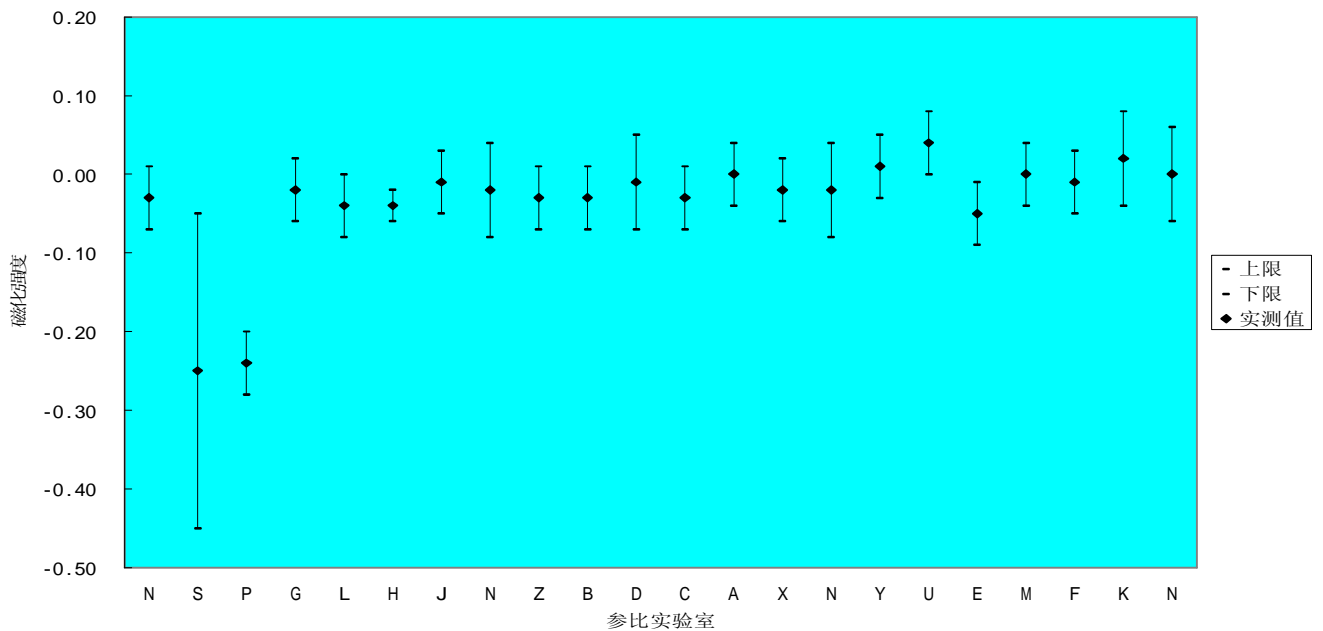


图 6 参比实验室（1kg OIML 体砝码 O1 磁化强度  $m_0M$ ）比对结果图

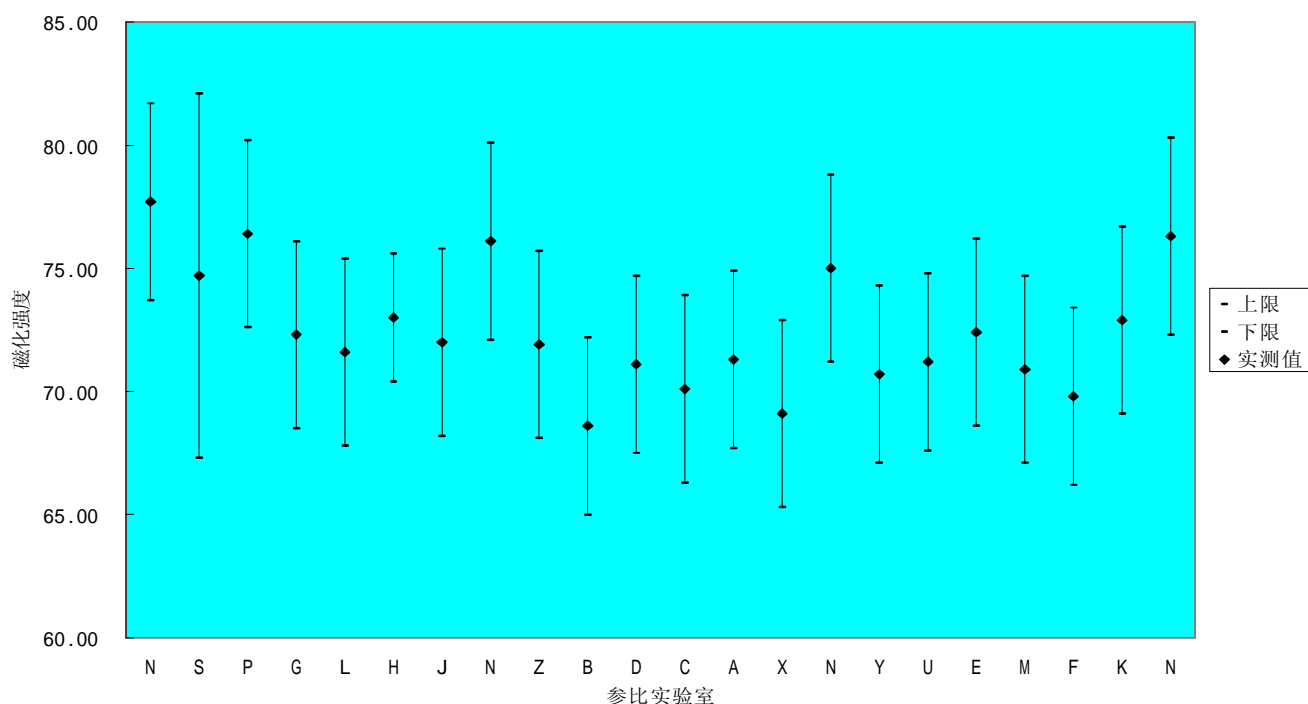


图 7 参比实验室（1kg 一等砝码 D1 磁化强度  $m_0M$ ）比对结果图

#### 四. 比对总结

由于各参比实验室开展砝码磁性测量工作时间有限，对于国内首次开展的砝码磁性测量比对工作带有一定的探索与研究性质，但是通过砝码磁化率和磁化强度的测量比对，可以发现对于材料磁性均匀一致的砝码，各参比实验室均具备较好的测量能力，可以判断砝码磁性是否合格，能够保障砝码量值传递工作准确有效。

对于使用中的砝码，当砝码被磁化后，内部材料出现各向异性，测量磁化率和磁化强度时应引起足够的注意。

以下 2 点是各参比实验室在砝码磁性测量工作经验的总结：

1、在出具砝码磁性检测报告证书时，可以出具砝码体积磁化率  $c$  数据，但由于砝码磁化强度测量的不确定度较大及磁化强度稳定性较差，一般不出具磁化强度数据。判断砝码磁性是否超出检定规程要求时需根据砝码的体积磁化率和磁化强度两项指标同时判断，其中任意一项超出最大允许误差即判定砝码磁性不符合相应准确度等级砝码磁性要求。若砝码磁化强度处于临界值时，可以测量 6 次，其中任一次测量结果超出最大允许误差要求即判定砝码磁化强度不符合要求。

2、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  $h$ （目前有些砝码底部为平底无凹陷部分）。因此建议实验室要定期对永久磁铁的磁矩  $m_d$  进行测量。

本次砝码磁性测量比对用时十个月，三个不同形状的 1kg 砝码在十九个参比实验室传递，各实验室均按时完成提交了比对细则中要求的砝码体积磁化率和磁化强度的测量计算和不确定度评定。根据比对细则的评定结果所有参比实验室的  $|E_n|$  均小于 1，表明各参比实验室具备了测量砝码磁性的能力。

附录 1: PTB 及奥地利计量院出具的检测报告

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**  
Braunschweig und Berlin

**PTB**



**Kalibrierschein**  
Calibration Certificate

Gegenstand:  
Object: Suszeptibilitätsstandard  
(reference of susceptibility)

Hersteller:  
Manufacturer:

Typ:  
Type: YSZ01RSC-HE210-1 kg

Kennnummer:  
Serial number: 23929366

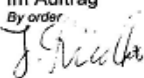
Auftraggeber:  
Applicant: Sartorius AG  
Weender Landstraße 94-108  
37075 Göttingen

Anzahl der Seiten:  
Number of pages: 4


Geschäftszeichen:  
Reference No.: 2.51-4040742/09

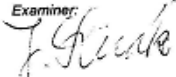
Kalibrierzeichen:  
Calibration mark: 3628 PTB 09

Datum der Kalibrierung:  
Date of calibration: 07.04.2009

Im Auftrag  
By order:   
J. Lüdke

Braunschweig, 08.04.2009

Siegel  
Seal: 

Bearbeiter:  
Examiner:   
J. Lüdke

391 00 1

Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Siegel haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein darf nur unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.  
Calibration certificates without signature and seal are not valid. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Extracts may be taken only with the permission of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

## Beschreibung des Kalibriergegenstandes

Zylindrische Probe

Durchmesser = 54,1 mm

Länge = 55,8 mm

## Prüfverfahren:

Gemessen wurde die magnetische Suszeptibilität über das Volumen der Probe. Die Probe wurde abmagnetisiert und in axialer Richtung dem homogenen Teil eines von einer langen Magnetisierungsspule erzeugten Magnetfeldes ausgesetzt. Die Probe wurde dann aus einer Induktionsspule, die in der Mitte der Magnetisierungsspule angebracht war, herausgezogen, die dabei auftretende Flussänderung gemessen und daraus die magnetische Polarisation bestimmt. Die magnetische Feldstärke ergab sich aus der Magnetisierungsstromstärke.

Wegen des kleinen Länge- zu -Durchmesser-Verhältnisses  $p < 10$  wurde der Entmagnetisierungsfaktor für den zylindrischen Körper berechnet und zur Korrektur der Messwerte verwendet.

## Umgebungsbedingungen

Die Temperatur der Probe betrug während der Messung  $(23,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ .

## Messergebnis und Messunsicherheit

Die erhaltenen Werte für die magnetische Suszeptibilität sind nachstehend aufgeführt (SI-System).

Feldstärke kA/m	magnetische Suszeptibilität $\chi_m$
5	$0,003882 \pm 0,000040$
10	$0,003892 \pm 0,000040$
20	$0,003891 \pm 0,000040$
30	$0,003889 \pm 0,000040$

Angegeben ist die erweiterte Messunsicherheit, die sich aus der Standardmessunsicherheit durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  ergibt. Sie wurde gemäß „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ISO, 1995) ermittelt. Der Wert der Messgröße liegt im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95 % im zugeordneten Werteintervall.

## Zusatzbemerkungen

Durch mechanische Verspannungen, Alterung und weitere Einflüsse ist es möglich, dass sich die magnetischen Eigenschaften der Probe ändern. Ein Anteil für die Langzeitstabilität der Probe ist in den Angaben der Messunsicherheit nicht enthalten.

Die englische Fassung des Kalibrierscheins ist eine unverbindliche Übersetzung. Im Zweifelsfall gilt der deutsche Originaltext.

# Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Seite 3 zum Kalibrierschein vom 08.04.2009, Kalibrierzeichen: 3628 PTB 09  
Page 3 of calibration certificate of 08.04.2009, calibration mark: 3628 PTB 09

## Translation

### Description of the calibration object

Cylindrical specimen

Diameter = 54.1 mm

Length = 55.8 mm

### Method of the measurement

The magnetic susceptibility has been measured over the volume of the specimen. The specimen was demagnetized and exposed in axial direction to the homogeneous part of a magnetic field generated by a long solenoidal magnetizing coil. Then the specimen was withdrawn from an induction coil located in the centre of the magnetizing coil. The magnetic polarization was calculated from the change in flux measured during the withdrawal and the magnetic field strength from the magnetizing current

Due to the small length to diameter ratio  $p < 10$  the demagnetizing factor was calculated for the cylinder and used for the correction of the measurement results.

### Measurement conditions

The temperature of the specimen during the measurement was  $(23.0 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$ .

### Measurement result and uncertainty

The values obtained for the magnetic susceptibility are listed in the following table (SI-System).

Applied field strength kA/m	Relative susceptibility $\chi_m$
5	$0.003882 \pm 0.000040$
10	$0.003892 \pm 0.000040$
20	$0.003891 \pm 0.000040$
30	$0.003889 \pm 0.000040$

The uncertainty is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k=2$ , which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95 %. The uncertainty of measurements has been determined in accordance with the "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement" (ISO, 1995).

### Remarks

Due to mechanical stress, aging and other factors specimen properties may change. The long-time rated stability of the specimen is not included in the stated measurement uncertainty.

The English version of the calibration certificate is not a binding translation. If any matter gives rise to controversy, the German original text must be used.



## Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Seite 4 zum Kalibrierschein vom 08.04.2009, Kalibrierzeichen: 3628 PTB 09  
Page 4 of calibration certificate of 08.04.2009, calibration mark: 3628 PTB 09

**Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)** in Braunschweig und Berlin ist das natur- und ingenieurwissenschaftliche Staatsinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen und Teile der Sicherheitstechnik. Die PTB gehört zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und - insbesondere im Rahmen des gesetzlichen und industriellen Messwesens - weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland. Kalibrierscheine der PTB dokumentieren die Rückführung des Kalibriergegenstandes auf nationale Normale.

Zur Sicherstellung der weltweiten Einheitlichkeit der Maße arbeitet die PTB mit anderen nationalen metrologischen Instituten auf regionaler europäischer Ebene in EUROMET und auf internationaler Ebene im Rahmen der Meterkonvention zusammen. Das Ziel wird durch einen intensiven Austausch von Forschungsergebnissen und durch umfangreiche internationale Vergleichsmessungen erreicht.

*The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig and Berlin is the national institute for science and technology and the highest technical authority of the Federal Republic of Germany for the field of metrology and certain sectors of safety engineering. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Labour. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in the EN ISO/IEC 17025.*

*It is the fundamental task of the PTB to realize and maintain the legal units in compliance with the International System of Units (SI) and to disseminate them, above all within the framework of legal and industrial metrology. The PTB thus is on top of the metrological hierarchy in Germany. Calibration certificates issued by it document that the object calibrated is traceable to national standards.*

*To ensure worldwide coherence of measures, the PTB cooperates with other national metrology institutes within EUROMET on the regional European level and on the international level within the framework of the Metre Convention. The aim is achieved by an intensive exchange of results of research work carried out and by comprehensive international comparison measurements.*

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100  
D-38116 Braunschweig

Abbestraße 2-12  
D-10587 Berlin



## Kalibrierschein-Duplikat

*Calibration Certificate-duplicate*

Nr. T09-0655/D

No. T09-0655/D

Gegenstand <i>Object</i>	<b>2 x Knopfgewichte 1kg / F1 2 x Gewichte 1kg / F1 2 x knob weights 1kg / F1 2 x weights 1kg / F1</b>	Die Kalibrierung erfolgt auf der gesetzlichen Grundlage der §§ 60 und 61 des Maß- und Eichgesetzes BGBl. Nr. 152/1950, in der geltenden Fassung. Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückverfolgbarkeit auf nationale Normale zur Darstellung der physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Das BEV ist als das nationale Metrologieinstitut für die nationalen Normale verantwortlich. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.  <i>The calibration is performed in accordance with the Metrology Act (MEG) federal gazette No. 152/1950, as amended. This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the physical units of measurements according to the International System of Units (SI). The BEV is the national metrology institute and maintains the national standards. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.</i>
Type, Bauart Fabrikations Nr. <i>Type, Serial number</i>	<b>Spezial Edelstahl, Klasse F1 special high grade steel, category F1</b>	
Hersteller <i>Manufacturer</i>	<b>Sartorius AG</b>	
Aufstellungsort <i>Location</i>	<b>BEV</b>	
Auftraggeber <i>Customer</i>	<b>Sartorius AG Weender Landstraße 94-108 37070 Göttingen Deutschland</b>	
Auftragsnummer des Auftraggebers <i>Order number of Customer</i>	<b>Lieferschein LS_BEV_0902-01 vom 26.02.2009</b>	
Auftragsnummer <i>Order number</i>	<b>E09-0510</b>	
Anzahl der Seiten <i>Number of pages</i>	<b>3</b>	
Eingangsdatum <i>Date of receipt</i>	<b>April 2009</b>	
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	<b>April 2009</b>	

Stempel <i>Seal</i>	Datum <i>Date</i>	Der Leiter des Prüfdienstes <i>Head of testing service</i>	Sachbearbeiter <i>Person responsible</i>
		Mag. Robert Edelmaier	Dipl.-Ing. Zoltan Zelenka

Kalibrierschein Nr. T09-0655/D  
 Calibration certificate No. T09-0655/D

**Kalibriergegenstand:**  
 Calibration object

Seriennummer serial number	Nennwert nominal value	Form shape
24029798 24029799 2303-180 ohne SNr. without snr.	1kg	zylindrische Gewichtsstücke cylindrical weights

Die Kalibriergegenstände befinden sich in Kästen, auf denen die Inventar Nummer angebracht sind.  
 The calibration objects are kept in cases, on which the inventory number is affixed.

**Kalibrierverfahren:**  
 Calibration procedure

Die magnetische Suszeptibilität erfolgte nach der suszeptometer Methode nach B.6.4 OIML R 111-1: 2004 mittels Suszeptometer Type: YSZ 01/02 mit SNr.: 380320504 bestimmt. Als Suszeptibilitätsstandard wurde das BEV - Bezugsnormal für magnetische Suszeptibilität 3624 PTB 09 verwendet. Die Geometrischenmaße wurden mittels Messschieber mit SNr. BEV 7494 ermittelt.

The magnetic susceptibility were determined according to susceptometer method B.6.4 OIML R 111-1: 2004 using the susceptometer type: YSZ 01/02 with snr.: 380320504. As reference of susceptibility was the BEV - susceptibility artifact for magnetic susceptibility 3624 PTB 09 used. The geometric dimensions were determined by using a vernier caliper with snr. BEV 7494.

**Umgebungsbedingungen**  
 Ambient conditions

Die Temperatur der Probe betrug während der Messung  $(22,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ .  
 The temperature of the specimen during the measurement was  $(22,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ .

**Messergebnisse:**  
 Measurement results

Seriennummer serial number	Feldstärke applied field strength [A/m]	magnetische Suszeptibilität $\chi_m$ Boden relative susceptibility bottom	magnetische Suszeptibilität $\chi_m$ Kopf relative susceptibility knob
2303-180	200	$0,0418 \pm 0,0042$	$0,0532 \pm 0,0053$
keine Nr. no snr.	200	$0,0509 \pm 0,0051$	$0,0677 \pm 0,0068$
24029798	800	$0,00308 \pm 0,00031$	$-0,00022 \pm 0,00002$
24029799	800	$0,00302 \pm 0,00030$	$0,00320 \pm 0,00032$

Kalibrierschein Nr. T09-0655/D  
 Calibration certificate No. T09-0655/D

**Messunsicherheit:**  
*Measurement uncertainty*

Die angegebene erweiterte Messunsicherheit  $U$  entspricht der zweifachen Standardunsicherheit ( $k=2$ ), welche für eine Normalverteilung einen Grad des Vertrauens von etwa 95 % bedeutet. Die Standardunsicherheit wurde in Übereinstimmung mit dem Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, deutsche Übersetzung des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML)“ und damit gemäß dem Dokument EA-4/02 ermittelt.

*The given extended measurement uncertainty corresponds to the double standard uncertainty ( $k=2$ ) which means for a normal distribution a degree of confidence of approximately 95 %. The standard deviation was determined in accordance to the „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML)“ and to document EA - 4/02.*

**Anmerkungen:**  
*Remarks*

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weitergegeben werden. Auszüge oder Änderungen sind unzulässig. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. Die Ergebnisse der Prüfung beziehen sich ausschließlich auf die verwendeten Gegenstände zum Zeitpunkt der Prüfung.

*This calibration certificate may not be reproduced other than in full and unchanged. Calibration certificates without signature and seal are not valid.*

*The results of test refer to the object used for the time of test only.*

Das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) hält in seiner Funktion als nationales Metrologieinstitut in der Gruppe Eichwesen die verbindlichen nationalen Etalons (Messnormale) zur Darstellung der gesetzlichen Maßeinheiten bereit und stellt deren internationale Gleichwertigkeit sicher. Es steht damit an der Spitze des nationalen metrologischen System und ist somit für die nationalen Normale verantwortlich.

Im Rahmen des physikalisch-technischen Prüfdienstes (PTP) werden die Maßeinheiten durch Kalibrierung und Prüfungen von Messgeräten unter Anschluss an die nationalen Normale weitergegeben.


*The BEV- the Federal Office of Metrology and Surveying is the national metrology institute of Austria. The metrology Service of the BEV maintains the national standards for the realisation of the legal units of measurement and ensures their international equivalence and recognition. Thus it is at the top of the national metrology system.*

*Within the scope of the Physico-Technical Testing Service (PTP) the legal units of measurement are disseminated through calibration by comparing measuring instruments with the national standards.*

Duplikat erstellt am:

19. Mai 2009



Der Leiter des physikalisch-  
 technischen Prüfdienstes des BEV  
  
 Ing. M. Freisinger

Mag. Robert Edelmaier

附录 2：砝码体积磁化率和磁化强度不确定度计算  
 计算砝码磁化率及永久磁化强度公式为：

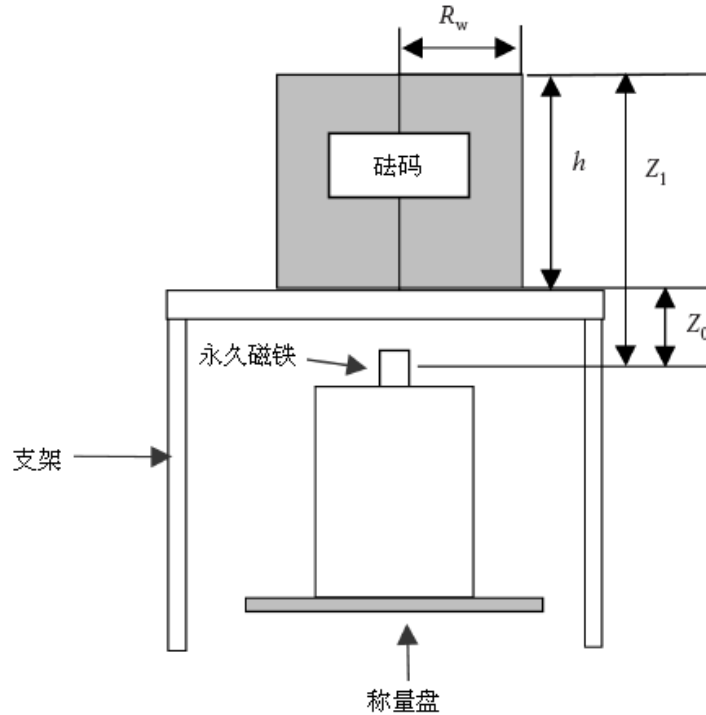


图1 磁化率测量装置原理图

$$\text{体积磁化率: } c = \frac{F_a}{I_a \times F_{\max} - 0.4F_a} \quad (1)$$

$$\text{式中 } F_a = \frac{F_1 + F_2}{2}, \quad F_{\max} = \frac{3m_0}{64p} \times \frac{m_d^2}{Z_0^4}$$

$$\text{永久磁化强度: } m_0 M_z = \frac{F_b}{\frac{m_d}{Z_0} \times \frac{1}{4p} \times I_b} - \frac{c}{1 + 0.23c} B_{EZ} \quad (2)$$

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

其中  $F_1 = -\Delta m_1 g$ ,  $F_2 = -\Delta m_2 g$

形状因子修正系数  $I_a$ 、 $I_b$  计算公式及上述具体各式解释可详见 JJG99-2006 砝码规程 7.3.3.2 部分。

由于为  $m_0$  真空中磁导率，为  $4p \times 10^{-7} N/A^2$ ，可以视为常数，砝码形状因子计算按照下式进行：

$$I_{a,j}(Z_0, r_j, h_k) = (-1)^{a_j} \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{Z_0}{Z_0 + h_k} \right]^4 - \frac{1 + \frac{1}{3} \left( \frac{r_j}{Z_0} \right)^2}{\left[ 1 + \left( \frac{r_j}{Z_0} \right)^2 \right]^3} + \left( \frac{Z_0}{Z_0 + h_k} \right)^4 \cdot \frac{1 + \frac{1}{3} \left( \frac{r_j}{Z_0 + h_k} \right)^2}{\left[ 1 + \left( \frac{r_j}{Z_0 + h_k} \right)^2 \right]^3} \right\}$$

式中  $a_i$  为 1 或 2, 取决于砒码形状。

在形状修正因子  $I_a, I_b$  计算中, 可以采用内圆柱体部分和外圆柱体部分分别计算。统一采用下式:

$$I_{a外} = I_a(r_{圆柱体}, h_{圆柱体}) + I_a(r_{提钮顶部}, h) - I_a(r_{提钮顶部}, h_{圆柱体}) - I_a(r_{底凹部分}, h_{底凹部分}) \quad (3)$$

$$I_{a内} = I_a(r_{圆柱体}, h_{圆柱体}) + I_a(r_{提钮顶部}, h) - I_a(r_{提钮顶部}, h_{圆柱体}) - I_a(r_{底凹部分}, h_{底凹部分}) \quad (4)$$

其中:  $I_{a内}$  为砒码内圆柱计算方式;  $I_{a外}$  为砒码外圆柱计算方式。

同理  $I_b$  计算也采取相同的方式。

通过对 (1) 和 (2) 式求偏导数可以分别得出灵敏系数值 ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ), 下式为体积磁化率不确定度公式合成:

$$C_1 = \frac{\partial c}{\partial(\Delta m_1)} = \frac{-g \left\{ I_a \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g \right\} + (\Delta m_1 + \Delta m_2)g \cdot 0.4g}{\left[ I_a \times \frac{3m_0}{32p} \times \frac{m_d^2}{Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g \right]^2}$$

$$= \frac{I_a \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} \cdot g}{\left[ I_a \times \frac{3m_0}{32p} \times \frac{m_d^2}{Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g \right]^2}$$

$$C_2 = \frac{\partial c}{\partial(\Delta m_2)} = \frac{I_a \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} \cdot g}{\left[ I_a \times \frac{3m_0}{32p} \times \frac{m_d^2}{Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g \right]^2} = C_1$$

$$C_3 = \frac{\partial c}{\partial g} = \frac{I_a \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} \cdot (\Delta m_1 + \Delta m_2)}{\left[ I_a \times \frac{3m_0}{32p} \times \frac{m_d^2}{Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g \right]^2}$$



$$C_4 = \frac{\partial c}{\partial m_d} = \frac{I_a \frac{3m_0 m_d}{16p Z_0^4} \cdot (\Delta m_1 + \Delta m_2) \cdot g}{\left[ I_a \times \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g \right]^2}$$

$$C_5 = \frac{\partial c}{\partial Z_0} = \frac{(\Delta m_1 + \Delta m_2) \cdot g \cdot \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} \cdot \left( \frac{\partial I_a}{\partial Z_0} - \frac{4I_a}{Z_0} \right)}{\left[ I_a \times \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g \right]^2}$$

$$\text{式中 } \frac{\partial I_a}{\partial Z_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial I_{a,i}(Z_0, r_j, h_k)}{\partial Z_0}$$

计算得出结果为

$$\frac{\partial I_a}{\partial Z_0} = 4 \cdot (-1)^{ai} \cdot \left\{ \frac{Z_0^3 h_k}{(Z_0 + h_k)^5} \left[ \frac{1 + \frac{1}{3} \left( \frac{r_j}{Z_0 + h_k} \right)^2}{\left[ 1 + \left( \frac{r_j}{Z_0 + h_k} \right)^2 \right]^3} - 1 \right] \right\}$$

$$+ 4 \cdot (-1)^{ai} \cdot \frac{r_j^2}{3} \cdot \left[ \frac{Z_0^4}{(Z_0 + h_k)^7} \frac{4 + \left( \frac{r_j}{Z_0 + h_k} \right)^2}{\left[ 1 + \left( \frac{r_j}{Z_0 + h_k} \right)^2 \right]^4} - \frac{1}{Z_0^3} \frac{4 + \left( \frac{r_j}{Z_0} \right)^2}{\left[ 1 + \left( \frac{r_j}{Z_0} \right)^2 \right]^4} \right]$$

$$C_{6,u} = \frac{\partial c}{\partial r_u} = \frac{(\Delta m_1 + \Delta m_2) \cdot g \cdot \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} \cdot \frac{\partial I_a}{\partial r_u}}{\left[ I_a \times \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2)g \right]^2}$$

其中

$$\frac{\partial I_a}{\partial r_u} = \frac{4}{3} r_u (-1)^{ai} \left\{ \frac{1}{Z_0^2} \frac{4 + \left( \frac{r_u}{Z_0} \right)^2}{\left( 1 + \left( \frac{r_u}{Z_0} \right)^2 \right)^4} - \frac{Z_0^4}{(Z_0 + h_k)^6} \cdot \frac{4 + \left( \frac{r_u}{Z_0 + h_k} \right)^2}{\left[ 1 + \left( \frac{r_u}{Z_0 + h_k} \right)^2 \right]^4} \right\}$$



$$C_{7,v} = \frac{\partial c}{\partial h_v} = \frac{(\Delta m_1 + \Delta m_2) \cdot g \cdot \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} \cdot \frac{\partial I_a}{\partial h_v}}{\left[ I_a \times \frac{3m_0 m_d^2}{32p Z_0^4} + 0.4(\Delta m_1 + \Delta m_2) g \right]^2}$$

其中

$$\frac{\partial I_a}{\partial h_v} = \frac{4Z_0^4}{(Z_0 + h_v)^5} (-1)^{a_i} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{r_j}{Z_0 + h_v} \right)^2 \right]^4} \right\}$$

综合上述各灵敏度系数，体积磁化率  $\times$  合成不确定度为

$$u(c) = \left\{ \begin{aligned} & c_1^2 u^2(\Delta m_1) + c_2^2 u^2(\Delta m_2) + c_3^2 u^2(g) + c_4^2 u^2(m_d) + c_5^2 u^2(Z_0) + \\ & \sum_{u=1}^p (c_{6,u} u(r_u)^2) + \sum_{v=1}^q (c_{7,v} u(h_v)^2) \end{aligned} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

同前述磁化率分析部分相似，测量过程中对磁化强度有影响的量包括：

- 1、质量变化  $\Delta m_1, \Delta m_2$  不确定度影响
- 2、 $Z_0$  测量不确定度影响
- 3、永久磁铁磁矩  $m_d$  测量不确定度影响
- 4、几何尺寸  $r, h$  测量不确定度影响
- 5、磁化率  $c$  测量不确定度影响
- 6、磁场梯度  $B_{EZ}$  测量不确定度影响

$$\text{此处 } I_{b,j}(Z_0, r_j, h_k) = 2p(-1)^{a_i} \cdot \left\{ \frac{\left( \frac{r_j}{Z_0} \right)^2}{\left[ 1 + \left( \frac{r_j}{Z_0} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{Z_0}{Z_0 + h_k} \cdot \frac{\left( \frac{r_j}{Z_0 + h_k} \right)^2}{\left[ 1 + \left( \frac{r_j}{Z_0 + h_k} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

经计算可得：

磁化强度不确定度公式中灵敏系数 ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) 为：

下式为磁化强度不确定度公式中灵敏系数 ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) 为：

$$C_1 = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial(\Delta m_1)} = -\frac{2pZ_0 \cdot g}{I_b \cdot m_d}$$

$$C_2 = -C_1 = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial(\Delta m_2)} = \frac{2pZ_0 \cdot g}{I_b \cdot m_d}$$

$$C_3 = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial(g)} = -\frac{2pZ_0 \cdot (\Delta m_1 - \Delta m_2)}{I_b \cdot m_d}$$

$$C_4 = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial(m_d)} = \frac{2pZ_0 \cdot (\Delta m_1 - \Delta m_2) \cdot g}{I_b \cdot m_d^2}$$

$$C_5 = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial(Z_0)} = \frac{2p \cdot (\Delta m_1 - \Delta m_2) \cdot g}{I_b^2 \cdot m_d} \left( Z_0 \cdot \frac{\partial I_b}{\partial Z_0} - I_b \right)$$

式中  $\frac{\partial I_b}{\partial Z_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial I_{b,i}(Z_0, r_j, h_k)}{\partial Z_0}$

$$\frac{\partial I_b}{\partial Z_0} = 2p \cdot (-1)^{ai}$$

$$\left\{ \frac{2r_j^2}{Z_0^3} \frac{1 - \left(\frac{r_j}{Z_0}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{r_j}{Z_0}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} + \frac{r_j^2}{(Z_0 + h_k)^4 \left[1 + \left(\frac{r_j}{Z_0 + h_k}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[ 2Z_0 \cdot \frac{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r_j}{Z_0 + h_k}\right)^2}{1 + \left(\frac{r_j}{Z_0 + h_k}\right)^2} - h_k \right] \right\}$$

$$C_{6,u} = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial(r_u)} = \frac{2pZ_0 \cdot (\Delta m_1 - \Delta m_2) \cdot g \frac{\partial I_b}{\partial r_u}}{I_b^2 \cdot m_d}$$

其中：

$$\frac{\partial I_b}{\partial r_u} = 4p \cdot r_u \cdot (-1)^{ai} \left\{ \frac{1}{Z_0^2} \frac{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r_u}{Z_0}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{r_u}{Z_0}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} - \frac{Z_0}{(Z_0 + h_k)^3} \cdot \frac{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r_u}{Z_0 + h_k}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{r_u}{Z_0 + h_k}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \right\}$$

$$C_{7,v} = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial(h_v)} = \frac{2pZ_0 \cdot (\Delta m_1 - \Delta m_2) \cdot g \frac{\partial I_b}{\partial h_v}}{I_b^2 \cdot m_d}$$

其中：

$$\frac{\partial I_b}{\partial h_v} = \frac{6pZ_0 r_j^2}{(Z_0 + h_v)^4 \cdot \left[1 + \left(\frac{r_j}{Z_0 + h_v}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \cdot (-1)^{ai}$$

$$C_8 = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial c} = -\frac{1}{(1+0.23c)^2} B_{EZ}$$

$$C_9 = \frac{\partial(m_0 M)}{\partial B_{EZ}} = -\frac{c}{1+0.23c}$$

磁化强度合成不确定度公式为

$$u(m_0 M) = \left\{ c_1^2 u^2(\Delta m_1) + c_2^2 u^2(\Delta m_2) + c_3^2 u^2(g) + c_4^2 u^2(m_d) + c_5^2 u^2(Z_0) + \sum_{u=1}^p c_{6,u}^2 u^2(r_u) + \sum_{v=1}^q c_{7,v}^2 u^2(h_v) + c_8^2 u^2(c) + c_9^2 u^2(B_{EZ}) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

附录 3: 砝码磁性测量不确定度分量说明:

各个不确定度分量说明:

1、质量变化  $m_1$ 、 $m_2$ ——通过天平示值变化得到, 示值不确定度分量包括测量重复性, 天平的分辨力引起的不确定度;

2、重力加速度  $g$  的不确定度  $u(g)$  为测量地点重力加速度的  $1/1000$  ( $k=1$ );

3、磁场强度的垂直分量  $B_{Ez}$  的不确定度  $U(B_{Ez}) = 5 \text{ mT}$  ( $k=1$ );

4、砝码底部与磁铁中心距离  $Z_0$ ——通过多次测量以重复性来评估其不确定分量 (距离可以通过标准磁块来确定);

5、永久磁铁磁矩值  $m_a$  数值由该永久磁铁的测试报告提供得到,  $U(m_a)$  取其值的 5% ( $k=2$ );

6、形状修正因子  $I_a$ 、 $I_b$ ——按照公式计算所需要的  $R_j$ ,  $H_k$  数值及不确定度。修正因子采用的是分别计算得到内模、外模两个极限的方法。