

研究论文

霍尔测磁仪的标定*

王子华 王功利 厉斌方 毛振麟 陈绍兴

(中国科学院高能物理研究所)

(北方工业大学)

本文报道了使用探头局部恒温的霍尔测磁仪,测量广量程磁谱仪的磁场分布,其输出的霍尔电压长期稳定度好于0.03%。利用核磁共振仪在磁场为0.7—2.1T的范围内进行标定。本文提出的拟合公式可应用到0.7T以下的范围,并对正负磁场区都适合。在标定区计算值与实验值的最大偏差为0.03%,在标定区外(0.7—0.15T)的偏差由0.03%增至0.06%。

关键词: 霍尔测磁仪 核磁共振校正 拟合公式

一、引言

为了开展中高能电子散射的研究,一台广量程磁谱仪正在建造中^[1,2]。其主要指标为:气隙60mm;中心场强1—2T;磁场均匀区宽度 $d \approx 30\text{cm}$,有效长度 $l_0 \approx 123\text{cm}$;磁铁电源为kys可控硅稳流电源,最大输出为550A/90V,电流稳定度好于0.01%。为了仔细测量谱仪磁铁的磁场分布,需建立一套相应的测磁系统。要求:测量精度好于0.1%;体积小,可看作点测;量程宽,可到2.1T;能在二维平面自由移动,其中X方向移动范围大于45cm,Z方向移动范围大于200cm;价格便宜。

基于以上要求,我们建立了一套探头局部恒温的霍尔测磁系统(图1)。整个系统主要由三部分组成:探头及校正装置;测磁支架及调节装置;数据获取和处理装置。

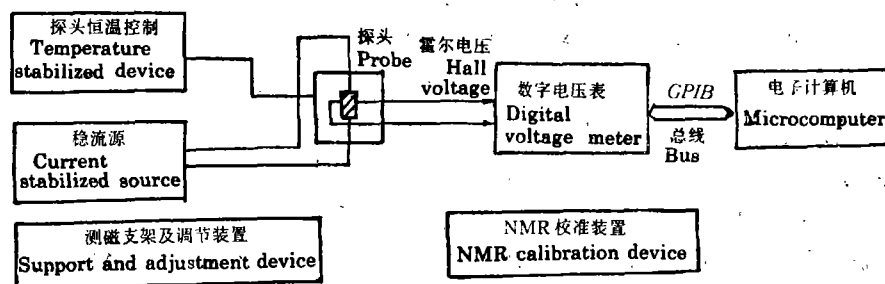


图1 测磁系统原理框图

Fig. 1 A block diagram of the magnetic field measurement system

虽然霍尔元件测磁具有尺寸小,无运动部件,测磁支架简单,便于大范围移动等优点,但存在温度漂移大、霍尔电压与磁场强度之间非线性两大缺点。由于其温漂太大,不能满足我们的精度要求,同时目前国内外市场所提供的普通霍尔测磁仪的测量精度都低于我们的要求^[3]。最后我们用恒温霍尔探头,使其24h的漂移小于0.03%,满足了实验要求。

用核磁共振仪对霍尔测磁仪进行标定的方法是 will 一组霍尔测磁仪得到的霍尔电压数据与相应的核磁共振仪得到的磁场数据,经过计算机程序得到一个拟合公式,即磁场值对霍尔电压

* 本工作属国家自然科学基金资助项目。

值的函数。由此可从霍尔测磁仪测得的霍尔电压计算出相应的磁场值。由于核磁共振仪在测量磁场时一般都有一定的灵敏范围(在我们的情况下是 0.7—2.1T),为了仔细研究谱仪磁铁的边缘场分布,也应该对小于 0.7T 的磁场范围进行测量。由于条件限制,我们未能对 0.7T 以下的磁场范围用另外的核磁共振仪进行标定,而是利用(± 0.7 — ± 2.1)T 范围内已有的标定数据,采用数据处理的方法,寻找合适的拟合公式,使之不仅适用于标定区域,也适用于 0.7T 以下的磁场范围,并得到较好的精度。

二、标定方法

我们采用沈阳仪器仪表所生产的 Hc-1 型霍尔测磁仪^[4],磁场测量范围为 0—2.1T,灵敏度好于 0.15V/T;采用国产砷化铟(InAs)霍尔片为传感器,其温度系数为 0.07%/°C,控温精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,供应霍尔片的恒流电源的输出电流为 100mA,电流漂移小于 1×10^{-5} 。

在磁场为 1.854T 情况下,测量了该霍尔测磁仪的长期稳定性,结果示于图 2。在室温下 24h 内最大漂移小于 $\pm 0.025\%$ 。

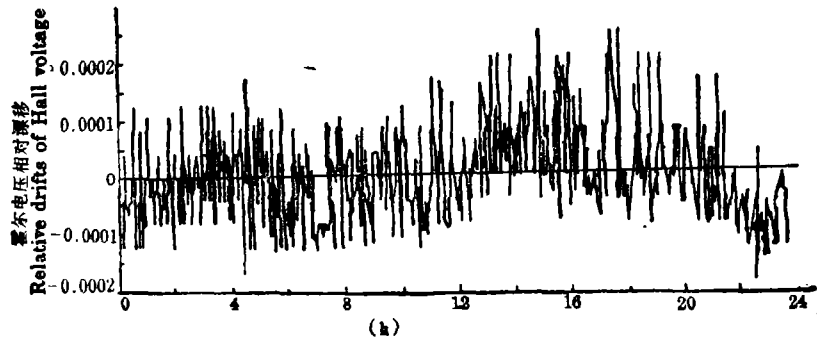


图2 霍尔测磁仪的长期稳定性

Fig. 2 The long-term stability of the Hall magnetometer

我们使用的核磁共振仪是由美国费米实验研制的 NMR Magnetometer^[5],测量精度为 5×10^{-8} ,测量磁场范围为 0.7—2.1T。

标定过程中,将 Hc-1 型恒温霍尔测磁仪探头和核磁共振测磁探头同时放在谱仪磁铁的上下中心位置,以保证霍尔测磁探头和核磁共振探头处在相同的磁场强度上。然后改变磁铁的激磁电流以获得不同磁场下一组霍尔电压数据与相应的 NMR 测出的磁场值数据。

三、实验结果

将激磁电流从 550A 下降到 175A,得(a)组 39 个标定数据,然后再从 175A 上升到 580A 得(b)组 42 个数据。再将激磁电流反向,由 -580A 上升到 -175A 得(c)组 42 个数据,又从 -175A 下降到 -580A 得(d)组 42 个数据(每次改变 10A)。

用计算机多项式拟合程序 FIT1^[6]分别对上述四组数据进行拟合,依次得到的拟合公式为

$$(a) \text{ 组 } B = 0.117256 + 3.0244H + 25.8236H^2 - 101.285H^3 + 259.142H^4 - 218.602H^5$$

$$(b) \text{ 组 } B = -0.027805 + 6.64265H - 9.71936H^2 + 70.6885H^3 - 150.728H^4 + 166.496H^5$$

$$(c) \text{ 组 } B = 7.0308 \times 10^{-3} + 5.65713H + 0.26315H^2 + 17.820H^3 - 15.9364H^4 + 30.7028H^5$$

$$(d) \text{ 组 } B = 0.051211 + 4.43844H + 13.1742H^2 - 48.5763H^3 + 150.244H^4 - 131.6H^5$$

式中, 磁场 B 的单位为 T, 霍尔电压 H 的单位为 V。上述 4 个公式的计算值与实验值的最大偏差为 0.03%, 因而在标定区, 这些公式能满足实验需要。但把上述公式推广应用到 $-0.7 < B < +0.7$ T 范围会带来很大的误差。

四、可应用到标定区外的拟合公式

由于谱仪磁铁的边缘场可以下落到 0.7T 以下, 必须寻找一个拟合公式, 不仅在标定区内与实验数据很好符合, 并且应用到标定区外也具有较小的误差。如前所述, (a)、(b) 两组和 (c)、(d) 两组数据分别表示磁场为正和负情况下霍尔测磁仪的响应。我们用内插法分别求出霍尔电压在 $+0.12 \sim 0.29$ V 及 $-0.29 \sim -0.12$ V 范围内、步距为 0.01 V 的霍尔电压所对应的磁场值, 结果示于表 1。从表 1 可知, (a)、(b) 和 (c)、(d) 两组数据都在 $\pm 0.02\%$ 误差范围内相符合。取 (a)、(b) 两组和 (c)、(d) 两组数据的平均值为磁场正和负时的响应函数 $B^+(H)$ 和 $B^-(H)$, 也示于表 1。从表 1 可知, H 绝对值相同时 B^+ 和 B^- 的绝对值有明显差别。这表明 $B(H)$ 函数并非纯反对称函数, 但可以把 $B(H)$ 函数看成一个反对称函数 $B^{(a)}(H)$ 和一个对称函数 $B^{(s)}(H)$ 之和。

即

$$B(H) = B^{(a)}(H) + B^{(s)}(H)$$

$$B^{(a)} = (A^+ - B^-) / 2$$

$$B^{(s)} = (B^+ + B^-) / 2$$

$B^{(a)}(H)$ 和 $B^{(s)}(H)$ 函数值, 也列于表 1。

反对称函数 $B^{(a)}(H)$ 可展开成

$$B^{(a)} = A_1 H + A_3 H^3 + A_5 H^5 + \dots$$

或

$$B^{(a)} / H = A_1 + A_3 H^2 + A_5 H^4 + \dots$$

表1 作为霍尔电压函数的磁场 B^+ , B^- , $B^{(s)}$ 和 $B^{(a)}$

Table 1 Magnetic field B^+ , B^- , $B^{(s)}$ and $B^{(a)}$ as functions of Hall voltage H (T)

$H(V)$	$a(B)$	$b(B)$	$B^+ = (a+b)/2$	$B^{(s)}$	$B^{(a)}$
0.12	0.72444	0.72436	0.72440	0.003260	0.721140
0.13	0.78988	0.78988	0.78988	0.003595	0.786285
0.14	0.85677	0.85666	0.85671	0.004055	0.852655
0.15	0.92439	0.92480	0.92485	0.004435	0.920415
0.16	0.99446	0.99443	0.99445	0.004915	0.989535
0.17	1.06571	1.06555	1.06563	0.005300	1.060330
0.18	1.13854	1.13849	1.13852	0.005860	1.132660
0.19	1.21306	1.21310	1.21308	0.006360	1.206720
0.20	1.28960	1.28949	1.28955	0.006835	1.282715
0.21	1.36799	1.36795	1.36797	0.007320	1.360650
0.22	1.44863	1.44833	1.44848	0.007870	1.440610
0.23	1.53118	1.53127	1.53123	0.008645	1.522585
0.24	1.61646	1.61608	1.61627	0.009210	1.607060
0.25	1.70373	1.70373	1.70373	0.009900	1.693830
0.26	1.79369	1.79402	1.79386	0.010615	1.783245
0.27	1.88538	1.88602	1.88520	0.011275	1.874925
0.28	1.98225	1.98183	1.98204	0.012055	1.969985
0.29	2.08047	2.08047	2.08047	0.012875	2.067595

(续表)

$H(V)$	$c(B)$	$d(B)$	$B^+ = (c+d)/2$
-0.12	-0.71794	-0.71781	-0.71788
-0.13	-0.78283	-0.78256	-0.78269
-0.14	-0.84861	-0.84859	-0.84860
-0.15	-0.91604	-0.91591	-0.91598
-0.16	-0.98463	-0.98460	-0.98462
-0.17	-1.05094	-1.05092	-1.05093
-0.18	-1.12683	-1.12679	-1.12680
-0.19	-1.20041	-1.20030	-1.20036
-0.20	-1.27577	-1.27599	-1.27588
-0.21	-1.35334	-1.35331	-1.35333
-0.22	-1.43277	-1.43271	-1.43274
-0.23	-1.51398	-1.51390	-1.51394
-0.24	-1.59783	-1.59786	-1.59785
-0.25	-1.68401	-1.68385	-1.68393
-0.26	-1.77254	-1.77271	-1.77263
-0.27	-1.86367	-1.86363	-1.86365
-0.28	-1.95798	-1.95788	-1.95793

而对称函数 $B^{(1)}(H)$ 可展开成

$$B^{(1)} = A_0 + A_2 H^2 + \dots$$

$B^{(1)}/H$ 和 $B^{(1)}$ 都是 H^2 的函数。 H^2 的标定范围为 0.0144—0.0841 V², 我们希望能扩展到 0.0144 V² 以下, 并有较小的误差。

把 $B^{(1)}/H$ 与 H^2 的关系作标绘, 近似得到一条直线(图 3)。由图 3 得出截距 $A_1^0 = 5.78$ 和斜率 $A_3^0 = 16.0$ 。定义 $f(H) \equiv 5.78 + 16H^2$, 并令一次剩余函数 $R_1(B^{(1)}/H) \equiv B^{(1)}/H - f(H)$, 把 $R_1(B^{(1)}/H)$ 与 H^2 标绘,

近似得到一条抛物线, 中心轴在 $H^2 \sim 0.044$ 处。再将一次剩余函数 $R_1(B^{(1)}/H)$ 与 $(H^2 - 0.044)$ 标绘, 又近似地得到一条直线(图 4), 其截距为 -0.0068, 斜率为 6.80。再定义 $g(H) \equiv -0.0068 + 6.8(H^2 - 0.044)^2$, 并令二次剩余函数

$$\begin{aligned} R_2(B^{(1)}/H) &= R_1(B^{(1)}/H) - g(H) \\ &= B^{(1)}/H - (5.78636 + 15.402H^2 + 6.8H^4) \end{aligned}$$

该函数值很小。把二次剩余函数 $R_2(B^{(1)}/H)$ 与 H^2 作标绘(图 5), 呈现与 H^2 无关的正负无规跳动, 其最大偏差为 0.0005, 可视为由该拟合公式带来的误差。

同样的方法, 我们得到

$$B^{(1)}(H) = 0.00133 + 0.136H^2$$

这两式的计算值和实验值的比较列于表 2。

综合 $B^{(1)}(H)$ 和 $B^{(2)}(H)$ 的结果, 得到总的拟合公式为

$$B(H) = 0.00133 + 5.78636H + 0.136H^2 + 15.402H^3 + 6.8H^5$$

该公式对正负磁场都适合。

利用该公式对原始(a)、(b)、(c)、(d)各组标定数据进行再计算, 全部数据的计算值和

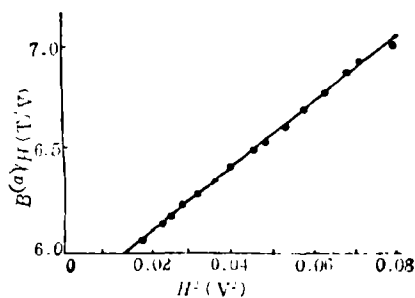


图3 $B^{(1)}/H$ 对 H^2 的标绘
Fig. 3 A plot of $B^{(1)}/H$ vs H^2

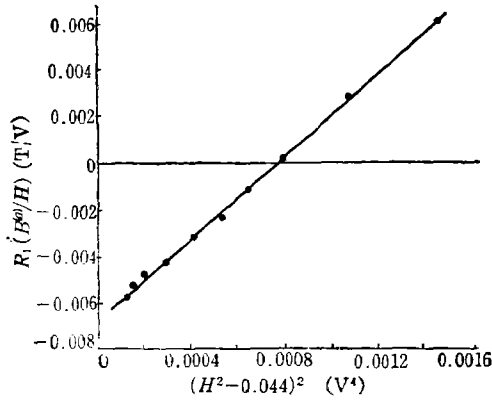


图4 $R_1(B^{(a)}/H)$ 对 $(H^2-0.044)^2$ 的标绘
Fig. 4 A plot of $R_1(B^{(a)}/H)$ vs $(H^2-0.044)^2$

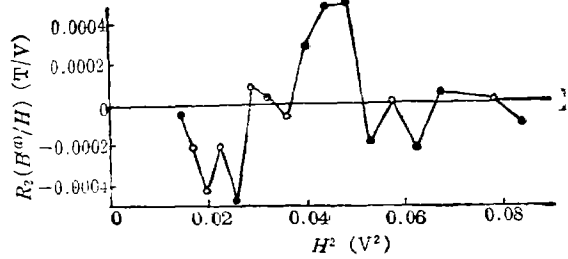


图5 $R_2(B^{(a)}/H)$ 对 H^2 的标绘
Fig. 5 A plot of $R_2(B^{(a)}/H)$ vs H^2

表 2 对称函数 $B^{(s)}$ 和反对称函数 $B^{(a)}$ 的公式化及其误差
Table 2 Formulas and errors of symmetric $B^{(s)}$ and antisymmetric $B^{(a)}$ funtrions

$H(V)$	$B^{(a)}$	$B^{(a)}(cal)$	$B^{(a)}-B^{(a)}(cal)$	$B^{(s)}$	$B^{(s)}(cal)$	$B^{(s)}-B^{(s)}(cal)$
0.12	0.72114	0.72114	0	0.00326	0.00334	-0.00007
0.13	0.78629	0.78632	0.00003	0.00359	0.00368	-0.00008
0.14	0.85266	0.85272	-0.00006	0.00404	0.00405	-0.00001
0.15	0.92042	0.92045	-0.00003	0.00444	0.00444	0
0.16	0.98851	0.98862	-0.00007	0.00492	0.00486	0.00005
0.17	1.06033	1.06032	0.00001	0.00530	0.00531	-0.00001
0.18	1.13266	1.13265	0	0.00586	0.00578	0.00007
0.19	1.20672	1.20673	-0.00001	0.00636	0.00629	0.00007
0.20	1.28272	1.28266	0.00004	0.00682	0.00682	0
0.21	1.36065	1.36005	0.00007	0.00732	0.00728	-0.00005
0.22	1.44061	1.44050	0.00007	0.00787	0.00786	-0.00009
0.23	1.52259	1.52264	-0.00002	0.00865	0.00857	0.00007
0.24	1.60706	1.60706	0	0.00921	0.00921	0
0.25	1.69383	1.69389	-0.00003	0.00990	0.00988	0.00002
0.26	1.78325	1.78324	0.00001	0.01062	0.01057	0.00004
0.27	1.87493	1.87523	0.00002	0.01128	0.01129	-0.00001
0.28	1.96999	1.96999	0	0.01206	0.01204	0.00002
0.29	2.06760	2.06763	-0.00003	0.01287	0.01282	0.00006

实验值都符合很好，最大偏差为 0.03%。

五、讨 论

在推导拟合公式过程中，由 $B^{(a)}$ 、 $B^{(s)}$ 的拟合公式引起的最大偏差分别为 $0.0005H$ 和 0.00009 。故拟合公式的最大偏差应为

$$\Delta B(fit) = \sqrt{(0.00009)^2 + (0.0005H)^2}.$$

在不同磁场下，拟合的最大偏差 $\Delta B(fit)$ 列于表 3。由表 3 可知，当 $H > 0.18V$ 时， $B^{(a)}$ 的拟合误差占优势；而在 $H < 0.18V$ 时， $B^{(s)}$ 的拟合误差占优势。所以尽管 $B^{(s)}$ 比 $B^{(a)}$ 的数值小得多，但当拟合公式应用到低磁场区时，主要误差由 $B^{(s)}$ 的误差决定。

在本工作将结束之际, 同步辐射室进口一台核磁共振仪 PT2025。用该核磁共振仪测量某一永久磁铁, 得到磁场值为 0.2076702T 。同时用我们的 Hc-1 霍尔测磁仪测得的霍尔电压为 0.03552V , 由上述拟合公式计算得到的磁场值为 0.2077T , 两者相差为 0.015% 。与我们在该磁场下最大拟合误差的估计值 0.05% 相符合。这也是对上述拟合公式应用到标定区外的可靠性的一次检验。

一个核磁共振探头, 往往只能覆盖一段磁场范围。要在大范围磁场下进行标定, 常常需要几个不同的核磁共振探头。这种多探头核磁共振仪非常昂贵, 本文提供的方法, 则可用单探头得到大磁场范围的拟合公式。

表 3 不同霍尔电压下拟合公式的误差
Table 3 Errors of the fitting formulas in different Hall voltages

$H(\text{V})$	$B(\text{T})$	$\Delta B^{(1)}$	$\Delta B^{(2)}$	$\Delta B(\text{fit})/B$
0.01	0.059272	0.000005	0.00009	0.0015
0.02	0.117284	0.000010	0.00009	0.00077
0.03	0.175509	0.000015	0.00009	0.00052
0.04	0.234038	0.000020	0.00009	0.00039
0.05	0.292965	0.000025	0.00009	0.00032
0.06	0.352383	0.000030	0.00009	0.00027
0.07	0.412385	0.000035	0.00009	0.00023
0.08	0.473067	0.000040	0.00009	0.00021
0.09	0.524522	0.000045	0.00009	0.00019
0.10	0.596846	0.000050	0.00009	0.00017
0.11	0.660134	0.000055	0.00009	0.00016
0.12	0.724485	0.000060	0.00009	0.00015
0.13	0.789995	0.000065	0.00009	0.00014
0.14	0.856764	0.000070	0.00009	0.00013
0.15	0.924892	0.000075	0.00009	0.00013
0.16	0.994478	0.000080	0.00009	0.00012
0.17	1.065627	0.000085	0.00009	0.00012
0.18	1.138440	0.000090	0.00009	0.00011
0.19	1.213024	0.000095	0.00009	0.00011
0.20	1.289484	0.000100	0.00009	0.00010
0.21	1.367928	0.000105	0.00009	0.00010
0.22	1.448466	0.000110	0.00009	0.00010
0.23	1.531210	0.000115	0.00009	0.000095
0.24	1.616271	0.000120	0.00009	0.000092
0.25	1.703766	0.000125	0.00009	0.000090
0.26	1.793812	0.000130	0.00009	0.000088
0.27	1.886526	0.000135	0.00009	0.000086
0.28	1.982030	0.000140	0.00009	0.000083
0.29	2.080448	0.000145	0.00009	0.000082

本工作得到马力同志在计算机拟合程序方面的帮助, 还得到陈仁怀同志的帮助, 对此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 毛振麟等, 中高能电子散射, 国家自然科学基金申请书, 1987年。
- [2] 毛振麟, 高能物理与核物理, 12(1988), 257。
- [3] 北京工业自动化研究所, 关于谱仪磁场霍尔监测系统的研究报告, 1989年。
- [4] 沈阳仪器仪表研究所, Hc-1型霍尔测磁仪使用说明书。
- [5] Fermi Lab, NMR MAGNETOMETER.
- [6] 中国科学院数学研究所, 电子计算机常用计算方法, 科学出版社, 1982年。

Calibration of the Hall magnetometer

Wang Zihua Wang Gongli Li Binfang Mao Zhenlin

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

Chen ShaoXing

(*Northern Polytechnic University*)

Abstract

The measurement of magnetic field distribution of the wide range magnetic spectrometer is carried out by a magnetometer with a temperature stabilized Hall element which has a long time stability of 0.03%. The magnetometer is calibrated with a NMR meter in the magnetic field range of 0.7—2.1 T. For below the calibrated region a fitting formula is presented. It is applicable to both positive and negative magnetic field regions.

Keywords: Hall magnetometer NMR meter calibration Fitting formula

(1989年12月4日收到)