

一种基于伸展线法的小孔径四极磁铁测量方法

刘婵^{1,2} 张继东^{1,3} 周巧根^{1,2,3}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院上海高等研究院 上海 201204)

摘要 针对目前多极磁铁孔径越来越小的发展趋势,搭建了一种基于单根伸展线法(Single Stretched Wire Method, SSWM)的磁测系统,该系统的主要优势是测量域所需空间小且运动模式灵活。基于该系统的优势及四极磁铁磁场分布的特点,尝试使用双曲线轨迹对四极磁铁靠近其四个极头的区域进行了扫描测量,并根据矢量在测量点分布的特性,提出了一种全新的数据分析方法,用以分析四极磁铁的梯度积分和高阶场误差。用该系统对一孔半径为11 mm、梯度大于 $100 \text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$ 的四极磁铁进行测量,测量结果表明高阶场误差测量重复性好于 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$,能满足小孔径高梯度四极磁铁的磁场测量要求。

关键词 磁场测量, 伸展线法, 四极磁铁, 小孔径磁铁

中图分类号 TL503.8

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060201

A small aperture quadrupole magnet measurement method based on the single stretched wire method

LIU Chan^{1,2} ZHANG Jidong^{1,3} ZHOU Qiaogen^{1,2,3}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract [Background] The trend towards increasingly narrow apertures in multipole magnets poses a challenge to many conventional measurement methods. Consequently, these methods' applicability in small aperture multipole magnets is limited. However, the single stretched wire measurement technique has emerged as a promising alternative due to its minimal space requirements within the measurement domain. Therefore, this technique is well-suited for accurately measuring magnetic fields in small aperture magnets. [Purpose] This study aims to introduce a novel approach for analyzing the gradient integral and multipole errors of the quadrupole magnet, to address the limitations associated with the current single stretched wire method (SSWM). [Methods] Firstly, a magnetic measurement system based on the single stretched wire method was constructed with two boasted key advantages: minimal space occupation within the measurement domain, and flexible motion modes. Then, leveraging these features, measurements of the four poles of a quadrupole magnet by employing a hyperbolic trajectory was acquired, and a new technique for analyzing both the gradient integral and multipole errors associated with the quadrupole magnet was developed. Finally, the feasibility of this SSWM was verified by comparing the results obtained from our system

第一作者: 刘婵, 女, 1995年出生, 2018年毕业于中国计量大学, 现为硕士研究生, 研究领域为磁场测量

通信作者: 周巧根, E-mail: zhouqiaogen@zjlab.org.cn

收稿日期: 2023-01-06, 修回日期: 2023-04-19

First author: LIU Chan, female, born in 1995, graduated from China Jiliang University in 2018, master student, focusing on magnetic field measurement

Corresponding author: ZHOU Qiaogen, E-mail: zhouqiaogen@zjlab.org.cn

Received date: 2023-01-06, revised date: 2023-04-19

to those derived from the rotating coil method. **[Results]** Measurement results of a quadrupole magnet with the inscribed radius of 11 mm and gradient of $100 \text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$ by SSWM show that the repeatability of three measurements is better than $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ which is less than one-third of the maximum value of multipole error of 5×10^{-4} , so it can meet the measurement requirements. **[Conclusions]** The methodology outlined in this study for constructing the measurement system and analyzing the resultant data offers a practical and effective solution for the future magnetic field measurements of small aperture magnets.

Key words Magnetic field measurement, Stretched wire, Quadrupole magnet, Small aperture magnet

基于电子储存环的同步辐射光源经历了三代的发展,为生命科学、材料科学等前沿基础研究提供了有利的实验手段^[1]。近十年来,世界各地又纷纷开始研究或建造第四代同步辐射光源,以及基于超低发射度电子储存环的衍射极限储存环(Diffraction Limited Storage Ring, DLSR)光源。衍射极限储存环光源相比第三代同步辐射光源具有更低束流发射度、更高亮度和更强横向相干性,其核心的要点在于要提供比现存大部分加速器强得多的横向聚焦,这意味着磁场梯度可能是三代光源同类磁铁的2~4倍^[2]。为提高磁场梯度,当前多极磁铁正朝着孔径越来越小的方向发展^[1,3]。另一方面,由于多极磁铁在安装到粒子加速器(Particle accelerator)或储存环(Storage ring)之前都要对其磁场进行测量,以表征磁铁在设计和制造过程中的误差^[4]。而小孔径多极磁铁的出现使得很多传统的测量方法受到限制,因此当前同步辐射光源的发展也对磁场测量方法提出了更高的要求。研究一种适用于小孔径磁铁的磁场测量方法对于下一代同步辐射光源的发展具有重要意义。

常用的磁场测量方法有霍尔探头点测法(Hall Probes)、旋转线圈法(Rotating coil)、平移线圈法(Translation coil)、翻转线圈法(Flipping coil)以及伸展线法(Stretched wire)^[5-7]。其中,测量时仅使用单根金属线的单根伸展线法(Single Stretched Wire Method, SSWM)因其在测量域所需空间小,故非常适合小孔径磁铁的磁场测量。同时,SSWM还具有运动模式灵活的优点,通过控制处在磁场中的单根伸展线(Single Stretched Wire, SSW)沿任意轨迹运动,可实现对不同位置磁场的测量。但由于测量过程中仅有单根金属线处于磁场中,因此这种测量方式产生的感应电压信号较弱,并且极易受外界噪声干扰,导致信噪比较低,故SSWM对测量方式和测量环境都有很高的要求。SSWM的上述缺陷使得目前使用SSWM系统测得的高阶场误差准确性较低,这也导致其当前的应用受到限制。为顺应多极磁铁孔径越来越小的发展趋势,本文研究了一种基于SSWM的小孔径多极磁铁磁测系统,并且针对当前

SSWM测得高阶场误差准确性较低这一缺点,探究了一种新的高阶场误差测量和数据分析方法。将该方法运用到一块高梯度小孔径四极磁铁的磁场测量中,该四极磁铁的主要物理参数如表1所示。

表1 四极磁铁物理参数
Table 1 Quadrupole magnet parameters

参量 Parameters	数值 Value
孔半径 Inscribed radius / mm	11
铁芯长度 Length of iron core / cm	20
磁场梯度 Gradient / $\text{T}\cdot\text{m}^{-1}$	100 (@5 400 AT)
好场区半径 Good reference radius / mm	5
高阶场误差 Multipole errors	$< 5 \times 10^{-4}$ (@ $r = 5 \text{ mm}$)

1 SSWM 磁测系统的搭建

本系统的实验平台如图1所示,整个装置主要由两个三维直线运动平台、伺服电机、3458A 数字万用表、运动控制器、工控机、磁铁调节平台组成。将整个磁测装置放置在减震大理石台面上,以减小地面震动对测量过程的影响。

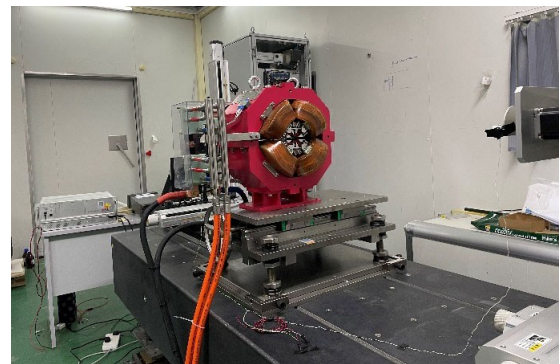


图1 SSWM测量系统实验平台照片
Fig.1 Snapshot of experimental platform for the SSWM measurement system

系统的整体布局如图2所示,主要参数如表2所示。整个系统由三部分组成:机械运动控制系统、磁测线圈系统、数据采集系统。测量时将SSW置于磁场中,线的两端通过低通滤波器连接至数据采集系统,处在磁场中的SSW在运动平台的带动下在磁场中做切割磁感线的运动,根据法拉第电磁感应定律,

SSW产生的感应电压 V 对时间的积分值正比于线圈所包围的有效面积内磁通量的变化量 $\Delta\Phi$ ^[8-10],对采

集到的电压信号进行分析可得到相应的磁场信息。

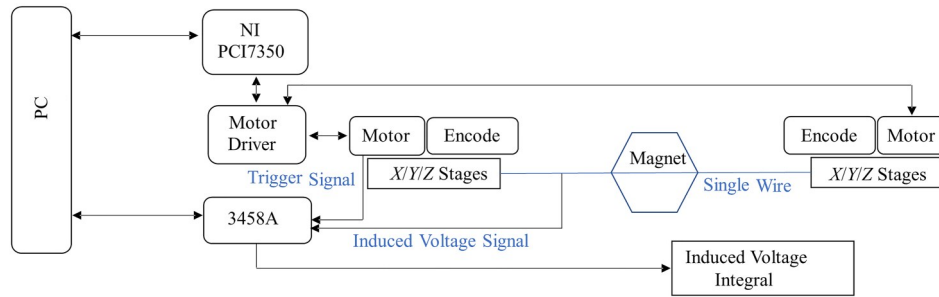


图2 SSWM系统整体布局示意图

Fig.2 Overall layout diagram of the SSWM measurement system

表2 SSWM系统主要参数

Table 2 Main parameters of the SSWM system

参量 Parameters	值 Value
线类型 Type of wire	Be-Cu
线长 Length of wire / m	1
步长 Step length Δl / mm	0.22

机械运动控制系统采用两个三维 (x, y, z) 直线运动平台,其中 x, y 方向用来定位SSW, z 方向用来拉伸SSW以控制线张力,测量过程将运动平台进行接地处理以免引入噪声干扰。当SSW沿某一段曲线轨迹运动时,首先计算该段曲线的总长度,然后将其分为相等的 N 段,每一段即为一步,根据起始点位置坐标 (x_0, y_0) 和步长 Δl ,通过LabVIEW程序迭代计算第 i 步($i=1, 2, 3, \dots, N$)终点的绝对位置坐标 (x_i, y_i) ,控制两个直线运动平台的 x 轴和 y 轴运动到 (x_i, y_i) ,这样SSW经过 N 步运动后完成一次完整的测量。对两个运动平台的控制通过LabVIEW运动控制程序完成。

数据采集系统采用KEYSIGHT3458A数字万用表,通过通用接口总线(General-Purpose Interface Bus, GPIB)实现对万用表的远程控制。数据采集系统主要分为三个部分:直流电压(DC)档基本配置、触发采数、数据读取与存储,系统的控制通过LabVIEW完成。在本系统中,SSW每运动一步触发万用表采集一个读数,该读数为每步运动产生的感应电压 V_i 对该段时间的积分值 $\int V_i dt$,一次完整的测量共采集 N 个读数。

2 坐标系建立

在开展后续测量之前,首先建立SSW运动坐标系,将SSW运动坐标系的 $(0, 0)$ 点校准到磁中心上,以便后续对SSW运动位置进行定位。采用一种磁

中心校准方法来实现这一过程^[11],如图3所示, (x, y) 为校准前的坐标系, (γ, β) 为四极磁铁磁中心实际所在坐标系,两坐标系的位移偏差为 (x_0, y_0) 。

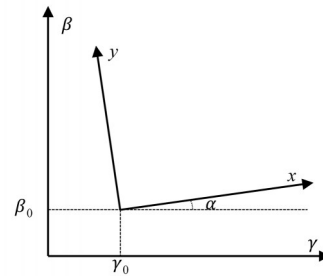


图3 磁中心偏差

Fig.3 Deviation of the magnetic center

现让SSW在 (x, y) 中沿8条直线轨迹运动以校准磁中心,运动轨迹如图4所示,在每种轨迹下,通过SSW所包围的闭合线圈有效面积内的磁通量变化量为图中 Φ_i^+ ($i=1, 2, 3, 4$),最终可得出角度偏差 α 如式(1)所示,位移偏差 (x_0, y_0) 如式(2)所示。

$$\alpha = \frac{(\Phi_2^+ - \Phi_2^-) - (\Phi_1^+ - \Phi_1^-)}{8(\Phi_1^+ + \Phi_1^-)} \cdot \frac{l}{d} \quad (1)$$

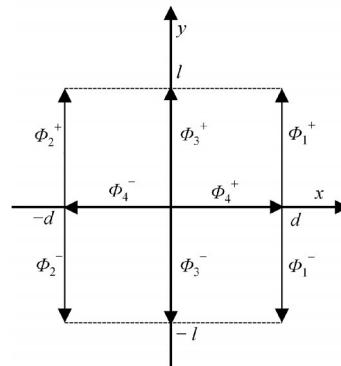


图4 用于磁中心校准的SSW运动轨迹

Fig.4 Movement trajectory of the SSW used for the magnetic center calibration

$$\begin{aligned} x_0 &\approx \frac{(\Phi_4^+ - \Phi_4^-)l^2}{2(\Phi_1^+ + \Phi_1^-)d} \\ y_0 &\approx \frac{(\Phi_3^+ - \Phi_3^-)l}{2(\Phi_1^+ + \Phi_1^-)} \end{aligned} \quad (2)$$

现在该四极磁铁额定工作电流($I=135\text{ A}$)下对磁中心进行校准。取 $l=5\text{ mm}$, $d=5\text{ mm}$,控制SSW沿图5中8条直线轨迹运动,计算此时的磁中心偏差(x_1, y_1, α)为:

$$x_1 = -214\ \mu\text{m}, y_1 = -152\ \mu\text{m}, \alpha_1 = 0.001\ 1\ \text{rad}$$

根据(x_1, y_1, α)调整SSW的位置,调整后控制SSW以同样的方式运动,计算此时的磁中心偏差(x_0, y_0, α),三次重复测量结果如表3所示。

表3 磁中心偏差测量结果

Table 3 Measurement results of magnetic center deviation

测量次数 Times	$x_0 / \mu\text{m}$	$y_0 / \mu\text{m}$	α / rad
1	2.82	-4.28	0.001 1
2	7.96	-1.36	0.000 87
3	4.94	-2.02	0.001 1

由表3可知,调整后水平位置偏差 x_0 小于 $8\ \mu\text{m}$,三次测量重复性好于 $\pm 3\ \mu\text{m}$;垂直位置偏差 y_0 小于 $4.5\ \mu\text{m}$,三次测量重复性好于 $\pm 1.5\ \mu\text{m}$;角度偏差小于 $0.001\ 2\ \text{rad}$,三次测量重复性好于 $\pm 0.000\ 15\ \text{rad}$ 。至此磁中心校准结束,将校准后的磁中心设置为SSW运动坐标系的(0,0)点,完成坐标系的建立。

3 测量原理和方法

将多极磁铁孔径内的磁场表示为复数形式 $\mathbf{B} = B_x + iB_y$,则其共轭为 $\mathbf{B}^* = B_x - iB_y$,其复势 \mathbf{F} 可表示为级数形式如式(3),其中: \mathbf{F} 的实部为矢势 A ,如公式(4),虚部为标势 V ; C_n 为归一化半径 r_0 处的高次谐波系数, $C_n = b_n + ia_n$; $\mathbf{z} = x + iy = r(\cos\theta + i\sin\theta)$, (x, y)为场点的笛卡尔坐标, (r, θ)为极坐标。根据 \mathbf{B}^* 和 \mathbf{F} 的关系 $\mathbf{B}^* = i\mathbf{F}'$, n 阶磁场高阶分量 \mathbf{B}_n^* 可表示为式(5)。对于四极磁铁,其梯度和磁场高阶分量系数分别为式(6)和式(7)^[12]。

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= A + iV = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \left(\frac{\mathbf{z}}{r_0}\right)^n \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + ia_n) \left(\frac{r}{r_0}\right)^n (\cos n\theta + i\sin n\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

$$A = \text{Re}[\mathbf{F}] = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^n (b_n \cos n\theta - a_n \sin n\theta) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_n^* &= inC_n \frac{1}{r_0} \left(\frac{\mathbf{z}}{r_0}\right)^{n-1} = \\ &inC_n \frac{r^{n-1}}{r_0^n} [\cos(n-1)\theta + i\sin(n-1)\theta] \end{aligned} \quad (5)$$

$$G = \frac{|\mathbf{B}_2|_{@r=r_0}}{r_0} = \frac{2|C_2|}{r_0^2} \quad (6)$$

$$\frac{|\mathbf{B}_n|_{@r=r_0}}{|\mathbf{B}_2|_{@r=r_0}} = \frac{B_n}{B_2} = \frac{n|C_n|}{2|C_2|} = \frac{nC_n}{2C_2} \quad (7)$$

磁铁的磁场质量主要由设计、加工和装配误差等决定。磁场的高阶场误差是衡量磁铁磁场质量的关键指标,对高阶场误差的评估通常表示为好场区内高阶分量占主磁场的相对含量,称为高阶分量系数。磁场误差分为两部分:系统误差和随机误差。系统误差主要是由磁极面设计决定的,对于四极磁铁,系统性差对应的磁场高阶分量为 $B_6, B_{10}, B_{14}, B_{18}$ 等;随机误差主要是加工误差和装配误差产生的磁场高阶分量^[13]。因SSWM自身的缺陷,如线圈匝数少,易受测量环境的干扰,最终导致测量产生的感应电压信号信噪比较低,故使用SSWM测得的高阶场误差与目前已发展成熟的磁测方法相比误差较大。由式(5)可知, r 越大, $|\mathbf{B}_n|$ 越大,故在离磁中心越远处,高阶分量对磁场的贡献越明显。根据多极磁铁中磁场的上述分布特点,尝试利用SSWM运动模式灵活、在测量域所需空间小的优势,对离磁中心更远、磁场更强的极头处进行了测量,以求一种新的分析高阶场误差的方式。

将四极磁铁的4个极头按直角坐标系中的1~4象限分为极头1~4(Pole1~4)。4个极面曲线方程为 $xy = \pm R^2/2$,其中 R 为磁铁孔半径。根据表1,磁铁的孔半径 $R = 11\ \text{mm}$,归一化半径 $r_0 = 5\ \text{mm}$ 。在激磁电流 $I=135\ \text{A}$ 下,控制SSW沿 $xy = \pm 10^2/2$ 的双曲线轨迹运动。测量初始位置点坐标 $x_0 = \pm 5.084\ \text{mm}$,采样个数 $N=31$ 。根据电磁感应定律,当SSW在磁铁孔径内切割磁力线运动时,感应电压的时间积分等于矢势 A 沿磁铁长度积分 AL (矢势积分)的变化量 ΔAL ,即 $\int V dt = \Delta AL$,因此,从测量采集到的电压积分可以得到极头表面处双曲面上的矢势积分分布,从而得到积分场的各阶分量。

4 测量结果和分析

4.1 积分场梯度

四极磁铁的磁场梯度可按式(8)估算,其中 R 为磁铁孔半径; NI 为每极安匝数; μ_0 为磁导率; η 为磁效率。按照磁铁的有效长度 $0.205\ 5\ \text{m}$ 、磁效率为1估算,当 $NI=5\ 400\ \text{AT}$ 时,四极磁铁的梯度积分理论值为 $(GL)_0 = 230\ 494\ \text{Gs}$,对应的在归一化半径 $5\ \text{mm}$ 处的二阶谐波系数为 $C_2 L = 28\ 812\ \text{Gs} \cdot \text{cm}^2$ 。

$$G = 2\eta\mu_0 \frac{NI}{R^2} \quad (8)$$

使用SSWM系统在四极头表面处双曲线上测得的 AL 曲线分布如图5所示,其中横坐标为上述估算得到的梯度积分对应的矢势积分 $(AL)_0$ 。理想情况下,如果不存在高阶场误差,则测得的 AL 和估算得到的 $(AL)_0$ 有固定的线性关系 $AL = k(AL)_0 + b$,故图5中4条曲线应为重合的直线。分别对这4条曲线做线性拟合,将4条曲线拟合得到的系数 k 取平均记为 \bar{k} ,则四极场积分对应的矢势积分为 $\bar{k}(AL)_0$,梯度积分值为 $\bar{k}(GL)_0$ 。将4条曲线分别减去 $\bar{k}(AL)_0$,由此得到残差即为高阶场误差对应的矢势积分误差。在不同时间重复三次测量,得到的梯度积分值分别为195 600 Gs、195 700 Gs和195 564 Gs,重复性好于0.1%。

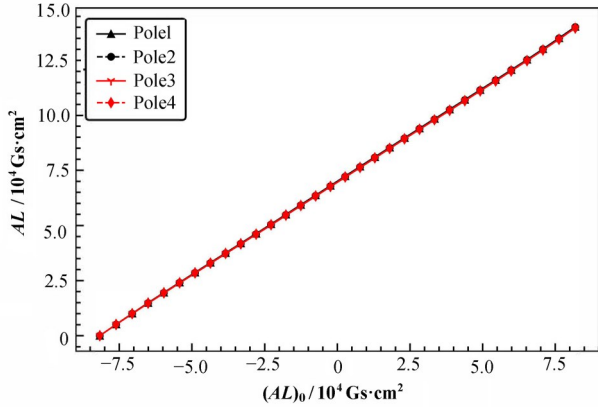


图5 使用SSWM在极头1~4上测得的 AL 曲线
Fig.5 AL curve of Pole1~4 measured by SSWM

4.2 积分场高阶分量

如前所述,图5中的4条曲线做线性拟合后得到的残差部分即为高阶场误差对应的矢势积分误差,图6为三次测量得到的4个极头表面处双曲线上的矢势积分误差曲线,可以看出,测量重复性较好。下面将根据这些曲线拟合得到各积分场高阶分量。

为方便拟合计算,先分析一下各阶分量的对称性。根据式(4):当仅存在斜分量即 $C_n = ia_n$ 时,矢势 A 关于 x 轴反对称(上下反对称),并且当 n 为奇数时, A 同时关于 y 轴对称(左右对称),而当 n 为偶数时, A 同时关于 y 轴反对称(左右反对称);当仅存在正分量即 $C_n = b_n$ 时,矢势 A 关于 x 轴对称(上下对称),并且当 n 为奇数时, A 同时关于 y 轴反对称(左右反对称),而当 n 为偶数时, A 同时关于 y 轴对称(左右对称)。将图6中4个极头表面处测得的矢势积分误差曲线别记为 $(AL)_{\text{pole}-i}$ ($i = 1, 2, 3, 4$),根据上述分析,可以把误差曲线拆分成4部分:偶数阶斜

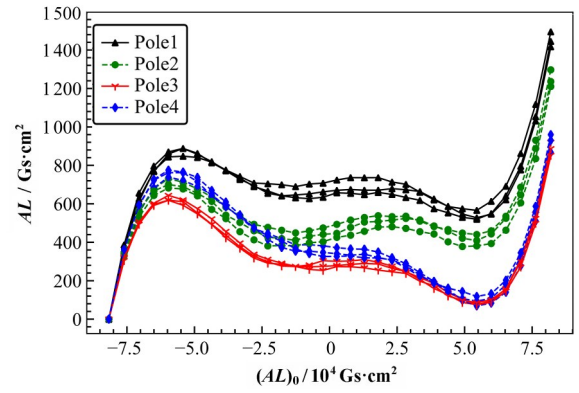


图6 三次测量得到的高阶场误差对应的矢势积分误差曲线
Fig.6 AL error curves corresponding to the multipole errors obtained by three measurements

分量 $(AL)_{\text{even}}^S$ 、奇数阶斜分量 $(AL)_{\text{odd}}^S$ 、奇数阶正分量 $(AL)_{\text{odd}}^N$ 和偶数阶正分量 $(AL)_{\text{even}}^N$,拆分方法为:

$$\begin{aligned} (AL)_{\text{even}}^S &= \frac{1}{2} [(AL)_{\text{pole}-1(2)} + (AL)_{\text{pole}-3(4)}] - (AL)_{\text{even}}^N, \\ (AL)_{\text{odd}}^S &= \frac{1}{2} [(AL)_{\text{pole}-1(3)} + (AL)_{\text{pole}-2(4)}] - (AL)_{\text{even}}^N, \\ (AL)_{\text{odd}}^N &= \frac{1}{2} [(AL)_{\text{pole}-1(2)} + (AL)_{\text{pole}-4(3)}] - (AL)_{\text{even}}^N, \\ (AL)_{\text{even}}^N &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (AL)_{\text{pole}-i} \end{aligned} \quad (9)$$

图7(a~d)是其中一次测量得到的4条曲线拆分后的4个部分。下面利用式(4)分别对这4个部分做多变量线性拟合,以得到各个积分场高阶分量 b_n 和 a_n 。偶数阶斜分量用 $n=4, 6, 8, 10$ 拟合,可得到 a_4, a_6, a_8, a_{10} ;奇数阶斜分量用 $n=3, 5$ 拟合,可得到 a_3, a_5 ;奇数阶正分量用 $n=3, 5, 7, 9, 11$ 拟合,可得到 $b_3, b_5, b_7, b_9, b_{11}$;偶数阶正分量用 $n=4, 6, 8, 10, 12, 14, 18$ 拟合,可得到 $b_4, b_6, b_8, b_{10}, b_{12}, b_{14}, b_{18}$ 。表4中给出了三次测量的拟合结果,可以看出,三次测量的重复性好于 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$,该值小于表1中高阶场误差最大值 5×10^{-4} 的三分之一,因此能满足测量要求。

运用PCB(Printed Circuit Board)旋转线圈法对该四极磁铁在相同激磁电流下的磁场高阶场误差进行测量,将上述分析得到的高阶分量系数(三次取平均)与旋测法得到的高阶分量系数列于表5^[14]。由表5可知,两种方法测得的高阶分量系数,除斜六极分量($n=3$)外,其余均小于表1中高阶场误差最大值 5×10^{-4} 。斜六极分量可以通过微调磁极的位置予以补偿^[14]。

表4 三次测量拟合得到的高阶分量系数
Table 4 Multipole component values obtained through three measurement fittings

阶数 n	$nb_n/2b_2$			$na_n/2b_2$		
	第一次测量 Measurement No.1	第二次测量 Measurement No.2	第三次测量 Measurement No.3	第一次测量 Measurement No.1	第二次测量 Measurement No.2	第三次测量 Measurement No.3
3	-2.25×10^{-4}	-2.34×10^{-4}	-1.88×10^{-4}	-1.14×10^{-3}	-8.74×10^{-4}	-1.06×10^{-3}
4	8.25×10^{-5}	1.04×10^{-4}	1.68×10^{-4}	-1.17×10^{-4}	-1.38×10^{-4}	-1.29×10^{-4}
5	-6.60×10^{-5}	-9.20×10^{-5}	-7.43×10^{-5}	1.92×10^{-6}	-7.01×10^{-5}	8.32×10^{-7}
6	1.45×10^{-4}	1.65×10^{-4}	1.81×10^{-4}	-1.85×10^{-4}	-1.15×10^{-4}	-2.30×10^{-4}
10	5.24×10^{-5}	5.57×10^{-5}	5.62×10^{-5}	-8.30×10^{-6}	-5.81×10^{-6}	-1.02×10^{-5}

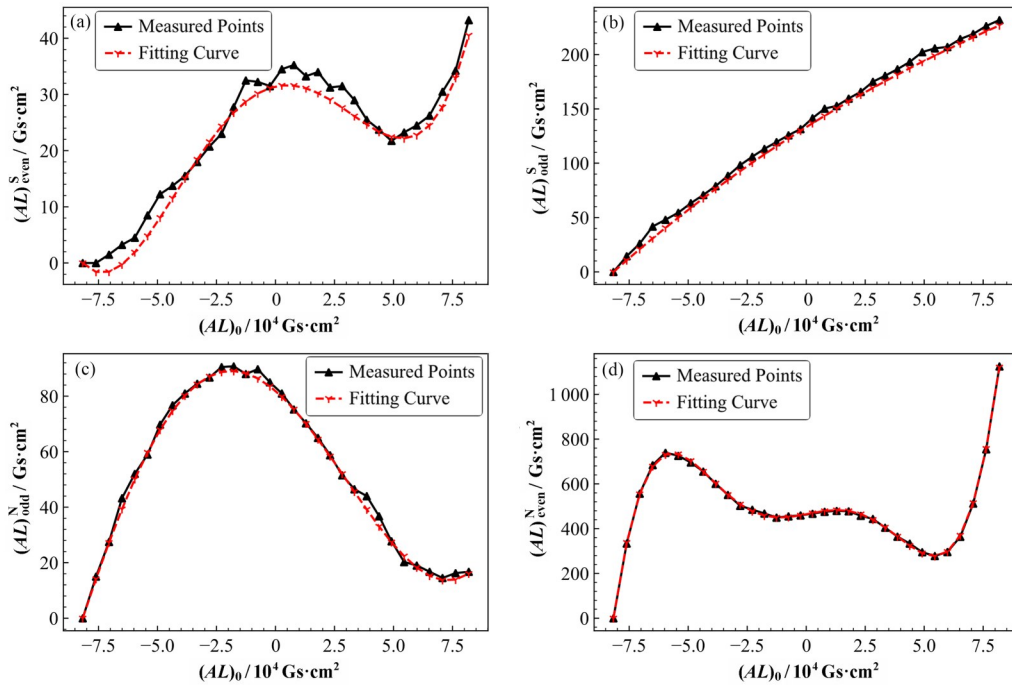


图7 实测与拟合得到的四部分矢势积分误差曲线
Fig.7 Curves of four-part AL error obtained by measurement and fitting

表5 SSWM和旋测法测得的高阶分量系数
Table 5 Multipole component values measured by SSWM and rotating coil method

高阶项 n	伸展线法 SSWM		旋转线圈法 Rotating coil	
	$nb_n/2b_2$	$na_n/2b_2$	$nb_n/2b_2$	$na_n/2b_2$
3	-2.16×10^{-4}	-1.02×10^{-3}	-8.03×10^{-5}	-8.74×10^{-4}
4	1.18×10^{-4}	-1.27×10^{-4}	-4.49×10^{-5}	-9.83×10^{-5}
5	-7.74×10^{-5}	-2.24×10^{-5}	-4.83×10^{-5}	-7.23×10^{-5}
6	1.64×10^{-4}	-1.77×10^{-4}	-1.10×10^{-4}	4.16×10^{-5}
10	5.48×10^{-5}	-8.10×10^{-6}	-1.31×10^{-4}	6.90×10^{-5}

5 结语

本文搭建了一种适合测量小孔径磁铁的单根伸展线法(SSWM)磁测系统,并提出了一种新的磁场测量和数据分析方法,以提高SSWM测量高阶场误差的准确性。将该系统运用到一孔半径为11 mm的正四极磁铁的测量中,在对该四极磁铁的4个极头处进行测量后,根据测量结果分别对其梯度积分、斜

高阶分量和正高阶分量进行了分析,并将结果与旋测法测得结果进行对比,验证了该方法的可行性。综上所述,本文为小孔径多极磁铁的磁场测量提供了一种可行的方案,为今后使用SSWM测量高阶场误差提供了一种新的思路。为方便与旋测法进行对比,本文选用的测量对象为一孔半径为11 mm的四极磁铁,今后还可将此系统运用到常规磁测方式无法测量的更小孔径的多极磁铁中。

作者贡献声明 刘婵负责硬件和软件系统的搭建, 实验研究, 数据分析整理, 撰写论文并完成后续修订; 张继东指导实验与系统搭建; 周巧根指导实验与数据分析, 指导并协助论文写作与修改。

参考文献

- 赵瑀, 李志平, 刘伟航, 等. 衍射极限储存环光源相关问题[J]. 科学通报, 2020, **65**(24): 2587 - 2600.
ZHAO Yu, LI Zhiping, LIU Weihang, *et al.* Physics issues of the diffraction-limited storage ring light source[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, **65**(24): 2587 - 2600.
- 罗箐. 衍射极限储存环的基本原理与技术[J]. 现代物理知识, 2020, **32**(3): 51 - 56. DOI: [10.13405/j.cnki.xdwz.2020.03.009](https://doi.org/10.13405/j.cnki.xdwz.2020.03.009).
LUO Qing. Basic principle and technology of diffraction limit storage ring[J]. Modern Physics, 2020, **32**(3): 51 - 56. DOI: [10.13405/j.cnki.xdwz.2020.03.009](https://doi.org/10.13405/j.cnki.xdwz.2020.03.009).
- Le Bec G, Chavanne J, Benabderrahmane C, *et al.* High gradient quadrupoles for low emittance storage rings[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2016, **19**(5): 052401. DOI: [10.1103/physrevaccelbeams.19.052401](https://doi.org/10.1103/physrevaccelbeams.19.052401).
- Le Bec G, Chavanne J, Penel C. Stretched wire measurement of multipole accelerator magnets[J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2012, **15**(2): 022401. DOI: [10.1103/physrevstab.15.022401](https://doi.org/10.1103/physrevstab.15.022401).
- Gehlot M, Khan S M, Trillaud F, *et al.* Magnetic field integral measurements with stretched wire and hall probe methods[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, **56**(5): 1 - 8. DOI: [10.1109/TMAG.2020.2976031](https://doi.org/10.1109/TMAG.2020.2976031).
- Clarke J A. The science and technology of undulators and wigglers[M]. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- Yang M, Chen F S, Yin B G, *et al.* A rotating coil measurement system based on CMM for high-gradient small-aperture quadrupole in HEPS-TF[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, **5**(1): 8 - 14. DOI: [10.1007/s41605-020-00211-y](https://doi.org/10.1007/s41605-020-00211-y).
- 王宏飞, 张继东, 周巧根. 精确测量波荡器磁场的伸展线磁测系统[J]. 核技术, 2009, **32**(9): 653 - 656. DOI: [10.3321/j.issn:0253-3219.2009.09.004](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-3219.2009.09.004).
WANG Hongfei, ZHANG Jidong, ZHOU Qiaogen. A stretch-wire system for accurate integrated magnetic field measurements in undulators[J]. Nuclear Techniques, 2009, **32**(9): 653 - 656. DOI: [10.3321/j.issn:0253-3219.2009.09.004](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-3219.2009.09.004).
- Gong L L, Li X Y, Li Y H, *et al.* Single-block measurement for the cryogenic permanent magnet undulator sorting[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, **5**(1): 83 - 89. DOI: [10.1007/s41605-020-00221-w](https://doi.org/10.1007/s41605-020-00221-w).
- Hwang C S, Hong C H, Lin F Y, *et al.* Stretch-wire system for integral magnetic field measurements[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, **467 - 468**: 194 - 197. DOI: [10.1016/s0168-9002\(01\)00272-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(01)00272-8).
- Schmüser P. Magnetic measurements of superconducting magnets and analysis of systematic errors[R]. CAS - CERN Accelerator School: Magnetic Measurement and Alignment, 1992. DOI: [10.5170/CERN-1992-005.240](https://doi.org/10.5170/CERN-1992-005.240).
- Tanabe J T. Iron dominated electromagnets: design, fabrication, assembly and measurements[M]. New Jersey: World Scientific, 2005.
- 朱亚, 张庆磊, 周巧根. 一种新型高梯度四极磁铁的设计及验证[J]. 核技术, 2022, **45**(7): 070102. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070102](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070102).
ZHU Ya, ZHANG Qinglei, ZHOU Qiaogen. Design and verification of a novel high gradient quadrupole magnet [J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(7): 070102. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070102](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.070102).
- 朱亚. 高梯度四极磁铁的研制[D]. 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2022. DOI: [10.27585/d.cnki.gkshs.2022.000034](https://doi.org/10.27585/d.cnki.gkshs.2022.000034).
ZHU Ya. Development of high-gradient quadrupole magnets[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022. DOI: [10.27585/d.cnki.gkshs.2022.000034](https://doi.org/10.27585/d.cnki.gkshs.2022.000034).