

上海同步辐射装置平移长线圈磁测机的研制

张继东 曹 瓚 任芳林 周巧根 张丽华 李 宇 赵玉彬 阎和平

中国科学院上海原子核研究所 上海 201800

摘要 描述了上海同步辐射装置(SSRF)平移长线圈磁测机的设计和制造。磁测机包括的硬件主要有:测量线圈、直线运动平台、高精度数字积分仪、步进电机控制卡、高稳定度电源、直流电流传感器、6位半数字电压表、通用接口总线(GPIB)接口卡及高精度编码器等。磁场测量和数据分析程序采用LabVIEW编制。该磁测机已测量了SSRF储存环二极磁铁的样机,效果良好,能做到灵活、快速和自动化地测量积分场。

关键词 二极磁铁,积分场,平移长线圈

中图分类号 TM 936

为了完成上海同步辐射装置(SSRF)储存环和增强器的二极磁铁的样机及以后批量磁铁的磁场测量^[1,2],根据SSRF工程的磁场测量技术要求,特研制了二极磁铁平移长线圈磁测机。这种磁测机能给出以下参数用于评估磁铁的质量:激磁特性曲线、传递函数特性、积分场误差沿横向分布以及批量生产磁铁之间的一致性。本文介绍磁测线圈的设计、磁测机机械结构、数据采集系统的构成和最后的磁测结果。

1 磁测线圈的设计

在磁场中移动的导体内感应的电压信号的积分等于磁场矢量势,即复磁势 F 的实数部分。在 n 阶磁场中,匝数为 N 、宽度为 $2a$ 的线圈在磁中性面上平移,其单位长度上给出的电压信号的积分为

$$I_n = A_{n@x=x_0} \left(\frac{x}{x_0} \right)^{n-1} \quad n=2,3,4 \dots \quad (1)$$

式中, $A_{n@x=x_0} = N(2a) B_{n@x=x_0}$, x_0 为好场区边缘的 x 值。在测磁过程中,按时间的变化同时记录下电压信号的积分值和线圈中心的位置 x ,就可得到 $I=f(x)$ 曲线。

按照SSRF储存环二极磁铁场强为1.105T、有效长度为1.66m、场质量 5×10^{-4} 等参数,我们设计的线圈骨架长为2200mm、有效长度+8倍的磁极间隙,宽14mm,为T型结构,其截面图如图1所示。线圈槽深为2mm,槽宽为2mm。测量线圈长2200mm、宽10mm,线圈线采用MWS公司

的B(20)441191-001,这是一种20股扁平线。实际绕制时用19股扁平线绕30层,头尾串接,共570匝。

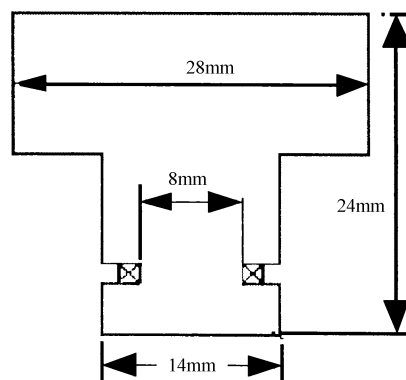


图1 SSRF 储存环二极磁铁测线圈骨架截面图

Fig.1 Sectional schematic of the dipole magnet measurement coil SSRF storage ring

这样估算储存环二极磁铁基波信号积分值 $\psi_1 = B_1 L_{eff} N(2a) = 10.46Vs$, 高次谐波信号 $\Delta y = 5 \times 10^{-4}$ 、 $\psi_1 = 5.23mVs$, 这两个信号都在积分器的有效工作范围内。

2 磁测机机械结构

磁测机机械结构包括底板、长线圈托架、长线圈骨架、直线运动平台和连接器。底板为一长2500mm、宽272mm的横工字型结构,下槽加工成与磁极断面形状一致,上槽为一直角槽。槽内放一个可以单向移动的长线圈托架,托架宽80mm、长2300mm,由8个小轮支撑。长线圈骨架长

第一作者:张继东,男,1969年8月出生,1995年毕业于上海第二工业大学,工业自动化专业,工程师

收稿日期:2002-04-19,修回日期:2002-11-28

m, 由 8 个小轮支撑。长线圈骨架长 2200mm、宽 10 mm, 可放入长线圈托架中。底板、长线圈托架、长线圈骨架由材料为 3248 环氧树脂的玻璃纤维板做成。底板槽两端各装一台日本神津公司的 XA10-54 直线运动平台, 行程 150mm。此平台由步进电动机驱动, 并且装有旋转编码器。可移动的线圈托架和直线运动平台之间由连接器连接, 运动时可允许托架有少许倾斜。此设备可方便地放入二极磁铁中, 灵活性强, 且自动定位。图 2 为放置在 SSRF 储存环二极磁铁样机中的磁测机机械结构的照片。

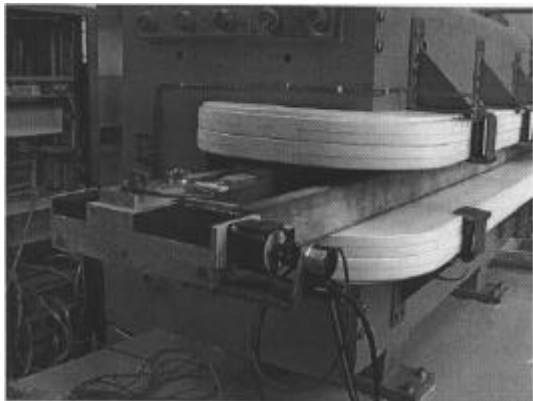


图 2 放置在 SSRF 储存环二极磁铁样机中的磁测机机械结构

Fig.2 A photograph showing mechanical structure of the SSRF storage ring dipole magnet measurement coil

3 数据采集系统^[3]

我们建立的磁测机是利用 PC 机结合测量线圈、高精度数字积分仪、高性能 4 轴步进电机控制卡、高稳定度电源、直流电流传感器、6 位半数字电压表、通用接口总线(GPIB)接口卡、高精度编码器和软件等组成 SSRF 高精度磁场测量系统,其硬件结构如图 3 所示。数字积分器采用瑞士 Metrolab 公司的双通道数字积分器 PDI5025, 线圈感生信号进入积分器先进行电压频率转换再到计数器进行积分, 其最好的分辨率为 $10 \times 10^{-8} \text{ Vs}$ 。系统中的高精度积分仪、数字电压表等通过 PCI-GPIB 卡接入 PC 机, 采用美国 NI 公司 PCI-ValueMotion 步进马达控制卡来完成系统平台高精度定位控制。两个平台的驱动马达都装有高精度旋转编码器, 从采集来的计数值可知道两个平台是否同步。如果不同步的值超过系统允许的范围, 测量程序将中止执行。磁铁电源采用丹麦 Danfysik 公司 S Y S T E M 8 0 0 0 电源, 电流稳定

度 8h 为 $\pm 3 \times 10^{-6}$, 由 Danfysik 公司 DCCT 采集送入 HP34401 数字电压表来监视其稳定度。

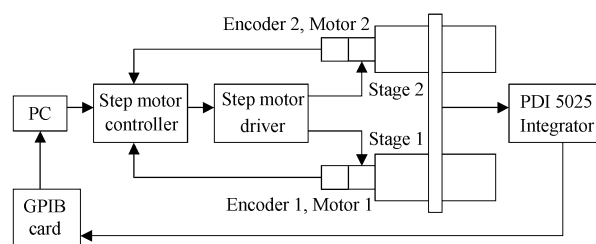


图 3 磁测机硬件结构图

Fig.3 Hardware composition of the magnetic measurement equipment

软件的编制采用 NI 公司的 LabVIEW 图形化编程平台进行开发, 平移长线圈磁测机主要编制的仪器驱动模块有: 高精度数字积分器、Danfysik 磁测电源、数字电压表和步进马达控制器; 测量数据处理模块有: 电流标准化循环、积分场质量测量、磁铁一致性测量、激磁特性测量、数据分析以及磁测界面等。

4 磁测结果

在完成平移长线圈磁测机组装和调试后, 我们对 SSRF 储存环二极磁铁样机进行了激磁特性和场误差分布的多次测量, 场误差分布曲线如图 4 所示。图 4 的条件为: $B_0 = 1.105 \text{ T}$, 好场区范围为 $x = \pm 40.3 \text{ mm}$ 。两次不同时间测量的场误差分布结果和重复精度如表 1 所示。

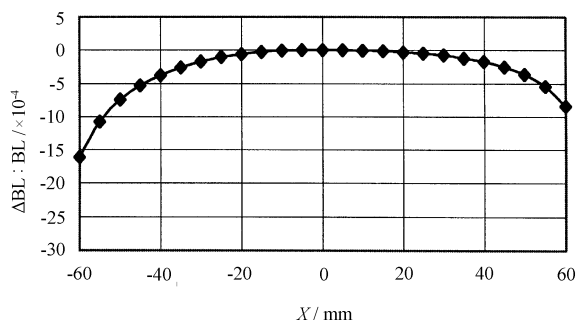


图 4 储存环二极磁铁样机场误差分布曲线

Fig.4 Distribution of the integral field error of the storage ring dipole magnet prototype

表 1 两次不同时间测量的储存环二极磁铁样机场误差分布结果和重复精度

Table 1 Results and precision of the integral field error measurement

x/mm	$\Delta \int B dl / \int B dl (\times 10^{-4})$ 激磁电流 690 安培) Current 690 A.)		场误差值的重复精度
	第 1 次测量(11 月 30 日)	第 2 次测量(12 月 4 日)	Precision / $\times 10^{-6}$
	First measurement	Second measurement	
-45	-5.31	-5.34	3.00
-40	-3.77	-3.81	4.00
-35	-2.59	-2.63	4.00
-30	-1.70	-1.74	4.00
-25	-1.03	-1.08	5.00
-20	-0.58	-0.59	1.00
-15	-0.24	-0.27	3.00
-10	-0.07	-0.09	2.00
-5	0.00	-0.02	2.00
0	0.00	0.00	0.00
5	0.02	-0.02	4.00
10	-0.04	-0.07	3.00
15	-0.15	-0.19	4.00
20	-0.32	-0.28	-4.00
25	-0.47	-0.48	1.00
30	-0.76	-0.76	0.00
35	-1.22	-1.14	-8.00
40	-1.73	-1.69	-4.00
45	-2.52	-2.48	-4.00

从表 1 和实验室多次测量的数据可以看出,对场误差值的重复测量精度好于设计指标($1. \times 10^{-4}$)。以上实验结果表明,此长线圈磁测机与国内外磁测实验室长线圈测量装置水平相当,且在定位灵活性上,更有自己的特点。

参考文献

1 ZHOU Q, CAO Z, SUN Y, *et al.* The magnet design of the SSRF storage ring and booster, IEEE Trans On Ap-plied Superconductivity, 2000, **10**, (1):256-259

2 ZHOU Q, CAO Z, SUN Y, *et al.* Design and measurement of the SSRF magnet prototypes. Second Asian Particle Accelerator Conference (APAC'01),THP034, 2001, Beijing

3 ZHANG Jidong, CAO Zan, REN Fanglin, *et al.* Design and fabrication of a rotating coil magnetic measurement system. Second Asian Particle Accelerator Conference (APAC'01), THP029, 2001, Beijing

Design and fabrication of a long coil magnetic measurement system

ZHANG Jidong CAO Zan REN Fanglin ZHOU Qiaogen ZHANG Lihua
LI Yu ZHAO Yubin YAN Heping

(Shanghai Institute of Nuclear Research ,the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A long coil magnetic measurement system has been built at SSRC to measure the storage ring dipole magnet prototypes of SSRF. The system consists of a 2.2 m long coil and a control system. The basic design concept is to build a reliable, precise and automatic measurement system for integral magnetic field measurement. A multi-function LabVIEW application program was developed on a personal computer main control unit, with Microsoft Windows 98/2000. Several personal computer slot interface cards communicate with, and control the various devices. The control system is designed to be versatile, modular, expandable, maintainable, quick and easily reconfigurable in both hardware and software. The system is accurate enough to characterize the magnetic field quality of the storage ring dipole magnet prototypes.

Key words Dipole magnets, Integral field, Moving long coil

CLC TM 936