

NSRL 二期工程波荡器磁场测量*

姚成贵, 贾启卡, 徐朝银, 卢绵凌, 刁操政

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘要:研制了一台二维自动磁场测量系统, 它包括测量行程为 3 500 mm 的运动定位装置和测量控制系统. 采用霍尔探头点测法, 并使用“on fly”测量技术对合肥国家同步辐射实验室(NSRL)二期工程新安装波荡器扫描点测量, 得到了波荡器场形分布测量结果, 并对测量结果进行了分析.

关键词:磁场测量; 霍尔探头; 波荡器

中图分类号:TL503.8 TM273

文献标识码:A

0 引言

国家同步辐射实验室(NSRL)二期工程的一个重要内容是在合肥电子储存环的直线段上安装一台新建波荡器(Undulator)以获取真空紫外到软 X 射线波段的可调谐、准单色的部分相干光.

该波荡器为纯永磁标准结构(或 Halbach 结构)^[1], 周期数 29, 周期长度为 92 mm, 每周期八块正方形截面的磁块, 总长为 2 668 mm. 波荡器是第三代同步辐射光源关键设备, 其磁场质量对光源的品质具有非常重要意义, 一个理想的波荡器磁场不仅要使其对电子束的扰动效应最小, 而且还要得到尽可能接近理想的高质量辐射谱. 因此要想波荡器获得理想的高质量磁场, 除了选择合适性能永磁块以外, 另外一项至关重要的工作就是根据每一块磁块的磁化强度矢量进行优化组合, 以确定每一磁块放置的磁化方向取向与在整个磁体中所排的位置. 由于波荡器整体结构制造工差和磁块粘接引起的误差, 波荡器磁场不可能按理论计算的磁块组合一蹴而就, 而是通过对波荡器积分磁场反复测量, 再根据测量结果多次对磁块进行调整优化, 最终获得较优化的波荡器积分场. 因此波荡器建造离不开磁场测量和磁场优化调整技术, 本文着重介绍波荡器磁场测量技术.

1 测量方法

新建波荡器采用霍尔探头点测法, 这种扫描式点测法可以直接了解局部磁场的情况, 它适用于波荡器磁块调整优化测量. 该波荡器工作间隙区间为 36 ~ 96 mm, 物理要求在此区间

* 收稿日期: 2002-12-01

基金项目: 国家大科学工程 NSRL 二期工程项目

作者简介: 姚成贵, 男, 1949 年生, 副研究员. 研究方向: 磁场测量方法与技术. E-mail: yaoeg@ustc.edu.cn

内磁场性能满足设计要求,因此磁块优化调整时,必须在这个区间内选择若干个磁场平面进行场积分测量,考虑磁场测量数据较多,测量工作量较大,测量系统使用“on fly”测量技术,所谓 on fly 测量,就是说让测量探头连续不停地运动,而测量数据获取可根据需要的步长进行采集,这种测量方式优点可以大大节省测量时间,提高测量效率。“on fly”测量关键技术是要实现读测量位置和即时位置的磁场采样要“同步”,为了解决这个问题,程序利用特斯拉计的触发功能,采用采样指令和读数指令分开方式,选择合适的运动速度和采样时间的时序分配,就能实现位置和磁场两仪器采样数据的同步统一。

2 测量系统

为测量波荡器磁场,国家同步辐射实验室二期工程专门研制了一台磁场测量系统,该测

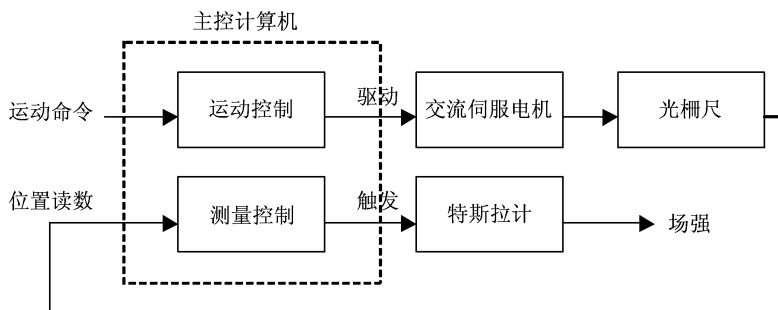


图1 测量控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of measurement control

量系统包括运动定位装置与测量控制及数据采集系统(图1)。测量运动定位装置(图2)由精密的直线运动导轨导向,z轴行程3500 mm,x轴行程400 mm,y轴行程200 mm,三方向均由滚珠丝杆传动,定位精度为0.01 mm。z轴和x轴为自动控制,y轴方向为手动。三方向位移都由光栅监测,光栅分辨率为0.01 mm。系统定位精度为0.01 mm。三维方向使用的光栅均经过高精度的双频激光干涉测长仪进行精确位置校对,该仪器的分辨率为0.001 mm。霍尔测磁仪器为新西兰生产的Group3-151-DG高斯计,霍尔探头为MPT-141,它的灵敏区面积为 $1 \times 0.5 \text{ mm}^2$,分辨率为0.05 Gs。为了保证磁场测量精度,该仪器采用了温度修正技术,克服霍尔探头测量磁场时易受温度影响的缺点,从而使得仪器测磁精度达到0.01%。测量控制系统由工控机、位置控制板和数据接口卡进行控制信息交换、数据采集和数据储存。

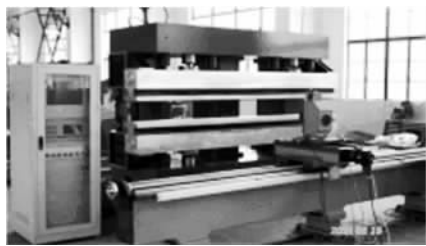


图2 测量运动装置

Fig. 2 Magnetic measurement facility

3 磁场测量和磁场优化调整

磁场测量分两步进行,首先进行磁场优化调整测量,待完成后,再进行磁场定型测量。磁场优化调整测量阶段,波荡器磁场间隙选择36 mm和96 mm两层并在轴向 $x = 0, \pm 15 \text{ mm}$ 处进行磁场积分测量,根据测量数据计算出该积分线一次积分和二次积分剩余场,磁场

优化就是要将这些剩余场降下来,以达到设计指标. 磁场优化调整是以积分场测量为基础,当测量发现波荡器磁场局部峰值有高低现象时,磁场调整就要根据磁场高低情况,结合单磁块磁场参数,对波荡器磁块位置编号分布进行调整或磁块更换,再进行对应的磁场测量,以分析磁块调整效果情况. 我们磁场优化调整工作重点放在力求降低波荡器一次积分和二次积分剩余场,以期波荡器在工作间隙为 36 ~ 96 mm 区间内,横向场在一定范围内一次积分和二次积分达到物理设计指标,位相误差未作特别调整. 经过几个月精心反复优化磁场和测量,终于得到在 60 mm 磁间隙变化范围内,主磁场一次积分值小于 $1 \text{ Gs} \cdot \text{m}$,二次积分值小于 $1 \text{ Gs} \cdot \text{m}^2$,位相误差为 3° 左右(详情另文待发表).

波荡器磁场定型测量内容:

1) 在磁间隙工作范围及最大磁间隙下,测量主磁场沿中心轴上的分布 $B_y(z)$; 由此计算出相应磁间隙下一次积分值、二次积分值、位相误差及磁间隙在工作范围下磁场峰值偏差.

2) 在磁间隙工作范围下,测量主磁场沿不同水平位置的偏轴上的分布 $B_y(x_i, z)$. 由此得到相应磁间隙下主磁场积分值在横向(x)上的变化即多极场分量.

3) 在磁间隙工作范围及最大磁间隙下,测量磁场水平分量沿中心轴上的分布 $B_x(z)$; 由此计算出相应磁间隙下一次积分值、二次积分值.

4) 在磁间隙工作范围下,测量磁场水平分量沿不同水平位置的偏轴上的分布 $B_x(x_i, z)$. 由此得到相应磁间隙下磁场水平分量积分值在横向(x)上的变化即斜多极场分量.

5) 在磁间隙工作范围下,测量磁场峰值强度及无量纲矢量势 K 随磁间隙的变化.

磁场积分值测量(第 1 ~ 4 项)采用“on fly”测量,其中磁间隙为 36 mm 主磁场测量时数据采集步长为 0.5 mm,行进速度 1.4 mm/s; 其它磁间隙数据采集步长均为 1 mm,行进速度 2.4 mm/s; 测量长度为 3 150 mm. 磁间隙工作范围取 36, 70 和 96 mm 三个间隙做代表性测量.

磁场积分值在横向(x)上的变化测量(第 2, 4 项) $B_y(x_i, z)$, 取 $x_i = 0, \pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20, \pm 25$ mm 11 条积分测量线; 对 $B_x(x_i, z)$ 取 $x_i = 0, \pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20$ mm 九条积分测量线.

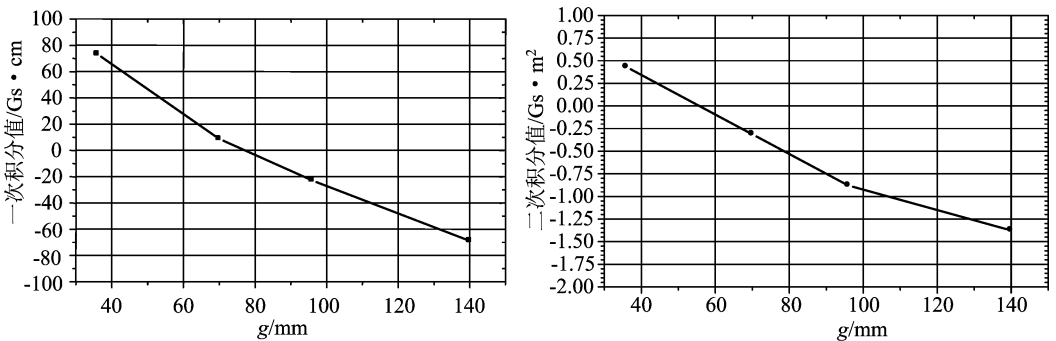


图 3 B_y 一、二次积分随磁间隙的变化

Fig. 3 B_y first and second field integrals as a function of undulator gaps

第 5 项测量按磁间隙每变化 5 mm 时,根据第 1 项测量结果选四个接近平均值的峰值点进行测量,然后取平均. 数据处理采用 Origin 程序. 测量分析测量结果(部分)见图 3.

4 测量结果及误差分析

为了保证波荡器磁场质量可靠性,磁场测量系统测量精度至关重要,为此我们对测量误差进行分析和计算,测量探头运动定位误差 σ_z 和磁场强度测量误差 σ_B 引起的磁场积分值误差,对于波荡器一次和二次积分场为

$$\begin{aligned}\sigma_{1,B} &= \sqrt{L\Delta z}\sigma_B, \quad \sigma_{1,z} = \pi \sqrt{\frac{2N}{n_z}}B_0\sigma_z \\ \sigma_I &= \frac{K}{0.934} \sqrt{\frac{2N}{n_z}} \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_B}{B_0}\right)^2 + \left(\frac{\pi\sigma_z}{\lambda_u}\right)^2} \quad (\text{T} \cdot \text{cm}) \\ \sigma_{II} &= \frac{L}{\sqrt{3}}\sigma_I \quad (\text{T} \cdot \text{cm}^2)\end{aligned}$$

其中 $L = n_z\Delta Z = \lambda_\mu N$, 测量长度; n_z , 测量点; ΔZ , 采样步长; λ_u , 周期长度; N , 周期数; $K = eBmck_n$ 是波荡器参数.

由测量数据得, $L = 315 \text{ cm}$, $\Delta z = 1 \text{ mm}$, $\sigma_z = 0.01 \text{ mm}$, 和 $N = 29$, $\lambda_u = 92 \text{ mm}$, 得到, $\sigma_{1,B} = \sqrt{31.5 \cdot \sigma_B} (\text{Gs} \cdot \text{cm})$, $\sigma_{1,z} = 2.903 \cdot K (\text{Gs} \cdot \text{cm})$. $\sigma_{II} (\text{Gs} \cdot \text{m}^2) = 0.018 \sigma_I (\text{Gs} \cdot \text{cm})$.

若 $\sigma_B = 0.5$, $\sigma_z = 0.01 \text{ mm}$, $\sigma_I = 10 \text{Gs} \cdot \text{cm}$ 以下

温度影响: $\Delta I_I = \alpha\Delta T \cdot I$, $\Delta II = \alpha\Delta T \cdot II$

I 表示一次积分值, II 表示二次积分值. $\alpha = -0.0011$, α 是永磁块温度系数,但测量仪器采用了温度修正技术因而测量受到温度影响较小.

本底影响: $\Delta I = L\Delta B$, $\Delta II = L^2\Delta B/2$.

$\Delta I (\text{Gs} \cdot \text{cm}) = 315\Delta B (\text{Gs})$; $\Delta II (\text{Gs} \cdot \text{m}^2) = 4.96\Delta B (\text{Gs})$

若测量本底 $\Delta B = 0.1 \text{Gs}$, 则 $\Delta I (\text{Gs} \cdot \text{cm}) = 31.5 (\text{Gs} \cdot \text{cm})$. 因此本底对测量误差影响较大. 针对测量仪器本底对测量误差影响较大的情况,我们采用每次测量前将霍尔探头“远离”测量磁场,移置某个固定位置,用零磁场套管套住霍尔探头,屏蔽外界干扰场,然后将测磁仪器清零. 经此处理,使得波荡器磁场一次积分测量精度达到 $\pm 20 (\text{Gs} \cdot \text{cm})$.

5 结论

作为实验室二期工程的子项目,建立了一台二维自动的波荡器磁场测量装置并使用“on fly”测量技术,测量结果表明该测量装置与方法是成功的,达到了要求的测量精度,完成了 NSRL 二期工程新建波荡器磁场调整优化测量任务. 波荡器磁场测量是分辨它的残余场,因此它是一项精密的磁场测量,若测量采用点测法要求测量系统定位精度高,测磁仪器分辨率高. 为此今后值得改进的地方有:测量机床制造和控制系统配置使得测量系统工作稳定,定位精度更高;为了提高测量工作效率,波荡器测量采用点测法和线圈法并用为最佳.

参 考 文 献

- [1] Mark S, *et al.* Insertion device magnet measurements for the advanced light source[A]. IEEE PAC[C],1993, 1575.
- [2] Hwang C S, *et al.* Advanced field-measurement method with three orthogonal Hall probes for an elliptically polarizing undulator[J]. J. Synchrotron Radiation,1998,5: 471.
- [3] Jia Qi-Ka. Field integrals error of undulator [J]. Nucl. Instr. And Methods, 1999, A 428: 589.
- [4] Humphries D, *et al.* Modeling and measurement of the ALS undulator end magnetic structures[A]. IEEE PAC[C], 1993, 1581.

Magnetic Field Measurement System for the Undulator of NSRL Phase II Project

YAO Cheng-gui, JIA Qi-ka, XU Chao-yin, LU Mian-ling, DIAO Cao-zheng

(*National Synchrotron Radiation Laboratory, USTC, Hefei 230029, China*)

Abstract: A Hall probe magnetic field measurement device is used to measure the undulator of NSRL Phase II Project, and it can be used to conduct “on fly” measurement of the magnetic field. A two-dimensional auto-measurement system has been developed, which includes a machine tool with a motion range of 3 500 mm, and a control system. The distribution of the undulator field is obtained by Hall probe scans to measure the undulator, and the results are analyzed.

Key words: magnetic measurement; Hall probe; undulator