

文章编号: 1001-4322(2003)09-0923-04

CHG-SRFEL 光学速调管磁极间隙全闭环控制系统*

陈 念, 李煜辉, 李 格, 徐宏亮, 贾启卡, 卢绵凌, 何多慧

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘 要: 描述了 CHG-SRFEL 光学速调管磁极间隙全闭环控制系统的原理, 给出了系统硬件结构和软件设计。可独立或同步调节光学速调管调制段、色散段及辐射段磁极间隙的大小, 分辨率达到 $20\mu\text{m}$, 精度达到 $5\mu\text{m}$ 。通过改进系统位置监测设备, 可进一步提高分辨率及精度。系统已经在光学速调管磁场测量、垫补中使用, 具有精度高、安全性高、操作方便等特点。

关键词: 储存环相干谐波自由电子激光; 光学速调管; 磁极间隙; 全闭环控制系统

中图分类号: TL594; TN24

文献标识码: A

合肥国家同步辐射实验室(NSRL)正在开展储存环相干谐波自由电子激光(CHG-SRFEL)研究, 储存环自由电子激光^[1]以其高质量、可工作于较短波长而成为目前世界上自由电子激光研究的热点之一, 在紫外至 X 射线的短波段内占有非常重要的地位, 被视为最有希望的新一代光源^[2~4]。现有储存环上的直线段较短, 因此一般采用光学速调管结构来提高增益, 同时使用谐波产生技术, 进一步扩展其短波范围。

光学速调管由三部分组成: 两段波荡器中间夹一段较强的单周期磁场, 分别称为调制段、色散段和辐射段。主体机械结构有基座、支架、减速装置、滚珠丝杠、滑块、上下梁、磁铁槽、磁铁盒等几部分。基座为 $2.0\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.25\text{m}$ 的箱体; 三个支架独立与基座连接, 分别支撑调制段、色散段和辐射段; 调制段和辐射段各有两根精密滚珠丝杠和三条滑动导轨, 色散段有一根滚珠丝杠和三条滑动导轨; 上下梁固定在滚珠丝杠的可动滑块上, 磁铁槽固定在上下梁上, 磁铁盒按顺序排列在磁铁槽中。电机通过减速装置驱动滚珠丝杠, 当滚珠丝杠转动时上下梁向相反方向运动, 磁极间隙改变。光栅尺读数头与光栅尺体分别安装在下梁与静止部件上, 来记录磁极间隙的变化量, 因此磁极间隙变化量是光栅尺读数的 2 倍。

光学速调管磁极间隙的调节在整个 CHG-SRFEL 实验中具有比较重要的地位^[5]。磁极间隙的大小决定着磁场强度的大小, 决定着光学速调管的各种参数。为了使光学速调管达到最佳的工作状态, 从而产生较强的相干谐波辐射, 要求磁极间隙的定位要准确、快速、方便、安全。光学速调管磁极间隙全闭环控制系统就是基于这样的要求设计的, 下面给出该控制系统的硬件结构和软件设计。

光学速调管磁极间隙在满足场强要求的同时, 应该保证电子束在储存环真空室内有足够可用的空间, 根据储存环物理计算, 并留有余地, 真空室竖直孔径为 26mm 。加上真空室壁厚、机械加工精度以及抽真空后可能引起的形变, 最小磁极间隙为 34mm , 谐波实验中为 40mm 。考虑到安装及使用上的方便, 不进行实验时磁极间隙可拉开最大至 140mm , 以减少磁体所受的辐射和磁场对束流的影响。因此, 光学速调管磁极间隙全闭环控制系统可调节磁极间隙的范围为 $40 \sim 140\text{mm}$ 。

1 光学速调管磁极间隙全闭环控制系统硬件结构

光学速调管三段的磁极间隙控制具有完全相同的硬件结构, 因此以其中一段为例, 如图 1 所示。整个硬件结构包括控制计算机、交流伺服驱动器、交流伺服电机、光学速调管、光栅尺、限位开关等。控制计算机上共有三个板卡, 分别为 PCL-832(三轴伺服电机控制卡)、PCF1760(8 通道隔离数字量输入和 8 通道继电器输出卡)、PCF1K304(三轴光栅尺四倍频计数卡)。其中 PCL-832 卡、交流伺服驱动器和交流伺服电机构成动力部分; 光栅尺、PCF1K304 卡和限位开关构成位置监测部分; PCF1760 卡起到电机开关、判断限位开关状态及复位限位开关的作用。

光学速调管磁极间隙全闭环控制系统的基本思想是: 动力部分驱动光学速调管磁极间隙变化, 同时, 位置

* 收稿日期: 2003-01-04; 修订日期: 2003-05-06

基金项目: 国家 973 前期预研专项基金资助课题(2001CCB01000); 深紫外自由电子激光研究项目资助课题; 安徽省自然科学基金资助课题(01046202)。

作者简介: 陈 念(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为加速器物理和自由电子激光技术; 合肥 6022 信箱。

监测部分获取磁极间隙实际变化量,当实际变化量到达预定目标时,动力部分停止工作。全闭环控制系统消除了机械空回、非线性传动等机械误差对控制精度的影响,控制精度仅仅取决于位置监测部分的精度。控制分辨率 = $2 \times$ 光栅尺栅距/光栅尺计数卡倍频数,控制精度 = $2 \times$ 光栅尺精度/光栅尺计数卡倍频数。

实际中使用栅距为 $40\mu\text{m}$ 、精度为 $\pm 10\mu\text{m}$ 的光栅尺和 4 倍频光栅尺计数卡,分辨率达到 $20\mu\text{m}$,精度达到 $\pm 5\mu\text{m}$ 。通过对光栅尺和光栅尺计数卡的选择可以进一步提高分辨率和控制精度,如果使用栅距为 $10\mu\text{m}$ 、精度为 $\pm 2\mu\text{m}$ 的光栅尺和 20 倍频光栅尺计数卡,分辨率可达到 $1.0\mu\text{m}$ 、控制精度达到 $0.2\mu\text{m}$ 。

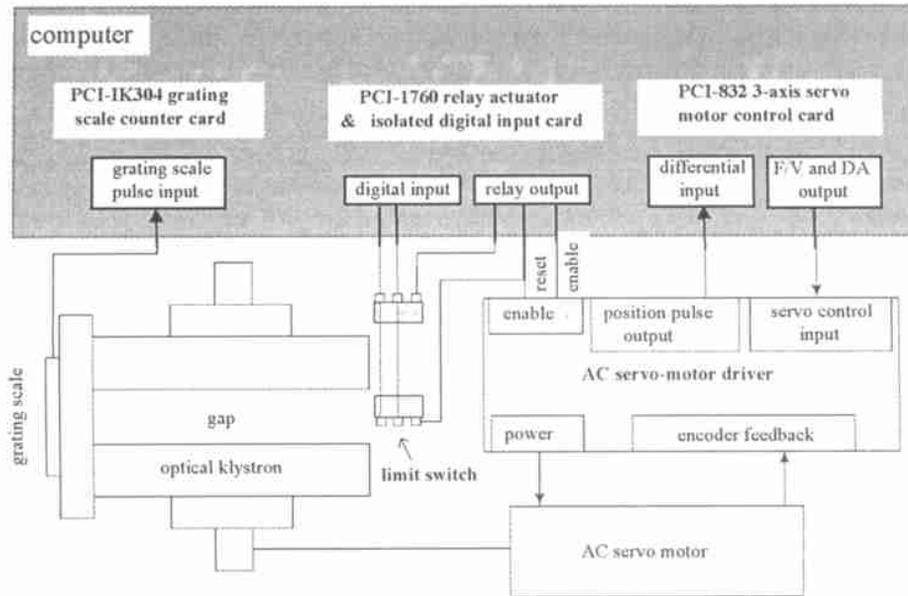


Fig. 1 Hardware construction of the close-loop control system

图 1 光学速调管磁极间隙全闭环控制系统硬件结构图

1.1 系统动力部分

光学速调管磁极间隙全闭环控制系统的动力部分具体组成设备为:研华 PCL-832 三轴伺服电机控制卡、凯奇 SD02 型交流伺服驱动器和凯奇 SM02 型交流伺服电机。PCL-832 卡使用数字微分分析(Digital Differential Analysis 简称 DDA)技术实现比例式半闭环位置控制。每个轴都有独立的集成电路,可以完全独立控制三个伺服电机。特殊同步电路使三轴可以同步运行。其工作原理见文献[6]。由于采用了全闭环控制系统,实际操作中使用的是 PCL-832 卡的速度控制功能。通过给 DDA 周期不同的 DDA 脉冲数控制电机的转速。PCL-832 卡通过 ISA 总线接收计算机发送的位置请求命令,输出可控电压信号驱动交流伺服驱动器,伺服电机的速度与该电压的大小成正比,方向由该电压的正负决定。这样,通过计算机向 PCL-832 发送连续的位置控制命令,就可以驱动伺服电机连续运转,磁极间隙也相应地改变。交流伺服电机的参数为:额定电流 3.6A,额定电压 165V,额定转矩 2NM,最大转速 2 000r/min。

1.2 系统位置监测部分

光学速调管磁极间隙全闭环控制系统位置监测部分的具体组成设备为:中国科学院长春光机所生产的 SGC 数显光栅尺和北京中科恒业中自技术有限公司生产的 PCF1K304 三轴光栅尺四倍频计数卡、限位开关等。当光学速调管磁极间隙变化时,光栅尺输出方波(或正弦波)信号,周期等于光栅尺的栅距,PCF1K304 卡对该信号四倍频后计数,计算机可以读取该计数值 n ,那么磁极间隙实际变化量就为 $n/2$ 个光栅尺栅距长度。同时 PCF1K304 具有过零计数功能,即光栅尺通过绝对零点后再计数,这样就能够校对磁极间隙的绝对大小。限位开关的作用是为了监测磁极间隙是否到达极限值,可以保护电子储存环真空室等外部设备不被破坏。限位开关有三个接点,分别为公共点、常规闭合点和常规断开点。当限位开关关闭时,常规闭合点断开而常规断开点闭合。光栅尺的参数为:栅距 0.04mm (25 线对/mm),精度 $\pm 0.01\text{mm}$,量程 300mm ,输出信号为 5V 方波信号,间隔 200mm 设有 ABS 绝对零点坐标。

1.3 电机开关、限位开关状态判断及限位开关复位

件限位开关等多重保护。控制精度及分辨率取决于光栅尺和光栅尺计数卡,分辨率达到 $20\mu\text{m}$,精度达到 $5\mu\text{m}$,并且可以进一步提高。该系统已经在光学速调管磁场垫补、测量^[9]中使用,将用于储存环相干谐波自由电子激光实验中。

参考文献:

- [1] Poole M. Linac-based free electron lasers[J]. *Science*, 1996, **272**: 467—471.
- [2] O'Shea P G, Freund H P. Free-electron lasers: status and applications[J]. *Science*, 2001, **292**: 1853—1858.
- [3] Milton S V, Gluskin E, Arnold N D, et al. Exponential gain and saturation of a self-amplified spontaneous emission free-electron laser[J]. *Science*, 2001, **292**: 2037—2041.
- [4] Yu L H, Babzien M, Ben-Zvi I, et al. High-gain harmonic-generation free-electron laser[J]. *Science*, 2000, **289**: 932—934.
- [5] 陈念,徐宏亮,刘金英,等. 储存环相干谐波自由电子激光器新光学速调管工作状态分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6): 524—528. (Chen N, Xu H L, Liu J Y, et al. Working condition of reconstructed optical klystron of CHG-SRFEL. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6): 524—528)
- [6] 李志锋,陈子辰. 基于 PC 总线工控机的平面磨床数控系统硬件设计与实现[J]. 机电工程, (2): 26—28. (Li Z F, Chen Z C. Design and realization on hardware of A NC system based on PC - BUS IPC for surface grinding machine[J]. *MEEM*, 1999, (2): 26—28)
- [7] 胡焰,何多慧,徐宏亮,等. 基于 PC 的光学速调管色散段磁极间隙调节系统[J]. 核技术, 1999, **22**(3): 157—159. (Hu Y, He D H, Xu H L, et al. A magnetic pole gap adjusting system of transverse optical klystron dispersive section based on PC. *Nuclear Techniques*, 1999, **22**(3): 157—159)
- [8] 李格,王勇,刘金英,等. 用于自由电子激光的光学速调管的设计与测试[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(2): 164—168. (Li G, Wang Y, Liu J Y, et al. Design and measurements of the optical klystron for FEL. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2): 164—168)
- [9] 陈念,徐宏亮,刘金英,等. 光学速调管改造后辐射段磁场垫补和测量[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(4): 401—404. (Chen N, Xu H L, Liu J Y, et al. Magnetic field shimming and measurement of radiator of reconstructed optical klystron. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(4): 401—404)

Close-loop control system of the optical klystron magnetic gap of CHG-SRFEL

CHEN Nian, LI Yu-hui, LI Ge, XU Hong-liang, JIA Qi-ka, LU Mian-ling, HE Duo-hui

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China,
P. O. Box 6002, Hefei 230029, China)

Abstract: This paper gives a description of the principle of the magnetic gap control system of the optical klystron for the coherent harmonic generation storage-ring free-electron laser in the National Synchrotron Radiation Laboratory. The hardware construction and software flowchart are illustrated for reliably engineering implementation of the system. The three parts of optical klystron, modulator, dispersive section and radiator can be adjusted separately or simultaneously, and the resolution can reach $20\mu\text{m}$ and the precision $5\mu\text{m}$. By means of optimizing the position monitoring instrument of the system, the resolution and the precision can be improved to $1.0\mu\text{m}$ and $0.2\mu\text{m}$ respectively. The vacuum chamber of the storage ring between the optical klystron is free of destruction by multi-protection system. Such system has been employed in the measuring and shimming of the optical klystron magnetic field.

Key words: Coherent harmonic generation storage-ring free-electron laser (CHG-SRFEL); Optical klystron; Magnetic field; Close-loop control system