

CNIC-01193

IAE-0174

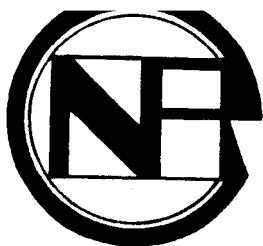
中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

同步辐射自由电子激光光学速调管研制

STUDIES AND CONSTRUCTION OF AN OPTICAL
KLYSTRON FOR SYNCHROTRON RADIATION FEL

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目(CIP)数据

中国核科技报告 CNIC-01193 IAE-0174:同步辐射
自由电子激光光学速调管研制/马佑梧等著. —北京:原子
能出版社,1997.9

ISBN 7-5022-1730-4

I. 中… I. 马… III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 18139 号

©原子能出版社,1997

原子能出版社出版发行

责任编辑:孙凤春

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

印刷厂印刷 新华书店经销

开本 787×1092mm 1/16·印张 1 字数 20 千字

1997 年 9 月北京第一版·1997 年 9 月北京第一次印刷

定价:5.00 元



马佑梧：中国原子能科学研究院研究员，1961年毕业于北京大学技术物理系。

Ma Youwu; Professor of China Institute of Atomic Energy. Graduated from Department of Technical Physics of Peking University in 1961.

CNIC-01193

IAE-0174

同步辐射自由电子激光光学速调管研制

马佑梧 刘波 吕玉珠 张兆明
张凤鸣 张立杰 崔宗渭

(中国原子能科学研究院,北京)

摘 要

报告了一同步辐射自由电子激光光学速调管的研制情况。此装置已应用在中国科技大学国家同步辐射实验室的储存环上进行同步辐射自由电子激光相干辐射的研究。装置具有光学速调管以及均匀波荡器两种工作模式,已用于短波长相干谐波辐射自由电子激光的研究,以期得到紫外(UV)、真空紫外(VUV)和软 X 射线波段的相干光源,也用于产生高亮度同步辐射光。光学速调管由三段组成:调制段、色散段和增益段。装置的主要技术性能为:在磁气隙 $g=40$ mm 时,磁场幅值 $B_0=0.30$ T 和 $B_0=0.70$ T(色散段),磁场幅值均方根偏差小于 1.0%。磁场一、二次积分值小于 0.005 T·cm 和 0.04 T·cm²。

Studies and Construction of an Optical Klystron for Synchrotron Radiation FEL

(In Chinese)

MA Youwu LIU Bo LU Yuzhu ZHANG Zhaoming
ZHANG Fengming ZHANG Lijie CHUI Zhongwei
(China Institute of Atomic Energy, Beijing)

ABSTRACT

The study and construction of an optical klystron is reported. The optical klystron will be installed at the store ring of National Laboratory of Synchrotron Radiation in University of Science and Technology of China (USTC) for carrying out the studies of synchrotron radiation free electron laser. This device has two working modes: (1) optical klystron, (2) normal SR undulator. For the first mode the coherent light can be got during the UV, VUV and soft X wave band. For the second mode, the device serves as a normal undulator and the synchrotron radiation of high brightness can be got. The optical klystron consist of three sections: modulation section, dispersive section and gain section. When $gap = 40$ mm, the average peak field is $B_0 = 0.30$ T in modulation and gain section, $B_0 = 0.70$ T in dispersive section. The RMS deviation of peak fields is within 1.0%. The 1st and 2nd fields integral at the exit of the optical klystron is 0.005 T · cm and 0.04 T · cm².

引言

由于同步辐射储存环中的电子束具有一些很好的束流品质,因此同步辐射储存环可成为短波长、高增益自由电子激光(FEL)的驱动源。为开展此方面的研究,中国科技大学(USTC)国家同步辐射实验室(NSRL)计划在其储存环上的一有限长度直线段上进行同步辐射自由电子激光(SR-FEL)实验工作。然而此实验计划的关键项目在于建造一台将安装于储存环上一有限长度直线段上的光学速调管。中国原子能科学研究院电物理激光研究所承担了为中国科技大学国家同步辐射实验室研制一台永磁光学速调管(Optical Klystron)的任务。

光学速调管由三段组成:调制段、色散段和增益段(见图1)。调制段和增益段具有相同的结构,两段之间插入色散段,色散段具有比调制段和增益段更高的磁场峰值。在调制段电子束与光场发生相互作用产生能量调制,当电子束通过色散段后,能量调制变为密度调制,即发生聚束,使相干辐射增强,从而提高了增益。

在光学速调管的设计中考虑了SR-FEL研究与SR应用相兼容的问题,因此装置设计成可更换的结构。装置可分别以Optical Klystron和普通的SR波荡器两种模式工作。当工作于Optical Klystron方式时,可得到紫外(UV),真空紫外(VUV)和软X射线波段的相干光源。当工作于普通的SR波荡器模式时,作为储存环上的一个插入元件又可获得高亮度同步辐射光。所以此光学速调管达到了一器二用的功能。

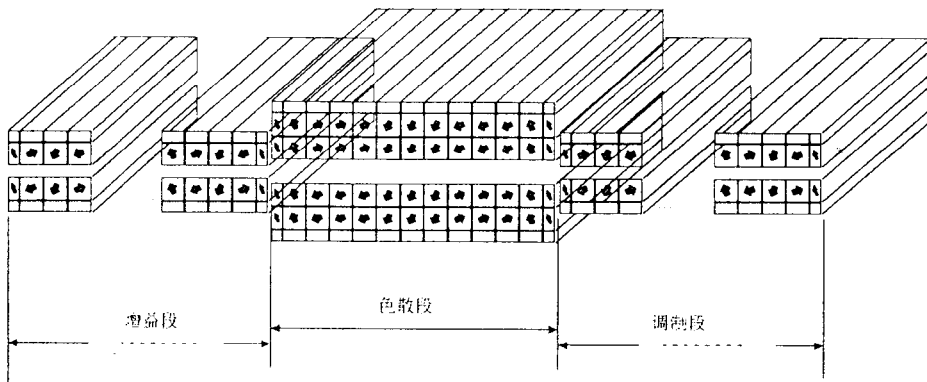


图1 永磁光学速调管组成示意图

1 基本要求

依据同步辐射自由电子激光物理工作方案,对所要研制的光学速调管提出如下要求:

• 结构及永磁铁的要求:

结构形式	Halbach 纯永磁结构
永磁材料	NdFeB(N35)
磁铁单元尺寸	18 mm×18 mm×50 mm

剩磁场	$B_r = 1.18 \sim 1.2 \text{ T}$
矫顽力	$H_c = 11.0 \sim 11.5 \text{ kOe}, 1\text{Oe} \triangleq (1000/4\pi)\text{A/m}$

• 磁场特性要求:

磁场峰值	$B_0 = 0.3 \text{ T}$ (调制段、增益段间隙 $g = 40 \text{ mm}$ 时) $B_0 = 0.5 \sim 0.7 \text{ T}$ (色散段间隙 $g = 40 \text{ mm}$ 时)
磁场周期	$\lambda = 72 \text{ mm}$ (调制段、增益段) $\lambda = 216 \text{ mm}$ (色散段)
周期数	$N = 12$ (调制段、增益段) $N = 1$ (色散段)
磁场工作气隙	$g = 40 \text{ mm}$ (25~150 mm 可调)
磁场峰值误差	$\pm 1.0\%$ (调制段、增益段间隙 $g = 40 \text{ mm}$ 时)
出口磁场一次积分	$0.005 \text{ T} \cdot \text{cm}$
出口磁场二次积分	$0.05 \text{ T} \cdot \text{cm}^2$

2 光学速调管的磁场设计

光学速调管的研制要满足三个方面的要求:第一、由不同气隙和周期组合的多段光学速调管在气隙与周期之比值(g/λ)较大时,要获得更高的场强和磁场均匀性。第二、光学速调管多段组合时有较高精度的工艺要求。第三、多层磁体粘结与装配后要求能够经受强大的磁场排斥力。

2.1 提高磁场峰值的设计考虑

对于 Halbach 结构的永磁光学速调管在磁中心轴上的磁场峰值为:

$$B_0 = 1.8B_r(1 - e^{-2\pi h/\lambda})e^{-\pi g/\lambda}$$

根据上述光学速调管的基本参数要求,可得出调制段 $B_0 = 0.3 \text{ T}$ 时, $g/\lambda = 0.556$; 色散段 $B_0 = 0.7 \text{ T}$ 时, $g/\lambda = 0.185$, 与国际上一些同类装置相比较我们的这一装置的研制是具有一定难度的。

由上面公式,光学速调管中心轴上磁场峰值是与周期(λ),磁铁单元的几何尺寸(h)及磁性能(B_r)有关。当周期长度及几何尺寸确定不可再变化后,唯一可选择的参量只有永磁铁单元的磁性能即:剩磁场 B_r 和矫顽力 H_c 。对于 N35 型的 NdFeB 永磁材料 $B_r = (1.17 \sim 1.20) \text{ T}$, $H_c = (11.0 \sim 11.5) \text{ kOe}$, 如 B_r 和 H_c 都能达到上限值,利用 PANDIRA 程序进行磁场数值计算可知 B_0 接近 0.3 T 。但实际上是很难实现的,因为生产一批量永磁材料,它的剩磁场 B_r 和磁化方向角的分散性大约分别为 3% 和 3° 。

计算表明:选择 B_r 和 H_c 值差别不大的永磁材料可以提高 B_0 值。另外,依据 B_r 以及磁化方向角的分散性进行磁块排列位置的优化,也可以提高 B_0 值。为此将具有较大 B_r 值的磁块排列在 90° 或 270° 方位,具有较小 B_r 值的磁块排列在 0° 或 180° 方位。又根据计算,若垂直取向的磁块的 B_r 值提高 3% , 磁场峰值 B_0 将增大 $0.7\% \sim 1.0\%$ 。

磁块尺寸公差也是使 B_0 减小的因素之一,当高度和宽度公差为 -0.1 mm 时, B_0 将减小 0.12% 。因此,我们限定磁块尺寸公差为 0.05 mm 。

2.2 磁场均匀性设计考虑

光学速调管磁极纵向长约 2000 mm, 横向尺寸 100 mm。每个磁极都是由 2 块 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的小磁块对接而成为 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的大磁块。因而需要尺寸为 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的磁块共 528 块。我们制造了 700 块这样的永磁铁。经过性能测试, 它们的 B_r 值分散性为 3%, 磁化方向角的分散性为 3° 。将数百块具有不同 B_r 值以及磁化方向角的磁块排列在横向和纵向位置上, 除了要克服它们之间的强大磁场排斥力之外, 更重要的是保证横向和纵向方向的磁场均匀性。我们用模拟退火优化技术 (Simulated Annealing Technique) 对磁块的位置进行优化组合排列, 明显改善了磁场的均匀性和电子轨迹的偏离。

磁块优化组合和排列的基础源于单块磁体的磁性能。为此, 在单块磁铁的两端, 距离其平面 $g=20\text{ mm}$ 处, 沿纵向轴测量了磁场垂直分量 B_z 的分布, 测量示意图和磁场分布如图 2 所示。

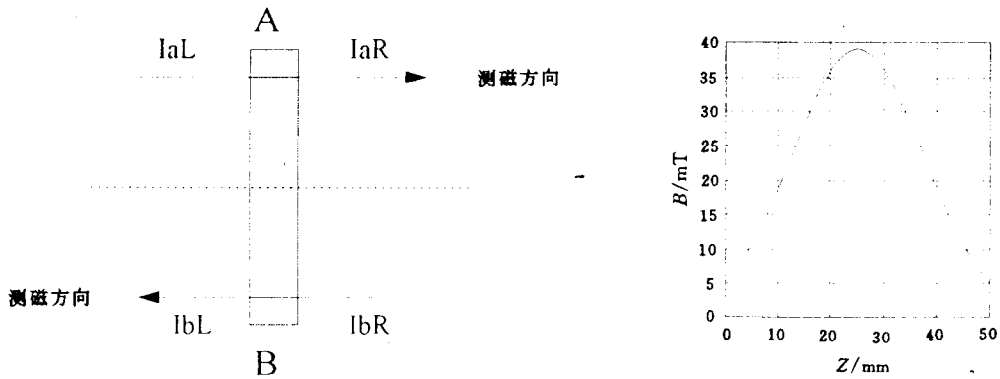


图 2 单块磁铁的磁场测量示意和磁场 B_z 分布

对于 700 块磁块中的每一块, 均可得到如图所示的四个区域的磁场积分值: I_{aL} , I_{aR} , I_{bL} 及 I_{bR} 。其值与磁块的 B_r 及磁化方向有关。小磁块粘接成大磁块的粘接原则是使得粘接在一起的两磁块磁化方向的偏离程度尽量一致, 且在总体上尽量均匀地分布。根据测量得到的 I_{aL} , I_{aR} , I_{bL} 及 I_{bR} , 利用我们自己的程序, 确定了每对磁块的粘接方式。

把对接好的 100 mm 磁铁对粘结在铝盒中, 需要粘结四种取向的形式, 如图 3 所示, 分别为 O、I、HL 和 HR。

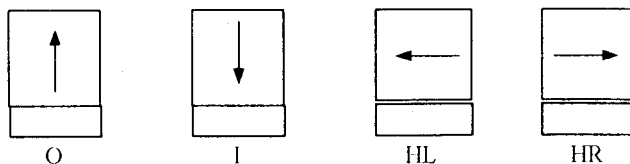


图 3 磁块在铝盒中的四种粘接型式

根据磁场计算和误差分析,为提高磁场峰值和磁场均匀性,按照下列原则选择磁铁并分别粘接成 O、I、H 的形式:

- (1) 将具有较大 B_z 值和积分值 $[Bds]$ 的磁铁对选为 O 和 I 的形式,从而可提高磁场峰值。
- (2) 对于垂直取向的磁铁(磁化方向为 90° 或 270° 与上下磁极相对应),选取磁块使其安装以后磁化方向偏差互为同向。因为当它们磁化方向偏差同向时,将会减小磁场误差。
- (3) 对于彼此相邻近的垂直取向的磁铁(90° 或 270°),则选取磁块使其安装以后磁化方向偏差互为反向。因为当它们的磁化方向偏差为反向时,磁场误差减小。
- (4) 对于水平取向的磁铁,选取磁块使其安装以后上、下、左、右相邻的磁块磁化方向偏差互为同向,这样可产生较小的磁场误差。

2.3 模拟退火法优化磁块位置

按上述原则将磁铁对分类后,用模拟退火优化方法确定了各磁块的在光学速调管中的最佳位置,从而保证磁场的一、二次积分值,即电子轨迹的偏离尽可能小。在用模拟退火优化方法进行光学速调管磁铁的优化组合中,成本函数的选择是很重要的。成本函数的选择有多

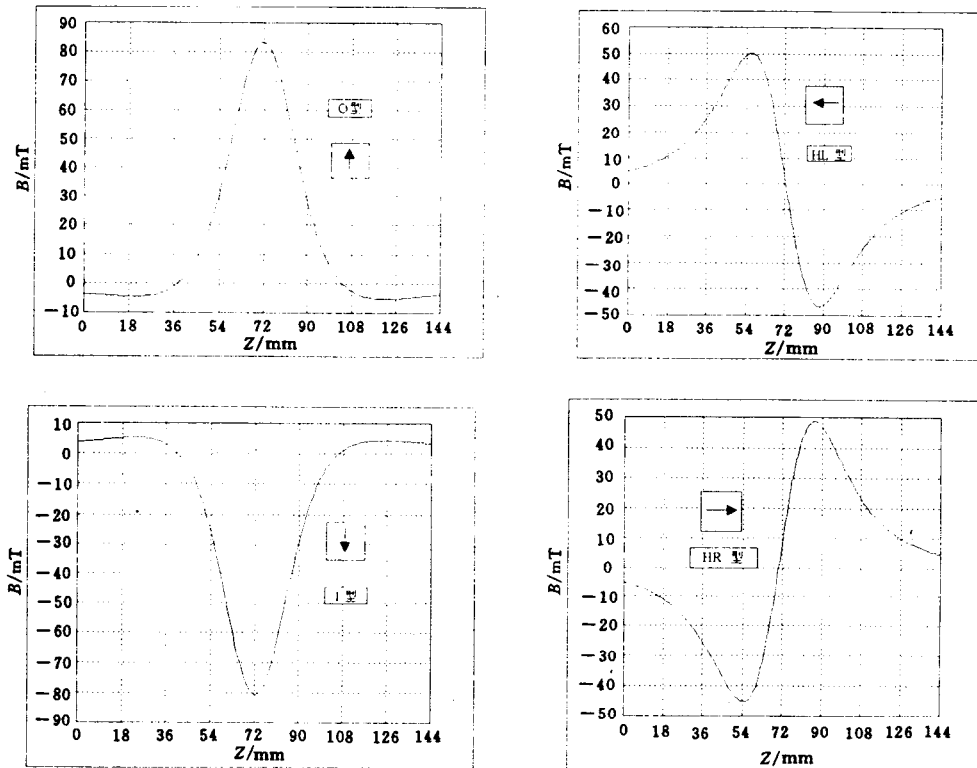


图 4 测得的 O、I、HL、HR 四种磁铁的磁场分布

种途径,可以用每块磁铁磁化强度的三个坐标分量来构成加权的成本函数。也可以依据实际测得的磁块的磁场分布来构造成本函数。我们选用的是后者来建立优化成本函数,因为它更能精确测量,并且直接模拟电子轨迹。首先我们用类似于图 2 的方法,对 100 mm 长的磁铁在距其平面 $g=20$ mm 的位置,沿横向中心线测量了 O,I,HL 和 HR 四种类型磁铁对的磁场分布,如图 4 所示:

根据上述四种类型的每一块磁铁的磁场分布 $B_i(Z)$,依据均匀磁化原理,从而求得光学速调管在中心轴线上的磁场分布,从而可得到电子轨迹的方向偏离和位置偏离。选择 $B_i(Z)$ 二次积分曲线峰值在每一段上的误差作为优化的成本函数(或称目标函数)。显然目标值与第 i 块磁铁在光学速调管中所处的位置有关。

利用模拟退火优化技术,用 C 语言编写了一磁块位置优化的计算程序。求得成本函数接近于最小值的磁块排列方案以及该方案下的磁场一、二次积分。图 5 给出了优化前后的磁场分布和磁场的一、二次积分结果。可以看到优化后磁场性能有明显的改善。

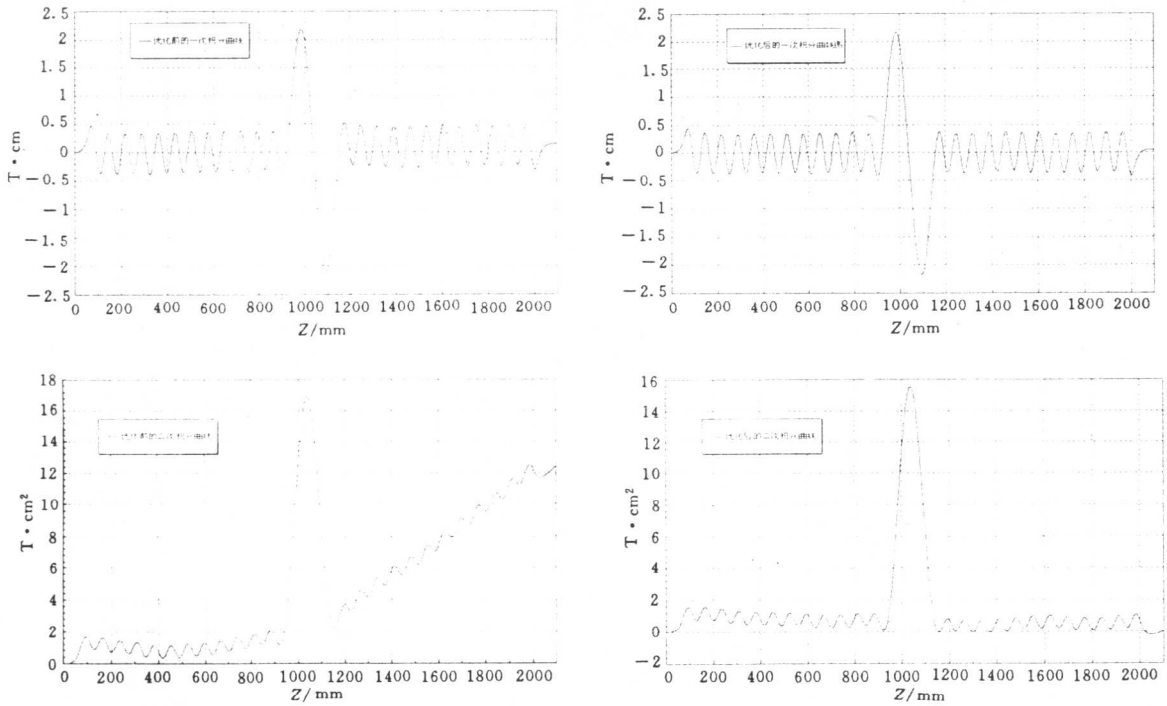


图 5 优化前后的磁场一、二次积分结果

3 光学速调管机械结构及工艺

3.1 主体结构

图 6 是整个光学速调管的照片。

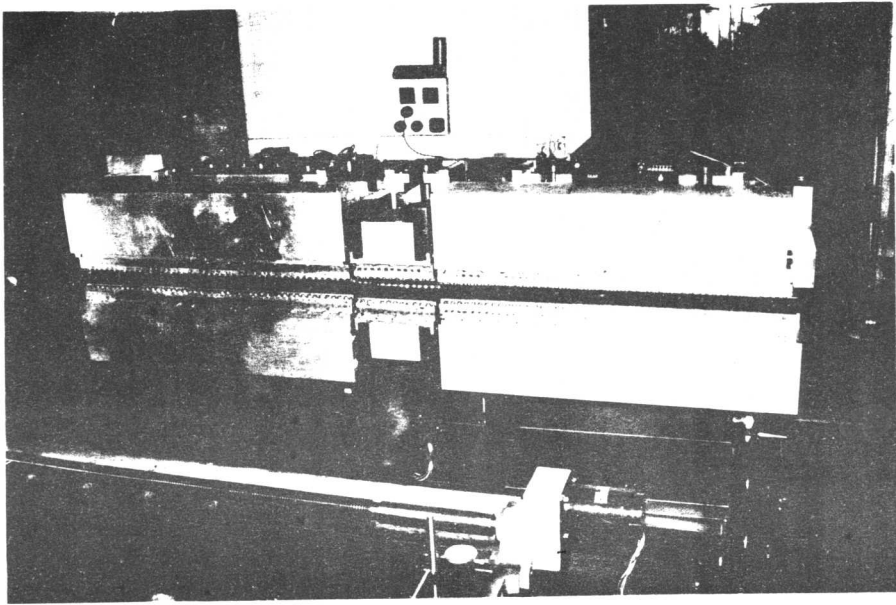


图6 光学速调管照片

基座为 $2000\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 的框体,本身带有升降高度的调节机构。支架分为三段,分别支撑调制段、色散段和增益段。它们独立与基座连接,各段支架都带有上下左右方向的调节机构。调制段和增益段的支架是一样的,尺寸为 $864\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 900\text{ mm}$,每段有两根精密滚珠丝杠和三条滑动导轨,保证上下梁传动和定位的精度。色散段支架尺寸为 $216\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 900\text{ mm}$,其带有一根滚珠丝杠和三条滑动导轨。

上下梁由硬铝合金加工,固定在滚珠丝杠的可动滑块上,当丝杠转动时上下梁向相反方向运动。由此改变磁气隙。

磁铁槽直接固定在上下梁上。为了便于更换磁块,可以从支架的一侧拆卸。磁铁盒按顺序排列在磁铁槽中,每一个磁铁独立固定,因此可以独立调节每一个磁铁盒的磁气隙。

调制段和增益段的磁气隙调节为手动,色散段的调节设计为可与计算机相连从而实现自动控制。传动机构为减速箱(减速比 $60:1$)和直齿轮(减速比 $47:12$),总的减速比为 $235:1$ 。考虑磁场力和自重因素,磁极受力小于 2000 kg 。因此,选用 $90\text{BF}002$ 的步进马达已足够。

滚珠丝杠行程误差为 $5\text{ }\mu\text{m}/160\text{ mm}$ 。滚珠丝杠的装配采用定位轴承,外加套筒、锁紧和微调结构,保证安装和传动的精度。联接在滚珠丝杠上的滑动块,受到三个方向的滑动导轨的定位,其结构简单、造价低、定位精度高。在三个方向上的滑动变化量均小于 0.05 mm 。滚珠丝杠的行程可以使磁气隙在 $25\text{ mm} \sim 150\text{ mm}$ 范围内调节。

调制段和增益段的磁气隙为手动调节,调节量由深度游标卡尺指示。色散段的磁气隙为

自动调节,调节量由光栅尺测量数显表指示,并可与计算机相接构成自动控制系统。

在总体结构安装后,在没有磁力作用的情况下测量了三段的磁气隙在纵向(长 863 mm)和横向(宽 100 mm)的平行度及上下极移动的同步精度。精度好于 0.02~0.04 mm。说明机械设计和工艺结构是合理的。

3.2 磁块的粘接

光学速调管要求磁极宽 100 mm,色散段的磁铁为双层结构高度为 36 mm,但实际可加工的磁块尺寸为 18 mm×18 mm×50 mm,满足不了上述宽 100 mm,高 36 mm 的要求。因此要求将长为 50 mm 的两块磁铁粘接为 100 mm,将高度只有 18 mm 的磁铁粘接为 36 mm。不管是在长度方向和高度方向的粘接,由于磁块的磁化方向相互平行。因此,它们之间的排斥力非常大,给粘结工艺带来很大困难。我们分两步粘接,较好地解决了粘接工艺问题。

第一步,将 18 mm×18 mm×50 mm 的磁铁两端对接为 18 mm×18 mm×100 mm 磁铁对,用专门的模具保证粘接的机械精度(垂直度,水平度)和强度。粘接时选用 502 快干胶,大约 60 s 即可固化。

第二步,将 18 mm×18 mm×100 mm 的磁铁对粘结在磁铁盒内,粘接胶选用环氧树脂胶,固化温度 50°C,8h 即可固化成型。将双层磁铁粘接在磁铁盒内。它们之间的磁排斥力将比单层更大。因此粘接的难度和危险性更大。必需精心设计粘接模具、粘接工艺过程及胶层的厚度等。

3.3 磁铁的安装

将粘接好的磁铁盒按顺序安装在磁铁槽内,由于它们之间的取向不同,相互之间的磁场作用力也不相同,即使同一取向的磁铁当它与相邻磁铁的位置不同时,受力情况也不完全一样,包括力的大小和方向都可能相反。因为磁铁间的受力情况相当复杂,在垂直方向既有拉力和推力,在水平方向又受到力矩的作用。因此,按顺序安装每一块磁铁时,要特别小心它的受力情况,采取必要的预防措施。我们在垂直方向和水平方向安装带有推力作用的限位板,较好地解决了磁铁的安装问题。

3.4 总体装配和准直

光学速调管的调制段,色散段和增益段各自固定在基座上。首先,在没有磁力作用下测试了各段磁气隙的平行度和开合时上下极移动的同步性。由测试结果可以得到:

- (1) 在不同气隙时,沿纵向 860 mm 范围内,磁气隙偏差小于 0.05 mm,在横向 100 mm 范围内,磁气隙偏差小于 0.02 mm。
- (2) 在不同磁气隙时,上下磁极开合运动后各段两端纵向磁气隙偏差小于 0.04 mm,横向磁气隙偏差小于 0.02 mm。
- (3) 对于色散段,采用自动控制调节磁气隙,由光栅尺和数量表得到的读数与千分表的测量值完全一致。经过上述测试后,把各段的磁气隙统一调到 40 mm,利用每段的准直靶,分段对中准直,使得三段的中心线与基准线相重合,基准线由准直望远镜和水平经纬仪预先设置。

4 光学速调管磁场测量和调整

4.1 测量仪器和方法

光学速调管总体装配后,我们用 1991 年研制成功的自动磁场测量系统测试光学速调管

的磁性能。自动测量系统的传动导轨轴向移动距离为 1700 mm,而光学速调管总长大于 2100 mm,因此只能采用分两段进行测量,中间进行数据连接的办法。分两段测量时,应保持对中准直线不变,保持测量接合点的磁场不变,为此,我们选择与磁场峰值相应的轴向位置作为接合点,接合“0”点是由数显表和千分表同时存储记忆。测量系统的精度为 3×10^{-4} ,定位精度 0.005 mm。测量步长 1 mm。

4.2 测量内容

根据光学速调管的设计要求,对光学速调管的磁性能进行了六项内容的测试。包括:

- (1) 在磁中心线上(0,0,Z)测量磁场垂直分量 B_z 沿轴向 Z 的分布 $B_z(Z)$,由此计算磁场的一次和二次积分,即电子轨迹的横向散角和偏离。
- (2) 在横向平面上(X,0,Z),测量 $B_z(X,0,Z)$,由此计算磁场一、二次积分,即电子轨迹的横向散角和偏离。
- (3) 在调制段和色散段测量磁场峰值与气隙变化的关系。
- (4) 在不同峰值处,测量 B_0 沿横向(X)的分布,计算横向均匀度和均匀区的大小。
- (5) 在磁中心线上,调制段和增益段的气隙 $g=40$ mm,改变色散段的气隙 g 测量 $B_z(g,z)$ 的分布。由此计算激光增益。
- (6) 以单层色散段替换双层色散段,测量 $B_z(X,Y,Z)$ 沿纵向的分布。

4.3 光学速调管的磁场调整

在调制段和增益段的磁气隙 g 都为 40 mm,色散段的磁气隙 $g=55$ mm,每段之间的距离为 12 mm 时,测量了磁场分布 $B_z(0,0,Z)$ 。图 7 给出了测得的场值 B_z 、磁场一次积分和二次积分的分布。这是安装后未经任何调整得到的测量结果。其中磁场峰值 $B_0=0.30$ T,磁场峰值均方根误差为 $\pm 0.6\%$ 。磁场一次积分值为 0.037 T·cm。磁场二次积分值为 0.72 T·cm²。上述结果除二次积分值稍为偏大外,其余均达到原设计指标。说明我们的物理设计,磁块优化方法及工艺过程是成功的。虽然在光学速调管终端处的二次积分值偏大,但在光学速调管全长 2100 mm 范围内二次积分曲线没有大的起伏,说明在每个周期内的积分值也近似为零。这样大大减轻了磁场调整和垫补的工作量。

磁场调整和垫补采用两种方法:第一种方法是减小相应峰值处向磁气隙,增大该处的磁场峰值。第二种方法是用硅钢片垫补法。在相应的磁场峰值处,粘贴厚 0.3 mm、宽 20 mm、长 100 mm 的硅钢片,通过磁化原理,改变该处的磁场峰值。磁场峰值增减的大小与被调整的一、二次积分值的大小、位置有关。对个别周期的磁场峰值进行适量的调整,即可得到较好的结果。图 8 是经过调整和垫补后测量的磁场分布和磁场一、二次积分结果。磁场峰值 B_0 为 0.296 T,磁场误差为 $\pm 0.8\%$,磁场一次积分值为 0.004 T·cm,磁场二次积分值为 0.02 T·cm²。

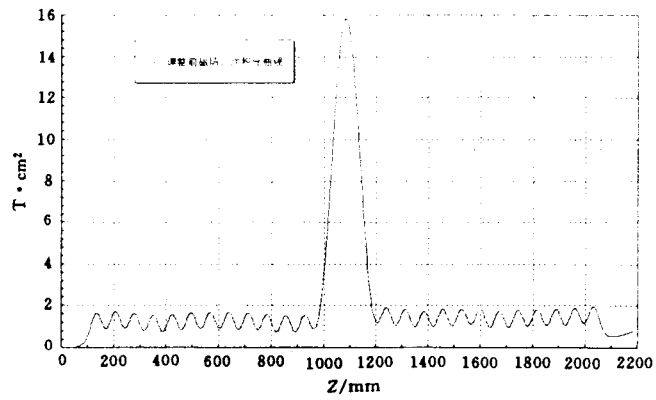
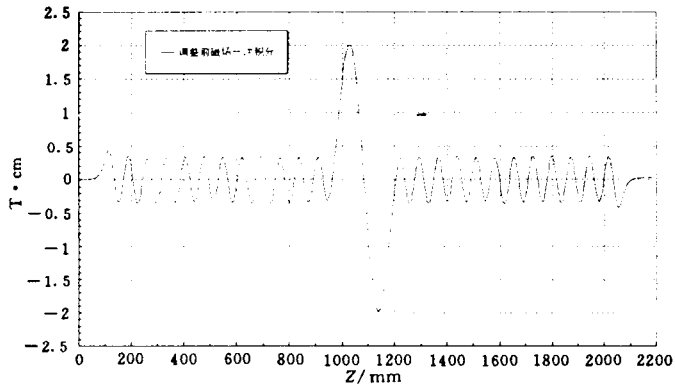
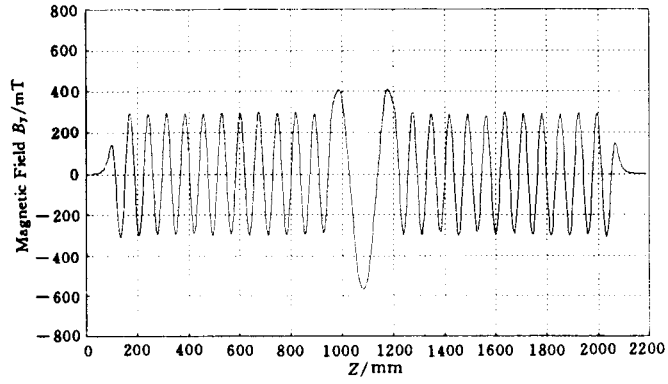


图7 调整前测量的光学速调管磁场值、一次积分及二次积分

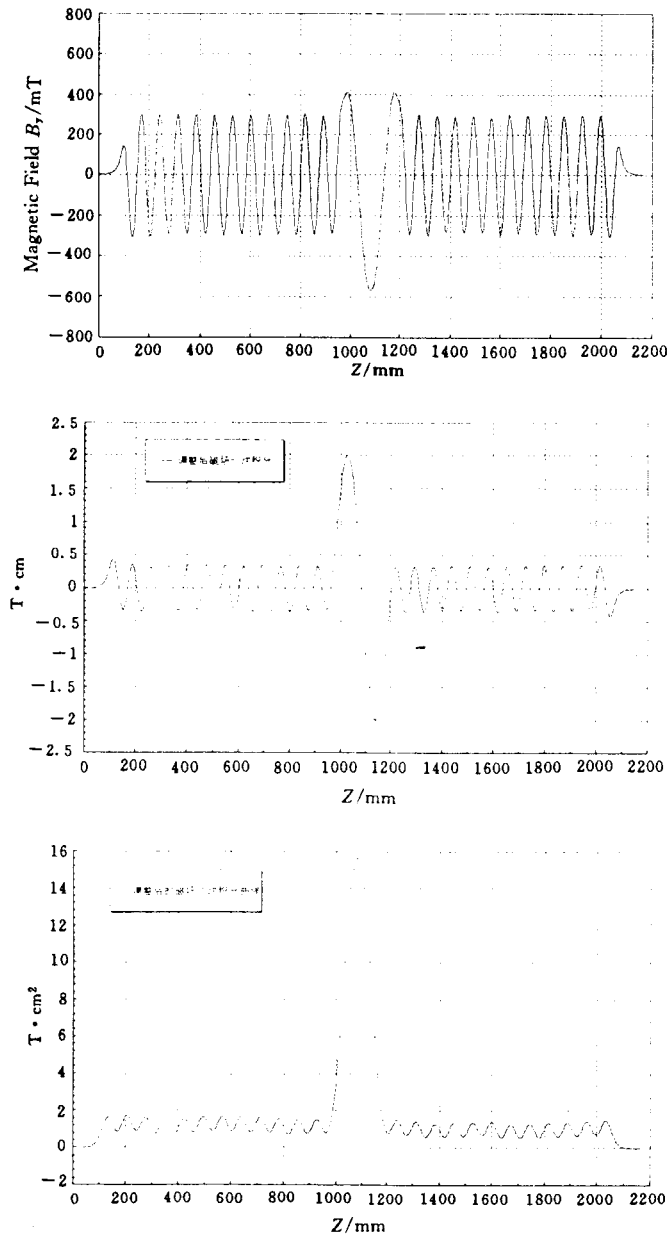


图 8 调整后测得的光学速调管磁场值、一次积分及二次积分

在横向平面,在不同 X 坐标上测量了 $B_z(X, 0, Z)$ 的分布。由此得到的二次积分结果如图 9 所示。当偏离中心轴为 ± 5 mm 时,二次积分的值分别为 $2.69 \text{ T} \cdot \text{cm}^2$ 和 $0.45 \text{ T} \cdot \text{cm}^2$ 。这说明,对于非中心入射的电子完全能够通过光学速调管。

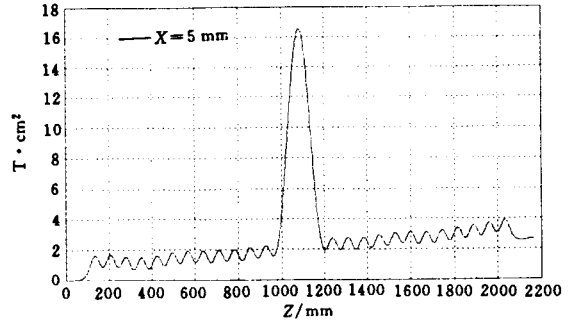
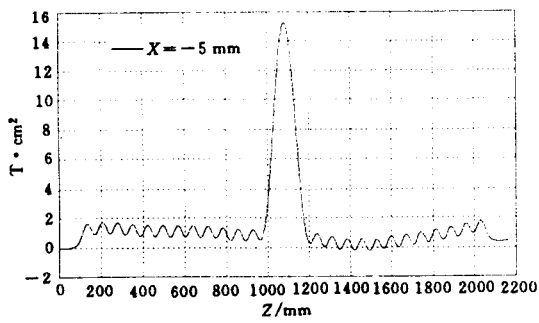
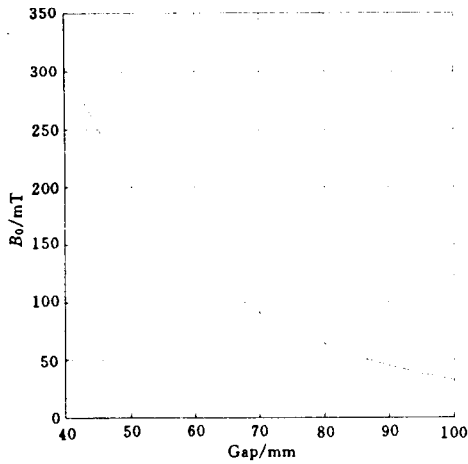
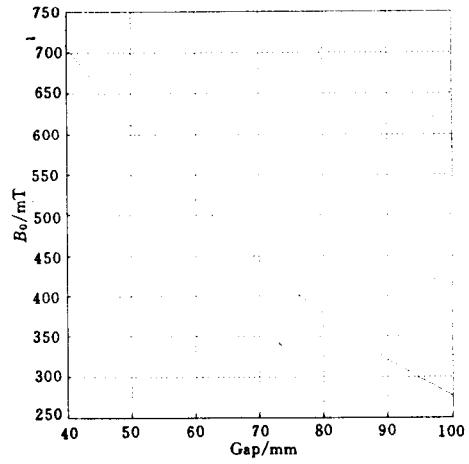


图9 非中心轴上的磁场二次积分图

对于调整好的光学速调管,当改变磁气隙 g 时,磁场峰值 B_0 随气隙的变化如图 10 所示。在工作气隙 $g=40$ mm 时, $B_0=0.30$ T(调制段)和 $B_0=0.70$ T(色散段),两者均达到设计指标。



(a) 增益段



(b) 色散段

图 10 磁场峰值 B_0 随气隙的变化

磁场 B_0 在横向坐标(X 向)的分布如图 11 所示。

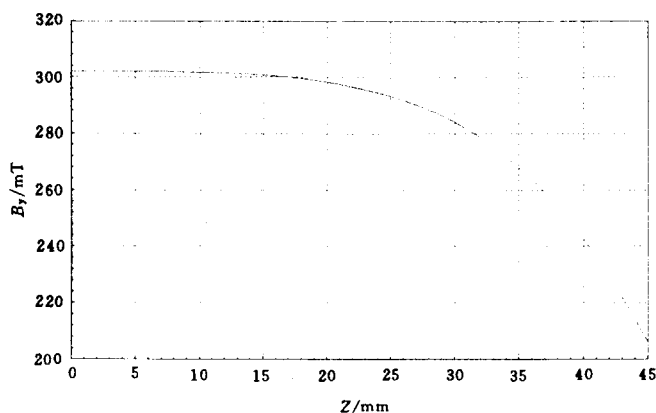


图 11 磁场峰值 B_z 随纵向 Z 的变化曲线

对于调制段磁气隙 $g=40$ mm, 当 $X=9$ mm 时, 磁场均匀度为 $6.6 \times 10^{-4} \sim 2.6 \times 10^{-3}$, 当 $X=21$ mm 时, 磁场均匀度为 $0.8\% \sim 1.47\%$ 。对于双层色散段磁气隙 $g=55$ mm, 当 $X=9$ mm 和 $X=21$ mm 时, 磁场均匀度分别为 0.24% 和 3.85% 。当电子束通过光学速调管的调制段和色散段时, 它的横向振荡振幅分别为 0.1 mm 和 3 mm ($E=150$ MeV)。因此, 上述磁场均匀区和均匀度能够满足电子束运动的要求。

5 结论

中国科技大学国家同步辐射实验室, 在中国首次开展同步辐射储存环自由电子激光的研究。我们为此所研制的是中国首台 SR-FEL 光学速调管。在该装置的研制中综合考虑了各种影响光学速调管磁场峰值与分布的因素, 使光学速调管的磁场性能达到如下指标:

磁场幅值	$B_0=0.296$ T(调制段); $B_0=0.707$ T(色散段)
磁场幅值误差	$\pm(0.6 \sim 0.8)\%$
磁场一次积分误差	0.004 T · cm
磁场二次积分误差	$-0.02 \sim 0.05$ T · cm ²
电子轨迹偏差	$-0.004 \sim -0.01$ mm
磁场横向均匀度	0.26% ($X=9$ mm)

参 考 文 献

- 1 贾启卡. 用非对称光学速调管的相干谐波自由电子激光. 强激光与粒子束, 1994, 6(3): 450
- 2 杨震华. 合肥电子储存环光学速调管计算. 强激光与粒子束, 1995, 7(3): 409
- 3 Yamazaki T. Design of 6.3 m Optical Klystron for a Storage Ring Ultraviolet Free Electron Laser. Nuclear Instruments and Methods, 1992 A318. 142~147
- 4 Couprie M E. Optimization of Permanent Magnet Optical Klystron for the Super-ACO Storage Ring Free Electron Laser. Nuclear Instruments and Methods, 1989, A278. 788~806
- 5 Yokoyama. Study on the Storage Ring NIJI-IV with an Optical Klystron. Nuclear Instruments and Methods, 1993 A331. ABS34~39
- 6 马佑梧等. Research of A Hybrid Undulator. 中国核科技报告(英文版), CNIC-00994, 1995
- 7 刘波等. A Magnetic Field Measurement System for Undulator. 中国核科技报告(英文版), CNIC-00785, 1993