

## 红外自由电子激光谐振腔的准直安装

王巍, 李笑, 罗涛, 陈佳鑫, 李和廷, 何晓业\*

中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029

**摘要** 基于可调谐红外激光的能源化学研究大型实验装置的核心器件是两套自由电子激光振荡器,能够产生覆盖 2.5~200.0  $\mu\text{m}$  波长范围的连续可调的中红外和远红外激光光谱。每套振荡器包括一个波荡器、一对由位姿可调的镀金球面反射镜和真空室构成的谐振腔以及三个 POP-IN 探测器。在准直过程中,需要保证波荡器磁中心、金属球面反射镜轴心和电子束流中心线达到很高的共轴精度以实现激光的饱和输出。为了实现波荡器束流的监测,需要通过准直的手段保证反射镜的光可以通过三个由步进电机控制的 POP-IN 上的直径为 1 mm 的小孔。采用激光跟踪仪配合光电自准直仪,对谐振腔进行了准直,谐振腔反射镜的横向倾斜度小于 50  $\mu\text{rad}$ , 横向离轴偏差小于 0.1 mm。使用激光跟踪仪结合准直望远镜,实现三个 POP-IN 的工作点位置与电子束流中心线共轴,共轴精度为 0.15 mm,并通过激光器搭建在线准直系统,将真空外准直激光照射到腔体内部以调节反射镜姿态。开展了离线标定实验和现场安装,红外自由电子激光装置的顺利出光证明所提方案是可行且可靠的。

**关键词** 测量; 红外自由电子激光; 谐振腔; 准直安装; 自准直仪; 激光跟踪仪

**中图分类号** P258

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.2304003

## 1 引言

按照与电子作用的光场来源,自由电子激光可以分为放大器、自放大自发辐射和振荡器三种工作模式,其中振荡器自由电子激光产生于电子束在波荡器中的自发辐射,光场在谐振腔内多次反射,不断积累放大直至饱和。基于可调谐红外激光的能源化学研究大型实验装置(FELiChEM,文中简称 IR-FEL)是一套覆盖中红外到远红外且波长连续可调的可调谐振荡器型红外自由电子激光光源,含有光检测、光解离、光激发三个面向能源化学基础研究的实验站,旨在解决能源材料化学发展的瓶颈问题。该光源利用一个 60 MeV 电子直线加速器产生驱动电子束团,在偏转磁铁的作用下,电子束分别通过中红外和远红外两套振荡器(由光学谐振腔和平面型波荡器组成),产生高功率的自由电子激光辐射,最终通过一套复杂的光束线系统传输到三个用户实验站<sup>[1-3]</sup>。

两套振荡器是该装置的核心器件,其重要功能是为三个实验站提供波长为 2.5~200.0  $\mu\text{m}$  的连续可调、准单色、高峰值功率的超短激光脉冲。其中,中红外振荡器负责提供 2.5~50.0  $\mu\text{m}$  超短激光脉冲,远红外振荡器负责提供 40~200  $\mu\text{m}$  超短激光脉冲。每套振荡器包括一个间隙可变的波荡器和一对镀金球面反射镜,在下游反射镜的中心有一个小孔用于自由电

子激光的引出,中红外振荡器和远红外振荡器相对镜面的距离为 5.04 m,即为谐振腔腔长。在准直过程中,需要保证波荡器磁中心、金属球面反射镜轴心和电子束达到很高的共轴精度以实现激光的饱和输出。为了对波荡器束流进行高精度检测,每套振荡器分别布设三个由高精度步进电机驱动的可伸缩 POP-IN 探测器。该探测器设计有两种工作模式:第一种模式是调节 POP-IN 靶,使束流撞击到靶面,产生的荧光经反射后从真空室出射,再被透镜成像到电荷耦合感光元件(CCD)上进行束流截面相关信息的分析。第二种模式是不断调节端靶,直到 CCD 看不到光斑,此时束流穿过靶中直径为 1 mm 的小孔。若反射镜反射的光是准直的,其也应通过 1 mm 小孔,即光腔反射的光与束流在一条准直线上,CCD 接收不到任何光信号;反之,若 CCD 上有光斑信号,则说明此时电子束与光束不在同一准直线上。在准直安装的过程中,三个 POP-IN 探测器被步进电机驱动,上游反射镜反射的光从小孔中出射并与束流线共轴<sup>[4-5]</sup>。

## 2 安装精度要求

受客观条件的限制,自由电子激光光源被放置于国家同步辐射实验室的 16.0 m $\times$ 10.0 m $\times$ 3.2 m 空间内。上下游反射镜和 POP-IN 的机械结构如图 1 所示。

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-02-28; 录用日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(21327901)、重要方向培育基金(WK2310000085)

通信作者: \*xyhe@ustc.edu.cn

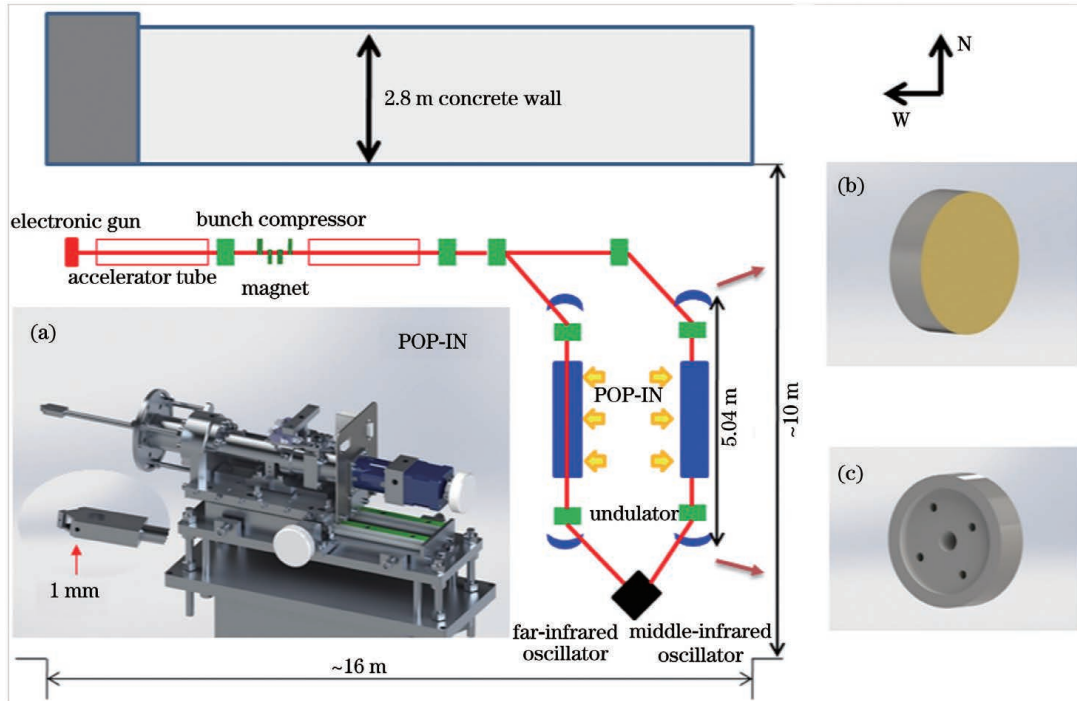


图 1 IR-FEL 的示意图。(a)POP-IN 探测器的结构示意图;(b)上游反射镜;(c)下游反射镜

Fig. 1 Schematics of IR-FEL. (a) Structural diagram of POP-IN detector; (b) upstream mirror; (c) downstream mirror

如图 1 所示,谐振腔镜之间的实线可以认为是电子束流中心线,它是自由电子激光物理设计中的一条理论线,利用机械设计图纸坐标将其导入到激光跟踪仪测量软件中,因此没有误差。在安装准直过程中,波荡器磁极中心轴线、真空室中心轴线、谐振腔镜轴线、POP-IN 轴线都以此理论线为参考线进行靠拢。在出光运行后电子束流中心线是实际存在的,由束流探测器确定其空间实际位置。

红外自由电子激光光源由两大物理系统组成:电子直线加速器(包括热阴极脉冲电子枪、加速系统、磁压缩系统等)和两套自由电子激光(FEL)振荡器。其中,电子直线加速系统的准直安装方法和精度要求与合肥光源基本相同,沿束流方向的横向定位精度优于 0.1 mm,纵向定位精度优于 0.15 mm,二极磁铁的纵向定位精度也优于 0.1 mm。在加速器物理中,横向的定义是垂直于束流前进方向的水平和垂直两个方向,纵向为束流前进的方向。采用激光跟踪仪布设控制网的方法进行准直安装,且由于该场地较小,跟踪仪三角高程的精度与光学水准仪的精度相当,不必进行专门的高程修正<sup>[6-7]</sup>。

整个准直安装工作的难点主要集中在谐振腔调控方面,特别是上下游反射镜及三个 POP-IN 探测器的调控。反射镜的镜面是由纯度较高的黄金镀膜而成的,质地较软,不能直接接触测量。在不同的工作波长下,到达反射镜上的光斑大小不同,因此为了满足大范围波长调谐的需要,下游腔内的反射镜需要根据工作波长选择合适的耦合孔尺寸,以实现激光输出最优。其中,中红外谐振腔下游有四个反射镜,对应不同尺寸

(1.0 mm/1.5 mm/2.5 mm/3.5 mm)的耦合孔;远红外谐振腔下游有三个反射镜,对应不同尺寸(1.0 mm/2.0 mm/4.0 mm)的耦合孔,通过一套磁控换镜装置来实现下游反射镜的替换。为了将三个 POP-IN 探测器安装到波荡器真空室内部,只能先通过预准直数据进行粗定位,再经过非接触测量进行精确定位<sup>[8-9]</sup>。

在红外自由电子激光装置设计阶段,用 Optical Propagation Code (OPC)程序进行数值模拟,其中光场在波荡器中与电子束相互作用的 FEL 过程是由 GENESIS 程序完成的。谐振腔的上下游反射镜放置在两个六自由度位移平台上,可以进行横向倾斜度的调节。反射镜倾斜度  $\theta_m$  与谐振腔光轴的倾斜角度  $\phi$  存在以下关系:

$$\phi = \frac{L_c^2 + 4z_r^2}{8z_r^2} \theta_m, \quad (1)$$

式中: $L_c$  为腔长; $z_r$  为瑞利长度。对于对称光腔,腔镜倾斜容忍度应使得

$$\theta_m \ll \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi L_c}} (1-g)^{1/4} (1+g)^{3/4}, \quad (2)$$

式中: $g$  为稳定性因子,由公式  $g = 1 - L_c/R$  定义,其中  $R$  为反射腔镜的曲率半径; $\lambda$  为工作波长。以中红外参数为例,由式(2)可得谐振腔的倾斜容忍度:当工作波长为 2.5  $\mu\text{m}$  时,  $\theta_m \ll 0.62$  mrad,对应的谐振腔倾斜角为  $\phi \ll 2.7$  mrad;当工作波长为 50  $\mu\text{m}$  时,  $\theta_m \ll 2.8$  mrad,对应的谐振腔倾斜角为  $\phi \ll 12.75$  mrad。

对腔镜横向倾斜度( $\phi_x$ )对输出 FEL 强度的影响进行数值模拟,结果如图 2 所示,其中横轴表示振荡的回程数。可以看出,谐振腔工作波长 2.5  $\mu\text{m}$  对腔镜

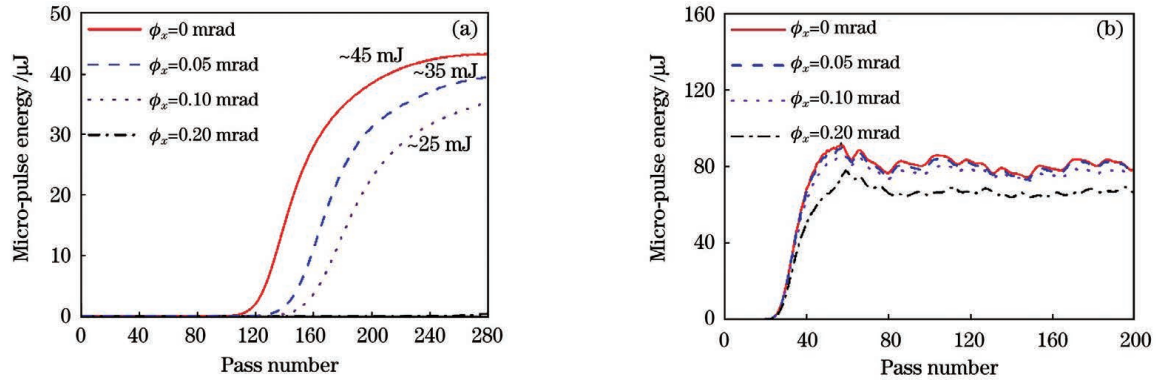


图 2 不同谐振腔工作波长下腔镜横向倾斜度对输出 FEL 强度的影响。(a)  $2.5 \mu\text{m}$ ; (b)  $50 \mu\text{m}$

Fig. 2 Influence of lateral tilt of cavity mirror on output FEL intensity under different working wavelengths of resonant cavity.

(a)  $2.5 \mu\text{m}$ ; (b)  $50 \mu\text{m}$

横向倾斜率更为敏感,谐振腔工作波长  $2.5 \mu\text{m}$  和  $50 \mu\text{m}$  下的数值结果也与解析分析结果吻合,故分别要求  $\theta_m \ll 0.05 \text{ mrad}$  和  $\theta_m \ll 0.2 \text{ mrad}$ 。综合解析结果和数值分析结果,要求中红外谐振腔的腔镜横向倾斜度小于  $0.05 \text{ mrad}$ ,即  $50 \mu\text{rad}$ 。同理,经过上述分析,远红外谐振腔的腔镜横向倾斜度要求小于  $0.3 \text{ mrad}$ ,即  $300 \mu\text{rad}$ <sup>[10]</sup>。

根据式(2)计算得到的结果满足一般光学谐振腔的要求,数值范围较宽。而基于 GENSIS 和 OPC 软件得到的模拟结果如图 2 所示,为了保证输出激光能量不发生明显下降,我们对腔镜倾斜角的要求更加严格。

上下游反射镜不但要保证相对倾斜度较小,还要保证其镜中心的轴线相对束流中心线的偏差值在要求的范围内,通过物理模拟分析,这个数值被要求小于  $0.1 \text{ mm}$ 。在实际的调节过程中,由于上下游反射镜下方有电控六自由度位移台可调,该数值可适当放宽到  $0.15 \text{ mm}$ ,出光后,基于实际束流位置,再将这个数值调节到  $0.10 \text{ mm}$  以内。倾斜角在出光前就被调节到指定范围内,否则可能会造成光束品质变差,影响后面调试工作的效率。

根据 POP-IN 探测器的准直安装要求,中红外谐振腔和远红外谐振腔三个 POP-IN 探测器的工作点位置、 $1 \text{ mm}$  小孔轴线与电子束流中心线的重合精度为  $0.15 \text{ mm}$ 。

### 3 准直安装方案

如前文所述,振荡器主要包括波荡器、波荡器真空室、上下游反射镜和 POP-IN 探测器。其中,波荡器的安装主要使用激光跟踪仪进行预准直和准直安装;波荡器真空室主要使用激光跟踪仪对两端法兰上的标记孔进行横向定位,使用光学水准仪进行高程方向的定位,其定位精度在笛卡儿坐标系的三个方向上都可以被控制在  $0.15 \text{ mm}$  以内。对于上下游反射镜和 POP-IN 探测器的预准直和准直安装,通过分析国内外相关

工程经验并结合具体工程实际,其过程主要包括以下两个步骤:1)将反射镜及其六自由度调节平台作为一个整体,使用激光跟踪仪对其进行预准直,在安装现场结合控制网进行准直安装,保证其粗安装空间定位精度在三个方向上分别优于  $0.2 \text{ mm}$ ;2)在粗安装完成后,使用光电自准直仪对其镜面的倾斜角度进行精确调节,使用准直望远镜对 POP-IN 探测器进行精确调节<sup>[8]</sup>。

#### 3.1 控制网的布设与波荡器、真空室的准直安装

考虑到整个加速器的布设空间较为狭窄,且波荡器和振荡器箱体的尺寸较大,后期安装通视性差,所以在控制网设计阶段网点布设较为密集,墙面控制网点分两层布设(分别距离地面  $1.2 \text{ m}$  和  $1.8 \text{ m}$ ,点与点之间的间距为  $1.5 \text{ m}$ ),地面控制网点沿墙布设,距离四周墙面  $0.2 \text{ m}$ ,点与点的间距为  $1.5 \text{ m}$ 。另外,根据建筑设计图纸,在机器未覆盖的地方,零星补充一些地面控制网点。墙面点与地面点的结构相同,只是尺寸略小,其布设方法是直接埋入墙体内部,墙面点和地面点的磁块均采用卡簧结构固定,在不用的时候将磁块取出<sup>[11]</sup>。波荡器由于经过长途跨国运输,在开箱后,我们使用激光跟踪仪对其进行校核,预准直数据基本保持不变,在笛卡儿坐标系下,预准直坐标数据与原厂提供的数据在  $xyz$  三个方向上的偏差均不超过  $0.02 \text{ mm}$ 。在进行三次严格复测后,采用国内的预准直数据作为安装数据<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 反射镜和 POP-IN 探测器的预准直与准直安装

上下游反射镜的旋转和平移由六自由度位移台进行控制,六自由度位移台被放置在一块大理石底座上,大理石底座上预先留好六个  $6 \text{ mm}$  直径的插销孔作为预准直靶点。在预准直过程中,基于大理石基座,反射镜的镜面和镜子中心构建元件坐标系,其中镜子中心是基于外轮廓测量拟合得到的,在这里基于激光跟踪仪的定位只是粗定位,精度并不高。POP-IN 探测器在出厂的时候用关节臂作过标定,即通过步进电机移动不同步长,确定定位固定插销孔与位移插销孔的空间位置关系,从而检核其运动直线度和位移精度等。

在安装的过程中,我们只需要用到其初始零位和最大行程的标定值:初始零位为探测头完全抽回的状态,可用于粗定位安装;最大行程位置为探测头工作点位置,在后面精确调节的时候,要保证该状态下探测头上 1 mm 的孔与光束轴线共轴。使用激光跟踪仪恢复控制网,通过反射靶球的空间定位将上述设备粗定位后,基于光电自准直仪和准直望远镜进行精确调节<sup>[13-15]</sup>。

由于大理石基座、六自由度位移台和反射镜是机械硬连接,在大理石基座粗定位完成后,反射镜在空间中的实际位置也很接近理论位置,通过激光跟踪仪配合 0.5 inch(1 inch=2.54 cm)靶球测量装夹反射镜机械结构,可以实现优于 0.15 mm 的空间定位精度,后面再通过带光调节到 0.10 mm。

对其角度调节采用光电自准直仪,本方案主要使用的数字内调焦电子自准直仪的视场范围为 0.5°,自准直测量精度为 1"。为了确保测量的精度可靠,我们使用高精度转台对其进行检核,该转台的转动精度为 0.33",通过测试,该自准直仪的角度测量精度能够达到标称精度。

为了验证光电自准直调节方案,在正式安装之前,按照设计距离进行了离线实验调节。该球面镜的曲率较大,与平面无异,曲面不影响角度测量;下游反射镜的背面是一个中心带圆孔的平面,实验证明中心带圆

孔不影响其测量。

在反射镜的准直安装之前,首先将光电自准直仪自身的轴线定位到光束轴同轴位置上,即对光电自准直仪及其机械调节机构进行预准直,在调节机构的周围粘上一些临时靶座,通过激光跟踪仪确定光电自准直仪的圆管和靶座位置关系。再通过这些靶座,基于控制网,使用激光跟踪仪进行安装调节,将光电自准直仪定位到与自由电子激光光轴共轴的位置上,这个调节过程与波荡器和真空管的调控在一个自由设站环节中同时完成,避免激光跟踪仪由于转站搭接出现定位精度损失。其中,对光电自准直仪的标定误差为 0.08 mm(包括 4 个反射靶球的测量误差以及激光管的拟合误差),另外两个单点测量误差为 ±0.03 mm,合成误差为 0.10 mm,故光电自准直仪与自由电子激光光轴的共轴精度为 0.10 mm。由于上下游反射镜自身底座有一个行程较大的六维电动调节平台,因此基于光电自准直仪的反射镜共轴调节精度和角度调节精度不需要太高,只需要保证能正常出光,后期再带光调节。如图 3 所示,使用光电自准直仪分别测量并调节了上下游反射镜的倾斜角,与轴线垂直的倾斜角( $\beta$ )包括俯仰角和摆动角,两个角度在实际测量中均调节到小于 5",故两个角度的合成倾斜角小于 10",满足物理设计倾斜角小于 0.05 mrad 的要求。

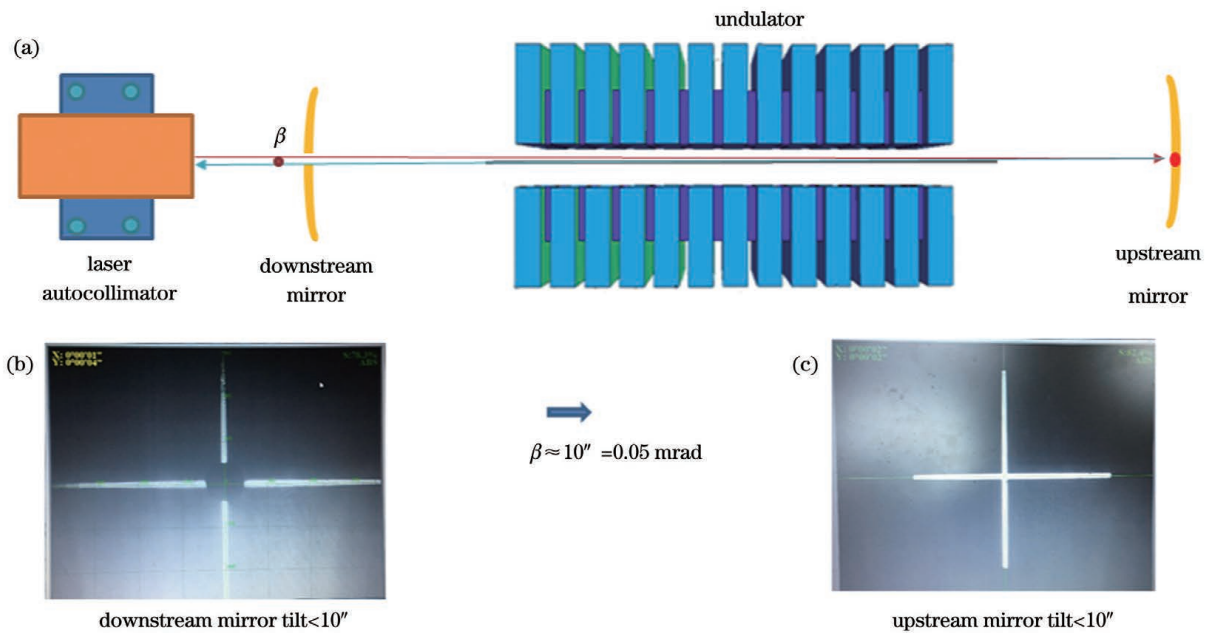


图 3 基于激光自准直仪的谐振腔上下游反射镜的准直调节。(a)激光自准直仪的光路图;(b)下游反射镜倾斜度的测量结果;(c)上游反射镜倾斜度测量结果

Fig. 3 Alignment adjustments of upstream and downstream mirrors of resonant cavity based on laser autocollimator. (a) Light path diagram of laser autocollimator; (b) measurement result of downstream mirror tilt; (c) measurement result of upstream mirror tilt

如图 3 所示,实际的上下游反射镜的调节精度都在 5"左右,好于既定的 10",即使光电自准直仪与自由电子激光光轴在实际调节中超出了限差一点,也有足

够的精度冗余量。

中红外和远红外振荡器的三个 POP-IN 探测器被安装在真空室内后,基于激光跟踪仪进行粗安装,保证

其由步进电机驱动的探杆能够正常伸入到真空室内部而不会划伤真空室。同时,在波荡器上下游分别设置一个靶座,使用激光跟踪仪进行精调,精调后垂直于束流中心线的两个方向上的位置偏差小于 0.03 mm,确保这两个靶座在放置 1.5 inch 靶球时球心在束流中心线上,基于这两个靶点来定位准直望远镜<sup>[16]</sup>。

### 3.3 激光在线准直系统

由于红外自由电子激光装置在运行过程中的辐射较大,为了保证能够对谐振腔镜的实时监测调整,增设了一套激光在线准直系统,其工作原理如图 4 所示。

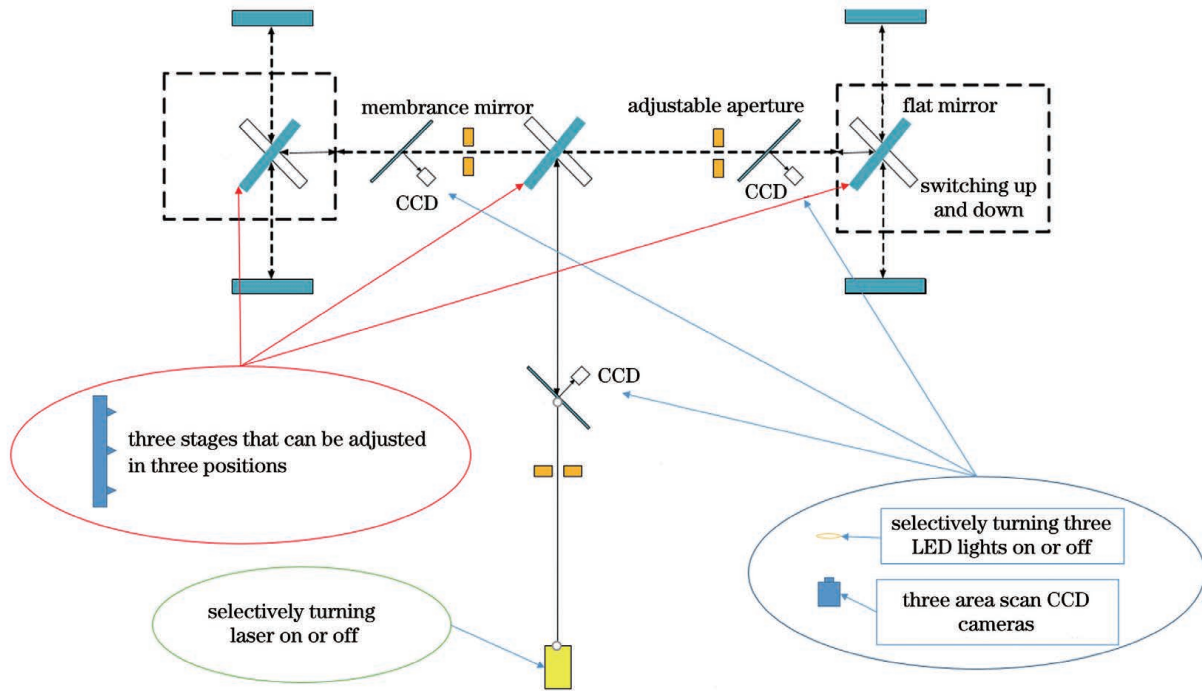


图 4 激光在线准直系统的光路示意图

Fig. 4 Schematic of optical path of laser online collimation system

本系统采用氦氖激光器作为整个光路系统的光源,输出功率为 10 mW,其可以进行二维平动和二维转动,其中平动调节范围为  $\pm 5$  mm,调节精度为  $\pm 5$   $\mu$ m,角度调节范围为  $\pm 5^\circ$ ,调节精度为  $\pm 5''$ 。为了避免红外自由电子激光装置运行过程中产生的辐射损坏该激光器,激光器被竖直放置在靠近地面的位置上,激光竖直向上经过反射镜反射后被可调光阑整形,之后传输到后续系统中。后续系统共布置了三套光斑监测模块,利用薄膜反射镜进行光斑取样,通过视频系统监测薄膜反射镜上的光斑情况,从而判断入射光与出射光的位置以及指向性,进而调节反射镜姿态,光斑中心位置的检测精度为  $\pm 30$   $\mu$ m。

## 4 准直安装过程

基于上述方案设计,我们采用激光跟踪仪结合控制网的方案,将包括磁铁、波荡器、真空室、镜箱的关键元件进行精确定位(横向定位精度优于 0.10 mm,纵向定位精度优于 0.15 mm),同时将光电自准直仪与波荡器磁极中心调节到共轴位置,共轴精度优于

激光器发出的光由可调望远镜进行聚焦调节,光束由可调光阑进行整形,然后利用两个取样薄膜反射镜进行取样,对取样薄膜发出的光斑进行分析,判断入射光和出射光的重合情况。激光器发出的光束经过两个薄膜反射镜和两个可调光阑后,通过可切换反射镜箱将其分别导入到不同通道的腔体中,在腔体内部通过反射镜切换实现上下游 POP-IN 探测器及镀金反射镜的准直调节。可调光阑主要用于对光束进行整形,提高检测精度,特别是返回的光束,因为氦氖激光经过球面反射镜反射,其发散角可能会发生变化,进而光斑偏大。

0.10 mm。在确保定位精度达到预期要求之后,先将中红外下游反射镜提起,使用光电自准直仪调节上游反射镜的角度,中红外振荡器的角度要求为  $10.33''$ ,光电自准直仪的测量精度达到  $1''$ ,测量精度冗余量很高。在调节完上游反射镜后,通过电磁换镜机构将下游反射镜放下,使用该方法对下游反射镜角度进行调节。远红外振荡器的角度要求为  $1'$ ,更容易调节。

在调节完谐振腔反射镜后,在波荡器上下游分别放置一个激光跟踪仪专用 1.5 inch 靶球座,并以 1.5 inch 反射靶球作为目标靶点。该靶球座下方设计有专门的精密微调机构,通过跟踪仪设站,将两个靶点高精度调节到与波荡器磁中心共轴,内符合精度达到 0.03 mm。以上述两个靶点为参考,配合两个靶球将准直望远镜的光学轴中心高精度调节到与波荡器磁中心共轴,准直望远镜的就位精度可以达到 0.1 mm。依次将三个 POP-IN 探测器推入到真空室内部工作点位置,使用准直望远镜精确瞄准 1 mm 的圆孔,如果不准,微调 POP-IN 探测器的机械支撑使圆孔对准,如

图 5 所示,其中  $\theta$  为 POP-IN 探测器的实际安装位置与理想位置的角度偏差。

根据准直望远镜标称精度和工程经验,在准直望远镜圆环与 POP-IN 探测器上 1 mm 的小孔目测同心的情况下,其同轴精度优于 0.05 mm。另外,依次插入三个 POP-IN 探测器,经过微调后,可以通

过下游的 POP-IN 探测器孔观测到上游的 POP-IN 探测器,证明三个 POP-IN 探测器的同轴度很好。由于三个 POP-IN 探测器的调节是相互独立的,根据协方差传播率,三个 POP-IN 探测器的轴中心线与电子束(即准直望远镜的光轴)的同轴精度优于 0.15 mm。

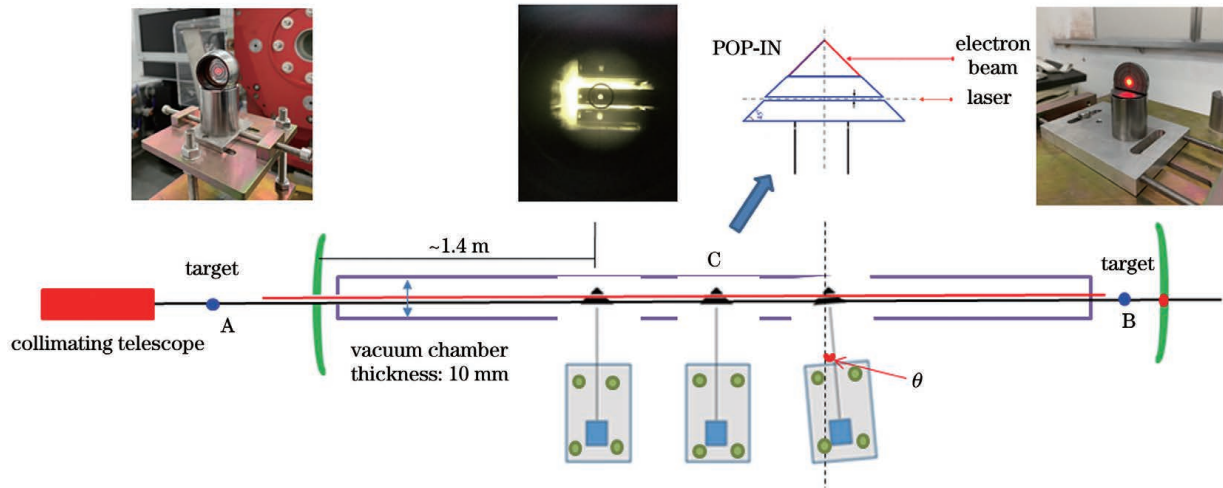


图 5 利用靶球(A和B)与准直望远镜测量 POP-IN 探测器上的 1 mm 小孔(C)

Fig. 5 Measuring 1 mm hole (C) on POP-IN by target ball (A and B) and collimating telescope

在调节完中红外振荡器和远红外振荡器的 POP-IN 探测器后,将完成离线调试的激光在线准直系统安装到红外自由电子激光系统中。同上文所述,还是利用激光跟踪仪在空间中定位球靶位置,激光器根据这些靶标来实现自定位调节,调整好激光器后

利用其发出的激光作为参考光来调节各反射镜组,反射镜组调节好后,氦氖激光被引入到谐振腔内的镀金反射镜上,通过比对入射光与反射光的位置和指向性的变化,对腔内反射镜进行调节,具体实物细节如图 6 所示。

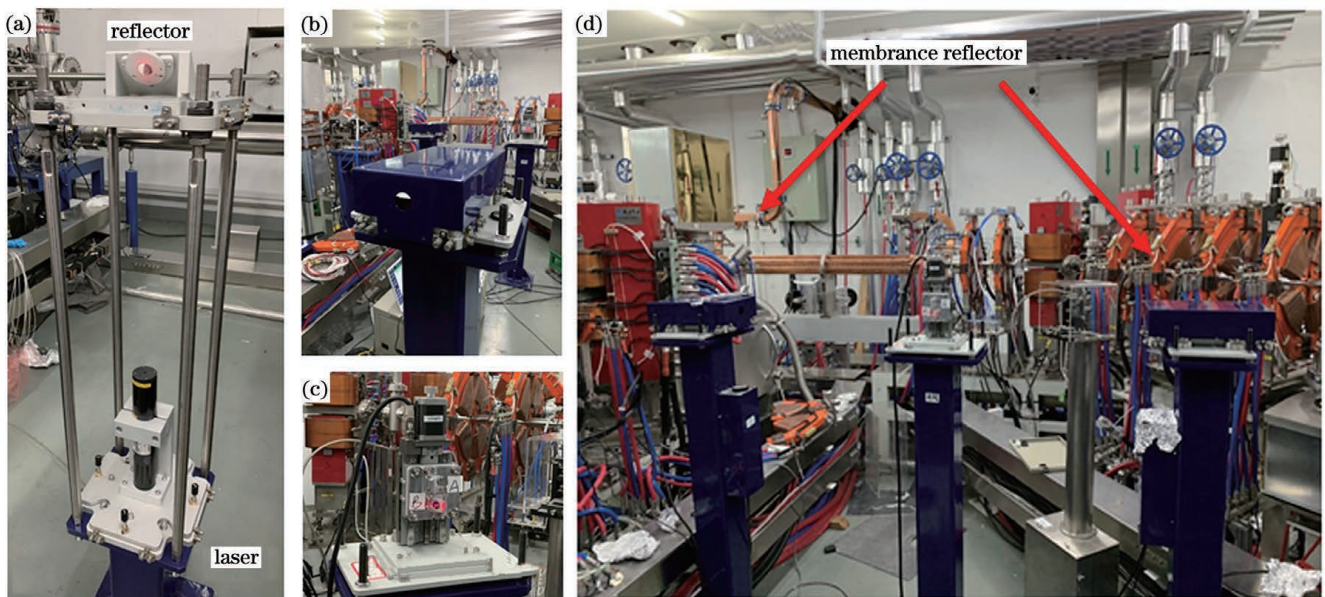


图 6 激光在线准直系统实物细节。(a)激光器与反射镜;(b)薄膜反光镜;(c)平面镜;(d)远红外和中红外薄膜反光镜  
Fig. 6 Physical details of on-line collimation system. (a) Lase and reflector; (b) membrane reflector; (c) flat mirror; (d) membrane reflectors for far and mid-infrared lasers

## 5 结 论

对红外自由电子激光装置进行了整体安装,安装过程分为粗调、精调和复核三个阶段,最终设备按照既

定精度指标安装就位。在具体的安装过程中,电子枪、加速管、磁铁等元件的准直定位要求不高,均使用激光跟踪仪配合 0.5 inch 和 1.5 inch 的反射靶球完成准直定位,横向定位精度优于 0.1 mm,纵向定位精度优于

0.15 mm。结合激光跟踪仪、光电自准直仪和准直望远镜等多种仪器,完成了中红外振荡器和远红外振荡器的谐振腔及 POP-IN 探测器的准直安装,达到了既定的精度指标要求。为了在自由电子激光准直运行过程中能够对谐振腔镜进行实时监测,增设了一套激光在线准直系统,通过离线和在线调试,证明了其稳定可靠。下一步将会对整个装置的稳定性和可靠性进行改进和完善,力争使该装置能够在更广阔的基础前沿研究领域发挥重要作用。

### 参 考 文 献

- [1] 李和廷, 何志刚, 吴芳芳, 等. 合肥红外自由电子激光装置[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1700001.  
Li H T, He Z G, Wu F F, et al. Hefei infrared free-electron laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1700001.
- [2] Li H T, Jia Q K, Zhang S C, et al. Design of FELiChEM, the first infrared free-electron laser user facility in China [J]. Chinese Physics C, 2017, 41(1): 018102.
- [3] 赵振堂, 王东, 殷立新, 等. 上海软 X 射线自由电子激光装置[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100004.  
Zhao Z T, Wang D, Yin L X, et al. Shanghai soft X-ray free-electron laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100004.
- [4] 赵振堂, 王东, 殷立新, 等. X 射线自由电子激光试验装置[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114006.  
Zhao Z T, Wang D, Yin L X, et al. Shanghai soft X-ray free-electron laser test facility [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114006.
- [5] 余永, 李钦明, 杨家岳, 等. 大连极紫外相干光源[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100005.  
Yu Y, Li Q M, Yang J Y, et al. Dalian extreme ultraviolet coherent light source [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100005.
- [6] 于成浩. 几种水准测量方法在电子直线加速器测量中的应用[J]. 北京测绘, 2005(2): 22-25.  
Yu C H. Application of some level methods in LINAC measurement [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2005(2): 22-25.
- [7] 周得洋, 何晓业, 高飞. 加速器准直中激光跟踪仪和水准仪的测量结果比较[J]. 城市勘测, 2013(1): 152-155.  
Zhou D Y, He X Y, Gao F. The comparing of measurement

- results between laser tracker and level in accelerator collimating [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(1): 152-155.
- [8] 范百兴. 激光跟踪仪高精度坐标测量技术研究与应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.  
Fan B X. Research and realization of the high precision coordinate measurement technique using laser tracker [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2013.
- [9] 王巍. 合肥光源升级改造测量准直及测量精度的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.  
Wang W. Survey and alignment of the HLS II upgrade project and study of the measurement precision [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [10] Liu X, Liu K F, Qin B, et al. Optical alignment and tuning system for the HUST THz-FEL [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, 837: 58-62.
- [11] 罗远刚. 三维平差技术在高铁轨道控制网测量中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.  
Luo Y G. Application research of three-dimensional adjustment technology in high-speed railway track control network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [12] 郭迎钢, 李宗春, 刘忠贺, 等. 加速器隧道控制网变形可监测性及稳定性分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(9): 1634-1642.  
Guo Y G, Li Z C, Liu Z H, et al. Deformation detectability and stability analysis for tunnel control network of particle accelerator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(9): 1634-1642.
- [13] Wang W, He X Y, Tang Z, et al. Smoothing analysis of HLSII storage ring magnets [J]. Chinese Physics C, 2016, 40(12): 127001.
- [14] 蔡国柱, 满开第, 张小奇, 等. SA 综合测量软件在兰州重离子加速器准直测量中的应用[J]. 测绘科学, 2013, 38(4): 162-163, 212.  
Cai G Z, Man K D, Zhang X Q, et al. A combined application of Spatial Analyzer in Alignment and Survey of Hirfl-CSR [J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(4): 162-163, 212.
- [15] 王巍, 何晓业, 姚秋洋, 等. 磁铁快速安装准直方法在 HLS II 升级改造中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 045104.  
Wang W, He X Y, Yao Q Y, et al. Application and research of magnets rapid installation and alignment method in HLS II upgrade project [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(4): 045104.
- [16] 沈云中, 陶本藻. 实用测量数据处理方法[M]. 2 版. 北京: 测绘出版社, 2012.  
Shen Y Z, Tao B Z. Practical methods for surveying data processing [M]. 2nd ed. Beijing: Sino Maps Press, 2012.

## Alignment and Installation for Resonant Cavities of FELiChEM

Wang Wei, Li Xiao, Luo Tao, Chen Jiabin, Li Heting, He Xiaoye\*

National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, Anhui, China

### Abstract

**Objective** The FELiChEM is an infrared free electron laser (FEL) facility, currently under construction, and it consists of two oscillators that generate middle- and far-infrared lasers covering the spectral range of 2.5–200.0  $\mu\text{m}$ . Each oscillator includes an undulator, a pair of gold-plated spherical mirrors with adjustable poses, a resonant cavity composed of a vacuum chamber, and three POP-IN detectors. The magnetic axis of the undulator, optical axis of the resonator, and electron beam propagation axis must be aligned with high precision to achieve saturated lasing. To monitor the beam current, the reflected light from the spherical mirrors must pass through three 1-mm holes on the POP-IN detectors controlled by stepper motors via a collimating telescope. According to physical calculations, the transverse inclination of the resonator mirror and the transverse off-axis deviation should be less than 50  $\mu\text{rad}$  and 0.1 mm, respectively, ensuring

that the three POP-IN operating points are coaxial with the electron beam centerline and the coaxial accuracy is 0.15 mm.

**Methods** Through the analysis of relevant engineering experience and actual measurement conditions, we analyze and install the two oscillators based on a laser tracker, photoelectric autocollimator, and collimating telescope. Initially, a laser tracker is used to install major equipment, such as magnets, undulators, vacuum chambers, and mirror supports, based on the installation control network. The installation accuracy is better than 0.15 mm and 0.1 mm in the beam and transverse directions, respectively. In accelerator physics, the transverse direction refers to two directions perpendicular to the beam direction. After this equipment is installed, a laser tracker and photoelectric autocollimator are used to install and adjust a gold-plated spherical mirror. First, based on the laser tracker, the photoelectric autocollimator is positioned in the space coordinate system with high precision to ensure that the axis of the photoelectric autocollimator is coaxial with the optical axis of the FEL, and the coaxial accuracy is better than 0.1 mm. Then, based on the photoelectric autocollimator, the postures of the upstream and downstream mirrors are adjusted to be within 10". Based on the same principle, a laser tracker and collimating telescope are used to collimate and locate the three POP-IN detectors. First, two reference target points are located on the optical axis of the FEL based on the laser tracker and installation control network. The two target points must be adjusted with high precision, and the internal coincidence accuracy with the optical axis of the FEL must reach 0.03 mm. Taking the above two target points as a reference, two high-precision reticle target balls are used to adjust the height of the optical axis center of the collimating telescope to the coaxial laser optical axis, and the coaxial accuracy is better than 0.1 mm. The three POP-IN detectors are pushed into the vacuum chamber successively to reach the working point, and a collimating telescope is used to adjust them. The coaxial measurement accuracy of a single POP-IN is better than 0.05 mm. The total coaxial accuracy is better than 0.15 mm. During the operation of the infrared FEL, the radiation is relatively large. To ensure real-time monitoring and adjustment of the resonator mirror, a set of laser online alignment systems is added. The adjustable aperture is shaped and then sampled by two flat mirrors, and the light spot emitted by the flat mirror is analyzed to determine the coincidence of the incident light and outgoing light. The device has a detection accuracy of  $\pm 30 \mu\text{m}$  for the spot center position.

**Results and Discussions** The requirements for the alignment and positioning of electron guns, accelerator tubes, magnets, and other equipment during device installation are not stringent. The alignment is completed using a laser tracker and 1.5-inch reflective target balls, with a transverse positioning precision and beam direction positioning accuracy better than 0.1 mm and 0.15 mm, respectively. A combination of a laser tracker and photoelectric autocollimator completes the installation and adjustment of the middle- and far-infrared oscillators (Fig. 3). A combination of a laser tracker and collimating telescope completes the installation and adjustment of the POP-IN detectors (Fig. 5). Real-time monitoring of the oscillator mirror is possible during the FEL alignment process. A set of laser online alignment systems is added (Figs. 4 and 6), which has been proved to be stable and reliable through offline and online debugging.

**Conclusions** By referring to the engineering experience and technical solutions of relevant scientific research institutions, a technological solution combining a laser tracker, photoelectric autocollimator, and a collimating telescope is selected based on the reliability of the specific project implementation and the needs of the infrared FEL project. This scheme includes offline calibration experiments and on-site installation. The smooth output of an infrared FEL device demonstrates that the scheme is feasible and reliable.

**Key words** measurement; infrared free electron laser; resonant cavity; alignment and installation; autocollimator; laser tracker