

上海光源的设备安装技术

于成浩, 孙 森, 严中保, 杜涵文, 殷立新

(中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 国家重大科学工程——上海光源工程的主体是一复杂、精密的大科学装置, 由成千上万、大小不一的设备组成, 其中很多关键元件均应达到亚毫米量级的安装定位精度要求。在工程设计阶段, 利用 Solid Edge 及 UG 等三维机械设计软件进行元件的设计及虚拟装配, 避免了设备之间的相互干涉; 在首批设备加工之后, 实施了多次模拟安装, 以查找设计缺陷, 进一步对设计进行优化, 为批量生产的批准提供依据; 在工程安装阶段, 利用激光跟踪仪、关节测量臂等三维准直测量仪器, 保证设备之间 0.2 mm 量级的安装精度, 并提前 3 个月实现获得同步辐射光这一关键工程节点。

关键词: 上海光源; 虚拟装配; 模拟安装; 准直测量; 激光跟踪仪

中图分类号: TL505

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)12-1138-05

Assembly Technique of Shanghai Synchrotron Radiation Facility

YU Cheng-hao, SUN Sen, YAN Zhong-bao, DU Han-wen, YIN Li-xin

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: As a national scientific engineering project, the main facility of Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) is composed of thousands of components with large or small dimension. Many key devices of them have the requirement of sub-millimeter assembly accuracy. In design stage, the design and virtual assembly of devices were realized by mechanical software Solid Edge and Unigraphics (UG) to avoid potential interference within and among devices. After the first group of components was fabricated, several times of test assembly were carried out to find the design bugs and optimize the design, then batch production could be approved. In installation stage, precise 3D measurement instruments, such as the laser tracker and the articulated arm, were fully utilized to assure about 0.2 mm assembly accuracy between devices, and a key engineering milestone was achieved by acquiring synchrotron light ahead of the schedule about three months.

Key words: Shanghai Synchrotron Radiation Facility; virtual assembly; test installation; survey and alignment; laser tracker

国家重大科学工程装置——上海光源 (SSRF) 是即将于 2009 年建成并运行的第 3 代

中能同步辐射光源^[1],是我国迄今为止最大的科学装置。

上海光源主体由直线加速器、增强器、储存环及沿环外侧分布的同步辐射光束线和实验站等子系统组成,而每个子系统又由成千上万个复杂的设备组成,以储存环为例,对安装定位精度要求较高的元件包括 200 块四极磁铁、140 块六极磁铁、40 块二极磁铁、140 多个束流位置探测器、3 个超导高频腔等,定位精度均应优于 0.15 mm,其中,位于同一支架上的四、六极磁铁的横向相对安装定位精度应优于 0.08 mm。

为满足最终的安装定位精度,需从物理设计开始,经机械设计、虚拟装配、设备制造、模拟安装、正式安装等一系列步骤。本文对虚拟装配、模拟安装和正式安装过程予以介绍,重点是利用精密直测量仪器进行的正式安装。

1 虚拟装配

物理设计是基础,机械设计在物理设计的基础上,进行各系统设备的布局,提出设备机械结构、几何尺寸等参数,并反馈给物理设计相关工程信息,保证物理设计在工程上的可实现性。据机械设计结果,借助计算机三维造型工具,进行虚拟装配,合理安排设备间相互关系,确保不发生干涉,且可工程操作。虚拟装配成功后,方可进行设备制造及后继的实际安装(图 1)。

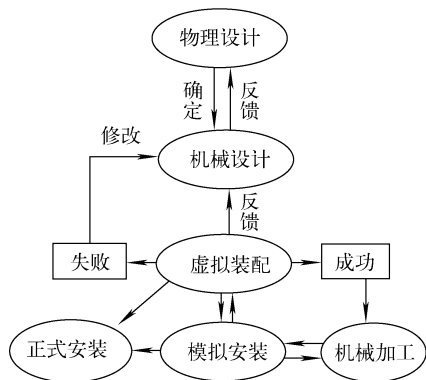


图 1 上海光源设备安装步骤

Fig. 1 Assembly procedures of SSRF

广义的虚拟装配是指利用虚拟现实技术、计算机技术、人工智能技术、网络技术、产品装配设计技术等进行的装配相关工作。由于其理论和方法尚不成熟,虚拟装配系统的工程实用程度不高^[2]。

本文所指的虚拟装配主要是指利用机械三维造型软件进行的设备模拟装配,利用逼真的图像反映设备之间的相对位置关系,以避免硬件干涉,并为实际装配的工艺流程、工装夹具设计提供参考。

1.1 所用软件

上海光源的工程建设阶段主要采用 Solid Edge 及 UG 进行机械设计和模拟装配。

上海光源工程对三维机械软件的要求为:能够满足机械设计,并能进行虚拟装配;设计阶段集中需要较多软件套数,其它阶段对软件需求较少。为此,和软件销售公司达成协议:使用 Solid Edge 作为主要机械设计软件,购买适当数量的单机版,大部分是租用网络版,用于满足机械设计的需求;另使用 2 套 UG 用于满足大型装配的需求。

工程实践证明,上述软件配置节约了成本,且较好地满足了工程的需求。

1.2 虚拟装配的实现

软件 Solid Edge 提供了强大的“装配”功能,在机械设计时利用螺栓/螺母、平面/平面及直线/直线等特征的几何关系,进行配合操作,以保证单个设备内部的零件/零件相对位置关系按设计要求排列。对于不同的设备,根据相对位置关系,也可利用特征进行装配。

图 2 为上海光源储存环标准单元的虚拟装配图,主要包括各种磁铁、真空设备、支撑设备、水泥墩等。根据物理设计,利用软件的装配功能,进行虚拟装配,以确认各设备的设计,避免元件的相互干涉,并确保操作空间,进而确认物理设计。在机械设计过程中,通过虚拟装配,发现了很多机械设计中存在的问题,通过反馈,让机械设计者得以修改并优化设计。当确认机械设计无法实现物理设计要求时,需修改物理设计方案,以保证物理方案的可实现性。

由于工艺设备极其复杂,为避免硬件干涉,上海光源的各子系统均进行了虚拟装配,为设计提供了很好的确认手段。

当设备数量很多时,虚拟装配对计算机硬件也提出了很高的要求,为此,专门配置了工作站,用于满足大型虚拟装配的需要。

1.3 从虚拟装配图到二维平面图

虚拟装配图为设计提供了直观的图示,但三

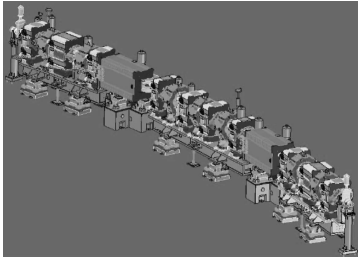


图2 储存环标准单元虚拟装配
Fig. 2 Visual assembly
of storage ring's standard cell

维视图不便于尺寸传递、交流,需提供设备的三视图。Solid Edge 等软件均提供了方便的图形转换功能,可直接将三维视图转化为平面视图、侧视图及局部视图等,从而实现三维视图向二维平面图的转化,为设备制造提供工程图纸,并为不同设计者、设计和加工之间的交流提供方便。

2 模拟安装

从理论上,通过虚拟装配,机械设计已得到了很好的确认,可进行设备加工,并能进行实际安装。但基于以下考虑,必须进行模拟安装:1) 由于工艺的复杂性以及对虚拟装配的不完全应用,很难在虚拟装配中完全考虑到所有问题;2) 在设备加工过程中,也有可能产生各种问题,导致修改设计,有必要通过模拟安装来进行设计的确认;3) 虚拟装配主要解决设计问题,至于如何安装、设计的工装卡具是否可用、能否精确调整、安装所用工时等是虚拟装配无法回答的。

简言之,模拟安装是虚拟装配和实际安装之间的桥梁,主要用于确认设计,并确认安装准直方案的可行性。

根据工程进度,上海光源共进行了两次大规模的模拟安装。

1) 第1次模拟安装

由于建筑尚未准备好,第1次模拟安装的地点位于距现场60 km之外的嘉定园区,对增强器和储存环的标准单元进行安装。

当时主体设备的首批(首件)已生产出来,亟待批准批量生产,因此,进行模拟安装的主要目的是确认设备工程设计、确认设备首件制造、为批准设备批量生产提供依据。图3a为增强器标准单元的模拟安装现场,由于元件量的限制,仅

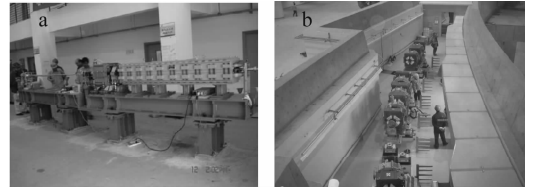


图3 模拟安装

Fig. 3 Test installation

a——第1次,增强器标准单元;b——第2次,储存环标准单元

组装了多半单元,但足以对设计进行确认。

由于工艺条件、技术方案尚未完全就绪,第1次模拟安装较为简单,准直调整方案是临时的,进行了一定范围的位置调整尝试,仅解决了“能否安装”问题,并未解决“如何高精度安装”的问题。因此,势必要在正式安装前进行新的尝试,以解决该问题。

2) 第2次模拟安装

第2次模拟安装主要针对储存环标准单元进行,选择第C10单元,在隧道现场实施(图3b)。主要解决设备吊装、安装、准直的具体技术问题,确保各方案、技术路线的可操作性,发现存在的问题,寻找解决办法,以确保满足各自的技术指标。

以准直测量来说,严格按照设计的方案,进行设备的基准转移、预安装准直、现场安装及准直复测等。经模拟安装,在各步骤均发现了相应的问题,包括磁铁标定的重复性、预安装准直过程中磁铁垫补方案等。

在模拟安装后、正式安装前,对发现的问题进行了重点攻关,使安装准直方案能够满足正式安装的要求。

3 正式安装

与虚拟装配及模拟安装不同,正式安装关心的重点是安装的精度、进度,这与精密准直测量技术的应用情况关系密切,因此,着重介绍准直测量。

3.1 准直测量技术方案

准直测量方案依据加速器物理提出的关键元件准直公差要求进行设计,根据误差对束流的影响特性、测量设备的技术指标,按照误差传播原理,进行准直步骤划分和精度估计。上海光源的准直工作主要分为5步(图4):精密控制网的设计和测量、元件标定、相关元件的预安

装准直、现场安装准直和平滑测量^[3]。鉴于控制网尺寸较大,影响因素多,估计精度为0.08 mm。根据仪器的精度指标及相关的实验情况,确定其它各步骤的精度为0.05 mm,根据误差传播定律,最终准直精度为0.12 mm。

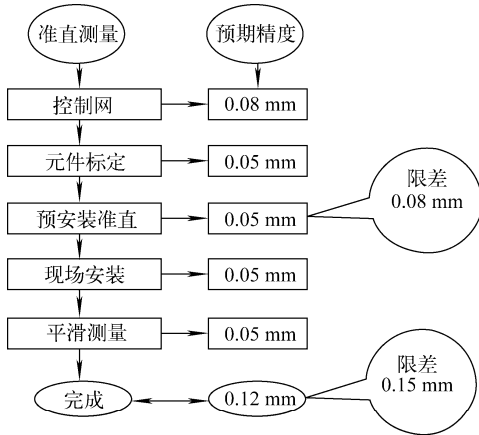


图4 准直测量步骤及精度估计

Fig. 4 Alignment steps and accuracy estimation

1) 控制网

高精度的控制网是实现约400 m大尺寸空间内设备亚毫米级安装精度的关键因素,控制网拓展了仪器的测量空间,扩大了可安装的尺寸。

2) 元件标定

元件标定的目的是建立准直靶座和设备自身几何或物理中心的相对位置关系,确保后继安装中可利用准直靶座对设备进行精确调整。

3) 预安装准直

预安装准直可减少现场安装操作环节及工作量,并提高关键设备的相对位置精度。

4) 现场安装

现场安装借助控制网将预安装准直后的组

件及其它设备按理论位置要求现场定位于支架或地面上。

5) 平滑测量

平滑测量是加速器准直测量中非常关键的一项技术,在所有设备均安装到位后进行,用于保证加速器束流轨道的平滑性。

3.2 所用仪器

准直测量的仪器配置示于图5,包括激光跟踪仪、关节测量臂、全站仪、水准仪和投点仪等。

与传统加速器准直测量不同的是,上海光源准直测量方案的特点是基于全站仪、激光跟踪仪和关节测量臂等三维测量仪器进行设计,不同仪器间的数据可通过三维坐标非常方便地进行相互传递。

激光跟踪仪是主要的测量仪器,参与控制网测量、元件标定、预安装准直、现场安装、平滑测量等所有准直步骤的工作。在工程现场,常备有3台激光跟踪仪,在高峰时段,又外借2台激光跟踪仪,共计有5台激光跟踪仪同时工作,如此大量的激光跟踪仪同时使用,对工程的质量和进度保证起到了关键作用。

其它仪器的使用情况为:在建立控制网时,利用全站仪和投点仪建立了整体平面控制网;在元件标定时,关节测量臂完成了大部分工作;隧道地基变形监测利用水准仪来完成。

3.3 人员安排

准直测量人员安排的基本原则是以工程内部人员为主,安装公司人员为辅。

工程内部参与准直工作的人员包括3名专职准直测量工程师及3~4名临时借调的机械工程师。准直测量工程师主要进行数据的处理及协调有一定难度的准直工作,是准直测量的

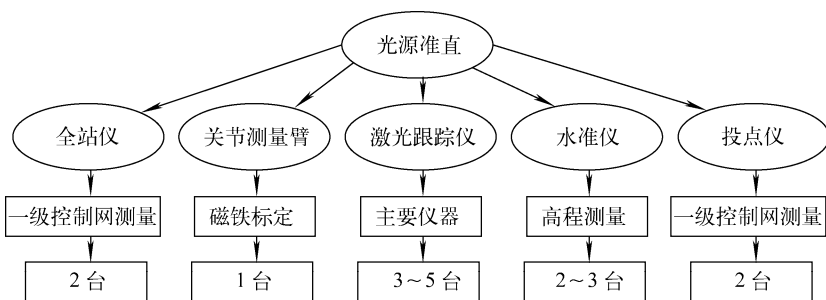


图5 准直测量仪器

Fig. 5 Alignment instruments

技术核心,对准直的质量负责。在工程繁忙时段,临时借调的机械工程师主要负责仪器的操作和数据的处理。安装公司有3~4名专门的工程师及若干辅助人员,主要负责现场的数据采集及准直调整等相关工作。

此外,加速器物理组专门派2~3人协助进行方案的优化、数据的复核等;在工程的关键阶段,又从中国科学院高能物理研究所借调1~2名准直测量人员,对准直结果进行更加专业的复核,确保满足工程质量的需要。

3.4 准直结果

储存环调束前对所有元件进行了复测,为估算四极铁的准直偏差,对20个标准单元的四极铁进行了局部拟合,以两端的四极铁为基准,利用拟合后的偏差计算均方根。为避免相邻单元之间磁铁的较大偏差,按照类似的方法对相邻单元的四极铁也进行类似操作。共得到40个均方根偏差,分布示于图6(横坐标为偏差量,单位mm,纵坐标为偏差出现的频率)。水平和垂直方向的平均均方根偏差分别为0.099 mm和0.061 mm,满足0.15 mm的设计要求。

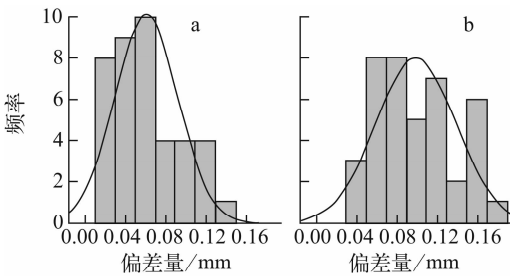


图6 储存环四极铁局部拟合均方根的直方图

Fig. 6 Local best-fit RMS histogram of storage ring's quadrupoles
a——垂直方向;b——水平方向

准直安装误差对束流闭合轨道偏差(closed orbit distortion, COD)将产生直接影响,根据对COD的实测结果,可估算准直测量的实际精度^[4]。在2008年3月4日调束时对储存环闭轨偏差进行了实测,工作点为22.22/11.29,水平和垂直方向校正铁强度均为0,水平闭轨偏差RMS为3 mm,垂直闭轨偏差RMS为1.75 mm。根据模拟四极铁安装误差对闭轨偏差的影响,可推算储存环中四极铁实际安装误差

水平和垂直方向RMS分别为0.078 mm和0.078 mm,与准直精度估算相当。

4 结语

经历了计算机的虚拟装配、首批元件的模拟安装、设备的正式安装等阶段,上海光源的设备安装准直取得了较好成绩。截至2008年9月,上海光源3个加速器的安装准直工作均已基本完成,光束线站正在安装中,加速器的调束进展顺利,从准直数据及实际闭轨偏差情况均反映出获得了较高的准直精度。从进度上看,高效的安装技术使得上海光源获得首束同步辐射光这一关键时间节点提前了3个月。

作为国家重大科学工程,上海光源设备安装准直工作具有尺寸空间大、精度要求高、工艺复杂、时间跨度大等特点,合理的设备安装技术发挥了重要作用,这对于国内其它大型工程的设备安装也具有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] ZHAO Zhentang, XU Hongjie, DING Hao. Construction of Shanghai Synchrotron Radiation Facility[C/OL]// Proceedings of Asian Particle Accelerator Conference-2007. Indore, India: Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT). [2007-11-11]. <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/a07/PAPERS/THZ-MA03.PDF>.
- [2] 夏平均,姚英学. 虚拟装配的研究综述与分析(II)[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(6): 942-947.
XIA Pingjun, YAO Yingxue. Survey and analysis of virtual assembly (II)[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(6): 942-947(in Chinese).
- [3] 于成浩,殷立新,杜涵文,等. 上海光源准直测量方案设计[J]. 强激光与粒子束,2006,18(7): 1167-1172.
YU Chenghao, YIN Lixin, DU Hanwen, et al. The design of SSRF survey and alignment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(7): 1167-1172(in Chinese).
- [4] 于成浩. 三维准直测量技术在上海光源中的应用研究[D]. 上海:中国科学院上海应用物理研究所,2008.