

HT-7U 超导托卡马克装置装配方案概述

赵庆荣, 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031)

摘要: HT-7U 超导托卡马克核聚变实验装置的科研目标是建造一个具有非圆截面的大型超导托卡马克装置, 用来开展稳态、安全、高效运行的先进托卡马克聚变反应堆基础物理问题的实验研究。讨论了 HT-7U 装置主机关键部件的构成, 装配过程中对各关键部件装配的精度要求, 建立了总装测量系统确保关键部件的装配精度。

关键词: 托卡马克; 装配; 测量系统

中图分类号: TL631.2⁺4; TG95

文献标识码: A

1 引言

HT-7U 超导托卡马克等离子体实验装置的科研目标是建造一个具有非圆截面的大型超导托卡马克装置及其实验系统, 发展并建立在超导托卡马克装置上进行稳态运行所需要的多种技术, 开展稳态、安

全、高效运行的先进托卡马克基础物理问题的试验研究。HT-7U 装置主机是该工程项目中的一个将要全部新建的重要组成部分, 其主要工程参数如表 1 所示。

表 1 HT-7U 超导托卡马克试验装置的主要工程参数

R_0/m	a/m	B_T/T	拉长比 K_x	三角形变 δ_x	等离子体位形	
1.7	0.4	3.5	1.6~2	0.4~0.8	双零偏滤器 单零偏滤器 抽气偏滤器	
ICRH	LHCD	ECRF	NBI	I_p/MA	脉冲长度/s	等离子体密度/ m^{-3}
3~3.5MW	4MW	0.5MW	$\leq 4MW$	1~1.5	60~1000	$(20~50) \times 10^{19}$

HT-7U 装置主机主要由超导极向场磁体系统、超导纵场磁体系统、真空室、冷屏和外真空杜瓦五大关键部件以及装置主机支撑、超导磁体支撑、真空室支撑、冷屏支撑等四组支撑系统组成。装置运行时存在四个运行温区: 370K 的真空室运行温区、80K 的冷屏运行温区、4.5K 的超导磁体运行温区、270K 的外真空杜瓦运行温区, 并且具有二个真空区域:

$1.3 \times 10^{-5} Pa$ 的真空室、 $5 \times 10^{-4} Pa$ 的外真空杜瓦。整个 HT-7U 装置总体结构方案的轴测图如图 1 所示。

2 HT-7U 装置主机装配过程

2.1 主机装配精度的设计要求

HT-7U 装置主机是一个形状结构复杂、各部件

收稿日期: 2003-08-21; 修订日期: 2004-01-12

作者简介: 赵庆荣(1971-), 男, 安徽宿松人, 博士研究生, 从事托卡马克装置总装系统研究。

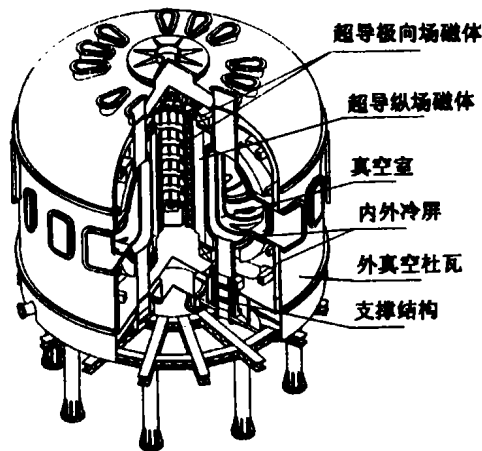


图1 HT-7U 装置总体结构方案轴测图

体积大、重量重的工程项目。为了保证装置主机在总装程序完成后,能够满足 HT-7U 托卡马克装置的物理和工程要求,必须在设计阶段对纵场磁体系统、极向场磁体系统、真空室、外杜瓦底座以及装置主机支撑等部件提出严格的装配精度要求。整个 HT-7U 装置主机装配图如图 2 所示。

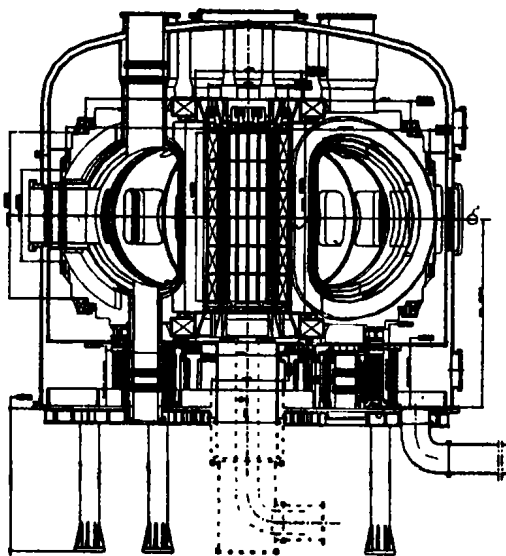


图2 HT-7U 装置主机装配图

HT-7U 装置主机总装精度要求如下:

a. 总装前,应以装置主支撑支架八个立柱形成的圆心在大厅标示出正北方位;

b. 应先建立装置的参考垂直中心线。该中心线应与主支撑支架八个立柱形成的圆心同心;

c. 在装置主支撑支架的安装过程中应测量支撑支架与装置的参考垂直中心线的偏心度及垂直度;

d. 外真空杜瓦底座上的基准平面是装置冷质部件支撑的基准面,要保证此基准平面与参考垂直中心线在要求范围内;

e. 要保证外冷屏底座的中心孔与外真空杜瓦底座中心孔的同心度;

f. 真空室、冷屏、纵场磁体及外真空杜瓦的水平及垂直窗口在环向的角度偏差应在 $\pm 0.05^\circ$;

g. 考虑到纵场磁体系统、冷屏环体及真空室环体在工作温区下中心偏移,总装时纵场磁体系统、冷屏环体及真空室环体的中心平面不在一个平面上;

h. 在安装纵场磁体中要保证其垂直中心平面相对于外真空杜瓦底座上基准平面的垂直度;

i. 纵场磁体系统成环后,各个部件都应以纵场磁体系统的中心为新的基准;

j. 内冷屏各部件与超导磁体及真空室各部件的间距应大于 20mm;

k. 真空室内面向等离子体瓦块的安装精度要求为:相邻瓦块或部件之间的位置偏差应小于 0.5mm;在整个环向,各瓦块或部件之间的最大位置偏差应小于 $\pm 1.0\text{mm}$;面向等离子体瓦块体的垂直中心线和水平平面与纵场磁体系统水平和垂直基准的位置偏差应小于 1.0mm。

HT-7U 装置主机总装设计所要求的位置精度及具体数值如表 2 所示。

2.2 装置主机的装配工艺过程

HT-7U 装置主机的装配工艺将会对装置主机的总装精度、总装进度及经费的支出等都产生重要影响。装置主机总装的关键在于超导纵场磁体、真空室及内冷屏装配方案的选择。而外冷屏及外真空杜瓦的装配程序基本是唯一的。在纵场磁体、真空室、内冷屏这三层环体安装成环工艺中,采用如下方案来满足工程指挥部对总装过程所提出的原则要求。三环套装工艺方案如图 3 所示。该方案的要点是:

a. 真空室和内冷屏预先形成组合环(至少留下 1/16 环在最后拼装)在总装工位上用临时支撑就位;纵场磁体套入这一环体逐个就位;

表 2 HT-7U 装置主机总装设计位置精度要求

位置精度	数值/mm
装置主机支撑支架与参考垂直轴线(基准 A)垂直度	1.0
外真空杜瓦底座上基准平面(基准 B)与基准 A 的垂直度	0.5
冷质部件与基准 A 的垂直度	0.5
真空室和冷屏支撑平台与基准 A 的垂直度	1.0
外冷屏底座中心孔与外真空杜瓦底座中心孔的同轴度	$\Phi 1.5$
纵场磁体垂直中心平面与基准 B 的垂直度	0.5
纵场线圈盒直线段成环后内切圆中心轴线(基准 C)与基准 B 的垂直度	1.0
纵场线圈盒直线段成环后内切圆中心轴线与基准 A 的同轴度	$\Phi 1.0$
纵场磁体水平中心面(基准 D)与基准 A 的垂直度	0.5
中心螺线管与偏滤器线圈与基准 C 的同轴度	$\Phi 0.5$
中心螺线管与偏滤器线圈与基准 D 的垂直度	1.0
极向场大线圈与基准 C 的同轴度	$\Phi 1.0$
极向场大线圈与基准 D 的垂直度	1.0
极向场大线圈和中心螺线管与基准 D 的对称度	1.0
真空室成环后中心与基准 C 的同轴度	$\Phi 1.0$
真空室成环后中心与基准 D 的垂直度	1.0
冷屏成环后中心与基准 C 的同轴度	$\Phi 1.0$
冷屏成环后中心与基准 D 的垂直度	1.0

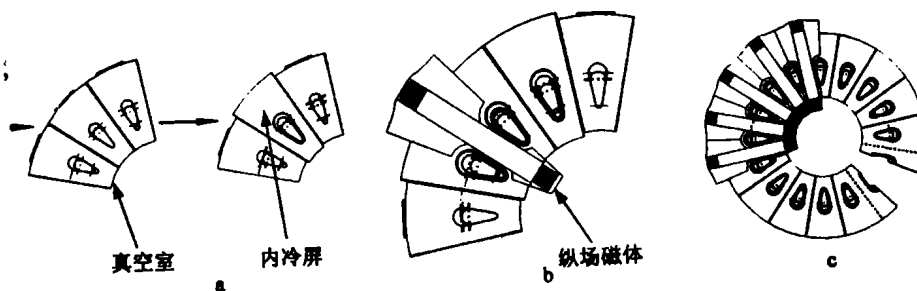


图 3 三环套装工艺方案

b. 真空室本体可单独进行内外强度焊接和真空密封焊接,但(最多)可成环 15/16;

c. 内冷屏可单独成环验收,然后逐步套装到真空室外,(最多)可一直套装到 15/16 环。套装成环时要用临时支撑将内冷屏和真空室的相对位置调整到位。无论在预装工位还是在总装工位,须要用可逐个移动拆卸的临时支撑将两环组合环体粗略支撑水平到位;

d. 必须要求单个纵场磁体能够套装到内冷屏和真空室构成的组合环体外,因此内冷屏的外轮廓尺寸必须保证套装可以进行;

e. 纵场磁体形成完整环体之前必须要有临时支撑,之后再将此临时支撑拆除;逐个拆除内冷屏和真空室组合环体临时支撑转换为正式支撑的过程是精心调整三环同心和水平的准直过程。

3 HT-7U 装置主机总装测量系统的建立

采用精密测量仪器设备和适宜的技术路线,对 HT-7U 超导托卡马克装置主机总装进行定位,以满足装置主机设计的装配精度要求。总装测量系统的建立本着满足精度要求、安装定位简便、速度快、费用经济等特点来设计,同时考虑到 HT-7U 超导托卡马克装置的复杂性和缺少经验,其安装定位又无现行的技术规范和行业标准,所以,本测量系统依据现有精密仪器的标称精度来进行设计。

3.1 建立设备安装参考坐标系

关于设备安装坐标系的建立,我们将考虑下列几个因素:

a.该坐标系易于直观地反映部件间的相互关系;

b.该坐标系不易受外部变化的影响;

c.该坐标系易于恢复。

参考坐标系的建立步骤如下:

a.置全站仪与装置参考平面上,该参考中心点根据已设定的 6 个支持螺栓组中心来求定并作为坐标原点,其坐标位(0,0,0);

b.过仪器中心的铅垂线位 z 轴(装置的参考垂直中心线 A);

c.过原点与 z 轴垂直的平面为该坐标系的 xy 平面;

d.以全站仪的任意度盘位置(根据实地情况可选一方向为零方向)为该坐标系的 x 轴,根据右手法则确定的方向即为 y 轴;

参考坐标系的设定如图 4 所示。

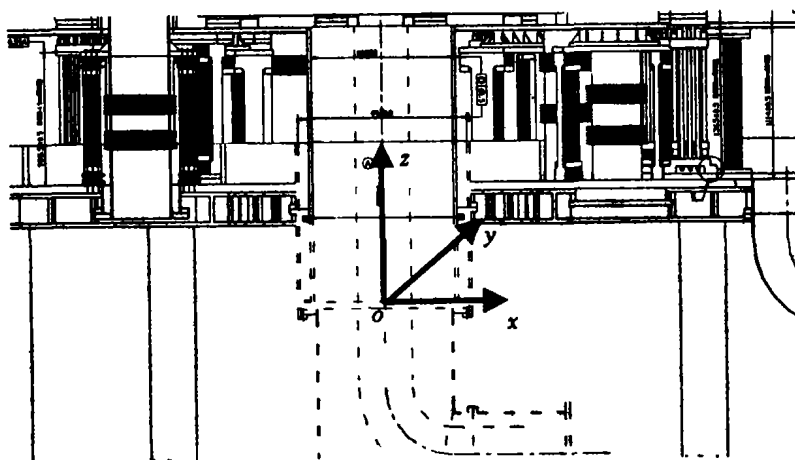


图 4 HT-7U 装置主机参考坐标系的设定

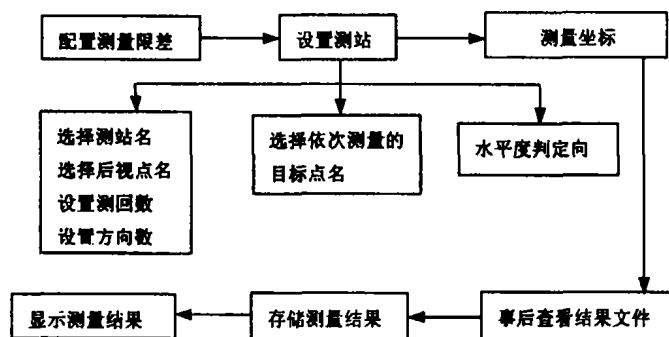


图 5 多测回坐标测量软件流程

3.2 全方位控制点的测定

在安装大厅墙面、地面设置若干点,作为日后恢复坐标系之用的控制点。这些控制点的布设主要考虑所设点的稳定性和图形结构。控制点的观测采用徕卡带 ATR 功能的高精度全站仪和机载或 PC 机控制的自动多测回坐标测量软件模块,点位精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ 。该软件模块的基本流程如图 5 所示。

3.3 全站仪自由设站站点坐标的测定

为了能够高精度地观测安装点,必须将仪器放在一个最佳的观测位置。最佳观测位置的确定,是根据部件上的观测点个数与分布,利用机载或 PC 机控制自由设站软件模块来测定仪器点坐标。通过测站仪器对已知目标点的观测,来反算测站的坐标及定向方位角,并将这些解算的数据设置在仪器中,以便随即从该测站测量其他待测点。考虑到控制点的误差,仪器站坐标精度可达 $\pm 0.2\text{mm}$ 。

3.4 安装点的测定

关于安装点的测定,可以利用自动多测回坐标测量软件模块来实施。最终的点位精度可达到 $\pm 0.3\text{mm}$,满足 HT-7U 装置主机安装的各项精度要求。

4 结论

HT-7U 超导托卡马克等离子体试验装置装配工作的各个方面都已经启动,到 2005 年整个装配工作将全面完成。装配方案的每一步实施都做到了认真、细致的确认和复核,确保 HT-7U 装置主机的每一个零部件都能按照总装设计的要求安装定位。同时,在装配过程中建立的测量控制点将作为永久的测量基准点永久保存,使得装置主机总装完成后 20 年内,原测量系统可以及时(一天之内)得到恢复,确保装置需要维修的部件能够准确定位。

参考文献:

- [1] 武松涛. HT-7U 装置主机结构及总装介绍 [R]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所, 2003.
- [2] 倪涵. HL-7U 超导托卡马克装置总装测量技术方案 [R]. 上海:徕卡测量系统有限公司上海软件开发中心, 2003.
- [3] 麻虹艳. 浅谈自由设站在施工测量中的应用 [J]. 辽宁交通科技, 2001, 12: 8.
- [4] 倪永贵, 张明海, 冯仲科. 全站仪钢柱吊装实时测量系统建立与应用 [J]. 工程勘察, 1998, 3: 45.

General description of assembly scheme for the HT-7U superconducting tokamak

ZHAO Qing-rong, WU Song-tao

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: The HT-7U superconducting tokamak is an advanced steady-state plasma experimental device to be built at the Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences. The scientific mission of the HT-7U project is to study physical issues of steady-state advanced tokamak devices and to establish the technology basis of full superconducting tokamak to support future reactor. The main components of the HT-7U device, the requirements of the installation tolerances, and the realization of these installation tolerances with a system-mounting to monitor the assembly procedure are described.

Key words: Tokamak; Assembly; Survey system