

组合式超大尺寸测量技术在 EAST 装置中的应用

顾永奇¹, 于连栋¹, 覃世军²

¹合肥工业大学; ²中国科学院等离子体物理研究所

摘要: 组合式测量技术是精密测试技术的研究发展方向之一。激光跟踪仪和柔性关节坐标测量臂都是便携式高精度三维测量系统,通过坐标转换等技术,把这两种仪器组合在一起,可实现对超大尺寸、隐藏点的高精度测量。根据 EAST 核聚变装置现阶段实际情况,把这种组合式超大尺寸测量方法应用到 EAST 的装配定位测量过程中。利用该方法对装置进行初步实验测量,结果表明这种方法可以解决 EAST 核聚变装置装配过程中的复杂测量问题,能为解决如航天器、舰船、加速器等其它大型装置的精密测量问题提供借鉴。

关键词: 定位装配测量; 超大尺寸; 隐藏点测量; EAST; 激光跟踪仪; 柔性关节式坐标测量臂

中图分类号: TG81

文献标志码: A

Combined Large – scale Measuring Techniques in Application of EAST Device

Gu Yongqi ,Yu Liandong , Qin Shijun

Abstract: The technique of combined measurement is one of the research directions in the field of precision testing technology. Laser tracker and articulated flexible coordinate measuring arm are portable , high – precision , three – dimensional measurement system. By coordinate conversion technology , these two instruments together , can achieve large – scale , high – precision measurement of hidden points. According to actual situation of the EAST Fusion device , in present stage , this combined large – scale measurement methods can be applied to the EAST assembly positioning measurement process. Using the methods on the device for initial measurement , results show that such an approach can solve the EAST complex measurement problems in the process of nuclear fusion device Assembly , and can provide a reference for to address the precision measurement problems of other big device such as spacecraft , ships , accelerator , etc.

Keywords: positioning assembly measurement; large – scale; hidden point measurement; EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak) ; laser tracker; articulated flexible coordinate measuring arm

1 引言

随着科技水平的不断提高及现代工业的不断进步,有越来越多的大尺寸零件需要测量。目前比较成熟的大尺寸测量技术有:大型三坐标测量机、全站仪、经纬仪、激光跟踪仪、室内 GPS 和机器视觉测量系统^[1-3]。在国家“九五”大科学工程项目 EAST 核聚变装置的前期试验装配过程中,应用全站仪和测量模板的方式对其进行三维坐标测量。随着核聚变试验参数的提高,对装置的装配精度有了更高的要求;再加上外围设备的安装,装置的外杜瓦及部分窗口不可能再打开,内部空间狭小且形状复杂,测量十分困难^[4,5]。因此,无论是从测量方法还是从测量精度来看,原来的测量方法已经无法完成测量任务。

为解决 EAST 装置装配过程中的实际测量难题,本文提出组合式超大尺寸精密测量技术——即利用激光跟踪仪和柔性关节坐标测量臂相互结合,

在完成仪器之间的三维坐标相互转换和建模的基础上,解决并完成 EAST 实验装置的基准测量、内部部件定位安装、变形检测等测量问题,使其达到核聚变安全实验的精度要求。并为其它的复杂空间、大尺寸、高精度的测量难题提供可行的、经济的、便捷的测量解决方案。

2 测量方法和原理

激光跟踪仪和柔性关节坐标测量臂都是便携式高精度三维测量系统,由于激光跟踪仪能够完成几十米的超大尺寸、高精度的测量任务,柔性关节坐标测量臂具有灵活、可测隐藏点等优点,它们已在许多精密测量工程中得到广泛的应用。但是在测量过程中,由于光线遮挡等原因,单独使用激光跟踪仪很难实现对隐藏点的三维坐标测量;由于受到臂展的限制,柔性关键坐标测量臂很难完成超大尺寸的高精度测量。为完成像 EAST 装置这样需要对几十米的范围进行测量,并且包含有较多的隐藏空间的测量任务,本文提出采用激光跟踪仪和柔性关节坐标测量臂组合的测量方法。通过这种组合式的测量方法

收稿日期: 2011 年 12 月

不仅能够轻松实现隐藏点的三维坐标测量,也能够轻松实现十几米、几十米等超大尺寸的精密测量。

测量原理如图 1 所示,就是把柔性关节坐标测量臂的测量系原点 O' 转换到激光跟踪仪的测量系原点 O ,相当于在柔性关节坐标测量臂上加了一个虚拟关节 OO' ,只是这个关节 OO' 的长度、转角等参数不定,需要根据现场安装情况,利用激光跟踪仪和柔性关节坐标测量臂的测量坐标值进行坐标转换得到。求出虚拟关节 OO' 的相关转换参数后,这两台仪器的测量结果就可以互相转换利用,达到测量目的。

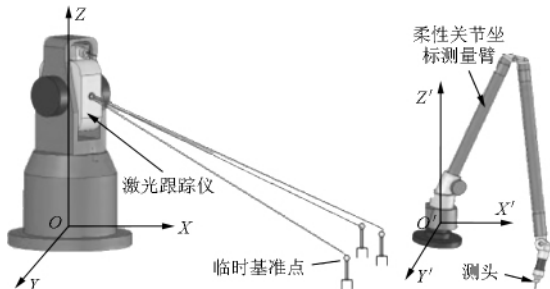


图 1 测量原理示意图

转换方法如图 1 所示,建立 $i(i \geq 3)$ 个临时基准点,利用激光跟踪仪测量这些临时基准点,得到它们在激光跟踪仪的测量坐标系 $O-XYZ$ 下的坐标值,分别为 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 \dots 、 (x_i, y_i, z_i) 。再利用柔性关节坐标测量臂测量这些临时基准点,得到它们在柔性关节坐标测量臂的测量坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 下的坐标值,分别为 (x'_1, y'_1, z'_1) 、 (x'_2, y'_2, z'_2) 、 \dots 、 (x'_i, y'_i, z'_i) 。把这些临时基准点在坐标系 $O-XYZ$ 下的坐标值写为矩阵 A ,在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 下的坐标值写为矩阵 B 。它们之间的关系可通过包含有虚拟关节 OO' 相关参数的 3×3 矩阵 X 表示,即有

$$A = BX \tag{1}$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_i & y'_i & z'_i \end{bmatrix}$$

求出转换矩阵 X 后,就可以把柔性关节坐标测量臂测量到的隐藏点坐标值,转换为激光跟踪仪测量坐标系下的坐标值,从而完成隐藏点的坐标测量。通过改变临时基准点和柔性关节坐标测量臂的位置,再用上述方法建立转换关系后,就可以完成超大尺寸隐藏点的测量问题。

3 测量系统的搭建

根据上述组合式测量方法的原理,结合 EAST 核聚变装置的现场情况及测量安装要求,采用图 2 所示的测量方法,搭建测量系统。即通过利用在 EAST 装置大厅墙壁上已经建好的三维数字基准网点,来定位激光跟踪仪,运用坐标转换技术实现激光跟踪仪的测量坐标系与装置大厅世界坐标系的统一;在可以打开的窗口处建立临时基准点,并在装置真空室内部合适的位置建立内部基准网点,利用外部激光跟踪仪能够看到的基准点和坐标转换技术,来完成内部已固定的柔性关节坐标测量臂的测量坐标系与装置大厅世界坐标系的统一;再利用内部定位后的柔性关节坐标测量臂,测量标定外部激光跟踪仪看不到的内部隐藏基准点;在各类型靶板进行安装时,可以通过内部已标定的基准点来定位柔性关节坐标测量臂,使其测量坐标系与装置大厅世界坐标系统一,然后即可完成支撑、热层、石墨瓦等内部部件位置的测量,并指导其装配到理论设计位置。

为验证上述测量方法的可行性,利用 API Tracker3 激光跟踪仪和 FARO 便携式三坐标测量臂在 EAST 核聚变装置上进行初步试测。即在装置大厅的一层平台上对着 P 窗口(EAST 装置有 A-P 共 16 个窗口)处的地方架设 API Tracker3 激光跟踪仪,在装置真空室内部 P 窗口处合适位置安装 FARO 便携式三坐标测量臂,并建立四个临时基准点。在保证激光跟踪仪和测量臂都能测量到的前提下,这四个基准点应尽可能的分散。

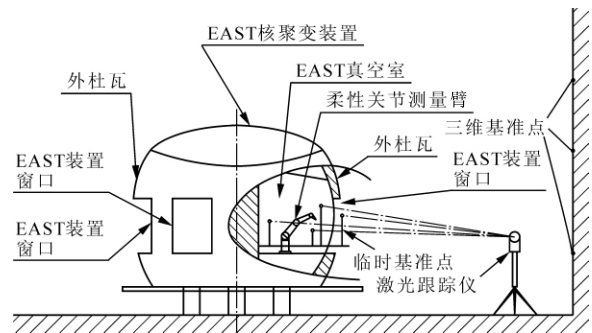


图 2 测量方法示意图

4 模拟试测量及其结果

在完成真空室内部基准点建立的基础上,分别用激光跟踪仪和测量臂测量这些基准点,通过坐标转换使 FARO 便携式三坐标测量臂的测量坐标系统一到装置大厅世界坐标系下,然后即可对真空室内各类部件进行测量。

4.1 纬环径向尺寸的测量

纬环是焊接在装置真空室内壁上的内部部件，是真空室内部多个部件安装的基准。由于真空室内壁完全封闭，不能从中心测量，必须从几十米外大厅墙面的定中基准点为基准进行测量，常规方法的测量精度很难达到装置装配测量要求。采用高精度三维测量可以完成测量目的，但是，由于受到 EAST 窗口狭小或本轮装配不允许打开等原因的限制，激光跟踪仪无法测量到被遮挡的纬环；由于受到臂展的限制，柔性关节坐标测量臂无法测量到几十米外的基准点，就不能完整定位，也不能完成对纬环的测量工作。使用组合式的测量方法，便可以完成纬环装配时的测量工作。

在搭建实验测量系统后，选择装置 P 窗口附近处的赤道面纬环，用定位后的 FARO 便携式三坐标测量臂对其进行采点测量，测量结果通过坐标转换使其变换为装置装配柱坐标值，如表 1 所示 11 个样点的坐标值。通过这些点的半径 R 值和角度 ψ 值，可以清晰判断纬环在角度 ψ 方向的位置处，其半径 R 与设计理论值 1271mm 的差值。根据这些差值可以判断安装是否达到装配设计的精度要求，并根据这些数据指导装配的调整。

表 1 赤道纬环测量数据

点号	R (mm)	ψ (°)	d_R (mm)
1	1272.682	-40.355	1.682
2	1272.537	-40.296	1.537
3	1270.033	-8.168	-0.967
4	1269.579	-2.473	-1.421
5	1269.242	5.080	-1.758
6	1269.446	13.487	-1.554
7	1269.118	14.726	-1.882
8	1269.252	13.825	-1.748
9	1269.320	2.553	-1.680
10	1269.254	4.117	-1.746
11	1269.716	-4.480	-1.284

4.2 纬环中心的测量

在装配过程中，有时需要知道纬环中心或真空室内壁中心，这可以通过定位后的 FARO 便携式三坐标测量臂测量纬环或真空室内壁，再通过圆柱拟合和坐标转换，即可得到纬环或真空室内壁的中心。选取 P 窗口附近处纬环上 51 个点，进行圆柱拟合和坐标转换后，得到纬环圆柱中心线与赤道面的交点，即在零平面的中心点坐标为 $(-3.409, -3.499)$ ，其纬环圆柱半径为 1270.057mm，拟合效果如图 3 所示。

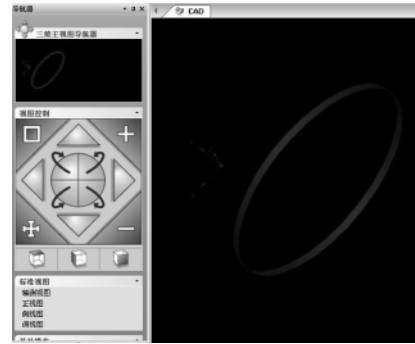


图 3 纬环圆柱拟合效果图

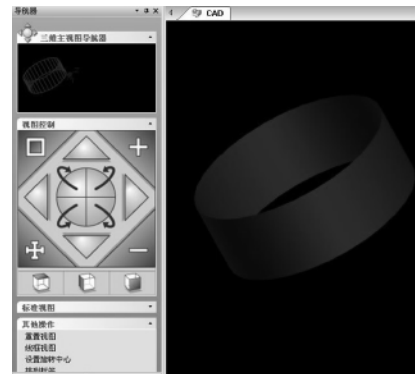


图 4 真空室内壁拟合效果图

根据纬环在零平面中心点的坐标，可以判断整个纬环在赤道面处是否偏离装置中心，也可以根据这一数据对纬环进行调整。纬环半径也可以作为判断其径向是否安装到位的依据。用同样的方法对真空室内壁进行测量，得到其在零平面的中心点坐标为 $(-3.546, -3.447)$ ，其真空室内壁圆柱半径为 1240.447mm，拟合效果如图 4 所示。这些数据可以作为判断真空室内壁安装是否到位和进行调整的依据。

4.3 各类靶板锥面的测量

真空室内部部件包含有内靶板、外靶板、被动板和 Dome 板，这些靶板的表面都是圆锥面，给装配定位测量带来了不少困难。然而这些靶板是组成面向等离子体的第一壁，装配精度要求非常高。为解决此测量难题，采用定位后的 FARO 便携式三坐标测量臂对靶板表面进行采点，采取多点后用这些点的坐标值进行圆锥拟合，经过坐标转换后可得到锥顶和锥角。在真空室 P 窗口处内靶板的下表面上，随机选取 70 个点进行测量，并用这些点进行圆锥拟合，采取点分布见图 5，圆锥拟合效果如图 6 所示。拟合后，通过坐标转换得到圆锥锥顶柱坐标为 $(103.140, -15.627^\circ, -4647.085)$ ，圆锥锥角 θ 大小为 12.923° 。

根据测量结果得到的锥顶坐标值与设计理论锥顶坐标值进行比较，可以判断该靶板锥面是否安装到位，并可根据其差值进行调整指导安装；测量给出

的圆锥锥角能更清晰地判断出安装过程锥面是否变形、变形是否超标等。

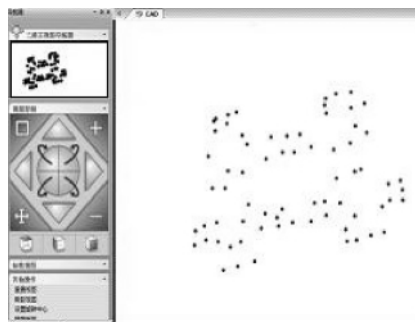


图5 测量点分布示意图

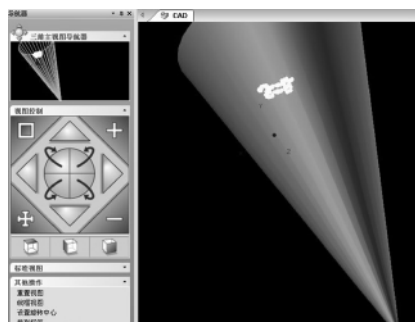


图6 测量点圆锥拟合效果图

5 结语

经过对 EAST 核聚变装置现场的临时模拟测量,从测量结果来看,这种测量方法能够很好地解决 EAST 装置装配过程中遇到的测量点相距基准点几十米、且要求测量的高精度、被测点被遮挡等测量难题。通过改变激光跟踪仪和柔性关节坐标测量臂的位置,可以完成 EAST 装置打开窗口处的测量任务;在不能打开的窗口处,亦可以通过打开窗口处的临时基准点和柔性关节坐标测量臂的蛙跳技术,完成内部其余窗口的测量任务。为解决每次建立临时基准点的麻烦,可按上述 EAST 测量方案中的方法,在真空室内部建立内部基准网点。在内部基准网点建立完成后,可取代实验测量中的临时基准点,实现对内部部件每块靶板的测量。这种组合式测量方法以及坐标转换等技术可为今后托卡马克聚变装置的装配测量,以及其它大型工程的精密测量提供参考。

参考文献

- [1] 张国雄. 坐标测量技术新进展[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(3): 16-19.
- [2] 叶声华, 王仲, 曲兴华. 精密测试技术展望[J]. 机电一体化, 2001(6): 6-7.
- [3] J G Zhu, X Wang, D W Wang, et al. Study on the key technologies of optical coordinate measuring system and software design[J]. Journal of Physics, 2006 Conf. Ser. 48: 587-592.
- [4] 赵庆荣, 武松涛. EAST 托卡马克装置关键部件装配的控制测量[J]. 核聚变与等离子体物理, 2006, 26(4): 302-305.
- [5] 刘旭峰, 卫靖, 郑福斌, 等. EAST 装置内部部件的安装准直[J]. 核聚变与等离子体物理, 2010, 30(1): 82-85.
- [6] 程文涛, 费业泰, 于连栋. 关节式柔性三坐标测量机测量模型[J]. 黑龙江科技学院学报, 2007, 17(3): 210-212.
- [7] 汪平平, 费业泰, 林楨旺. 柔性三坐标测量臂的标定技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 284-288.
- [8] 汪平平. 柔性坐标测量机精度理论及应用技术研究[D]. 合肥工业大学博士学位论文, 2006.
- [9] 梅中义, 范玉青. 基于激光跟踪仪定位的部件对接柔性装配技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 65-69.

第一作者: 顾永奇, 硕士研究生, 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 230009, 合肥市

First Author: Gu Yongqi, Postgraduate, School of Instrumentation Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

四大新兴产业专项规划 最快在两会后颁布实施

工信部副部长苏波 3 月 8 日出席全国政协十一届五次次会议“大力发展实体经济、打牢经济发展基础”提案办理协商会时透露,在战略性新兴产业领域,由工信部牵头负责的四大新兴产业专项规划最快在两会后颁布实施。

国家确定的七个战略性新兴产业中,工信部牵头负责高端装备制造业、新材料发展、信息产业新一代信息技术、节能与新能源汽车等四个专项规划。苏波表示,工信部已会同发改委、科技部、财政部等有关部委制定完毕上述四个专项规划,近期将发布实施。

苏波表示,除了这四个专项规划,工信部对 15 个细分领域均会制定更为细致的规划,给予政策和资金支持。包括:三网融合、物联网、新能源汽车、智能制造装备、新型显示、云计算及信息安全示范、稀土稀有金属材料及器件、基因工程药物和疫苗、通用化学名药、宽带中国、支线飞机和通用航空、海洋工程装备、重大环保技术和装备、重大技术装备首台(套)、TD-LTE 规模技术试验等。目前,部分行业规划已制定完成,例如智能制造装备、新型显示、稀土稀有金属材料及器件、云计算及信息安全示范等。

2010 年 10 月,国务院发布《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》,明确将出台财税金融等一揽子政策加快培育和发展战略性新兴产业。到 2015 年,战略性新兴产业增加值占国内生产总值的比重要力争达到 8% 左右。