

HT-7U 装置纵场磁体装配位置精度仿真分析

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 装置纵场磁体系统是由 16 个纵场磁体装配后形成的环体。为了确定出这些纵场磁体安装后的中心位置, 在考虑了磁体的制造误差和安装误差的基础上, 建立了 16 个磁体安装位置的数学模型, 通过最小二乘原理, 拟合出纵场磁体的中心位置。利用 AutoCAD2000 的二次开发工具 ObjectARX2000, 采用面向对象的编程技术, 实现了纵场磁体装配位置精度的仿真分析, 仿真结果表明通过用最小二乘原理拟合算法解决了纵场磁体系统中心位置的确定, 为后续部件的装配提供了基准。

关键词: HT-7U; 装配精度; 最小二乘拟合; AutoCAD2000

中图分类号: TL 631.2+4; TH122

文献标识码: A

Simulation analysis of the TF coils position precision in the assembly procedure of the HT-7U device

ZHAO Qing-rong, WU Song-tao

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

Abstract: The toroidal field (TF) magnets system is a loop structure composed of sixteen TF coils. In order to define the center of these TF coils, the mathematic modules are given in thinking of the TF coils manufacture tolerance and the assembly tolerance. The center of these TF coils is fitted with the least square fitting. The simulation analysis is accomplished with the second develop tool ObjectARX2000 on the platform of AutoCAD2000 and the object oriented programming technology. The result of the simulation shows the center of the TF magnets system is defined with the least square fitting, and it can be used to be the base for the later assembly.

Key words: HT-7U; assembly precision; least square fitting; AutoCAD2000

0 引言

HT-7U 超导托克马克核聚变试验装置是中国科学院等离子体物理研究所正在承担研制的国家“九五”大科学工程项目。托卡马克装置是一种磁约束的核聚变装置, 作为 HT-7U 重要核心部件的纵

场磁体, 就是用来提供这种磁约束的闭合环向系统, 它所提供的强大的环向场与环电流产生的角向场合成为多重螺旋形磁场来约束等离子体。考虑到物理设计方面的要求, 在工程建设上, 纵场磁体的

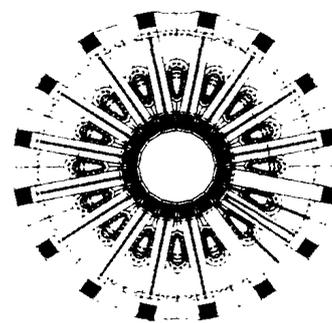
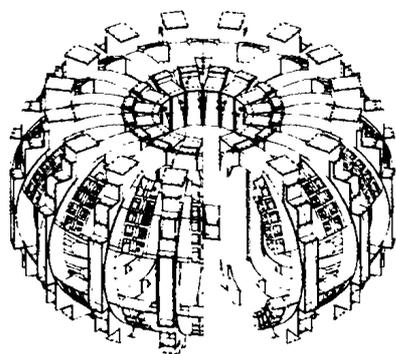


图 1 HT-7U 纵场磁体系统

Fig.1 the toroidal field (TF) magnets of HT-7U

收稿日期: 2003-09-21

基金项目: 国家“九五”大科学工程项目(编号:)

作者简介: 赵庆荣(1971-), 男, 安徽 宿松人, 博士研究生。本文编校: 唐巧凤

安装成环后的中心位置必须要有严格的精度要求。因此,在考虑了各个磁体的制造误差和安装误差后,对整个磁体安装成环的中心位置进行仿真分析就是一件非常必要的工作。整个磁体系统的结构如图 1 所示。

1 纵场磁体安装位置数学模型建立

纵场磁体系统由十六个 D 形线圈盒组成一个环体,其成环后的平面图形如图 1 所示。每个磁体均为扇形形状,理论中心角为 α ,成环后径向理论距离为 r 。在纵场磁体的安装过程中,建立如图 2 所示装配坐标系 xoy ,用数学解析的方法,推导出每个磁体安装后中心点的坐标。磁体安装时,采用架设在装配坐标系坐标圆点的经纬仪来确定磁体安装的水平方向,用接杆千分尺或其他测距仪器来测量径向距离,纵场磁体的测量点均在 D 形线圈盒直线段的中心线上。

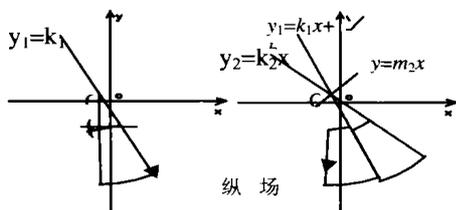


图 2 纵场磁体装配过程数学模型

Fig.2 mathematic model of TF assembly procedure

在安装第一个纵场磁体时,考虑到其加工后扇形中心角度误差为 $\Delta\alpha_1$,径向测距误差为 Δr_1 ,由于测量点在 D 形线圈盒直线段的中心线上,因此磁体定位时可能出现的水平偏转误差 γ (如图 2 (a))也作为安装误差加以考虑。在上述误差的影响下,扇形磁体的圆弧中心移动到了 O_1 处,计算出 O_1 点的坐标为

$$\begin{aligned} x_{o_1} &= -r \sin \gamma \\ y_{o_1} &= r \cos \gamma - r + \Delta r_1 \end{aligned} \quad (1)$$

扇形磁体右侧径向面平面投影直线方程为

$y_1 = k_1 x + b_1$ 式中 k_1 为直线斜率,其值为

$$k_1 = \tan\left(\frac{\pi + \alpha + \Delta\alpha_1}{2}\right) \quad (2)$$

由于直线 $y_1 = k_1 x + b_1$ 经过 o_1 点,把 o_1 点的坐标代

入 (2) 式,得 b_1 的值为

$$b_1 = r \cos \gamma - r + \Delta r_1 + r \sin \gamma \tan\left(\frac{\pi + \alpha + \Delta\alpha_1}{2}\right) \quad (3)$$

由此可以确定第一个纵场磁体右侧径向面平面投影的直线方程。

在安装第二个及以后的纵场磁体时,各个扇形磁体均以前一个磁体的径向面为基准相互贴合,沿着前一个磁体的径向面作径向移动,以调整其安装时的径向距离。因此,在安装误差中将不考虑水平偏转误差,只考虑磁体直线段到装配坐标系原点的径向测距误差 Δr 以及磁体加工制造后的扇形中心角度误差 $\Delta\alpha$ 。

假定第二个磁体的径向测距误差为 Δr_2 ,扇形中心角度制造误差为 $\Delta\alpha_2$ 。由于这些误差因素的影响,磁体的中心将位于直线 $y_1 = k_1 x + b_1$ 上的 O_2 处。过 O_2 点作平行于 D 形磁体直线段的直线 $y = m_2 x + b$ 式中 m_2 为直线斜率,其值为

$$m_2 = \tan\left(\alpha + \gamma + \frac{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2}{2}\right) \quad (4)$$

从坐标系原点 O 到直线 $y = m_2 x + b$ 的距离为 Δr_2 ,

根据点与直线的距离公式有

$$\Delta r_2 = \frac{|b|}{\sqrt{1+m_2^2}} \quad (5)$$

由此得

$$b = -\Delta r_2 \sqrt{1+m_2^2} \quad (6)$$

O_2 点为直线 $y = m_2 x + b$ 与直线 $y_1 = k_1 x + b_1$ 的交点,联立方程组

$$\begin{aligned} y_1 &= k_1 x + b_1 \\ y &= m_2 x + b \end{aligned} \quad (7)$$

解此方程组,并把 (6) 式代入得第二个纵场扇形磁体中心点 O_2 坐标为

$$\begin{aligned} x_{o_2} &= \frac{b_1 + \Delta r_2 \sqrt{1+m_2^2}}{m_2 - k_1} \\ y_{o_2} &= \frac{m_2 b_1 + k_1 \Delta r_2 \sqrt{1+m_2^2}}{m_2 - k_1} \end{aligned} \quad (8)$$

第二个纵场扇形磁体右侧径向面平面投影直线方程为 $y_2 = k_2 x + b_2$ 式中 k_2 为直线斜率,其值为

$$k_2 = \tan\left(\frac{\pi + \alpha + \Delta\alpha_1}{2} + \gamma + \alpha + \Delta\alpha_2\right) \quad (9)$$

直线 $y_2 = k_2x + b_2$ 过 O_2 点, 将 O_2 点的坐标代入

$$y_2 = k_2x + b_2 \text{ 得}$$

$$b_2 = \frac{(m_2 - k_2)b_1 + (k_1 - k_2)\Delta r_2 \sqrt{1 + m_2^2}}{m_2 - k_1} \quad (10)$$

由式 (9)、(10) 即可确定直线 $y_2 = k_2x + b_2$ 。

同理, 根据上面的推算过程, 可以得到第 i ($2 < i < 17$) 个扇形磁体安装后, 其中心点 O_i 的坐标为

$$\begin{aligned} x_{o_i} &= \frac{b_{i-1} + \Delta r_i \sqrt{1 + m_i^2}}{m_i - k_{i-1}} \\ y_{o_i} &= \frac{m_i b_{i-1} + k_{i-1} \Delta r_i \sqrt{1 + m_i^2}}{m_i - k_{i-1}} \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式中 m_i 为过 O_i 点作平行于 D 形磁体直线段的直线 $y = m_i x + b$ 的斜率, k_{i-1} 为第 $i-1$ 个纵场扇形磁体右侧径向面平面投影直线方程 $y_{i-1} = k_{i-1}x + b_{i-1}$ 的斜率, b_{i-1} 为其 y 轴截距, 这三类变量分别取值为

$$\begin{aligned} m_i &= \tan\left[(i-1)\alpha + \gamma + \frac{\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_i}{2} + \sum_{n=2}^i (i-1)\Delta\alpha_n\right] \\ k_{i-1} &= \tan\left[\frac{\pi + \alpha + \Delta\alpha_1}{2} + \gamma + (i-2)\alpha + \sum_{n=2}^{i-1} \Delta\alpha_n\right] \\ b_{i-1} &= \frac{(m_{i-1} - k_{i-1})b_{i-2} + (k_{i-2} - k_i)\Delta r_{i-1} \sqrt{1 + m_{i-1}^2}}{m_{i-1} - k_{i-2}} \end{aligned} \quad (12)$$

2 纵场磁体成环后中心拟合算法

将全部 16 个扇形磁体安装定位后, 就形成了图 1 所示的环形纵场磁体系统。由于磁体安装时有安装误差和制造误差的存在, 因此每个扇形磁体的中心都会偏离其理论安装中心, 形成 16 个离散数据点。根据最小二乘原理, 这 16 个离散点可以用来拟合一个圆方程, 这个拟合圆的圆心即可作为环形纵场磁体系统的中心。设最小二乘圆的方程为

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 - r^2 = 0 \quad (13)$$

可以写成

$$x^2 + y^2 - 2ax - 2by + c = 0 \quad (14)$$

则圆心坐标和半径分别为

$$x_o = a, y_o = b, r = \sqrt{a^2 + b^2 - c} \quad (15)$$

各离散点 P_i ($i=1, 2, \dots, 16$) 与所对应的最小二乘圆上 P' 点的误差为

$$\Delta r_i = x_i^2 + y_i^2 - 2ax_i - 2by_i + c \quad (16)$$

根据最小二乘法的定义, 各点误差的平方和

$$\delta = \sum_{i=1}^{16} (\Delta r_i)^2 = \sum_{i=1}^{16} (x_i^2 + y_i^2 - 2ax_i - 2by_i + c)^2 \quad (17)$$

为最小, 则有

$$d\delta = \frac{\partial \delta}{\partial a} da + \frac{\partial \delta}{\partial b} db + \frac{\partial \delta}{\partial c} dc = 0 \quad (18)$$

由于 a 、 b 、 c 的线性无关性, 可得方程组

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{16} (x_i^3 + y_i^2 x_i - 2ax_i^2 - 2by_i x_i + cx_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^{16} (x_i^2 y_i + y_i^3 - 2ax_i y_i - 2by_i^2 + cy_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^{16} (x_i^2 + y_i^2 - 2ax_i - 2by_i + c) &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

解方程组 (19), 可求出 a 、 b 、 c , 进而可求出圆心坐标、半径。

3 纵场磁体装配位置精度仿真实现

在 AutoCAD2000 的平台上, 利用其二次开发工具 ObjectARX2000 所提供的库函数和头文件的支持来开发 ARX (AutoCAD Runtime eXtension) 应用程序, 利用 Visual C++6.0 作为编译和链接工具, 采用面向对象的程序设计方法来构建零件类。在零件类的设计中, 运用 ObjectARX2000 中 AcDb3dSolid 类的成员函数作为零件类三维图形可视化显示的实现函数, 把零件加工后装配面的形位误差、装配时的安装误差作为其属性值, 并在类中封装了对这些数据的操作函数。零件类定义为

```
Class CPart
{
private:
```

```

double m_manu-tolerance;//制造公差值
public:
virtual AcDb3dSolid* Create (); //创建实体
AcDbObjectID AddEntityToDBs (AcDbEntity* );
//添加到图形数据库
virtual int GetAssemType (); //获得装配体装配类型
void SetTolerance (); //设置制造公差值
double GetTolerance (); //获取制造公差值
.....
};

```

纵场磁体类 CTF 作为 CPart 的继承类, 它添加了自己的属性及相关的操作函数, 其属性值有扇形磁体理论中心角、磁体中心角制造误差、磁体安装时的平面偏转误差、磁体安装后径向测距误差。纵场磁体类可定义为

```

CTF: public CPart
{
private:
double m_angle;//理论中心角
double m_rotation_angle;//平面偏转误差角
double m_radius_tolerance;//径向测距误差
double m_manu_tolerance;//中心角制造误差
public:
void Set_Angle(double angle);//设置理论
中心角
void Set_Rotation_Angle(double
rotation_angle);//设置平面偏转误差角
void Set_Radius_Tolerance(double
radius_torance);//设置径向测距误差
void Set_Manu_Tolerance(double
manu_tolerance);//设置中心角制造误差
double Get_Angle (); //获取理论中心角
double Get_Rotation_Angle (); //获取平面
偏转误差角
double Get_Radius_Tolerance (); //获取径
向测距误差
double Get_Manu_Tolerance (); //获取中心
角制造误差
}

```

在可视化的分析系统中, 采用二叉树数据结构来存储各装配体, 并采用二叉树后序遍历算法, 进

行装配过程仿真, 在 AutoCAD2000 平台上建立三维装配模型。利用 VC++6.0 中对话框数据交换机制, 来设置各磁体的制造误差、安装误差, 并对各磁体的中心坐标值进行计算, 最终完成拟合圆圆心坐标的计算。图 3 为纵场磁体系统中心拟合计算对话框。

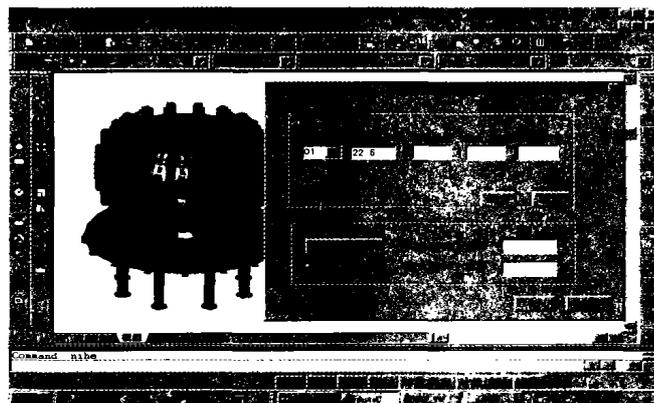


图 3 纵场磁体系统中心拟合计算

Fig.3 the fitting of TF magnets center

4 结 论

纵场磁体系统的安装是整个 HT-7U 超导托卡马克装置总装过程中最为关键的一个环节, 十六个纵场磁体成环后的中心位置将作为后续极向场磁体系统、真空室内部部件安装的基准。因此, 纵场磁体系统的中心位置在工程建设中应有严格的控制和确定的数据。本文利用数学解析的方法推导出每个纵场磁体安装后的中心位置, 并根据最小二乘原理算法, 拟合出整个纵场磁体系统成环后的中心位置, 从而有效地解决纵场磁体成环后中心位置的确定。

参考文献:

- [1] 武松涛. HT-7U 装置主机结构及总装介绍[M]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所,2001,6-10.
- [2] 王能超. 数值分析简明教程[M]. 北京:高等教育出版社,2000,57-60.
- [3] 王琨琦, 李平. 一种光滑曲线的圆弧拟合新方法[J]. 西安工业学院学报,1994,14(3):243-247.
- [4] Sartaj Sahni. 数据结构、算法与应用—C++语言描述[M]. 北京:机械工业出版社,2000,260-263.
- [5] 高艳明, 李利, 杨志刚等. 精通 AutoCAD 三维设计与开发[M]. 北京:中国铁道出版社,2002,268-278.