

ITER CC 校正场线圈绕制数学模型的 建立及其计算*

解 淞, 文 军, 许留伟*

(中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了实现 ITER CC 校正场线圈绕线机自动绕制线圈, 就线圈绕制过程进行了运动学分析。分析的关键在于预弯点运动轨迹数学模型的推导, 经过一系列推导得到了参与线圈绕制的四根驱动轴的数学关系。对于具体线圈绕制过程进行了数据计算, 得出四根驱动轴随时间变化的速度函数, 构成了绕线机电控部分数学基础。研究结果表明该绕线机自动绕制线圈是可行的。

关键词: 绕线机; 四轴联动; 预弯点轨迹数学模型

中图分类号: TB273

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)05-0018-04

Building of mathematical model of ITER correction coil winding and its calculation

XIE Song, WEN Jun, XV Liu-wei

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

Abstract: Aiming at realizing ITER correction coil automatically winded, the kinematic analysis of the coil winding process was made. Mathematical models of the pre-bend point trajectory was derived, and the mathematical relationship of the four drive shafts which have been involved in winding coils was gotten through a series of derivation. Calculations for the specific winding coils process were made, and the four drive shafts time-varying velocity functions which constituted the mathematical basis for the electrical control part were gotten. The results indicate that it is possible to wind coils automatically.

Key words: winding machine; four-axis linkage; mathematical model of the pre-bend point trajectory

0 引 言

ITER 全称国际热核实验聚变堆, 其科学目标是建造一个人造小太阳, 超导线圈是其组成部分。课题目标是在 HT-7U 的 CICC 特种绕线机电控系统研制基础上, 开发 ITER CC (correction coil) 校正场线圈绕线机电控系统, 以期高效率的绕制校正场线圈。特种绕线机是通过手动控制来实现线圈的绕制, 而 ITER CC 校正场线圈绕线机要求自动绕制两种校正场线圈, 包括 side 线圈 (瓦片形) 和 bottom&top (平面扇形) 线圈两种线圈。

绕制线圈过程的数学模型是实现线圈自动绕制的基础, 本研究对此进行研究, 通过数学分析最终得到绕制线圈过程的数学模型, 并且将 side 线圈和 bottom&top 线圈的具体数据代入模型计算, 得到了绕制线圈过程的具体数学公式, 为绕线机电控部分打下了数学基础, 期望在开放式的数控系统的基础上完成 ITER CC 校正场线圈绕线机电控系统的设计。

1 绕线机加工方案概述

ITER CC 绕线机机械系统由放缆机构放缆、校直

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 国家 ITER 计划专项支持—我国承担 ITER 计划任务相关科学问题和关键技术研究资助项目 (2007IB200)

作者简介: 解 淞 (1984-), 女, 山东青岛人, 主要从事数控机床、自动化技术方面的研究。E-mail: jiesang5@tom.com

通信联系人: 许留伟, 男, 副研究员。E-mail: Xulw@ipp.ac.cn

机构进给、预弯进给及压弯进给、回转台回转、预弯架移动、回转台移动 7 根驱动轴协调运作构成^[1-3]。机械系统结构简图如图 1 所示。该绕制是无张力绕制,先预弯成型后再入模进行绕制。为了成功入模,在控制上有点动控制和自动控制两种方式。

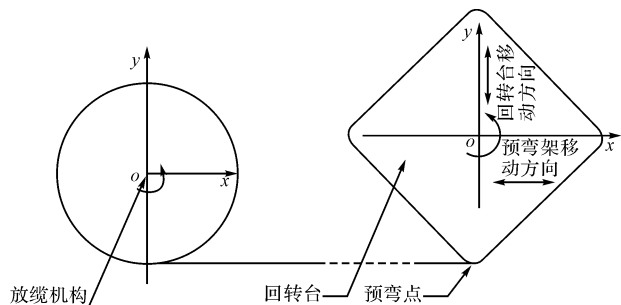


图 1 ITER CC 线圈绕制的机械系统结构简图

导体以给定导线进给速度绕制时,线圈模具以相应的角速度旋转(通过回转台回转实现)。根据线圈绕制的工艺要求,预弯点应当始终处在导体线圈圆弧的切点位置上。当线圈围绕几何中心旋转时,切线方向固定不变,而切点(即预弯点)不是固定不变的,它的运动轨迹可以由 X 、 Y 两轴移动合成,即预弯点的轨迹由 X 、 Y 两轴移动量与回转台的旋转角度共同决定。

X 轴方向移动由预弯架实现, Y 轴方向移动由回转台实现。而线圈模具的旋转角速度由预弯进给速度决定,所以绕制动作由四根驱动轴协调运作实现,分别是导线进给、回转台回转、预弯架移动、回转台移动,找出四轴联动数学关系以构成自动绕制线圈的数学基础。

2 四轴联动数学关系推导

2.1 预弯点(切点)运动轨迹数学模型的推导

以线圈的几何中心点为原点作直角坐标系, X 轴向右, Y 轴向上^[4]。对一段圆弧,其对应的圆心坐标 $O'(X', Y')$,过该点作平行于 Y 轴的直线,并交于圆弧曲线上的点 $A(X, Y)$,则 $O'A$ 线段即该圆弧段的曲率半径 R ,点 $A(X, Y)$ 为该圆弧段平行于 Y 轴的切线的切点。

设圆心坐标 $O'(X', Y')$ 及曲率半径 R 为已知,则切点 $A(X, Y)$ 的表达式为:

$$\begin{aligned} X &= X' \\ Y &= Y' + R \end{aligned} \quad (1)$$

曲线以几何中心点为旋转圆心逆时针方向旋转 α 角,圆心坐标从 $O'(X', Y')$ 移到 $O''(X'', Y'')$,切点 $A(X, Y)$ 移到 $B(X_b, Y_b)$,圆心坐标 $O''(X'', Y'')$ 表达式为:

$$\begin{aligned} X'' &= X' \times \cos(\alpha) - Y' \times \sin(\alpha) \\ Y'' &= X' \times \sin(\alpha) + Y' \times \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

切点坐标 $B(X_b, Y_b)$ 表达式为:

$$\begin{aligned} X_b &= X'' = X' \times \cos(\alpha) - Y' \times \sin(\alpha) \\ Y_b &= Y'' + R = X' \times \sin(\alpha) + Y' \times \cos(\alpha) + R \end{aligned} \quad (3)$$

对于旋转角度 α ,切点 $B(X_b, Y_b)$ 相对切点 $A(X, Y)$ 在 X 轴和 Y 轴的移动量为:

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_b - X \\ &= X' \times \cos(\alpha) - Y' \times \sin(\alpha) - X' \\ &= X' \times \cos(\alpha) - Y' \times \sin(\alpha) - X' \\ \Delta Y &= Y_b - Y \\ &= X' \times \sin(\alpha) + Y' \times \cos(\alpha) + R - Y' - R \\ &= X' \times \sin(\alpha) + Y' \times \cos(\alpha) - Y' \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 回转台旋转角速度推导

预弯架在行车上,由行车实现 X 轴方向移动,移动量即为 ΔX ; Y 轴运动由回转台平移实现,移动量为 ΔY 。导线进给速率设为 F ,回转台旋转角速度为 ω 。在直线段成型中,回转台随着 F 同步移动。在圆弧段成型中,已完成加工的圆弧对应的弧度为 θ ,圆弧半径为 R ,如图 2 所示。由图 2 可见,旋转角速度取决于 F 、 R 。

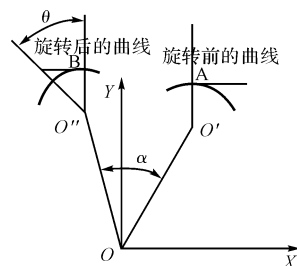


图 2 圆弧旋转 α 角度

2.3 预弯点速度时间函数推导

直线段预弯点速度为 F ,圆弧段预弯点速度分解为 X 轴方向的速度 U ,即预弯架移动速度; Y 轴方向的速度 W ,即回转台移动速度。

圆弧段预弯架移动速度时间函数 $U(t)$:

$$\begin{aligned} U(t) &= \frac{d\Delta X}{dt} = \frac{d(X' \cos \omega t - Y' \sin \omega t - X')}{dt} \\ &= -\omega X' \sin \omega t - \omega Y' \cos \omega t \end{aligned} \quad (6)$$

直线段预弯架移动速度时间函数 $F(t) = F$;

圆弧段回转台移动速度时间函数 $W(t)$:

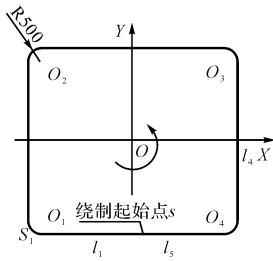
$$\begin{aligned} W(t) &= \frac{d\Delta Y}{dt} = \frac{d(X' \sin \omega t + Y' \cos \omega t - Y')}{dt} \\ &= \omega X' \cos \omega t - \omega Y' \sin \omega t \end{aligned} \quad (7)$$

3 side 线圈绕制过程具体分析

3.1 side 线圈的计算数据

Side 线圈先在 $X-Y$ 平面预弯绕制,后在空间成型,平面 side 线圈绕制过程分为 9 段,4 段圆弧和 5 段

直线,4 段圆弧逆时针记为 $S_1, S_2 \dots, S_4$, 对应圆心记为 $O_1(X_1, Y_1), O_2 \dots, O_4$ 。5 段直线顺时针记为 $L_1, L_2 \dots, L_5$ 。设定 X 轴向右, Y 轴向上, 以几何中心 O 为旋转中心, 导图 3 side 线圈平面坐标系图线向右进给, 回转台逆时针旋转, 如图 3 所示。



3.2 side 线圈的计算过程

由 cad 图^[5]得到数据, $L_1 = L_2/2 = 6\,727.6/2 = 3\,363.8\text{ mm}$, $R = 500\text{ mm}$, 设定导线进给速度为 $1\,000\text{ mm/min}$, $\omega = 2\text{ rad/min}$ 。

按线圈转一周分析, 初始状态各圆弧圆心坐标分别为 $(-3\,363.8, -3\,363.8)$ 、 $(-3\,363.8, 3\,363.8)$ 、 $(3\,363.8, 3\,363.8)$ 、 $(3\,363.8, -3\,363.8)$, 旋转对应角度后的圆心坐标都变为 $(-3\,363.8, -3\,363.8)$ 。

按式(6)计算得到 4 段圆弧段预弯架移动速度时间均为:

$$U(t) = 6\,727.6 \sin 2t + 6\,727.6 \cos 2t = 9\,514 \sin(2t + \pi/4)$$

$$t \in [0, 0.785], U \in [6\,727.6, 9\,514]$$

5 段直线段预弯架移动速度时间函数为:

$$F(t) = 1\,000$$

按式(7)计算得到 4 段圆弧段回转台移动速度时间均为:

$$W(t) = -6\,727.6 \cos 2t + 6\,727.6 \sin 2t = 9\,514 \sin(2t - \pi/4)$$

$$t \in [0, 0.785], W \in [-6\,727.6, 6\,727.6]$$

4 bottom&top 线圈绕制过程具体分析

4.1 bottom&top 线圈的计算数据

导线向右进给, 绕制起始点为 S , 坐标原点为几何

$$U(t) = \begin{cases} -1\,671.1 \cos 0.268t_1 \\ 4\,805.6 \cos 4t_2 + 10\,436.8 \sin 4t_2 \\ 9\,909.2 \cos 4t_3 - 2\,769.6 \sin 4t_3 \\ -2\,030.4 \cos 0.350t_4 + 888.8 \sin 0.350t_4 \\ -1\,655.12 \cos 4t_5 + 10\,154.8 \sin 4t_5 \\ 9\,909.2 \cos 4t_6 + 5\,813.2 \sin 4t_6 \\ -1\,546.4 \cos 0.268t_7 - 699.2 \sin 0.268t_7 \end{cases}$$

两段直线段预弯架移动速度时间函数为:

$$F(t) = 2\,000;$$

中心 O ; X 轴向右, Y 轴向上。bottom&top 线圈坐标系图如图 4 所示。

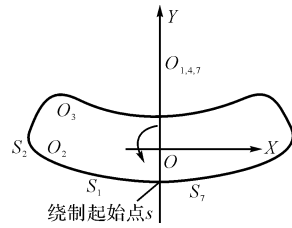


图 4 bottom&top 线圈坐标系图

两段直线段记为 L_1, L_2 ; 7 段圆弧顺时针标记为 $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7$; 圆心分别为 $O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6, O_7$, 对应坐标记为 $(X_1, Y_1), \dots, (X_7, Y_7)$ 。对应圆弧半径分别是 $7\,471.5, 4 \times 500, 5\,715$; 弧长分别为 $3\,172.99, 834.86, 729.79, 4\,715.91, 729.89, 834.86, 3\,172.99$; 直线段长为 760.67 ; 圆弧对应弧度分别为 $24.33^\circ, 95.67^\circ, 83.64^\circ, 47.28^\circ, 83.64^\circ, 95.67^\circ, 24.33^\circ$ 。

4.2 计算过程

初始圆心坐标分别为 $(0, 6\,332.5), (-2\,872.45, -19.75), (-2\,491.6, 639.01), (0, 6\,332.5), (2\,491.6, 639.01), (2\,872.45, -19.75), (0, 6\,332.5)$ 。各圆弧旋转相应角度后对应的圆心坐标对应为 $(0, 6\,332.5), (-2\,609.2, -1\,201.4), (692.4, -2\,477.3), (2\,539.3, -5\,801.1), (-2\,538.7, 413.7), (-1\,453.3, -2\,477.7), (2\,608.9, 5\,770.1)$ 。

设定导线进给速度为 $2\,000\text{ mm/min}$, 进给轴进给弧长为 S , 对应回转台旋转角度为 θ , 旋转角速度 $\omega_1 = F/R_1 = 2\,000/7\,471.5 = 0.268\text{ rad/min}$; 旋转角速度 $\omega_2 = F/R_2 = 2\,000/500 = 4\text{ rad/min}$; 旋转角速度 $\omega_3 = F/R_3 = 2\,000/5\,715 = 0.350\text{ rad/min}$ 。

按式(6)计算得到 7 段圆弧段预弯架移动速度时间函数为:

$$U(t) = \begin{cases} t \in [0, 1.59], U \in [-1\,671.1, -1\,522.7] \\ t \in [0, 0.417], U \in [4\,805.6, 11\,488] \\ t \in [0, 0.365], U \in [-1\,654.9, 9\,909.2] \\ t \in [0, 2.36], U \in [-2\,030.4, -917.9] \\ t \in [0, 0.365], U \in [-1\,654.8, 9\,909.0] \\ t \in [0, 0.417], U \in [4\,805.6, 11\,488] \\ t \in [0, 1.59], U \in [-1\,671.1, -1\,546.4] \end{cases}$$

按式(7)计算得到 7 段圆弧段回转台移动速度时间函数为:

$$W(t) = \begin{cases} -1\,671.1 \sin 0.268t_1 & t \in [0, 1.59], U \in [-688.5, 0] \\ 4\,805.6 \sin 4t_2 - 10\,436.8 \cos 4t_2 & t \in [0, 0.417], U \in [5\,813.2, 10\,436.8] \\ 9\,909.2 \sin 4t_3 + 2\,769.6 \cos 4t_3 & t \in [0, 0.365], U \in [2\,769.6, 10\,287] \\ 2\,030.4 \sin 0.350t_4 - 888.8 \cos 0.350t_4 & t \in [0, 2.36], U \in [-882, 694.2] \\ -1\,655.12 \sin 4t_5 - 10\,154.8 \cos 4t_5 & t \in [0, 0.365], U \in [-10\,289, -2\,769.5] \\ 9\,909.2 \sin 4t_6 - 5\,813.2 \cos 4t_6 & t \in [0, 0.417], U \in [-5\,813.2, 10\,287] \\ -1\,546.4 \sin 0.268t_7 + 699.2 \cos 0.268t_7 & t \in [0, 1.59], U \in [0, 699] \end{cases}$$

4.3 结果分析

由分析结果可知,对称圆弧段速度是反方向变化的,存在少许误差;预弯架平移速度范围较大,初步设想通过降低导线进给速率来降低速率。

5 结束语

经过推导运算,本研究得到了 side 线圈和 bottom&top 线圈绕制时回转台旋转角速度,回转台移动速度时间函数,预弯架移动速度时间函数,同时由这 3 个函数可以实现对线圈预弯点的轨迹追踪,构成绕线机电控系统自动绕制线圈的数学基础。

经研究,确定该绕线机系统是开放式的数控系统,因其有模块化、动态配置系统,且具有可移植、可扩展性^[6]等特点,硬件采用“PC 机 + 可编程运动控制器”的模式^[7],工控机通过编写控制软件^[8]将这几个速度函数进行编译,通过输入数控程序,由数控程序解释器进行逻辑结构检查、词法检查、语法检查,提取有效的加工数据^[9],输入到运动控制器,从而控制交流伺服电机,实现线圈的自动加工。

本研究只是初步研究了绕线机电控系统构成的数学基础和软硬件构成,具体如何实现有待进一步深入

研究。

参考文献 (References):

- [1] 郁杰,高大明,文军,等.复杂截面铠装超导电缆导体线圈的无张力绕制技术及绕线机:中国,99107575.7[P]. 1999-11-10.
- [2] 郁杰,高大明. HT-7U 超导专用绕线机预弯成型机能的设计及实现[J]. 机电工程,1999,16(5):181-183.
- [3] 林锦实. 基于 PLC 的绕线机自动控制系统[J]. 机电工程技术,2009,38(4):48-50.
- [4] 郁杰. HT-7U 超导托卡马克装置 CICC 纵场实验线圈的研制[D]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所,1999.
- [5] 冯如设计在线. AutoCAD 2008 中文版自学手册 完全实例篇[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [6] 张明亮,解旭辉,李圣怡. 开放性数控技术的发展[J]. 机电工程,1999,16(4):65-67.
- [7] 白海清,彭玉梅,何宁. 基于 PMAC 的数控系统软件开发研究[J]. 机床与液压,2007,35(2):59-61.
- [8] 蔡树林. 板料渐进成形数控系统的研究与开发[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2007.
- [9] 郭然. 数控程序代码解释器及图形显示研究[J]. 机电工程,2003,20(5):7-9.

[编辑:张翔]

《机电工程》杂志 2010 年编辑委员会会议在杭州召开

《机电工程》杂志 2010 年编辑委员会会议于 2010 年 4 月 28~29 日在杭州召开,杂志编委会副主任、中国科学院院士闻邦椿,以及来自上海交通大学、东北大学、吉林大学、厦门大学、东南大学、燕山大学、华东理工大学、浙江大学等 12 所高校的 18 位教授编委出席了会议。杂志编辑部的全体工作人员也参加了会议。

本次会议由《机电工程》杂志主编赵群主持。副主编、浙江大学唐任仲教授代表杂志编委会主任、浙江大学陈子辰教授作了发言。副主编罗向阳向与会编委就杂志现状、发展目标及改进措施进行了详细的介绍。

会上,闻邦椿院士首先充分肯定了机电工程杂志近年来学术上取得的进步和成就,希望各位编委要积极主动地为进一步提高杂志的论文质量,为刊物的进一步发展尽心尽力,为我国机电事业的进步尽职尽责。闻院士在发言时指出:《机电工程》在具有广泛性的同时其自身也存在着优势,那就是机电结合的唯一性。为我刊的进一步发展,闻院士以自身为表率,亲笔写下了“坚持继承与创造相结合,为发展我国机电工业作出我们的贡献”。会上编委们就如何提高办刊质量、学术地位,进行了热烈的讨论,并提出了很多宝贵的意见。

最后,杂志主编赵群再次代表《机电工程》杂志对各位编委们的鼎力支持表示衷心感谢,并表示接下来的工作重点将是依据各编委的意见,立足现实,进行研究改进,以进一步提升《机电工程》杂志的整体水平。

本次编委会议取得了圆满成功。