

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.019

# 电机定子自动绕线运动控制策略研究<sup>\*</sup>

袁京鹏<sup>1</sup>, 高 冲<sup>2</sup>, 潘 骏<sup>2\*</sup>, 陈文华<sup>2</sup>, 金 晶<sup>1</sup>, 王颖洁<sup>1</sup>, 贺青川<sup>2</sup>

(1. 杭州奥士玛数控设备有限公司, 浙江 杭州 311113;

2. 浙江理工大学 浙江省机电产品可靠性技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对电机定子自动绕线的运动控制问题,对电机定子骨架结构特征进行了分析。结合穿线法绕线方式,建立了由导针垂直运动和骨架旋转运动复合而成的腰形绕线轨迹数学模型,提出了腰形轨迹两端分别为圆弧、椭圆、劣弧时的运动控制策略;利用 ADAMS 软件进行了电机定子自动绕线的运动仿真,得到了两端弓高变化对绕线效率及绕线过程中加速度变化的影响;针对弓高为椭圆的情况,进行了样机测试和理论计算。研究结果表明,运动仿真、理论计算和样机测试三者结果基本一致;提出的腰形绕线轨迹数学模型和运动控制策略能够较好地解决电机定子自动绕线运动控制问题。

**关键词:**绕线机;定子绕线;运动控制策略;ADAMS

**中图分类号:**TP273;TH39

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2016)07-0873-06

## Motion control strategy of automatic winding machine for motor stator

YUAN Jing-peng<sup>1</sup>, GAO Chong<sup>2</sup>, PAN Jun<sup>2</sup>, CHEN Wen-hua<sup>2</sup>,  
JIN Jing<sup>1</sup>, WANG Ying-jie<sup>1</sup>, HE Qing-chuan<sup>2</sup>

(1. Hangzhou OZMA CNC Equipment Co., Ltd., Hangzhou 311113, China; 2. Key Laboratory of Reliability Technology for Mechanical and Electrical Product of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of motion control of motor stator winding, according to the motor stator frame structure and the threading method of winding way, a mathematical model was established which could be used to describe the enameled wire waist shape trajectory combining vertical movement of the guide needle and the rotation of the frame. The motion control strategy was presented for arc, ellipse, and minor ends of the waist shape trajectory. The virtual prototype of the motor stator winding machine was established by using the ADAMS software. The efficiency of winding and variation of acceleration under different chord of the both ends were identified through motion simulation. The Acceleration of prototype was tested and theoretical calculated under ellipse chord. The results indicate that the motion simulation, theoretical calculation and test results are basically consistent. The mathematical model and motion control strategy could address the problem of automatic winding motion control of the motor stator.

**Key words:** winding machine; stator winding; motion control strategy; ADAMS

## 0 引 言

绕线机是用于绕制各类电磁线圈的专用设备,根

据绕线方式可将绕线机分为3类:平绕机、飞叉绕线机和穿线绕线机。平绕机是由主轴带动骨架旋转,配合三维机构空间移动定位控制漆包线,使漆包线在骨架

收稿日期:2016-03-09

基金项目:杭州市重大科技创新资助项目(20142011A17)

作者简介:袁京鹏(1980-),男,山东青岛人,工程师,主要从事自动化装备研究和管理方面的研究。E-mail: yuanjingpeng 2003@126.com

通信联系人:潘 骏,男,教授,硕士生导师。E-mail: Panjun@zstu.edu.cn

外层以螺旋线排列的绕线机,通常用于变压器、电感等线圈。飞叉绕线机绕制时骨架固定不动,以侧边主轴带动飞叉旋转将漆包线绕制在骨架的外槽上,通常用于电机转子和十字仪表线圈。穿线绕线机是由导针牵引漆包线往复直线运动,并配合骨架旋转,将漆包线绕制在骨架的内环槽上,通常用于电机定子和特殊产品。

对于平绕机和飞叉绕线机,要实现线圈绕制的精密性,必须保证绕线主运动和排线运动的协调配合。于克龙<sup>[1]</sup>研究了绕线机排线运动与线圈绕制中层面形状平整的关系,并据此给出了进给运动的控制方法。潘骏<sup>[2]</sup>通过分析绕线时层间匀速运动排线和端点折返排线原理,建立了基于轴向压力补偿的层间匀速运动和端点折返运动精密排线数学模型。翟迎迎<sup>[3]</sup>以控制绕线过程中电磁线与线嘴之间夹角基本恒定,减小电磁线与线嘴之间摩擦力为目标,提出了排线轴高速折返运动控制算法。惠晶<sup>[4]</sup>针对变压器绕线的不足,提出了一种高动态响应和高精度的卷绕——排线双轴协调运动的控制系统。李乐等<sup>[5]</sup>针对绕线机多轴同步问题进行了研究,提出了多电机同步控制算法,并建立了电机运动控制模型,实现了多轴电机精确同步联动。张兵辉<sup>[6]</sup>设计了一种基于 10MC 总线型运动控制器的 16 头高速绕线机。王新艳<sup>[7]</sup>设计了一种基于 PLC 的双飞叉绕线机控制系统。赖兴余<sup>[8]</sup>设计了转子绕线机的控制系统硬件结构和控制系统软件,提高了绕线质量。陈文华<sup>[9]</sup>运用有限元法对绕线机的高速主轴单元进行了动力学设计、分析,研制了转速高达 15 000 r/min 的主轴单元。张良<sup>[10]</sup>基于 Pro/TOOL-KIT 和 ANSYS 软件,建立了绕线机主轴箱的参数化设计与分析模型,提高了主轴箱的设计效率。平绕机和飞叉绕线机技术已趋于成熟。

由于穿线绕线机的主运动是由导针牵引漆包线的往复直线运动,在两端需要加减速,会造成整机的振动,其控制要比平绕法和飞叉绕法的连续旋转主运动复杂得多。由于绕线效率越高,要求的往复直线运动速度越快,两端的加减速也越大,如何达到两者的平衡,是造成目前穿线绕线机自动化水平较低的主要原因。在加减速控制算法<sup>[11-12]</sup>研究中,主要是控制加速度连续无突变,降低因加速度不连续而引起的设备振动。

本研究拟建立由导针垂直运动和骨架旋转运动复合而成的电机定子腰形绕线轨迹数学模型,并研究其运动控制策略;笔者利用 ADAMS 软件建立其虚拟样机,仿真分析绕线效率及绕线过程中加速度变化规律,并利用样机试验进行验证,解决电机定子自动绕线的

运动控制问题。

## 1 定子自动绕线原理

### 1.1 电机定子骨架

电机定子骨架结构如图 1 所示。

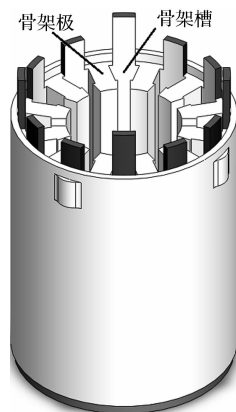


图 1 电机定子骨架三维示意图

电机定子骨架结构为多极骨架,骨架极数多为 4、6、8、12 和 24 等,每极左右两侧为扇形骨架槽。电机定子绕线是将漆包线在每一骨架极两侧的骨架槽中运动,绕制在电机定子骨架的每一极上。

### 1.2 漆包线运动轨迹数学模型

主轴系统首先将所加工骨架极旋转到指定位置,排线系统经  $X$  向、 $Y$  向及  $Z$  向运动,使导针运动到绕线起始线槽处(如图 2 所示),启动绕线程序,绕线时漆包线由导针带动。

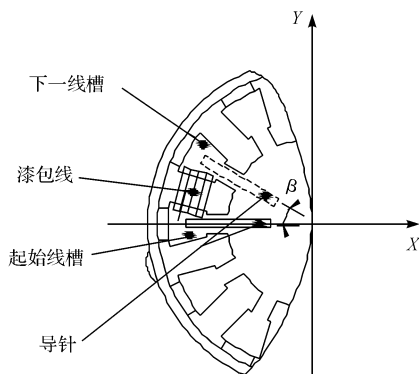


图 2 绕线轨迹示意图(12 极骨架)

导针带动漆包线在电机定子骨架槽内以速度  $v$  匀速直线运动,在定子骨架上下两端运动时,考虑到绕线效率的问题,两端运动为组合运动,即导针在竖直方向( $Z$  方向)减速为 0,然后反向加速到速度  $-v$ ,同时定子骨架旋转一个槽角  $\beta$ ,故在两端的组合运动为一段弧线。基于以上分析,笔者建立腰形绕线轨迹数学模型,模型如图 3 所示。

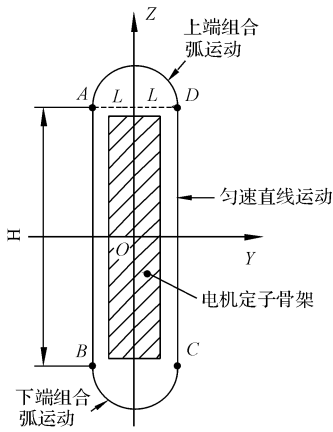


图3 腰形绕线轨迹数学模型

$Z$  向—线杆垂直运动方向; $Y$  向—骨架旋转方向;  
 $H$ —上下定子骨架两端的距离; $2L$ —骨架旋转一个槽角  
 $\beta$  对应的弧长

如图3所示,导针绕线起点为 $A$ 点, $Z$ 向直线 $AB$ 段以 $v$ 做匀速直线运动。导针到达 $B$ 点时,骨架开始旋转运动,同时导针 $Z$ 向先作减速运动,然后反向加速运动,导针 $Z$ 向直线运动和骨架旋转运动合成弧 $\widehat{BC}$ 运动。导针到达 $C$ 点时,骨架停止转动,导针 $Z$ 向运动速度变为反向,此后导针 $Z$ 向直线 $CD$ 段以 $v$ 做匀速直线运动;导针到达 $D$ 点时,骨架开始反向旋转运动,同时导针 $Z$ 向先作减速运动,然后反向加速运动,导针 $Z$ 向直线运动和骨架旋转运动合成弧 $\widehat{DA}$ 运动,导针回到 $A$ 点。至此导针带动漆包线绕定子骨架旋转一周。图3所示导针运动轨迹为导针在电机定子骨架极根部(即靠近定子骨架内壁处)的运动轨迹,漆包线由导针牵引完成如图3所示轨迹后,由于漆包线内的张力作用将漆包线缠绕在电机定子骨架极上,在导针按图3数学模型运动一周时, $X$ 轴运动带动导针运动一个线径的距离,故而漆包线可以均匀排列在电机定子骨架上,即完成如图2所示漆包线运动轨迹。

## 2 定子自动绕线运动控制策略

### 2.1 $Z$ 、 $Y$ 向组合运动

3种两端组合运动如图4所示。

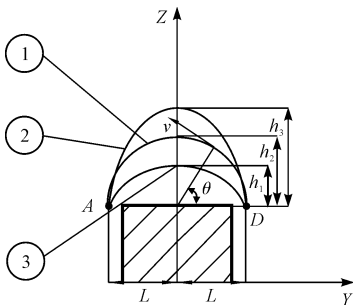


图4 3种两端组合运动

由于定子骨架的半径和极数不同,即对于不同型号的电机定子,考虑到绕线效率问题,设定不同的弓高 $h$ , $Z$ 、 $Y$ 向组合运动可分为3种情况:(1)半圆( $h_2$ 等于 $L$ );(2)椭圆( $h_3$ 大于 $L$ );(3)劣弧( $h_1$ 小于 $L$ )。

#### 2.1.1 圆弧轨迹数学模型

由圆的参数方程可得:

$$\begin{cases} S_{Rz} = R \cdot \sin\theta + S_{Rz0} \\ S_{RY} = R \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_{Rz}$ , $S_{RY}$ —圆弧轨迹 $Z$ 向位移和 $Y$ 向位移; $S_{Rz0}$ — $D$ 点 $Z$ 向坐标; $R$ —圆弧半径, $R = L$ 。

本研究对式(1)两边对时间 $t$ 求导得速度 $v$ ,对时间 $t$ 求二阶导得加速度 $a$ ,则可得 $Z$ 向及 $Y$ 向运动方程:

$$Z \text{ 向: } \begin{cases} a_{Rz} = -\frac{v_R^2}{L} \sin \frac{v_R}{L} t \\ v_{Rz} = v_R \cos \frac{v_R}{L} t \\ S_{Rz} = L \sin \frac{v_R}{L} t + S_{Rz0} \end{cases} \quad (2)$$

$$Y \text{ 向: } \begin{cases} a_{RY} = -\frac{v_R^2}{L} \cos \frac{v_R}{L} t \\ v_{RY} = -v_R \sin \frac{v_R}{L} t \\ S_{RY} = L \cos \frac{v_R}{L} t \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a_{Rz}$ , $v_{Rz}$ —圆弧轨迹 $Z$ 向加速度和速度; $a_{RY}$ , $v_{RY}$ —圆弧轨迹 $Y$ 向加速度和速度; $v_R$ —匀速圆周线速度。

因 $Y$ 向运动为骨架旋转角 $\theta$ 对应弧长,并不是骨架旋转运动方程,故要将 $Y$ 向运动转化为 $Y_R$ ( $Y_R$ 为骨架旋转运动方程),将上述 $Y$ 向运动速度除以对应骨架旋转半径 $R'$ ,即可得到 $Y_R$ 向角速度,并对 $Y_R$ 角速度方程两边对时间 $t$ 求导、积分得角加速度和转角:

$$Y_R \text{ 向: } \begin{cases} a_R = -\frac{v_R^2}{LR'} \cos \frac{v_R}{L} t \\ \omega_R = -\frac{v_R}{R'} \sin \frac{v_R}{L} t \\ \varphi_R = \frac{L}{R'} \cos \frac{v_R}{L} t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $a_R$ , $\omega_R$ , $\varphi_R$ —圆弧轨迹骨架旋转角加速度、角速度和转角; $R'$ —骨架旋转半径,且 $L/R' = \beta/2$ 。

#### 2.1.2 椭圆轨迹数学模型

由椭圆参数方程可得:

$$\begin{cases} S_{Ez} = h_3 \cdot \sin\theta + S_{Ez0} \\ S_{EY} = L \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S_{Ez}$ , $S_{EY}$ —椭圆轨迹 $Z$ 向位移和 $Y$ 向位移; $S_{Ez0}$ — $D$ 点 $Z$ 向坐标。

对(5)式两边对时间  $t$  求导得速度  $v$ , 对时间  $t$  求二阶导得加速度  $a$ , 则得到  $Z$  向及  $Y$  向运动方程:

$$Z \text{ 向: } \begin{cases} a_{Ez} = -\frac{v_E^2}{h_3} \sin \frac{v_E}{h_3} t \\ v_{Ez} = v_E \cos \frac{v_E}{h_3} t \\ S_{Ez} = h_3 \sin \frac{v_E}{h_3} t + S_{Ez0} \end{cases} \quad (6)$$

$$Y \text{ 向: } \begin{cases} a_{Ey} = -\frac{v_E^2 L}{h_3^2} \cos \frac{v_E}{h_3} t \\ v_{Ey} = -\frac{v_E L}{h_3} \sin \frac{v_E}{h_3} t \\ S_{Ey} = L \cos \frac{v_E}{h_3} t + S_{Ey0} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $a_{Ez}, v_{Ez}$ —椭圆轨迹  $Z$  向加速度和速度;  $a_{Ey}, v_{Ey}$ —椭圆轨迹  $Y$  向加速度和速度;  $v_E$ — $Z$  向初速度。

同理由式(4)可推出  $Y_E$  ( $Y_E$ —骨架旋转运动方程):

$$Y_E \text{ 向: } \begin{cases} a_E = -\frac{v_E^2 L}{h_3 R'} \cos \frac{v_E}{h_3} t \\ \omega_E = -\frac{v_E L}{h_3 R'} \sin \frac{v_E}{h_3} t \\ \varphi_E = \frac{L}{R'} \cos \frac{v_E}{h_3} t \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $a_E, \omega_E, \varphi_E$ —椭圆轨迹骨架旋转角加速度、角速度和转角。

上述各参数方程未考虑上下半圆、半椭圆所在象限问题, 加速度  $a$ 、速度  $v$  及位移  $S$  的正负, 在三角函数中加初相  $\varphi$  调整即可。时间均设置从 0 时刻起, 若初始时间为  $t_0$ , 将上式中  $t$  换成  $(t - t_0)$  即可。劣弧轨迹数学模型, 可将其化为长轴为  $L$  的椭圆轨迹模型, 故参照 2.1.2 数学模型即可。

## 2.2 Z 向匀速直线运动

绕线直线  $AB$ 、 $CD$  段,  $Z$  向匀速直线运动, 运动方程如下:

$$S = v \cdot t \quad (9)$$

时间均设置从 0 时刻起, 若初始时间为  $t_0$ , 将上式中时间  $t$  换成  $(t - t_0)$  即可。

## 3 自动绕线运动仿真

为了减少仿真难度, 本研究在保证仿真效果的前提下, 对对排线系统进行合理的简化处理, 只建立排线线杆和定子工装的运动仿真模型。首先笔者在三维软

件 Solidworks 中建立三维模型<sup>[13]</sup>, 并转化为 Parasolid 格式导入 ADAMS/VIEW 中。通过添加线杆直线移动副和定子旋转副, 得到运动仿真模型如图 5 所示。

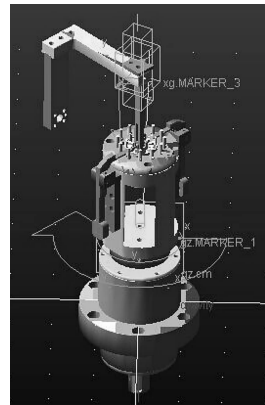


图 5 绕线运动仿真模型

本研究设定好各参数,  $v_{\max} = 700 \text{ mm/s}$ ;  $\beta = 30^\circ$ ;  $H = 48 \text{ mm}$ ; 分别设定 3 个弓高  $h_1 = 5 \text{ mm}$ 、 $h_2 = 10 \text{ mm}$  和  $h_3 = 15 \text{ mm}$ , 分别得到  $Z$  向及  $Y$  向运动方程, 并将各运动方程添加到线杆直线移动副和主轴旋转副中, 设定运动时间为一个绕线周期, 加载得到仿真动画, 并得到 3 种弓高下一个周期内的加速度、速度和位移曲线。

## 4 实验验证与分析

在研发的电机定子自动绕线机上, 笔者以某型号电机定子为例, 将加速度传感器黏牢在电机定子自动绕线机线杆部件上, 通过加速度传感器, 应用便携式测量仪 CoCo-80 测量线杆部件运动学参数, 实验测试图如图 6 所示。



图 6 实验测试

参数设置:  $v_{\max} = 700 \text{ mm/s}$ ;  $h = 15 \text{ mm}$ ;  $H = 48 \text{ mm}$ ;  $\beta = 30^\circ$ , 可得运动仿真、理论分析与实验测得的线杆加速度、速度和位移信号的对比图如图(7~9)所示。

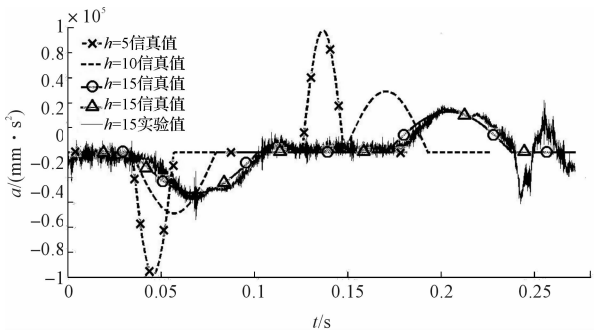


图7 理论、仿真与实验加速度对比

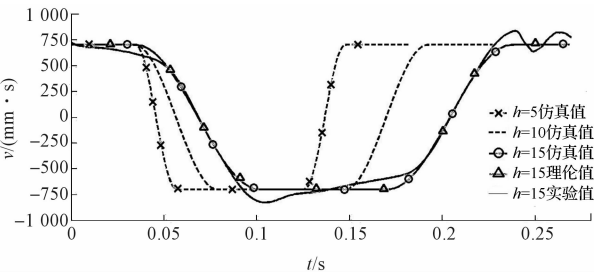


图8 理论、仿真与实验速度对比

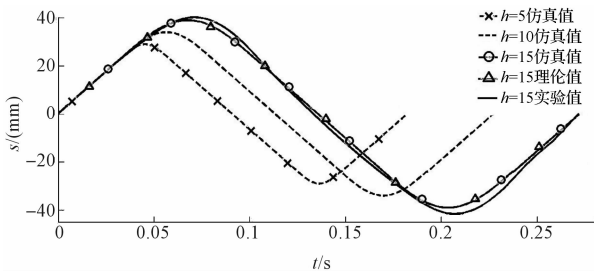


图9 理论、仿真与实验位移对比

由图可知,随着弓高的增加,一个周期的时间延长,表明绕线效率降低;但此时最大加速度值减小,对整机的振动也将随之减小。因此利用此仿真方法,能够找到两者的平衡点。

由图7 加速度实验曲线可知,在上、下端组合运动中,起始加减速点以及最大加速度点时,加速度出现了震荡,在最大加速度点附近,加速度有过冲现象;由图8 实验速度曲线可知,速度在匀速起始阶段速度明显超过设定速度,并上下波动;由图9 实验位移曲线可知,由于加速度、速度存在过冲,则位移在最高、最低点超出设定行程。除此之外,对比仿真值、理论计算值和实验值,总体上基本一致。

按照数学模型理论计算、运动仿真及实验结果,合成一个周期的复合运动位移曲线(弓高为15 mm,如图10 所示)。

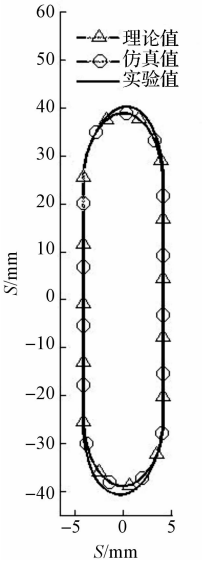


图10 理论、仿真与实验对比图

由图10 可知,整个过程中理论分析与运动仿真一致,在匀速段实验结果与理论分析、仿真分析一致。在加减速过程中,实验测试线杆位移有一定量的过冲,过冲量约1 mm,但此时导针已在定子骨架外运动,对绕线质量影响不大,绕制的电机定子成品如图11 所示,绕制质量符合要求。



图11 绕制电机定子成品

5 结束语

(1)本研究分析了电机定子自动绕线机的工作原理,建立了由导针垂直运动和骨架旋转运动复合而成的腰形绕线轨迹的数学模型,提出了腰形轨迹两端分别为圆弧、椭圆、劣弧时的运动控制策略。

(下转第 899 页)