

全自动变压器绕线机自动排线控制技术研究

许家忠, 张 剑, 刘美军, 杨 海

(哈尔滨理工大学 自动化学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 采用传统人工控制技术受到人为因素影响, 在排线过程中出现惯性误差, 导致控制效率较差, 对于实现全自动变压器绕线机的高效率运行, 提出了伺服自动排线控制技术研究; 根据绕线机主要设备, 分析张力产生原因; 使用三菱伺服驱动器, 根据执行时发送的脉冲指令改变发送脉冲频率, 在规定时间内使漆包线机构跟随绕线机主轴转动, 由此获取排线时序图; 根据时序图设计具体排线方案, 通过调试确定惯性补偿系数, 保证绕线能够平滑移动, 改善惯性误差, 实现恒定张力控制; 通过调试结果可知, 该技术最高控制效率可达到 90%, 为线圈绕制中绝缘带的张力控制和轴向紧密度提供保证。

关键词: 绕线机; 漆包线张力; 惯性误差; 伺服驱动器; 脉冲指令

Research on Tension Control Technology of Insulation Belt of Automatic Transformer Winding Machine

Xu Jiazhong, Zhang Jian, Liu Meijun, Yang Hai

(College of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The traditional manual control technology is influenced by man-made factors, and inertia error occurs in the process of wiring arrangement, resulting in poor control efficiency. For the high-efficiency operation of automatic transformer winder, the research on servo automatic cable control technology is put forward. According to the main equipment of winding machine, the cause of tension is analyzed. Using the Mitsubishi servo driver, the transmission pulse frequency is changed according to the pulse command sent during execution, and the enameled wire mechanism is rotated following the winding machine main shaft within a specified time, thereby obtaining the wiring timing chart. According to the time sequence diagram, the specific wiring arrangement scheme is designed, and the inertia compensation coefficient is determined by debugging, which ensures the smooth movement of the winding, improves the inertia error and realizes the constant tension control. The test results show that the highest control efficiency of this technology can reach 90%, which can guarantee tension control and axial tightness of coil winding.

Keywords: winding machine; enameled wire tension; inertial error; servo driver; pulse command

0 引言

现代变压器是由铁芯、线圈和绝缘材料共同组成的, 该线圈通常分为高压线圈和低压线圈, 其中高压线圈使用绝缘导线进行绕制。线圈绕制是变压器制造的核心, 对于变压器工作性能影响较大, 不仅直接影响变压器外形尺寸, 还影响着变压器绝缘性能和机械性能。现有绕线机一般为半自动绕线机, 工作过程是: 电机带动工件一起旋转绕线, 通过计数装置将缠绕圈数显示在仪表上, 工人手工排线, 根据仪表显示缠绕圈数控制电机启停^[1]。但它存在以下缺点: 由于人工排线方式, 使工件加工质量过于依赖工人技术水平, 且当电机转速过快时, 人的操作无法跟上电机速度, 因此限制了加工效率^[2]。自动排线绕线机的出现虽然解决了半自动绕线机生产的一些弊端, 但现有的自动排线

绕线机为单绝缘层供给, 不能实现线带同步缠绕或线圈侧边绝缘纸缠绕, 自动化程度低且工艺不完备。传统变压器线圈绕制都是依靠人力将绝缘层按照生产工艺流程缠绕到组件上的, 由工作人员统计匝数, 使用传统绕线方式受到人为因素影响, 导致绕制效率较低。因此, 采用全自动变压器绕线机来解决该问题^[3]。

针对上述问题, 采用伺服系统来驱动排线机构, 搭建硬件平台, 结合控制系统软件部分设计, 完成变压器的绕制过程。为实现精密绕制, 需对漆包线和绝缘带中的张力进行控制, 本文对全自动变压器的自动排线控制技术展开研究, 为了绝缘带的张力控制奠定基础。

1 绕线机设备构成

传统的半自动绕线机包括机座、检测装置、基于 PLC 控制的控制柜和设置在机座上的人机界面, 该设备仅为单绝缘层供给, 不能实现线圈侧边绝缘纸缠绕, 工艺不完备, 生产的线圈侧边绝缘性能差^[4]。因此本文设计的全自动变压器绕线机, 采用双绝缘层供给装置, 可同时实现线带同步缠绕和线圈侧边绝缘纸缠绕。对于绕线机主要设备主要包括电线自动排线装置、主副绝缘层供给装置、主副绝缘层主轴轴向驱动装置和卷绕主机等装置, 如图 1 所示。

收稿日期: 2018-11-07; 修回日期: 2018-12-06。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61503131)。

作者简介: 许家忠 (1977-), 男, 黑龙江鸡东县, 博士研究生, 教授, 博导/硕导, 主要从事智能机器人与运动控制; 纤维复合材料成型 CAD/CAM 技术; 纤维缠绕复合材料制造工艺及数控装备方向的研究。

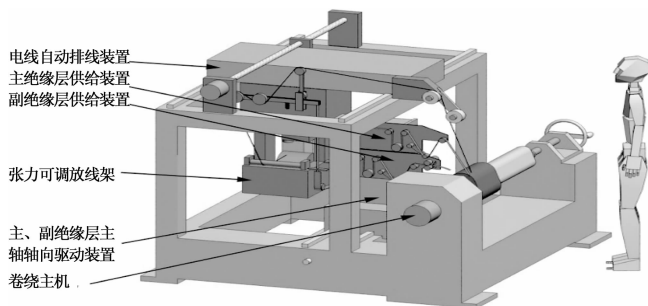


图 1 全自动变压器绕线机

1.1 电线自动排线装置

自动排线装置为一轴伺服控制, 包括排线装置架体、主体小车、定向定位轮、电机、导轨、导程 20 的滚珠丝杠和 1: 5 的配减速机组成的, 排线装置架体和主体小车上端设有丝杠, 主体小车可沿导轨和丝杠方向移动, 排线机头安装在滚珠丝杠上, 可实现线头沿着导轨直线移动, 而排线装置两端设有限位开关, 其中排线电机功率设置为 150 W。

1.2 卷绕主机

卷绕主机包括主轴 4.5 kW 的伺服电机、1: 10 的主轴配减速机、便于安装绕组芯模、取成品的主轴关节、主轴模架和手摇顶尖装置; 主机装置轴承上可固定工件, 随着主轴旋转完成线圈的绕制。设收卷电极功率为 6.0 kW, 通过变频器驱动脚踏开关进行启动与停止控制。收卷主机配有电磁驱动器, 能够满足收卷主轴的制动需求。收卷电机与主轴之间是通过机械换挡来调节机箱传递动力的, 其中设置两个档位分别为变压器绕制提供较小额定转矩和较高额定转速, 以满足工艺要求^[5]。

1.3 主副绝缘层供给装置

主副绝缘层供给装置包括伺服张力控制系统 (内含伺服电机一台及反馈传感器等相关部件)、副绝缘层供给装置中步进驱动轮组、剪纸机构和其他辅助机构; 伺服系统控制绝缘纸捆沿定位定向轮移动。另双绝缘层供给排线绕线机还包括脚踏开关和控制盒, 卷绕主机主轴的正反转可通过所述脚踏开关和控制盒分别实现。

1.4 主副绝缘层主轴轴向驱动装置

主副绝缘层主轴轴向驱动装置包括主副绝缘层架体、2 kW 伺服电机、1: 5 的配减速机、导程 20 的丝杠、导轨和主体小车; 主副绝缘层主轴轴向伺服电机和主副绝缘层主轴轴向配减速机连接 PLC 控制系统, PLC 控制系统设有触摸屏, 用于显示绕线圈数, 并具有正反记数和断电记忆功能。

全自动变压器绕线机主要设备负责完成程序编写和人机界面组态, 程序是控制技术的具体实现, 在硬件选型已经确定条件下, 程序控制将最终决定整台机器的性能。人机界面作为人机交互平台, 不仅能够完成向程序发送控制指令以及输入工艺参数的操作, 还可实时显示设备运行状态^[6]。

2 自动排线控制技术分析

对于影响全自动变压器绕线机绕线质量以及加工精度, 绝缘带和漆包线中的张力是重要影响因素, 目前张力控制

已经广泛应用于绕线行业中。在自动绕线机绕线过程中, 如果漆包线中的张力较小, 而导致绕线机组的绝缘带松弛, 那么就会产生绕线堆积现象; 反之, 如果漆包线中的张力较大, 而导致绕线机组的绝缘带缠绕表面坍塌, 那么就会产生绕线断带现象, 因此控制漆包线和绝缘带张力对于绕线机绕线质量来说是具有重要的作用^[7]。

2.1 张力的产生

在绕线机自动绕线过程中, 为了达到工艺要求, 必须在漆包线上产生摩擦力和阻力, 因此对于张力的产生可通过如下 3 种情况进行说明^[8]。

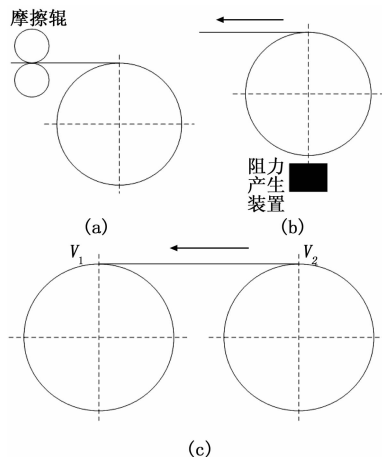


图 2 张力的产生

由图 2 可知: 图 (a) 中在漆包线表面设置摩擦辊, 使在运动时产生张力。当机器主轴产生带动飞叉旋转的绕线时, 摩擦辊与漆包线之间会产生相对摩擦力, 因此在摩擦辊与绝缘带之间的漆包线产生了张力; 图 (b) 中是对防线卷施加了阻力矩, 设置产生阻力矩的装置; 图 (c) 是利用防线速度和收线速度之差来产生拉力, 采用该方式可通过控制放线卷的放线速度实现对漆包线和绝缘带中张力的控制。

图 (a) 中产生的张力与带盘半径大小无关, 即带盘转动变化对绝缘带中张力是不产生影响的, 因此对于张力的控制是比较容易的; 图 (b) 中装置产生的阻力矩是保持不变的, 因此绝缘带产生的张力值是由阻力矩与放线卷半径的比计算出来的; 由于在摩擦辊与绝缘带之间施加正压力产生一定张力值才能促使绕线机正常工作, 因此在图 (c) 产生张力过程中, 绝缘带张力由如下公式进行计算:

$$F = \frac{\alpha}{d} \int_0^d (V_2 - V_1) t \quad (1)$$

公式 (1) 中: V_2 和 V_1 分别为控制收线卷和防线卷的速度; s 为绝缘带的截面积; α 为绝缘带弹性模量; d 为转动点之间的距离; t 为设备运转时间。

绝缘带张力会随着绕线机绕线的速度变化而产生一定影响, 在整个张力控制过程中实际上就是计算控制收线卷和放线卷之间的速度差, 采用这种方式将张力控制转化为两线速度差的控制。卷绕主机上放置线圈芯模, 而绝缘层

供给装置将绝缘纸送至卷绕主机，卷绕主机转动使绝缘纸缠绕在线圈芯模上，主副绝缘层主轴轴向驱动装置左右重复移动使绝缘纸均匀布满线圈芯模，通过张力调节线架，将导线通过电线自动排线装置送至卷绕主机，卷绕主机转动使导线缠绕在绝缘纸上，电线自动排线装置左右重复移动使导线均匀布满绝缘纸。本文提出伺服自动排线方案，提高排线精确度，为绝缘带张力的控制打下基础。

2.2 伺服自动排线设计

伺服电机的控制有精确度高、定位准、调速范围宽、响应速度快、动态性能好等特点。本系统中排线机构需要较好的跟随性和主轴电机协同运转，同时需要排线误差小，排线均匀，精确度高，因此我们选用三菱伺服系统来驱动排线机构进行排线^[9]。

使用伺服驱动器时，电线自动排线方案设计如下所示：根据一定时间内绕线机转过的角度来控制程序向伺服驱动器发动的脉冲，排线装置快速跟随绕线机主轴转动，根据在执行时发送的脉冲指令改变发送脉冲频率，当发送脉冲指令之前，会按照之前设定的频率发送脉冲，一旦更改了发送脉冲频率之后，必须先断开接通条件，再重新接通启动脉冲指令，才可按照原始的脉冲频率执行。此时电极工作是位于控制模式下进行的，由此设计了如图 3 所示的排线时序图。

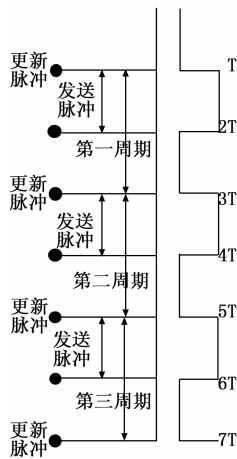


图 3 排线时序图

由图 3 可知，为了使排线更加平滑，需保证脉冲采样时间间隔最短，选择可编程逻辑控制器的扫描周期 T 作为采样时间，每隔 $2T$ 更新一次脉冲数量，但是每次都必须在时间 T 内完成脉冲的发送，因此在采样周期为 $2T$ 时，就完成了一次自动排线任务，继续进行下一次自动排线，直到自动绕线全部完成。具体排线方案设计如下所示：

- 计算导线整体直径；
- 计算主轴转速；
- 计算可编程逻辑控制器发送的脉冲主要频率；
- 将上一次差值折算为可编程逻辑控制器发送脉冲的附加频率；
- 计算可编程逻辑控制器实际应发脉冲频率，并以此

频率发送脉冲；

- 统计一个周期的采样结果；
- 计算以此脉冲发送结束时的可编程逻辑控制器实际应发脉冲与理论应发脉冲之差；
- 将第一次差值固定，将下一次差值移动到上一次差值中；
- 查看是否达到设定的匝数？
- 如果达到，则结束；如果没有达到，则需重新计算导线整体直径，直到达到设定的匝数即可。

虽然根据上述设计方案实现了绕线机的快速排线，但在变压器的绕制过程中通过电磁刹车装置实现主轴电机的快速制动，开始时电机转速由低速加速到高速运行，在这一段绕制快要结束时电机又由高速降为低速运行，绕线完成一层后，自动铺设绝缘层，伺服电机排线方向取反，继续绕制工作。在这个过程中，主轴转速过快，转动惯量过大，致使排线误差偏大，漆包线张力波动，因此本文提出逐次逼近补偿的方法减少惯性造成的误差。

2.3 惯性误差补偿

当设定匝数去掉惯性补偿量即为低速线圈匝数，每当累计线圈匝数大于等于低速线圈匝数时，电机主轴将进入低速运行状态。在实际调试过程中，最大线圈是以高速运转所产生的惯性误差为 2.0 匝左右，设置一定裕量，使惯性补偿量达到 2.5 匝。加入一定裕量为保证主轴能够在设定匝数前就进入低速运行区域。进入低速运行区域后，需引入预停匝数 c_1 ，通过调试确定惯性补偿系数，如下所示：

$$c_1 = c - \beta \times k \quad (2)$$

公式 (2) 中： c 为设定的匝数； β 为惯性补偿系数； k 为当前转速。

当累计匝数大于等于预停匝数时，可发出停止信号，在电机停止运行之后，需判断累计匝数与设定匝数之间的关系。如果累计匝数小于等于设定匝数时，则需令主轴重新启动，并以最低速度继续绕线；如果匝数大于等于设定匝数时，则认为该段绕线完成。

由实际调试结果可知，对于排线方案的设计是通过控制电机移动速度，实现了排线在整个绕线机绕线过程中能够保持更加平滑的移动，对于误差补偿措施也有效减小了计算误差，使绕线机线圈匝数与匝数之间紧密排布，电线自动排线装置左右重复移动，使导线均匀布满绝缘纸，为绝缘带张力控制奠定基础。

在控制系统中，检测装置作为反馈环节，需要对张力进行实时检测，将张力值转化为点信号反馈到张力控制装置中，在稳定状态下，控制张力所产生的作用与气缸相平衡，保证浮辊位于中央稳态位置。当出现某种扰动导致张力发生变化时，平衡位置将被破坏，而浮辊位置上下移动较大，通过浮辊电位器位置变化将其反馈到控制器之中，经过排线设计方案实现对绕线机的控制，保证绕线能够平滑移动，采用逐步逼近的方法改善惯性误差，进而实现恒定张力控制。

3 调试验证

3.1 调试前期准备工作

3.1.1 操作台布局

带有触屏装置的控制器和显示器应放置在操作者视线最佳位置; 不同按钮应使用不同颜色加以区分; 应急按钮应安装在操作者最优选择位置。

3.1.2 控制柜布局

将发热严重元器件放置在电气柜上部, 并与下层元件保持足够大距离; 轻微发热的元器件安装在控制柜最底层; 控制器不能安装在熔断器下方; 动力线应与控制线保持一定距离, 避免受到电磁干扰。

3.2 调试步骤及方法

调试步骤如下所示: 先检查电线电路, 然后设备上电检查, 并设置设备参数, 点动调试, 最后分别进行不带料调试和带料调试。

在调试过程中, 使用可编程逻辑控制器编程软件, 并监视程序运行情况, 有效解决调试过程中遇到的问题。

3.3 调试参数设置

调试参数设置如表 1 所示。

表 1 调试参数设置

参数编号	参数值	含义	参数编号	参数值	含义
12.01	2	变频器启动信号	65.21	2	利用控制器进行张力调试
11.05	1500	最小半径转速	65.31	0	不使用维度功能
20.02	1600	最大转速	66.03	2000	设定最大张力 5000N
23.02	100	加速时间 10s	65.02	30000	开卷最小直径为 200mm
50.05	26	减速时间 20s	65.14	1	设置复位信号
60.01	1769	传动比 16:50:1	99.01	800	开卷最大直径为 700mm

3.4 调试结果与分析

根据上述调试内容, 验证全自动变压器绕线机绝缘带张力控制技术是否合理。以初始开卷半径等于 265 mm、300 mm、400 mm 和 500 mm 启动变压器绕制, 获取的张力单位阶跃响应图如图 4 所示。

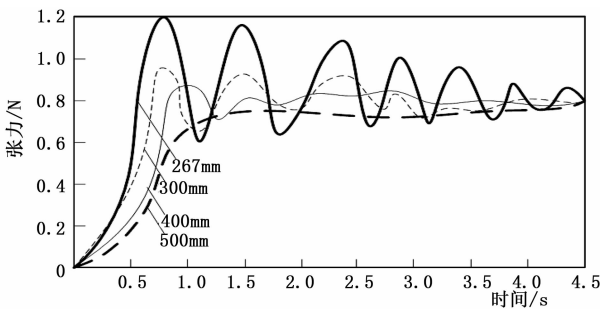


图 4 不同半径下张力单位阶跃响应图

由图 4 可知: 在进行实际绕线过程中, 下一个线圈最多绕 100 匝, 并且开卷处半径变化量较小。开卷半径从 265mm 增加到最大 500mm 情况下, 将调试时间设定为 5.0s, 采用自排线惯性误差补偿方法, 可消除开卷半径变化对绕线机的影响。

分别将传统技术与研究的控制技术转矩微调量进行对比分析, 结果如图 5 所示。

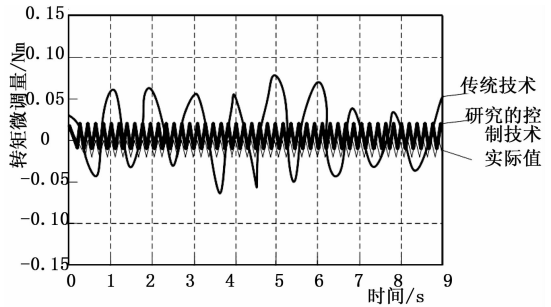


图 5 两种技术转矩微调量变化情况

由图 5 可知, 采用传统技术获取的转矩微调量在范围 $[-0.06 - 0.07]$ 内波动, 而研究的控制技术获取的转矩微调量在范围 $[-0.02 - 0.02]$ 内波动。调试的开卷半径是平滑增大的, 而实际开卷半径是按阶梯型增大的, 采用研究的控制技术与实际值基本吻合。

依据微调量变化情况, 将两种技术控制效率进行对比分析, 结果如表 2 所示。

表 2 两种技术控制效率对比分析结果

不同半径/mm	传统技术/%	研究控制技术/%
200	50	82
267	43	90
300	56	89
400	62	88
500	57	86
600	61	90

由表 2 可知, 当半径为 200 mm 时, 采用研究控制技术比传统技术控制效率高 32%; 当半径为 267 mm 时, 采用研究控制技术比传统技术控制效率高 47%; 当半径为 300 mm 时, 采用研究控制技术比传统技术控制效率高 33%; 当半径为 400 mm 时, 采用研究控制技术比传统技术控制效率高 26%; 当半径为 500 mm 时, 采用研究控制技术比传统技术控制效率高 29%; 当半径为 600 mm 时, 采用研究控制技术比传统技术控制效率高 29%。

根据上述调试内容, 可得出调试结论: 在不同半径下, 所研究的控制技术比传统技术控制效率高, 且最高高出 47%, 因此全自动变压器绕线机伺服自动排线控制技术研究是具有合理性的。

4 结束语

本文采用伺服张力器工作原理是由电机作为主要工作机
(下转第 104 页)