

一种电缆自动绕包机的设计与实现

俞民强,王 力,沈 辉,路 锐,陆文钦

(国网江苏省电力有限公司 常州供电分公司,江苏 常州 213000)

摘要:针对输配电重要部件高压电缆在发生线芯断裂、绝缘层破损等故障时,人工绕包维修存在效率较低、易损伤电气性能等问题,文中提出了一种利用微控制器自动化调节齿轮做卷绕运动的电缆自动绕包机设计。电缆自动绕包机的机械结构利用步进电机与 C 型齿轮结构实现卷绕机械运动,其控制系统的硬件部分利用传感器、微控制器、串口电路、数模转换处理电路等实现高压电缆绕包过程的恒张力反馈系统,软件部分通过运行模式和调试模式满足绕包过程的实时性和交互性需求。利用绕包过程中常用的 3 种带材完成自动绕包的实际效果测试,测试结果表明,所提出的电缆自动绕包机在对 3 种材料进行的绕包过程中,可以保证张力的恒定,其结果满足铺设电缆所需要的性能,提升了绕包效率和质量。

关键词:高压电缆;绕包带;恒张力控制;电机;单片机

中图分类号:TP273;TN782

文章编号:1000-0682(2024)01-0087-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.01.019

Design and implementation of an automatic cable winding machine

YU Minqiang, WANG Li, SHEN Hui, LU Rui, LU Wenqin

(Changzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Jiangsu Changzhou 213000, China)

Abstract: In order to solve the problems such as low efficiency and easy damage of electrical performance in the maintenance of high voltage cable, which is an important part of transmission and distribution, the paper presents a design of automatic cable winding machine which uses a microcontroller to automatically adjust the gear for winding motion. The mechanical structure of the automatic cable winding machine uses the stepper motor and C-type gear structure to realize the winding mechanical movement. The hardware part of the control system uses sensors, microcontrollers, serial ports and digital-to-analog conversion processing circuits to realize the constant tension feedback system of the high voltage cable winding process. The software part meets the real-time and interactive requirements of the winding process through the operation mode and debugging mode. Three kinds of strips commonly used in the wrapping process are used to complete the actual effect test of automatic wrapping. The test results show that the automatic cable wrapping machine in this paper can ensure the constant tension during the wrapping process of the three kinds of materials, and the results meet the performance required for laying cables, and improve the efficiency and quality of the wrapping.

Keywords: high voltage cable; wrapping tape; constant tension control; electric machine; micro-controller

0 引言

高压电缆是电力系统中用于完成长距离、跨区

域传输电能的重要组件,也是电力系统在运行时,最容易发生事故的部分。由于外力破坏、自然老化侵蚀等原因,导致其发生内部线芯断裂、外部绝缘层破损等故障^[1-2]。高压电缆在发生故障时,需要剔除故障电缆段,同时采用绕包形式将电缆两端的故障点进行重新连接。传统绕包方式是采用人工对高压电缆接头进行绕包,然而人工绕包通常效率较低且不能有效控制张力和速度,导致绕包后的电缆绝缘

收稿日期:2023-08-28

基金项目:国网江苏省电力有限公司常州供电分公司科技项目(CZ202208)

第一作者:俞民强(1979—),男,汉族,江苏常州人,本科,高级工程师,研究方向为电气工程。

与防水性能降低。而先进的自动化绕包机设计有助于提升高压电缆绕包质量,从而保障其的电气性能。

高压电缆断裂后,采用绕包形式进行修复时,需要通过均匀、稳定的张力控制,将带有自粘性的半导体绝缘橡胶带紧密的贴合在线芯上。对于绕包过程的卷绕技术,目前已有相关研究设计出了带有计算机或者微控制器的机械结构。例如,文献[3]中对于卷绕张力需求,可以通过在控制电机的嵌入式计算机中加入神经网络来优化;文献[4]完成了多轴运动张力控制系统的软硬件开发及控制算法的优化;文献[5]提出的卷绕控制系统以单片机为核心,通过信号采集和控制信号输出完成了电机的闭环控制。

文中针对目前高压电缆线芯绕包所存在的问题,分析了绕包时的材料、机械运动轨迹等因素,提出了一种利用传感器采集张力数据、微控制器控制电机、机械齿轮做卷绕运动的电缆自动绕包机设计设计方案。

1 自动绕包机理论分析

在对高压电缆线芯接头进行绕包时,需要采用有一定机械强度和绝缘性的材料^[6-7],同时在绕包过程中需要保持恒定的张力与螺旋式前进的运动轨迹。然而在工程师手工绕包时,绕包带的张力属于不可控状态,容易出现绕包后的高压电缆接头难以稳定工作的情况。针对以上特征而设计的电缆自动绕包机需要满足以下几个关键技术:

(1) 自动绕包机的绕包带材料应当同时满足电气性能指标和安全性要求。目前被广泛使用的电缆线芯绕包带包括:半导体电带、电应力控制带和乙丙橡胶绝缘带。在自动绕包过程中,绕包带材料的拉伸形变数据与绕包运动拉伸张力、转速有着密不可分的关系。表 1 是 3 种绕包带的拉伸形变数据,自动绕包机在绕包时需要同时用到这 3 种绕包带。由数据可以看出,不同绕包带的拉伸数据存在差异,因此在绕包时需要根据具体材料控制绕包带的拉伸情况。

表 1 3 种绕包带的拉伸数据

材料类别	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	最大负荷 /N
半导体电带	0.84	100.015	12.15
应力控制带	0.73	10.000	10.55
乙丙橡胶带	0.61	150.640	14.48

(2) 将 3 种不同材料的绕包带紧密、平整地绕包于电缆的线芯上需要均匀稳定的张力控制^[8-9],从而保证高压电缆在电能传输过程中的性能平稳。电缆线芯绕包带的卷绕运动轨迹数学模型,如图 1 所示。

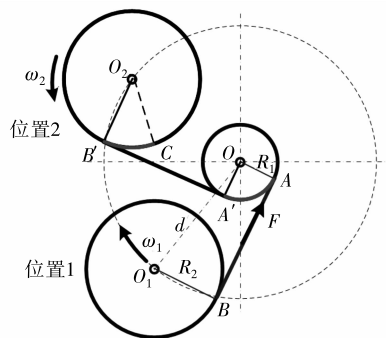


图 1 电缆绕包带做卷绕运动模型图

图 1 中, d 为绕包带伸长率; R_1 为电缆接头半径; R_2 为绕包带卷半径; ω_1 为绕包公转角速度; ω_2 为绕包带自转卷绕角速度。整个轨迹是逆时针旋转; 从位置 1 到位置 2 所需要的时间为 t ; AA' 为已经绕包入带的长度; $B'C$ 为出带长度。假设公转速度 ω_1 不变, 此时自转角速度 ω_2 由伸长率 d 控制, 具体计算过程如式(1)~式(4)所示:

$$AA' = \omega_1 t R_1 \quad (1)$$

$$B'C = \omega_2 t R_2 \quad (2)$$

$$AA' = B'C(1 + d) \quad (3)$$

$$\omega_2 = \frac{R_1}{(1 + d) R_2} \quad (4)$$

式中, 当 $R_1 < (1 + d) R_2$ 时, $\omega_2 < 1$, 表明顺时针自转; 当 $R_1 > (1 + d) R_2$ 时, $\omega_2 > 1$, 代表逆时针自转。在高压电缆的绕包过程中, 需要根据整个阶段 3 种绕包材料的伸长率数据来实时控制绕包的自转速度。

(3) 由于绕包卷带的中心与轴线距离是动态变化的, 因此需要实时监测和控制张力的变化以确保绕包过程的部分恒定变量^[10-12]。因为绕包带所受到的张力与绕包带卷半径、力矩存在一定的物理关系, 所以要保持一定的张力, 则需要通过控制绕包速度来维持卷绕张力的恒定^[13]。张力的计算如式(5)所示:

$$F = \frac{M}{R} \quad (5)$$

由式(5)可知, 绕包带受到的张力 F 与力矩 M 和绕包带半径 R 有关。因此在绕包过程中, 以恒定的角速度自转时, 要使得绕包带 F 不变, 力矩应跟随 R 逐渐减小。

2 控制系统设计

在现有恒张力控制系统的研究过程中, 主要采用压力传感元件来控制张力的变化, 根据压力传感器的测量数值来调节绕包电机的转速。该文所设计的自动绕包机不仅利用张力传感器、绕包带两端电机来调节

张力的大小,而且其控制系统中还引入了闭环反馈机制。自动绕包机的整体控制系统架构,如图 2 所示。

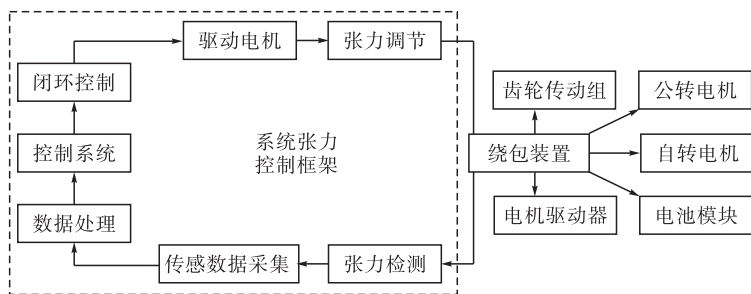


图 2 高压电缆线芯绕包控制系统架构图

电缆自动绕包机的控制系统主要由绕包装置的控制系统和机械组件两部分组成:绕包装置控制系统的核心是张力控制框架,利用张力传感器和采样电机的转速来反馈控制系统,然后驱动电机完成恒定张力的调节;绕包装置的机械组件主要由公转和自转电机、齿轮传动组与机械电机构成。

2.1 控制系统机械组件

该设计的控制系统的机械部分,如图 3 所示。其主要包含 C 型传动齿轮、自转电机、公转电机、带轮传动、胶带和电缆线绕包接头构成。

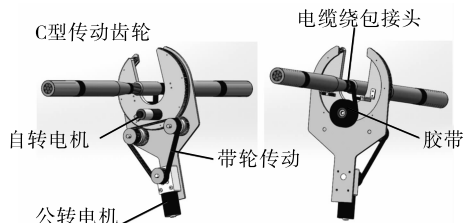


图 3 自动绕包机机械部分示意图

自动绕包机的传动结构主要由主动齿轮、从动齿轮和 C 型大齿轮带动。主动齿轮依次带动两侧从动齿轮转动,从动齿轮进而带动 C 型大齿轮进行工作。C 型大齿轮由于存在缺齿状态,所以需要进行强度校准。自动绕包机的电机选型需要遵循转速稳定、结构紧凑以及反映灵敏等要素。此次选取了 42 系列步进电机,其中公转电机选取 42HB60A,其步距角为 $(1.8 \pm 5\%)^\circ$,保持力距 $0.89 \text{ N} \cdot \text{m}$;自转电机则选取 42HS60-0.9,该电机步距角为 0.9° ,保持力矩 $0.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

2.2 控制系统硬件

电缆自动绕包机的控制系统需要通过传感器对绕包带的张力、电机转速进行采样,并反馈给微控制器^[14-16](Micro Controller Unit, MCU)。微控制器可以通过键盘输入设定控制数据,并由此实现自动化绕包。控制系统的硬件组成,如图 4 所示。系统硬件的核心部分是微控制系统,其主要通过屏幕模块和按键的组合设定来完成自动绕包机系统的初始参数设置,

从而实时掌握总体装置的运行情况。控制系统的硬件包括核心控制芯片、数模采集和处理电路、显示模块电路、按键电路、串口调试电路以及电机控制电路。

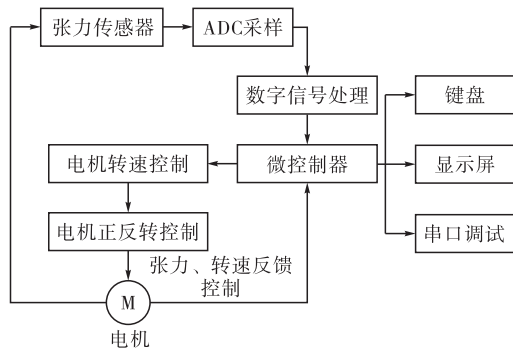


图 4 控制系统硬件组成图

电缆自动绕包机实现所采用的部分器件:主控芯片采用意法半导体的 STM32 系列处理器,其最小系统如图 5 所示,包括了复位电路、晶振电路及电源滤波电路等。电动机采用 42 系列步进电机,张力传感器采用的是 CLTL 系列传感器,显示模块是 OLED 材料的显示屏,具有 128×64 分辨率,串口调试采用 UART 调试接口。

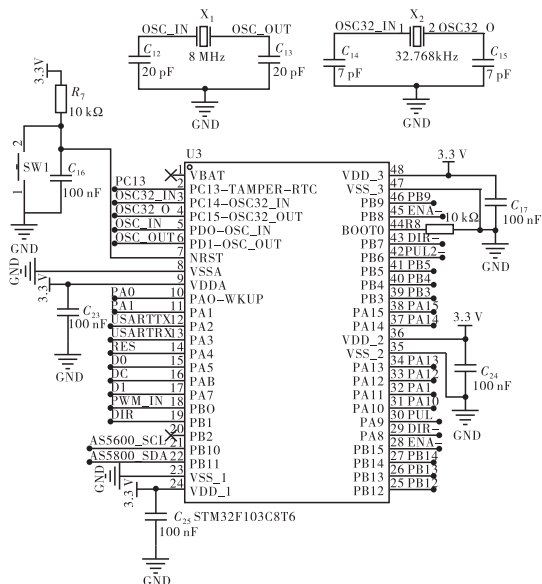


图 5 主控制芯片的最小系统图

2.3 控制系统软件

自动绕包机控制系统的软件设计需要满足实时性和交互性两种特征,该所设计的自动绕包机软件主控制程序框架,如图 6 所示。由于在绕包过程中张力是实时变化的,因此控制系统将实时检测张力

的变化情况并调整驱动电机的工作状态。所设计系统还增加了调试模式,以便工程师及时调试程序中的错误以及不合理之处。此外,在绕包过程中可以存储绕包张力的变化数据以便于进行后期技术分析。同时,还可通过按键设定转速值。

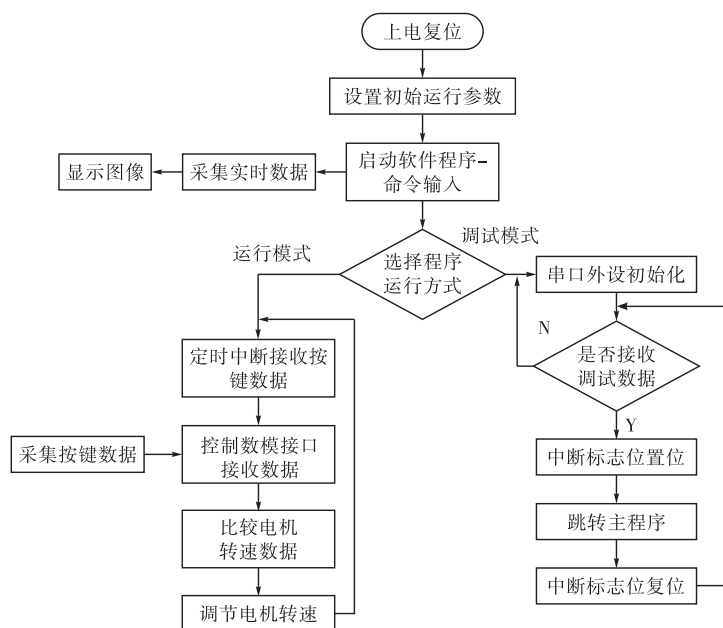


图 6 控制系统软件的主程序框图

3 实验结果与分析

所提方案的软件调试完成后,为了验证自动绕包控制系统在绕包过程中带材控制的张力是否能够保持一致,文中利用半导体电带、应力控制带和乙丙橡胶带进行了张力虚拟控制实验。虚拟实验初始参数设定与上文所述相同,公转电机的转速为 400 r/min,自转电机的转速为 150 r/min。在电机运转过程中,通过监测转速的差值可知,在绕包过程中该系统能够保持恒定的张力。

为了检测该方案的实际绕包效果,为 3 种材料设定相应的绕包工艺参数,如表 2 所示。在绕包过程中,电缆的轴线与带卷中心之间发生距离变化,使得张力也随之发生了改变。通过调整电机转速,保证了带卷上的张力恒定,从而使伸长率维持不变,实际绕包效果如图 7 所示。经过检测验证,绕包后的结果符合规范要求。

表 2 绕包过程设定的工艺参数

绕包材料	材料伸长率	初始自转电机转速/ $r \cdot \min^{-1}$	初始公转电机转速/ $r \cdot \min^{-1}$
半导体电带	100%	150	400
应力控制带	10%	152	400
乙丙橡胶带	150%	143	400

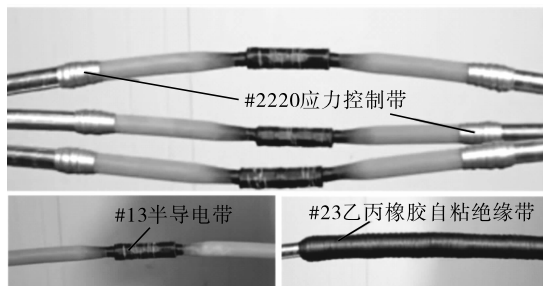


图 7 绕包实际效果图

4 结束语

该文以高压电缆线芯自动绕包的实际需求出发,设计了一套电缆自动绕包机,其结构包含控制系统和机械结构。电缆自动绕包机的机械部分采用 C 型传动齿轮与电机结合的方式完成绕包过程的机械运动。电缆自动绕包机控制系统的硬件部分利用传感器、微控制器、串口电路、数模转换处理电路等实现了高压电缆绕包过程的恒张力反馈控制,软件部分则通过运行模式和调试模式满足了绕包过程的实时性和交互性需求。高压电缆线芯实际绕包测试结果表明,设计结果能够满足需求,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 仇炜,刘真,钟森龙,等. 220 kV 金属型高压电缆接头保护装置的泄能孔和壁厚设计[J]. 高压电器,2022,58(1):190-198.
- [2] 汪锐,牟志远,任长永. 基于谐振特性的高压电缆介损测试方法研究[J]. 绝缘材料,2022,55(10):107-112.
- [3] 王延年,李鹏程,廉继红,等. 纱线卷绕系统恒张力先进控制策略[J]. 纺织高校基础科学学报,2023,36(1):49-56.
- [4] 邱靖超. 基于 FPGA 的步进电机多轴运动控制系统设计[D]. 太原:中北大学,2021:15-36.
- [5] 仇月仙. 小型金属窄带恒张力卷绕控制系统设计[J]. 机械科学与技术,2023,42(3):396-401.
- [6] 肖云吉. 聚四氟乙烯绕包绝缘导线研究与应用[J]. 机电元件,2020,40(3):6-8+12.
- [7] 宋欢,丁娉,杨军,等. 导线绕包用聚芳酰胺纤维纸热老化及应用性能研究[J]. 绝缘材料,2022,55(8):37-44.
- [8] 毛玉祥,康运江,潘登辉,等. 钢卷穿心缠绕机张力控制策略研究[J]. 制造业自动化,2021,43(12):89-92.
- [9] 郭杰,张亚锋. 适宜于非晶窄薄带材的智能张力控制系统的设计与实现[J]. 机床与液压,2021,49(24):105-109.
- [10] 张立冬,寇子明,吴娟,等. 输送带收卷装置设计及其恒张力控制研究[J]. 机电工程,2021,38(3):388-392.
- [11] 曹小华,宋景祥. 基于 BP 神经网络的电缆输送装置恒张力控制研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(6):1190-1194.
- [12] 陈宏博,杜向党,汪旭海. 基于恒张力控制的小型波浪补偿装置的设计与实现[J]. 机械与电子,2020,38(03):35-38.
- [13] 孙志龙,贾立民,刘勇,等. 自动绕线机控制系统的研究[J]. 机床与液压,2022,50(24):54-58.
- [14] 殷晓康,邓承杰,曹松,等. 基于微控制器的便携式共面电容无损检测系统[J]. 实验技术与管理,2020,37(11):103-109.
- [15] 李想,李阳. 32 位微控制器在远程网络化测控系统研究[J]. 微型电脑应用,2020,36(7):85-87.
- [16] 唐钊,刘昱,曾林. 面向步进电机控制的 RISC-V 微控制器的设计与实现[J]. 重庆大学学报,2021,44(11):31-39.

(上接第 86 页)

参考文献:

- [1] 严明林. 地面筛分选煤破碎装备智能化改造与研究[J]. 煤矿机械,2022,43(05):116-119.
- [2] 孟莹. 井下智能煤矸分选系统方案研究[J]. 煤矿机械,2021,42(09):29-31.
- [3] 冯甜欣,张晓光,刘景勇,等. 基于云平台的选煤厂环境监测系统[J]. 工矿自动化,2021,47(10):121-126.
- [4] 程子墨. 新形势下我国煤炭洗选加工现状及展望[J]. 煤炭加工与综合利用,2022(1):20-26.
- [5] 张洋洋,樊玉萍,马晓敏,等. 基于 ISSA-LSTM 的浓缩池溢流浓度预测[J]. 工矿自动化,2022,48(11):63-72.
- [6] 董永胜,陈为高,侯佃平,等. 智能化选煤厂研究与建议[J]. 工矿自动化,2021,47(增刊1):26-31.
- [7] 李庆明,褚平安,王学军. 煤炭洗选相关国家标准分析[J]. 煤炭加工与综合利用,2022(5):83-89.
- [8] 李朋,张明远,王保强. 分级破碎机智能化技术现状与发展方向[J]. 煤炭工程,2022,54(1):133-136.
- [9] 任继平. 自动控制系统在选煤厂浮选过程中的应用研究[J]. 煤炭与化工,2020,43(11):103-105.
- [10] 代伟,夏振兴,常俊林,等. 基于 CPS 架构的煤炭清洗选过程控制创新实验平台[J]. 实验技术与管理,2022,39(09):119-126.
- [11] 凌标灿,杨佳滨. 电机滚动轴承故障诊断中 BP 与 RBF 神经网络的比较[J]. 华北科技学院学报,2018,15(6):53-57.
- [12] 贺耀庭,谢源,李少朋,等. 基于蚁群算法的风电 AD-RC 变桨控制器优化设计[J]. 计算机应用与软件,2022,39(10):64-70.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277
网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱: gyybbjb@126.com