

变电站轨道式巡检机器人驱动系统设计

赵金洋,张洪丽*,张鹏程

山东交通学院工程机械学院,山东 济南 250357

摘要:为解决变电站轨道式巡检机器人运行时转速稳定性差的问题,以控制特性较好的永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor,PMSM)为驱动电机,设计变电站轨道式巡检机器人驱动系统,计算机机器人的结构参数和运动参数,完成电机选型;结合矢量控制(field oriented control,FOC)与空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation,SVPWM)策略,采用软件 MATLAB Simulink 搭建比例-积分-微分(proportional-integral-derivative,PID)速度-电流双闭环控制方式的 PMSM 驱动系统仿真模型,验证设计系统的稳定性与可靠性,搭建实物试验平台进行电机空载与带载转速试验。结果表明:采用 PID 速度-电流双闭环控制方式的 PMSM 驱动系统,变电站轨道式巡检机器人的转速稳定,工作可靠;试验结果与仿真结果吻合,满足预期设计要求,该设计方案可行。

关键词:轨道式巡检机器人;驱动系统;PMSM;FOC;PID 速度-电流双闭环控制

中图分类号:U273.3;TP242.2

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)04-0009-09

引用格式:赵金洋,张洪丽,张鹏程.变电站轨道式巡检机器人驱动系统设计[J].山东交通学院学报,2023,31(4):9-17.

ZHAO Jinyang, ZHANG Hongli, ZHANG Pengcheng. Design of the driving system for an orbital inspection robot in a substation[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(4): 9-17.

0 引言

变电站轨道式巡检机器人可按预定时间间隔和路径,借助传感器和摄像头自动巡检,发现异常及时报警,减少人员风险,提高巡检效率和频率,也可分析处理收集的信息,预测潜在故障,提高设备的可靠性和可用性。

大部分变电站轨道式巡检机器人的运行轨道为室内悬挂式轨道,对变电站开关柜进行直线往复巡检工作时,需通过自身搭载的摄像头拍摄现场仪表与开关图像,上传至监控平台完成巡检任务^[1-3]。为确保所拍摄的图片质量,要求机器人整体运行平稳,响应快、运行精确、可靠性高。

机器人的驱动系统主要分为直流有刷电机驱动系统、步进电机驱动系统和直流无刷电机驱动系统 3 类。直流有刷电机驱动系统可实现闭环精确控制,但因机械电刷的换向特性,输出效率低、摩擦发热快、使用寿命短等,不适于在变电站长时间工作^[4-5]。步进电机驱动系统可满足变电站长时间工作要求,避免了机械电刷换向带来的问题,但此系统采用开环控制,实际应用中因机器人挂载设备较重易产生丢步现象,影响运行的精确性^[6-7]。采用无刷电机和矢量控制技术的直流无刷电机驱动系统开发成本较低,避免了机械电刷换向特性带来的问题,采用闭环控制策略保证机器人运行时的精确度要求,成为此类机器人驱动系统的首选方案,但因电机本身的磁场换向特性,电机转速的稳定性及机器人的可靠性

收稿日期:2023-06-05

基金项目:山东交通学院研究生科技创新项目(2023YK045)

第一作者简介:赵金洋(1997—),男,济南人,硕士研究生,主要研究方向为智能制造,E-mail:976989982@qq.com。

*通信作者简介:张洪丽(1976—),女,山东德州人,教授,工学博士,主要研究方向为高效精密复合加工技术及装备、智能机器人结构设计,E-mail:63027776@qq.com。

较低^[8-9]。

为提高机器人整体的可靠性,改善电机转速稳定性差的问题,综合考虑同类轨道式巡检机器人的设计要求及变电站巡检任务要求,本文采用可靠性高、功率密度大、效率高、换相平滑的永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)^[10]为驱动电机,设计机器人的机械结构、驱动电机、驱动控制系统,完成机器人 PMSM 驱动系统的设计任务,进行仿真模拟与实物平台试验验证,实现机器人的稳定运行。

1 机器人 PMSM 驱动系统设计

变电站轨道式巡检机器人的 PMSM 驱动系统控制 PMSM 输出恒定转速,通过齿轮传动使机器人主动轮恒速转动,实现机器人匀速稳定运行。机器人执行巡检任务时要求运行平稳,变速快速精确,结合同类变电站轨道式巡检机器人的设计参数,确定机器人驱动系统的技术指标要求为:匀速运行时最大行走速度为 2 m/s,总质量 $m \approx 20$ kg,1 s 内加速至最大行走速度 2 m/s。按此技术要求进行机械结构设计、电机选型,设计电机的驱动控制系统。

1.1 电机选型

轨道式巡检机器人的机械结构如图 1 所示。PMSM 水平放置,机器人的传动系统为多级齿轮传动。机器人挂载轨道与运行方式如图 2 所示,机器人沿轨道直线运动时受摩擦力 f 和重力 $G = mg$ 作用,摩擦力 f 的方向与机器人运动方向相反。

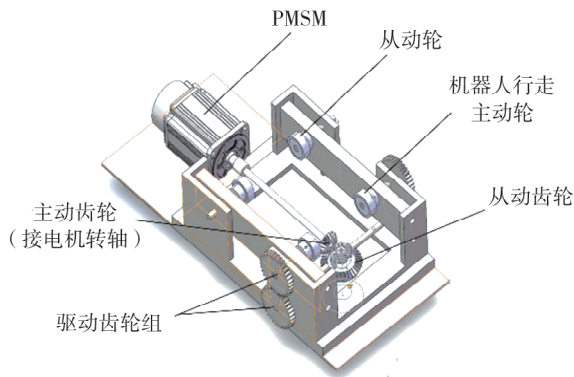


图1 轨道式巡检机器人的机械结构示意图

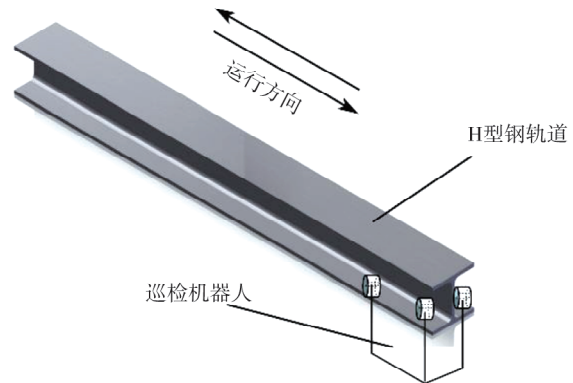


图2 机器人挂载轨道与运行方式示意图

与电机相连的主动齿轮齿数为 17,分度圆半径 $R_1 = 30$ mm,质量 $m_1 = 0.06$ kg。与主动齿轮啮合的从动齿轮齿数为 34,分度圆半径 $R_2 = 100$ mm,质量 $m_2 = 0.20$ kg。驱动齿轮组起传动作用,由 2 个相同齿轮组成,单个齿轮齿数为 34,分度圆半径 $R_3 = 100$ mm,质量 $m_3 = 0.20$ kg。机器人行走主动轮半径 $R_4 = 15$ mm,质量 $m_4 = 0.50$ kg,从动轮随主动轮转动,辅助机器人移动,从动轮的半径、质量与主动轮相同。主动齿轮与机器人行走主动轮的传动比 $i = 2$,齿轮间的传动效率 $\eta = 95\%$ 。

计算机器人匀速运行的电机功率

$$P = \mu mgv,$$

式中: μ 为巡检机器人驱动轮与轨道间的动摩擦因数, g 为重力加速度, v 为机器人运行时的最大速度。

机器人匀速运行时,电机转速 $n = 60i / (2\pi R_4)$,电机轴转矩 $M = \mu mg R_4 / (i\eta)$ 。电机转子的总转动惯量 $J = (m_4 R_4^2 + m_3 R_3^2) / (2i^2 \eta)$ 。机器人加速运行时,电机轴转矩

$$M_s = M + J\alpha / (i\eta),$$

式中 α 为电机转轴角加速度。

经计算得: $P = 156.8$ W, $n = 2\,548$ r/min, $J = 0.277\,8$ g·m², $M = 0.619$ N·m, $M_s = 0.638$ N·m。

综合考虑各参数匹配度与机器人电机选型原则^[11-12],选取表贴式 ASM200 电机,参数如表 1 所示。

表 1 表贴式 ASM200 电机参数

额定 电压/V	额定 电流/A	额定转速/ (r·min ⁻¹)	额定扭矩/ (N·m)	瞬时最大 扭矩/(N·m)	转子转动惯量/ (kg·cm ²)	磁通/Wb	定子电感/H	定子 电阻/Ω	极数
24	6.5	3 000	0.64	1.28	0.28	0.034 182	0.000 450	0.45	10

1.2 驱动控制系统设计

PMSM 系统是多变量、非线性、强耦合的系统,采用矢量控制(field oriented control,FOC),可将 PMSM 控制系统由复杂的非线性交流电机系统等效为易于控制的直流电机系统^[13-15]。PMSM 的电流闭环矢量控制如图 3 所示。确定电机参数后,通过 FOC 的 Clarke 坐标变换与 Park 坐标变换,建立电机的两相同步旋转坐标轴线性数学模型;通过传感器采集电机三相电流参数和电角度信息,FOC 将三相 PMSM 矢量转化为 d 轴和 q 轴控制器所需电流 I_d 、 I_q 和电压 V_d 、 V_q ,在 d 轴和 q 轴上分别控制,通过比例-积分(proportional-integral,PI)控制器生成可控制电机输出的电压信号 V_α 、 V_β ;对电压信号 V_α 、 V_β 进行空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation,SVPWM),生成 3 个开关作用时间信号 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} ;将 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} 与定时器中心计数模式产生的三角波信号相比,生成脉冲宽度调制(pulse width modulation,PWM)波形信号,输入全桥逆变器,生成控制电机旋转的交流电压信号 V_a 、 V_b 、 V_c 。为方便实际工程调试,引入比例-积分-微分(proportional-integral-derivative,PID)控制器调节控制系统。电流闭环控制的目标是使电机转矩与调节电流的 PID 控制器输出产生对应关系,电机输出转速受转矩影响,可通过电流闭环控制稳定输出电机转速,实现电机运行时的转矩稳定。实际运行时,机器人需根据巡检任务要求改变现行速度并快速达到设定速度,实现运行速度的自动控制。在电流闭环控制的基础上引入速度 PID 控制,实现 PMSM 系统的速度-电流双闭环控制,如图 4 所示,在电流闭环控制的基础上通过传感器测得实时运行角速度 ω ,计算实时运行速度与参考速度 ω_{ref} 的偏差,将偏差输入 PID 控制器,通过 PID 控制器动态控制电流环中 q 轴的输入电流 I_{q_in} ,使电机输出转速快速收敛至给定参考转速。

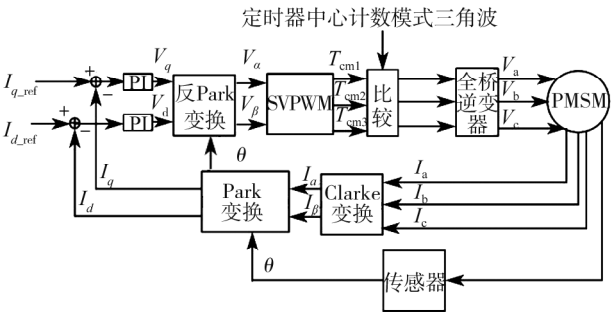


图 3 PMSM 电流闭环矢量控制示意图

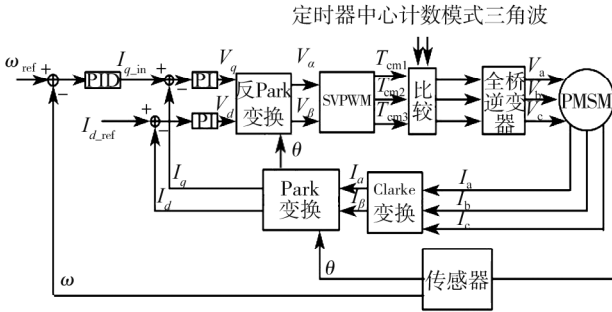


图 4 PMSM 速度-电流双闭环控制示意图

1.3 驱动控制系统硬件方案设计

STM32 单片机运算性能高,功耗低。选用 STM32F446 为主控芯片,DRV8301 为电机驱动芯片,开发的控制系统如图 5 所示。STM32F446 主控芯片输出 PWM 信号到 DRV8301,DRV8301 与 STM32F446 主控芯片间通过串行外设(serial peripheral interface,SPI)接口通信,由 SPI 接口通信配置 DRV8301 的工作模式和电流控制方式等相关参数,DRV8301 接收 PWM 信号,放大一定比例,生成可驱动三相逆变器金属氧化物半导体型场效应管(metal oxide semiconductor field effect transistor,MOSFET)的 PWM 信号,三相逆变器生成等效的交流电压控制 PMSM 旋转。DRV8301 也可通过 SPI 接口向主控芯片发送电机电压、电流和温度等状态信息,在三相逆变器的下桥臂采集电机运行时的电流信号,通过 DRV8301 内置运算放大模块计算,输出到 STM32 单片机模拟数字转换(analog-to-digital converter,ADC)模块,霍尔传感器采集

PMSM 运行时的电角度信号后输出到 ADC 模块,可实现运行时电流信号与电角度信号的实时采集反馈,采集到的信号在 STM32 单片机运算模块进行 FOC、SVPWM 调制、PID 算法等相关运算,构成完整的电流-速度闭环控制系统。主控芯片通过通用异步串行接收发送器(universal synchronous asynchronous receiver transmitter,USART)与上位机通信,检测电机运行状态,调试控制系统。

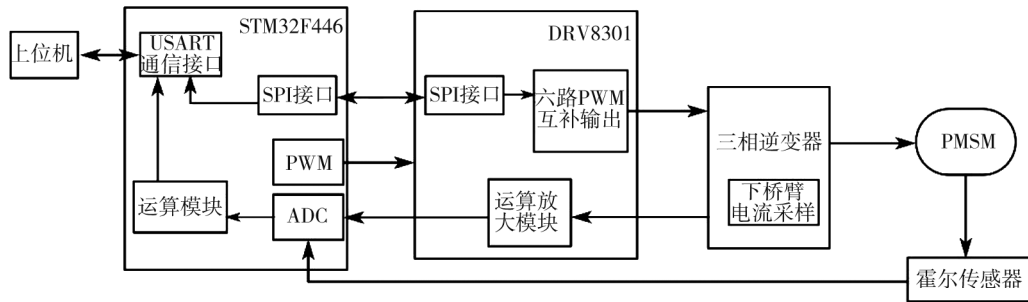


图 5 控制系统硬件框图

1.4 驱动控制系统软件方案设计

以软件 IAR Embedded Workbench 为开发平台,采用 C 语言编写 PMSM 控制程序,如图 6 所示。PMSM 控制程序分为硬件初始化、主程序循环、中断服务程序 3 部分,各部分程序的流程如图 7 所示。

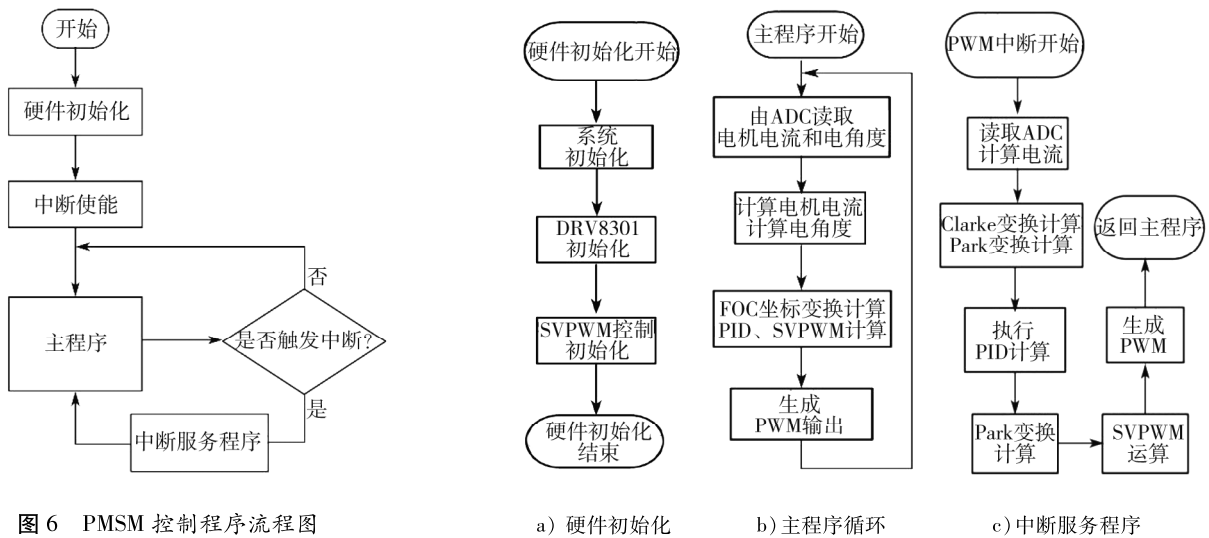


图 6 PMSM 控制程序流程图

a) 硬件初始化

b) 主程序循环

c) 中断服务程序

图 7 各部分程序流程图

硬件初始化时包括系统初始化、DRV8301 初始化、SVPWM 控制初始化 3 部分:系统初始化包括设置时钟、初始化通用输入输出(general purpose input output,GPIO)端口、初始化定时器、配置 ADC 和设置 SPI 参数;DRV8301 初始化包括配置 SPI 参数和参数写入寄存器;SVPWM 控制初始化包括复位 PWM、初始化 PID 控制器和初始化变换矩阵。

运行主程序时,通过主控芯片 ADC 读取电机电流和电角度的模拟量信号,计算读取的电机电流和电角度模拟信号,转化为数字信号,将数字电机电流与电角度信号进行 FOC 坐标变换计算和 PID、SVPWM 相关运算,根据计算结果生成 PWM 输出。后续等待控制命令或中断信号,若未检测到控制命令或中断信号,则不断重复上述步骤。若检测到控制命令或中断信号,则跳出主程序,执行中断服务程序。

中断服务程序中的核心是 PWM 中断子程序。由控制器读取 ADC 中电机两相电流 I_a 、 I_b 及霍尔传感器电角度 θ ,计算第三相电流 I_c ,并对 I_c 进行 Clarke 变换与 Park 变换,得到 d 轴电流 I_d 与 q 轴电流 I_q ,对 I_d 、 I_q 执行 PID 计算,得到 d 轴电压 V_d 与 q 轴电压 V_q ,对 V_d 、 V_q 进行 Park 变换后执行 SVPWM 运算,生成

控制 PWM 信号,运行中断服务程序后将 PWM 信号更新到主程序,继续运行主程序。

2 仿真与试验分析

采用软件 MATLAB Simulink 搭建仿真模型与实物试验时,需设定系统参考电流。采用控制形式为 $I_d=0$, d 轴不产生电枢反应,即不产生转矩。此时表贴式 PMSM 中轴电流用作产生电磁转矩, $d-q$ 轴电压实现变量解耦,改变 I_q 可控制 PMSM 的转矩和转速^[16-17]。

2.1 仿真模型及结果分析

按设计驱动控制系统,采用 MATLAB Simulink 仿真模块搭建 PMSM 电流闭环仿真模型,采用 MATLAB 的 FCN 模块导入编写的程序进行矢量控制,根据 PMSM 额定电压设置参考 $I_d=0$, $I_q=2\text{ A}$,对电机选用 Permanent Magnet Synchronous Machine 模块。

对三相逆变器选用 Universal Bridge 模块,根据表 1 的电机参数设置电枢电感、定子相电阻,磁链值/转动惯量、黏滞摩擦系数、极对数、静摩擦力,反电动势为类正弦波,整定控制系统中 PI 控制器 (proportional integral controller,比例调节和积分调节控制器)的 P 增益与 I 增益时,引入电流环带宽

$$\omega_c=2\pi\{R_0\}_\Omega/\{L\}_H,$$

式中: R_0 为定子电阻, L 为定子电感。

电流环控制系统的 P 增益 $K_p=L\omega_c$, I 增益 $K_i=R_0\omega_c$ 。为便于观测,设置仿真时间为 1 s。经计算得到 $\omega_c=6\,283\text{ Hz}$, $K_p=2.827\,35$, $K_i=2\,827.35$ 。

搭建的仿真模型如图 8 所示,仿真模型中 PMSM 相关参数配置如表 2 所示,在电流环控制的基础上搭建速度-电流双闭环仿真模型,如图 9 所示。

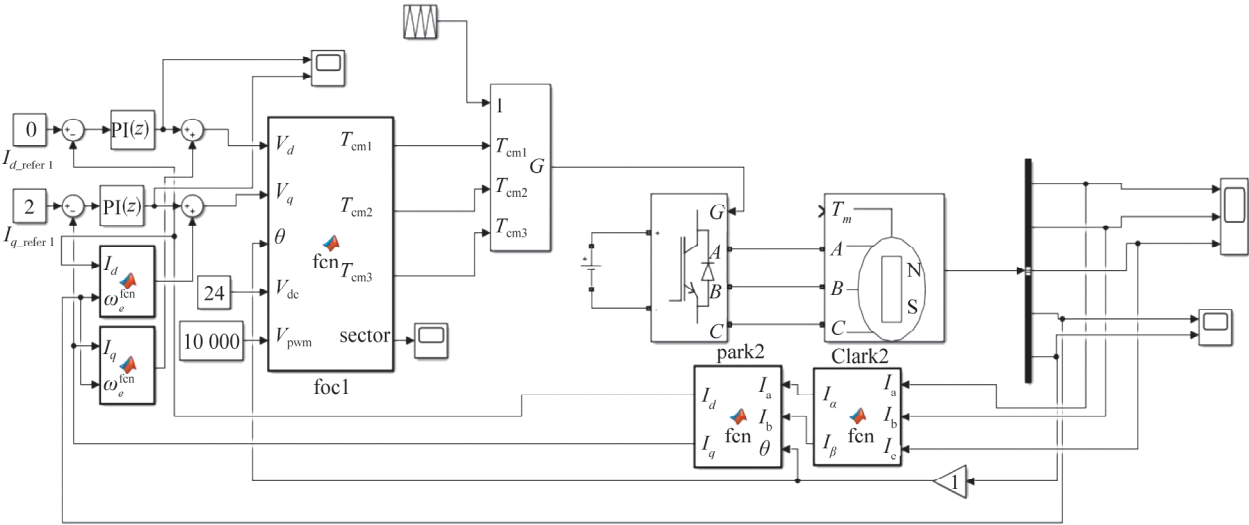


图 8 PMSM 电流环 Simulink 仿真模型

表 2 PMSM 仿真参数

电机定子 电阻/ Ω	电机定子 电感/mH	永磁体 磁链/mWb	转子转动 惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	极对数	电机转子 初始位置/rad	电机转子初始 角速度/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
0.45	0.45	34.182	0.000 028	5	0	0

速度环 PI 控制器中的 P 增益

$$K_{pv}=\{\beta\}J/(1.5p\{\Phi_f\}),$$

式中: $\{\beta\}$ 为速度环带宽 β 的数值, $\beta = 100 \text{ Hz}$; p 为电机极对数; $\{\Phi_f\}$ 为以 T 为单位的电机磁通 Φ_f 的数值。

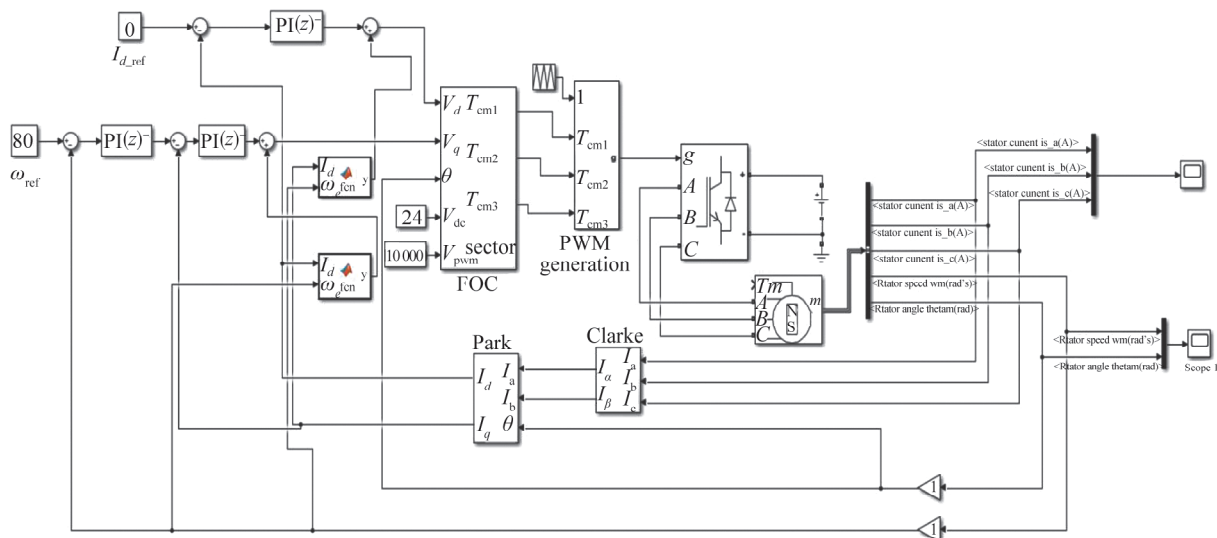


图 9 PMSM 速度-电流双闭环仿真模型

I 增益 $K_{IV} = \beta K_{PV}$ 。代入电机相关参数, 计算得到 $K_{PV} = 0.109$, $K_{IV} = 10.9$ 。

将电流环及速度环的 P 增益与 I 增益分别代入仿真模型, 设定参考速度环转速为 80 rad/s , PMSM 电流环仿真结果如图 10 所示, PMSM 速度-电流双闭环转速仿真如图 11 所示。

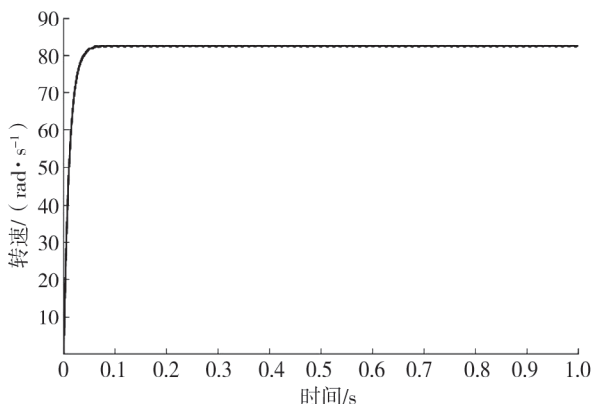


图 10 PMSM 电流环转速仿真结果

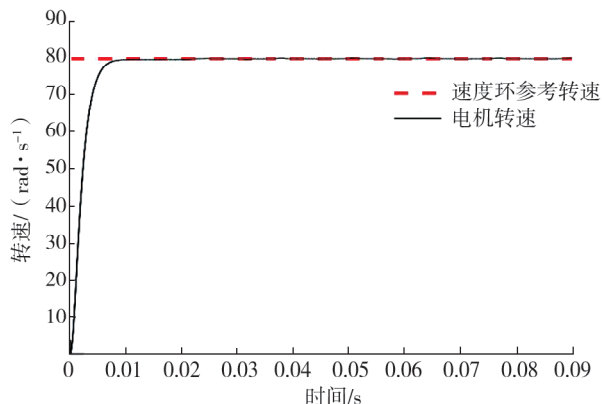


图 11 PMSM 速度-电流双闭环转速仿真结果

由图 10 可知: 在电流环控制系统的作用下, 运行约 0.1 s 后 PMSM 达到参考转速并保持稳定。说明所设计的电流环控制系统可确保 PMSM 稳定输出转速, 保证机器人长时间稳定执行巡检任务。转速受转矩影响, 说明输出转矩稳定, 不会对系统产生频繁冲击, 保证系统可靠。

由图 11 可知: 在速度-电流双闭环控制系统作用下, 运行约 0.01 s 后 PMSM 达到参考转速 80 rad/s , 精确稳定, 控制过程中 PMSM 转速无剧烈波动。速度-电流双闭环控制系统使 PMSM 快速稳定在参考速度的时间比电流环控制系统更短, 保证机器人快速精准运行。

2.2 实物试验平台及结果分析

根据驱动系统设计方案搭建的驱动系统试验平台, 如图 12 所示。驱动系统由 24 V 稳压电源供电, 上位机软件为 MATLAB, 采用表贴式 ASM200 永磁同步电机, 由霍尔传感器采集电机运行时的电角度信号, 由 USB 连接驱动控制板和计算机, 实现与上位机的通信, 调试器 STlink 将 IAR Embedded Workbench 中的控制代码下载至控制驱动板进行系统调试。根据速度-电流双闭环仿真模型设置控制程序中的 PI

参数后,在平台进行电机空载与带载转速试验,通过电机空载转速试验与带载转速试验验证所设计驱动系统的实际可行性。

验证驱动控制系统的实际可行性,进行电机空载转速试验,电机的期望转速应与速度-电流双闭环仿真模型中速度环参考转速保持一致,设置电机期望转速为 80 rad/s,通过上位机查看电机空载转速试验结果,如图 13 所示。由图 13 可知:采用速度-电流双闭环控制的 PMSM 转速无超调快速收敛到期望转速,转速无明显波动,与仿真结果一致。说明所设计的驱动控制系统能够达到快速、稳定、可靠、精确控制电机转速的要求,所设计的驱动控制系统实际可行。



图 12 PMSM 实物试验平台

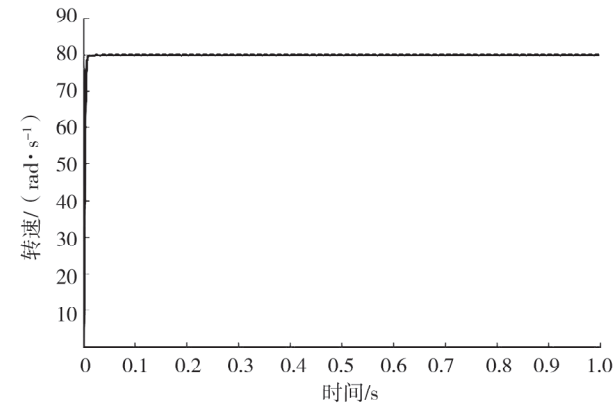


图 13 PMSM 空载转速试验结果

在驱动控制系统实际可行的前提下,在实物试验平台的基础上设计电机等质量带载试验验证驱动系统的实际可行性,如图 14 所示。通过联轴器连接 PMSM 与电机转轴,电机转轴与带有轴承的轴承座相连,轴承座下挂 20 kg 负载铁块模拟机器人质量,转轴末端连接机器人的驱动轮,机器人驱动轮放置在 H 型钢轨道截面上,模拟机器人运行工况。试验前,检查 PMSM 上的电机位置传感器是否正常工作,此传感器提供准确的转子位置和角度反馈信息,确保 PMSM 稳定运行并满足精确控制运行速度的要求,电机位置传感器正常工作是 PMSM 驱动系统稳定精确运行的前提^[18-20]。电机位置传感器可正常工作时,根据 Simulink 仿真模型在控制程序中设置相应的控制环 PI 参数。

实际工况下机器人正常匀速运行时的速度小于机器人按最大行走速度匀速运行时的速度 2 m/s,说明机器人在正常匀速运行时的电机转速小于机器人按最大行走速度匀速运行时的电机转速 2 548 r/min (42 rad/s)。为更贴合实际工况,在进行电机等质量带载试验时,选取的电机期望转速应小于 42 rad/s,设置电机的期望转速为 40 rad/s。通过上位机查看电机带载运行的转速情况,试验结果如图 15 所示。由图 15 可知:电机带载运行正常,电机转速无超调快速收敛至期望速度,转速无明显波动。说明在实际工况下,本文所设计的变电站轨道式巡检机器人 PMSM 驱动系统运行快速、稳定、可靠、精确,符合预期设计要求,实际可行。

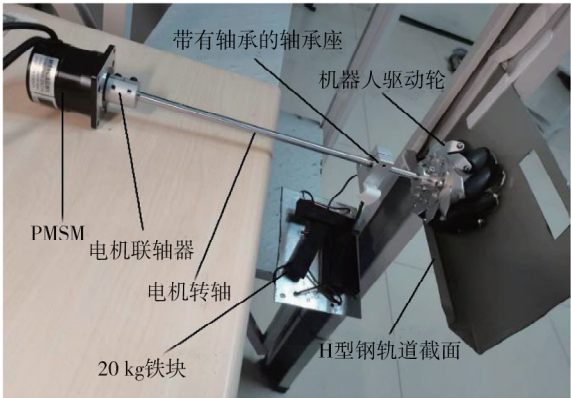


图 14 PMSM 等质量带载试验平台

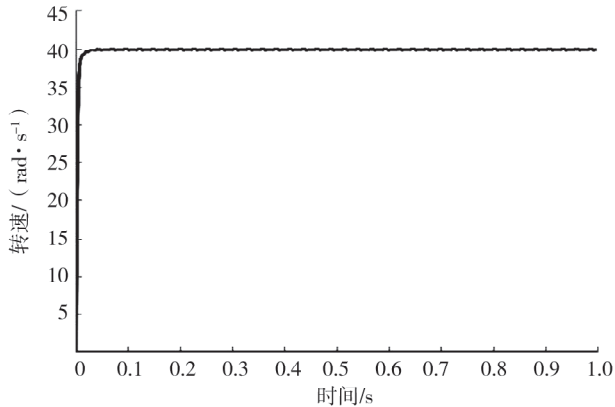


图 15 PMSM 带载转速试验结果

3 结束语

根据变电站轨道式巡检机器人机械参数,选取表贴式 ASM200 的永磁同步电机作为变电站轨道式巡检机器人的驱动电机,设计机器人的驱动系统,进行仿真与实物试验验证。采取电流-速度双闭环矢量控制方式,电机的转速无超调稳定收敛至参考转速,说明变电站轨道式巡检机器人 PMSM 驱动系统的稳定性、精确性、可靠性良好,能满足变电站巡检任务的相关指标要求。电机在空载与带载试验中均能稳定精确运行,说明本设计方案实际可行。

PMSM 矢量电流闭环控制系统依赖电机转子位置传感器的作用,若出现传感器采集精度偏差、传感器损坏等问题,驱动系统无法精确运作,影响巡检任务和电力系统效益。可进一步研究电机无位置传感器工况下 PMSM 驱动系统在变电站轨道巡检机器人上的应用。

参考文献:

- [1] 吴锴,左兆陆,窦少校. 我国轨道式巡检机器人研究及发展现状[J]. 软件, 2018, 39(11):80-83.
WU Kai, ZUO Zhaolu, DOU Shaoxiao. Research and development status of track inspection robot in China[J]. Software, 2018, 39(11):80-83.
- [2] 杨从赞,钱平,徐嘉龙. 变电站巡检机器人应用与技术分析[J]. 工程建设与设计,2017(24):217-218.
YANG Congzan, QIAN Ping, XU Jialong. The application and technical analysis of substation inspection robots[J]. Construction and Design for Engineering, 2017(24):217-218.
- [3] 胡绍刚,贾明月,刘君. 轨道式变电站巡检机器人的研究与应用[J]. 电气应用,2013,32(增刊2):613-616.
- [4] ISATO M, SAWA K, UENO T. Commutation phenomena and brush wear of DC motor at high speed rotation[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2017, E100. C(9):716-722.
- [5] 郭峰. 轨道式变电站设备巡检机器人的设计与应用[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2016.
GUO Feng. The design and the application of the rail-mounted equipment inspection robot for substation[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2016.
- [6] BLUM J. Driving stepper and servo motors[M]. [S.l.]:John Wiley & Sons, Inc., 2019:99-124.
- [7] 鲜开义. 变电站轨道式巡检机器人控制系统设计[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
XIAN Kaiyi. The design of control system for substation track inspection robot[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2018.
- [8] 王凯. 变电站巡检机器人关键技术及系统的研究与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
WANG Kai. Research and implementation on the key technologies and system of substation inspection robot[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [9] 尹剑琪. 轨道式巡检机器人设计与实验研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2020.
YIN Jianqi. Design and experimental study of orbit inspection robot[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [10] 邹文斌,潘松峰,李先弘,等. 基于复合控制的永磁同步电机伺服系统设计[J]. 机械制造与自动化. 2023,52(2):209-212.
ZOU Wenbin, PAN Songfeng, LI Xianhong, et al. Design of permanent magnet synchronous motor servo system based on compound control[J]. Machine Building and Automation, 2023, 52(2):209-212.
- [11] 何新林,焦林,尚苗,等. 直驱式托盘交换装置驱动系统惯量匹配研究[J]. 制造技术与机床,2017(6):73-75.
HE Xinlin, JIAO Lin, SHANG Miao, et al. Research on inertia matching of drive system of direct drive rotary pallet exchange device[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2017(6):73-75.
- [12] 赵苇航,曹勇,鞠丽梅. 小型四轮移动机器人驱动电机选型设计计算[J]. 机械设计,2018,35(增刊2):357-359.
ZHAO Weihang, CAO Yong, JU Limei. Design calculation of small four-wheel mobile robot drive motor[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(Suppl. 2):357-359.
- [13] 付兴贺,陈锐. 电机中 ABC 到 dq0 坐标变换的梳理与辨析[J]. 微特电机, 2021, 49(4):1-8.

- FU Xinghe, CHEN Rui. Criticism and argument on coordinate transformation from ABC to dq0 in electric machine[J]. Small and Special Electrical Machines, 2021, 49(4): 1-8.
- [14] 徐旭明. 永磁同步电机矢量控制系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
XU Xuming. Development on vector control system for permanent magnet synchronous motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [15] 杨贵杰, 孙力, 崔乃政, 等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 79-83.
YANG Guijie, SUN Li, CUI Naizheng, et al. Study on method of the space vector PWM[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 79-83.
- [16] 樊峰宇, 周兆忠, 赵颖, 等. 基于电流解耦的表贴式永磁同步电机无源控制研究[J]. 工程设计学报, 2022, 29(6): 731-738.
FAN Fengyu, ZHOU Zhaozhong, ZHAO Ying, et al. Research on passive control of surface-mounted permanent magnet synchronous motor based on current decoupling[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(6): 731-738.
- [17] 张志坚, 荆龙, 赵宇明, 等. 高速低开关频率下永磁同步电机的解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6345-6354.
ZHANG Zhijian, JING Long, ZHAO Yuming, et al. Decoupling control of permanent magnet synchronous motor at high speed and low switching frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6345-6354.
- [18] 生龙, 刘立昊, 叶永强. 永磁同步电机无位置传感器控制现状和展望[J]. 电工电气, 2023(2): 1-8.
SHENG Long, LIU Lihao, YE Yongqiang. Status and prospect on no position sensor control of permanent magnet synchronous motor[J]. Electrotechnical Electric, 2023(2): 1-8.
- [19] 邓智浩, 李争光, 祝后权, 等. 永磁同步电机无传感器控制在电力推进中的应用综述[J]. 船电技术, 2021, 41(7): 49-55.
DENG Zhihao, LI Zhengguang, ZHU Houquan, et al. Overview of application of sensorless control of PMSM in electric propulsion[J]. Marine Electric, 2021, 41(7): 49-55.
- [20] 梁新成, 张智文, 周黎, 等. 高速永磁同步电机控制策略综述[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(1): 60-65.
LIANG Xincheng, ZHANG Zhiwen, ZHOU Li, et al. A summary on control strategy of high-speed permanent magnet synchronous motor[J]. Transport Energy Conservation and Environmental Protection, 2023, 19(1): 60-65.

Design of the driving system for an orbital inspection robot in a substation

ZHAO Jinyang, ZHANG Hongli*, ZHANG Pengcheng

School of Construction Machinery, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: In order to solve the problem of poor stability in the rotational speed of the track-based inspection robot in a substation, a permanent magnet synchronous motor (PMSM) with good control characteristics is used as the driving motor to design the driving system for the substation track-mounted inspection robot. The structural and motion parameters of the robot are calculated to complete the motor selection. By combining field-oriented control (FOC) and space vector pulse width modulation (SVPWM) strategies, a simulation model of the PMSM drive system is built using MATLAB Simulink software, employing a proportional-integral-derivative (PID) dual-loop control method for velocity and current. The stability and reliability of the designed system are verified, and a physical test platform is set up to conduct no-load and load speed tests on the motor. The results show that the PMSM drive system, using the PID dual-loop velocity-current control, achieves stable and reliable speed control for the substation track-mounted inspection robot. The experimental results are consistent with the simulation results, meeting the expected design requirements, and proving the feasibility of the proposed design solution.

Keywords: orbital inspection robot; driving system; PMSM; FOC; PID velocity-current dual-loop control

(责任编辑:王惠)