

高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制

钟加勇^{1,2}, 程 晓², 胡伟楠², 王雪文², 崔 漾²

(1. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司 电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 带电作业机器人在执行精细化检修工作时, 文章对操作力矩的把控是影响操作精度和操作稳定性的关键因素; 为此, 对高压柜带电作业机器人操作力矩进行精细化控制研究; 通过对高压柜带电作业机器人操作力矩控制硬件进行设计, 使得高压柜带电作业机器人能够实现从数据采集和感知到智能决策和实际执行的全过程; 在此基础上, 得到高压柜待检修目标确定定位结果后, 在 PID 算法的基础上, 使用灰狼算法对 PID 控制器参数进行自适应优化, 满足高压柜的检修任务中的多个复杂操作步骤; 结合理想的力矩变化曲线对带电作业机器人进行力矩控制, 进而保护带电作业机器人的机械臂, 由此完成高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制; 经实验测试可知, 所设计系统的超调量在 0.5% 以内; 拟合优度相对更大, 更加接近 1; 由此说明所设计系统对带电作业机器人的控制精准度更高, 稳定性更好, 更有利于实现精细化操作, 可以有效避免误操作现象的发生, 满足了高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制的需求。

关键词: 高压柜; 带电作业机器人; 精细化操作; 力矩; 自动控制系统

Fine Control of Operating Torque for Live Working Robots in High-voltage Cabinets

ZHONG Jiayong^{1,2}, CHENG Xiao², HU Weinan², WANG Xuewen², CUI Yang²

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: The precise control of operating torque is a key factor affecting the operational accuracy and stability of live working robots during fine maintenance work. Therefore, the precise control of operating torque for live working robots in high-voltage cabinet is studied. The hardware for controlling the operating torque of live working robots was designed to achieve entire process from data collection and perception to intelligent decision-making and actual execution. On this basis, after obtaining the precise positioning results of the high-voltage cabinet maintenance target, the PID controller parameters were adaptively optimized using the Grey Wolf algorithm based on the PID algorithm, meeting the multiple complex operational steps in the high-voltage cabinet maintenance task. Integrating the ideal torque change curve to control the torque of the electrified operation robot, thus protecting the robot's mechanical arm, and achieving precise control of the operating torque of the high-voltage cabinet live working robot. Experimental testing shows that the overshoot of the designed system is within 0.5%, with a relatively higher fitting goodness, approaching 1.0, indicating that the designed system has better control accuracy and stability of the live working robot, which is more conducive to achieving fine operations, effectively avoiding misoperation. It can meet the requirements for precise control of operating torque for the high-voltage cabinet living working robot.

Keywords: high voltage cabinet; live working robot; refined operation; torque; automatic control system

收稿日期: 2024-02-29; 修回日期: 2024-04-23。

基金项目: 国网重庆市电力有限公司科技项目基金(KJ2023_033)。

作者简介: 钟加勇(1981-), 男, 博士研究生, 高级工程师。

通讯作者: 程 晓(1993-), 男, 硕士研究生, 工程师。

引用格式: 钟加勇, 程 晓, 胡伟楠, 等. 高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(5): 152-161.

0 引言

高压柜作为高压设备的关键部分,具备自动开关、自动输电和断电等功能,主要应用于供电局和变电所中进行电压控制。由于高压柜所涉及的电压较高,其危险性也相对较高。因此,在每次定期检修时^[1],必须进行事先停电操作,否则将对检修工人的人身安全构成严重威胁。为了解决这个问题,带电作业机器人得到广泛研究和开发。带电作业机器人不仅可以避免停电造成的损失,而且大幅降低了检修工作的安全风险,同时提高了工作效率^[2],从而实现高压柜内部的维护工作。然而,由于高压柜内部空间狭小,带电作业机器人操作难度大^[3],如何精确控制带电作业机器人的操作力矩,以实现细化操作,进一步提高操作效率和安全性成为了一个重要的研究问题。

关于带电作业机器人的控制研究有很多,很多专家和学者依据各种模型和算法研究了很多不同的控制方法。例如周帅等^[4]提出了一种基于神经网络的控制方法,该方法中首先利用传感器采集设备机器人工作过程中动作参数,然后将参数信号反馈给训练好的神经网络模型,通过神经网络模型预测得出修正值,最后将修正值与当前时刻的参数值相加得出下一个时刻机器人的动作控制参数,完成控制。这种控制方法容错性高,泛化能力强,但是可解释性弱。刘运忠等^[5]提出了一种 PSO+模糊 PID 的控制方法,该方法中将模糊控制与 PID 控制结合在一起设计一种混合控制器,然后利用粒子群算法对控制器的比例因子参数进行优化,最后以实际压力与预期压力之间的误差为输入,计算控制量,实现控制。这种控制方法的控制精度高,稳定性强,但是过程复杂,容易出现控制延迟。朱志浩等^[6]提出了一种基于自适应降阶滑模算法的控制方法,该方法首先建立了关于机器人的动力学模型并为其设置约束条件,然后利用自适应降阶滑模算法对动力学模型中的未知扰动进行补偿,完成控制器设计。该方法的响应速度快,但是控制稳定性较差,对于进行高精度工作的机器人适用性较差。

基于上述研究内容,操作力矩的精准控制是带电作业机器人研究中的重点之一。本文进行高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制。该控制以一种改进 PID 控制器为核心,以多种物理设备和软件程序为辅助,实现操作力矩的精细化控制,为高压柜带电检修工作提供有效的帮助。

1 机器人操作力矩精细化控制硬件设计

高压柜内部空间通常狭小且布局复杂,装有各种设备和连接线路。为了适应这种复杂环境,带电作业机器人在高压柜内部进行旋钮、开关的转动等精细的操作

时,需要具备精确的力矩控制能力。因此,在带电作业机器人操作力矩精细化控制中通过使用高精度传感器、可编程逻辑控制器和安全保护装置等组件使带电作业机器人具备自主感知和决策能力,实现精确的操作力矩测量和控制,并通过智能化控制系统,使得带电作业机器人能够根据实时的反馈信息和任务要求快速调整力矩,适应不同的操作场景和需求。

高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制结构如图 1 所示。

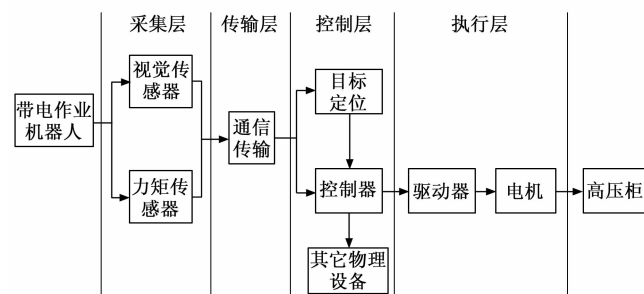


图1 高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制结构图

精细化控制过程中的控制目标是带电作业机器人本体^[7-8],对象是高压柜。如图1所示,二者之间建立的框架结构由采集层、传输层、控制层以及执行层组成。

1.1 采集层

采集层是系统中的数据采集和感知部分,负责收集环境和带电作业机器人状态的相关信息^[9-10],相当于系统的对外感知器官。该层包括视觉传感器和力矩传感器两个传感器。通过这两个传感器,采集层可以实时获取关于目标物体、工作环境、机器人位置和姿态等重要数据,并将其传输给传输层进行进一步处理。

1) 视觉传感器:

选用的视觉传感器型号为 K210,其外观小巧精致,通过支架安装到带电作业机器人^[11]上与其他主控系统协同工作。在高压柜检修中,视觉传感器能够识别待检修部件,并在画面中框选并显示其名称。通过串口通信,传感器可以传递待检修部件在画面中的位置、大小等详细数据。并提供待检修部件在画面中的位置偏移和方向角度等信息,帮助带电作业机器人实现精准的操作定位。

2) 力矩传感器:

力矩传感器,用于采集带电作业机器人工作过程中力矩参数^[12]。所选用的力矩传感器型号为法兰盘式静态扭矩传感器 LZ-NJY。该传感器利用4个专用的测扭力应变在弹性轴上组成应变桥,通过通电测量可以得到带电作业机器人^[13-14]工作时弹性轴所受扭矩的电信号。力矩传感器在带电作业机器人的安装位置如图2所示。

在力矩传感器完成采集任务后,输出电信号会先后

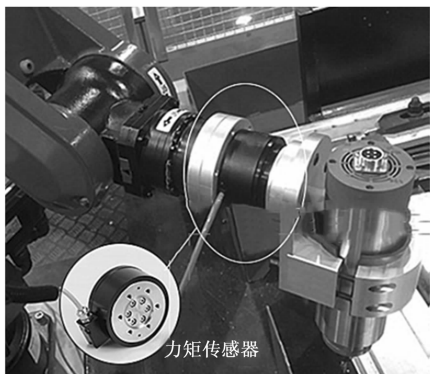


图 2 力矩传感器的安装位置示意图

进入三级放大电路中，第一级放大电路的作用是单纯的对电信号进行放大，二级放大电路进行再次放大的同时，进行滤波，去除电信号中的噪声，三级放大电路对滤波后的电信号放大并调整阻值，保证输出电压稳定性。传感器电信号与力矩之间映射关系如下：

$$A = a(B - \gamma) \quad (1)$$

式中， A 代表力矩； a 代表力矩与电压之间的比例系数； B 代表传感器电信号； γ 表示偏移量。

视觉传感器和力矩传感器在采集层中相互协作，为高压柜带电作业机器人操作提供丰富的信息和反馈，并利用传输层进行传输，从而实现更精确、稳定和安全的操作。

1.2 传输层

传输层负责处理和传输采集层收集到的数据和信息。对采集层中的数据进行分析、处理和编码，然后将其传输到控制层，实现两者之间的信息交流。传输层的通信传输单元采用串口通讯方式，具备 CAN 功能，使用 SP 接口 CAN 控制器 MCP2515，搭配收发器 SN65HVD230，收发器通过 SUB-2 加 32 串口线将该通信模块与系统控制单元连接起来，实现通信传输。通信传输单元与控制单元的连接示意图如图 3 所示。

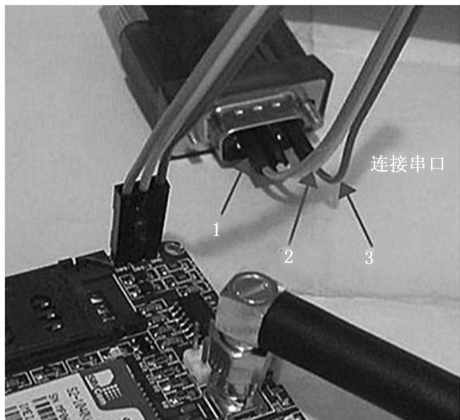


图 3 通信传输单元与控制单元的连接示意图

传输层接收采集层中的数据，并通过特定的通信协议将数据传输给控制层。同时，传输层还接收来自控制层的命令和指令，并将其传输给控制层。

1.3 控制层

控制层是带电作业机器人操作力矩精细化控制的核心^[15-16]。控制层接收来自传输层的数据，通过算法和控制策略对高压柜带电作业机器人进行智能化的决策和控制。本系统控制层中的控制器搭载 51 单片机 AT89C2051，内嵌存储器 2.68 K 的 FLASH，自带 CAN 芯片驱动协议，支持接入 CAN 网络，接收并执行控制指令，含有丰富的动作和工艺指令，简化编程工作。51 单片机 AT89C2051 电路图如图 4 所示。

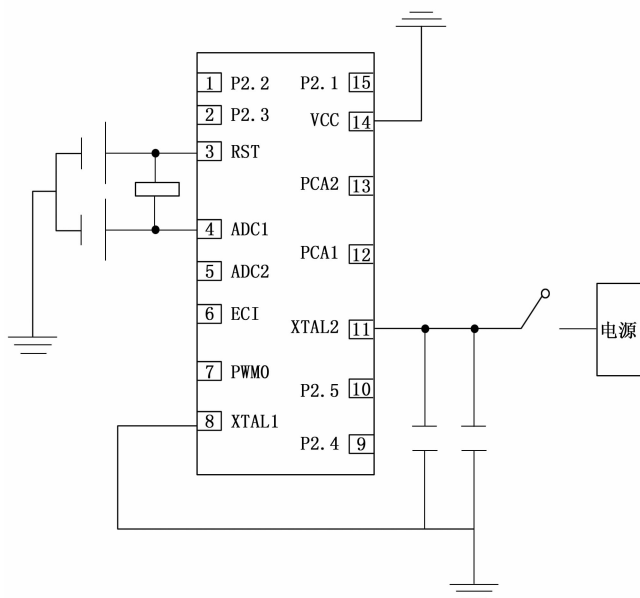


图 4 51 单片机 AT89C2051 电路图

根据设定的目标和规则，控制层对执行层发出控制指令，调整力矩输出或执行相应的动作。

1.4 执行层

执行层是高压柜带电作业机器人的实际执行部分，负责根据控制层下达的指令进行力矩精细化操作，由驱动器和电机组成。执行层会根据控制层提供的力矩指令，控制机器人关节的运动和力矩输出，从而完成精细化的操作任务。

在执行层中所使用的电机为 GHR 系列无刷力矩电机，该电机可以直接嵌入到控制设备中，对带电作业机器人关节提供最合适且精准的控制服务。与电机配套的驱动器为 ESTS1BT，采用 ARM Cortex M4F 内核处理器，内嵌 FOC 矢量控制算法，支持位置/速度/扭矩三闭环控制，电流环带宽最高可达 3.2 kHz，速度环带宽高于 200 Hz。

当控制器根据传感器采集到数据得出控制量后并将

其转换成控制指令,传递给执行层中的驱动器。驱动器与高压柜带电作业机器人的电机相连,执行控制层的控制指令,调整输出的力矩、位置或角度等,控制电机调整力矩,由此通过采集层、传输层、控制层和执行层的协同工作,高压柜带电作业机器人能够实现从数据采集和感知到智能决策和实际执行的全过程,以实现精准、稳定和安全的操作。

2 高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制功能模块设计

高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制中所设计的硬件需要与相应的软件算法相结合,进而确保系统可以正确地执行所需的功能和任务。通过功能模块设计可以编写高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制过程中所需的一系列程序算法^[17-18]。具体设计如下。

2.1 目标定位设计

高压柜内部的电气设备和电路处于高压状态,存在触电风险。带电作业机器人需要能够正确定位和识别高压柜内部的目标位置,以避免机器人接触到高压部分或触发电气故障。然而硬件设计过程中可能存在传感器的噪声和精度问题,这会对目标位置的识别和定位造成干扰,影响机器人的操作精度和稳定性。因此,通过带电作业机器人采集到的高压柜图像进行处理和分析,使得带电作业机器人的采集层能够实时获取待检修部件在高压柜中的位置、角度以及其他相关信息,并将该信息传输到控制层^[19]。这样,控制层可以根据目标位置的数据制定相应的操作策略,并运用合适的力矩控制机制来实现精确的检修操作。识别定位程序流程如下:

1) 视觉图像进行预处理。采用均值法对视觉图像进行灰度化处理。计算图像每个像素点红、绿、蓝三分量的均值,即为每个像素点的灰度值;然后采用中值滤波法进行图像去噪。滤波窗口的尺寸为 3×3 。围绕每个像素点,获取周围9个邻域点的像素值,并按照从小到大的顺序排序,选出位于中间位置的数值并利用该值取代滤波窗口中心位置的像素值,完成去噪。

2) 提取视觉图像特征。图像特征是识别待检修目标的依据。利用LBP算法提取图像中的局部纹理特征,过程如下:以每个像素点为中心,围绕该中心选取周围邻域8个像素点,将邻域8个像素点的灰度值与中心点的灰度值进行对比,大于中心点灰度值的邻域像素点灰度值设置为0,小于中心点灰度值的邻域像素点灰度值设置为1,重复上述过程,完成图像中所有像素点的赋值,最后按照下述公式计算LBP局部纹理特征值:

$$L_o = \sum_{k=0}^{K-1} 2^k f(b_k - b_o) \quad (2)$$

其中:

$$f(b_k - b_o) = \begin{cases} 1, b_k - b_o \geq 0 \\ 0, b_k - b_o < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, L_o 代表中心点的LBP局部纹理特征值; K 代表邻域像素点数量; b_k 代表邻域第 k 个像素点对应的灰度值, $k, k \in K$; b_o 代表中心点对应的灰度值; $f()$ 代表符号函数。

统计图像中像素点的LBP局部纹理特征值出现的频率,构建LBP特征直方图,构成图像特征向量。

3) 目标识别。在这里需要利用支持向量机算法构建一个分类器,该分类器以图像LBP特征向量为输入,利用通过SVM分类器进行是否存在目标的二分类。

4) 假设识别存在目标,围绕该目标在图像画面中框选出来并显示对应的检修设备名称,然后确定画框中心点位置。

5) 建立4个坐标系,即高压柜带电作业机器人坐标系^[20-22],视觉传感器坐标系,图像坐标系,像素坐标系。

6) 根据建立的4个坐标系,将目标中心点在图像中的像素坐标转换为高压柜带电作业机器人工作的三维坐标,完成高压柜中待检修目标定位。

2.2 基于改进PID的力矩控制算法

在高压柜中待检修目标定位完成后,带电作业机器人的机械手放在定位位置处,准备对柜中的部件进行检修。但高压柜的检修任务通常涉及多个复杂的操作步骤,例如更换电气元件、调整电路连接等。带电作业机器人需要能够精确控制力矩来执行这些任务,否则力矩过大可能会造成部件损坏和停电,而力矩过小则无法完成准确的检修任务或可能导致误操作。进而导致操作失败、设备损坏或安全事故。为了有效控制机器人力矩大小,在进行操作前,一般通过人工给带电作业机器人设置一个理想的力矩变化曲线,该理想力矩变化曲线带电作业机器人进行精细化操作力矩的参考。但受到带电作业机器人本体以及环境的影响,带电作业机器人的力矩输出与理想力矩是无法完全达到一致的,存在一定的误差。而PID算法可以根据实际情况精确计算出适当的力矩输出,确保带电作业机器人在操作过程中施加的力矩符合要求,提高操作的准确性和稳定性。同时为了提高控制系统的性能,本系统通过灰狼算法对PID控制器参数进行自适应优化^[23],结合理想的力矩变化曲线对带电作业机器人进行力矩控制。具体过程如下。

步骤1:设置理想力矩变化曲线,记为 $p(t)$, $t = 1, 2, \dots, T$, T 代表带电作业机器人机械手的操作时长。

步骤2:利用力矩传感器采集当下时刻关于带电作业机器人机械手的力矩值,记为 $\bar{p}(t)$, $t = 1, 2, \dots, T$ 。

步骤 3: 计算上述实际力矩与理想力矩之间的差值:

$$\Delta p = \bar{p}(t) - p(t) \quad (4)$$

式中, Δp 代表力矩偏差值。

步骤 4: 将力矩反馈给 PID。

步骤 5: 根据 PID 控制器计算力矩控制量。表达式为:

$$Y(t) = K_p[\Delta p(t) - \Delta p(t-1)] + \frac{T \cdot \sum_{i=0}^T [\Delta p(t) - \Delta p(t-1)]}{T_i} + \frac{T_D \cdot [\Delta p(t) - \Delta p(t-1) - \Delta p(t-2)]}{T} \quad (5)$$

式中, $Y(t)$ 代表 t 时刻的力矩控制量; K_p 代表比例系数; T_i 、 T_D 分别代表积分常数和微分常数; $\Delta p(t-1)$ 、 $\Delta p(t-2)$ 分别代表 $t-1$ 、 $t-2$ 时刻的力矩误差。

由于:

$$\begin{cases} T_i = \frac{K_p}{K_I} \\ T_D = \frac{K_D}{K_p} \end{cases} \quad (6)$$

式中, K_I 、 K_D 分别代表积分系数和微分系数。

由此可以将上述公式 (5) 转换为下述公式 (7) 的形式:

$$Y(t) = K_p[\Delta p(t) - \Delta p(t-1)] + \frac{T \cdot K_I \sum_{i=0}^T [\Delta p(t) - \Delta p(t-1)]}{K_p} + \frac{T \cdot K_D [\Delta p(t) - \Delta p(t-1) - \Delta p(t-2)]}{K_p} \quad (7)$$

步骤 6: 参数整定。在上述 PID 控制器当中, K_p 、 K_I 、 K_D 是决定控制量计算结果准确性的关键参数, 因此采用智能寻优算法——灰狼算法对 K_p 、 K_I 、 K_D 进行寻优, 实现控制器参数整定, 以达到最佳的控制效果。

然而, 灰狼算法本身的收敛速度较快, 容易陷入到局部最优当中。针对这种情况, 在传统灰狼算法中加入收敛因子, 以优化传统灰狼算法。由此采用改进灰狼算法进行 K_p 、 K_I 、 K_D 整定, 具体过程如下:

1) 设置灰狼算法的初始参数。

2) 确定 K_p 、 K_I 、 K_D 的搜索空间, 在搜索空间内生成初始种群, 种群中每个个体都代表一个可行解, 一个可行解在灰狼算法中拟化为每一只狼。生成的初始种群记为 $X = \{x_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, 其中 x_i 代表第 i 个可行解, 也就是第 i 只狼。

3) 计算种群中每个可行解的适应度函数值:

$$H_{x_i} = \sqrt{\sum_{t=1}^T [y_{x_i}(t) - y(t)]^2} \quad (8)$$

式中, H_{x_i} 代表第 i 个可行解的适应度函数值; $y_{x_i}(t)$ 代表第 i 个可行解对应的 PID 控制器控制下的 t 时刻的力矩; $y(t)$ 代表 t 时刻的理想力矩。

4) 根据适应度函数值, 对可行解进行划分, 划分为 3 个群体, α 狼、 β 狼、 δ 狼。

5) 计算收敛因子:

$$\theta(k) = 1 + \sin\left(\frac{\pi}{2} H_{x_i} k^2\right) \quad (9)$$

$$\vartheta(k) = 1 + \cos(\pi H_{x_i} k^{0.1}) \quad (10)$$

式中, $\theta(k)$ 、 $\vartheta(k)$ 代表收敛因子; k 代表迭代次数; K 代表最大迭代次数。

6) 判断群体中每个灰狼个体的适应度值是否小于平均值。若是, 对灰狼个体的位置进行更新; 否则保留灰狼个体的当前位置不变。则更新后的灰狼个体位置表达式为:

$$L(k+1) = \lambda \cdot h \cdot [\theta(k) + \vartheta(k)][L(k) - L_{\text{best}}] \quad (11)$$

式中, $L(k+1)$ 代表更新后的位置; λ 代表步长的缩放因子; h 代表 Levy 飞行分布的随机步长; $L(k)$ 代表更新前的位置; L_{best} 代表全局最优值。

7) 判断是否达到最大迭代次数, 若是, 结束算法, 将种群中适应度函数值最小对应的个体作为最优解, 得出 K_p 、 K_I 、 K_D 整定后的参数; 否则返回步骤 (3) 继续进行搜索。

步骤 7: 经过上述灰狼算法的整定后, 对公式 (7) 进行改进, 得到改进后的控制器。改进 PID 控制器模型如图 5 所示。

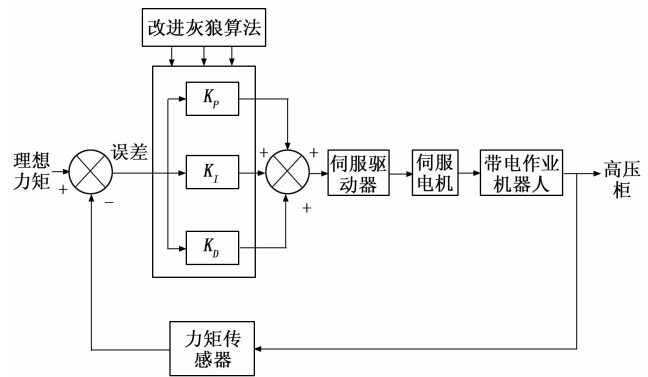


图 5 改进 PID 控制器模型

步骤 8: 经过改进 PID 控制器运算后, 得出 t 时刻的力矩控制量, 系统单片机将控制量转换为执行器能够识别的指令, 将其发送给执行层, 通过驱动器驱动电机调整带电作业机器人在检修时的工作力矩, 完成力矩控制。

综上所述, 使用目标定位结合 PID 算法作为核心, 再利用灰狼算法对 PID 控制器进行改进, 可以解决带

电作业机器人在高压柜检修过程中的问题,从而实现精细化的力矩控制,提高操作的准确性、安全性和稳定性。

2.3 机械手保护

由于高压柜内部空间狭小,带电作业机器人在操作过程中可能会发生机械部件与周围环境或高压柜内部设备的碰撞。这种碰撞可能导致机械部件受损、引起电气故障或引发安全事故。为了避免碰撞,机器人的关节的运动范围和运动速度是有一定范围的,一旦超过整个范围,就需要触发机械手保护,带电作业机器人停止检修工作,保护机械手部件不受干扰损害。通用带电作业机器人^[24]的运动范围和最大运动速度如表1所示。

表1 带电作业机器人工作范围限制表

带电作业机器人部位	运动范围/(°)	最大运动速度/(°/s)
大臂	0~120	50
小臂	0~110	40
腕部	0~360	100
腰部	0~180	80

保护模块的具体运行程序如下。
步骤1:设置带电机器人机械手保护限值。
步骤2:采集带动机器人机械手运动参数。
步骤3:运动参数是否在安全范围内,进行安全风险判断。令 ξ 代表机械手运动参数; $\varnothing$ 代表设置的机械手保护限值。
当 $\xi \leq \varnothing$ 时,表示机械手运动参数在设置的机械手保护限值之内,预警指令显示为安全,带电机器人持续工作;反之,表示机械手运动参数大于设置的机械手保护限值,预警指令显示为危险,控制带电机器人停止工作。

根据设定的阈值,机械手保护模块可以实时监测机械手的力矩输出,并在超出预设范围时立即停止或限制机械手的运动。这样可以避免机械手的过大力矩导致部件损坏或伤害人员的情况发生。

结合上述模块,精细化操作力矩自动控制系统能够根据预设的目标定位和力矩控制,自动进行准确的检修操作。实现机械手的精确定位、力矩控制和及时保护,提高操作的效率和生产效益。

3 实验与分析

3.1 实验设置

为了验证所设计系统的实际应用是否能够达到预期,以一个三自由度的带电作业机器人为控制对象,对XGN15-12高压柜进行测试。在带电作业机器人上安装系统视觉传感器、力矩传感器以及通信传输设备等,搭建测试现场,如图6所示。

测试中高压柜、带电作业机器人、控制器等相关参



图6 带电作业机器人控制测试现场图

数设置如表2所示。

表2 相关参数设置

设备名称	参数名称	参数值
XGN15-12 高压柜	额定电压	12 kV
	额定功率	50 Hz
	主母线额定电流	630 A
带电作业机器人	关节数目	3 个
	关节限位范围	-180°~+180°
	逐渐控制精度	0.1°
	最大可承载负载	20 kg
	编码器分辨率	1,000 步/转
	定位精度	±1 mm
基于改进灰狼算法优化的 PID 控制器	控制精度	0.01 mm
	控制频率	100 Hz
	K_P	0~1.2
	K_I	0~1.2
	K_D	0~1.2
力矩传感器	测量范围	-200 Nm~+200 Nm
	分辨率	0.01 Nm
	采样频率	100 Hz
	安装位置	每个关节安装一个
视觉传感器	安装位置	安装在机械臂末端
	相机分辨率	1 920 像素×1 080 像素
灰狼算法	狼群数量	20
	最大迭代次数	100

适应度函数是评估个体在特定环境下适应能力的指标,对于基于改进灰狼算法优化的 PID 控制器而言,适应度函数能够量化不同 K_P 、 K_I 、 K_D 参数组合下控制器的性能。因此,为了确定最佳参数,拟合3个参数在取值范围中的适应度函数值的变化曲线如图7所示。

从图9中可以看出,经过改进灰狼算法的整定,控制器中3个参数 K_P 、 K_I 、 K_D 分别在0.446、1.027、0.817时适应度函数值达到最小值,因此,确定基于改进灰狼算法优化的PID控制器的 K_P 、 K_I 、 K_D 的最佳取

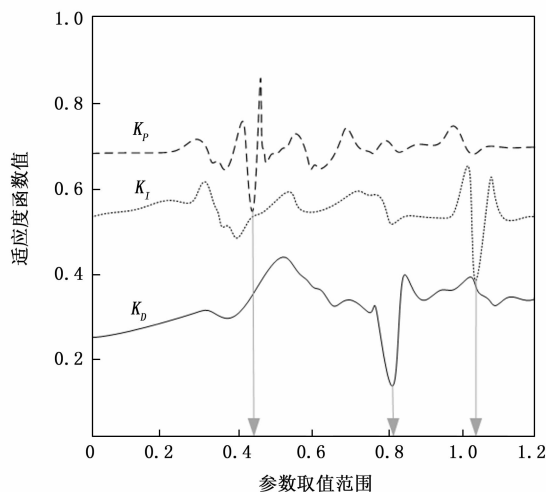


图 7 适应度函数的变化曲线

值为 0.446、1.027、0.817。

3.2 实验过程

结合前文的设计可知,设计系统在实现高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制时,主要包括目标定位和利用改进 PID 控制算法实现精细化控制两个方面。因此,实验也从这两个方面进行。

1) 目标定位:

根据 2.1 部分的目标定位流程,以 XGN15-12 高压柜中的 3 个精细化部件为检修目标,按照下述过程实现部件定位。

步骤 1: 视觉图像预处理: 对从带电作业机器人上安装的视觉传感器采集的图像进行预处理。

步骤 2: 提取视觉图像特征: 从预处理后的图像中提取形状、颜色、纹理等特征。

步骤 3: 目标识别: 根据步骤 2 提取的图像特征,对图像中的 3 个精细化部件进行识别。

步骤 4: 目标框选与显示: 一旦目标被识别,机器人会在图像中框选出该目标,并显示对应的检修设备名称。同时,确定画框中中心点的位置。

步骤 5: 建立坐标系并转换坐标: 建立高压柜带电作业机器人坐标系、视觉传感器坐标系、图像坐标系和像素坐标系。根据这些坐标系,将目标中心点在图像中的像素坐标转换为机器人在三维空间中的工作坐标,从而实现目标的精确定位。

步骤 6: 输出目标定位结果,如图 8 所示。

从定位结果可以证明所设计系统的目标定位模块可以应用到实际作业任务中。

2) 基于改进 PID 控制算法的力矩精细化控制:

为了确保带电作业机器人在执行复杂检修任务时能够精确控制力矩,避免力矩过大或过小导致的操作失

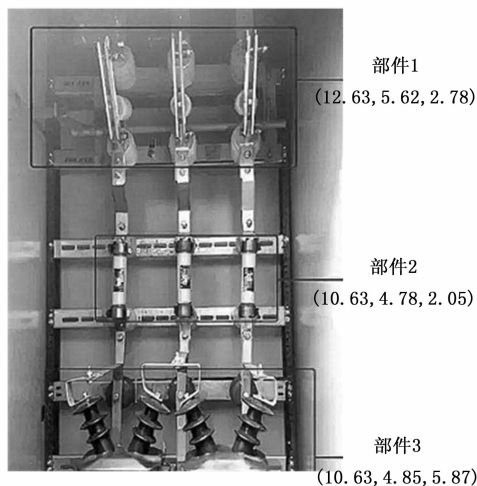


图 8 高压柜目标定位结果

败、设备损坏或安全事故,从而提高操作的准确性和稳定性。在目标定位后,利用改进 PID 控制算法实现力矩精细化控制。具体实验过程如下。

步骤 1: 设置理想力矩变化曲线。

由于这 3 个部件的种类不同、尺寸不同、形状不同,其在检修过程中,对带电作业机器人的力矩要求也不同。为此,针对高压柜中的 3 个精细化部件设置的理想力矩变化曲线如图 9 所示。

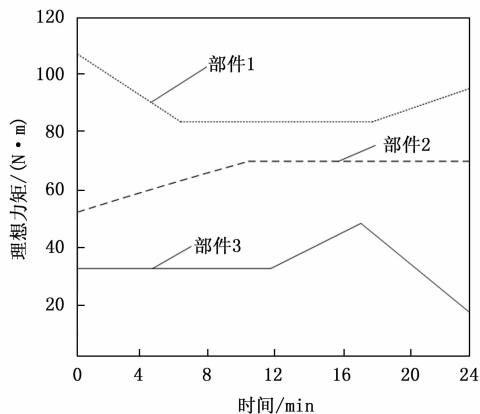


图 9 理想力矩变化曲线图

步骤 2: 采集实际力矩值: 通过力矩传感器实时采集机器人机械手的当前力矩值。

步骤 3: 计算力矩差值: 将实际采集到的力矩值与理想力矩值进行比较,并根据公式 (4) 计算出差值。

步骤 4: 力矩反馈与 PID 计算: 将力矩差值反馈给 PID 控制器,根据 PID 控制器的算法和公式 (5) 计算出当前时刻的力矩控制量。

步骤 5: 利用改进后的灰狼算法对 PID 控制器的 K_P 、 K_I 、 K_D 参数进行整定。

步骤 6: 根据整定后的参数,对 PID 控制器进行

改进。

步骤 7: 执行力矩控制: 将改进 PID 控制器计算出的力矩控制量转换为执行器能够识别的指令, 通过驱动器驱动电机调整带电作业机器人在检修时的工作力矩, 实现精细化的力矩控制, 如图 10 所示。

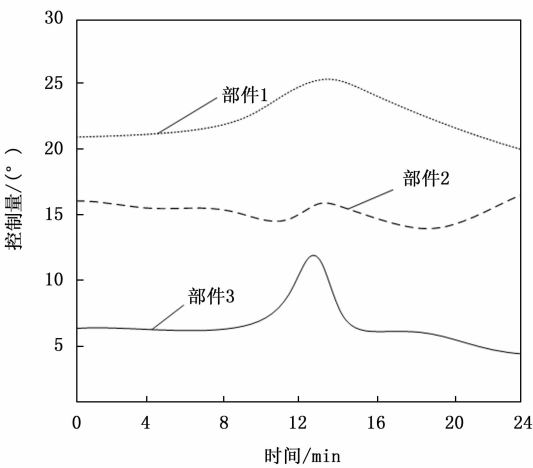


图 10 带电作业机器人操作力矩控制方案

根据上述图 10 方案控制带电作业机器人精细化操作力矩进行调整, 使其能够不断靠近理想力矩。控制后的实际力矩如图 11 所示。

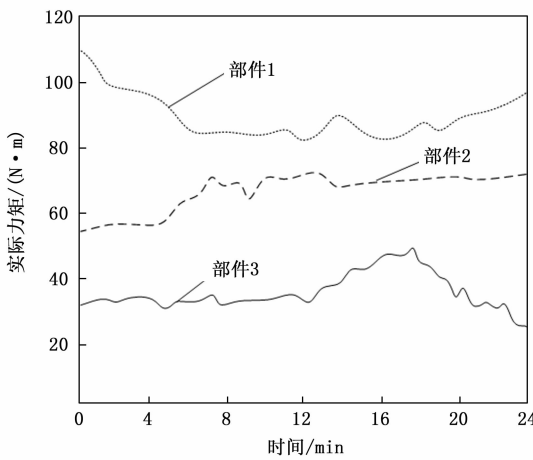


图 11 控制后的带电作业机器人操作力矩变化曲线

从图 11 中可以看出, 图 10 控制后的操作力矩变化曲线与图 7 理想力矩变化曲线基本走势基本吻合, 但是二者之间在各个时刻仍存在一定的误差, 但是该误差很小, 证明了所设计系统可以有效控制带电机器人力矩。

3.3 结果与分析

以文献 [4-6] 提出的控制方法作为对比, 通过评价指标的分析, 确定所设计高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制的控制能力。

1) 目标定位测试:

为了评估高压柜带电作业机器人操作力矩精细化控制的定位准确性。通过提取 LBP 特征并进行目标定位测试, 以确定带电机器人实际操作位置与目标位置之间的偏差和准确度。4 种方法的 LBP 纹理特征提取效果如图 12 所示。

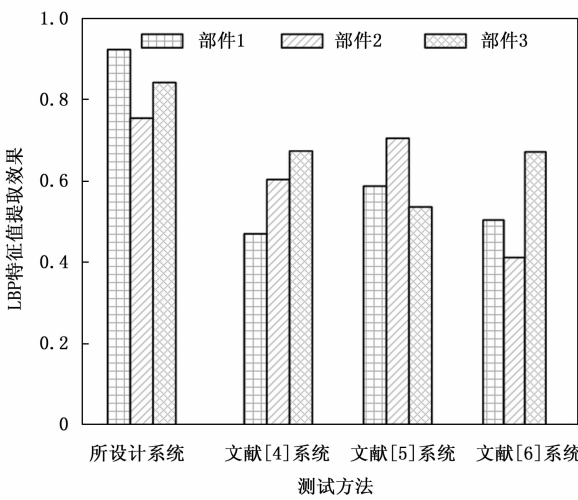


图 12 LBP 纹理特征直方图

分析图 12 可知, 所设计系统的对 3 个部件的特征提取效果在 0.7 以上, 与其他 3 种方法相比, 提取程度较好。可以准确定位高压柜待检修位置。

2) 操作力矩控制效果对比:

针对上述控制后的操作力矩, 计算超调量以及拟合优度来对系统的控制稳定性和控制精准度进行评价。其中, 超调量越小, 证明控制的稳定性越好。超调量的计算公式为:

$$\varphi = \frac{\eta - \mu}{\mu} \cdot 100\%$$
 (12)

式中, φ 代表超调量; η 代表输入量达到的最大值与稳态值之间的最大偏差; μ 代表输入量的稳态值。

拟合优度是指力矩控制后总体偏离理想力矩的程度, 拟合优度的取值都是 0~1, 越靠近理想力矩, 控制精准度越高。拟合优度计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \sum_{t=1}^T [y(t) - \hat{y}(t)]^2$$
 (13)

式中, R^2 代表拟合优度; $y(t)$ 代表 t 时刻的力矩; $\hat{y}(t)$ 代表 t 时刻的理想力矩; $\bar{y}$ 代表力矩的平均值; T 代表控制周期。

在相同的测试条件下, 利用文献 [4]、文献 [5]、文献 [6] 提出的控制方法进行同一个高压柜部件的控制, 然后根据控制结果参照上述两个指标的计算公式, 与文献 [4]、文献 [5]、文献 [6] 系统进行对比, 验证所设计系统的控制效果, 结果如表 3 所示。

表 3 带电作业机器人操作力矩控制效果对比表

对比项目	控制对象	超调量/%	拟合优度
所设计系统	高压柜部件 1	0.455	0.985
	高压柜部件 2	0.362	0.974
	高压柜部件 3	0.374	0.969
文献[4]系统	高压柜部件 1	0.956	0.876
	高压柜部件 2	1.263	0.895
	高压柜部件 3	0.847	0.906
文献[5]系统	高压柜部件 1	0.635	0.815
	高压柜部件 2	0.684	0.763
	高压柜部件 3	0.769	0.886
文献[6]系统	高压柜部件 1	0.926	0.823
	高压柜部件 2	0.879	0.805
	高压柜部件 3	0.978	0.836

从表 3 中可以看出,与文献 [4-6] 系统对比,所研究系统的超调量相对更小,在 0.5% 以内;拟合优度相对更大,更加接近 1。由此说明所设计系统在控制带电作业机器人进行高压柜检修时,控制精准度更高,稳定性更好,更有利于实现精细化操作,更大程度上避免了误操作现象的发生,提高了高压柜检修的工作质量。

3) 带电作业机器人运动范围控制对比:

带电作业机器人的运动过程中,与高压柜以及其内部设备之间的接触可能引起意外损坏。比较不同运动范围控制策略,以防止机器人碰撞到高压柜或其他设备,从而选择最佳的策略以保护设备完整。带电作业机器人运动范围控制对比结果如图 13 所示。

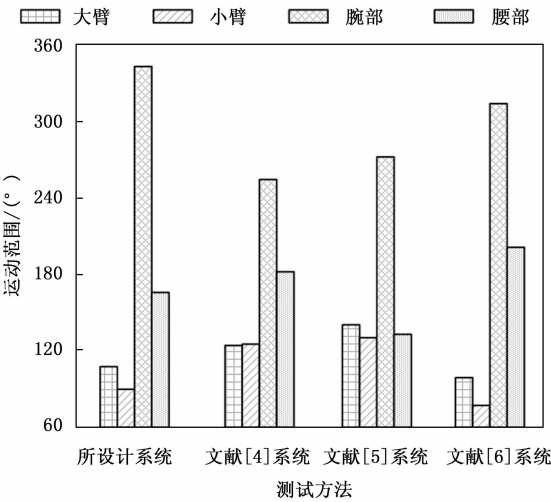


图 13 带电作业机器人运动范围控制对比

分析图 13 可知,与表 1 相比,4 种方法均可以将带电机器人的运动范围控制在较为合理的范围内。其中,使用所设计系统进行精细化控制后可以将带电作业机器人的运动范围控制在较为合理的范围内,可以避免机器人接近高压部分或与其他设备碰撞,保障操作的安全。

4 结束语

在电力系统的高压柜中包含很多部件,人工检修需要花费大量的时间和精力而且在检修过程中还伴随很高的危险性。为此,对高压柜带电作业机器人进行操作力矩精细化控制。实验结果表明:所设计系统的对 3 个部件的特征提取效果较优,控制后的操作力矩变化曲线与理想力矩变化曲线走势基本吻合;超调量更小,拟合优度更大,证明了所设计系统的控制稳定性和控制精度。

参考文献:

[1] 徐善军,任书楠,杜婧,等. 协作机器人在高压带电作业中的应用研究 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (9): 106-110.

[2] 陈柏希,高晓科,王斐宏,等. 面向高压带电作业的机器人三维遥操作技术 [J]. 机械设计与研究, 2022, 38 (5): 11-16.

[3] 杨洋,王建,董新胜,等. 多分裂输电线路末端自重构移动作业机器人机械系统设计 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (8): 3183-3190.

[4] 周帅,刘晓鸣. 基于神经网络的工业机器人力控制研究 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (17): 21-25.

[5] 刘运忠,姜宏,章翔峰. 基于 PSO 优化的模糊 PID 恒力控制研究 [J]. 电子测量技术, 2023, 46 (9): 16-22.

[6] 朱志浩,李蔚,高直,等. 基于自适应降阶滑模算法的受约束多机械臂力/位混合控制 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (17): 51-56.

[7] 高晓科,孙亮,张伟军. 高压带电引流作业机器人系统的设计与开发 [J]. 机械设计与研究, 2021, 37 (5): 10-14.

[8] 陈贤飞,李威,刘惊. 人机协同带电作业机器人系统设计研究 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (8): 12-17.

[9] 甄富帅,宋光明,毛巨正,等. 基于 STM32 的夹爪式蛇形机器人控制系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2022 (9): 96-100.

[10] 赵琪,张华,熊鹏文,等. 一种多功能半自主遥操作的履带式消防机器人控制系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2022 (9): 253-256.

[11] 高长旭,孙巧妍,陈祥光,等. 基于单目视觉的全自动捡球机器人控制算法设计 [J]. 传感器与微系统, 2022, 41 (9): 88-91.

[12] 覃尚活,郭乾,刘颖辉,等. 基于 SMART PLC 的移动机器人控制系统 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (15): 33-36.

[13] 张浩文,刘铮,樊绍胜,等. 核电站法兰盖开盖机器人控制系统的设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2021 (12): 51-56.

[14] 李宏,陈平,刘宋彬. SCARA 机器人控制系统的设计与实现 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (12): 206-210.

- 投稿网址: www.jsjcykz.com