

基于有限差分法的巡检机器人位姿伺服控制策略

李丽平¹, 邵鹏程²

(1. 浙江商业职业技术学院 财会金融学院, 浙江 杭州 310053;

2. 西安交通大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 巡检机器人柔性关节操作空间灵活, 导致其轨迹跟踪及振动控制的难度较大, 为保证巡检机器人高效、准确地完成既定巡检任务, 提出基于有限差分法的巡检机器人位姿伺服控制策略。构建巡检机器人位姿伺服驱动系统动力学模型, 设计基于有限差分法的巡检机器人位姿伺服控制器, 执行巡检机器人关节轨迹跟踪及振动控制, 实现巡检机器人位姿伺服控制。实验结果表明: 巡检机器人关节角度均在0.2 s内完成关节位置指令跟踪, 巡检机器人位姿变化的响应速度较快; 该策略使用后不同关节的输出力矩变化平稳, 关节振动极其微弱; 巡检机器人在简单和复杂巡检环境下, 均能以较小的能量和位姿变化范围完成控制指令。

关键词: 有限差分法; 巡检机器人; 位姿伺服控制; 动力学模型; 轨迹跟踪; 振动控制

中图分类号: TP241.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24408

Position and Attitude Servo Control Strategy of Inspection Robot Based on Finite Difference Method

LI Liping¹, SHAO Pengcheng²

(1. School of Finance and Accounting, Zhejiang Business College, Hangzhou 310053, Zhejiang, China;

2. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: It is difficult to track and control the vibration of inspection robot because of its flexible operation space. In order to ensure the high efficiency and accuracy of the inspection robot, the position and posture servo control strategy based on finite difference method was proposed. The dynamic model of position and posture servo system of inspection robot was constructed, and the position and posture servo controller based on finite difference method was designed. The servo control of position and posture of inspection robot was realized by implementing joint track and vibration control of inspection robot. The experimental results show that the joint angle of the inspection robot is within 0.2 s to track the joint position command, and the robot's response speed is fast. The output torque of different joints is stable and the vibration of joints is very weak. The inspection robot can complete the control command with a small range of energy and posture in simple and complex inspection environment.

Key words: finite difference method; inspection robot; position and posture servo control; dynamic model; track tracking; vibration control

巡检机器人因具有安全稳定、自动避障和适用场景广等优势, 在输电线路、矿井以及建筑设备巡检工作中获得广泛应用^[1]。通过巡检机器人的定期巡检, 可及时发现早期损伤和缺陷, 从而保证待巡检对象的可靠性。巡检机器人位姿直接关系着既定巡检任务的完成效果, 对其进行伺服控制不仅能提升巡检机器人的工作效率, 还能

保证巡检机器人精确地完成巡检任务^[2-3], 因此研究巡检机器人位姿伺服控制策略极为重要。

当前已有相关领域研究学者对巡检机器人位姿伺服控制策略做出了研究, 例如文献[4]针对输电线路巡检机器人的自动越障行为控制复杂、越障效果差的问题, 利用有限状态机设计了五臂巡检机器人控制技术, 对越障行为进行规划和分

基金项目: 浙江省教育厅一般科研项目(Y202147492)

作者简介: 李丽平(1982—), 女, 硕士, 助理研究员, Email: 858793876@qq.com

析,设计了机器人自主越障控制方案;文献[5]提出基于深度强化学习的巡检机器人位姿伺服控制技术,通过深入的强化训练算法,探讨了基于模糊控制的智能电网巡检机器人的运动计划问题。这两种策略在越障控制方面具有较优良的性能,但对于指令信号的响应时间较长,难以完成连续越障控制,且未考虑关节振动控制。

有限差分法是一种经典的数值计算方法,具有计算简便、格式直观等优点,非常适用于伺服控制器设计,因此本文提出基于有限差分法的巡检机器人位姿伺服控制策略。

1 巡检机器人位姿伺服控制策略

1.1 巡检机器人位姿伺服驱动系统动力学模型

巡检机器人的结构通常为中心对称形式,由行走、旋转以及升降等机构组成。在巡检机器人位姿伺服驱动系统中,传动轴系或弹性联轴器能够起到驱动电机和负载之间的连接作用。需要将以上两个连接媒介视作扭簧,其两端分别与驱动电机、负载相连,两个连接媒介拥有一定的扭转刚度和阻尼^[6]。柔性关节是影响巡检机器人位姿的重要部分,其具体结构如图1所示。

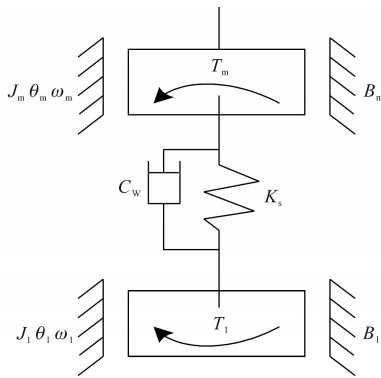


图1 影响巡检机器人位姿的柔性关节结构图
Fig.1 Structure diagram of flexible joint affecting the posture of inspection robot

图1中,对于驱动电机和负载, T_m, T_l 分别为两者的电磁转矩; θ_m, θ_l 分别为两者的转角; J_m, J_l 分别为两者的转动惯量; B_m, B_l 分别为两者的阻尼系数; ω_m, ω_l 分别为两者的角速度。巡检机器人位姿伺服驱动系统动力学模型的方程式如下:

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m - K_s(\theta_l - \theta_m) - C_w(\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_m) = T_m \\ J_l \ddot{\theta}_l + B_l \dot{\theta}_l - K_s(\theta_l - \theta_m) - C_w(\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_m) + T_l = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_s, C_w 分别为传动系统的扭转刚度和阻尼;变量上方的“ \cdot ”和“ $\ddot{\cdot}$ ”分别表示变量的一阶、二

阶导数。

不考虑驱动电机、负载和传动系统的阻尼系数时,所得结果用下式描述:

$$\begin{cases} J_m \dot{\omega}_m = T_m - K_s(\theta_m - \theta_l) = T_m - T_s \\ J_l \dot{\omega}_l = K_s(\theta_m - \theta_l) - T_l = T_s - T_1 \\ T_s = K_s(\theta_m - \theta_l) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_s 为通过传动轴系的扭转生成的轴矩。

利用式(2)能获得驱动电机转速和电磁转矩间的传递函数^[7],如下式:

$$\frac{\omega_m}{T_m} = \frac{s^2 + \omega_a^2}{J_m s^3 + J_m \omega_n^2 s} \quad (3)$$

式中: ω_a, ω_n 为分别为谐振及反谐振频率; s 为电机转速和电磁转矩产生的能量。

假设负载电机惯量比用 R 描述,其与以上两种频率的计算过程如下:

$$\begin{cases} R = \frac{J_l}{J_m} \\ \omega_a = \sqrt{K_s/J_l} \\ \omega_n = \omega_a \sqrt{1+R} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 有限差分法基本原理

以离散形式处理求解域,使其变为差分网,通过数量一定的网格点表征连续的求解域,并利用网格点的差商描述其空间导数,获得将网格点场值视作未知量的差分方程组,同时求解该方程组,此即为有限差分法的核心思想。

令 $v_{i,j}, v_{i+1,j}$ 为 x 轴向 (i,j) 和 $(i+1,j)$ 两点上的速度分量,两者间的关系可以使用泰勒展开式表示:

$$\begin{aligned} v_{i+1,j} = & v_{i,j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} \Delta x + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{2} + \\ & \left(\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^3}{6} + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

式中: Δx 为量级。

有限差商 $\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j}$ 的表达式如下:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{\Delta x} - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{\Delta x}{2} + \left(\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(\Delta x)^2}{6} + \dots \quad (6)$$

等式右侧第一项为有限差分式,其余项共同组成截断误差^[8]。当使用式(6)近似偏微分时,可以忽略截断误差,加之其最低阶项为量级 Δx ,因此可将式(6)转换为下式所示形式,并将其称作一阶向前差分:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (7)$$

式中: $O(\Delta x)$ 为量级 Δx 的高阶无穷小。

$v_{i,j}, v_{i-1,j}$ 为 x 轴向 (i,j) 和 $(i-1,j)$ 两点上的速度分量,两者间的关系使用泰勒展开式表示:

$$v_{i-1,j} = v_{i,j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j}(-\Delta x) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)_{i,j} \frac{(-\Delta x)^2}{2} + \left(\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}\right)_{i,j} \frac{(-\Delta x)^3}{6} + \dots \quad (8)$$

求解式(8)可获得 $\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j}$ 的表达式,具体用下式描述,将其称作一阶向后差分:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{v_{i,j} - v_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (9)$$

将式(5)和式(8)作差,能得到二阶精度中心差分,如下式:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2 \quad (10)$$

通过上述同样的方式,便能获得 y 轴向的一阶向前差分、一阶向后差分以及二阶精度中心差分,具体如下式:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{\Delta y} + O(\Delta y) \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{v_{i,j} - v_{i,j-1}}{\Delta y} + O(\Delta y) \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2\Delta y} + O(\Delta y)^2 \quad (13)$$

1.3 巡检机器人位姿伺服控制策略实现

针对1.1节构建的巡检机器人位姿伺服驱动系统动力学模型,利用1.2节描述的有限差分法,设计巡检机器人位姿伺服控制器进行关节轨迹跟踪及振动控制,从而实现巡检机器人位姿伺服控制。

将驱动电机转角 θ_m 当作式(2)中第一个式子的控制变量,通过设计虚拟控制变量 θ_m 进行巡检机器人的关节轨迹跟踪控制;设计能够使 θ_m 跟踪 θ_m 的驱动电机实际输出力矩 τ_m ,以达到控制关节振动的目的。

若将 θ_m 当作控制变量,依据式(2)中第一个式子可获得下式所示结果:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + [0, \boldsymbol{\theta}^T]^T = [0, \boldsymbol{\theta}_m^T]^T \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{q} = [q_0, q_1, \dots, q_4]^T$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T$$

式中: \mathbf{q} 为巡检机器人姿态角和关节角构成的向量; $\ddot{\mathbf{q}}$ 为 \mathbf{q} 的二阶导数; $\mathbf{H}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 分别为离心力向量和质量矩阵; $\boldsymbol{\theta}$ 为伺服控制器的反馈关节角。

当均能测量 q_0 及其一、二阶导数的情况下, $\boldsymbol{\theta}_d$ 为期望关节轨迹, $\boldsymbol{\theta}$ 和 $\boldsymbol{\theta}_d$ 两者的扩展形式分别为 $\mathbf{q} = [q_0, \boldsymbol{\theta}^T]^T$, $\mathbf{q}_d = [q_0, \boldsymbol{\theta}_d^T]^T$,相应的伺服控制器扩展跟踪误差表示为

$$\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q} = [0, (\boldsymbol{\theta}_d - \boldsymbol{\theta})^T]^T \quad (15)$$

为在有限时间内,使巡检机器人关节轨迹跟踪误差收敛到 $0^{[9-10]}$,定义下式所示的滑模面:

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{e} + \mathbf{K}_e^{-1} \dot{\mathbf{e}} = [0, \mathbf{S}_1^T]^T \quad (16)$$

式中: \mathbf{K}_e 为对角矩阵; \mathbf{S}_1^T 为正定常值矩阵。

综合式(14)和式(16),可得到关于虚拟控制变量 θ_m 的巡检机器人关节轨迹跟踪控制器^[11-12],如下式:

$$[0, \boldsymbol{\theta}_m^T]^T = [0, \boldsymbol{\theta}^T]^T + y_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}_d) + [\mathbf{K}_e \text{diag}(\dot{\mathbf{e}}^2)]^T + [\delta, (\mathbf{K}_1 \boldsymbol{\Sigma}_1)^T]^T + b_1 \text{sgn}(\mathbf{r}_1) \quad (17)$$

式中: δ 为标量参数; $y_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}_d)$ 为伺服控制器参数; $b_1 \text{sgn}(\mathbf{r}_1)$ 为等速趋近项; $\mathbf{K}_1 \boldsymbol{\Sigma}_1$ 为指数趋近项; b_1 为趋近速度。

根据式(11)~式(16)近似获取虚拟控制变量 θ_m 的一阶、二阶导数,所得结果如下式:

$$\dot{\theta}_m(t) \approx \frac{\theta_m(t) - \theta_m(t-h)}{h} = f_1 \quad (18)$$

$$\ddot{\theta}_m(t) \approx \frac{\theta_m(t) - 2\theta_m(t-h) + \theta_m(t-2h)}{h^2} = f_2 \quad (19)$$

式中: t 为采样时间; h 为采样时间间隔。

在式(18)、式(19)的基础上设计有关驱动电机实际输出力矩 τ_m 的控制律,具体如下式:

$$\tau_m = -J_m [f_2 + \mathbf{K}_e(\dot{\boldsymbol{\theta}}_m - f_1)] + \mathbf{K}_s(\boldsymbol{\theta}_m - \boldsymbol{\theta}) - \mathbf{K}_2 r_2 - b_2 \text{sgn}(r_2) \quad (20)$$

式中: $\mathbf{K}_2 r_2$, $b_2 \text{sgn}(r_2)$ 分别为指数和等速趋近项, \mathbf{K}_2 和 b_2 的值均大于0。

通过式(20)可获得巡检机器人关节振动控制器:

$$\tau_m = k_1 \hat{\tau} - (k_1 - 1)\tau - k_2(\dot{\tau}) \quad (21)$$

式中: k_1, k_2 为设计参数; τ 为巡检机器人的输入力矩; $\hat{\tau}$ 为弹性力矩。

通过式(21),实现巡检机器人关节振动控制,完成基于有限差分法的巡检机器人位姿伺服控制设计。

2 结果分析

将某包含伸缩、开合、外摆、压紧、滑移5种关节的巡检机器人作为实验对象,在Simulink平台构建巡检机器人位姿伺服驱动系统动力学模型,并针对该模型利用本文策略进行伺服控制,以验

证该策略对巡检机器人关节轨迹跟踪及振动的控制能力。

选取巡检机器人的开合关节和外摆关节进行振动控制测试,不同时间下,两种关节的原始及控制输出力矩结果如图2所示。

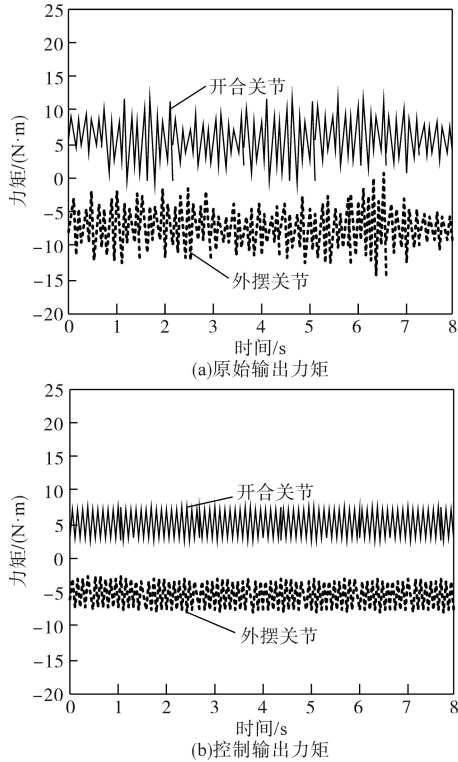


图2 巡检机器人开关的原始及控制输出力矩

Fig.2 Original and control output torque of inspection robot switch

分析图2可以发现,巡检机器人开合关节和外摆关节的原始输出力矩波动较大,关节振动显著,使用本文策略进行伺服控制后,两种关节的输出力矩变化平稳,关节振动极其微弱,表明本文策略能有效保证巡检机器人位姿变化的稳定性,其伺服控制能力较为理想。

以文献[4]、文献[5]方法作为实验对比方法,选取巡检机器人的伸缩关节和滑移关节进行角度响应测试,结果如图3所示。分析图3发现,本文方法巡检机器人两种关节角度均在0.2 s内完成关节位置指令跟踪,且跟踪精度可达99%,而文献[4]、文献[5]方法的跟踪响应耗时较长,且跟踪精度较差。上述结果表明,应用本文方法后,巡检机器人位姿变化的响应速度较快,可验证本文策略具有较优良的巡检机器人位姿伺服控制效果。

设定防震锤和间隔棒两种障碍,统计分析使用本文策略控制巡检机器人跨越障碍时,开合、外摆、压紧三种关节的变化量与控制器输出幅值,结果如表1、表2所示。

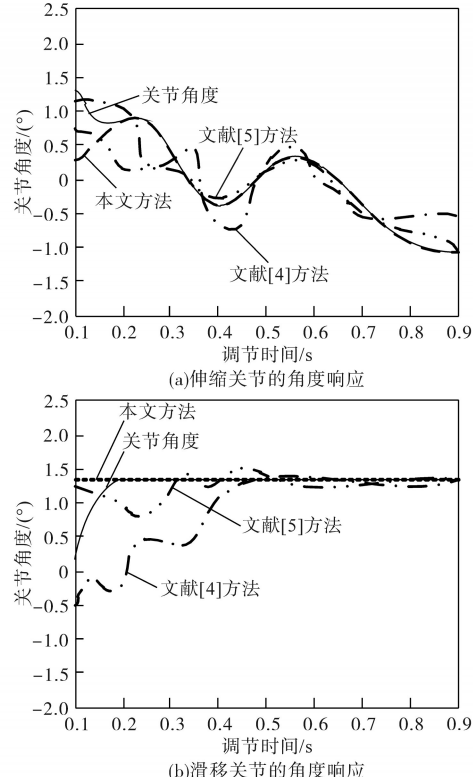


图3 巡检机器人关节角度响应测试

Fig.3 Joint angle response test of inspection robot

表1 关节变化量对比结果

Tab.1 Joint change comparison results

障碍类型	关节名称	关节变化量/%		
		本文方法	文献[4]方法	文献[5]方法
无障碍	开合关节	1.26	3.48	7.12
	外摆关节	1.11	4.54	6.28
	压紧关节	0.98	4.12	6.19
防震锤	开合关节	1.31	5.32	6.63
	外摆关节	1.26	5.62	5.91
	压紧关节	1.15	5.65	5.67
间隔棒	开合关节	1.28	5.19	6.27
	外摆关节	1.19	5.47	6.11
	压紧关节	1.12	5.31	6.30

表2 控制器输出幅值对比结果

Tab.2 Controller output amplitude comparison result

障碍类型	关节名称	控制器输出幅值/(N·m)		
		本文方法	文献[4]方法	文献[5]方法
无障碍	开合关节	4.268	10.09	14.52
	外摆关节	5.123	11.02	13.85
	压紧关节	4.397	9.68	13.71
防震锤	开合关节	4.562	9.47	13.49
	外摆关节	5.236	9.57	12.58
	压紧关节	4.451	9.23	12.68
间隔棒	开合关节	4.379	10.09	12.94
	外摆关节	5.128	10.42	12.03
	压紧关节	4.402	9.89	13.02

分析表1、表2发现,使用本文策略控制巡检机