

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.039

应用状态反馈云数据的变电站巡检机器人 S 型加减速控制方法

剧树春^{1,2}, 李来杰^{1,2}

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071000; 2. 内蒙古电力公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:变电站巡检机器人日常工作过程中,通常利用指数型加减速控制算法生成控制方案,起点存在加减速突变情况,导致速度控制结果加速度变化率较大。提出应用状态反馈云数据的变电站巡检机器人 S 型加减速控制方法。运用 S 型控制原理,将机器人加减速控制过程划分为 11 个阶段,构建一个完整的 S 型加减速控制模型。借助云计算平台和传感器设备,搭建状态反馈云数据采集模块,对机器人实时运行状态进行跟踪。设计包含前馈补偿和反馈补偿两个关键部分的控制器,并确定符合要求的控制参数取值方案,运用粒子群算法进行优化求解,生成巡检机器人 S 型加减速最优控制参数。实验结果表明:该方法表现出的加速度变化率低于 0.2 m/s^3 ,满足巡检机器人加减速变化的平滑性要求。

关键词:状态反馈;巡检机器人;加减速;S 型速度曲线;补偿控制

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0201-05

S-type Acceleration and Deceleration Control Method for Substation Inspection Robot Using State Feedback Cloud Data

JU Shuchun^{1,2}, LI Laijie^{1,2}

(1. North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

2. Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China)

Abstract:In routine operation of substation inspection robots, exponential acceleration and deceleration control algorithms are usually used to generate control schemes, and a sudden deceleration change may occur at the starting point, causing a drastical acceleration change rate in the speed control result. A S-type acceleration and deceleration control method for substation inspection robots using state feedback cloud data is proposed. Using the S-type control principle, the acceleration and deceleration control process of the robot is divided into 11 stages, and a complete S-type acceleration and deceleration control model is constructed. Assisted by cloud computing platforms and sensor devices, a state feedback cloud data collection module is built to track the real-time operation status of robots. A controller composed of feedforward compensation and feedback compensation is designed, and a control parameter value scheme meeting the requirements is determined. Particle swarm optimization algorithm is applied to optimize the solution, generating the optimal control parameters for the S-type acceleration and deceleration of the inspection robot. The experimental results show that the acceleration change rate by the proposed method is less than 0.2 m/s^3 , which meets the smoothness requirements of robot's acceleration and deceleration changes.

Keywords: state feedback; inspection robots; acceleration and deceleration; S-shaped velocity curve; compensating control

0 引言

变电站运行的安全性和稳定性对于整个电力系统的正常运作至关重要。在电力行业智能化水平不断发展的背景下,巡检机器人广泛应用到电力系统日常巡检工作中。由于变电站环境的复杂性和不确定性,巡检机器人在执行巡检任务时,需要频繁进行加减速操作以适应不同的工作环境和任务需求。如何实现高质量的机器人加减速控制,已成为一个亟待解决的问题。

文献[1]依托于正弦函数,构建加减速平滑运动控制曲线,并考虑当前设备起始和结束运行

速度,生成柔性加减速控制规划方案。但在实际应用中,会受到各种外界干扰和不确定性因素的影响,导致加减速控制算法的应用鲁棒性较差。文献[2]将模糊逻辑处理思想和 PID 控制思想结合起来,设计一种模糊 PID 控制技术。以保证系统运行稳定性为目标,不断调整控制参数,生成适应各种复杂环境的加减速控制方案。但是,模糊控制器的设计依赖于经验和试错,缺乏系统性的设计方法,可能导致在某些特定情况下控制精度较低。文献[3]考虑机器人运行速度变化要求,设置加减速控制规划目标函数并应用粒子群算法进行迭代求解,生成最优控制参数。但是,粒子群

第一作者简介:剧树春(1981—),男,山西大同人,高级工程师,硕士,研究方向为信息通信技术、电力信息化,rwonzedp@163.com。

优化算法本身可能陷入局部最优解,导致无法找到全局最优的加减速控制参数,使得机器人在加减速过程中无法达到最理想的平滑效果。文献[4]将深度学习技术应用到机器人运行速度控制过程中,通过环境分析、状态跟踪、控制策略生成和控制参数优化等环节,实现优越的机器人加减速控制。但是,随着环境或任务的变化,模型可能需要重新训练或调整来适应环境,这可能导致响应延迟较大。

本文在研究应用状态反馈云数据的变电站巡检机器人S型加减速控制方法时,充分利用了云计算技术的优势,获取并分析机器人实时状态数据,结合S型加减速控制算法,计算出机器人的最优加减速轨迹,并将控制指令实时下发至机器人执行,实现对巡检机器人运动轨迹精确控制的同时,有效避免机器人在加减速过程中出现的抖动和冲击现象发生。

1 基于应用状态反馈云数据设计变电站巡检机器人S型加减速控制方法

1.1 建立机器人S型加减速控制模型

深入分析变电站巡检机器人加减速变化特点,设计以S型加减速控制算法为核心的四次控制模型,如图1所示,将完整的加减速控制过程划分为11个阶段。

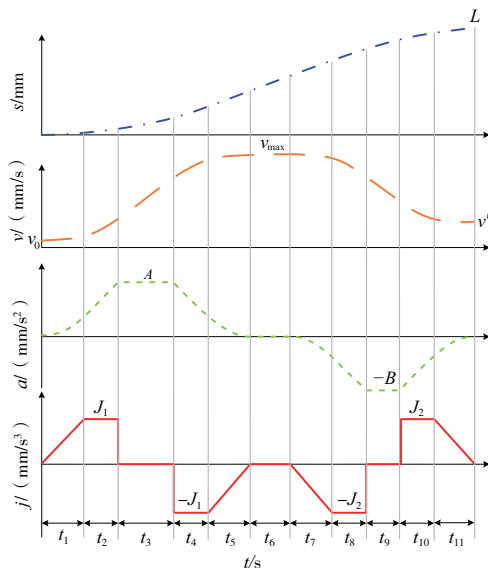


图1 四次S型加减速控制模型图

图1中, $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}$ 表示控制时间段; v_0 表示初始速度; v' 表示终止速度; $v_{\max}$ 表示最大速度; L 表示机器人巡检位移总长度; $A, -B$ 分别表示最大加速度和最大减速度; $J_1, -J_1, -J_2, J_2$ 分别表示加速区和减速区的最大加加速度; $-J_1, -J_2$ 分别表示加速区和减速区的最大减减速度。

以提升机器人运行稳定性为基础,针对每个阶段位移、速度、加速度、加加速度4个指标的取值变化,设置式(1)所示的约束条件。

$$\begin{cases} a(t) = \varepsilon(t-1) + \int_{t-1}^t j(c) dc \\ v(t) = g(t-1) + \int_{t-1}^t a(c) dc \\ s(t) = h(t-1) + \int_{t-1}^t v(c) dc \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 表示操作时间; c 表示操作周期内的选定时刻; d 表示导数; ε, g, h 分别表示前一时刻的加速度、速度和位移参数值; a, v, s 分别表示当前时刻的加速度、速度和位移参数值。

不同S型加减速控制阶段中,加加速度斜率取值变化模式为

$$r(t) = \begin{cases} G & 0 \leq t < t_1; t_4 \leq t < t_5 \\ 0 & t_1 \leq t < t_4; t_5 \leq t < t_6; t_7 \leq t < t_{10} \\ -G & t_6 \leq t < t_7; t_{10} \leq t < t_{11} \end{cases} \quad (2)$$

式中: r 表示加加速度变化曲线斜率; G 表示限定值。

将斜率计算结果代入到各阶段加加速度方程、加速度方程和速度方程中,可以确定变电站巡检机器人S型加减速控制各个阶段的具体控制运动方程^[5],以作为后续控制方案生成的基础。

1.2 建立状态反馈云数据获取方案

为了确保机器人S型加减速控制结果符合预期要求,借助于云计算平台和传感器设备^[6],搭建状态反馈模块,采集机器人实时运行状态反馈云数据,应用到速度控制过程中。在设定采样状态变量和采样周期后,可以得到状态反馈信号为

$$\chi(t) = \begin{cases} [f_1(\eta_1), \tilde{f}_2(\eta_1)] & t \in [\eta_1 | N] \\ [\tilde{f}_1(\eta_2), f_2(\eta_2)] & t \in [\eta_2 | N] \end{cases} \quad (3)$$

式中: χ 表示状态反馈信号; f_1, f_2 表示采样状态变量; $\tilde{f}_1, \tilde{f}_2$ 表示状态变量的转置矩阵; η_1, η_2 表示两个设定的采样周期; N 表示状态反馈数据采样周期数量。

从式(3)可以看出,在不同采样周期设定条件下,状态反馈信号会发生极大变化,为了更好地描述这种变化特点,需要搭建一个具有能控能观性的状态观测器^[7],按照图2所示的信息采集模

式,不断获取传感器测量数据。

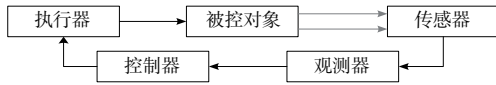


图2 观测器信息采集示意图

考虑状态增益函数和观测器增益函数,推导出最终的状态反馈函数如式(4)所示。

$$O(t) = \delta[R - W + \chi(t)] \quad (4)$$

式中: O 表示最终的状态反馈函数; δ 表示用于求一个方阵行列式的函数; R 表示状态增益函数; W 表示观测器增益函数。

所有采集的机器人运行状态反馈数据保存到云计算平台内,在 S 型加减速控制过程中,选取每个阶段对应的状态数据,规划具体的控制方案。

1.3 设计考虑反馈补偿的速度控制器

依托于状态反馈云数据,设计考虑反馈补偿的速度控制器,用来执行每个阶段的变电站巡检机器人 S 型加减速控制^[8]。如图 3 所示,该控制器内包含前馈补偿和反馈补偿两个关键环节^[9],二者相结合实现对各种机器人巡检扰动的实时补偿,实现更加优越的 S 型加减速控制。

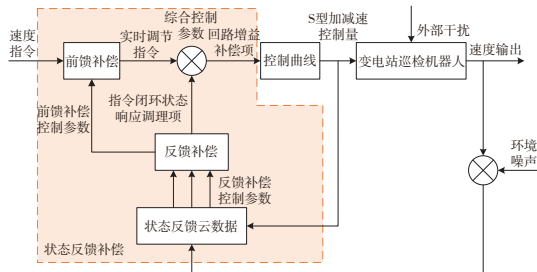


图3 考虑反馈补偿的速度控制器结构图

图 3 中,前馈补偿控制参数的取值需要考虑回路增益补偿项和改善闭环响应特性增加的指令调理项^[10],最终得到:

$$u_1 = \varphi_1 \times \varphi_2(t) \quad (5)$$

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{\sigma^2}{b/\psi} \\ \varphi_2(t) = \frac{1 + v\tau t}{1 + \tau t} \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_1 表示前馈补偿控制参数; φ_1 表示回路增益补偿项; φ_2 表示改善闭环响应特性增加的指令调理项; σ 表示闭环系统二阶自然振荡频率; b 表示速度与归一化传递系数; ψ 表示响应时间参数; v 表示常数; τ 表示实时调节指令。

而反馈补偿控制阶段,产生的参数如式(7)所示^[11]。

$$u_2 = -\frac{\sigma^2 z_1 + 2\lambda \sigma z_2}{b/\psi} - \frac{z_3}{b/\psi} \quad (7)$$

式中: u_2 表示反馈补偿控制参数; λ 表示闭环系统阻尼比; z_1, z_2, z_3 表示状态反馈云数据变量。

将前馈补偿和反馈补偿参数项结合起来,即可得到 S 型加减速控制最终控制函数^[12]

$$\hat{u} = u_1 + u_2 \quad (8)$$

式中 $\hat{u}$ 表示综合控制参数。

1.4 生成最优加减速控制参数

机器人行驶加减速控制过程中,控制参数取值结果会影响最终控制效果。因此,在 S 型加减速控制方法设计的最最终环节,以提升速度变化的平滑性为目标,设置一个加减速控制参数求解函数,并利用粒子群算法进行优化求解。

粒子群优化求解过程中,依靠适应度函数来衡量每个控制参数求解方案的优越性^[13],适应度计算公式为

$$\zeta = \min \{ [(\Gamma + \Gamma')\theta(\Gamma, \Gamma') - (\Gamma + \tilde{\Gamma})\theta(\Gamma, \tilde{\Gamma})]^2 \} \quad (9)$$

式中: ζ 表示适应度; $\min$ 表示最小值取值函数; Γ 表示实际最大速度; Γ' 表示机器人初始运行速度; $\tilde{\Gamma}$ 表示机器人终止运行速度; θ 表示时间函数。

依托于适应度函数计算结果,判断每个控制参数取值方案的实施效果,保留可以发挥更好加减速控制效果的参数方案,按照同样的运算持续进行多次学习,即可生成最优控制参数,代入到控制器中,实现良好的机器人 S 型加减速控制。

2 实验

2.1 实验装置

为了检验变电站巡检机器人 S 型加减速控制方法的实际应用效果,将某电力企业应用的巡检机器人作为实验对象,在变电站巡检场地内,将其与上位机连接起来,形成实验系统,其原理如图 4 所示。



图4 实验系统原理图

图4中,实验系统的操作步骤是,利用HIMA F3211速度传感观测器采集巡检机器人的运行状态数据,通过FS8500 32 Gb 24口交换机输入到上位机中。上位机计算出加减速控制指令后,通过交换机和PLC控制系统控制巡检机器人。

机器人相关参数的设置如表1所示。

表1 巡检机器人相关参数

参数	参数值或说明
物理结构	双履带结构
驱动形式	差速驱动
电机选择	24 V 直流无刷电机
供电方式	24 V 锂电池
总体大小/mm	650×480×190
电机减速比	1 : 10
速度范围/(m/s)	0~2.5
转弯角度/(°)	0~360
定位精度/cm	≤3
质量/kg	45

在机器人S型加减速控制实验开始之前,先对巡检机器人的运动能力进行测试,通过上位机向机器人发送指令,观察机器人运动速度变化,得到图5(a)所示的测试结果。对其进行滤波处理,最终生成图5(b)所示的运动速度变化曲线。

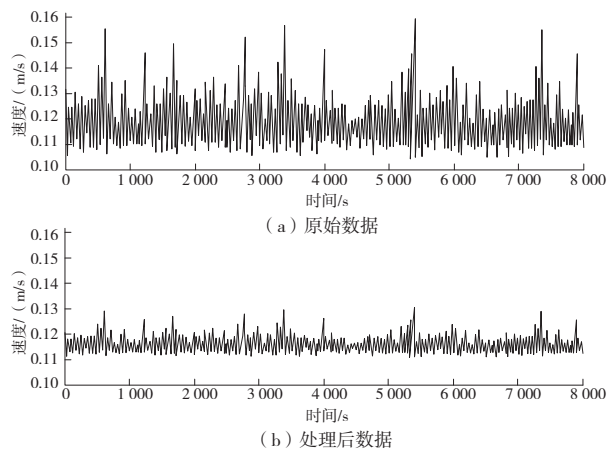


图5 巡检机器人运动能力测试结果

根据图5可知,机器人设备在正常环境中运行速度波动较小,稳定在0.02 m/s以内,证明了这一实验设备具有良好的运动能力,符合实验要求。

将实验系统转移到变电站巡检区域,基于实验系统,采用本文提出控制方法和文献[1]、文献[3]方法分别完成加减速控制,并观察每种方法控制效果。

2.2 加减速控制结果

由于机器人巡检会受到突风干扰和地形干扰等因素的影响,在加减速控制过程中需要充分考虑不同干扰情况,得到机器人运行状态反馈数据如图6所示。

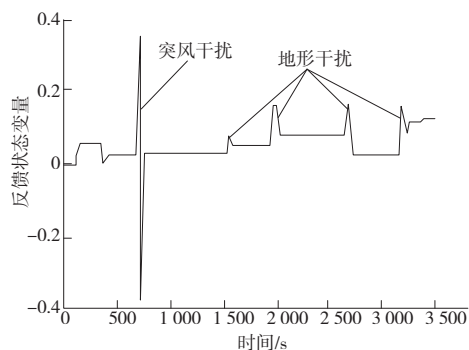


图6 机器人巡检状态反馈云数据

应用图6所示的状态反馈云数据,完成机器人S型加减速控制,所生成的具体控制参数如图7所示。

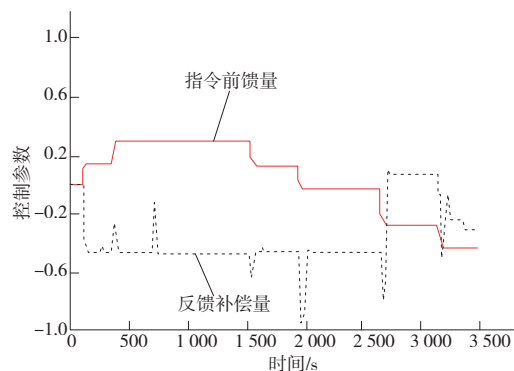
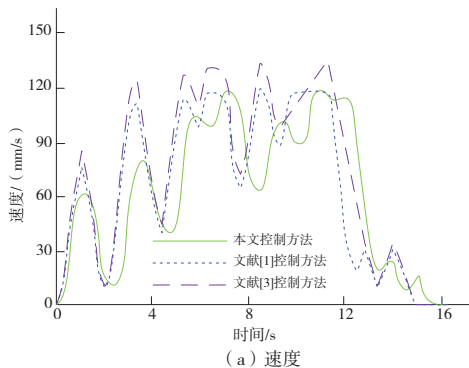


图7 机器人S型加减速控制参数

将控制参数代入到控制器中,执行S型加减速运动控制模型,最终得到机器人速度和加速度控制结果如图8所示。为了便于对比,在图8中同样总结了另外两种控制方法实施后产生的速度、加速度变化曲线。



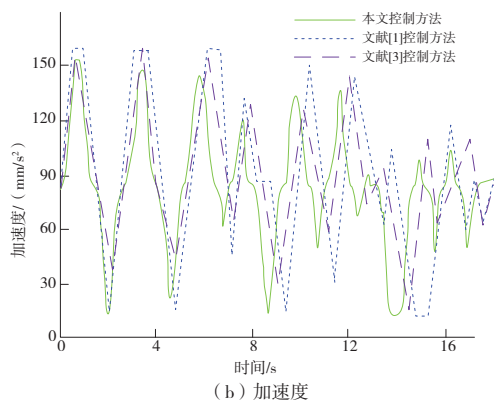


图8 不同方法控制后速度、加速度变化曲线

从图8可以明显看出,与两种常规方法相比,本文研究S型加减速控制方法得出的速度曲线和加速度曲线更加平滑,基本满足了电力巡检机器人运行稳定要求。

2.3 控制方法性能对比

在进一步验证该方法有效性时,选用加速度变化率(Jerk)作为评估指标,对加速度变化曲线进一步分析,描述不同控制方法实施后机器人运行速度变化的平滑程度。

$$P(t) = \frac{a(t)}{t} \quad (10)$$

式中: t 表示控制时间; a 表示加速度; P 表示加速度变化率。

以任意4个加减速控制时间点为例,这4个时刻不同方法加减速控制Jerk值对比结果如图9所示。

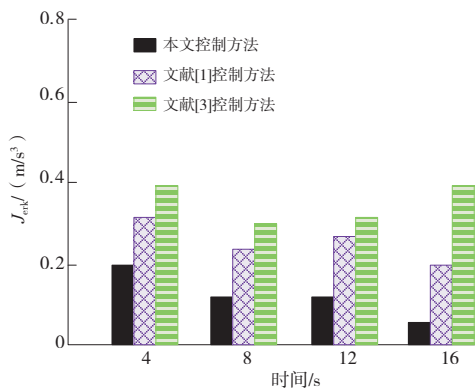


图9 不同方法加减速控制Jerk值对比

从图9显示的统计结果可以看出,新方法加减速控制Jerk值始终低于 0.2 m/s^3 ,相比另外两种方法有了显著降低,这反映了该方法实施后机器人加速度的平滑程度更优,将应用状态反馈云数据的S型加减速控制方法应用到电力智能巡检

工作中,可以更好地保证机器人稳定运行。

3 结语

本文对应用状态反馈云数据的变电站巡检机器人加减速控制方法进行深入研究后,得到一种以S型加减速控制算法为基础的新型控制技术,这为变电站巡检机器人的研发和应用提供新的思路和技术支持,同时推动电力行业的智能化进程。

参考文献:

- [1] 王树峰,孟新宇,杜毅龙. 一种加加速度连续平滑的新型柔性加减速控制算法[J]. 机床与液压, 2024, 52(6): 81-85.
- [2] MAGHFIROH H, AHMAD M, RAMELAN A, et al. Fuzzy-PID in BLDC motor speed control using MATLAB/Simulink[J]. Journal of Robotics and Control (JRC), 2021, 3(1): 8-13.
- [3] 张青山,吴正平. 基于粒子群优化的改进四次S型加减速控制算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(8): 3338-3344.
- [4] XIAO X S, LIU B, WARNELL G, et al. Motion planning and control for mobile robot navigation using machine learning: a survey [J]. Autonomous Robots, 2022, 46(5): 569-597.
- [5] 孔祥晔,王如刚,周锋,等. 基于FPGA的自适应动态规划控制算法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(10): 100-106, 126.
- [6] 刘帅,王帆,李丙林. 非完整约束下机器人运动轨迹跟踪控制仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 422-425, 444.
- [7] 孙筠,杨凯. 面向复杂曲面的激光切割机器人移动速度平滑控制[J]. 激光杂志, 2023, 44(6): 245-249.
- [8] 张俊娜,白国星. 基于速度调节与路径跟踪的差动机器人运动控制[J]. 工程科学学报, 2023, 45(9): 1550-1558.
- [9] 臧延旭,姜海洋,陈峰,等. 610管道检测机器人速度控制装置研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(5): 80-86.
- [10] 张一东,徐一栋,陈海卫. 基于PCIe总线的机器人多轴控制器的研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(21): 35-42.
- [11] 杨博涵,邢燕好,张佳,等. 运行时间周期化工业机器人模型迭代寻优NURBS轨迹插补[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(2): 331-341.
- [12] 李振坤,黄金凤,李奇松. 选矸机器人高速并联机构伺服驱动选型研究[J]. 选煤技术, 2024, 52(1): 73-78.
- [13] 吴家雄,陈建明,杨晶,等. 基于ADAMS与MATLAB联合的机器人动态仿真分析[J]. 计算机仿真, 2024, 41(12): 509-516.

收稿日期:2024-07-05