[清洗机器人]

基于模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制方法

文/胡志明　王驰　李志远
神华神东电力有限责任公司郭家湾电厂

由于清洗技术和设备的局限性，空冷冷端清洗机器人在清除空冷冷端上的污垢时面临困难，尤其是难以彻底清除较深层次的污垢，导致清洗效率不高的问题。为解决这一问题，实现高效、精确的清洗机器人控制，提出基于模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制方法。通过对机器人坐标系模型的分析，构建出空冷冷端清洗机器人动力学模型。以该动力学模型为基础，引入RBF神经网络，对滑模控制律进行设计。为避免抖振现象，将上述滑模控制律融入基于模糊逻辑的自适应滑模控制器设计中，将该控制器应用于机器人中，完成对基于模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制方法的设计。实验结果表明：基于模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制方法，不仅提高机器人的控制性能和运行平稳性，还增强系统的鲁棒性。

在空冷冷端清洗机器人的应用中，面对复杂多变的工作环境和任务需求，传统的控制方法难以达到理想的控制效果。而模糊理论作为一种处理不确定性的有效工具，在空冷冷端清洗机器人的控制中，可以很好地应对环境变化和任务不确定性带来的挑战。然而，传统的滑模控制方法在实际应用中往往存在抖振问题，影响了系统的控制准确度和稳定性。为克服这一缺点，将自适应控制策略与滑模控制相结合，形成自适应滑模控制方法，可以有效地削弱抖振现象，提高系统的控制性能。

近年来，众多学者开展研究，如文献[1]通过迭代学习控制提升轨迹控制准确度，结合滑模控制加强系统鲁棒性，并运用自适应控制应对系统内部的不确定性，有效减轻滑模控制切换项引发的振荡。利用Bellman-Gronwall定理，证明控制系统的收敛性。再如文献[2]将系统分解为四旋翼飞行器和机械臂两个子系统，运用牛顿-欧拉法构建动力学模型，设计抗干扰轨迹跟踪控制器，同时采用自适应策略估算扰动上限。然而，这两种方法均存在局限性。本文则融合模糊理论的近似能力和滑模控制的鲁棒特性，利用模糊逻辑自适应调整滑模控制中的切换函数及其变化率，实现对清洗机器人的精确操控。

模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制

1. 构建空冷冷端清洗机器人动力学模型

动力学模型是设计机器人控制器的基础。基于所建立的动力学模型，可以设计出更加精确和稳定的控制器，以提高空冷冷端清洗机器人的运动准确度和鲁棒性。此外，动力学模型还可以用于机器人的轨迹规划、故障诊断等方面，为机器人的智能化和自主化提供有力支持。

根据上述分析，首要任务是建立空冷冷端清洗机器人的动力学模型，特别关注于质心与几何中心不一致的情况，如图1所示。该模型中，机器人的

几何中心C与质心D不重合，前轮无电动机驱动，仅作为从动轮，负责引导和支撑机体[3]。此外，机器人的全方位移动能力由两个独立伺服电动机驱动的后轮提供，通过调整两后轮电动机的转速差异来产生速度差，进而实现机体的全向移动。

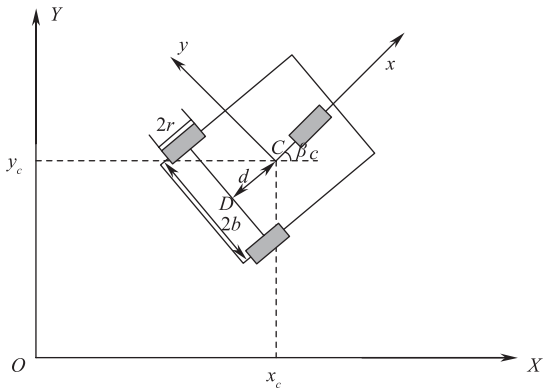

图1　空冷冷端清洗机器人坐标系模型

图1中，地球坐标系XOY被定义为机器人的二维平面参考系，是固定的。而xCy则是机器人的自身坐标系，会随着机器人的移动而改变位置，但对于机器人本身来说，其位置是恒定的[4]。在地球坐标系中，机器人的初始位置P由坐标(x_c,y_c)和偏航角β_c确定，其中β_c表示机器人运动方向与地球坐标系X轴之间的夹角，也称为偏航角。此外，该机器人两轮间距为$2b$，质心距为d，轮子半径为r。

当$d\neq 0$时，则该空冷冷端清洗机器人的非完整约束条件为

$$\dot{y}_c\cos\beta_c-\dot{x}_c\sin\beta_c-d\dot{\beta}_c=0 \tag{1}$$

根据式（1），得出该机器人的运动学方程为

$$\dot{q}=\begin{bmatrix}\dot{x}_c\\ \dot{y}_c\\ \dot{\beta}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\beta_c,-d\sin\beta_c\\ \sin\beta_c,d\cos\beta_c\\ 0,1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ w\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，w为机器人的角速度；v为机器人的线速度。

而d=0时，则该机器人的非完整约束公式为

$$\dot{y}_c\cos\beta_c-\dot{x}_c\beta_c=0 \tag{3}$$

即，此时该机器人的运动学方程的表达式为

$$\dot{q}=\begin{bmatrix}\dot{x}_c\\ \dot{y}_c\\ \dot{\beta}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\beta_c,0\\ \sin\beta_c,0\\ 0,1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ w\end{bmatrix} \tag{4}$$

基于上述分析，考虑一类忽略扰动的空冷冷端清洗机器人的动力学模型的表达式为

$$\overline{Z}(q)\dot{B}+\overline{C}(q,\dot{q})B=\overline{L}(q)\delta$$
$$\dot{B}=\begin{bmatrix}\dot{v}\\ \dot{w}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{mr},\frac{1}{mr}\\ \frac{b}{rS},-\frac{b}{rS}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\delta_1\\ \delta_2\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中，$\overline{Z}(q)$为机器人系统的惯性向量；δ为左右轮的驱动力矩；$\overline{C}(q,\dot{q})$为与速度和位置相关的离心力和哥氏力向量；S为机器人的转动惯量；m为机器人的质量。

空冷冷端清洗机器人在实际工作中会受到多种非线性因素的影响，如关节摩擦、外部干扰等。因此，在建立动力学模型时，需要充分考虑这些因素，以确保模型的准确性和实用性。

2. 滑模控制律的设计

在滑模控制中，由于建模不确定性和外部干扰，往往会产生抖振现象。RBF神经网络的引入可以通过自适应逼近非线性系统模型[5]，减少模糊增益，从而有效地降低抖振。当系统状态处于边界层外部时，模糊滑模控制器能够迅速调整控制增益，引导系统向边界层内移动。一旦系统进入边界层内部，RBF神经网络则协助控制器实现更平滑的控制，有效减轻抖振现象。因此，本文通过引入RBF神经网络对滑模控制律进行设计。

设定RBF神经网络的输入为x，则隐含层的输出$h(x)$的表达式为

$$h(x)=\alpha^{\mathrm{T}}\chi(x)=r(x\mid\alpha) \tag{6}$$

$$\alpha=\left[\alpha^1,\alpha^2,...,\alpha^n\right]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

$$\chi(x)=\left[\chi^1(x),\chi^2(x),...,\chi^n(x)\right]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中，α为该RBF神经网络的权值；n为隐含层神经元的个数；$\chi(x)$为基函数。

而当基函数为高斯函数类型时，其计算公式为

$$\chi^i(x)=\exp\left(-\frac{\|x-g_i\|^2}{\gamma_i^2}\right) \tag{9}$$

式中，γ_i、g_i分别为径向基函数的宽度、中心。

其次，设j_H为目标位移向量，j为机器人关节角位移向量。滑模控制旨在使关节角位移向量以尽可能小的误差跟踪指定的目标位移向量j_H，其跟踪误差的计算公式为

$$e=j_H-j \tag{10}$$

设定$\Lambda=\mathrm{diag}(l_1,l_2,\cdots,l_n)$代表正对角向量，$l_i>0$代表滑模面的斜率，则该滑模面的计算公式为

$$b = \Lambda e + \dot{e} \tag{9}$$

基于此，该滑模控制律的计算公式为

$$\partial = \dot{B}\left(\ddot{j}_H + +\Lambda\dot{e}\right) + \overline{C}\left(j_H + \Lambda e\right) + \overline{Z} + \overline{L} + S(b) \tag{12}$$

由上述公式可知，利用RBF神经网络逼近高斯基函数的输出，能够在不依赖被控对象精确模型的前提下实现控制。

3. 基于模糊理论的自适应滑模控制器设计

然而传统滑模控制器易发生抖振现象，其根源在于控制器切换增益k_i的设定。k_i值旨在补偿建模误差及外部干扰等不确定性因素，确保滑模运动的存在条件得以维持。鉴于此，将设计的滑模控制律，融入基于模糊逻辑的自适应滑模控制器设计中，其核心利用模糊系统动态调整控制增益，以此缓解抖振问题。针对式（12）中的滑模控制规律，通过结合模糊规则来降低抖振效应。

将运动点到滑模面的距离定义为广义距离，记为$u_i(i=1,2)$。根据广义距离u_i，适时调整滑模控制中的切换部分k_i的数值。此时，u_i作为模糊规则的输入，而k_i作为模糊规则的输出。通过对模糊系统的深入分析以及制定关于切换增益调整的模糊规则，设计包含7个模糊集合的规则集，具体见表1。

表1　模糊理论的调整规则

量名	模糊集
k_i	PB PM PS Z PS PM PB
u_i	NB NM NS Z PS PM PB

表1中，PB、PM、PS、Z、NS、NM、NB分别代表了正大、正中、正小、零、负小、负中、负大。同时，为描述模糊系统的输入与输出模糊集，该系统采用了广泛应用的三角形和高斯函数来描述隶属度。模糊系统的架构涵盖了乘积推理机制、单值模糊化处理以及中心平均解模糊策略，进而确定系统的输出

$$k_i = \frac{\sum_{m=1}^{m} \alpha_{k_i}^{m} \delta_{j_H}(u_i)}{\sum_{m=1} \delta_{j_H}(u_i)} = \alpha_{k_i}^{\mathrm{T}} q_{k_i}(u_i) \tag{13}$$

将模糊系统嵌入到滑模控制器中，利用模糊系统自适应逼近控制律的增益，从而消除滑模控制中的抖振现象。将式（13）与滑模控制律式（12）进行结合，设计出基于模糊理论的机器人自适应滑模控制器，其计算公式为

$$\begin{cases} k_i = \alpha_{k_i}^{T} q_{k_i}(u_i) \\ \dot{B} = diag(k_1, k_2, k_3) \\ \partial = \dot{B}\left(\ddot{j}_H + +\Lambda\dot{e}\right) + \overline{C}\left(j_H + \Lambda e\right) + \overline{Z} + \overline{L} + S(b) \end{cases} \tag{14}$$

综合上述设计，完成对基于模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制方法的整体设计，使机器人在存在外部干扰或不确定性时，仍能保持状态在滑模面上稳定移动，并迅速跟踪设定的目标值。

实验测试与分析

1. 实验准备

为验证本文设计的基于模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制方法的可行性，现进行实验测试，本次测试基于MATLAB /Simulink软件在由1台（来自Z有限公司）空冷冷端清洗机器人搭建的实验平台中进行分析，该机器人的各项技术参数见表2。

表2　空冷冷端清洗机器人参数

配置	参数
体积/mm	440×250×175
重量/kg	16
工作速度/（m/min）	0-21
工作距离/m	150
清洗方式	“双旋转”清洗
清洗范围/mm	圆形管道直径250~500

该实验平台的各项参数设定见表3。

表3　实验参数

参数	数值
操作系统	Windows 11.0
内存	16 GB
处理器	Intel（R）Core（TM）i5-3230M CPU，2.60 GHz
MATLAB /Simulink版本	R2014a（8.3.0.532），64-bit

基于上述设定，将本文方法与文献[1-2]方法分别

代入该实验平台中，并进行三种方法的对比验证。

2. 实验结果与分析

首先，对三种控制方法进行该空冷冷端清洗机器人的某一关节角度跟踪偏差进行测试，其测试结果如图2所示。

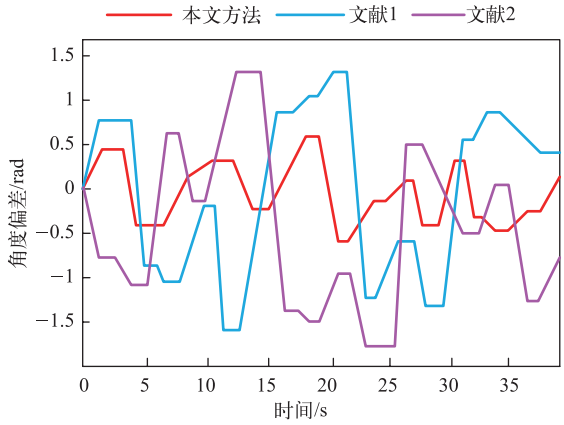

图2　控制效果测试结果

根据实验结果，可以得出结论：相较于其他两种方法，本文提出的方法展现出最优的控制效果，具备良好的角度跟踪性能和抗干扰能力。

其次，对三种方法的控制效率进行测试，测试结果如图3所示。

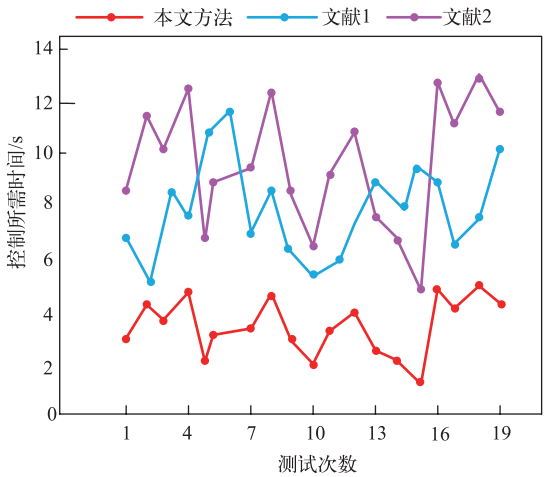

图3　控制效率测试结果

根据测试结果可知，本文方法所需的控制时间远远小于其余两种方法。

综上所述，基于模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制方法在实验中取得显著的控制效果。该方法不仅提高机器人的控制性能和运行平稳性，还增强系统的鲁棒性。未来可以进一步深入研究模糊逻辑与滑模控制的结合方式，优化控制参数和规则设计，以进一步提高清洗机器人的控制性能和智能化水平。

结束语

基于模糊理论的空冷冷端清洗机器人自适应滑模控制方法的研究，成功地将模糊逻辑系统与滑模控制理论相结合，设计出具有自适应能力的控制器。该方法不仅充分利用模糊逻辑系统在处理不确定性和非线性问题上的优势，还利用滑模控制对于外部干扰及参数变动的强大鲁棒性优势。借助模糊自适应策略来调整控制器增益，有效地解决传统滑模控制中存在的抖振问题，提高控制系统的稳定性和准确度。同时，自适应滑模控制器的设计使得清洗机器人能够在复杂多变的工作环境中保持稳定的性能，实现对空冷冷端的高效清洗。研究结果表明，基于模糊理论的自适应滑模控制方法能够显著提高清洗机器人的控制性能，为空冷冷端的智能化清洗提供新的解决方案。EA

（收稿日期：2025-01-18）

参考文献

[1] 周博文，张海峰，李秦川．2R1T并联机器人滑模自适应迭代学习控制[J]．机器人，2024，46(3)：317-329．

[2] 丁力，夏天，康绍鹏，等．悬停状态下旋翼飞行机器人自适应鲁棒控制[J]．电子测量与仪器学报，2021，35(9)：73-79．

[3] 王君，程浩，姜荣俊，等．基于滑模反馈的履带式机器人自适应轨迹跟踪[J]．组合机床与自动化加工技术，2023(1)：25-28，33．

[4] 张鑫，秦东晨，谢远龙，等．基于双环自适应滑模的移动机器人轨迹跟踪控制[J]．合肥工业大学学报(自然科学版)，2024，47(1)：13-20．

[5] 付晓东，陈力．基于WNN的全弹性空间机器人自适应非奇异快速终端滑模控制算法[J]．中国惯性技术学报，2021，29(5)：672-679．