

恒线速无卡旋切机变速进给模糊控制研究

杨素珍

(漳州职业技术学院智能制造学院 福建 漳州 363000)

摘要: 进给系统的精确匹配速度控制是恒线速无卡旋切机实现木材均匀厚度旋切的关键, 通过闭环智能控制方法可以有效提高进给系统的抗干扰能力, 解决开环控制方法速度匹配不稳定的问题。本研究分析了一类恒线速无卡旋切机的工作机理, 建立其进给系统运动学模型, 通过引入新的控制变量, 获得系统闭环误差控制模型, 在此基础上, 基于模糊系统理论, 分四个步骤设计了一种结构简单的闭环变速进给模糊控制器。该控制器以误差和误差变化率为输入, 通过高斯隶属度输入输出模糊化、知识库、模糊推理和解模糊化直接获得进给系统所需的匹配速度。在 Matlab 软件环境下, 使用 M 文件编写无卡旋切机运动模型和模糊控制器, 进行仿真实验验证, 从不同旋切厚度的进给速度变化对比和厚度变化对比结果表明模糊控制器有效提高了系统的控制性能, 进给速度变化平稳, 实时性好, 收敛迅速, 控制精度高, 适应性强。

关键词: 无卡旋切机; 恒线速; 变速进给; 模糊控制

0 引言

我国木材资源十分贫乏^[1], 人造板是提高木材综合利用率的主要手段, 旋切机作为单板、胶合板等人造板的关键生产设备之一, 其旋切质量至关重要, 研究无卡旋切机控制系统的高性能控制算法意义重大。旋切机按结构不同可分为无卡旋切机和有卡旋切机。由于无卡旋切机的成品质量更好, 工作效率更高, 剩余木材更少, 成为目前木材旋切的主流设备^[2]。木材旋切厚度均匀性是衡量人造板质量的关键指标, 理想旋切均匀的无卡旋切机的切刀刀刃在圆木横断面上的运动轨迹近似阿基米德螺旋线^[3], 此时圆木以恒线速转动, 而切刀刀刃以匹配的速度进给。但由于实际系统存在外界干扰, 系统也无法精确建模, 需要通过闭环控制方法来实现进给系统的精确速度匹配, 目前已有自整定 PID^[4]、遗传算法^[5]、PID 神经网络^[6]等控制方法, 但这些方法复杂度高, 计算量大, 影响系统的实时性, 为此本文提出一种无卡旋切机变速进给闭环模糊控制方法, 基于专家经验知识构建模糊控制系统, 有效抵御系统不确定性和外部干扰的影响, 保证旋切厚度精度, 同时算法结构简单, 有利于提高系统的实时性。文中将详细阐述无卡旋切机的运动学模型和模糊控制器设计, 最后给出仿真实验结果。

1 无卡旋切机的运动学模型

主流无卡旋切机旋切系统的结构如图 1 所示。

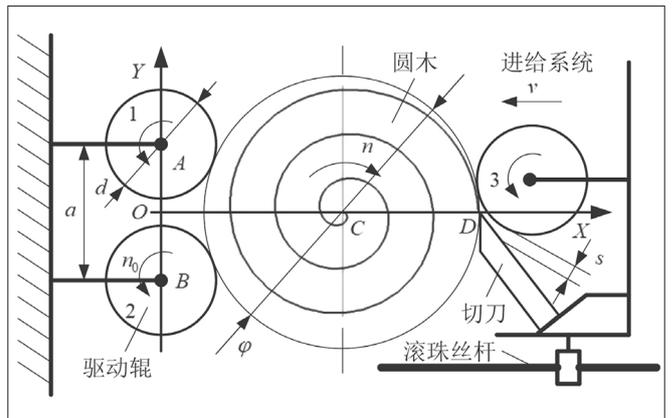


图 1 无卡旋切机旋切系统结构示意图

系统主要由圆木驱动系统和切刀进给系统两部分组成, 圆木的恒线速旋转通过固定驱动辊 1、2 和与进给系统同步移动的压尺辊 3 共同驱动实现, 结合切削条件和切屑厚度参数等, 旋刀由进给系统带动变速进给, 假定驱动辊与圆木之间无相对滑动, 理论上可切屑出厚度均匀的成品单板。为了保证进给系统的刚性和精度, 进给系统的变速调节通常采用调速电动机驱动滚珠丝杆实现。建立无卡旋切机的运动学模型^[7]为:

$$s = \vartheta(\varphi)u \tag{1}$$

$$\vartheta(\varphi) = \frac{\varphi\sqrt{(\varphi+d)^2-a^2}}{n_0(\sqrt{(\varphi+d)^2-a^2}+\varphi+d)} \tag{2}$$

式中： s - 旋切厚度 (mm)；
 u - 切刀进给速度 (mm/s)；
 φ - 圆木直径 (mm)；
 d - 驱动辊直径 (mm)；
 n_0 - 驱动辊转速 (r/min)；
 a - 驱动辊 1、2 的中心距 (mm)。

可见，恒线速无卡旋切机的变速进给系统是一个非线性时变系统^[8]，控制器设计难度大。而传统开环控制是假定输出 s 始终为期望的旋切厚度，结合圆木的瞬时直径，根据式 (1) 来求得所需的进给速度控制量。由于实际系统不可避免存在干扰，时滞和参数摄动，输出总存在误差，开环控制无法消除，应采用闭环控制方法来进一步消除误差。

2 模糊控制器设计

定义目标厚度为 s_d ，则控制误差为 $e=s-s_d$ 。构造新的控制输入 $w=s_d/\vartheta(\varphi)-u$ ，并将其代入式 (1)，可得到闭环控制系统的误差方程为：

$$e = \vartheta(\varphi)w \tag{3}$$

模糊控制器的控制目标是通过确定合适的 w ，使得系统误差 e 收敛于原点。模糊控制系统是一种以模糊数学理论为基础的非线性智能控制系统^[9]，其提供了一种将基于专家知识的语言规则转化为精确数值解的方法，在解决具有多参数、非线性、时变的复杂系统的控制问题方面具有突出优势。基本多输入单输出模糊控制系统结构如图 2 所示，主要由模糊

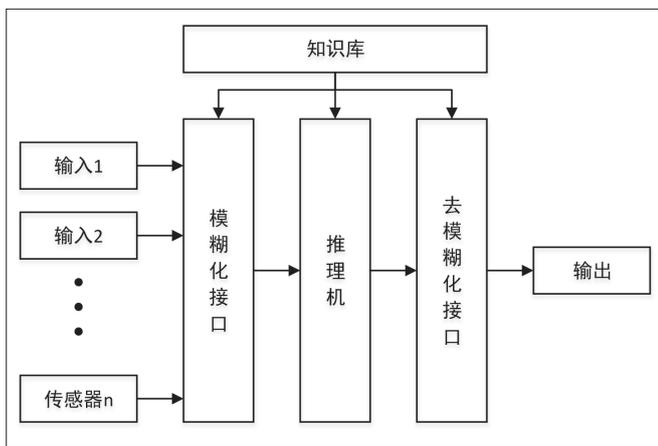


图 2 模糊控制系统组成结构

化接口、知识库、推理机、去模糊化接口四个部分组成^[10]。模糊化接口是将控制系统输入输出数据转换为隶属度函数值；知识库提供输入模糊化和输出去模糊化所需的隶属度函数库，以及推理机所需的推理规则库，推理规则库需结合专家知识或操作人员经验制定，并使用人的推理语言进行表述，是决定模糊控制系统性能的关键部分；推理机根据输入模糊量和推理规则库，模拟人的决策过程进行推理决策，获得控制输出值；去模糊化是基于输出隶属度函数将模糊输出值转换为实际应用所需的清晰化值。

本文模糊控制器的设计步骤为：

(1) 确定模糊控制器的输入量与输出量。

输入变量的个数决定了模糊控制系统的维数，需适当选取才能既保证控制器的性能，又不影响系统的实时性。文中模糊控制器的输入变量为控制误差 e 和误差的变化率 d_e ，输出变量为进给速度 w 。

(2) 对输入量和输出量进行模糊化。

模糊化是将输入或输出变量的精确值转化为给定论域上的模糊子集。变量模糊化首先要确定变量不同状态的变化范围，即把相应论域划分为若干区间，进而确定模糊化等级。 e 、 d_e 和 w 模糊子集均取为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，对应于 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}， e 的论域均取为 [-10, 10]， d_e 的论域取为 [-8, 8]， w 的论域取为 [-18, 18]。

模糊化还需要建立变量的隶属度函数。设给定论域 U 和 U 到 [0,1] 的任一映射 $u_A : U \rightarrow [0,1]$ ，则 u_A 确定 U 的一个模糊子集， u_A 为 A 的隶属度函数。本文选用高斯型隶属度函数对输入进行模糊化，其表达式为：

$$f(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2a^2}} \tag{4}$$

式中： x - 输入变量 e 、 d_e 或 w 的值；

a - 输入量或输出量的方差，决定函数曲线的宽度；

c - 输入量或输出量的均值，决定函数曲线的中心。

(3) 建立模糊规则库。

本文推理规则描述采用“Rn: if (e is A) and (de is B) then (u is C)”的结构形式，其中 A、B 为不同论域上的模糊子集，Rn 为根据专家经验制定的决策规则，C 为输出模糊子集。控制系统的输入由 2 个变量，

每个变量的模糊子集包含 7 个语言变量，则模糊规则的总数为 $7^2=49$ 条。本文模糊规则库的具体规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

e	d_e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

对于推理机的输出模糊值，本文采用“与”逻辑，选择较小数作为去模糊化的隶属度值。

(4) 去模糊化。

通过去模糊化处理可获得无卡旋切机进给系统的速度控制值。本文采用加权平均法对输出模糊子集进行去模糊化，该方法的表达式为：

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n p_i u(i)}{\sum_{i=1}^n u(i)} \quad (5)$$

式中： η - 去模糊化后的控制输出值；
 p_i - 输出模糊子集的元素；
 $u(i)$ - 元素对应的隶属度值。

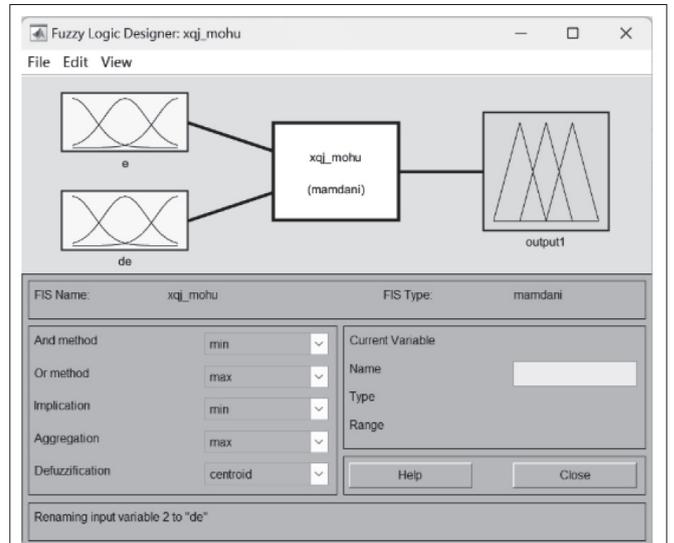
3 仿真实验

在 Matlab 软件环境下进行仿真实验，仿真步长取 0.01s。模糊控制器使用 Matlab 模糊控制工具箱进行设计，设计步骤为：

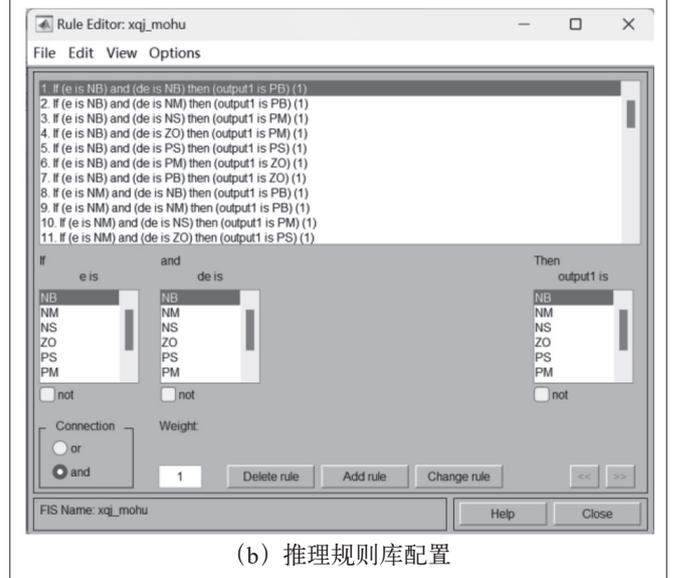
- (1) 设置模糊控制结构为两输入单输出，如图 3 (a) 所示；
- (2) 对每个输入变量和输出变量配置论域和高斯隶属度函数参数；
- (3) 根据表 1 的模糊规则表配置模糊规则，如图 3 (b) 所示；
- (4) 使用“View → Rules”检查模糊规则，保证模糊推理的结果连续。

通过模糊控制工具箱生成 FIS 文件，再通过 M 文件中函数调用 FIS 文件实现模糊控制器的控制量计算。

无卡旋切机的仿真模型参数为： ϕ =[40mm, 400mm]， $d=82$ mm， $n_0=40$ r/min， $a=94$ mm。目标旋



(a) 输入输出模糊化配置



(b) 推理规则库配置

图 3 模糊控制器配置

切厚度 s_d 分别取 0.6mm、1mm 和 2mm，控制量随时间的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知，无卡旋切机的切刀刀刃是变速进给的，控制量变化总体平稳且较为均匀，旋切厚度越小，进给速度变化越小。实际旋切厚度随时间的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知，系统取得较好的控制效果，上升时间快，超调量和稳态误差均较小。

4 结语

本文在建立无卡旋切机进给系统运动学模型和闭环误差控制模型的基础上，设计了一类实时性高的模糊控制器，并进行了仿真实验研究，不同旋切厚度的对比实验结果表明：为了实现无卡旋切机的均匀厚

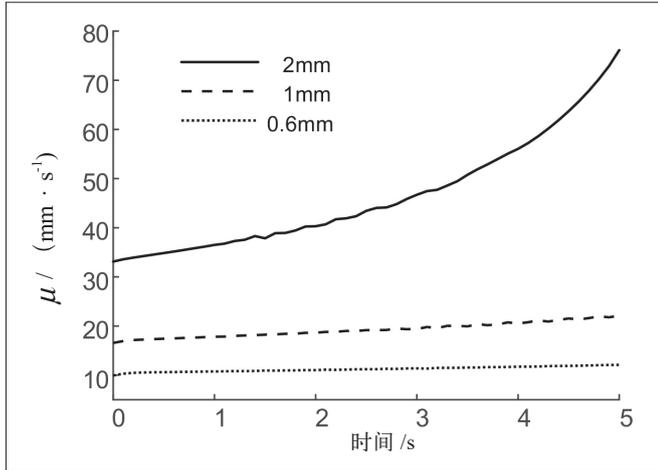


图4 进给速度变化曲线

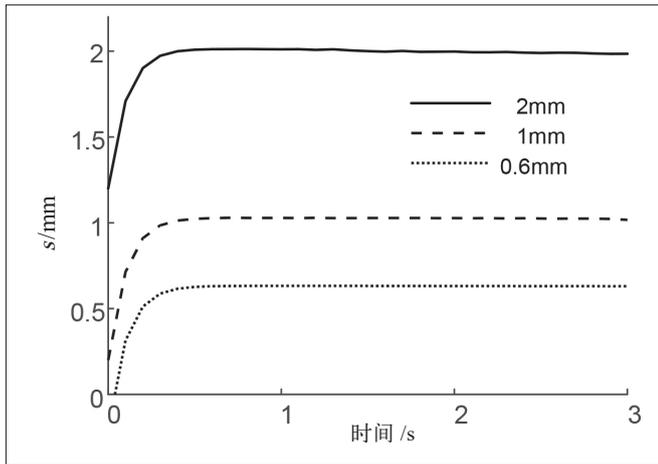


图5 旋切厚度变化曲线

度旋切，其旋切进给系统为非线性变速进给，旋切厚度越小所需进给速度越小，变化范围也越小。同时，所设计模糊控制器可使得闭环系统的误差收敛于零点，动态响应快，控制精度高，具备工程应用价值。

基金项目：福建省中青年教育科研项目（JAT201276）。

参考文献：

[1] 张盼盼. 我国森林资源发展状况与趋势分析 [J]. 绿色科技, 2019(17):204-206.

[2] 赖蕾磊. 多层实木地板生产的研究 [J]. 轻工科技, 2019, 35(07):64-65.

[3] 丁攀, 赵大旭, 王群, 等. 新型无卡轴木材旋切机结构分析与设计 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(01):162-167.

[4] 杨素珍. 恒线速无卡旋切机变速进给自整定PID控制 [J]. 漳州职业技术学院学报, 2012, 14(01):7-11.

[5] 杨素珍, 叶锦华, 郑炳坤. 一种恒线速无卡旋切机闭环变速进给控制方法 [J]. 集美大学学报(自然科学版), 2012, 17(03):200-203.

[6] 马巍凌, 郝矿荣. 基于PIDNN的恒线速无卡轴旋切机进给系统的控制 [J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(01):13-16.

[7] 李运华, 郭乙宏. 无卡轴旋切机床进刀速度伺服控制 [J]. 制造技术与机床, 2011(11):74-78.

[8] 吴桐, 张志信, 蒋威. 具有时变时滞的非线性分数阶退化微分系统的有限时间稳定性 [J]. 应用数学学报, 2023, 46(01):32-44.

[9] Bose B K. Fuzzy control of industrial systems— theory and applications [J]. Automatica, 2001, 37:958-959.

[10] Abdenouri N, Zoukit A, Salhi I, et al. Model identification and fuzzy control of the temperature inside an active hybrid solar indirect dryer [J]. Solar Energy, 2022, 231:328-342.

作者简介：杨素珍（1982.11-），女，汉族，福建漳州人，硕士研究生，讲师，研究方向：智能机电系统。