

基于磁导引 AGV 的路径跟踪控制策略研究*

曾祥苹¹, 刘兴教², 栗江¹

(1. 广州南洋理工职业学院 机电与汽车学院, 广州 510125; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘要:随着 AGV 在物流输送系统中应用场景越来越复杂化, 如何提高其路径跟踪精度及系统鲁棒性是目前主要研究内容之一。对此, 以前轮舵机转向、后轮速度驱动型磁导引 AGV 为控制对象, 分别设计了前轮转向模糊控制器和后轮速度调节模糊控制器, 并使两者协调配合, 达到实时根据路况合理调整舵机转角和驱动电机速度的目的。最终在 Matlab 中进行了仿真分析与验证, 实验结果表明该控制策略在提高磁导引 AGV 路径跟踪精度及系统鲁棒性方面具有一定的可行性和有效性。

关键词:磁导引 AGV; 路径跟踪精度; 模糊控制

中图分类号:TH112;TG506

文献标识码:A

Research on Path Tracking Control Strategy of AGV Based on Magnetic Guidance

ZENG Xiang-ping¹, LIU Xing-jiao², LI Jiang¹

(1. School of Mechanics and Electronics and Automobile, Guangzhou NanYang Polytechnic, Guangzhou 510125, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: With that application scenario of AGV in the logistic conveying system become more and more complicated, How to improve its path tracking accuracy and system robustness is one of the main research contents at present. To this end, the steering wheel steering rear wheel speed driven magnetic guided AGV as the control object, The front wheel steering fuzzy controller and the rear wheel speed adjustment fuzzy controller are designed respectively, And coordinate that two, The purpose of reasonably adjusting the steering gear rotation angle and the driving motor speed according to the road condition in real time is achieved. Finally, the simulation analysis and verification are carried out in MATLAB, The experimental results show that the proposed control strategy is feasible and effective in improving the path tracking accuracy and system robustness of AGV.

Key words: magnetic guided AGV; path tracking accuracy; fuzzy control

0 引言

AGV(Automated Guided Vehicle 自动导引运输车)是指装备有电磁或光学等自动导引装置,能够沿规定导引路径行驶,具有安全保护以及各种移载功能的运输小车^[1],属于轮式移动机器人范畴。目前,AGV在导引方式上有磁导引、激光导引、惯性导引和视觉导引^[2],每种导引方式有其自身的应用特点,可根据实际情况灵活选用。本文的磁导引 AGV 是一种预先在规划路径上铺设磁条,通过车上传感器感应磁条信号进行导航的 AGV。

磁导引 AGV 在驱动转向方式上有单舵轮驱动、双舵轮驱动、四舵轮驱动、双轮差速驱动和麦克纳姆轮驱动等^[3],通过查阅大量文献发现:目前,学者们对磁导引 AGV 路径跟踪控制的研究主要集中在双轮差速驱

动型 AGV 上,而对前轮舵机转向、后轮速度驱动型磁导引 AGV 的路径跟踪控制研究甚少。本文则重点对此类驱动方式的 AGV 进行路径跟踪控制策略研究和设计。

1 磁导引 AGV 系统结构

AGV 在结构上通常由:控制器模块、导航模块、驱动模块、避障模块、通信模块和电源模块共六部分构成^[4]。其中控制器模块、导航模块和驱动模块是磁导引 AGV 实现路径跟踪控制的硬件基础,此处 AGV 驱动采用前轮舵机转向+后轮电机速度驱动的方式,具体采用磁导航传感器跟踪采集路面预先铺设的磁条信息,然后将这些信息传送给主控制器(单片机),主控制器经过运算对前轮舵机的转角和后轮速度进行决策控制调整,使 AGV 沿规定路径行驶。其整体控制结构

收稿日期:2018-01-05;修回日期:2018-02-05

* 基金项目:广州南洋理工职业学院课题:基于物联网的物流移动机器人研究与设计(NY-2018KYYB-3)

作者简介:曾祥苹(1984—),女,湖北襄阳人,广州南洋理工职业学院讲师,硕士,研究方向为智能控制技术(E-mail) 523216062@qq.com。

可分为三层,如图 1 所示。

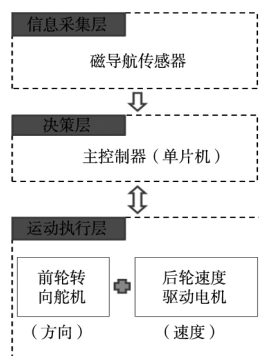


图 1 路径跟踪控制结构图

2 运动学模型

对磁导引 AGV 进行路径跟踪控制,实质是对小车行驶方向和速度的控制,并根据路况自动协调方向和速度的关系,减小路径跟踪偏差量。而建立抽象的数学模型是对其进行深入研究的基础,如图 2 所示是小车的运动示意图。 XOY 为全局坐标系,相对于车体中心, ϕ 为可控的前轮舵机转角,两前轮随舵机同步转向;两后轮是通过差速器连在后轴上,后轴通过齿轮由直流电机驱动,后轴始终与车体中心轴保持垂直; θ 是车体中心与 X 轴的夹角;前转向轮中心点为 Q ,后速度驱动轮中心点为 H , L 为前后轮中心点之间的距离。

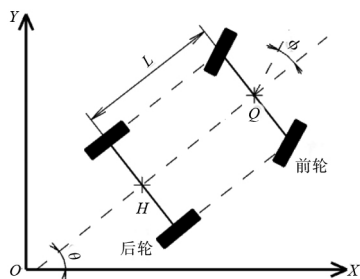


图 2 运动示意图

假设小车是刚性的且作纯滚动运动,根据几何关系,前后轴中心线速度关系如下:

$$V_Q = \frac{V_H}{\cos\phi} \quad (1)$$

式中, V_Q 为前轴中心点 Q 处线速度; V_H 为小车驱动速度。

若以 Q 点作为反映小车位置的参考点,则在全局坐标系下可用向量 $P = [X_Q, Y_Q, \theta]^T$ 表示小车位姿情况,它与小车转角 ϕ 及 Q 点速度之间的关系为:

$$\dot{X}_Q = V_Q \times \cos(\theta + \phi) \quad (2)$$

$$\dot{Y}_Q = V_Q \times \sin(\theta + \phi) \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{V_Q \times \sin\phi}{L} \quad (4)$$

根据式(2)~式(4),该磁导引 AGV 运动方程表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_Q \\ \dot{Y}_Q \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_Q \times \cos(\theta + \phi) \\ V_Q \times \sin(\theta + \phi) \\ V_Q \times \sin\phi / L \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(5)进一步离散化,得到 $(k+1)$ 时刻小车的位姿:

$$\begin{bmatrix} X_Q(k+1) \\ Y_Q(k+1) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_Q(k) + V_Q \Delta T \cos[\theta(k) + \phi(k)] \\ Y_Q(k) + V_Q \Delta T \sin[\theta(k) + \phi(k)] \\ \theta(k) + V_Q \Delta T \sin[\phi(k)] / L \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, k 为采样时刻; ΔT 为采样时间间隔。

3 路径跟踪控制策略

路径跟踪控制是 AGV 实现自主导航的基础,而控制算法是实现路径跟踪控制的关键。PID 控制是一种较传统的控制方法,但其在具有一 定的局限性,尤其对一些较复杂的时变非线性系统控制效果往往不佳。近年来,国内外许多学者又提出一些新的智能控制算法,并取得了一定的效果,如文献[1]提出粒子群算法对 PID 参数进行优化的方法;文献[5]采用模糊控制实现小车路径跟踪控制;文献[6]采用神经网络算法对 PID 控制器参数进行优化,从而提高路径跟踪精度等;本文的前轮舵机转向、后轮速度驱动型磁导引 AGV,其路径跟踪控制是一个较复杂的时变、非线性系统,很难建立其精确数学模型。另外由式(6)可以看出,该磁导引 AGV 能否以较高的精度沿指定路径行驶,是由当前舵机转角和小车速度共同决定的,两者需协调配合,如当小车行驶速度较快时,舵机转角值应减小;而当小车速度较慢时,可适当增大舵机转角等等;其控制规律可通过人的生活经验总结获得,因此,此处采用模糊控制算法实现前轮舵机转角和后轮驱动电机速度的控制。模糊控制即是一种基于人的操作经验总结出来的控制规则用计算机来实现的自动控制,它区别于经典控制理论的是不需要知道控制系统精确的数学模型,就能够实现有效的控制^[7],具有适应能力强、智能性高和控制实现简单的优点。

此处磁导引 AGV 路径跟踪控制结构图如图 3 所示,具体实现过程是将磁导航传感器获得的小车实际位置与理想位置间的偏差量作为输入,经过前轮转向控制器和后轮速度调节控制器协调配合控制,达到实时调整舵机转角和驱动电机速度的目的,使小车能够以较高的精度和稳定性沿给定路径行驶。

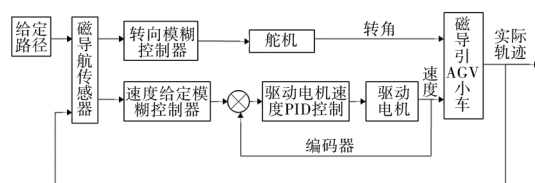


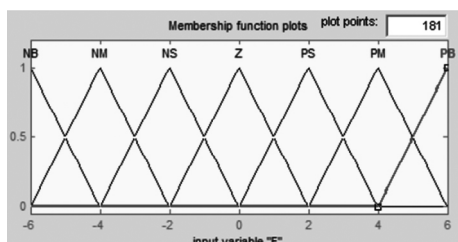
图 3 路径跟踪控制结构图

3.1 前轮转向模糊控制器设计

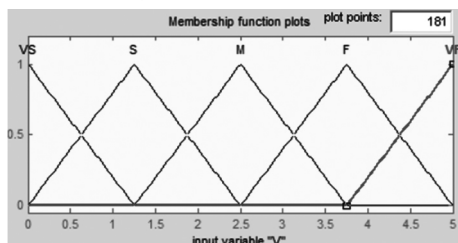
模糊控制器在结构上通常由模糊化、模糊推理和解模糊(或清晰化)三部分构成,具体控制过程是将传感器获得的精确输入信号值模糊化,再经过经验总结的控制规则进行模糊推理,最后将得到的模糊结果转换为精确控制量进行输出,驱动执行机构动作。具体设计内容包括:

(1) 定义模糊控制器输入、输出量,确定其语言变量及相应论域上的模糊子集

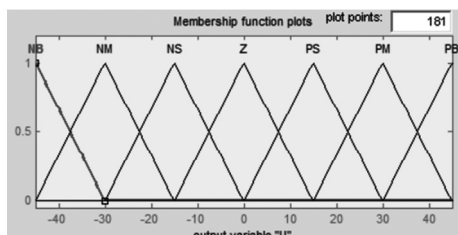
前轮转向模糊控制器实际上是根据小车跟踪路径偏差值实时调整舵机转角,实现小车沿给定路径直行、左转或右转,然而针对前轮舵机转向+后轮速度驱动型磁导引 AGV,其位姿同时还受到后轮驱动速度的影响。因此将小车跟踪路径的偏差值 E 和小车速度 V 作为该模糊控制器的输入量,舵机转角 U 作为输出量,构成一个 2 输入/1 输出的模糊控制系统;结合实际的磁导引 AGV 路径跟踪情况,此处将输入量偏差值 E 的模糊语言变量定义为 {“负大”,“负中”,“负小”,“零”,“正小”,“正中”,“正大”} = {“NB”,“NM”,“NS”,“Z”,“PS”,“PM”,“PB”},为了提高控制精度将偏差值 E 的语言变量量化为 13 个等级,其论域表示为: { -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 }; 小车速度 V 这一输入量的模糊语言变量定义为 {“很慢”,“慢”,“中速”,“快”,“很快”} = {“VS”,“S”,“M”,“F”,“VF”},对应的论域表示为: { 0, 1, 2, 3, 4, 5 }; 对于输出量舵机转角 U ,其语言变量也定义为: {“负大”,“负中”,“负小”,“零”,“正小”,“正中”,“正大”} = {“NB”,“NM”,“NS”,“Z”,“PS”,“PM”,“PB”},由于舵机实际转角大小受到小车机械结构及舵机本身最大转角的限制,因此结合实际情况,其论域为 $[-45^\circ, 45^\circ]$; 对于隶属度函数,本文输入输出均选择较常用的三角形隶属度函数。对应小车偏差值 E 、速度 V 和舵机转角 U 的隶属度曲线如图 4 所示。



(a) 偏差 E 隶属度函数



(b) 速度 V 隶属度函数



(c) 转角 U 隶属度函数

图 4 偏差 E 、速度 V 和转角 U 隶属度曲线

(2) 运用模糊推理方法,建立模糊控制规则及对应的模糊关系

制定模糊控制规则是进行模糊控制的关键,它是建立在人的实验、学习和经验总结基础上的,反映了输入量与输出量之间的映射关系。此处对前轮舵机进行转向控制可结合人们驾驶车辆的经验总结其控制策略,具体归纳为以下几点:

①当偏差 $E > 0$ 时,小车相对于给定路径右偏,此时小车应向左转,舵机转角 U 为负;反之,当偏差 $E < 0$ 时,小车相对于给定路径左偏,此时小车应向右转,舵机转角 U 为正;而当 $E = 0$ 时,说明小车在给定路径上行驶,舵机转角 U 为零;

②若偏差 E 绝对值较大,说明小车此时偏离给定路径较远,则应加大舵机转角 U 的值,使小车尽快回到给定路径上;反之,若偏差 E 绝对值较小,说明小车此时距离给定路径较近,应减小舵机转角 U 的值,提高控制精度和稳定性;

③当小车行驶速度 V 较快时,应减小舵机转角值 U ;反之,当小车速度较慢时,可适当加大舵机转角值;

这些控制策略在模糊控制器中需用专门的模糊推理方法进行表达,本文采用马丹尼(Mamdani)的 max-min 推理法,即条件语句 if E and V then U 的推理。例如:假设小车当前以较慢的速度在给定路径左边较远的地方行驶,根据前面总结的控制策略,则可控制小车以较大的舵机转角右转,用 if-then 条件语句表达为: IF $E = \text{NB}$ AND $V = \text{VS}$ THEN $U = \text{PB}$; 表 1 是该前轮转向控制系统的模糊控制规则表。

表 1 前轮转角 U 模糊规则表

E	V				
	VS	S	M	F	VF
NB	PB	PB	PB	PM	PM
NM	PB	PB	PM	PM	PS
NS	PB	PM	PS	PS	PS
Z	Z	Z	Z	Z	Z
PS	NB	NB	NS	NS	NS
PM	NB	NB	NM	NM	NS
PB	NB	NB	NB	NM	NM

(3) 解模糊,确定模糊清晰化方法

目前模糊量的清晰化方法有很多,较常用的有最大隶属度法、取中位数法和加权平均法(重心法)^[8]。鉴于重心法能够全面考虑各输入信号的微小变化,且具有较平滑的输出,此处选用重心法作为解模糊方法。

如图 5 所示是前轮转向模糊控制器对应的输入输出曲面观测图,它可以直观地反映与整个输入区间(偏差 E 、速度 V)相对应的输出区间(前轮转角 U)的变化情况。

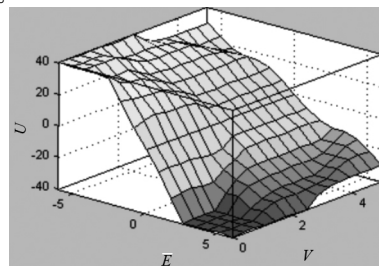


图 5 前轮转向曲面观测图

3.2 速度调节模糊控制器设计

速度调节模糊控制器负责控制磁导引 AGV 实时根据路况(小车路径跟踪偏差大小及直行或转弯等信息) 调节后轮驱动速度,使之与前轮转向控制协调配合,提高 AGV 路径跟踪精度。因此对于该速度调节模糊控制器,将偏差 E 和当前舵机转角 ϕ 作为输入,速度 U_v 作为输出。且将输入量 E 和 ϕ 模糊语言变量均定义为 {“负大”,“负中”,“负小”,“零”,“正小”,“正中”,“正大”} = {“NB”,“NM”,“NS”,“Z”,“PS”,“PM”,“PB”},论域为: { -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}; 输出量 U_v 模糊语言变量定义为: {“很慢”,“慢”,“中速”,“快”,“很快”} = {“VS”,“S”,“M”,“F”,“VF”},论域表示为: {0, 1, 2, 3, 4, 5}; 隶属度函数选择及解模糊方法与前轮转向模糊控制器相同,此处不再赘述。根据实际经验,同时考虑到前轮转向舵机在转向角度及响应速度上受到一定的限制,因此在制定速度调节模糊控制规则时可从以下几点着手: ①当小车转角值较大时,应适当减慢速度;反之,小车转角值较小时,应适当加快速度;保证前轮转向精度。②当偏差较大时,应减慢小车速度;反之,偏差较小时,可适当加快速度;防止由于惯性影响使小车偏差再次加大。③当小车当前转向与纠偏方向相反时,应适当减慢速度;反之,可适当加快速度。按照此控制思路结合小车实际行驶情况(偏差 $E < 0$ 时,小车相对于给定路径左偏;转角 $\phi < 0$ 时,小车主转),表 2 列出了对应的速度调节模糊控制规则表。

表 2 速度调节模糊规则表

E	ϕ						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	VS	VS	VS	S	VF	F	M
NM	VS	VS	S	M	F	M	S
NS	VS	S	S	F	F	M	S
Z	S	M	F	VF	F	M	S
PS	S	M	F	F	S	S	VS
PM	S	M	F	M	S	S	VS
PB	M	F	VF	S	VS	VS	VS

图 6 是速度调节模糊控制器对应的输入输出曲面观测图,它直观地反映了与整个输入区间(偏差 E 、前轮转角 F) 相对应的输出区间(小车速度 U_v) 的变化情况。

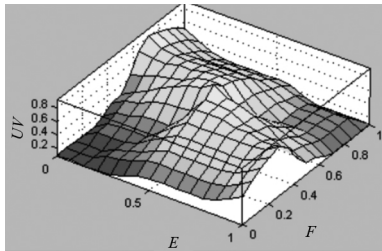


图 6 速度调节曲面观测图

4 仿真分析与验证

为了较直观地反映在上述控制策略下磁导引 AGV 路径跟踪情况,本文在 Matlab 中利用其编程功能及图形用户界面(GUI) 模块建立了一条带连续转弯的封闭轨道进行路径跟踪仿真实验,实验过程中通过多

次仿真修改,最终结果如下:

(1) 在后轮速度恒定情况下,对前轮转向控制分别采用传统 PID 控制和模糊控制算法进行仿真分析与比较。如图 7 所示是小车在恒定速度($v = 0.4\text{m/s}$) 行驶时,前轮转向 PID 控制与模糊控制轨迹跟踪图;由图 7 可以看出,在后轮驱动速度保持不变时,前轮转向采用模糊控制比用 PID 控制整体路径跟踪精度要高、系统鲁棒性要好,尤其是连续转弯时表现比较明显,PID 控制转弯时调整时间比模糊控制长。

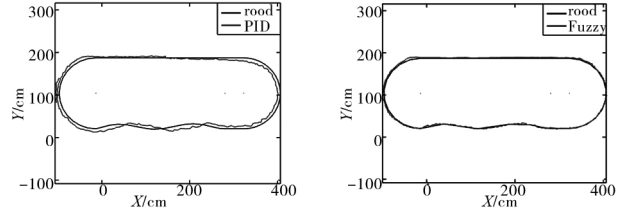


图 7 恒定低速($v = 0.4\text{m/s}$) 轨迹跟踪图

(2) 为了体现后轮驱动速度对 AGV 路径跟踪精度的影响,分别在高速和低速下采用模糊控制对其轨迹跟踪情况进行仿真。如图 8 所示是小车在恒定高速($v = 1.2\text{m/s}$) 行驶时,采用模糊控制轨迹跟踪图;由图 7 b 和图 8 可以看出,在采用同样控制算法的情况下,AGV 行驶速度快慢对其路径跟踪精度是有影响的,尤其是转弯时,速度越快跟踪精度越低。这也验证了本文控制策略的合理性,即对前轮舵机转向、后轮速度驱动型磁导引 AGV 应该实时根据路况对其后轮驱动速度进行调节。

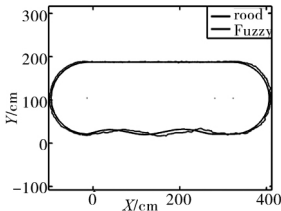


图 8 恒定高速($v = 1.2\text{m/s}$) 轨迹跟踪图

(3) 在前轮舵机转向模糊控制和后轮速度调节模糊控制共同协调配合下,AGV 轨迹跟踪情况如图 9 所示。比较图 8 和图 9 可以看出: 同样采用模糊控制算法,图 9 AGV 根据路况不断调整速度获得的轨迹跟踪精度和系统鲁棒性较佳,从而验证了本文控制策略的可行性和有效性。

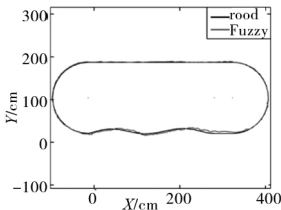


图 9 根据路况实时调速时轨迹跟踪图

5 结论

本文重点针对前轮舵机转向、后轮速度驱动型磁导引 AGV 制定了以模糊控制为主的可行(下转第 93 页)

5 实际加工

在 5 轴加工中心 DMU65 monoBLOCK 上完成导叶体零件的实际加工。该机床为 AC 摇篮式 5 轴机床, 数控系统为 Heidenhain iTNC530 控制系统。机床部分参数如表 3 所示。

表 3 DMU65 monoBLOCK 5 轴加工中心部分参数

参数	数据
主轴转速	0 ~ 18000r/min
X 轴行程	0 ~ 735mm
Y 轴行程	-650mm ~ 0
Z 轴行程	-560mm ~ 0
A 轴行程	-120° ~ 120°
C 轴行程	-360° ~ 360°
快速行程	20000mm/min
重复定位精度	0.001mm

选用圆柱形 7075 硬铝合金毛坯进行车削加工, 完成后使用自主设计的专用工装固定在五轴机床工作台上进行加工。加工过程稳定, 没有出现过切、欠切等现象。最终完成的导叶体零件实物如图 12 所示。



图 12 加工完成的导叶体零件

6 结论

(1) 采用车削与五轴铣削复合加工的加工工艺, 基于 UG NX 叶轮加工模块将导叶体铣削加工分为粗加工、半精加工和精加工三个阶段, 既提高了加工效率, 又能够有效保证导叶体的加工精度。

(上接第 89 页) 时根据路况合理调整舵机转角和驱动电机速度的路径跟踪控制策略, 并通过仿真验证了其可行性, 从而为此类驱动方式的磁导引 AGV 路径跟踪控制提供了一定的理论参考价值。然而模糊控制更多依靠的是人的经验总结, 带有主观性, AGV 在实际行驶中控制效果可能达不到最优。因此, 在后续研究中可尝试采用多种控制算法组合的方式, 取长补短进行改进, 以求达到最优控制效果。

[参考文献]

- [1] 孟文俊, 刘忠强. 视觉导引 AGV 的路径跟踪控制研究[J]. 控制工程 2014, 21(3): 321-325.
- [2] 谭雪, 戴更新. 应用于物流 AGV 磁导航传感器的研究[J]. 物流科技 2017, 40(8): 37-42.
- [3] 蒋小龙. 磁导引双轮差动 AGV 的关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学 2016.
- [4] 韩以伦, 李明波, 郭唤唤, 等. 智能 AGV 运输车控制系统设计[J]. 智慧工厂 2017(9): 69-71.

(2) 基于 Vericut 软件, 通过五轴机床仿真系统对导叶体 NC 代码进行虚拟加工验证, 可以有效检测过切、欠切, 防止机床碰撞等错误。

(3) 在 DMU65 monoBLOCK 5 轴加工中心上对导叶体进行了实际加工, 使用 5 轴铣削专用工装结构, 加工过程平稳。经检测, 加工完成的导叶体零件符合精度要求。研究结果为其他同类型复杂零件的编程加工提供了实际参考。

[参考文献]

- [1] 赵文明, 庄鹏, 鞠岗岗, 等. 基于 hyperMILL 的半开式整体叶轮五轴数控编程与加工技术[J]. 组合机床与自动化加工技术 2017(1): 70-77.
- [2] 陈良骥, 王永章. 整体叶轮五轴侧铣数控加工方法的研究[J]. 计算机集成制造系统 2007, 13(1): 141-146.
- [3] 丁刚强. 整体叶轮五轴数控加工技术的研究[J]. 工艺与检测 2013(4): 100-103.
- [4] 姬俊锋. 复杂整体叶轮数控加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学 2009.
- [5] 秦录芳, 孙涛, 时四强, 等. 基于 UG 的整体叶轮数控加工仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术 2015(11): 98-102.
- [6] 张文祥, 韩江. 基于 Hyper MILL 的整体叶轮五轴数控加工[J]. 制造技术与机床 2012(6): 125-128.
- [7] 樊文刚, 叶佩青. 复杂曲面五轴端铣加工刀具轨迹规划研究进展[J]. 机械工程学报 2015, 51(15): 168-182.
- [8] 叶佩青, 陈涛, 汪劲松. 复杂曲面五坐标数控加工刀具轨迹的规划算法[J]. 机械科学与技术 2004, 23(8): 883-886.
- [9] 王馨, 白海清, 沈钰. 整体叶轮五轴数控加工仿真与优化[J]. 工具技术 2017, 51(7): 67-69.
- [10] 邓先智, 黄泽森. 在 VERICUT 中优化刀具路径[J]. 实验科学与技术 2007, 5(6): 54-56.
- [11] 杨胜群. Vericut 数控加工仿真技术[M]. 北京: 清华大学出版社 2010.
- [12] 李升. 基于 Vericut 的 AC 摇篮式五轴机床加工仿真研究[J]. 现代制造技术与装备 2017(12): 49-50.
- [13] 蒋丽霞. Vericut 数控仿真技术研究及应用[J]. 兵器装备工程学报 2013, 34(7): 101-103. (编辑 李秀敏)

- [5] Jorge Villagra, David Herrero-Pérez. A comparison of control techniques for robust docking maneuvers of an AGV[J]. IEEE TransControl Syst Technol 2012, 20(4): 1116-1123.
- [6] 焦俊, 陈无畏, 王继先, 等. 基于 RBF 在线辨识的 AGV 转向单神经元 PID 控制[J]. 仪器仪表学报 2008, 29(7): 1431-1435.
- [7] Chuen Chien Lee. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I[J]. IEEE Transactions on Systems, 1990: 404-418.
- [8] 姜长生, 王从庆, 魏海坤, 等. 智能控制与应用[M]. 北京: 科学出版社 2007.
- [9] 杨小菊, 张伟, 高宏伟, 等. 基于模糊控制的移动机器人避障研究[J]. 传感器与微系统 2017, 36(3): 51-54.
- [10] 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社 2008.
- [11] 张博, 范国勇, 张保平. 基于 MATLAB 的电液伺服系统模糊 PID 控制研究[J]. 机械工程与自动化 2016(1): 169-170.

(编辑 李秀敏)