

联合收获机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统*

陈进¹ 宁小波¹ 李耀明² 杨广进¹ 吴培¹

(1. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 以切纵流联合收获机为研究对象, 设计了一种基于联合收获机前进速度的模型参考模糊自适应控制系统, 建立了融合多个变量的自适应控制参考模型和模糊控制规则。研制了联合收获机前进速度控制装置, 并进行了田间水稻收获试验。试验表明, 与普通模糊控制相比, 所设计的模型参考模糊自适应控制系统可以实现对联合收获机的自适应控制, 能够有效地降低操作人员的作业强度, 提高田间收获效率。

关键词: 联合收获机 前进速度 模型参考 模糊自适应控制

中图分类号: S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0087-05

引言

联合收获机前进速度是直接影响联合收获机作业质量和收获效率的主要控制参数, 性能良好的联合收获机应该在不超过额定喂入量和允许损失量的前提下具有最大的前进速度^[1-7]。目前, 国内外农机研究人员在联合收获机前进速度的自动控制方面已作了不少研究, 取得了较多的研究成果^[8-14], 但基于参考模型通过对联合收获机多个工作部件数据监测的融合来实现控制前进速度的研究尚不多见。

本文以模型参考模糊自适应控制理论为基础, 设计了以单片机为控制器通过对多个变量的融合实现前进速度的自适应控制, 以保持联合收获机获得均匀合理的喂入量, 使联合收获机主要工作部件负荷稳定, 以获取最佳脱粒质量和最大前进速度, 同时减轻操作人员的作业强度。

1 控制系统的结构及工作原理

联合收获机前进速度自动控制系统总体结构如图1所示, 整个系统由手动-自动切换系统、传感系统、控制器、前进速度控制执行系统、液晶显示系统、声光报警系统和调理电路组成。

传感系统是由安装于联合收获机上各个工作部件监测点的传感器组成, 用于采集联合收获机的作业信息, 包括联合收获机割台螺旋输送机、输送槽、切流滚筒、纵流滚筒、输粮螺旋输送机转速信号以及

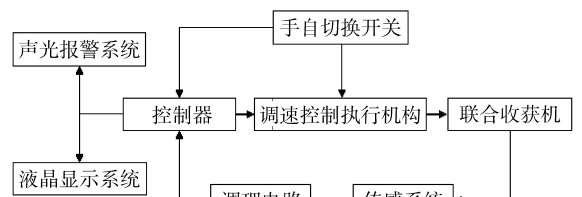


图1 联合收获机前进速度自适应控制系统结构
Fig.1 Structure of combine harvester forward speed under adaptive control system

作业过程中的喂入量信号与损失量信号。控制器是整个控制系统的核心, 主要的功能有: 数据处理、显示控制、决策与执行、数据存储与复现、参数设定等。液晶显示和声光报警系统实现联合收获机各监测点状态信息的显示以及对状态异常点进行声光报警。手动-自动切换系统主要是用来实现联合收获机手动控制与自动控制的切换。前进速度控制执行系统是用来对联合收获机的前进速度进行控制, 其中手动控制通过电控手柄实现, 而自动控制则是通过控制器发出控制信号进行控制。

控制系统中, 传感器采集到的信号为系统当前的输入信号, 输入信号经过相关的调理电路处理后输入控制器中, 经过模型参考模糊自适应控制算法, 得出前进速度的改变量。控制器根据改变量输出电压控制信号驱动前进速度执行机构调整收获机的前进速度, 使前进速度按照预期的改变量进行调整。各输入信号通过液晶显示器显示, 除前进速度外, 其他输入信号还具有超限预警和故障报警功能。

收稿日期: 2013-09-28 修回日期: 2013-11-01

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA10A502)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2010BAD01B06)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2012312)和无锡市科技成果产业化资金资助项目(CYE22C1216)

作者简介: 陈进, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备监测与控制技术研究, E-mail: chenjinjd126@126.com

2 模型参考模糊自适应控制系统的建立

如图2所示,模型参考模糊自适应控制主要由4部分组成:控制对象、参考模型、模糊控制器和自适应控制算法,其中 r 为系统的输入, u 为模糊控制器输出的控制信号, y_s 为控制对象的实际输出, y_m 为输出的参考值, e 为实际输出与参考值的偏差。模型参考模糊自适应控制是让可调系统(图2虚线框)紧随参考模型,可调系统通过模糊推理得出,并通过自适应规律进行不断调整,同时参考模型也可根据监测状态进行自适应优化。

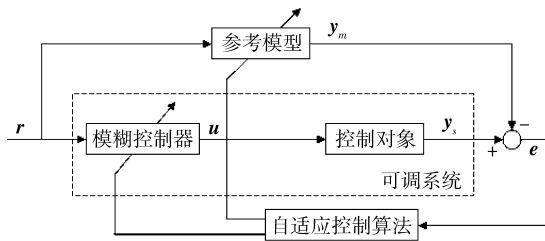


图2 模型参考模糊自适应控制系统结构框图

Fig.2 Structure diagram of model reference fuzzy adaptive control system

2.1 自适应参考模型的建立

根据自适应控制的要求建立前进速度的参考模型,假设参考模型的状态方程为^[15-18]

$$\begin{cases} \dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t) \\ y_m(t) = C x_m(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $x_m(t)$ ——模型的 n 维状态向量

$r(t)$ ——输入指令信号

A_m 、 B_m —— $n \times n$ 维和 $n \times m$ 维的系数矩阵

C —— $n \times n$ 维的常数输出矩阵

假设由模糊控制器与控制对象组成的可调系统的状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + B_s r(t) + u(e, t) \\ y_s(t) = C x_s(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 A_s 、 B_s —— $n \times n$ 维和 $n \times m$ 维的常数矩阵

$u(e, t)$ ——模糊控制器在自适应调节下的输出量

通过一个合适的控制量 $u(e, t)$,使得模型参考模糊自适应的误差量 $e(t)$ 减小到零。由式(1)和(2)可得

$$e(t) = y_m(t) - y_s(t) \quad (3)$$

因此,前进速度模型参考模糊自适应控制就是根据参考模型的输出和可调系统输出之差,产生一个模糊自适应控制量 $u(e, t)$,作用于控制对象,使其输出 $y_s(t)$ 趋于参考模型的输出 $y_m(t)$ 。

2.2 模型参考模糊规则的设计

本系统的被控对象是联合收获机的前进速度。

当联合收获机处于自动控制状态时,控制器输出的电压信号可以替代手动控制下的电控手柄,实现联合收获机前进速度的调节。控制器输出的电压信号范围是 $0 \sim 5$ V,对应的前进速度分别为:Ⅰ挡 $0 \sim 0.8$ m/s,Ⅱ挡 $0 \sim 1.4$ m/s,Ⅲ挡 $0 \sim 2.3$ m/s,输入与输出为一阶线性关系。设 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 为割台螺旋输送机、输送槽、切流滚筒、纵流滚筒、输粮螺旋输送机在正常作业状态下的转速参考值, n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 n_5 为割台螺旋输送机、输送槽、切流滚筒、纵流滚筒、输粮螺旋输送器的实际转速测量值, M_1 、 M_2 为喂入量和损失量的上限值, m_1 、 m_2 为喂入量和损失量的实际测量值。根据水稻和小麦的收获状况不同,分别设定正常工作状态下的初始参考模型,如表1所示。

表1 初始参考模型参数

Tab.1 Parameters of initial reference model

参数	水稻	小麦
割台螺旋输送机转速 $N_1 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	150	155
输送槽转速 $N_2 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	300	310
切流滚筒转速 $N_3 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	640	720
纵流滚筒转速 $N_4 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	910	1 110
输粮螺旋输送机转速 $N_5 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	540	545
前进速度 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.8 (Ⅰ挡)	0.4 (Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ挡)

系统参考模型设有3种工作状态,分别为正常、异常和故障。正常工作状态下参考模型中割台螺旋输送机、输送槽、切流滚筒、纵流滚筒、输粮螺旋输送器的转速参考值可根据收获环境的不同进行修改,喂入量与损失量为联合收获机固定的性能指标;异常工作状态参考模型中前进速度为正常工作状态下的50%;故障状态参考模型中前进速度为零。

可调系统的模糊控制规则中根据各工作部件监测数据也设定了正常、异常和故障3种输出状态。

用 $P_i(n_i) = \{n_i \geq 90\% N_i\}$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), 分别表示割台螺旋输送机、输送槽、切流滚筒、纵流滚筒和输粮螺旋输送机监测的转速大于参考转速90%的事件;用 $Q_i(n_i) = \{80\% N_i \leq n_i < 90\% N_i\}$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), 分别表示上述工作部件监测的转速处于参考转速80%~90%的事件;用 $L_i(n_i) = \{n_i < 80\% N_i\}$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), 分别表示上述工作部件监测的转速低于参考转速80%的事件;用 $U_j(m_j) = \{m_j \leq M_j\}$ ($j = 1, 2$), 表示喂入量和损失量监测数据处于正常范围中;用 $V_j(m_j) = \{m_j > M_j\}$ ($j = 1, 2$), 表示喂入量和损失量监测数据处于故障范围中,则可调系统模糊控制规则为:

监测状态正常

$$P_1(n_1) \wedge P_2(n_2) \wedge P_3(n_3) \wedge P_4(n_4) \wedge P_5(n_5) \wedge U_1(m_1) \wedge U_2(m_2) \quad (4)$$

监测状态异常

$$Q_1(n_1) \vee Q_2(n_2) \vee Q_3(n_3) \vee Q_4(n_4) \vee Q_5(n_5) \quad (5)$$

监测状态故障

$$L_1(n_1) \vee L_2(n_2) \vee L_3(n_3) \vee L_4(n_4) \vee L_5(n_5) \vee V_1(m_1) \vee V_2(m_2) \quad (6)$$

根据可调系统输出状态,参考模型选取的优先级依次为:故障、异常和正常,即有故障时进入故障状态模型,无故障、有异常时进入异常状态模型,无故障无异常时才进入正常状态模型。

2.3 模型参考模糊控制的算法设计

根据模型参考模糊规则设计了控制算法,其流程如图 3 所示。首先,调用模糊控制程序(图 4),根据状态优先级先判断是否故障,若故障则输出故障状态模型,若无故障则判断是否异常,若异常则输出异常状态模型,若无异常则输出正常状态模型。在正常状态下,系统可调用自适应优化算法,控制器根据自适应优化方式输出调节电压,使前进速度改变直至挡位的最大值,前进速度变化控制量如表 2 所示。若各工作部件监测数据保持稳定,则将此时状态下各数据替代参考模型下的数据,从而达到对参考模型进行优化的目的。在作业状态界面下将循环

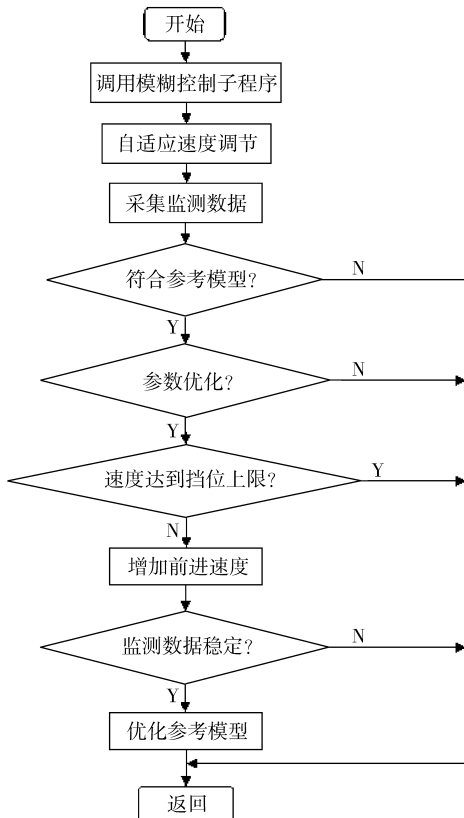


图 3 模型参考模糊自适应控制主程序流程图

Fig. 3 Program of model reference fuzzy adaptive control

调用模型参考模糊自适应控制子程序对联合收获机的作业速度进行调节。

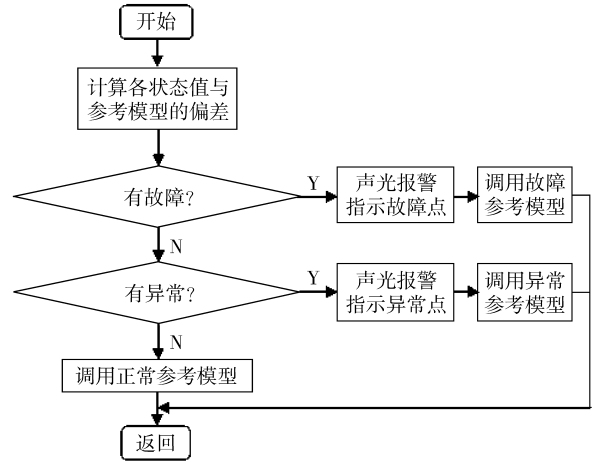


图 4 模糊控制子程序流程图

Fig. 4 Fuzzy control subprogram

表 2 前进速度变化控制量

Tab. 2 Control variation of forward speed

输出状态	前进速度	控制加速度 / (m·s ⁻²)
正常	小于参考值	0.1
	大于参考值	-0.1
异常	小于参考值	0
	大于参考值	-0.15
故障	小于参考值	0
	大于参考值	-0.2

3 田间试验与结果分析

将该系统应用于多个型号切纵流联合收获机试验样机,试验从 2011 年 10 月—2013 年 6 月在多个地方进行了多次水稻及小麦田间收获验证试验。现以其中一组水稻收获试验结果进行分析,作物品种为龙粳 29 号,作物自然高度 73.3 cm,产量为 8 025 kg/hm²,割茬高度为 12 cm。

3.1 加速度模糊自适应控制试验

当联合收获机进入模糊自适应控制时,首先要获取当前的挡位信息。开始时控制器输入一个较小的电压使联合收获机起步,通过首次采集到的前进速度与输入电压的比值,得到联合收获机的挡位信息;然后,根据挡位信息和当前输出状态,选取相应的前进速度控制方案,使联合收获机在不同挡位下的自动控制均能保持稳定的前进速度。

用 I 挡、II 挡和 III 挡进行了收获过程中前进速度在普通模糊控制和模糊自适应控制下的满割幅自动收获试验。表 3 为 2 种控制下输入电压增幅与加速度之间的对应关系。图 5 为不同挡位状态下模糊自适应控制和普通模糊控制的对比曲线。

表3 输入电压增幅与加速度对应关系

Tab.3 Correspondence relationship between input voltage increase and acceleration

挡位	普通模糊控制		模糊自适应控制	
	输入电压	加速度	输入电压	加速度
	增幅/V	$/(m \cdot s^{-2})$	增幅/V	$/(m \cdot s^{-2})$
I挡	0.625	0.1	0.625	0.1
II挡	0.625	0.2	0.375	0.1
III挡	0.625	0.3	0.217	0.1

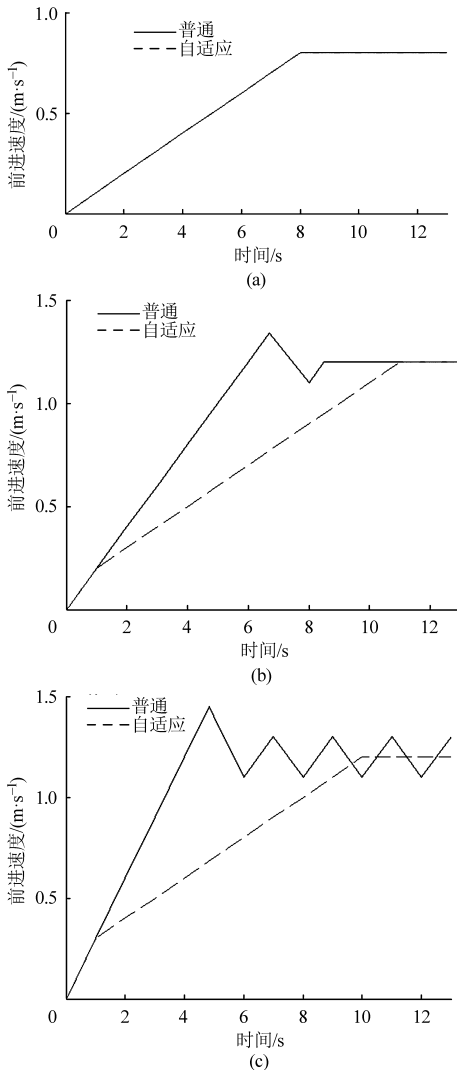


图5 模糊自适应控制与普通模糊控制对比曲线

Fig.5 Contrast curves between fuzzy adaptive control and ordinary fuzzy control

(a) I挡 (b) II挡 (c) III挡

在普通模糊控制和模糊自适应控制下, I挡的速度变化曲线重合,因为在I挡的状态下普通模糊控制方法和模糊自适应调节方法的加速度均为 $0.1 m/s^2$ 。在II挡的状态下,由于普通模糊控制不进行挡位信息的判断,仍按输入电压每秒增加 $0.625 V$ 进行控制,所以加速度将比I挡的状态下提高1倍,并且在速度到达 $1.2 m/s$ 的过程中产生了波动,但通

过调整最后仍然能保持在 $1.2 m/s$;而在模糊自适应控制下,经过刚开始短暂的加速后,通过反馈的前进速度计算出挡位信息,按照挡位信息使前进速度的加速度仍然为 $0.1 m/s^2$,并且速度平稳地达到 $1.2 m/s$,仅在最初未得到挡位信息时有较大的加速度。在III挡状态下,普通模糊控制的加速度是I挡状态时的3倍,并且由于过大的加速度使得控制系统无法将前进速度稳定在 $1.2 m/s$ 的参考状态下,而模糊自适应控制下,效果与II挡时控制状态相同,保持在 $0.1 m/s^2$ 的加速度,并平稳地达到 $1.2 m/s$ 。

通过对比试验可知,模型参考模糊自适应控制系统可以使联合收获机在不同挡位工作状态下保持相同的加速度进行作业速度控制,保证了联合收获机收获过程中能平稳和高效地工作。

3.2 作业速度自适应优化试验

图6为模型参考模糊自适应控制的作业速度优化监测数据曲线。可以看出,此时挡位为II挡,联合收获机达到初始设定的作业速度 $1.2 m/s$ 后,因各监测点的参数能够保持稳定,则可以调用参考模型自适应优化算法,优化参考模型的作业速度将以加速度 $0.1 m/s^2$ 增加到II挡的最高速 $1.4 m/s$ 。当进入参数设定界面时,可以发现作业速度的设定值由初始的 $1.2 m/s$ 变为 $1.4 m/s$ 。通过试验可知,模型参考模糊自适应控制算法可在保证收获机无故障的前提下优化模型参数,在自适应控制的过程中寻找最佳的收获速度,提高联合收获机的作业稳定性和工作效率。

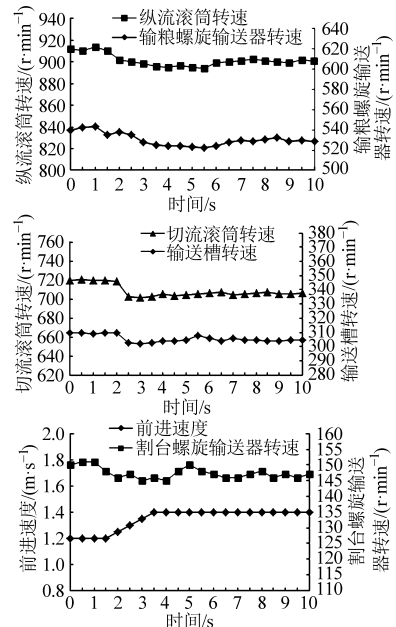


图6 模型参考模糊自适应优化监测数据曲线

Fig.6 Optimal monitoring data curves under model reference fuzzy adaptive control

4 结束语

针对联合收获机收获过程中非线性、时变、滞后的特点,设计了基于模型参考模糊自适应的联合收获机前进速度控制系统,建立了前进速度控制的参考模型。该控制系统以单片机为控制器,通过调用

模型参考模糊自适应控制算法,对联合收获机前进速度进行合理的控制。对该控制系统进行田间试验,试验结果表明控制系统能及时有效地对收获过程中的异常状态进行处理,且在正常作业过程中能够对模型参数进行优化,使联合收获机的作业效率能够获得较大地提高。

参 考 文 献

- 1 介战,刘红俊,侯风云. 中国精准农业联合收获机研究现状与前景展望[J]. 农业工程学报,2005,21(2):179-182.
- 2 Eroglu M C, Ogut H, Turker U. Effects of some operational parameters in combine harvesters on grain loss and comparison between sensor and conventional measurement method[J]. Energy Education Science Technology, 2011, 28(10): 497-504.
- 3 介战,陈家新,刘红俊. GPS 联合收获机随机喂入量模糊控制技术[J]. 农业机械学报,2006,37(1):55-58.
Jie Zhan, Chen Jiashan, Liu Hongjun. Research on fuzzy control of random feed quantity of GPS combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 55-58. (in Chinese)
- 4 陈进,吕世杰,李耀明,等. 基于 PLC 的联合收获机作业流程故障诊断方法研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):112-116.
Chen Jin, Lü Shijie, Li Yaoming, et al. Fault diagnosis of combine harvester based on PLC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 112-116. (in Chinese)
- 5 陈进,李耀明,季彬彬. 联合收获机喂入量测量方法[J]. 农业机械学报,2006,37(12):76-78.
Chen Jin, Li Yaoming, Ji Binbin. Study on measurement method of combine feed quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 76-78. (in Chinese)
- 6 唐忠,李耀明,赵湛,等. 切纵流联合收获机小麦夹带损失检测试验与分析[J]. 农业工程学报,2012,28(1):11-16.
Tang Zhong, Li Yaoming, Zhao Zhan, et al. Test and analysis of wheat entrainment loss for tangential-longitudinal-axial combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1):11-16. (in Chinese)
- 7 倪军,毛罕平,程秀花. 脱粒滚筒自调整模糊控制及 VLSI 实现技术[J]. 农业工程学报,2010,26(4):134-138.
Ni Jun, Mao Hanping, Cheng Xiuhua. Self-adjustment fuzzy control for threshing cylinder and its VLSI implementation[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(4):134-138. (in Chinese)
- 8 李耀明,丁为民,陈进. 梳脱式联合收获机脱粒输送装置自动控制系统[J]. 农业机械学报,2004,35(5):86-89.
Li Yaoming, Ding Weimin, Chen Jin. Automatic controller for threshing and transporting devices of stripping combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(5): 86-89. (in Chinese)
- 9 张认成,桑正中. 轴流脱粒滚筒模糊控制仿真[J]. 农业机械学报,2001,32(2):45-48.
Zhang Rencheng, Sang Zhengzhong. Simulation research on the fuzzy logic control of an axial threshing cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(2):45-48. (in Chinese)
- 10 Omid M, Lashgari M, Mobli H, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 7080-7085.
- 11 Gundoshmian T M, Ghassemzadeh H R, Abdollahpour S, et al. Application of artificial neural network in prediction of the combine harvester performance[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2010, 8(2): 721-724.
- 12 郑世宇,陈进,李耀明. 联合收获机多传感器信号采集与数据处理系统[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):107-111.
Zheng Shiyu, Chen Jin, Li Yaoming. Multi-sensor signals acquisition and data processing system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 107-111. (in Chinese)
- 13 陈进,郑世宇,李耀明,等. 联合收获机前进速度灰色预测模糊控制系统[J]. 农业机械学报,2011,42(10):110-115.
Chen Jin, Zheng Shiyu, Li Yaoming, et al. Grey predictive fuzzy control system of forward speed for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):110-115. (in Chinese)
- 14 李国栋,李勇智,张际先,等. 联合收获机脱粒滚筒的 PID 恒速控制[J]. 农业机械学报,2000,31(1):48-50.
Li Guodong, Li Yongzhi, Zhang Jixian, et al. PID control of constant palstance of a combine cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1): 48-50. (in Chinese)
- 15 董宁. 自适应控制[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009:216-218.
- 16 刘国荣. 模型参考模糊自适应控制[J]. 控制理论与应用,1996,13(1):92-97.
Liu Guorong. Model reference fuzzy adaptive control[J]. Control Theory and Applications, 1996, 13(1): 92-97. (in Chinese)
- 17 纪志成,李晓庆,沈艳霞. 无刷直流电机的模型参考模糊自适应方法及实验研究[J]. 电工技术学报,2006,21(1):75-81.
Ji Zhicheng, Li Xiaoqing, Shen Yanxia. Model reference adaptive approach and experiment study for brushless DC motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 75-81. (in Chinese)
- 18 邵俊鹏,徐星辉,贾慧娟. MATLAB 在模型参考模糊自适应控制系统仿真中的应用[J]. 计算机仿真,2003,20(1):59-61.

Numerical Simulation of Internal Flow Field in Centrifugal Fan with Double Outlet and Multi-duct

Xu Lizhang Yu Lijuan Li Yaoming Ma Zheng Wang Chenghong

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Centrifugal fan is one of the important parts of the combine harvester, and study on its internal flow field distribution is of great importance for the structural design of the fan. Single duct centrifugal fan is commonly used in air-and-screen cleaning device of the existing full-feed rice combine. And it has the problems of unstable internal flow field, uneven outlet velocity and fast wind speed attenuation. In order to solve those problems, the channel model of the fan was established by using Solidworks software. Meshing it with ICEM software and simulating it in Fluent software, the internal flow field in centrifugal fan was simulated. The results showed that the wind speed at upper outlet and external rim of impeller was larger, and the pressure of impeller runner increased along radial direction. The wind speed of lower outlet I and II and III increased successively, and the decline rate decreased, which was useful for the air flow covering the whole sifter. Transverse air flow was nearly layered distribution on the upper outlet. Transverse air flow of middle outlet among three lower outlets was the largest, and that of other two outlets were symmetric. Maximum value of wind speed, air quantity and pressure of upper outlet and lower outlet II and III increased with fan speed increasing. Maximum value of each outlet's air quantity and wind speed decreased with inlet diameter decreasing and the change of lower outlet I was more obvious. Variation of upper and lower separating board angle had a great change on wind speed and air quantity of lower outlet. The research of this paper provides basis for designing double outlet and multi-duct centrifugal fan.

Key words: Centrifugal fan Double outlet Multi-duct Internal flow field Numerical simulation

(上接第 91 页)

Fuzzy Adaptive Control System of Forward Speed for Combine Harvester Based on Model Reference

Chen Jin¹ Ning Xiaobo¹ Li Yaoming² Yang Guangjin¹ Wu Pei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Taking a tangential-axial combine harvester as a research object, a fuzzy adaptive control system of forward speed based on model reference was put forward, and the multivariate fusion reference models under adaptive control and the fuzzy control rules were established. Then, the control device of forward speed for the combine harvester was developed, and the field harvesting tests of rice were made to verify the feasibility of the device. The results proved that the model reference fuzzy adaptive control system could implement the adaptive control function of the forward speed for the combine harvester compared with the ordinary fuzzy control system, which effectively reduced the labor strength and increased the harvesting efficiency.

Key words: Combine harvester Forward speed Model reference Fuzzy adaptive control