

基于 FPGA 的联合收获机脱粒滚筒模糊控制系统^{*}

倪军 毛罕平 程秀花

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

【摘要】 提出了一种基于 VHDL 语言描述、FPGA 实现的联合收获机脱粒滚筒模糊控制系统的硬件设计方法。建立脱粒滚筒模糊推理规则和控制算法结构, 完成了控制器的 VHDL 模块化设计, 并通过 MAX + PLUSII 开发平台, 对各模块进行时序与功能仿真, 实现了脱粒滚筒智能控制技术的单片集成。结果表明: 用 FPGA 实现联合收获机脱粒滚筒模糊控制器, 时序验证方便, 而且推理速度快、修改灵活、系统集成度高, 是实现智能控制策略的一种新的有效思路。

关键词: 联合收获机 脱粒滚筒 模糊控制 VHDL FPGA

中图分类号: S255.5 **文献标识码:** A

Fuzzy Control System of Combine Cylinder Based on FPGA

Ni Jun Mao Hanping Cheng Xiuhua

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

Abstract

A design method of fuzzy control system of combine cylinder based on VHDL and FPGA was proposed. With the fuzzy logic toolbox of Matlab, the fuzzy inference rules and the algorithm architecture of cylinder were constructed. According to top-down mode, the VHDL modular design of the controller was carried out. Time simulation and function simulation of the fuzzy controller were proceeding on MAX + PLUSII, and the design was realized. The results indicate that FPGA implementation of fuzzy control about combine cylinder has many advantages, such as timing test is convenient, inference speed is high, design modification is agile, and system integration is great. It is an efficient method to implement intelligent control strategy.

Key words Combine, Cylinder, Fuzzy control, VHDL, FPGA

引言

联合收获机收获工作过程中, 脱粒滚筒是一个非线性时变且有较大延时的复杂系统, 脱粒负荷与影响因素之间很难建立精确的数学模型, 这给传统控制理论的应用带来不便^[1]。随着智能控制技术的发展, 由于基于经验、规则和自学习的模糊控制不需要受控对象的精确模型, 因此为非线性复杂系统的控制提供了有效的研究手段^[2]。

目前, 大多数模糊控制器都是依靠单片机通过

编程实现智能控制策略, 开发周期长、成本高, 运行速度慢, 而联合收获机脱粒滚筒控制系统要求实时性好, 因此用硬件实现模糊逻辑推理是一种可行的解决途径。近年来, 大规模集成电路 (very large scale integration, 简称 VLSI) 的强势发展使得智能控制策略的超高速硬件描述语言 (very high speed integrated circuit hardware description language, 简称 VHDL) 描述和现场可编程门阵列 (field programmable gate array, 简称 FPGA) 实现得到广泛开展, 开发具有自主知识产权的智能控制器成为可

能^[3]。本文借助 Matlab 的模糊工具箱建立联合收获机脱粒滚筒模糊推理规则和控制算法结构,利用 VHDL 语言在 EPF10K30ETC144-1 芯片上建立脱粒滚筒模糊控制器,并在 MAX+PLUSII 开发平台上通过仿真验证各模块时序与功能,以实现联合收获机脱粒滚筒智能控制技术的单片集成。

1 联合收获机脱粒滚筒控制策略

收获过程中,要求联合收获机在不超过脱粒滚筒额定喂入量和允许损失量的前提下,具有最大的前进速度,其目的是在保证脱粒质量的前提下,提高收获效率^[4]。文献[1]将脱粒过程中的滚筒视为变质量系统,所建立的动态模型为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{N}{J\omega} - (A + B\omega^2) - \frac{q\omega R^2}{2(1-f)J} \frac{\gamma + \lambda}{1 + \gamma}$$

其中 $q = H\rho v$

式中 ω 、 $\frac{d\omega}{dt}$ ——滚筒运行时的角速度和角速度的变化率

J ——滚筒转动惯量

R ——等效半径

f ——搓擦系数

v ——联合收获机行进速度

N ——发动机提供给滚筒的功率

ρ ——作物密度 γ ——作物的谷草比

A 、 B ——常数 H ——割幅宽度

λ ——谷物进出口速度比 q ——喂入量

从滚筒动态模型中可以看出,喂入量 q 与联合收获机的行进速度 v 及作物密度 ρ 成正比, ρ 不可控制,因此通过控制行进速度实施对脱粒滚筒转速调控是最佳的控制策略。

通过上述分析得出脱粒滚筒转速的控制方案:当田间作物密度 ρ 突变引起滚筒角速度 ω 变化时,控制机组的行进速度 v ,使滚筒角速度 ω 和损失量始终稳定在设定值附近。

2 模糊控制器的设计

2.1 结构与参数设计

根据脱粒滚筒转速控制策略,选取二维模糊控制器,输入量为滚筒角速度误差 E 和误差变化率 C ,输出量为联合收获机行进速度的调节量 U 。其基本结构如图 1 所示,其中 G 为滚筒角速度给定值, F 为滚筒角速度实际值。

考虑到脱粒滚筒对控制器性能的实际要求把滚筒角速度误差 E 、误差变化率 C 、行进速度调节量 U 划分为 7 个模糊子集,分别用 NB(负大)、NM(负

中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)表示。取 E 、 C 、 U 的模糊论域为 $[-6, 6]$,隶属函数选用 trimf 型,相邻两个模糊集交集的最大隶属度控制在 0.4 左右,保证了控制器的灵敏度和稳定性。 E 、 C 的基本论域为 $[-6, 6]$, U 的基本论域为 $[-1, 1]$,所以量化因子取 $K_E = 1, K_C = 1$,比例因子取 $K_U = 1/6$ 。根据滚筒角速度误差及误差变化率,采用 Mamdani 模糊模型建立模糊控制规则,如表 1 所示。误差较大时,选取控制量以尽快消除误差;误差较小时,选取控制量应抑制系统超调。

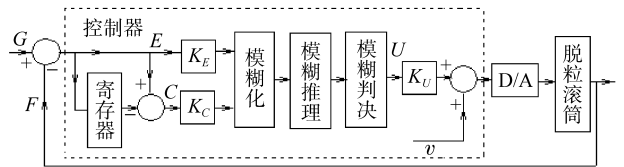


图 1 脱粒滚筒模糊控制系统结构图

Fig.1 Structure of fuzzy control system in cylinder

表 1 脱粒滚筒控制规则

Tab.1 Control regulation of cylinder

E	C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	ZO
NS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PS	ZO	ZO	ZO	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
PM	ZO	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

2.2 模糊推理系统的建立与控制表提取

由上述思路,在 Matlab 模糊逻辑工具箱中建立联合收获机脱粒滚筒模糊推理系统,如图 2 所示,其中模糊关系运算、合成运算和模糊判决分别采用模糊蕴含最小运算法、Max-min 合成法和重心法^[5]。通过规则观察器,提取模糊控制表,如表 2 所示。

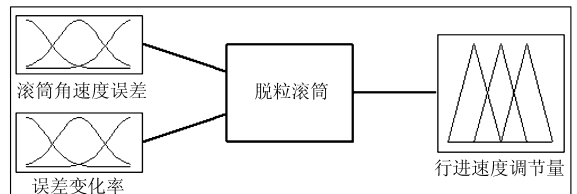


图 2 脱粒滚筒模糊推理系统

Fig.2 Fuzzy inference system of cylinder

3 脱粒滚筒模糊控制器 VHDL 语言设计

VHDL 语言支持自顶而下的层次化设计方法,能够对设计实体进行顶层的系统级描述和底层的门

表2 脱粒滚筒模糊控制
Tab.2 Fuzzy logic control of cylinder

	C												
E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	5	5	5	5	5	5	5	4	4	3	2	1	0
-5	5	5	5	5	5	4	4	3	3	2	1	1	0
-4	5	5	5	5	5	4	4	3	2	1	0	0	0
-3	5	4	4	3	3	3	3	2	1	0	0	0	0
-2	5	4	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2
-1	4	3	3	2	1	1	1	1	0	-1	-2	-3	-3
0	4	3	2	1	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-4
1	3	3	2	1	0	-1	-1	-1	-1	-2	-3	-3	-4
2	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-5
3	1	1	1	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-4	-4	-5
4	0	0	0	-1	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-5	-5	-5
5	0	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-5	-5	-5	-5
6	0	-1	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5

级描述,并结合多层次的仿真技术,确保设计的正确与可行^[6-7]。在FPGA上实现脱粒滚筒模糊控制器,其顶层描述如图3所示,CLK为全局时钟,它主要提供系统工作时钟,并且保证底层各模块的同步工作,方便各个模块的移植与复用;G为滚筒角速度给定量;F为实际滚筒角速度;v为联合收获机正

常行进速度;OUTPUT为联合收获机的实际行进速度。从顶层文件可以看出,模糊控制器包括4个子模块,即:运算处理模块(SUB)、模糊化模块(MOHUHUA)、模糊推理模块(FIM)、控制量生成模块(KONGZHILIANG)。

3.1 运算处理模块(SUB)

运算处理模块用来产生脱粒滚筒角速度误差信号E和误差变化率信号C。滚筒角速度设定值为100 rad/s^[8],经过A/D转换后,离散成8位二进制代码G,滚筒实际角速度值经过A/D后,离散成8位二进制代码F。由于控制系统定义误差为给定值减去实际值,为了描述方便,将两组信号进行无符号数减法运算。在时钟信号的作用下,先判断两组数值大小,然后用大的数值减去小的数值,得到误差并寄存,符号位用EO单独表示。在下一个时钟作用时候,所寄存的误差值与当前误差值进行无符号数减法描述,得到误差变化率,符号位用CO表示。根据上述设计思路,用VHDL语言进行描述并在MAX+PLUSII开发平台上进行功能验证,仿真波形图如图4所示。

3.2 模糊化模块(MOHUHUA)

模糊化模块的作用是把滚筒角速度误差E和误差变化率C在其论域中进行模糊化处理。为了节省FPGA资源,提高综合效果,在数值的处理上,

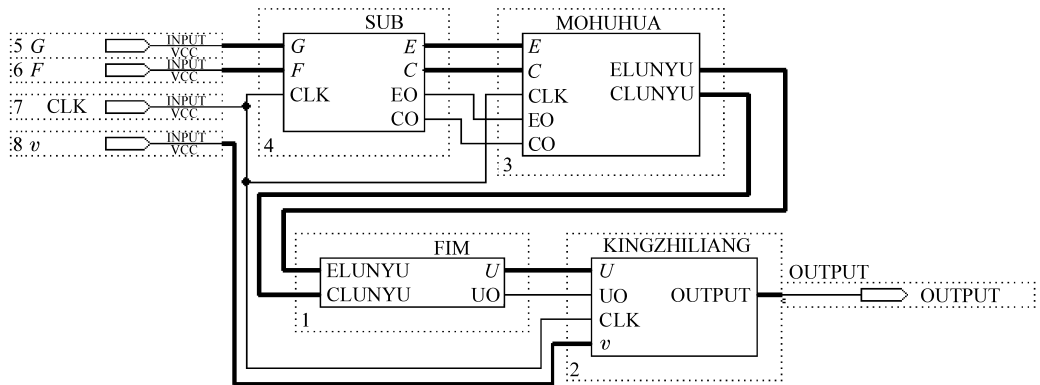


图3 脱粒滚筒模糊控制器顶层模块

Fig.3 Top module of controller about cylinder

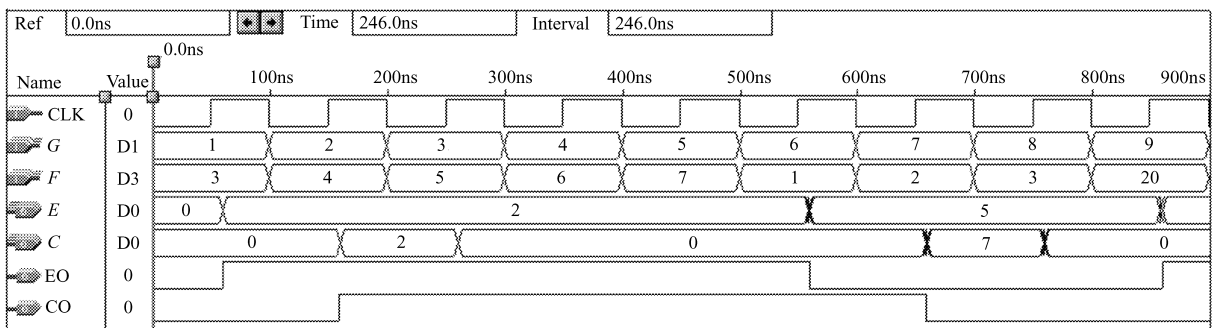


图4 运算处理模块仿真波形

Fig.4 Simulation of SUB module

将量化因子 K_E 、 K_C 直接乘入到误差与误差变化率上进行模糊化,避免另外编写乘法模块。误差 E 和误差变化率 C 的论域用 4 位二进制代码表示,最高位表示符号,正号为 0,负号为 1;低三位为数值位,表示 0~6。根据处理后的误差值 E 和误差符号 EO 、处理后的误差变化率 C 值和变化率符号 CO ,在论域上进行模糊化,其对应关系如表 3 所示。图 5 为该模块在 MAX+PLUSII 开发平台的功能仿真图。

从仿真波形图上可以看出,当 EO 为 1, E 值为 5(对应二进制 00000101),在 CLK 上升沿作用时, $ELUNYU$ 的值为 10(对应二进制 1010),与表 2 中的数据相符合。

3.3 模糊推理模块(FIM)

模糊推理模块的作用是实现模糊控制表的功能。程序编写依据表 2、3,模块的输入为滚筒角速度误差、误差变化率分别在其论域上对应的数值,输出是联合收获机行进速度的调节量,为了后续模块处理上的方便,其数值用四位二进制数表示,符号位用 UO 输出。控制表的描述采用“case. .when”结构,在 MAX+PULSII 平台上编译、仿真后,波形如图 6 所示。

分析波形图,当 $ELUNYU$ 为 14(二进制为 1110,

表 3 模糊化对应表

Tab.3 Fuzzification table

EO(CO)	$E(C)$ 值范围	ELUNYU(CLUNYU)
0	00000000~00000001	0000
0	00000001~00000011	0001
0	00000011~00000101	0010
0	00000101~00000111	0011
0	00000111~00001001	0100
0	00001001~00001011	0101
0	00001011~11111111	0110
1	00000000~00000001	1000
1	00000001~00000011	1001
1	00000011~00000101	1010
1	00000101~00000111	1011
1	00000111~00001001	1100
1	00001001~00001011	1101
1	00001011~11111111	1110

最高位是 1,表示负数,数值位为 110),即对应于控制表中 E 为 -6, $CLUNYU$ 分别等于 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 得到行进速度调节量分别为 5, 4, 4, 3, 2, 1, 0, 符号位输出 UO 为 1,表示行进速度调节量均为负值,这与控制表是完全一致的。

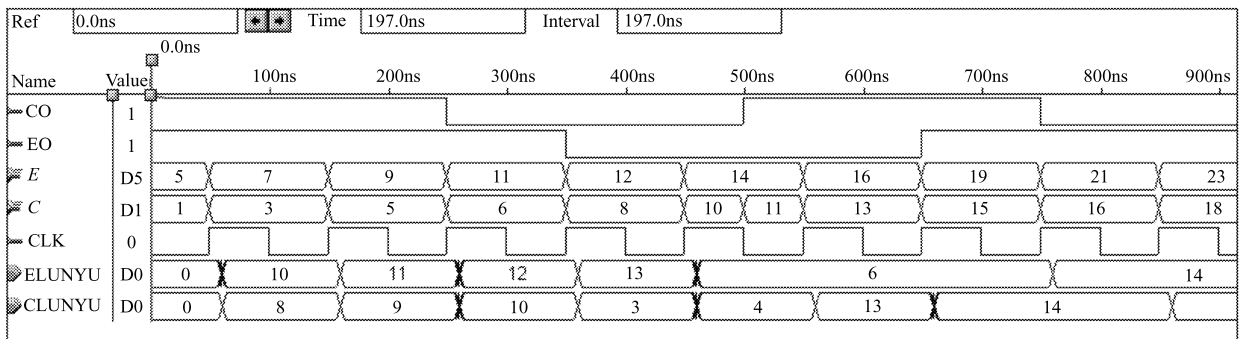


图 5 模糊化模块仿真波形

Fig.5 Simulation of MOHUHUA module

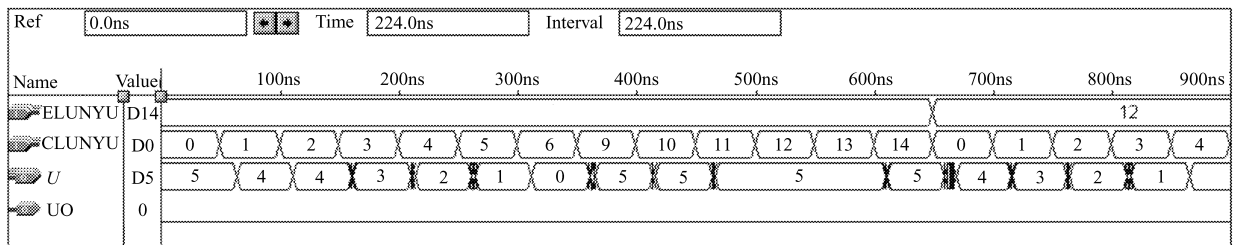


图 6 模糊推理模块仿真波形

Fig.6 Simulation of FIM module

3.4 控制量生成模块(KONGZHILIANG)

模糊推理模块输出的是联合收获机行进速度调节量,不能直接控制收获机的行进速度。控制量生成模块的作用是根据当前速度调节量,在行进速度

设定值的基础上进行运算得到此次控制量。联合收获机行进速度设定值 v 为 1 m/s ^[8],根据模糊推理模块输出端 U 的值,采用“if. .then”结构,实现与速度调节量加或者减运算。由图 1 可知,在模糊推

理模块后端有一比例因子 K_U , 为了节省 FPGA 资源, 避免编写乘法模块, 按照控制理论中结构图等变化的方法, 将该因子移至模糊控制器之外处理, 行进速度设定值相应扩大 $1/K_U$ 倍, 即 v 等于 6 m/s 。依据以上思路, 编写 VHDL 代码, 如下:

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_unsigned.all;
entity kongzhiliang is
port(U:in std_logic_vector(3 downto 0);
UO:in bit;CLK:in std_logic;
V:in std_logic_vector(3 downto 0);
OUTPUT:out std_logic_vector(3 downto 0));
end kongzhiliang;
architecture kzl_art of kongzhiliang is
begin
```

```
process(clk)
begin
if CLK'event and CLK = '1' then
if UO = '1' then
OUTPUT <= U + V;
else OUTPUT <= V - U;
end if;
end if;
end process;
end kzl_art;
```

该代码段在 MAX + PLUSII 平台上进行功能仿真, 波形图如图 7 所示。从仿真波形图中可以看出, 在联合收获机行进速度设定值一定的条件下, 控制量 OUTPUT 随着速度调节量 U 的变化而变化, 变化规律与理论上的模糊控制系统输出完全一致, 符合控制器设计思想。

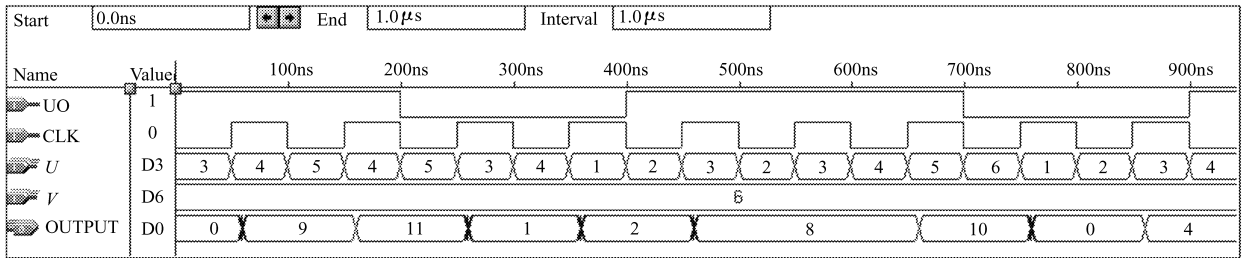


图 7 控制量生成模块仿真波形

Fig. 7 Simulation of KONGZHILIANG module

3.5 FPGA 实现

在 MAX + PLUSII 平台上对脱粒滚筒控制器的顶层模块进行编译、综合、优化, 通过 ALTERA 公司 EPF10K30ETC144 - 1 器件进行适配和时序仿真, 利用固核实现智能控制策略, 完成脱粒滚筒模糊控制器专用芯片的开发。EPF10K30ETC144 - 1 器件具有 144 个外部引脚, ETC 封装, 30 K 系统门, 工作速度等级为 1 ns, 其高集成度与高速性十分有利于智能控制技术的单片集成。根据文献[9], 在系统时钟均为 12 MHz 情况下, 基于 FPGA 的模糊控制器进行一条模糊推理, 需要 32 个时钟周期, 推理速度为 375 KLFPS, 而基于 MCS51 单片机的模糊控制器进行一条模糊推理, 则需要 200 个时钟周期, 推理速度约为 1 KLFIPS。可见, 由全硬件实现脱粒滚筒

模糊控制器在推理速度上有很大的优越性。

4 结论

(1) 用 FPGA 实现联合收获机脱粒滚筒模糊控制器, 方便可行。控制器各模块均可使用 VHDL 语言描述、FPGA 实现, 无需增加额外的硬件电路, 系统集成度高。

(2) 采用纯硬件 FPGA 并行处理方式实现模糊控制器, 推理速度快, 时序验证方便, 能达到系统实时性要求。

(3) 由于 FPGA 具有在系统可重配置性能, 使得设计修改灵活、易升级, 有助于智能控制技术的单片集成。

参 考 文 献

- 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): 46~48.
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): 46~48. (in Chinese)
- Kevin M Passino, Stephen Yurkovich. Fuzzy control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- Lund T, Torralba A, Garvajal R G. The architecture of an FPGA-style programmable fuzzy logic controller chip[C]//5th Australasian Computer Architecture Conference, 2000: 51~56.

粒间隙,最后是滚筒转速。

(4)根据试验数据分别建立脱粒功耗、脱粒损失、脱出物含杂率与脱粒间隙、滚筒线速度、喂入量之间的回归方程。经验证,3个回归数学模型有意义且显著,拟合程度都相当高。

(5)对短纹杆-板齿脱粒滚筒进行了多目标优化,得出了其最佳工作参数为脱粒间隙 19.2 mm、滚筒线速度 24.225 m/s(滚筒转速为 818 r/min)、喂入量 2.0 kg/s,经试验验证优化的结果是可靠的,为水稻联合收获机的研制与开发提供了参考依据。

参 考 文 献

- 1 张认成,桑正中.轴流脱粒空间谷物运动仿真研究[J].农业机械学报,2000,31(1):55~59.
Zhang Rencheng, Sang Zhengzhong. Simulation research on the motion of cereal in axial threshing space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(1): 55~59. (in Chinese)
- 2 衣淑娟,李敏,孟臣.谷物脱粒与分离装置试验数据采集系统[J].农业机械学报,2005,36(1):100~103.
Yi Shujuan, Li Min, Meng Chen. Computer data acquisition system of grain threshing and separating installation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(1):100~103. (in Chinese)
- 3 孟繁昌,庞凤斌,叶耘,等.联合收获机水稻收获性能对比试验[J].农业机械学报,2005,36(5):141~143.
Meng Fanchang, Pang Fengbin, Ye Yun, et al. Comparable experiments of combine harvester of rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(5):141~143. (in Chinese)
- 4 Petre I Miu. Kinematic model of movement through an axial threshing unit[C]. ASAE Paper, No.023052,2002.
- 5 Petre I Miu, Heinz-Dieter Kutzbach. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007,58(2):93~99.
- 6 李显旺,张彬,石磊.超级稻联合收获机具的探讨[J].中国农机化,2004(4):57~58.
Li Xianwang, Zhang Bin, Shi Lei. Discussion of combine harvester for the super hybrid rice[J]. Chinese Agriculture Mechanization, 2004(4):57~58. (in Chinese)
- 7 唐启义,冯明光.实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M].北京:科学出版社,2002.
- 8 辛益军.方差分析与实验设计[M].北京:中国财政经济出版社,2002.
- 9 田彦.回归分析法在实验数据处理中的应用[J].内蒙古工业大学学报:自然科学版,1995,14(3):57~62.
Tian Yan. Application of regressive analysis in experimental data processing[J]. Journal of Inner Mongolia Polytechnic University: Natural Science Edition, 1995, 14(3):57~62. (in Chinese)
- 10 邱立春.逐步回归分析方法在农机化系统分析中的应用[J].农业机械学报,1997,28(1):98~101.
Qiu Lichun. Application of the regression analysis method in the analysis of mechanization system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28(1):98~101. (in Chinese)
- 11 胡毓达.实用多目标最优化[M].上海:上海科学技术出版社,1990.
- 12 清源计算机工作室. MATLAB 基础及其应用[M].北京:机械工业出版社,2000.

(上接第 87 页)

- 4 吴守一.农业机械学[M].北京:中国农业机械出版社,1986.
- 5 楼天顺,胡昌华,张伟.基于 MATLAB 的系统分析与设计——模糊系统[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- 6 姜立东.VHDL 语言程序设计及应用[M].北京:北京邮电大学出版社,2001.
- 7 《中国集成电路大全》编委会.专用集成电路和集成系统自动化设计方法[M].北京:国防工业出版社,1997.
- 8 中机南方机械股份有限公司.4LZ-2.0 型碧浪牌 200 全喂入联合收割机使用说明书[M].2008:42.
- 9 焦素敏,阎有运.基于 FPGA 的模糊控制器的设计[J].华北水利水电学院学报,2006,5(4):69~72.
Jiao Sumin, Yan Youyun. The design of fuzzy logic controller based on FPGA[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2006,5(4):69~72. (in Chinese)
- 10 李国栋,韩金仓,桑正中.联合收割机脱粒滚筒恒速智能控制器设计[J].控制工程,2007(3):154~156.
Li Guodong, Han Jincang, Sang Zhengzhong. Design of intelligent controller of constant palstance of the combine[J]. Control Engineering of China, 2007(3):154~156. (in Chinese)
- 11 Wayne Wolf. FPGA-based system design[M]. Beijing: China Machine Press,2005.