

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.002

基于滑转率的拖拉机自动耕深模糊控制仿真*

白学峰 鲁植雄 常江雪 李 和 周伟伟

(南京农业大学江苏省高等学校智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

【摘要】 仿真分析了基于滑转率的拖拉机自动耕深模糊控制算法。首先建立系统的数学模型,并用 Matlab/Simulink 建立计算机仿真模型。然后设计系统的模糊控制器,进一步根据系统的数学模型进行了仿真分析,观察控制效果。同时用 PID 控制算法、模糊 PID 控制算法进行仿真,分别进行响应性、抗干扰、适应性的对比分析,结果表明,模糊 PID 和模糊控制算法较为合适,两者控制效果近似,但是模糊 PID 控制算法需要更多的变量,更为复杂。

关键词: 拖拉机 滑转率 耕深自动控制 模糊算法 仿真

中图分类号: S219.1; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0006-05

Fuzzy Control Algorithm Simulation of Automatic Control of Tilling Depth for Tractor Based on Slip Rate

Bai Xuefeng Lu Zhixiong Chang Jiangxue Li He Zhou Weiwei

(Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract

The automatic fuzzy algorithm for controlling tilling depth of tractor based on slip rate was simulated. Firstly, the mathematical of the system was built and simulated by using Matlab/Simulink. Secondly, the fuzzy controller was designed. Further simulated analysis of the proposed model was carried out. At the same time, PID controller and fuzzy-PID controller were also designed and simulated. And then, these three controllers performance was compared, including responsiveness, adaptability, and anti-interference performance. As a result, fuzzy-PID and fuzzy controller was more suitable for this system, but fuzzy-PID needed more variables and seemed more complex.

Key words Tractor, Slip rate, Automatic control of tilling depth, Fuzzy algorithm, Simulation

引言

液压悬挂直接影响拖拉机的作业效率,传统的中大型拖拉机已经实现了基于力位调节的悬挂控制,但是仅仅是手动调节,需要较多的人力支持。国外大型拖拉机厂已经实现拖拉机部分结构的智能控制,如基于力位调节的液压悬挂自动控制系统、多信号实时显示等,大大提高了拖拉机的作业效率。一般情况下传统的力位控制均能保证稳定的作业过

程。但当土壤湿度较大时往往导致滑转率过大,有时甚至使拖拉机原地打滑而不能前进,拖拉机牵引效率很低。滑转率控制的目的是通过调节犁的耕深从而改变拖拉机机组的工作阻力,使滑转率稳定在设定值附近以提高机组的牵引效率^[1~4]。

控制系统的核心是控制算法的选择与设计,传统的力位调节控制系统多采用 PID 控制算法,但是滑转率控制系统是一个典型的非线性系统,PID 适应性较差。近些年出现了一些智能控制系统,如模

收稿日期: 2012-07-03 修回日期: 2012-07-28

* 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2012384)

作者简介: 白学峰,硕士生,主要从事车辆电子控制技术研究,E-mail: whatwhat521@126.com

通讯作者: 鲁植雄,教授,博士生导师,主要从事车辆电子控制技术和车辆-地面系统力学研究,E-mail: luzx@njau.edu.cn

糊控制、模糊 PID 控制等。因此本文对拖拉机自动耕深控制算法进行仿真对比分析。

1 拖拉机滑转率控制系统数学模型的建立

基于滑转率的拖拉机驱动防滑液压控制系统结构如图 1 所示。其数学模型的建立主要包括比例电磁铁数学模型、比例方向阀控制液压缸数学模型、悬挂位置与悬挂对拖拉机形成的阻力的关系、拖拉机阻力与驱动力的关系和拖拉机驱动力与滑转率的关系。

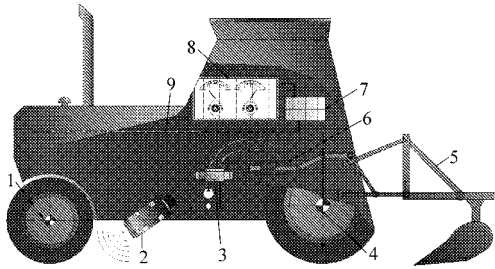


图 1 基于滑转率的拖拉机自动耕深控制系统结构

Fig.1 Structure of automatic control system of tilling depth based on slip rate

1、4. 编码器 2. 低速雷达传感器 3. 电液比例换向阀 5. 犁架
6. 双作用油缸 7. 控制器 8. 显示与操作面板 9. CAN-bus

1.1 比例电磁铁数学模型

本系统电液比例换向阀中的电-机械转换元件是耐高压直流比例电磁铁。通电以后电磁铁产生电磁吸力，克服弹簧力推动比例阀阀芯运动，其实质是电压-力-位移的转换关系。可以发现电压 U 和阀芯行程基本存在一个比例关系，表示为

$$x_v = K_v U \tag{1}$$

式中 K_v ——电压-阀芯位移的增益

1.2 比例换向阀控制液压缸数学模型

采用三位四通阀控制双作用油缸。根据流量线性化方程流量连续方程列出力平衡方程。

负载压力 p_L 作用于活塞部面积 A_p 上所产生的液压力与负载诸阻力之和平衡。这些阻力包括运动部件的惯性力、运动件的粘性摩擦力、弹性负载力以及其他负载力。可写为

$$A_p p_L = M_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + kx_p + F_L \tag{2}$$

式中 M_t ——活塞及负载折算至活塞上的总质量

B_p ——活塞及负载等运动件粘性摩擦系数

k ——负载运动时的弹性负载刚度

F_L ——作用在活塞上的其他负载力

进一步根据分析，简化出传递函数为

$$\frac{x_p}{x_v} = \frac{K_q/A_p}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \tag{3}$$

农具耕深 H 与液压缸活塞位移 Y 在设计耕深处可近似认为比例环节，其比例系数为

$$K_g = H/Y \tag{4}$$

最终得到电液比例方向阀控制液压缸的传递函数如图 2 所示。

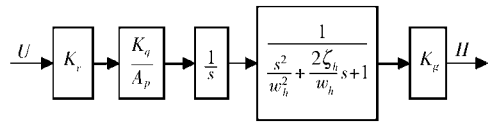


图 2 电液比例换向阀控制液压缸传递函数框图

Fig.2 Transfer function of hydraulic cylinder controlled by electro-hydraulic proportional reversal valve

1.3 悬挂位置与拖拉机作业阻力的关系

工作阻力（牵引力） F 主要取决于土壤的特性和耕深 H ，土壤越硬即比阻越大，耕深越深，则工作阻力越大，因此可以将其关系写为

$$K_H = \frac{F}{H} \tag{5}$$

1.4 拖拉机的阻力与驱动力的关系

轮式拖拉机带悬挂农具作业时，必须把悬挂农具作为机组整体的组成部分加以分析。悬挂农具的重力以及悬挂农具工作机构所受到的土壤阻力是通过悬挂机构直接传到拖拉机机架上去的，对整个机组来说处于平衡状态。经分析，可以将水平方向的各力投影于土壤平面，得到力平衡方程式^[5]

$$F_t = F_{f1} + F_{f2} + F_D = F_f + F_D \tag{6}$$

其中

$$F_f = F_{f1} + F_{f2} \tag{7}$$

式中 F_D ——牵引阻力 F_f ——滚动阻力

考虑到作业时，滚动阻力相对作业阻力较小，因此仿真时假设滚动阻力为零，则有

$$F_t = F_D$$

1.5 拖拉机的驱动力与滑转率的关系

驱动力与滑转率的关系通过轮胎来反映。本文采用 Duggoff 轮胎模型计算轮胎的驱动力，则拖拉机的驱动力与滑转率的关系为

$$F_x = \begin{cases} \frac{cS}{1-S} & \left(\frac{cS}{1-S} < \frac{\mu F_z}{2} \right) \\ F_z \left[\mu - \mu^2 \frac{F_z(1-S)}{4cS} \right] & \left(\frac{cS}{1-S} \geq \frac{\mu F_z}{2} \right) \end{cases} \tag{8}$$

其中

$$S = 1 - v/(\omega R)$$

式中

c ——轮胎纵向刚度

μ ——地面附着系数

S ——驱动轮滑转率

v ——拖拉机行驶速度

ω ——驱动轮角速度

R ——驱动轮半径

2 系统模糊控制器设计

基于滑转率的拖拉机自动耕深控制系统是典型的非线性系统^[6~7]。对上述系统,如果使用PID控制器,则比较难达到预期的效果。在复杂控制系统和高精度伺服系统中,采用模糊控制算法或者复合型控制器——模糊PID控制器等,可以达到理想的控制效果。

2.1 滑转率模糊控制器设计

基于滑转率的拖拉机驱动防滑模糊控制,既是将滑转率偏差 e 以及滑转率偏差变化率 de/dt 输入到模糊控制器,模糊控制器根据已有的控制规则输出相应的输出控制量,控制执行机构。最后将通过执行机构之后的反馈滑转率信号到输入处,从而实现滑转率的闭环控制。基于滑转率的拖拉机驱动防滑模糊控制原理如图3所示,图中 S_G 代表设定滑转率, S_R 实际滑转率。

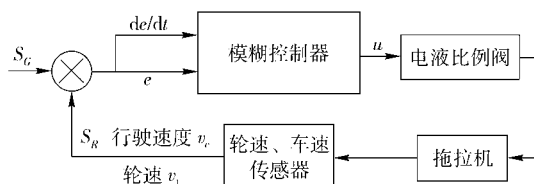


图3 基于滑转率的拖拉机自动耕深模糊控制原理

Fig.3 Principle of automatic control system of tilling depth based on slip rate

2.1.1 模糊控制器的输入输出变量

以滑转率的偏差 e 以及偏差变化率 de/dt 作为输入量,输出为电液比例阀的控制电压信号 u 。

2.1.2 隶属度函数

滑转率设定为0.2,因此输入信号滑转率偏差 e 的变化范围为 $[-0.8, 0.2]$,设定 e 的模糊论域为 $[-8, 2]$,则量化因子为10。滑转率偏差 e 定为6个模糊子集,为{NB, NM, NS, ZO, PS, PB},对应6个等级,用模糊语言表示为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB)。确定其隶属度函数如图4所示。

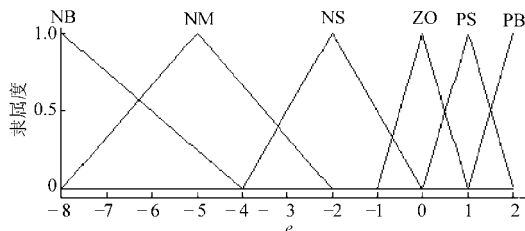


图4 滑转率偏差 e 的隶属度函数

Fig.4 Membership function of e

前期进行了拖拉机滑转率的测量实验,通过测量不同作业条件、不同土壤时的滑转率变化情

况,分析了滑转率变化特性,尤其是滑转率变化率的情况。实验结果发现,滑转率偏差变化率 de/dt 的变化范围一般为 $[-6, 6]$,所以设定 de/dt 的模糊论域为 $[-6, 6]$,量化因子为1。滑转率的偏差变化率 de/dt 设定为6个模糊子集,为{NB, NM, NS, ZO, PS, PB},对应6个等级,用模糊语言表示为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB)。确定其隶属度函数如图5所示。

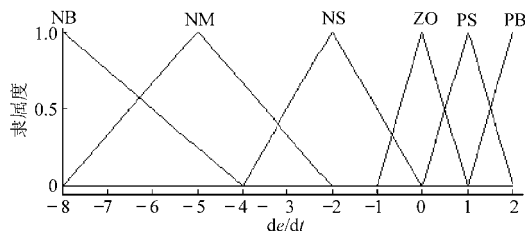


图5 滑转率偏差变化率 de/dt 的隶属度函数

Fig.5 Membership function of de/dt

输出 u 的变化范围为 $[-5, 5]$,设定 e 的模糊论域为 $[-1, 1]$,则量化因子为5。输出设定为5个模糊子集,为{NB, NS, ZO, PS, PB},对应5个等级,用模糊语言表示为:负大(NB)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB)。确定其隶属度函数如图6所示。

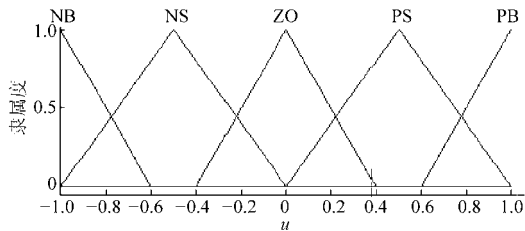


图6 输出 u 的隶属度函数

Fig.6 Membership function of u

2.1.3 模糊控制规则

控制的主要思想为:当误差较大时,此时有较大的控制信号,使液压阀开启较大的口径,液压悬挂便会较快地上升或者下降,快速回到设定位置;当误差较小时,此时有较小的控制信号,液压阀开启较小的口径,以使液压悬挂慢速上升或者下降,防止超调的出现;从较大到较小之间,控制信号基本上是线性变化的,基本上实现了准确的快速控制,同时可以防止超调的出现。设计控制规则如表1所示,图7为控制规则曲面图。

2.1.4 解模糊化的方法

模糊控制器的输出是一个模糊集合,而被控对象只能接受精确的控制量,所以需要通过解模糊方法将输出的模糊量转换为精确量。本文采用重心法编写 Simulink 仿真模型如图8所示。

表 1 滑转率模糊控制规则

Tab.1 Control rule of fuzzy algorithm

de/dt	e					
	NB	NM	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	ZO	NS
NS	PB	PS	PS	PS	ZO	NS
ZO	PS	PS	PS	ZO	NS	NB
PS	ZO	ZO	ZO	NS	NB	NB
PB	PS	NS	ZO	NB	NB	NB

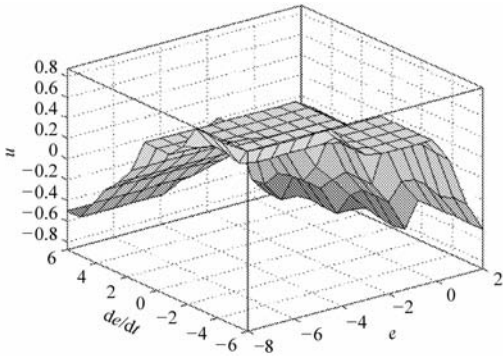


图 7 控制规则曲面

Fig.7 Surface plots of control rule

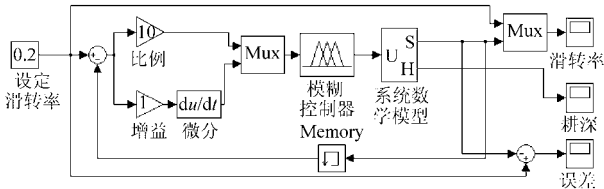


图 8 模糊控制算法仿真模型

Fig.8 Simulation model of fuzzy control algorithm

3 3 种控制算法仿真比较

本文不仅设计了模糊控制器,同时设计了 PID 控制器、模糊 PID 控制器,分别将这 3 种控制器嵌入到系统数学模型当中进行仿真对比分析。

3.1 响应性仿真比较

3 种控制方法的仿真曲线如图 9 所示。观察图中几个主要控制效果:响应速度、最大超调量和最终静态误差。从图中可以看出,模糊 PID 控制响应速度最快,调整时间为 1 s;PID 控制最慢,调整时间为 6 s。通过调整,均没有出现超调。同时也可以看出,3 种控制基本没有静态误差。

3.2 抗干扰性仿真比较

为了分析控制系统的抗干扰性能,对闭环中的反馈信号增加干扰信号,信号为 Uniform Random Number,1 s 变化一次,变化范围为[-0.2,0.8],得到 3 种控制方法的控制效果,如图 10 所示。可以发现 PID 控制响应速度较慢,一般在 5 s 左右,也存在

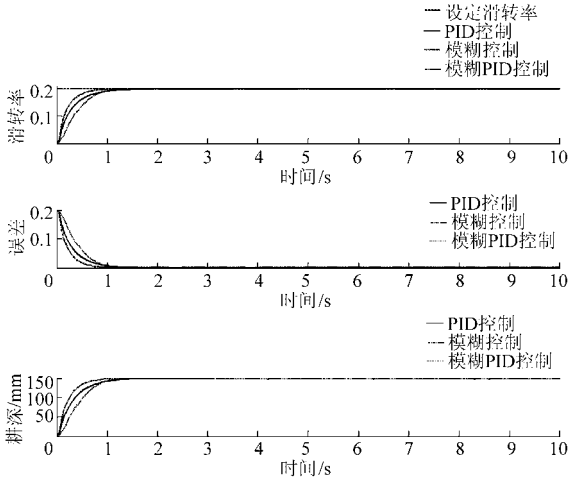


图 9 3 种控制算法仿真对比(阶跃信号, $\mu = 0.7$)

Fig.9 Simulation of three algorithms(step signal, $\mu = 0.7$)

一定的超调,静态误差相对其他两种控制算法较大。模糊和模糊 PID 控制响应速度均较快,一般在 1 s 之内,基本不存在超调和静态误差,较 PID 控制效果好。

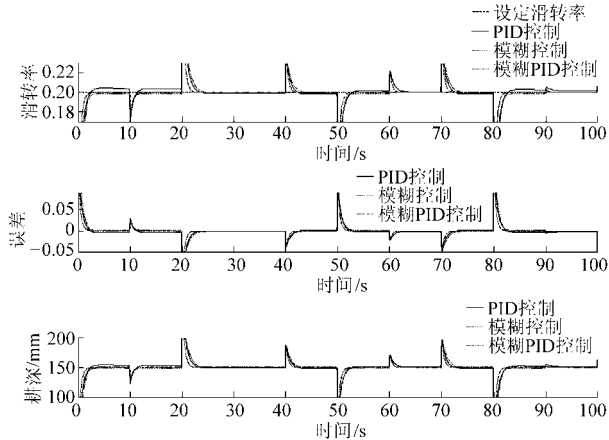


图 10 3 种控制算法仿真对比(干扰信号, $\mu = 0.7$)

Fig.10 Simulation of three algorithms

(interference signal, $\mu = 0.7$)

3.3 适应性仿真比较

改变路面附着系数 μ 从 0.7 到 0.3。仿真情况如图 11、12 所示。由图可以看出,随着系统参数的变化,PID 控制效果变化较大,图 11 中其响应时间增大到 8 s,同时存在较大的超调;图 12 中发现其超调最大达到 20%,静态误差也较大。图 11 同时可以发现,模糊 PID 控制响应性相对模糊控制较好,抗干扰性能基本不变。

4 结束语

通过对控制算法的响应性、抗干扰性、适应性分析,可以得到,PID 控制的适应性较差,随着参数的变化,控制效果变化较大,模糊和模糊 PID 控制效果基本相当,但是考虑到模糊控制算法实际是非线性比例或比例积分控制算法,由于不引入积分机制,理

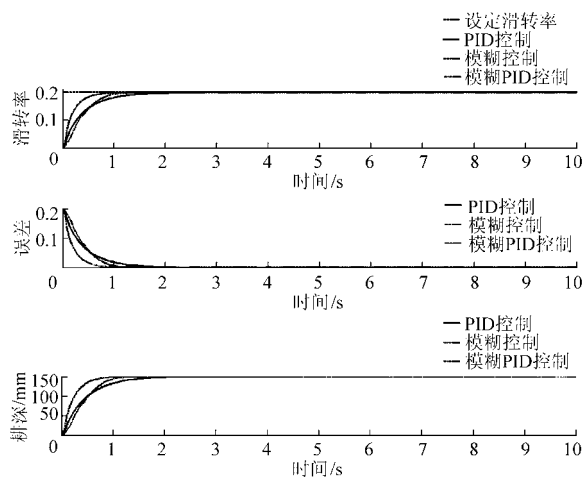
图 11 3 种控制算法仿真对比(阶跃信号, $\mu = 0.3$)

Fig. 11 Simulation of three algorithms

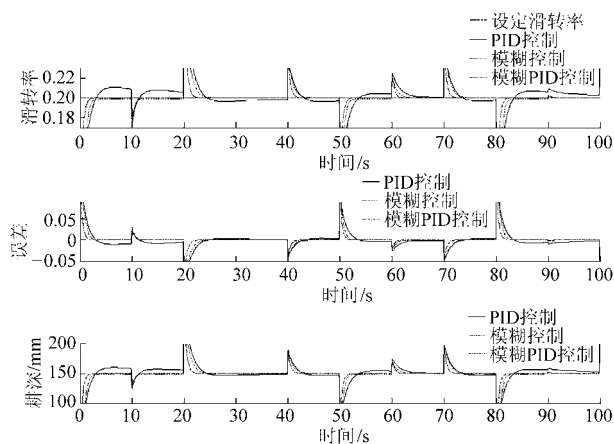
(step signal, $\mu = 0.3$)图 12 3 种控制算法仿真对比(干扰信号, $\mu = 0.3$)

Fig. 12 Simulation of three algorithms

(interference signal, $\mu = 0.3$)

论上讲总会存在静态误差,所以一定程度上必将影响控制精度。但是模糊 PID 控制算法涉及到更多的

变量,更为复杂,在实际的控制器设计中将需要更多的存储空间,更快的运算速度,因此代价更高,实现难度更大。

参 考 文 献

- 1 Igor KOVAčev, Silvio KOŠuTić, Viktor Jejič, et al. Impact of electronic-hydraulic hitch control on rational exploitation of tractor in ploughing [J]. Strojarstvo, 2008, 50(5): 287 ~ 294.
- 2 Anthonis J, Mouazen A M, Saey W, et al. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 3: design of depth control system [J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(1): 59 ~ 67.
- 3 Jeyong Lee, Yamazaki M, Oida A, et al. Electro-hydraulic tillage depth control system for rotary implements mounted on agricultural tractor: design and response experiments of control system [J]. Journal of Terramechanics, 1998, 35(4): 229 ~ 238.
- 4 Jeyong Lee, Yamazaki M, Oida A, et al. Field performance of proposed foresight tillage depth control system for rotary implements mounted on an agricultural tractor [J]. Journal of Terramechanics, 2000, 37(2): 99 ~ 111.
- 5 李文哲, 许绮川. 汽车拖拉机学—底盘构造与车辆理论 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 197 ~ 203.
- 6 张宾, 余群. 轮式拖拉机滑转率数字 PD 控制的模拟实验研究 [J]. 北京农业工程大学学报, 1995, 15(2): 29 ~ 32.
Zhang Bin, Yu Qun. Experimental study on digital PD control for wheel-slip of a model tractor [J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1995, 15(2): 29 ~ 32. (in Chinese)
- 7 张宾, 余群. 轮式拖拉机滑转率模糊控制室内模拟研究 [J]. 农业机械学报, 1996, 27(2): 14 ~ 18.
Zhang Bin, Yu Qun. Experimental study on wheel-slip fuzzy control for a model tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(2): 14 ~ 18. (in Chinese)
- 8 杜巧连, 熊熙程, 魏建华. 拖拉机液压悬挂耕深电液控制系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 62 ~ 65.
Du Qiaolian, Xion Xicheng, Wei Jianhua. Design and experiment on the control system of electro-hydraulic plow depth of tractor hydraulic hitch mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 62 ~ 65. (in Chinese)
- 9 谭彧, 谢斌, 赵建军, 等. 拖拉机液压悬挂系统模糊控制的研究 [J]. 机床与液压, 2004, 32(10): 75 ~ 77.
Tan Yu, Xie Bin, Zhao Jianjun, et al. The research of fuzzy control for hydraulic hitch in tractor [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2004, 32(10): 75 ~ 77. (in Chinese)
- 10 庞昌乐, 宗伯华, 鄂卓茂, 等. 拖拉机作业机组仿真试验系统的设计 [J]. 农机化研究, 2005(2): 120 ~ 124.
Pang Changle, Zong Bohua, E Zhuomao, et al. Design on a simulation control system of tractor-implement combination [J]. Journal of Agriculture Mechanization Research, 2005(2): 120 ~ 124. (in Chinese)