DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.009

# 重塑土壤承压模型的建立与试验\*

姚 艳 丁启朔 周 俊 (南京农业大学工学院,南京 210031)

【摘要】 使用小面积压板在重塑软粘土中进行压板沉陷试验,分析压板尺寸、土壤含水率、土壤密度及样筒筒 径对土壤承载力的影响。试验曲线拟合表明重塑土壤的承压特性满足二阶多项式模型。由拟合方程分析可知,模 型各项系数随含水率呈对数变化、随土样密度呈线性变化、随着密度和含水率的耦合关系呈对数变化,筒径变化使 二次项系数符号发生变化。大田实际土壤的试验表明,其承压曲线也满足二阶多项式模型。

关键词:重塑土壤 承压特性 压板沉陷 试验

中图分类号: S152.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)03-0040-06

# Pressure-sinkage Characteristic Model of Remolded Soil

Yao Yan Ding Qishuo Zhou Jun

(School of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

## Abstract

A plate sinkage test was conducted on remolded soft soil with small-sized plates to determine the effects of plate size, soil moisture content, soil bulk density and the diameter of sampling cores on the soil bearing capacity. Curve fitting on the resultant data revealed a 2nd order polynomial model of remolded soil bearing capacity. Further analysis on the fitted equation revealed a trend of logarithmic variation of each coefficient of the model with moisture content, a linear trend with soil bulk density, a logarithmic trend with the coupling of density and moisture content. The change of core diameter led to a shift of sign of the second order coefficient. A trial test on the field soil also showed a 2nd order trend of the bearing curve.

Key words Remolded soil, Pressure-sinkage characteristics, Plate sinkage, Test

## 引言

影响土壤(尤其是软粘土)承压特性的因素非 常多,如土壤质地、紧实度、含水率及结构性、承压面 积和形状、穿入速率等<sup>[1]</sup>。Bekker承压公式揭示了 土壤承压的基本规律,但对于不同类型的土壤,其压 力-沉陷关系曲线各不相同,这种多样性给提供一个 普适的数学模型带来困难<sup>[2]</sup>。因此一些学者针对 不同的状况对 Bekker 公式进行修正<sup>[3-8]</sup>。

我国南方软粘土表现出的承压特性尤其复杂,

其根源在于土的内聚力及内摩擦角可以发生变化, 进而改变其承压特性,因此揭示软粘土承压特性的 变化规律是认识其宏观力学表现的根本。谢小妍对 超液限土进行承载力测试,导出高含水土壤条件下 的压力--沉陷关系<sup>[9]</sup>;潘君拯<sup>[10]</sup>、姬长英<sup>[11-12]</sup>及赵 池航<sup>[13]</sup>等也对水田土壤的流变特性进行了探索;苏 显添发现用圆锥指数表征南方水田土壤强度的局限 性并给出其适用范围<sup>[14]</sup>。不过,软粘土的承压特性 仍未被完整地表述清楚。

目前,已给出的土壤承压模型包括分段式模

收稿日期: 2009-07-21 修回日期: 2009-09-11

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50875131)、江苏省博士后基金资助项目(0802015B)和中国博士后特别基金资助项目(200902521) 作者简介:姚艳,硕士生,主要从事软粘土条件下车辆驱动力学研究,E-mail:gglovehh1314@163.com

通讯作者:丁启朔,副教授,主要从事土壤耕作力学研究,E-mail: qsding@ njau.edu.cn

型<sup>[9]</sup>(由指数段及由宾汉模型推导出的线性段组合 而成)、海涂土壤承压模型<sup>[3]</sup>及基于 Bekker 公式的 修正模型<sup>[6]</sup>等。不过,由于使用大尺寸压板在户外 实际条件下的测试十分繁琐,而且获取的数据有限, 因此较难获取软粘土承压特性的完整描述。本文使 用小尺寸压板在重塑土样上进行压板沉陷试验。

## 1 材料与方法

试验用土取自大田,为粘性水稻土,土质为黄棕 壤,物理及化学成分如表1所示。

## 表1 试验用土的物理化学组成

Tab.1 Physical and chemical component

of the experimental soil

粘粒	壤粒(2~	沙粒	有机质	pH 值
( <2 µm)/%	50 µm)/%	( >50 µm)/%	含量/%	
24	26	50	2.90	7.78

取耕作层土壤,经过风干、破碎、过孔径为4mm的筛子,去除秸秆杂草,测取土壤含水率,后按5%级差调配不同含水率,获取含水率分别为5%、10%、15%、20%、25%、30%的土壤。

土壤承载力测试试验往往使用较大尺度的土槽 及压板<sup>[15~16]</sup>。国内一些学者<sup>[1,6,17~18]</sup>采用较大面 积的压板进行试验,相应的土槽尺度也较大。只有 少数试验使用了小样筒<sup>[19~20]</sup>。但是,苏显添<sup>[21]</sup>、谢 小妍<sup>[9]</sup>等的结论表明小面积压板不适合液限区间 之上的南方水田土壤承压特性测试。不过,他们没 有对液限以下的土壤状况是否适用这一结论进行研 究。另外,作者考虑到对软粘土重塑后的承压特性 及模型描述的需要,设计了小面积压板在重塑土壤 中的压板沉陷试验。参照 Henderson 等<sup>[22]</sup>的试验参 数(样筒尺寸: φ15.2 cm × 11.6 cm; 压头尺寸: 19.6 cm<sup>2</sup>),试验选用样筒尺寸为: \$\phi73, \$\phi98 和 φ155 mm, 筒高 200 mm, 壁厚 2 mm。在选用压板时, 参照以往压板形状等效性结论,如 Hanamoto 和 Janosi 指出当矩形板宽度和圆形板半径相等时,两 者在任何时候都具有明显的等效性<sup>[2]</sup>。谈黎虹<sup>[3]</sup> 也发现压板形状对承压特性试验的参数影响甚微。因 此本试验选用圆形压板,尺寸分别为 630、650 mm。

使用分层静压法制样<sup>[23]</sup>,压样装置如图 1 所示。参照农地土壤的实际密度(1.25~1.35 g/cm<sup>3</sup>) 以及作物的最适宜土壤密度(1.1~1.3 g/cm<sup>3</sup>)<sup>[24]</sup>, 压制出 3 种不同土壤密度,为 1.1 、1.2 、1.3 g/cm<sup>3</sup>。

试验分4层压样,每层厚度50mm。为使土样 干密度保持一致,需根据含水率、筒径计算出每层所 需的湿土质量。将称出的土样均匀装入样筒,置于



图1 压样器示意图

 Fig. 1 Schematic of compacting frame

 1. T型限位螺杆 2、4. T型螺母 3. 压样架 5. 制样压板 6. 标尺 7. 样筒 8. 立柱 9. 载样台 10. 千斤顶伸缩柱 11. 千斤顶 12. 千斤顶压杆 13. 横梁 14. 底座

压样器载样台上,配合使用标尺和手动千斤顶及限 位螺杆控制每层土样厚度。制备后的样本用保鲜袋 包裹,并静置24h均质化,之后用于压板沉陷试验。

参照 Henderson<sup>[22]</sup>等的试验方法及试验参数, 试验加压与信息采集装置采用 CSS44100 型电子万 能试验机,使用自制压板进行筒状样品的下陷测试, 测试下陷量达 80 mm,获取下陷量与压板所受压力 之间的关系曲线。由于将穿入速率控制在一定范围 内就不会产生测试误差<sup>[1]</sup>,因此使用统一的下陷速 率 90 mm/min<sup>[17]</sup>。

## 2 重塑土壤承压特性曲线结果分析

## 2.1 压板尺寸对压力-沉陷曲线的影响

以 φ155 mm 样筒内 20% 含水率及 1.2 g/cm<sup>3</sup> 干 密度的土样测试曲线为例(图 2),压板直径越大,在 下陷量相同时,压板所受力越大。



## 2.2 含水率对压力-沉陷曲线的影响

以 φ155 mm 样筒内、1.3 g/cm<sup>3</sup> 干密度重塑土 样在 φ50 mm 压板下曲线为例,其不同含水率条件 下的承压试验曲线如图 3 所示。

可以看出,随含水率增加,下陷量相同时压板所 受力减小。对各曲线拟合,都满足 F = a<sub>2</sub>z<sup>2</sup> + a<sub>1</sub>z +



moisture contents

a<sub>0</sub>的二阶多项式模型。以其中的10%含水率测试曲线为例(图4),发现拟合曲线具有较高的拟合精度,R<sup>2</sup> 值可达0.9701。





不同含水率下试验曲线拟合方程为

F = F =  $(-2.5654z^{2} + 358.81z + 2639.8 (\omega = 5\%, R^{2} = 0.9636))$   $-1.2933z^{2} + 188.43z + 2072.1 (\omega = 10\%, R^{2} = 0.9701))$   $-0.7370z^{2} + 104.26z + 843.96 (\omega = 15\%, R^{2} = 0.9766))$   $-0.5642z^{2} + 84.302z + 646.85 (\omega = 20\%, R^{2} = 0.9932))$   $-0.3751z^{2} + 47.595z + 417.94 (\omega = 25\%, R^{2} = 0.9886))$   $-0.1981z^{2} + 22.729z + 322.87 (\omega = 30\%, R^{2} = 0.9588)$  (1)

由式(1)可知,随含水率变化,该二阶承压模型 的系数随之改变。以系数 a<sub>2</sub> 为例,其随含水率变化 关系如图 5 所示。



进一步拟合,发现各项系数都随含水率呈对数 关系变化。其对数拟合关系分别为

$$a_2 = 1.293 4 \ln \omega + 1.500 9$$
  
 $a_1 = -184.29 \ln \omega - 215.65$   
 $a_0 = -1413.1 \ln \omega - 1526.6$ 

## 2.3 密度对压力-沉陷曲线的影响

以 20% 含水率重塑样在  $\phi$ 155 mm 筒径内、  $\phi$ 50 mm压板下曲线为例(图 6)。可以看出,随密度 增加,压板所受力增加,而系数  $a_2$  随之减小, $a_1$ 、 $a_0$ 增加。



以系数  $a_2$  为例,其随密度变化如图 7 所示。进 一步拟合,发现各项系数随着密度呈线性变化关系, 其关系满足  $a = k\rho + b$ ,其中 a 为各项系数, $\rho$  为密 度。拟合方程见表 2。



图 7 系数 a2 随密度变化关系、拟合曲线与方程

Fig. 7 Fitted curve and fitted equation of the relationship between the coefficient  $a_2$  and dry density

## 2.4 样筒筒径对压力-沉陷曲线的影响

以 10% 含水率、干密度 1.2 g/cm<sup>3</sup>、3 种不同筒 径的重塑土壤在 φ50 mm 压板下曲线为例,其试验 曲线、拟合曲线及方程如图 8 所示。

干密度 1.2 g/cm<sup>3</sup>、筒径 φ73 mm 时,不同含水 率土样在 φ50 mm 压板下拟合方程为

 $F = \begin{cases} 1.752 \ 4z^2 \ -3.033 \ 4z \ +759.81 & (\omega = 10\%, R^2 = 0.994 \ 3) \\ 0.728 \ 5z^2 \ +9.076 \ 8z \ +651.23 & (\omega = 20\%, R^2 = 0.993 \ 0) \\ 0.010 \ 9z^2 \ +12.854z \ +170.45 & (\omega = 30\%, R^2 = 0.992 \ 5) \end{cases}$  (2)

筒径 φ98 mm 时,不同含水率土样在 φ50 mm 压 板下拟合方程为

	表	2	各	项系数随额	密度变	化关系	的拟台	含方程	
Tab.	2	Fitte	d	equations	of the	relatio	onship	between	the
			c	oefficients	and o	lrv der	nsity		

含水	二阶多项式	各项系数随密度	$\mathbf{p}^2$				
率/%	各项系数	变化的拟合方程	K				
	$a_2$	$a_2 = -12.973\rho + 14.713$	0.7747				
5	$a_1$	$a_1 = 1$ 707. 1 $\rho - 1$ 903. 9	0.8407				
	$a_0$	$a_0 = 12\ 336\rho - 13\ 358$	0. 997 8				
10	$a_2$	$a_2 = -6.6085\rho + 7.3736$	0.9670				
	$a_1$	$a_1 = 820.68\rho - 884.14$	0.9875				
	$a_0$	$a_0 = 8\ 687.\ 6\rho - 9\ 356.\ 6$	0.9268				
15	$a_2$	$a_2 = -3.4585\rho + 3.8386$	0.8715				
	$a_1$	$a_1 = 410.34 \rho - 436.48$	0.9171				
	$a_0$	$a_0 = 3\ 650.\ 3\rho - 3\ 858.\ 1$	0.9626				
20	$a_2$	$a_2 = -2.060 \ 0\rho + 2.125 \ 5$	0.9933				
	$a_1$	$a_1 = 272.\ 18\rho - 269.\ 57$	1.0000				
	$a_0$	$a_0 = 1$ 820. 2 $\rho - 1$ 763. 8	0.8411				
25	$a_2$	$a_2 = -1.825\ 0\rho + 2.001\ 9$	0.9989				
	$a_1$	$a_1 = 168.67 \rho - 171.57$	0. 999 7				
	$a_0$	$a_0 = 1$ 319. 0 $\rho - 1$ 342. 1	0.7324				
30	$a_2$	$a_2 = -0.789 5\rho + 0.8143$	0.9071				
	$a_1$	$a_1 = 70.\ 00\ 0\rho - 66.\ 357$	0.8097				
	$a_0$	$a_0 = 1$ 342. 3 $\rho - 1$ 459. 3	0.8102				



Fig. 8 Trial and fitted curves and fitted equation of varying sampling cores

$$F = \begin{cases} 0.568\ 8z^2 + 23.034z + 314.13 & (\omega = 10\%\ , R^2 = 0.997\ 8) \\ 0.021\ 8z^2 + 35.362z + 216.65 & (\omega = 20\%\ , R^2 = 0.998\ 3) \\ -0.112\ 9z^2 + 15.671z + 135.48 & (\omega = 30\%\ , R^2 = 0.994\ 8) \end{cases}$$
(3)

筒径 φ155 mm 时,不同含水率土样在 φ50 mm 压板 下拟合方程为

F =

$$\begin{cases} -0.4157z^{2} + 90.031z + 786.61 & (\omega = 10\%, R^{2} = 0.9871) \\ -0.3269z^{2} + 57.168z + 329.00 & (\omega = 20\%, R^{2} = 0.9947) \\ -0.1623z^{2} + 21.568z + 76.501 & (\omega = 20\%, R^{2} = 0.9966) \end{cases}$$
(4)

可以看出,含水率相同,筒径增加,系数 a, 随之 减小,a1 增加,a0则无规律性。筒径为 \$73,\$98 mm 时拟合的方程 a, 出现正值, 如图 8 示, 曲线上翘, 此 时样筒产生巨大的约束效果。随含水率增加,a2的 绝对值减小,可见此时样筒约束减弱。

#### 2.5 含水率与密度对模型系数的耦合效应

表 2 为 φ155 mm 样筒内、不同含水率、不同干 密度下的土样在 φ50 mm 压板下拟合方程各项系数 随密度变化的拟合方程。

从表中可知,含水率变化时,各项系数随密度呈 现出一定变化规律。设 k 为系数 a 随密度变化拟合 方程的斜率。k,随含水率变化关系见图 9。



k, 随含水率变化关系及拟合曲线

Fig. 9 Fitted curves and fitted equations of the relationship between  $k_2$  and moisture content

进一步拟合,发现各方程斜率随含水率都呈对 数变化,其对数拟合关系分别为

> $k_2 = 6.742 \ 2 \ln \omega + 8.185 \ 6$  $k_1 = 905.53 \ln \omega - 1.144.9$  $k_0 = 6\ 780.\ 7\ln\omega - 8\ 018.\ 5$

#### 大田土壤与室内重塑土壤承压模型比较 3

在 2009 年夏季麦收后的土壤中取样,土壤的密 度为 1.23 g/cm<sup>3</sup>、含水率为 29.23%。取样时清除 表层 2~3 mm 土壤, 用  $\phi$ 155 mm 的样筒打入土层, 打入深度为20 cm,之后清除样筒周边土壤,后用切 土刀切下样筒土壤并取出,置于塑料袋密封带回实 验室测定,方法如上所述。

将试验所得大田曲线与室内含水率为25%、密 度 1.3 g/cm3 的重塑土样的试验曲线比较,如图 10 2500大田实际实测值



所示。同样对大田试验曲线进行拟合,发现其也满 足二阶多项式模型,且具有较高的拟合精度,因此该 模型可以用于预测大田实际土壤的承压性质。

## 4 结论

(1)使用小面积压板在重塑软粘土中进行压板 沉陷试验来测定土壤的承压特性能够得到可靠的结 果,室内重塑土壤的承压特性可用 F = a<sub>2</sub>z<sup>2</sup> + a<sub>1</sub>z + a。形式的二阶多项式模型表述。

(2)压板尺寸、土壤含水率、土壤密度、样筒筒 径等对二阶多项式各项系数均有影响。发现模型各 项系数随含水率呈对数变化、随密度呈线性变化、随 着密度和含水率的耦合关系呈对数变化、筒径变化 使二次项系数符号产生变化。

(3)对大田土壤进行试验,发现大田土壤承压 曲线也满足二阶多项式模型。

参考文献

- 李癸酉,杨建刚. 饱和性水稻土承载特性的研究[J]. 土壤学报,1989,26(4):401~404.
   Li Guiyou, Yang Jian'gang. A study on the bearing characteristics of saturated paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(4): 401~404. (in Chinese)
- 2 Bekker M G. 地面——车辆系统导论 [M]. 北京:机械工业出版社,1978.
- 3 谈黎虹,程国耀.海涂土壤承压模型的建立[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2002,28(4):440~444. Tan Lihong, Cheng Guoyao. Construction of the coastal shoaly land soil pressure-sinkage model[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2002, 28(4): 440~444. (in Chinese)
- 4 曹伯彦. 草原土壤与农田土壤承压特性比较[J]. 青海科技,1997,4(Sup.):1~4.
- 5 陆怀民,赵志国. 工程车辆湿地通过能力的试验研究[J]. 车辆与动力技术,2003(3):13~14. Lu Huaimin, Zhao Zhiguo. A study on passability of engineering vehicles in wetland[J]. Vehicle & Power Technology, 2003(3):13~14. (in Chinese)
- 6 魏东,洪涛,李杰,等. 车轮重复通过时新疆沙漠沙土力学特性的试验研究[J]. 吉林工业大学学报,1997,27(2):1~5. Wei Dong, Hong Tao, Li Jie, et al. Test study on dynamic characteristic of Xinjiang desert sand in the case of multiple passage of the vehicle wheel[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1997, 27(2):1~5. (in Chinese)
- 7 张立彬,陈航洲. 新型静载土壤承压仪[J]. 农业机械学报,1993,24(2):104~105. Zhang Libin, Chen Hangzhou. A new type of cone penetrometer under static loading[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1993, 24(2): 104~105. (in Chinese)
- 8 王庆年,王志浩,李杰敏. 车轮重复通过对沙土力学特性影响及参数预测[J]. 农业工程学报,1995,11(4):33~38. Wang Qingnian, Wang Zhihao, Li Jiemin. Effect of wheel multi-pass on the sand mechanical properties and its parameters prediction[J]. Transactions of the CASE, 1995, 11(4): 33~38. (in Chinese)
- 9 谢小妍,邵耀坚. 高含水量土壤承压特性的探讨[J]. 农业工程学报,1995,11(1):52~57. Xie Xiaoyan, Shao Yaojian. Analysis on the pressure-sinkage relationship in paddy field soil with high moisture content[J]. Transactions of the CASE, 1995, 11(1): 52~57. (in Chinese)
- 10 潘君拯.载荷条件及流变参量对水田履带式行走装置下陷量的影响[J].农业机械学报,1984,15(4):7~12.
   Pan Junzheng. Effect of load conditions and rheological parameters on sinkage of tracked vehicles in paddy fields [J].
   Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1984, 15(4): 7~12. (in Chinese)
- 11 姬长英,陈铭年,潘君拯.按水田土壤流变特性预测水田车辆下陷量的方法和仪器的研究[J].农业机械学报,1986, 17(1):21~30.

Ji Changying, Chen Mingnian, Pan Junzheng. Approach and instrumentation for prediction sinkage of wetland vehicle based on rheological characteristics of paddy soils [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1986, 17(1): 21 ~ 30. (in Chinese)

- 12 姬长英,赵池航.动载式水田土壤流变仪的研制[J].农业机械学报,2004,35(2):88~91. Ji Changying, Zhao Chihang. Development of rheometer for paddy soils under dynamic loading[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 88~91. (in Chinese)
- 13 赵池航.动载式土壤流变参数测量仪的研制[D].南京:南京农业大学,2001.
   Zhao Chihang. Development of rheometer for paddy soils under dynamic loading[D]. Nanjing : Nanjing Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- 14 苏显添.试论圆锥指数的适用性[J].农业机械学报,1985,16(1):12~22.
   Su Xiantian. On the adaptive application of cone index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,

1985, 16(1): 12 ~ 22. (in Chinese)

- 15 Gotteland P h, Benoit O. Sinkage tests for mobility study, modelling and experimental validation [J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(4): 451 ~ 467.
- 16 Yoshiyuki Kawase, Hiroshi Nakashima, Akira Oida. An indoor traction measurement system for agricultural tires [J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(3): 317 ~ 327.
- 17 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- 18 沈杰,余群. 湿软土壤压力-下陷-时间关系的建立[J]. 农业机械学报,1989,20(4):15~19. Shen Jie, Yu Qun. Pressure-sinkage-time equation for wet soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1989, 20(4):15~19. (in Chinese)
- 19 Earl R, Alexandrou A. Deformation processes below a plate sinkage test on sandy loam soil: experimental approach [J]. Journal of Terramechanics, 2001, 38(3): 153 ~ 162.
- 20 Leroy O Garciano, Shrinivasa K Upadhyaya, Randolph A Jones, et al. Determination of the soil pressure distribution around a cone penetrometer[J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(3): 265 ~ 273.
- 21 苏显添,王前健,贺杰.珠江三角洲水田土壤承压特性探讨[J].华南农学院学报,1984,5(2):45~54. Su Xiantian, Wang Qianjian, He Jie. Analysis of the soil pressure-sinkage characteristics of the paddy field in the Pearl River Delta[J]. Journal of South China Agricultural College, 1984, 5(2):45~54. (in Chinese)
- 22 Henderson J J, Crum J R, Wolff T F, et al. Effects of particle size distribution and water content at compaction on saturated hydraulic conductivity and strength of high sand content root zone materials [J]. Soil Science, 2005, 170(5): 315 ~ 324.
- 23 Frost J D, Park F. A critical assessment of the moist tamping technique [J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(1): 57 ~ 70.
- 24 孙忠英,李宝筏.农业机器行走装置对土壤压实作用的研究[J].农业机械学报,1998,29(3):172~174. Sun Zhongying, Li Baofa. Approach for the compaction effect by the agricultural tracked vehicles to the soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 172~174. (in Chinese)

### (上接第19页)

- 2 吴保林,裘丽华,祁晓野,等. 单泵驱动双马达速度同步控制技术研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(6):1585~1588. Wu Baolin, Qiu Lihua, Qi Xiaoye, et al. Research on rotational speed synchronization control of one pump driving two motors [J]. Journal of System Simulation, 2006,18(6):1585~1588. (in Chinese)
- 3 陶建峰,王旭永,刘成良,等.负载变形敏感双马达同步驱动系统建模与仿真[J].系统仿真学报,2007,19(7):1574~ 1578.

Tao Jianfeng, Wang Xuyong, Liu Chengliang, et al. Modeling and simulation of load deformation sensitive dual hydraulic motor synchronizing driving system[J]. Journal of System Simulation, 2007,19(7):1574~1578. (in Chinese)

- 4 Kugi A, Schlacher K, Aitzetmüller H, et al. Modeling and simulation of a hydrostatic transmission with variable-displacement pump[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2000, 53(2):409 ~414.
- 5 万丽荣,赵胜刚,沈潇,等. 基于 Matlab/Simulink 的变量泵变量马达调速系统动态仿真[J]. 煤矿机械,2007,28(2): 26~28.

Wan Lirong, Zhao Shenggang, Shen Xiao, et al. Dynamic simulation of variable displacement pump variable displacement motor volume speed-modulating system based on Matlab/Simulink [J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(2):26 ~ 28. (in Chinese)

- 6 Jinwei X. Fuzzy PID control through optimization: a new method for PID control [D]. Milwaukee: Marquette University, 2006.
- 7 Yasin S. Systematic methods for the design of a class fuzzy logic controllers [D]. Michigan: Western Michigan University, 2003.
- 8 金立生,赵丁选,丁德胜,等.液压挖掘机节能参数自适应模糊 PID 控制器研究[J].农业工程学报,2003,19(6):87~90. Jin Lisheng, Zhao Dingxuan, Ding Desheng, et al. Energy-saving PID fuzzy controller with self-tuning parameters of hydraulic excavator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6):87~90. (in Chinese)
- 9 陈宝瑞,马彪,李和言,等. 高速履带车辆静液传动改进模糊控制[J]. 农业机械学报,2009,40(11):18~21. Chen Baorui, Ma Biao, Li Heyan, et al. Improved fuzzy control of high speed tracked vehicle hydrostatic transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):18~21. (in Chinese)