

静液传动系统自适应模糊滑模控制*

刘涛¹ 刘清河¹ 姜继海²

(1. 哈尔滨工业大学汽车工程学院, 威海 264209; 2. 哈尔滨工业大学流体传动与控制研究所, 哈尔滨 150001)

【摘要】 针对静液传动系统的速度控制问题,提出一种带有摩擦力矩补偿的自适应模糊滑模的设计方案。引入摩擦力矩动态补偿的方法,对摩擦力矩进行动态实时补偿,提高系统的响应速度和稳态误差。采用自适应模糊滑模控制解决因系统的不确定性及干扰的存在而不能准确控制的问题,使控制器的设计不依赖于被控对象的精确数学模型。基于李雅普诺夫函数推导出规则参数调整的自适应率,保证闭环控制系统的稳定性,并削弱了高频抖振。仿真结果表明该方案可以提高稳态误差,增强系统的鲁棒性,削弱控制信号中的高频抖振现象。

关键词: 静液传动 滑模变结构控制 自适应模糊控制

中图分类号: TH137; TP273+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)01-0029-05

Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Hydrostatic Transmission System

Liu Tao¹ Liu Qinghe¹ Jiang Jihai²

(1. School of Automobile Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China

2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract

Aiming at the speed control of hydrostatic transmission system, a design method of adaptive fuzzy sliding mode control with friction torque dynamic compensation is proposed. The friction torque dynamic compensation method is introduced to enhance the response of the system. The adaptive fuzzy controller is introduced to solve the problem of the uncertain parameters and external disturbances of the system, so that the design of controller can be performed without accurate model. The adaptive law derived by Lyapunov method can guarantee the stability of control system and reduce the high frequency chattering. Simulation results show that the control approach can decrease the tracking error, enhance the system's robustness and attenuate the high frequency chattering in the control signal.

Key words Hydrostatic transmission, Sliding mode variable structure control, Adaptive fuzzy control

引言

由于环境污染、能源匮乏等问题日益严重,汽车的节能、减排技术正受到越来越广泛的关注。静液传动系统^[1]可有效地降低汽车油耗,逐渐引起了各国政府、研究机构及汽车制造商的高度重视。静液传动系统是一个典型的非线性系统,且存在着许多不确定因素。这些非线性和不确定性使系统的动态特性十分复杂,要建立系统的精确数学模型比较困

难。传统的控制算法难以达到满意的控制效果^[2]。滑模变结构控制鲁棒性强,可通过控制器结构的调整 and 变化,有效地控制具有参数变化和外部扰动的被控制对象,这与具有不定性(包括参数变化、外部扰动与非线性)的静液传动系统的控制要求相一致^[3-6],但当系统模型参数事先未知时,很难得到合适的等价控制律,且常规滑模变结构控制中用于处理不确定项的切换控制将使系统产生高频抖振现象^[7-8]。这种颤动可能会把系统中存在的未建模高

收稿日期: 2009-02-09 修回日期: 2009-03-18

* 国家自然科学基金资助项目(50875054)和车辆传动国家重点实验室资助项目(51457050105HT0112)

作者简介: 刘涛,副教授,博士生,主要从事流体传动与控制研究, E-mail: liutao@hitwh.edu.cn

频成分激励起来,甚至会使系统不稳定。同时高频颤动增加了控制器的负担,容易损坏控制器的部件。针对静液传动系统的速度控制问题,提出一种带有摩擦前馈补偿的自适应模糊滑模设计方案。针对系统的低速跟踪性能较差问题,采用摩擦前馈补偿方式提高系统的速度跟踪性能;针对系统不确定性及干扰的存在,采用一个自适应模糊控制器,动态更新规则参数,使自适应模糊控制输出逐步逼近滑模控制器的有效输出,确保闭环控制系统的稳定性,削弱系统的抖振现象。

1 系统描述

静液传动系统是基于二次调节静液传动技术形成的一种新型动力传动系统^[1],其组成如图1所示。

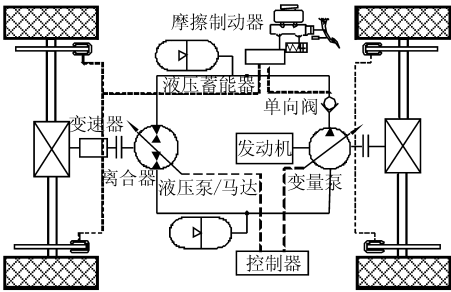


图1 静液传动系统原理图
Fig.1 Configuration of hydrostatic transmission

发动机与变量泵作为系统动力源,发动机可以带动变量泵驱动液压泵/马达工作,同时向蓄能器充液储能。蓄能器作为辅助动力源可以回收车辆的制动动能,并通过液压泵/马达驱动车辆。

假定:忽略油液的泄漏,油液为不可压缩流体。则系统的动力学模型为

$$\begin{cases} pD_{p/m} = (J_{p/m} + J_t)s^2\theta + Bs\theta + T_f \\ T_f = \left(mgf\cos\beta + mg\sin\beta + \delta m \frac{r}{i_0 i_g} s^2\theta \right) \frac{r}{i_0 i_g \eta_t} \\ D_{p/m} = \frac{K_v D_{\max}}{A_g s X_{\max}} I \end{cases} \quad (1)$$

其中 $f=f_0(1+v^2/19\,440)$
式中 p ——液压泵/马达两腔压差
 $D_{p/m}$ ——液压泵/马达的排量
 $J_{p/m}$ ——液压泵/马达的转动惯量
 B ——液压泵/马达的粘性阻尼系数
 T_f ——外负载力矩 m ——整车质量
 f ——滚动阻力系数 δ ——质量转换系数
 r ——车轮半径 i_0 ——主减速比
 i_g ——变速器各挡位速比
 η_t ——液压泵/马达到车轮的传动效率
 K_v ——电液伺服阀的流量增益
 $D_{\max}$ ——液压泵/马达的最大排量

$X_{\max}$ ——变量油缸最大位移量
 A_g ——变量油缸活塞有效作用面积
 I ——控制电流
 f_0 ——系数,在良好沥青路面取值为0.014
取状态变量 $\mathbf{X}=[x_1\ x_2]^T=[\dot{\theta}\ \ddot{\theta}]^T=[\omega\ \dot{\omega}]^T$ 得系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{B}{J}x_2 + \frac{K_m}{J}u - \frac{1}{J}(T_f + T_F) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中 } J = J_{p/m} + \left(\frac{r}{i_0 i_g} \right)^2 \delta m \quad K_m = \frac{K_v D_{\max} p r}{A_g X_{\max} i_0 i_g}$$
$$u = I \quad \delta = 1 + \frac{1}{m} \sum \frac{J_w}{r^2} + \frac{1}{m} \frac{J_{p/m} i_g^2 i_0^2 \eta_t}{r^2}$$

在起动和制动过程中,静液传动系统的压力 p 是在最高工作压力和最低工作压力范围内频繁变化的,系统呈现出强非线性;外负载干扰扭矩也随着路面的坡度、加减速及变速器挡位的调整情况而发生变化;另外系统的流量系数、泄漏系数、轮胎与路面间的摩擦因数等具有明显的不确定性,且随着工作状态、温度等而缓慢变化。因此,系统参数 J 、 K_m 、 T_f 均是不确定的。控制的目标是:当系统的参数不确定时,设计一个控制器使系统的输出速度 ω 跟踪期望的输出信号 ω_d 。定义系统的速度误差为

$$e = \omega_d - \omega \quad (3)$$

式中 ω_d ——目标速度 ω ——系统输出速度

2 控制系统的设计

一般滑模控制器的输出为

$$u_{eq} = \frac{1}{g(\mathbf{X})} \left(- \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} - \hat{f}(\mathbf{X}) - \Delta f(\mathbf{X}) - d(\mathbf{X}) - \theta_d^{(n)} \right) \quad (4)$$

对于静液传动系统而言,由于 $f(\mathbf{X})$ 、 $g(\mathbf{X})$ 和 $d(\mathbf{X})$ 具有不确定性,难以产生精确的滑模控制,尤其是低速时的摩擦力矩干扰恶化了静液传动系统性能,主要体现在系统的稳态误差及跟踪滞后等方面。因此静液传动系统的控制器必须具备两大功能:①消除摩擦干扰力矩的影响。②较强的鲁棒性和抗干扰能力。

2.1 摩擦力矩动态补偿

本文采用自适应模糊滑模控制作为静液传动系统的主控制器,并采用基于模型的摩擦力矩补偿方式实现对摩擦力矩的动态补偿,其控制结构如图2所示。摩擦模型有多种描述形式,目前摩擦模型的结构和参数没有形成统一的描述形式,其中 LuGre 模型的研究比较广泛,其模型为

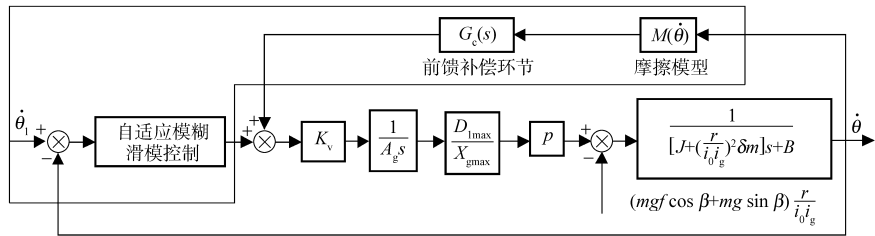


图 2 带有摩擦补偿的自适应模糊滑模控制结构图

Fig. 2 Structure of adaptive fuzzy sliding control with friction compensation

$$M(\omega) = [M_c + (M_s - M_c)e^{-(\omega/\omega_0)^2} + \alpha_2 |\omega|] \operatorname{sgn} \omega \quad (5)$$

式中 M_c ——库仑摩擦力矩
 M_s ——静摩擦力矩
 ω_0 ——边界润滑摩擦临界速度
 α_2 ——粘性摩擦因数

采用上述模型为静液传动系统的摩擦模型,其前馈补偿函数为

$$G_c(s) = \frac{A_g X_{\max} s}{p K_v D_{\max}} \quad (6)$$

基于模糊模型的前馈动态摩擦力矩补偿可消除摩擦力矩的干扰,提高系统的稳态误差。

2.2 自适应模糊滑模控制

在消除摩擦力矩的影响后,静液传动系统仍存在着强非线性和负载扰动等情况,常规的控制方法难以达到理想的速度跟踪效果,因此采用自适应模糊滑模控制方法对其进行控制。

模糊逻辑系统的输出变量 u_{fz} 由下述 N 条模糊控制规则来确定

$$\text{Rule } i: \text{ If } s \text{ is } \tilde{A}_i \text{ Then } u_{fz} \text{ is } \tilde{B}_i \quad (7)$$

式中 $\tilde{A}_i$ ——第 i 条规则中输入变量模糊子集描述

$\tilde{B}_i$ ——这条规则的后件参数向量

模糊子集隶属函数为高斯型,可表示为

$$\xi_i = \exp([-(s - c_i)/\sigma_i]^2) \quad (8)$$

当采用乘积推理、加权平均去模糊化时,可得模糊逻辑系统决定的滑模控制为

$$u_{fz}(s, a) = \mathbf{a}^T \boldsymbol{\xi} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_m]^T$, a_i 为可调参数。

由于模糊逻辑系统能以任意精度逼近紧集上的实连续函数,因此,存在一个最优模糊系统 $u_{fz}^*(s, a^*)$ 来逼近 $u_{eq}(t)$, 即

$$u(t) = u_{fz}^*(s, a^*) + \varepsilon = \mathbf{a}^{*T} \boldsymbol{\xi} + \varepsilon \quad (10)$$

式中 ε 为逼近误差,满足 $|\varepsilon| < E$ 。为了达到理想的逼近效果,采用切换控制率 u_{vs} 来弥补理想输出 $u_{eq}(t)$ 和模糊系统输出 u_{fz} 之间误差,则总控制率为

$$u(t) = u_{fz} + u_{vs} \quad (11)$$

定义
$$\tilde{u}_{fz} = \tilde{u}_{fz} - u = \tilde{u}_{fz} - u_{fz}^* - \varepsilon \quad (12)$$

$$\tilde{a} = \hat{a} - a^* \quad (13)$$

式中 $\tilde{u}_{fz}$ 为 u_{fz} 的估计值, $\hat{a}$ 为 a^* 的估计值。根据式(9)和式(13),式(12)变为

$$\tilde{u}_{fz} = \tilde{\mathbf{a}}^T \boldsymbol{\xi} - \varepsilon$$

在切换控制器中,由于切换增益 E 很难确定,在实际控制中往往通过经验确定。如果 E 值过大,则会产生大的抖振,如果 E 过小,则控制系统不稳定。

用 $\hat{E}$ 代替 E , 则

$$u_{vs} = -\hat{E} \operatorname{sgn} s \quad (14)$$

式中 $\hat{E}$ ——估计的切换项增益

定义估计误差为

$$\tilde{E} = \hat{E} - E$$

针对静液传动系统,定义滑模面为

$$s(t) = -\dot{\theta}(t) + \int_0^t (\ddot{\theta}_d(t) + c_1 e + c_2 \dot{e}) dt \quad (15)$$

式中 c_1 和 c_2 为非零正常数。根据式(13)求导并将式(3)代入,得

$$\dot{s}(t) = \ddot{e} + c_1 e + c_2 \dot{e} \quad (16)$$

则
$$u_{eq} = \frac{1}{g(\mathbf{X})}(-f(\mathbf{X}) - d(\mathbf{X}) + \ddot{\theta}_r - c_1 e - c_2 \dot{e}) =$$

$$\frac{1}{g(\mathbf{X})}(-f(\mathbf{X}) - d(\mathbf{X}) + \ddot{\theta} - \dot{s}) =$$

$$\frac{1}{g(\mathbf{X})}(g(\mathbf{X})u - \dot{s})$$

由式(10)得

$$\dot{s}(t) = g(\mathbf{X})(u - u^*) = g(\mathbf{X})(u_{fz} + u_{vs} - u^*) \quad (17)$$

对于式(2)的系统模型,采用控制量 $u(t) = u_{fz} + u_{vs}$, 同时选取如下控制律为

$$\dot{\tilde{a}} = \dot{\hat{a}} = -\eta_1 s \boldsymbol{\xi} \quad (18)$$

$$u_{vs} = -E \operatorname{sgn} s \quad (19)$$

$$\dot{\tilde{E}} = \eta_2 |s| \quad (20)$$

式中 η_1 和 η_2 为正实数,则该控制系统及滑动模态是李雅普诺夫意义下渐近稳定的,当 $t \rightarrow \infty$ 时,系统

的跟踪误差沿滑模收敛至零。

综上所述,本文提出自适应模糊滑模控制的主要思路是:用自适应模糊控制代替传统滑模控制,通过参数在线调节有效减少由于系统不确定性造成的误差,平滑不连续控制,达到削弱抖振的目的。

3 仿真

考虑某静液传动速度跟踪系统,如式(1)所描述,主要参数标称值为: $D_{\max}=6.3694\times10^{-6}\text{ m}^3/\text{rad}$, $K_v=3.3333\times10^{-6}\text{ m}^3/\text{As}$, $X_{\max}=0.014\text{ m}$, $J_{p/m}=0.04\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $B=0.15\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $A_g=1.849\times10^{-3}\text{ m}^2$ 。

针对滑模面采用以下5种隶属函数来模糊化,即

$$\mu_{\text{NM}}=\exp\left(\left[-\left(s+\frac{\pi}{6}\right)\right]/\left(\frac{\pi}{24}\right)\right)^2$$
$$\mu_{\text{NS}}=\exp\left(\left[-\left(s+\frac{\pi}{12}\right)\right]/\left(\frac{\pi}{24}\right)\right)^2$$
$$\mu_{\text{ZO}}=\exp\left(-\left[s/\left(\frac{\pi}{24}\right)\right]^2\right)$$
$$\mu_{\text{PS}}=\exp\left(\left[-\left(s-\frac{\pi}{12}\right)\right]/\left(\frac{\pi}{24}\right)\right)^2$$
$$\mu_{\text{PM}}=\exp\left(\left[-\left(s-\frac{\pi}{6}\right)\right]/\left(\frac{\pi}{24}\right)\right)^2$$

采用5条规则逼近 $u(t)$ 。选择 $\hat{a}$ 和 $\hat{E}$ 初始值为0.2和0.3,被控对象的初始状态为 $[0,0]$ 。自适应控制参数取 $\eta_1=300$, $\eta_2=150$ 。外干扰力矩为 $14-7|\sin(4\pi t)|$,系统增益变化 $20+18|\sin(4\pi t)|$, $J=1.25-0.8\sin(4\pi t)$, $B=0.18+0.1\sin(4\pi t)$ 。

为方便比较,在同样参数变化和外负载力条件下,分别采用自适应模糊滑模控制和常规滑模变结构控制对该系统进行仿真,仿真结果如图3~5所示。常规滑模变结构控制和自适应模糊滑模控制的系统速度跟踪特性曲线如图3所示。图3中1表示期望的控制输出,2表示自适应模糊滑模控制输出,3表示常规滑模控制输出。自适应模糊滑模控制响应速度快,控制精度高,这主要在于参数的在线调节可有效处理系统中的不确定性。自适应模糊滑模控制信号曲线如图4所示。同样可以看出自适应模糊滑模控制有效削弱了高频抖振现象。

4 结束语

针对静液传动系统的速度控制问题,提出了一

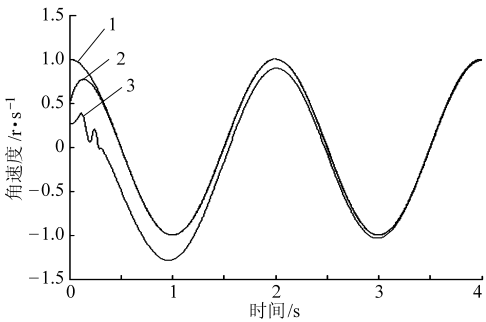


图3 系统速度跟踪曲线

Fig.3 Tracking curves of system speed

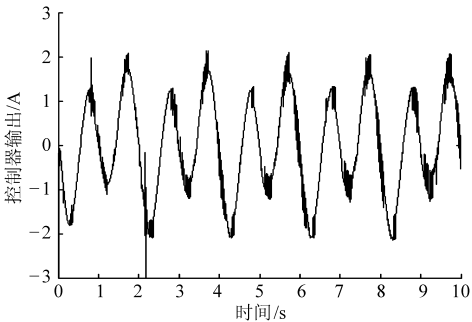


图4 自适应模糊滑模控制信号曲线

Fig.4 Signal of adaptive fuzzy sliding mode control

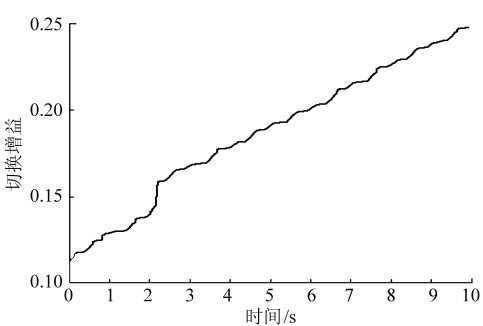


图5 切换增益估计值的变化曲线

Fig.5 Change curve of estimation value of gain switching

种带有摩擦前馈补偿的自适应模糊滑模的设计方案,使用具有参数在线调节的自适应模糊控制器,逼近传统滑模控制的控制输出,而不依赖于被控对象的精确数学模型。带有摩擦前馈补偿的自适应模糊滑模控制能确保闭环控制系统的稳定性,提高系统的响应速度,并达到削弱抖振的目的。仿真实例表明,该方案对于参数扰动及负载干扰,具有较好的动态响应性能、较小的稳态控制精度和较强的鲁棒性,并能有效削弱控制信号中的高频抖振。该方案简单易行,适于工程应用。

参 考 文 献

1 姜继海,赵春涛,孟兆生. 二次调节静液传动在城市公交车辆驱动中的节能技术研究[J]. 中国机械工程,2001,12(3): 475~478.
Jiang Jihai, Zhao Chuntao, Meng Zhaosheng. Study on energy recovery method in automobile system of hydrostatic transmission with secondary regulation[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(3): 475~478. (in Chinese)

- 2 Hewko L O, Weber T R. Hydraulic energy storage based hybrid propulsion system for a terrestrial vehicle[C] // Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1990: 99 ~ 105.
- 3 何玉彬,刘艳秋,徐立勤,等. 电液伺服系统神经网络在线自学习自适应控制[J]. 中国电机工程学报,1998,18(6): 434 ~ 437.
He Yubin, Liu Yanqiu, Xu Liqin, et al. Neural network based on-line self-learning adaptive control for electro-hydraulic servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 434 ~ 437. (in Chinese)
- 4 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- 5 吴立刚,王常虹,高会军. 不确定线性 2-D 离散系统的鲁棒滑模控制[J]. 控制与决策,2007,22(2): 148 ~ 154.
Wu Ligang, Wang Changhong, Gao Huijun. Robust sliding mode control for a class of uncertain linear 2-D discrete-time systems[J]. Control and Decision, 2007, 22(2): 148 ~ 154. (in Chinese)
- 6 米阳,潘伟,井元伟. 一类不确定时滞系统的模糊滑模控制[J]. 控制与决策,2006,21(11): 1 280 ~ 1 283.
Mi Yang, Pan Wei, Jing Yuanwei. Fuzzy sliding mode control for a class of uncertain time-delay system[J]. Control and Decision, 2006, 21(11): 1 280 ~ 1 283. (in Chinese)
- 7 张颖伟,王小刚,王福利. 基于模糊自适应滑模的非线性系统的故障调节[J]. 控制与决策,2005,20(4): 408 ~ 411.
Zhang Yingwei, Wang Xiaogang, Wang Fuli. Fault accommodation for nonlinear system using fuzzy adaptive sliding control [J]. Control and Decision, 2005, 20(4): 408 ~ 411. (in Chinese)
- 8 蔡素芬,李文林. 存在外界干扰的连续系统离散自适应滑模控制[J]. 控制与决策,2005,20(11): 1 317 ~ 1 320.
Cai Sufen, Li Wenlin. Discrete sliding mode control for continuous system with disturbance[J]. Control and Decision, 2005, 20(11): 1 317 ~ 1 320. (in Chinese)
- 9 白寒,王庆九,徐振,等. 阀控非对称缸系统多级滑模鲁棒自适应控制[J]. 农业机械学报,2009,40(10):193 ~ 198.
Bai Han, Wang Qingjiu, Xu Zhen, et al. Multiple sliding mode robust adaptive control for valve controlled asymmetric cylinder system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 193 ~ 198. (in Chinese)
- 10 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)

(上接第 62 页)

- 8 朱庆保,杨志军. 基于变异和动态信息素更新的蚁群优化算法[J]. 软件学报,2004,15(2):185 ~ 192.
Zhu Qingbao, Yang Zhijun. An ant colony optimization algorithm based on mutation and dynamic pheromone updating[J]. Journal of Software, 2004, 15(2): 185 ~ 192. (in Chinese)
- 9 Merkle D, Middendorf M, Schmeck H. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2002, 6(4): 333 ~ 339.
- 10 Parpinelli R S, Lopes H S, Freitas A A. Data mining with an ant colony optimization algorithm[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2002, 6(4): 321 ~ 328.
- 11 邵光成,张展羽,刘娜,等. 投影寻踪分类模型在膜下滴灌模式评价中的应用[J]. 水利学报,2007,38(8):944 ~ 947.
Shao Guangcheng, Zhang Zhanyu, Liu Na, et al. Application of projection pursuit model to evaluate under mulch drip irrigation scheme[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(8): 944 ~ 947. (in Chinese)
- 12 陈广洲,汪家权,解华明. 粒子群算法在投影寻踪模型优化求解中的应用[J]. 计算机仿真,2008,25(8):159 ~ 165.
Chen Guangzhou, Wang Jiaquan, Xie Huaming. Application of particle swarm optimization for solving optimization problem of projection pursuit modeling[J]. Computer Simulation, 2008, 25(8): 159 ~ 165. (in Chinese)
- 13 高尚,杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.