

# 基于改进自适应广义预测控制的天然气分输站压力控制

李立刚<sup>1</sup>, 张朝晖<sup>1</sup>, 昂扬<sup>2</sup>, 王多才<sup>3</sup>, 戴永寿<sup>2</sup>

1. 北京科技大学自动化学院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(华东), 山东 东营 257061;

3. 中石油西气东输管道分公司压缩机处, 上海 200000

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2010D-5006-0620).

通信作者: 李立刚, upellg@163.com 收稿/录用/修回: 2013-07-23/2013-10-16/2014-04-10

## 摘要

针对天然气长输管网分输站用气量大范围波动以及调节阀死区较大引起的压力控制不平稳问题, 常规的机理建模难以建立准确的控制模型, 控制参数难以整定. 本文采用改进自适应广义预测控制进行分输压力控制, 先对系统模型进行在线辨识, 然后由辨识模型的阶跃响应系数计算  $G$  矩阵和预测向量, 避免  $G$  矩阵不收敛且无需进行 Diophantine 方程计算; 同时针对阀门死区的问题提出了改善方法, 并在实际应用中取得较好效果, 说明了该方法的有效性.

## 关键词

天然气分输站

压力控制

改进广义预测控制

阀门死区

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Pressure Control in Natural Gas Distribution Station Based on an Improved Adaptive Generalized Predictive Control Method

LI Ligang<sup>1</sup>, ZHANG Chaohui<sup>1</sup>, ANG Yang<sup>2</sup>, WANG Duocai<sup>3</sup>, DAI Yongshou<sup>2</sup>

1. School of Automation and Electrical Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100083 China; 2. University of Petroleum, Dongying 257061, China; 3. Compress Department, West-east Gas Pipeline Company of CNPC, Shanghai 200000, China

## Abstract

Aiming at the problem for long-distance gas pipeline distribution stations, pressure control is not smooth, which caused by large-scale flow fluctuations and large dead-zones in the valve. The exact mechanism control models are hard to establish by the conventional method, and tuning the control parameter is difficult. An improved adaptive generalized predictive control method is adopted. The system model is identified first. The  $G$  matrix and the predicted vector of step response coefficients of the system model are calculated without solving the Diophantine equation. For the dead-zone problem, an improved approach is proposed which yielded better results in practical application, thereby proving the viability of these methods.

## Keywords

natural gas distribution station;

pressure control;

improved generalized predictive control (GPC) method;

valve dead-zone

## 1 引言

在天然气分输站的输气压力控制中, 传统 PID 控制, 虽然原理简单, 但是参数整定困难, 对参数变化大的控制系统适应性较低. 同时由于用户的用气量波动性大和阀门死区的存在, PID 控制往往难以保证压力的平稳, 导致阀门频繁动作, 不仅供气压力无法稳定, 而且降低阀门使用寿命. 分输管段的管容小时, 压力控制更是困难.

预测控制属于自适应控制方法, 具有对模型要求低、鲁棒性强、在线计算方便等优点<sup>[1-4]</sup>. 广义预测控制(GPC)是基于预测模型、滚动优化和反馈校正的控制算法, 因此被广泛应用于工业生产中, 如电力系统控制<sup>[5-8]</sup>、化工<sup>[9]</sup>、机械<sup>[10-13]</sup>、制药行业<sup>[14]</sup>等. 它具有预见性, 明

显优于先有信息反馈、再产生控制动作的经典反馈控制系统, 能得到比 PID 控制更良好的效果.

本文采用改进的隐式广义预测控制方法, 以改善压力控制的效果, 同时提高其适应性. 针对阀门死区导致的压力在设定值附近波动和相关的阀门频繁动作问题, 通过动态设定阀门最小控制增量初始值的方法减小死区对压力控制的影响.

## 2 广义预测控制

### 2.1 广义预测控制算法原理

GPC 采用 CARIMA 模型作为预报模型<sup>[15-17]</sup>:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta \quad (1)$$

式中,  $\Delta = 1 - z^{-1}$ ,  $y(k)$ 、 $u(k)$ 、 $\xi(k)$  分别表示输出、输入

和均值为零的白噪声序列。

目标函数为二次性能指标函数:

$$J = \sum_{j=1}^P [y(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^M \lambda [\Delta u(k+j-1)]^2 \quad (2)$$

式中,  $P$ 、 $M$  分别为预测长度和控制长度,  $\lambda$  为控制加权系数。

引入 Diophantine 方程, 求得最优控制律为

$$\Delta U = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{W} - \mathbf{f}) \quad (3)$$

$$\Delta U = [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+M-1)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{W} = [w(k+1), w(k+2), \dots, w(k+P)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{f} = [f(k+1), f(k+2), \dots, f(k+P)]^T \quad (6)$$

$$w(k+j) = \alpha^j y(k) + (1 - \alpha^j) y_r, j = 1, 2, \dots, P \quad (7)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_P & g_{P-1} & \dots & g_{P-M+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $\Delta U$ 、 $\mathbf{W}$ 、 $\mathbf{f}$  分别为控制增量、跟踪参考轨迹、预测向量;  $\alpha$  为柔化系数,  $0 < \alpha < 1$ ;  $y(k)$  为系统实测输出值,  $y_r$  为系统的给定值; 矩阵  $\mathbf{G}$  中的元素  $g_1, g_2, \dots, g_P$  为系统单位阶跃响应的前  $P$  项。

## 2.2 改进自适应广义预测控制

当模型参数未知或慢时变时, 需要在线辨识更新参数, 进行自适应控制. 如果直接辨识原系统模型参数, 则需要在线递推计算 Diophantine 方程, 解出控制器参数, 才能求解控制律, 这样计算时间较长. 隐式广义预测自校正控制直接辨识  $\mathbf{G}$  矩阵和开环预测向量  $\mathbf{f}$ , 而不必递推求解 Diophantine 方程, 可节省在线计算时间<sup>[18-20]</sup>.

在实际使用中, 直接辨识  $\mathbf{G}$  矩阵会出现无法收敛的情况,  $\mathbf{G}$  矩阵的元素可能会发生较大变化而致使  $\mathbf{f}$  预测出现较大偏差, 控制效果不理想或者无法达到控制的目的. 故本文采取先辨识系统模型的参数, 然后由辨识的模型来计算  $\mathbf{G}$  矩阵的方法, 最后根据  $\mathbf{G}$  矩阵和系统过去时刻的控制量以及输出情况得到开环预测向量  $\mathbf{f}$ . 这样不需要在线计算 Diophantine 方程, 同时也可以避免  $\mathbf{G}$  矩阵的不精确、不收敛等问题。

### 1) 矩阵 $\mathbf{G}$ 的求取

对式(1)作如下处理:

$$\bar{A}(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})\Delta u(k-1) + \xi(k) \quad (9)$$

其中,  $\bar{A}(z^{-1}) = A(z^{-1})(1 - z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}$ ,  $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}$ ,  $C(z^{-1}) = 1$ .

对  $\bar{A}(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$  中未知系数用最小二乘法进行辨识, 令:

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}]^T \quad (10)$$

得到  $\boldsymbol{\theta}(k)$  的估计值  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$  后对辨识模型输入单位阶跃输入, 计算辨识模型的输出, 可得到系统的阶跃响应系数  $\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_P$ . 根据隐式广义预测控制与动态矩阵控制的等价性, 得系数矩阵

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \hat{g}_1 & 0 & \dots & 0 \\ \hat{g}_2 & \hat{g}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{g}_P & \hat{g}_{P-1} & \dots & \hat{g}_{P-M+1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 2) 预测向量 $\mathbf{f}$ 的求取

$\mathbf{f}$  为开环预测向量, 表示不考虑当前及未来时刻的控制增量时系统未来时刻的输出值预测, 由此:

$$\begin{bmatrix} f(k+1) \\ f(k+2) \\ \vdots \\ f(k+P) \end{bmatrix} = \mathbf{G}' \begin{bmatrix} \Delta u(k-1) \\ \Delta u(k-2) \\ \vdots \\ \Delta u(k-P) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_0(k+1|k) \\ y_0(k+2|k) \\ \vdots \\ y_0(k+P|k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{G}' = \begin{bmatrix} \hat{g}_2 & \hat{g}_3 & \dots & \hat{g}_P & \hat{g}_P \\ \hat{g}_3 & \dots & \ddots & & \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \hat{g}_P & & & & \\ \hat{g}_P & \dots & & & \hat{g}_P \end{bmatrix} \quad (13)$$

系统  $k$  时刻的输出  $y(k)$  可以写成如下形式:

$$y(k) = \sum_{i=1}^P \hat{g}_i \Delta u(k-i) + \sum_{i=1}^{k-P-1} g_{k-i} \Delta u(i) + \sum_{i=1}^k \xi(i) \quad (14)$$

式中, 当  $k > P+1$  时, 后两部分分别表示在  $k-P$  时刻之前的控制增量、 $1 \sim k$  时刻的噪声所造成的系统输出. 上式中后两部分之和记为  $y_0(k)$ , 则:

$$\begin{aligned} y_0(k) &= \sum_{i=1}^{k-P-1} g_{k-i} \Delta u(i) + \sum_{i=1}^k \xi(i) \\ &= y(k) - \sum_{i=1}^P \hat{g}_i \Delta u(k-i) \end{aligned} \quad (15)$$

同理, 可得:

$$y_0(k+j|k) = \sum_{i=1}^{k-P-1} g_{k+j-i} \Delta u(i) + \sum_{i=1}^k \xi(i) \quad (16)$$

比较式(15)和式(16)中对应项, 其中  $g_{k-i}$ 、 $g_{k+j-i}$  为没有进行估计的动态响应系数, 考虑系统为惯性系统, 若  $P$  取得较大, 动态响应  $P$  步后趋于平稳, 则有:

$$g_l = \hat{g}_P (l > P) \quad (17)$$

$$y_0(k+j|k) = y_0(k) = y(k) - \sum_{i=1}^P \hat{g}_i \Delta u(k-i) \quad (18)$$

由式(12)和式(18)可求取  $\mathbf{f}$ , 将  $\mathbf{G}$  和  $\mathbf{f}$  代入式(3)得到最优控制增量序列  $\Delta U$ , 取其第一个控制增量  $\Delta u(k)$  作用于系统. 在  $k+1$  时刻, 重复上述过程。

## 3 天然气分输站的压力控制系统数学模型

### 3.1 压力控制系统的组成

天然气分输站的压力控制系统主要由控制器, 调压阀, 输气管道, 压力、阀门开度传感器等部分组成. 控制器输出直接控制调压阀的阀门开度, 从而控制管道入口流量, 达到控制阀后压力的效果, 以保证阀后压力的平稳性. 输气管道的输出流量与用户的用气量相关, 用气量的波动性和不可预测性使压力的控制变得困难. 压力传感器作为反馈环节, 给出当前的阀后压力值, 是控制器决策的

依据.

### 3.2 压力控制系统数学模型

天然气管道压力和流量的模型取为理想的模型.

$$P = \rho(t) \cdot Z \cdot R \cdot T \quad (19)$$

$$\rho(t) = \frac{\int_0^t (Q_{in}(t) - Q_{out}(t)) \cdot \rho_0 \cdot dt + M_0}{V} \quad (20)$$

式中:  $P$  表示压力,  $\rho$  表示工况密度,  $Z$  表示压缩系数,  $R$  表示通用气体常数,  $T$  表示温度,  $t$  表示时间,  $Q_{in}$ 、 $Q_{out}$  表示入口出口标况流量,  $\rho_0$  表示标况密度,  $M_0$  表示管道内初始气体质量,  $V$  表示管道容积.

将连续方程离散化:

$$P(k) - P(k-1) = \frac{\rho_0}{V} \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot \Delta Q(k) \cdot \Delta t \quad (21)$$

式(21)表示理想状况下, 系统为积分环节, 实际由于天然气的可压缩性和管容等因素, 系统表现为惯性环节.

## 4 阀门死区问题及改善方法

实际天然气分输站的调压阀门存在死区问题, 即控制增量小于阀门死区时, 阀门不变化, 而大于或等于阀门死区时才会动作; 且死区的大小是动态变化的, 与当前阀门的开度有关系. 死区的存在可能会导致压力无法稳定, 使阀门频繁动作, 不但使压力在设定值附近波动, 而且会降低阀门寿命; 此外, 若采用 PID 控制, 由于积分作用, 一旦阀门动作时, 可能会产生较大的超调量, 这是我们不希望的.

为了改善阀门死区问题对压力控制的影响, 采用以下方法:

#### 1) 死区动态更新:

$$DZ(k) = \begin{cases} |\Delta u(k-1)|, & \Delta u(k-1) = \Delta u(k-1)_{real} \\ & DZ(k-1) > |\Delta u(k-1)| \\ |\Delta u(k-1)|, & \Delta u(k-1) \neq \Delta u(k-1)_{real} \\ & DZ(k-1) < |\Delta u(k-1)| \\ DZ(k-1), & \text{其它} \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $DZ(k)$  为当前时刻关于阀门死区的记录值,  $\Delta u(k-1)$  表示上一时刻 GPC 计算的控制增量,  $\Delta u(k-1)_{real}$  为上一时刻实际的阀门开度变化量.

#### 2) 设定最小的阀门控制增量初始值 $\Delta u_0$ :

$$\Delta u_0(k) = \lambda \cdot DZ(k) \quad (23)$$

式中,  $0 < \lambda < 1$ ,  $\lambda$  大小适中, 可取 0.7. 太小, 则没有意义; 反之, 会使阀门对于  $\Delta u(k)$  过于灵敏, 系统不容易稳定.

3) 对由隐式 GPC 计算出的下一时刻控制增量  $\Delta u(k)$  进行如下处理:

$$\Delta u(k) = \begin{cases} \pm \Delta u_0(k), & \Delta u(k-1) = \Delta u(k-1)_{real} \\ & |\Delta u(k)| \neq 0 \\ & |\Delta u(k)| < \Delta u_0(k) \\ \pm \Delta u_0(k) \pm \Delta u(k), & \Delta u(k-1) \neq \Delta u(k-1)_{real} \\ \Delta u(k), & \text{其它} \end{cases} \quad (24)$$

从上式中可以看出, 如果控制增量过小, 则让其为

$\Delta u_0(k)$ , 符号保持不变, 这一步起着加速的作用, 下一时刻适当的控制增量就会使阀门动作. 这样既可以保证阀门以较小的动作进行压力的调整, 又不会使阀门频繁变化.

## 5 仿真及应用实例

采用本文改进的自适应广义预测控制方法进行仿真, 针对如下模型:

$$y(k) = 1.7y(k-1) - 0.7y(k-2) + \Delta u(k-3) + 2\Delta u(k-4)$$

预测步长  $P=16$ , 控制步长  $M=2$ , 控制加权系数  $\lambda=0.8$ , 柔化系数  $\alpha=0.8$ , 期望值为周期为 200 s 的矩形波, 仿真结果如图 1 所示. 从图中可以看出系统输出值能跟踪期望值, 效果良好.

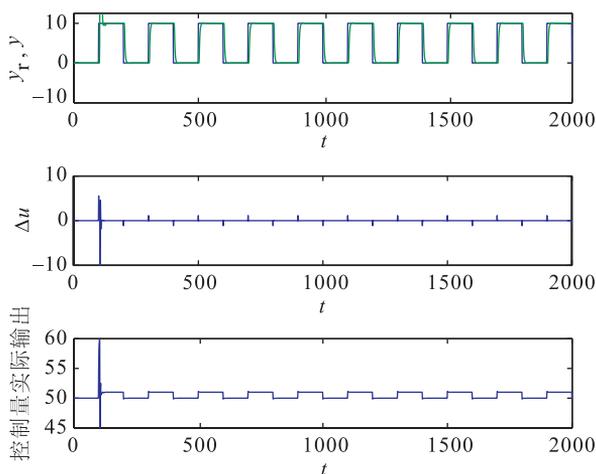


图 1 仿真结果图

Fig.1 The simulation results

西气东输某分输站的调压管线管径为 114 mm, 分输管线管径为 168 mm, 分输调节阀距离最近用户约 40 m, 由于用户使用压缩机为汽车、气罐车加气, 压缩机启停时用量波动很大, 阀死区大于 2%, 同时还有停滞现象, 非线性特性严重, 使用原 PLC (programmable logic controller) 中的 PID 控制策略无法实现压力稳定, 调节阀大幅度动作, 开度变化幅度超过 10%, 同时经常引起安全调节阀动作.

采用改进自适应广义预测控制系统控制分输压力后, 在流量大幅波动时, 调节阀开度变化平稳, 一般开度变化幅度约 2%, 同时满足出口压力精度要求. 改变出口压力设定值观察系统的阶跃响应, 当出口压力设定值阶跃变化 0.2 MPa 时, 3 min 内压力调节稳定, 调节阀动作最多约 8 次, 调节过程无超调或超调小于 2%, 正常情况下约 10 min 动作 1 次. 目前该系统已经连续运行超过 6 个月, 实现了在不同工况下的出站压力自适应控制, 调节阀动作频率和幅度大幅降低, 在满足出口压力稳定的同时, 延长了设备寿命.

## 6 结论

本文使用改进的隐式广义预测控制, 对系统模型进行辨识, 然后求取动态响应系数, 进而计算  $G$  矩阵和预测向

量 $f$ , 避免 Diophantine 方程求解, 虽然较隐式广义预测控制计算量大, 但解决了直接辨识  $G$  矩阵时存在的不收敛问题. 该方法在实际应用中表现良好, 证明了其有效性及可行性.

## 参考文献

- [1] 钱积新, 赵均. 预测控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
Qian J X, Zhao J. Predictive control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [2] 胡耀华, 贾欢乐. 广义预测控制综述[J]. 信息与控制, 2000, 29(3): 248-256.  
Hu Y H, Jia X L. Summarization of generalized predictive control[J]. Information and Control, 2000, 29(3): 248-256.
- [3] 黄湘云, 朱学峰. 预测控制的研究现状与展望[J]. 石油化工自动化, 2005, 16(2): 27-31.  
Huang X Y, Zhu X F. The situation and prospect of predictive control[J]. Automation in Petro-chemical Industry, 2005, 16(2): 27-31.
- [4] Khadir M T, Ringwood J V. Linear and nonlinear model predictive control design for a milk pasteurization plant[J]. Control and Intelligent System, 2003, 31(1): 37-43.
- [5] Rossiter J A, Kourarakis B, Dunnitt R M. Application of generalized predictive control to a boiler turbine unit for electricity generation[J]. IEEE Proceedings - D, 1991, 138(1): 59-67.
- [6] Zhang J H, Zhou Y L, Zhang X Z, et al. Generalized predictive control applied in waste heat recovery power plants[J]. Applied Energy, 2013, 102(11): 320-326.
- [7] 赵丹丹, 梁平. 非线性预测控制在电厂热工过程中的应用研究[J]. 广东电力, 2009, 22(1): 2-7.  
Zhao D D, Liang P. Application research analysis on nonlinear predictive control in power plant thermal process[J]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(1): 2-7.
- [8] Eliasi H, Menhaj M B, Davilu H. Robust nonlinear model predictive control for a PWR nuclear power plant[J]. Process in Nuclear Energy, 2012, 54(9): 177-185.
- [9] Clarke D W. Application of generalized predictive control to industrial processes[J]. IEEE Control System Magazine, 1988, 21(8): 49-55.
- [10] 陈增强, 车海平, 袁著祉. 具有比例积分结构的广义预测自校正控制器[J]. 控制与决策, 1994, 9(2): 105-110.  
Chen Z Q, Che H P, Yuan Z Z. A generalized predictive self-tuning controller with proportion and integration structure[J]. Control and Decision, 1994, 9(2): 105-110.
- [11] Kassapakis E G, Warwick K. Predictive algorithm for the roll control autopilot of a jet fighter aircraft[J]. Adaptive Control and Signal Processing, 1994, 8(4): 359-368.
- [12] 胡耀华, 贾欢乐. 广义预测控制应用于船舶航向和航迹保持[J]. 中国造船, 1998, 140(1): 36-41.  
Hu Y H, Jia X L. Ship track-keeping based on generalized predictive control method[J]. Ship Building of China, 1998, 140(1): 36-41.
- [13] 朱学莉, 齐维贵, 付润, 等. GPC 隐式算法及其在供热控制中的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 2214-2217.  
Zhu X L, Qi W G, Fu R, et al. Study on simulation of GPC implicit algorithm for heat supply control[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(9): 2214-2217.
- [14] 张俊, 罗大庸. 广义预测控制和 PID 控制在混凝投药中的应用[J]. 信息与控制, 2012, 41(1): 89-94.  
Zhang J, Luo D Y. The application of GPC control and PID control to coagulant dosing[J]. Information and Control, 2012, 41(1): 89-94.
- [15] 陈希平, 朱秋琴, 工彩霞. 广义预测控制算法的研究[J]. 控制工程, 2005, 31(5): 35-37.  
Chen X P, Zhu Q Q, Gong C X. Research of generalized predictive control algorithm[J]. Control Engineering, 2005, 31(5): 35-37.
- [16] 蒋存波, 张淑祯, 陈俊达, 等. 一种基于时域响应的预测控制算法的研究[J]. 自动化仪表, 2012, 33(1): 59-62.  
Jiang C B, Zhang S Z, Chen J D, et al. Research on the predictive control algorithm based on time domain response[J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33(1): 59-62.
- [17] 张敏杰. 改进广义预测控制算法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.  
Zhang M J. Study of improved generalized predictive control algorithm[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [18] 林伟, 孙先波. 广义预测自校正控制隐式算法及其仿真研究[J]. 现代电子技术, 2008, 36(7): 141-143.  
Lin W, Sun X B. Implicit arithmetic for generalized predictive self-tuning control and simulation[J]. Modern Electronics Technique, 2008, 36(7): 141-143.
- [19] 符晓玲. 一种隐式广义预测自校正控制算法及仿真研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2011, 27(2): 7-9.  
Fu X L. An algorithm of implicit generalized predictive self-tuning control and simulation[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2011, 27(2): 7-9.
- [20] 李国勇. 输入受限的隐式广义预测控制算法的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1533-1535.  
Li G Y. Simulation research of constrained implicit generalized predictive control algorithm with constrained input[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(7): 1533-1535.

## 作者简介

李立刚(1976-), 男, 博士生, 副教授. 研究领域为系统工程, 预测控制.  
张朝晖(1965-), 男, 博士, 教授. 研究领域为现代信号处理, 智能控制.  
昂 扬(1988-), 男, 硕士. 研究领域为控制理论与应用, 先进控制.