

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.02.014

基于变约束预测理论的微电网 UPQC 控制方法

罗晓东, 李圣清, 李永安, 曾黎琳, 何政平

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对微电网中存在的电能质量问题, 提出了基于变约束预测理论的 UPQC 控制方法。该方法通过在线优化方法构建当前反馈矩阵的凸组合系数, 获得当前控制量, 由不同稳定椭圆域确定其对应的控制约束, 有效地增加了在线求解的自由度, 减少了运算时间。仿真结果表明, 该方法能够补偿谐波畸变和抑制电压波动, 有效地改善电能质量。

关键词: 变约束预测理论; 微电网; UPQC; 谐波畸变; 电压波动

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)02-0064-05

The Micorgrid UPQC Control Method Based on Variable Constraint Predictive Theory

Luo Xiaodong, Li Shengqing, Li Yong'an, Zeng Lilin, He Zhengping

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: According to the power quality problems in micorgrid, proposes a UPQC control method based on variable constraint predictive theory. It constructs the convex combination coefficients for the state feedback matrix through on-line optimization, obtains the current control and determines the corresponding control constraints according to the elliptical stability domain, which increases the freedom of online solving and reduces computing time. Simulation results show that the method compensates the harmonic distortions, restrains voltage fluctuation and improves power quality effectively.

Keywords: variable constraint predictive theory; micorgrid; UPQC; harmonic distortion; voltage fluctuation

0 引言

微电网^[1-3]是建立在电力电子技术基础上的新型电力系统, 大量电力电子器件的投入使用, 会引起微电网电流、电压波形畸变和谐波污染。在改善电能质量的众多装置中, 统一电能质量调节器 (unified power quality conditioner, UPQC) 具有综合的电能质量调节作用^[4-7], 它既能补偿电源端和负载的谐波电流, 又能抑制电源电压闪变和波动, 因此在微电网中应用越来越广。

目前, 对 UPQC 的控制策略已有较多研究^[6-9]。文献^[7]提出了基于两相同步旋转 dq 坐标系的 UPQC 完全解耦的新型控制策略, 控制过程中, 由于 dq 两相完全解耦, 使控制更简单且容易实现, 控制品质得到提高。文献^[8]提出了基于 H_∞ 的控制方法, 该方法具有算法简单、控制精度高的特点。文献^[9]采用最优控制理论, 实现电压补偿和电流补偿同步协调工作, 且易于数字化。但这些控制方法对于输入、输出和状态的约束条件控制效果较差, 限制了 UPQC 的

收稿日期: 2011-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51077046), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目 (CX1113)

作者简介: 罗晓东 (1984-), 男, 河南平顶山人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电能质量调节与控制技术,

E-mail: luosan0803@163.com

通信作者: 李圣清 (1961-), 男, 湖南永兴人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为电能质量调节与控制, 现代电力系统控制理论及应用, E-mail: Lsq1961@sohu.com

综合调节性能。本文提出一种基于变约束预测理论的UPQC控制方法,综合考虑UPQC系统的动态性能和约束条件,具有效率高、稳定性好的特点。

1 统一电能质量调节器建模

UPQC是一个多输入多输出的系统,由串联和并联有源滤波器组成,可作为一个整体来研究。图1是微电网中UPQC的单相等效结构图,串联和并联有源滤波器,相当于是由R、L和C组成的压控二阶低通滤波器。 U_s 和 I_L 分别是电源电压和负载电流,由于存在畸变可以表示为基波和谐波之和; I_s 表示电源电流, U_L 表示负载电压; U_{ss} 和 U_{pp} 分别是串联和并联有源滤波器的控制电压。

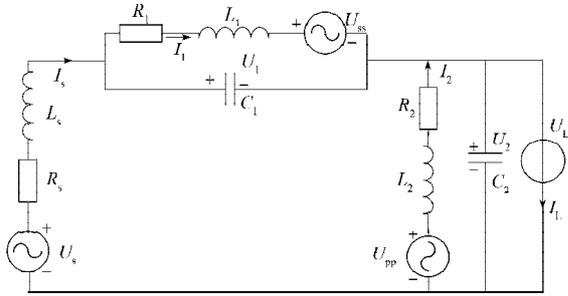


图1 UPQC单相等效结构图

Fig. 1 Equivalent single phase of the UPQC

由基尔霍夫定理可得UPQC的空间状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{w} + \mathbf{B}_2\mathbf{u}, \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为状态变量;

\mathbf{w} 为系统外部输入,即为外部干扰;

\mathbf{u} 为控制输入量;

\mathbf{y} 为系统输出。

式(1)中各量可表示为:

$$\mathbf{w} = [U_s \quad I_L]^T, \quad \mathbf{u} = [U_{ss} \quad U_{pp}]^T,$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} I_s \\ U_2 \\ I_1 \\ I_2 \\ U_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & -1/C_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1/L_1 & 0 \\ 0 & 1/L_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & -1/L_s & 0 & 0 & 0 \\ 1/C_2 & 0 & 0 & 1/C_2 & 0 \\ 0 & 0 & -R_1/L_1 & 0 & -1/L_1 \\ 0 & -1/L_1 & 0 & -R_2/L_2 & 0 \\ 1/C_1 & 0 & 1/C_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

2 变约束预测控制

2.1 UPQC变约束预测控制设计

首先将式(1)转化成离散模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_1\mathbf{w}(k) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(k), \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k). \end{cases} \quad (2)$$

变约束预测控制方法是随状态在不同位置求解出输入控制规律,在不影响求解的情况下,依照状态对约束进行调整,减少求解范围和计算时间,以达到最佳优化控制效果。由于 \mathbf{w} 可测,故可采用前馈方式,将UPQC的状态分为稳态和暂态2部分,通过计算可以将式(2)转化成暂态模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}_2\mathbf{U}(k), \\ \mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k). \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$, $\mathbf{U}(k)$, $\mathbf{Y}(k)$ 为UPQC离散模型与稳态模型经过相减处理后的结果; $\mathbf{U}(k)$ 和 $\mathbf{X}(k)$ 分别为输入和可测状态,而 $\mathbf{Y}(k)$ 相当于暂态误差信号。

从式(3)可看出暂态模型可以不考虑外部输入 \mathbf{w} 的影响。

针对式(3)设计预测控制器,为使系统达到稳定状态,可以先构造出性能指标函数^[9-10]

$$J(k) = \sum_{i=0}^{N_1-1} \|\mathbf{X}(k+i)\|_D^2 + \sum_{i=0}^{N_2-1} \|\mathbf{U}(k+i)\|_R^2, \quad (4)$$

式中: N_1 和 N_2 分别为预测时域和控制时域;

\mathbf{D} 和 \mathbf{R} 是相应维数的加权矩阵。

对UPQC的多输入多输出系统求解,通常采用最小化最差性能指标形式,即在每个采样时刻 k ,求解控制规律

$$\mathbf{U}(k+i) = \mathbf{G}(k)\mathbf{X}(k+i),$$

式中 $\mathbf{G}(k)$ 为最优反馈控制增益。

从而有:

$$\min_{\mathbf{U}(k+i)=\mathbf{G}(k)\mathbf{X}(k+i)} \max_{\|\mathbf{U}(k+i)\|_R \leq \Omega} J(k), \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{U}(k+i) \leq \mathbf{U}_{\max}, \\ \mathbf{X}_{\min} \leq \mathbf{X}(k+i) \leq \mathbf{X}_{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

式中: \mathbf{U}_{\max} 和 \mathbf{U}_{\min} 分别表示控制输入约束的最大和最小值;

\mathbf{X}_{\max} 和 \mathbf{X}_{\min} 分别表示状态约束最大和最小值。

$$\begin{cases} \|\mathbf{X}(k+i+1)\|_{P(k)}^2 - \|\mathbf{X}(k+i)\|_{P(k)}^2 \leq \\ \|\mathbf{X}(k+i)\|_D^2 - \|\mathbf{U}(k+i)\|_R^2, \\ \mathbf{P}(k) > 0. \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{P}(k)$ 是正定矩阵。

式(7)能保证性能指标单调且鲁棒稳定,将式(7)从 $i=1$ ($i=1,2,\dots,N$)逐次累加,并定义标量 $\gamma > 0$,可得

$$\max_{\{A_i, B_i\} \in \Omega} J(k) \leq \|X(k)\|_{P(k)}^2 \leq \gamma \quad (8)$$

若存在矩阵 $Z > 0$, 定义

$$Q = \gamma P^{-1}(k), G(k) = ZQ^{-1}.$$

通过 Schur 补引理^[8-9]把式 (7) 和 $\|X(k)\|_{P(k)}^2 \leq \gamma$ 转换成 LMI^[10-13]形式:

$$\begin{bmatrix} Q & * & * & * \\ A_i Q + B_{2i} Z & Q & * & * \\ D^{1/2} Q & 0 & \gamma I & * \\ R^{1/2} Z & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (9)$$

式中 I 是单位矩阵, A_i 与 B_{2i} 分别表示在 LMI 形式下, $i=1, 2, \dots, N$ 时对应的 A 与 B_2 的表示形式;

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ X(k) & Q \end{bmatrix} \geq 0. \quad (10)$$

对式 (3) 在 k 时刻的控制规律

$$U(k+i) = G(k)X(k+i),$$

应用最小化性能指标公式 (4) 来求上界 γ 。其中 $G(k) = ZQ^{-1}$, 且 Z 和 Q 可应用下式求得:

$$\min_{\gamma, Z, Q} \gamma, \text{ s.t. 式 (9), (10) 成立.} \quad (11)$$

变约束预测控制方法设计包括离线和在线两部分, 利用每个采样时刻的状态点构建嵌套渐进稳定的椭圆集, 再计算出对应椭圆的控制规律。离散部分主要是根据每个逐渐趋于原点的离散状态点, 由式 (11) 计算对应的 Z, Q 和 γ , 并进行储存。而在线部分主要是对每个状态 $X(k)$ 在储存库中搜索, 求解满足条件的控制规律。

对于在线部分, 为了提高运行的自由度, 提高控制的可行性和最优性, 引入一个新的自由度值 θ 。在 k 时刻的状态 $X(k)$, 每次计算前都要确定该状态下的不变椭圆集, 同时还要确定对应椭圆 ε_{out} 和与其相邻内部椭圆 ε_{in} 。目标是实现该状态能达到内部嵌套椭圆集合 $M(\theta(k))$, 并使 $M(\theta(k))$ 尽可能的接近最小椭圆集合 M_{min} , 因此可设

$$\begin{aligned} (\gamma(\theta(k)), Q(\theta(k)), X(\theta(k)), Z(\theta(k))) = \\ \theta(k)(\gamma_{out}, Q_{out}, X_{out}, Z_{out}) + \\ (1-\theta(k))(\gamma_{in}, Q_{in}, X_{in}, Z_{in}), \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\gamma_{out}, Q_{out}, X_{out}, Z_{out}, \gamma_{in}, Q_{in}, X_{in}, Z_{in}$ 分别表示在 k 时刻确定的对应椭圆 ε_{out} 和 ε_{in} 与其相邻内部椭圆内的 γ, Q, X 和 Z 值。

对 θ 优化求解如下:

$$\theta^*(k) = \min_{\theta(k)} \theta(k), \quad (13)$$

$$\text{s.t. } 0 < \theta(k) < 1, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ X(k) & Q(\theta(k)) \end{bmatrix} \geq 0, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} H(\theta(k)) & * \\ G^T(\theta(k)) & Q^{-1}(\theta(k)) \end{bmatrix} \geq 0, \quad (16)$$

式中 $H(\theta(k)) = H^T(\theta(k))$ 。

通过对式 (12), (13) 求解得:

$$\begin{cases} Z(\theta^*(k)) = \theta^*(k)Z_{out} + (1-\theta^*(k))Z_{in}, \\ Q(\theta^*(k)) = \theta^*(k)Q_{out} + (1-\theta^*(k))Q_{in}. \end{cases} \quad (17)$$

对于 $0 < \theta^*(k) < 1$, 存在如式 (12) 的线性组合:

$$\begin{aligned} (\gamma(\theta^*(k)), Q(\theta^*(k)), X(\theta^*(k)), Z(\theta^*(k))) = \\ \theta^*(k)(\gamma_{out}, Q_{out}, X_{out}, Z_{out}) + \\ (1-\theta^*(k))(\gamma_{in}, Q_{in}, X_{in}, Z_{in}). \end{aligned} \quad (18)$$

这样可以形成一个状态不变集合

$$M(\theta^*(k)) \triangleq \{X \in \mathbf{R}^n \mid X^T(k)Q^{-1}(\theta^*(k))X(k) \leq 1\},$$

对应的内部控制规律为

$$U(k) = Z(\theta^*(k))Q^{-1}(\theta^*(k))X(k). \quad (19)$$

上述计算得到的 $Q^{-1}(\theta^*(k))$ 和 $Z(\theta^*(k))$ 是椭圆 ε_{out} 和椭圆 ε_{in} 的凸组合。考虑椭圆 $\varepsilon_i (i=1, 2, \dots, N)$ 内的状态对应的最大控制量可由相邻椭圆的参数给定, 这样相邻的椭圆之间就只需很小的计算量, 就可使系统向平衡点收敛。每一步都需要重新定义椭圆 ε_{out} 和椭圆 ε_{in} , 直到系统状态可以直接采用控制规律

$$U(k+i) = G(k)X(k+i)$$

为止。

变约束预测控制的计算:

1) 离散部分。对于给定的每个离散状态点 $X_i (i=1, 2, \dots, N)$, 计算得出其对应的 Z_i, Q_i 及 γ_i 的值, 并附加约束条件 $Q_{i-1} > Q_i (i \neq 1)$, 确保椭圆间互相嵌套提高求解过程的精确性, 并建立一个存储空间来储存 Z_i, Q_i 及 γ_i 的值, 同时保存

$$U_{\max i, n} = \max \left\{ \left| (Z_i Q_i^{-1})_r X(i) \right|, \left| (Z_{i+1} Q_{i+1}^{-1})_r X(i) \right| \right\}. \quad (20)$$

2) 在线部分。a) 在 k 时刻确定离散状态 $X(k)$ 所在的椭圆, 并判断是否是最小椭圆, 如果不是最小椭圆, 则

$$Q_{out} = Q_i, Q_{in} = Q_{i+1},$$

$$Z_{out} = Z_i, Z_{in} = Z_{i+1},$$

$$U_{\max} = \min \{ U_{\max i, r}, U \},$$

转到 b); 如果是最小椭圆, 则转到 c)。

b) 求解式 (13) 得到 θ^* , 并应用到式 (19), 即得对应的控制规律, 返回 a) 继续。

c) $X(k)$ 处于最小椭圆内, 则控制规律为

$$U(k+i) = G(k)X(k+i).$$

通过上述优化求解, 得出UPQC变约束预测控制规律, 从而实现变约束预测控制器的设计。

2.2 UPQC变约束预测控制系统结构设计

基于变约束预测理论的UPQC控制原理如图2所示。控制系统主要包括UPQC模块、状态估算模块和变约束预测控制模块。该控制器主要是对输入量 U 进行协调控制, 来补偿电源电压和负载电流中的谐波并抑制干扰。通过状态估算模块对外部干扰 w 进行估算, 得到 w 的状态 ζ , 并输出参考值 y ; 然后对UPQC的输出 Y 进行估算, 得到状态 X 和系统偏差 e ; 变约束预测控制器处理得到UPQC的控制输入 U , 从而实现对UPQC的控制。

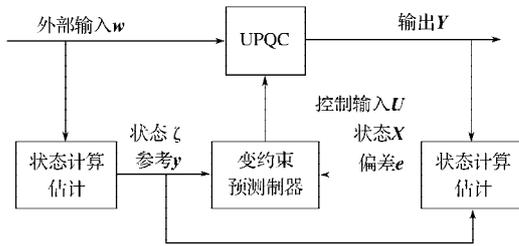


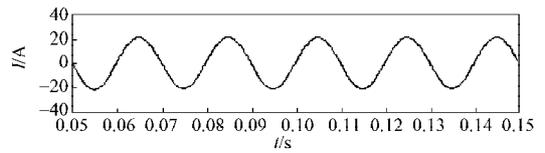
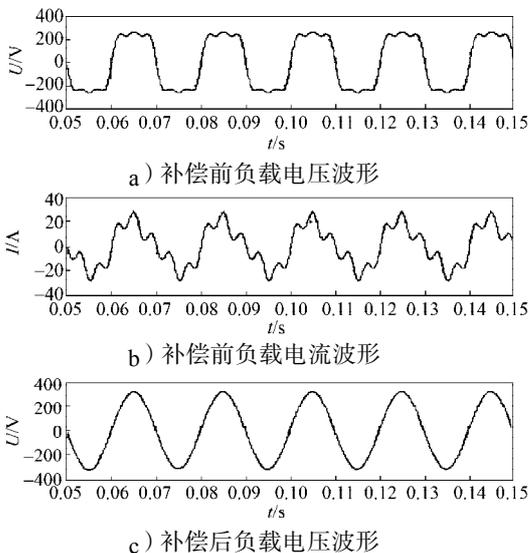
图2 UPQC控制原理

Fig. 2 The control principle of UPQC

3 仿真分析

为了验证该控制方法的正确性, 通过Matlab软件建立仿真模型, 分析UPQC改善电能质量的效果。

图3是UPQC补偿前后谐波畸变的仿真波形, 其中a), b)是存在谐波畸变的负载压和电流波形, 经FFT分析谐波畸变率分别为48.2%和51.3%; c), d)是补偿后负载电压和电流波形, 经FFT分析谐波畸变率分别为0.95%和1.1%。可见基于变约束预测控制的UPQC可以对谐波畸变进行有效补偿。



d) 补偿后负载电流波形

图3 谐波畸变的仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms for harmonic distortion

图4是UPQC补偿前后负载电压波动的仿真波形。由图a)可知, 补偿前负载电压在0.25~0.35s时上升30%, 在0.45~0.55s时下降25%, 谐波畸变率约为48%。由图b)可知, 补偿后负载电压几乎不随电源电压的变化而变化, 且接近正弦波, 谐波畸变率约为1.33%。由此可见, 本文提出的方法可以有效地抑制电压波动, 改善电能质量。

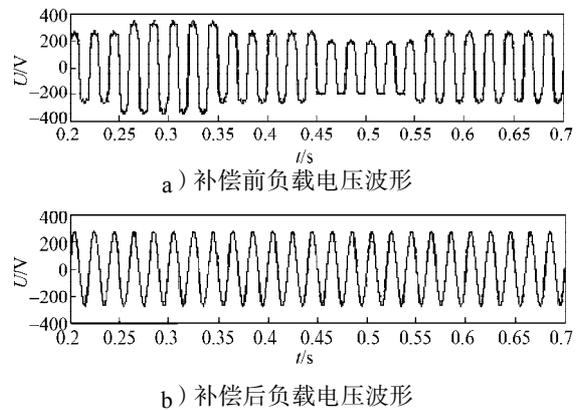


图4 负载电压波动仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms for load voltage fluctuation

4 结论

本文针对微电网中存在的电能质量问题, 提出了一种基于变约束预测理论的微电网UPQC控制方法。该方法在鲁棒预测控制的基础上, 通过在线优化控制方法, 构建当前状态的反馈控制矩阵的凸组合系数, 确定对应的控制约束, 增加了在线求解的自由度, 减少了运算时间。仿真结果表明, 该方法能够补偿谐波畸变和抑制电压波动, 从而有效地改善微电网中的电能质量。

参考文献:

[1] Ackermann T, Andersson G, Seder L. Distributed Generation: a Definition[J]. Electric Power System Research, 2001, 57(6): 195-204.
 [2] Guerrero JM, Matas J, Vicuna LG, et al. Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance[J]. IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [3] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on Microgrid Research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [4] 李国勇, 刘汉奎, 徐殿国, 等. 统一电能质量调节器的研究[J]. 电力电子技术, 2003, 37(1): 74-78.
Li Guoyong, Liu Hankui, Xu Dianguo, et al. Study on Unified Power Quality Conditioner[J]. Power Electronics, 2003, 37(1): 74-78.
- [5] 李圣清, 罗飞, 陈兴国. 基于快速块LMS算法的统一电能质量调节器谐波电流预测方法[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(2): 53-56.
Li Shengqing, Luo Fei, Chen Xingguo. Harmonic Current Prediction Method of Universal Power Quality Conditioner Based on Rapid Block LMS Algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(2): 53-56.
- [6] 谭智力, 李勋, 陈坚, 等. 基于简化p-q-r理论的统一电能质量调节器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 85-91.
Tan Zhili, Li Xun, Chen Jian, et al. A New Control Strategy of UPQC by Using Simplified p-q-r Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 85-91.
- [7] 梁祖权, 束洪春, 刘志坚. 新型统一电能质量调节器解耦控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 99-104.
Liang Zuquan, Shu Hongchun, Liu Zhijian. New Approach of Decoupling Control for Unified Power Quality Conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 99-104.
- [8] Kian H K, Chu Y C, Ping L S. Model Based H_2 Control of a Unified Power Quality Conditioner[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2493-2504.
- [9] Raffei S M R, Asadi R, Griva G, et al. Optimal Unified Power Quality Conditioner with Improved Compensation Performance under Distorted Voltages[C]//Proceedings of the 2009 IEEE Bucharest Power Technology. Bucharest: USA IEEE, 2009: 1-8.
- [10] 高宪文, 张立, 王介生, 等. 变约束高效预测控制[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 855-860.
Gao Xianwen, Zhang Li, Wang Jiesheng, et al. Efficient Model Predictive Control with Variable Constraints[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(6): 855-860.
- [11] 丁宝苍, 邹涛. 约束时变不确定离散系统的输出反馈预测控制综合[J]. 自动化学报, 2007, 33(1): 78-83.
Ding Baocang, Zou Tao. Synthesizing Output Feedback Predictive Control for Constrained Uncertain Time-Varying Discrete Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(1): 78-83.
- [12] Immanuel L, Rossiter J A. Robust Triple Model MPC[J]. International Journal of Control, 2008, 81(4): 679-689.
- [13] 李德伟, 席裕庚. 有界扰动系统高效鲁棒预测控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(5): 535-539.
Li Dewei, Xi Yugeng. Design of Efficient Robust Model Predictive Controller for Systems with Bounded Disturbances[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(5): 535-539.

(责任编辑: 邓光辉)