

基于LPV增益调度技术的风机主动容错控制

吴定会^{1†}, 李意扬¹, 纪志成¹

(1. 江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214000)

摘要: 针对风机具有非线性和参数的不确定性的特征, 提出了基于LPV增益调度的风机主动容错控制方法, 解决故障对机组带来的不稳定性问题。基于LPV凸分解方法, 将风机的非线性模型转化为具有凸多面体结构LPV模型, 利用LMI技术对凸多面体各个顶点分别设计 H_∞ 控制器, 再利用各顶点设计的反馈控制器得到具有凸多面体结构LPV容错控制器。仿真结果表明, LPV增益调度技术可以成功地应用于风能转换系统的容错控制。

关键词: 风机; 主动容错控制; LPV增益调度技术; 凸分解

中图分类号: TK81 **文献标识码:** A

Active fault-tolerant LPV control of wind turbines

WU Ding-hui^{1†}, LI Yi-yang¹, JI Zhi-cheng¹

(1. Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214112, China)

Abstract: In light of the nonlinear properties and uncertain parameters of wind turbines, an active fault tolerant control technology was proposed to resolve the dynamic stability problems, which based on the LPV gain scheduling technology. The linearized model around the operating point of wind turbines and fault were converted into convex polyhedron structure LPV model by using LPV convex decomposition method. Then each vertex of convex polyhedron was designed to meet the H_∞ performance by using LMIs (linear matrix inequalities). All the vertex gain were synthesized to get LPV controller with convex polyhedron structure. The simulation result shows that the LPV active fault tolerant controller could be applied to the wind turbines successfully.

Key words: wind turbines; active fault tolerant control; LPV gain scheduling technology; convex decomposition

1 引言(Introduction)

最近20年, 风机的总装机量增长迅速, 从1992年的2.5GW到2010年的200GW [2561b@1]。随着对风机效率和可靠性要求的提高, 现代风机不再如传统风机那样一味追求高的产能, 而是将更多的考虑成本问题, 如可靠性, 运维成本, 风机的使用寿命等等 [5122b@2]。由于大多数风机安装在远离人烟的地区, 将容错控制技术引入风力发电系统可以大幅减少维护的成本 [7683b@3]。容错控制是在保证当控制系统中的某些部件发生故障时, 还能安全地完成控制任务的一种控制技术。容错控制包括被动容错(Passive Fault-Tolerant Control, PFTC)和主动容错(Active Fault-Tolerant Control, AFTC), 其中被动容错控制 [10244b@4]是考虑正常工作和故障状态的参数值设计适当固定结构的控制器, 在故障前后使用同样的控制器。主动容错 [12805b@5]则是在故障发生后重新调整控制器参数, 或者改变控制器结构, 与被动容错最大的不同在于依赖故障诊断机构 [12805b@5]。

从控制的角度看, 风速的变化和故障的发生导

致了风力机的动态特性在工作点附近发生非线性变化, 同时缺少风力机精确的数学模型, 传统的控制器设计策略难以胜任 [15366b@6, 17927b@7]。无论是传统的鲁棒技术 [15366b@6]还是一般的增益调度控制 [17927b@7], 对模型参数变化和工作点选取的要求, 都非常苛刻, 不符合实际情况。基于鲁棒控制的线性参数变化(Linear Parameter Varying, LPV)增益调度技术对这种动态特性变化显著的风力系统会非常有效 [20488b@8, 23049b@9]。对风力系统来讲, 鲁棒性和容错性都是必不可少的特征, 而LPV控制方法恰恰能够同时处理由风速、故障带来的参数变化和模型本身描述不精确的问题。

LPV容错控制器采用当前工作点附近的风速估计值和故障诊断机构输出的故障信息作为增益调度变量, 将模型转换为仿射依赖型, 在线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequalities LMIs)约束下求出最优控制器 [256010b@10]。

在一个实际的系统中, 传感器, 执行器和系统构件中均可能发生故障, 从缓慢变化的到急性的。这些故障所表现出的共性就是系统动态特性的变

化,从而使它们大部分都可被描述成一个线性变化的参数。本文中,为了突出控制器的设计过程,选取了一种常见的单一故障,即桨距执行器的液压系统故障。当液压油中混入过多空气,桨距执行器的动态特性就会变差,从而影响在额定风速以上时,风机恒功率控制的动静态特性[281611b@11]。在实际运行和仿真中,虽然LPV的综合过程中LMI迭代求解计算量大,但LPV容错控制器是离线计算,在线运行时只需在每个采样周期,根据故障信息的变化,经过简单的算数运算,便可得出随增益调度变量变化的控制器,涉及的运算量很小。另外,在实际系统中,有限的采样周期内获得故障信息的精确估计是不太可能的,值的庆幸的是Apkarian等人[307212b@12]已经证实LPV对时变参数的估计误差并不敏感,不需精确估计就可将LPV控制应用于系统的容错控制。

本文组织如下:第2章描述了风力机和故障数学模型,并推导出了其对应的LPV仿射依赖模型。在第3章将无限维的控制器转换为顶点的凸优化问题,并给出了计算的步骤。第4章和第5章中,给出无容错和有容错控制器的对比仿真图,并对仿真结果进行分析,最后给出了结论。

2 风机模型(Wind Turbine Model)

风机的非线性模型,即包括空气动力学子模型,传动机构子模型,桨距执行器子模型和故障模型[332813b@13]。

2.1 空气动力学模型(Aerodynamic Model)

风力机的叶桨将风能转换到转子侧,以速度 $\omega_r(t)$ 旋转。风能依赖于风速 $v_r(t)$,空气密度 ρ 和叶桨的等效面积 A 。风能转换到转子侧的能量的效率为 $C_p(\lambda(t), \beta(t))$,是桨距角 $\beta(t)$ 和叶尖速比 $\lambda(t)$ 的函数。气动转矩 $T_a(t)$ 可由下式给出:

$$T_a(t) = \frac{1}{2\omega_r(t)} \rho A v_r^3(t) C_p(\lambda(t), \beta(t)) \quad (1)$$

2.2 传动机构模型(Drive Train Model)

传动机构由低速轴和高速轴组成。低速轴和高速轴转动惯量分别为 J_r 和 J_g ,摩擦系数分别为 B_r 和 B_g ,高低两侧的齿轮比为 N_g 。考虑传动机构的粘性摩擦,扭力衰减系数是 B_{dt} ,扭转刚度是 K_{dt} 。传动系统的输出是扭矩角 $\theta_{\Delta}(t)$,电机产生的转矩 $T_g(t)$ 和发电机转速 $\omega_g(t)$ 。产生的电能 $P_g(t)$ 是由转换效率 η_g 决定。模型如下:

$$\begin{aligned} J_r \dot{\omega}_r(t) &= T_a(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_g(t) - K_{dt} \theta_{\Delta}(t) \\ &\quad - (B_{dt} + B_r) \omega_r(t) \\ J_g \dot{\omega}_g(t) &= \frac{K_{dt}}{N_g} \theta_{\Delta}(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_r(t) - T_g(t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$- \left(\frac{B_{dt}}{N_g^2} + B_g \right) \omega_g(t) \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_{\Delta}(t) = \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t) \quad (4)$$

$$P_g(t) = \eta_g \omega_g(t) T_g(t) \quad (5)$$

2.3 包含故障信息的桨距执行器模型(Pitch System Model Including Fault Model)

桨距执行器模型如下:

$$\ddot{\beta}(t) = -2\xi\omega_n\dot{\beta}(t) - \omega_n^2\beta(t) + \omega_n^2\beta_{ref}(t - t_d) \quad (6)$$

其中 t_d 是变桨距执行器的时间常数, $\beta_{ref}(t)$ 是桨距角的参考值, ω_n 是变桨距执行器模型的自然振荡频率。 ξ 是变桨距执行器模型的阻尼系数。

桨距执行器中液压油空气含量过高的故障,其变化主要影响的是阻尼系数 ξ 、自然振荡频率 ω_n 。 α_{ha} 为故障影响因子。其故障模型为:

$$\bar{\xi}(t) = (1 - \alpha_{ha}(t))\xi_{min} + \alpha_{ha}(t)\xi_{max} \quad (7)$$

$$\bar{\omega}_n(t) = (1 - \alpha_{ha}(t))\omega_{n,min} + \alpha_{ha}(t)\omega_{n,max} \quad (8)$$

当故障影响因子 $\alpha_{ha} = 0$ 变成 $\alpha_{ha} = 1$,其对应的空气密度就从7%变化为15%。

2.4 风机LPV模型(LPVP Model of Wind Turbine)

空气动力学模型中的 $C_p(\lambda(t), \beta(t))$ 是风力机呈现非线性的动态特性的主因。利用泰勒公式对气动转矩 $T_a(t)$ 展开,得:

$$T_a \approx \bar{T}_a(\bar{v}_r, \bar{\omega}_r, \bar{\beta}) + \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \hat{\beta} + \frac{\partial T_a}{\partial v_r} \hat{v}_r + \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} \hat{\omega}_r \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} \frac{\partial T_a}{\partial v_r} = \frac{\rho A v_r^2}{2\omega_r} (3C_p + v_r \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial v_r}) \\ \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} = \frac{\rho A v_r^3}{2\omega_r} (\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega_r} - \frac{C_p}{\omega_r}) \\ \frac{\partial T_a}{\partial \beta} = \frac{\rho A v_r^3}{2\omega_r} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} \end{cases}$$

展开后的泰勒表达式的分量均为近似为风速 v_r 的线性函数,意味着可将风速作为LPV模型的增益调度变量:

$$\theta_{op}(t) := v_r(t) \quad (10)$$

同时将故障影响因子作为另一个增益调度变量:

$$\theta_f(t) := \alpha_{ha} \quad (11)$$

选取系统状态变量,控制量分别为: $x(t) = [\beta(t), \dot{\beta}(t), \theta_{\Delta}(t), \omega_g(t), \omega_r(t)]^T$, $u(t) = \beta_{ref}(t)$ 。得出变桨距风机系统的LPV模型为:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\theta_{op}, \theta_f)x(t) + B_1(\theta_{op}, \theta_f)w(t) \\ &\quad + B_2(\theta_{op}, \theta_f)u(t) \end{aligned} \quad (12)$$

3.2 LPV控制器求解(Computation of LPV Controller)

由于上述的参数轨迹 $\theta \in \Lambda$ 是定义在连续的空间, 如果对每一个点求解控制器, 会涉及到无限多个LMIs, 这是不可能求解的。本节中, 将无限维的问题转化为顶点的凸优化问题, 通过求解有限个顶点的LMIs, 得出满足 γ 的容错控制器。

定理1 设 N_R 和 N_S 分别为 $[B_2^T, D_{12}^T]$ 和 $[C_2, D_{21}]$ 核空间的基, $i = 1, 2, \dots, r$, r 为顶点个数, 则问题1有解的充要条件为存在矩阵 $R, S \in R^{n \times n}$, 满足下列线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} N_R & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_i R + R A_i^T & R C_{1i}^T & B_{1i} \\ C_{1i} R & -\gamma I & D_{11i} \\ B_{1i}^T & D_{11i}^T & -\gamma I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_R & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} N_S & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A_i S + S A_i^T & S C_{1i}^T & B_{1i} \\ C_{1i} S & -\gamma I & D_{11i} \\ B_{1i}^T & D_{11i}^T & -\gamma I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_S & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} < 0 \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} \geq 0 \quad (22)$$

证 根据引理2, 问题1存在一个 k 阶LPV容错控制器的充分必要条件是线性矩阵不等式(19)存在正定对称解 $0 < x_{cl} \in R^{(n+k) \times (n+k)}$, 且式(19)可以改写为:

$$\Psi_i + P_x^T F_i Q + Q^T F_i^T P_x < 0 \quad (23)$$

式中

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} A_0^T(\theta_i) x_{cl} + x_{cl} A_0(\theta_i) & x_{cl} B_0(\theta_i) & C_0^T \\ B_0^T(\theta_i) x_{cl} & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_0 & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix}$$

$$P_x = [B^T x_{cl} \quad 0 \quad D_{12}^T], Q = [C \quad D_{21} \quad 0]$$

由引理1可知, 线性矩阵不等式(23)成立的充分必要条件是:

$$W_{P_x}^T \Psi_i W_{P_x} < 0, W_Q^T \Psi_i W_Q < 0 \quad (24)$$

其中 W_{P_x}, W_Q 分别为 P_x, Q 零空间的任意基。

由于

$$P_x = \begin{bmatrix} B^T & 0 & D_{12}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cl} & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (25)$$

令向量 $P = [B^T \quad 0 \quad D_{12}^T]$, 则 P 对应的零空间

的任意基与 W_P 的关系为:

$$W_{P_x} = \begin{bmatrix} x_{cl}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} W_P \quad (26)$$

那么式(24)的第一个不等式可改写为:

$$W_P^T \phi_i W_P < 0 \quad (27)$$

其中

$$\phi_i = \begin{bmatrix} A_0^T(\theta_i) x_{cl}^{-1} + x_{cl}^{-1} A_0(\theta_i) & B_0(\theta_i) x_{cl}^{-1} C_0^T \\ B_0^T(\theta_i) & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_0 x_{cl}^{-1} & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix}$$

令 $N_R = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}, N_S = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix}$ 分别为 $[B_2^T, D_{12}^T]$ 和 $[C_2, D_{21}]$ 的零空间的任意基, 则 P 和 Q 的零空间的基分别为:

$$W_P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & I \\ P_2 & 0 \end{bmatrix}, W_Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ Q_2 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (28)$$

因此, 式(24)可以进一步转换为式(20)和式(21)所示的形式。

条件 $x_{cl} > 0$ 等价于 $\begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} \geq 0$ 。

证毕。

由上述定理, 便可得LPV容错控制器的求解算法。

算法

第一步 计算满秩矩阵 $M, N \in R^{n \times k}$, 使得:

$$M N^T = I - R S \quad (29)$$

第二步 计算方程的唯一解 x_{cl} :

$$\begin{bmatrix} S & I \\ N^T & 0 \end{bmatrix} = x_{cl} \begin{bmatrix} I & R \\ 0 & M^T \end{bmatrix} \quad (30)$$

第三步 求解不等式(19)得:

$$\begin{bmatrix} A_K(\theta) & B_K(\theta) \\ C_K(\theta) & D_K(\theta) \end{bmatrix} \in$$

$$Co \left\{ K_i = \begin{bmatrix} A_{Ki} & B_{Ki} \\ C_{Ki} & D_{Ki} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, r \right\} \quad (31)$$

最后, LPV容错控制器的形式为:

$$K = \sum_{i=1}^r \alpha_i K_i, \sum_{i=1}^r \alpha_i = 1 \quad (32)$$

4 仿真结果(Simulation Result)

风力机仿真参数见表1。

表 1 仿真参数

Table 1 Parameter value

| 参数 | 值 | 参数 | 值 |
|------------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| K_{dt} | $2.7GNm/rad$ | B_r | $27.8Nm/(rad/s)$ |
| A | $10387m^2$ | B_{dt} | $945kNm/(rad/s)$ |
| ρ | $1.225kg/m^3$ | B_g | $3.034Nm/(rad/s)$ |
| $\theta_{f,min}$ | 0 | $\theta_{f,max}$ | 1 |
| J_r | $55 \times 10^6 kgm^2$ | $\theta_{op,min}$ | $16m/s$ |
| J_g | $390kgm^2$ | $\theta_{op,max}$ | $28m/s$ |
| N_g | 95 | | |

在设计中为了体现系统的性能要求,可以对输出向量进行加权。 W_w 主要是对电机转速反馈进行整形,减弱风速抖动对稳定性的影响, W_u 是对桨距参考值取高频分量,强化控制的作用。加权函数选取如下:

$$W_w = \frac{s^2 + 2\xi_\Omega\omega_\Omega s + \omega_\Omega^2}{(s + z_I)(s + \xi_\Omega\omega_\Omega)} \quad (33)$$

$$W_u = \frac{s + z_3}{s + p_3} \quad (34)$$

其中, $\omega_\Omega = 0.6283rad/s$, $\xi_\Omega = 0.7$, $p_3 = 1.3425$, $z_3 = 13.425$ 。

与LPV主动容错控制对比的是一个传统的PI控制,其参数为 $K_P = 4.234$, $K_I = 0.978$ 。仿真时间60s,在第30s时,加入故障,即故障影响因子由 $\alpha_{ha} = 0$ 变成 $\alpha_{ha} = 1$ 。仿真结果为图2~图4。

图2所示的是风速变化曲线,风速在额定风速以上,此时控制的目标是实现恒功率控制。图3是发电机转速图,图3的第一张为正常情况的转速图,发电机转速维持在162rad/s附近。图3的第二张和第三张分别为采用LPV容错控制器和PI控制器的转速图,在第30s故障发生后,LPV容错控制器能有效抑制故障带来的影响。图4是发电机功率,其第一张为正常情况功率图,第二第三张分别是LPV容错控制器和PI控制器作用下功率图,且均在30s处发生故障。可以明显的看出,故障对LPV容错控制下的恒功率输出几乎没有影响,而传统PI控制下功率出现了大幅的抖动。

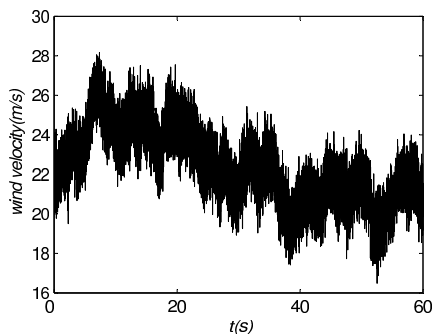


图 2 风速

Fig. 2 Wind Velocity

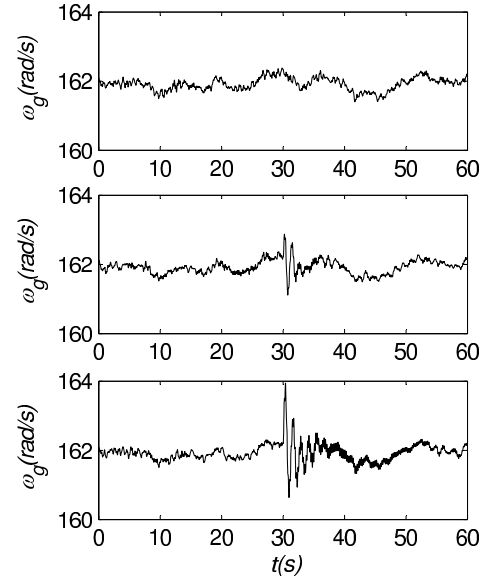


图 3 发电机转速

Fig. 3 Generator Speed

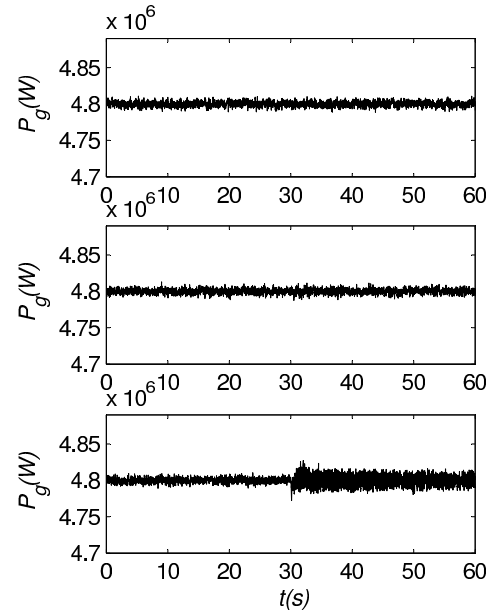


图 4 发电机功率

Fig. 4 Electrical Power

5 结论(Conclusions)

本文依据LPV系统的鲁棒 H_∞ 控制原理,分别以输入风速、故障信息作为变增益参数,建立了风能转换系统故障模型的LPV控制方程,求解LMIs,得到系统离线顶点控制器。最后在仿真模型中嵌入该LPV容错控制器,仿真结果表明,所设计的控制器能有效地抑制故障带来的发电机产生功率的波动,控制效果满意。

参考文献(References):

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind report – annual market update 2011 [R]. Brussels Belgium: Global Wind Energy Council,

- 2012.
- [2] DOBRILA O, STEFANSEN R. *Fault tolerant wind turbine control* [M]. Denmark: Technical University of Denmark, 2007.
- [3] LI S B, SAUTER D, AUBRUN C. Stability guaranteed active fault-tolerant control of networked control systems [J]. *Journal of Control Science and Engineering*. 2008: 22 – 31.
- [4] TAO G, JOSHI S M, MA X L. Adaptive state feedback and tracking control of systems with actuator failures [J]. *IEEE transactions on Control Systems Technology*, 2001, 46(1): 78 – 95.
- [5] LIAO F, WANG J L, YANG G H. Reliable robust flight tracking control: An LMI approach [J]. *IEEE transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(1): 76 – 89.
- [6] 扶凌云, 何勇, 吴敏. 基于时滞的 H_∞ 滤波器设计及其在网络中的应用[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(4): 517 – 522.
FU Lingyun, HE Yong, WU Min. H-infinity filter design based on time-delay and its application to network [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(4): 517 – 522.
- [7] BIANCHI F D, BATTISTA H D, MANTZ R J. *Wind Turbine Control Systems – Principle, Modelling and Gain Scheduling Design* [M]. London: Springer, 2007.
- [8] 刘香霞, 沈艳霞, 潘庭龙, 万红淑. 基于LPV的直驱式永磁同步风电系统控制器设计[C]. // 中国控制会议. 烟台, 2011, 7: 5178 – 5181.
LIU Xiangxia, SHEN Yanxia, PAN Ting-long, WAN Hongshu. LPV Based Direct-driven Permanent Magnet Synchronous Wind Power System Controller Design [C]. // *Chinese Control Conference*. Yantai, 2011, 7: 5178 – 5181.
- [9] SLOTH C, ESBENSEN T, STOUSTRUP J. Active and Passive Fault-Tolerant LPV Control of Wind Turbines[c]. // *American Control Conference*. Baltimore, 2010, 2: 4640 – 4646.
- [10] ALLERHAND L I, SHAKED U. H_∞ Robust stability and stabilization of linear switched systems with dwell time[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(2): 381 – 386.
- [11] 秦生升, 胡国文, 顾春雷等. 风力发电系统的恒功率非线性 H_∞ 鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(5): 617 – 622. QIN Shengsheng, HU GuoWen, GU Chunlei. Nonlinear H-infinity robust control of constant power for wind power system[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(5): 617 – 622.
- [12] APKARIAN P, GAHINET P, BECKER G. Self-scheduled H_∞ control of linear parameter-varying systems: a design example[J]. *Automatica*, 1995, 31(9): 1251–1261.
- [13] ESBENSEN T, SLOTH C. *Fault-Tolerant Control of Wind Turbines*[M]. Aalborg University, 2009: 16–21, 100–104.
- [14] MOHAMMADPOUR J, SCHERER C W. *Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications*[M]. New York: Springer, 2012: 303 – 337.

作者简介:

吴定会 (1970—), 男, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为风力发电控制技术, E-mail: wh033098@163.com;

李意扬 (1990—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为故障诊断与容错控制, E-mail: lyyyuna@gmail.com;

纪志成 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为风力发电控制技术, E-mail: zcji@sytu.edu.cn.