

柴油发电机组非线性 H_2/H_∞ 综合控制器

黄曼磊, 宋克明, 魏志达

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 独立电力系统的稳定性主要取决于柴油发电机组的转速和电压响应特性. 柴油发电机组控制系统是一个非线性控制系统, 转速和电压相互作用, 对二者进行综合控制非常必要. 为了分析系统的动态特性, 首先建立柴油发电机组的非线性数学模型, 然后以此为基础设计非线性 H_2/H_∞ 综合控制器. 将直接反馈线性化和混合 H_2/H_∞ 控制理论相结合应用于柴油发电机组综合控制器的设计, 把系统的性能要求转化为标准 H_2/H_∞ 控制问题, 获得了柴油发电机组非线性 H_2/H_∞ 综合控制律. 计算机仿真结果表明, 设计的非线性 H_2/H_∞ 综合控制器有效地提高了系统的动态精度和抑制扰动的能力, 改善了独立电力系统的稳定性.

关键词: 柴油发电机组; 综合控制; 非线性控制; H_2/H_∞ 控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Nonlinear H-two/H-infinity synthetic controller for diesel-generator set

HUANG Man-lei, SONG Ke-ming, WEI Zhi-da

(School of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The stability of an isolated power system is determined by the speed and voltage response characteristic of the diesel-generator set. The control system of a diesel-generator set is a nonlinear control system. Because of the interaction between speed and voltage, it is necessary to control them synthetically. To analyze the dynamic characteristics of this system, a nonlinear mathematical model of diesel-generator set is built first, and a nonlinear H-two/H-infinity synthetic controller is then designed. In combining the direct feedback linearization with the mixed H-two/H-infinity control theory to design the synthetic controller for the diesel-generator set, the specifications of the system are transformed to that of a standard H-two/H-infinity control problem, and a nonlinear H-two/H-infinity synthetic control law is developed for the diesel generator set. The computer simulation results show that the nonlinear H-two/H-infinity synthetic controller effectively improves the dynamic precision of the system and suppresses the load disturbance, thus providing desirable stability for an isolated power system.

Key words: diesel-generator set; synthetic control; nonlinear control; H-two/H-infinity control

1 引言(Introduction)

柴油机拖动同步发电机组成柴油发电机组, 其中柴油机与调速器组成了柴油机调速系统, 同步发电机与调压器组成了同步发电机调压系统. 柴油发电机组电压的变化影响转速的变化, 反之转速的变化也影响电压的变化. 转速和电压是一对相互耦合的变量, 对转速和电压进行综合控制是非常必要的. 同步发电机的电压控制和柴油机的转速控制是提高独立电力系统稳定性的重要手段. 目前, 柴油发电机组的调压系统和调速系统本身有了很大的改进, 但其控制方式却落后于受控系统本身的改进. 大多数的电压控制器和转速控制器仍采用单输入单输出的经典控制方法, 同时发电机组的电压控制和转速控制处于互相割裂的状态, 使得控制效果受到很大的限制.

Bernstein于1989年提出了混合 H_2/H_∞ 控制的设计思想, 成为控制理论及应用研究的热点问题之一. 单独使用 H_2 控制只能保证系统的鲁棒性能, 无法保证系统的鲁棒稳定性; 单独使用 H_∞ 控制只能保证系统的鲁棒稳定性, 无法保证系统的鲁棒性能. 混合 H_2/H_∞ 控制可以使系统同时获得较好的鲁棒稳定性和鲁棒性能, 能够解决对象建模中的误差和在一定范围内因模型摄动而引起控制品质恶化的问题, 因此本文采用混合 H_2/H_∞ 控制处理柴油发电机组的综合控制问题.

文献[1]采用线性 H_∞ 控制的方法对柴油机调速器进行了设计, 文献[2]建立了柴油发电机组的非线性数学模型, 文献[3~6]采用非线性鲁棒控制的方法解决了电力系统的相关控制问题, 文献[7]给出了混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器的设计方法. 由于柴油发电机

组控制系统是一个非线性控制系统, 本文采用直接反馈线性化和混合 H_2/H_∞ 控制理论相结合的方法对其进行研究. 利用直接反馈线性化的方法对非线性系统线性化, 对线性化的系统, 应用混合 H_2/H_∞ 控制理论设计状态反馈控制器, 从而获得柴油发电机组非线性 H_2/H_∞ 综合控制律, 以解决柴油发电机组参数和结构不确定性的问题, 达到抑制负荷扰动, 提高柴油发电机组控制系统动态精度的目的, 从而改善独立电力系统的稳定性.

2 柴油发电机组的非线性数学模型 (Nonlinear mathematical model of diesel-generator set)

柴油机是把燃料热能转化为机械能的动力机械. 由于柴油机主力矩 M_1 是脉动转矩, 可将其分解成一富氏级数形式, 即

$$M_1 = M_P + \sum_{\nu=1}^{\infty} M_\nu^0 \sin(\nu\omega_0 t + \varphi_\nu), \quad (1)$$

式中: M_P 为周期中的平均力矩值; M_ν^0 为 ν 次谐波力矩幅值; ω_0 为基谐波力矩角频率; φ_ν 为 ν 次谐波力矩初相角.

式(1)中, 除第一项为常数外, 其余都是振幅、相位、频率不同的谐波力矩.

由于安装了转动惯量很大的飞轮, 可以保持柴油机输出力矩在允许范围内变动, 其飞轮回转不均匀度为0.0033~0.0067. 这样大的飞轮矩已确保柴油机输出力矩是接近均匀的. 所以在柴油机正常运行情况下, 输出扭矩的不均匀性是可以略去不计的.

于是式(1)变为

$$M_1 = M_P. \quad (2)$$

柴油机的转矩转速特性是一条光滑的曲线, 可以用若干个线性段来逼近. 将柴油机的转矩转速特性分成 m 段, 则每一段可写成

$$M_{1j} = k_j n + b_j, \quad (3)$$

式中: k_j, b_j 是常数, 对于各个分段, k_j, b_j 取不同的值, $j = 1, 2, \dots, m$.

柴油机的调整特性描述主力矩 M_1 与执行器输出轴位移 L 的关系, M_1 与 L 呈直线关系, 由于柴油机扭矩存在一定的滞后, 则柴油机的调整特性可以表示为

$$M_1 = a(L(t - T_d) - L_0), \quad (4)$$

式中: a 是常数, $a = \frac{M_1^e}{L_e - L_0}$; M_1^e 是柴油机的额定扭矩; L_e 是执行器输出轴的额定行程; L_0 是执行器输出轴的空载行程; T_d 是柴油机扭矩滞后时间.

综合柴油机的速度特性与调整特性可以得到 M_1 的表达式为

$$M_1 = k_j n + b_j + a(L(t - T_d) - L_0). \quad (5)$$

取额定转速所在的分段的表达式为

$$M_1 = k_1 n + b_1 + a(L(t - T_d) - L_0). \quad (6)$$

定义 $d_1 = b_1 - aL_0$, 则式(6)可写为

$$M_1 = k_1 n + d_1 + aL(t - T_d), \quad (7)$$

柴油机扭矩滞后时间 T_d 决定于柴油机的转速、气缸数和冲程数, 一般可按式(8)估算其范围.

$$\frac{15}{n} < T_d < \frac{15}{n} + \frac{60\tau}{ni}, \quad (8)$$

式中: n 为柴油机转速, i 为气缸数, τ 为柴油机冲程系数, 对每转发火一次的二冲程柴油机 $\tau = 1$, 对每两转发火一次的四冲程柴油机 $\tau = 2$.

文中研究的柴油机 $n = 1500 \text{ r/min}$, 气缸数 $i = 16$, 冲程系数 $\tau = 2$. 经过计算可得 $0.01 \text{ s} < T_d < 0.015 \text{ s}$, 而柴油机调速系统转速的过渡过程时间为2~3 s, T_d 与其相比非常微小, 可以忽略不计. 于是式(7)变为

$$M_1 = k_1 n + d_1 + aL. \quad (9)$$

柴油机转速 n 与曲轴角速度 ω_g 的关系为

$$n = \frac{60\omega_g}{2\pi}, \quad (10)$$

代入式(9)得

$$M_1 = \frac{60k_1\omega_g}{2\pi} + d_1 + aL. \quad (11)$$

考虑同步发电机阻尼力矩 M_y 的作用, 则柴油发电机组运动的动力学方程可表示为

$$J \frac{d\omega_g}{dt} + M_y = M_1 - M_2, \quad (12)$$

式中: J 为机组轴系转动惯量(包括柴油机、发电机及传动装置等转动惯量), ω_g 为柴油机轴角速度, 即曲轴角速度, M_1 为柴油机输出轴扭矩或称主力矩, M_2 为发电机作为负载引起的阻力矩, M_y 为同步发电机阻尼力矩.

阻尼力矩 M_y 由同步发电机的阻尼绕组产生, 其特点是同发电机转子的电角速度成正比, 可由式(13)计算.

$$M_y = K\omega = Kp\omega_g, \quad (13)$$

式中: K 为与发电机阻尼绕组电阻成正比的阻尼系数, ω 为同步发电机转子的电角速度, p 为发电机磁极对数.

将式(11)(13)代入式(12)可得

$$J \frac{d\omega_g}{dt} + Kp\omega_g = \frac{60k_1\omega_g}{2\pi} + d_1 + aL - M_2. \quad (14)$$

在独立电力系统动态稳定性分析中, 一般变量都采用标么值, 为了形式的统一, 可以将式(14)标么化. 这样只需将机械角速度转化为电角速度, 然后将功率、转矩、角速度标么化, 用以研究柴油机的转速响应特性.

取柴油发电机组的额定视在功率 S_B 为功率的基准值, 取 $\omega_0 = 100\pi$ 为角速度的基准值. 将式(14)标么化得

$$T_a \frac{d\omega}{dt} = T_b \omega + c_1 + c_2 L - M_2. \quad (15)$$

式中:

$$T_a = \frac{J\omega_{g0}^2}{S_B}, T_b = \frac{60k_1\omega_{g0}^2 - 2\pi Kp\omega_{g0}^2}{2\pi S_B},$$

$$c_1 = \frac{d_1\omega_{g0}}{S_B}, c_2 = \frac{a\omega_{g0}}{S_B}, \omega_{g0} = 100\pi/p,$$

ω 为电角速度, ω 和 M_2 为标么值, L 和 t 为实际值.

M_2 略去空载转矩和绕组损耗, 等于同步发电机的输出转矩, 即

$$M_2 = \frac{P_e}{\omega}, \quad (16)$$

式中: P_e 是同步发电机的输出功率. 将式(16)代入式(15)得

$$T_a \frac{d\omega}{dt} = T_b \omega + c_1 + c_2 L - \frac{P_e}{\omega}. \quad (17)$$

在进行稳定性分析或控制系统设计时, 为计算方便起见, 通常对式(17)做近似处理: 即认为在暂态过程中角速度 ω 变化不大, 约等于同步转速, 即 $\omega \approx 1$. 于是式(17)变为

$$T_a \frac{d\omega}{dt} = T_b \omega + c_1 + c_2 L - P_e, \quad (18)$$

式(18)两边同除以 T_a 得到

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a} \omega + \frac{1}{T_a} c_1 + \frac{c_2}{T_a} L - \frac{1}{T_a} P_e. \quad (19)$$

凸极同步发电机的输出功率为

$$P_e = \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2\delta), \quad (20)$$

式中: U 为发电机端电压, E'_q 为 q 轴暂态电势, X 为绕组电抗, δ 为发电机功角.

发电机功角 δ 与电角速度 ω 的关系为

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0, \quad (21)$$

式中: ω 为标么值, δ 和 t 为实际值.

将式(20)代入式(19), 并与式(21)联立就得到柴油发电机组机电暂态过程的数学模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a} \omega + \frac{1}{T_a} c_1 + \frac{c_2}{T_a} L - \\ \frac{1}{T_a} \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta - \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2\delta). \end{cases} \quad (22)$$

从式(22)可知, 该方程具有非线性特征. 在独立电力系统运行过程中, 励磁控制是最基本

的和必不可少的. 同步发电机是励磁控制系统的控制对象, 研究励磁系统的动态特性, 离不开对同步发电机动态特性的分析. 柴油发电机组电磁暂态过程的数学模型包括同步发电机定子电压平衡方程和转子各绕组电磁暂态方程, 同步发电机电磁暂态方程的标准形式为

$$\begin{cases} \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} E_{fd} - \frac{1}{T_{d0}} E'_q - \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}} I_d, \\ \frac{dE''_q}{dt} = \frac{c}{T_{d0}} E_{fd} + \left(\frac{1}{T''_{d0}} - \frac{c}{T_{d0}}\right) E'_q - \frac{1}{T''_{d0}} E''_q - \\ \left(\frac{X'_d - X''_d}{T''_{d0}} + \frac{cX_d - cX'_d}{T_{d0}}\right) I_d, \\ \frac{dE''_d}{dt} = -\frac{1}{T''_{q0}} E''_d + \frac{X_q - X''_q}{T''_{q0}} I_q, \\ U_d = -RI_d + \omega X''_q I_q + \omega E''_d, \\ U_q = -RI_q - \omega X''_d I_d + \omega E''_q, \\ U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}, \end{cases} \quad (23)$$

式中: U 为定子绕组端电压, U_d 和 U_q 为定子绕组端电压的 d 轴和 q 轴分量, R 为定子绕组电阻, X 为绕组电抗, I 为各绕组电流, T 为各绕组时间常数, E'_d 为 d 轴次暂态电势, E'_q 为 q 轴暂态电势, E''_q 为 q 轴次暂态电势, E_{fd} 为励磁绕组电压, $c = \frac{X''_d - X_1}{X'_d - X_1}$.

将式(22)和式(23)联立起来, 就得到了柴油发电机组统一的数学模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a} \omega + \frac{1}{T_a} c_1 + \frac{c_2}{T_a} L - \\ \frac{1}{T_a} \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta - \frac{1}{T_a} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2\delta), \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} E_{fd} - \frac{1}{T_{d0}} E'_q - \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}} I_d, \\ \frac{dE''_q}{dt} = \frac{c}{T_{d0}} E_{fd} + \left(\frac{1}{T''_{d0}} - \frac{c}{T_{d0}}\right) E'_q - \frac{1}{T''_{d0}} E''_q - \\ \left(\frac{X'_d - X''_d}{T''_{d0}} + \frac{cX_d - cX'_d}{T_{d0}}\right) I_d, \\ \frac{dE''_d}{dt} = -\frac{1}{T''_{q0}} E''_d + \frac{X_q - X''_q}{T''_{q0}} I_q, \\ U_d = -RI_d + \omega X''_q I_q + \omega E''_d, \\ U_q = -RI_q - \omega X''_d I_d + \omega E''_q, \\ U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}. \end{cases} \quad (24)$$

式(24)是柴油发电机组的非线性数学模型, 该模型将转速与电压相互作用、相互影响的关系反映出

来,更准确地描述了转速和电压的变化规律^[1,2,8].

3 非线性H₂/H_∞综合控制器的设计(Design of nonlinear H-two/H-infinity synthetic controller)

基于非线性H₂/H_∞综合控制器的柴油发电机组综合控制系统原理图如图1所示.柴油发电机组综合控制系统由柴油机、发电机、非线性H₂/H_∞综合控制器、执行器和供油机构、励磁机等组成.非线性H₂/H_∞综合控制器由两部分组成,一部分是非线性H₂/H_∞转速控制器,另一部分是非线性H₂/H_∞电压

控制器.非线性H₂/H_∞综合控制器要考虑转速和电压的耦合作用,对转速和电压进行综合控制,将两者之间的相互影响控制在最小的范围内,从而提高独立电力系统频率和电压的稳定性.

执行器的微分方程为

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{L}{T_1} + \frac{K_1}{T_1}u_1. \quad (25)$$

励磁机的微分方程为

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = -\frac{E_{fd}}{T_2} + \frac{K_2}{T_2}u_2. \quad (26)$$

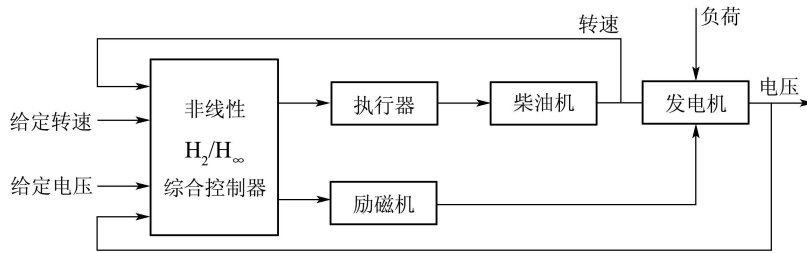


图1 柴油发电机组综合控制系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of diesel-generator set synthetic control system

Step 1 设计非线性H₂/H_∞转速控制器.

将式(25)和式(22)联立可得到柴油机调速系统的非线性数学模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0, \\ \frac{dL}{dt} = -\frac{L}{T_1} + \frac{K_1}{T_1}u_1, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a}\omega + \frac{1}{T_a}c_1 + \frac{c_2}{T_a}L - \frac{1}{T_a}\frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta - \frac{1}{T_a}\frac{U^2}{2}\frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2\delta). \end{cases} \quad (27)$$

由于式(27)具有非线性特性,这里应用直接反馈线性化的方法,对式(27)进行线性化.令:

$$\begin{aligned} x_1 &= \delta, \quad x_2 = (\omega - 1)\omega_0, \\ x_3 &= \frac{T_b}{T_a}\omega + \frac{1}{T_a}c_1 + \frac{c_2}{T_a}L - \frac{1}{T_a}\frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta - \frac{1}{T_a}\frac{U^2}{2}\frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \sin(2\delta), \end{aligned}$$

则式(27)可写成

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \omega_0 x_3 + d_1 w, \\ \dot{x}_3 = \frac{T_b}{T_a}x_3 + \frac{c_2 K_1}{T_a T_1}u_1 - \frac{c_2}{T_a T_1}L - \frac{E'_q U \omega_0}{T_a X'_d} \cos \delta (\omega - 1) - \frac{U^2 \omega_0 (X'_d - X_q)}{T_a X'_d X_q} \cos(2\delta) (\omega - 1), \end{cases} \quad (28)$$

式中 $d_1 w$ 为采用H₂/H_∞控制方法时设定的干扰信号,包括扰动转矩和建模误差等引起的等价扰动.

指定虚拟控制量

$$\begin{aligned} v &= \frac{c_2 K_1}{T_a T_1}u_1 - \frac{c_2}{T_a T_1}L - \frac{E'_q U \omega_0}{T_a X'_d} \cos \delta (\omega - 1) - \\ &\frac{U^2 \omega_0 (X'_d - X_q)}{T_a X'_d X_q} \cos(2\delta) (\omega - 1), \end{aligned} \quad (29)$$

则式(28)变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \omega_0 x_3 + d_1 w, \\ \dot{x}_3 = \frac{T_b}{T_a}x_3 + v. \end{cases} \quad (30)$$

式(30)写成矩阵形式为

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 v, \quad (31)$$

式中:

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_0 \\ 0 & 0 & \frac{T_b}{T_a} \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

定义动态性能评价信号为

$$\begin{cases} z_\infty = C_1 x + D_{11} w + D_{12} v, \\ z_2 = C_2 x + D_{21} w + D_{22} v, \end{cases} \quad (32)$$

式中:

$$C_1 = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & q_{12} & 0 \\ 0 & 0 & q_{13} \end{bmatrix}, D_{11} = D_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} q_{21} & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & q_{23} \end{bmatrix}, D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_1 \end{bmatrix}, D_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_2 \end{bmatrix},$$

C₁, C₂, D₁₁, D₁₂, D₂₁, D₂₂为加权矩阵, q_{ij} > 0 (i = 1, 2; j = 1, 2, 3)和r_i > 0 (i = 1, 2)为加权系数. 通过改变加权系数选择最优的性能组合, 包括独立电力系统稳定性、频率调节精度及调速系统的低能量损耗等.

对于如图2所示的控制系统, 要求设计一个控制器F, 使得闭环系统是渐进稳定的, 且从w到z_∞的闭环传递函数T_∞(s)的H_∞范数不超过一个给定的上界, 以保证闭环系统对由w进入的不确定性具有鲁棒稳定性; 同时使得w到z₂的闭环传递函数T₂(s)的H₂范数尽可能小, 以保证用H₂范数度量的系统性能处于一个较好的水平, 这样的控制问题称为H₂/H_∞控制问题.

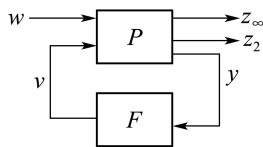


图2 H₂/H_∞控制问题的模型

Fig. 2 Model of H₂/H_∞ control problem

由式(31)(32)可得基于混合H₂/H_∞控制理论的增广被控对象为

$$P = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

控制器F可以由对应的增广被控对象P求解.

MATLAB 软件中的LMI工具箱提供了求解H₂/H_∞控制问题的msfsyn.m函数, 该函数可用于求解图2所示的多目标H₂/H_∞状态反馈控制器v = Fx的反馈系数F. 对于所有的参数摄动以及外部干扰, 可以使闭环系统稳定, 且达到下列性能指标(γ₀, ν₀表示最小化的扰动抑制度).

1) 最优H_∞控制.

$$\|T_{\infty}\|_{\infty} = \sup_{\omega} \bar{\sigma}[T_{\infty}(j\omega)] < \gamma_0, \quad (34)$$

即H_∞范数极小化, 或简单地说, 系统频率响应最大奇异值的峰值极小化.

2) 最优H₂控制.

$$\|T_2\|_2 = \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}[T_2^T(j\omega)T_2(j\omega)]d\omega\right)^{\frac{1}{2}} < \nu_0, \quad (35)$$

即H₂范数极小化, tr(·)表示矩阵“·”的迹.

3) H₂/H_∞控制.

闭环系统极点位于左半开复平面, 且使得性能指标α||T_∞||_∞² + β||T₂||₂²最小化.

对于被控对象P, 有H₂/H_∞状态反馈控制器

$$v = Fx = [f_1 \ f_2 \ f_3] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = f_1x_1 + f_2x_2 + f_3x_3. \quad (36)$$

将式(29)与式(36)联立解得

$$u_1 = \frac{1}{K_1}L + \frac{T_aT_1}{c_2K_1}Fx + \frac{E'_qU\omega_0T_1}{c_2K_1X'_d} \cos \delta(\omega - 1) + \frac{U^2\omega_0T_1(X'_d - X_q)}{c_2K_1X'_dX_q} \cos(2\delta)(\omega - 1), \quad (37)$$

即为所求得柴油机非线性H₂/H_∞转速控制律. 将x₁, x₂, x₃代入式(37)即得柴油机非线性H₂/H_∞转速控制律的实用化形式

$$u_1 = \frac{1}{K_1}L + \frac{T_aT_1}{c_2K_1}f_1\delta + \frac{T_aT_1}{c_2K_1}f_2(\omega - 1)\omega_0 + \frac{T_bT_1}{c_2K_1}f_3\omega - \frac{T_1}{c_2K_1} \frac{E'_qU}{X'_d} f_3 \sin \delta - \frac{T_1}{c_2K_1} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_dX_q} f_3 \sin(2\delta) + \frac{T_1}{c_2K_1} f_3c_1 + \frac{T_1}{K_1} f_3L + \frac{E'_qU\omega_0T_1}{c_2K_1X'_d} \cos \delta(\omega - 1) + \frac{U^2\omega_0T_1(X'_d - X_q)}{c_2K_1X'_dX_q} \cos(2\delta)(\omega - 1). \quad (38)$$

Step 2 设计非线性H₂/H_∞电压控制器. 将式(26)和式(24)的前3项联立可得到同步发电机调速系统的非线性数学模型

$$\begin{cases} \frac{dE_{fd}}{dt} = -\frac{E_{fd}}{T_2} + \frac{K_2}{T_2}u_2, \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}}E_{fd} - \frac{1}{T_{d0}}E'_q - \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}}I_d, \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a\omega_0}\omega + \frac{1}{T_a\omega_0}c_1 + \frac{c_2}{T_a\omega_0}L - \frac{1}{T_a\omega_0} \frac{E'_qU}{X'_d} \sin \delta - \frac{1}{T_a\omega_0} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_dX_q} \sin(2\delta). \end{cases} \quad (39)$$

由于阻尼绕组对励磁控制影响较弱,因此在设计控制器时可以不考虑式(24)的第4项和第5项.

将 $\frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta + \frac{U^2 X'_d - X_q}{2 X'_d X_q} \sin(2\delta)$ 用 P_e 表示,把 P_e 看作外部扰动,则式(39)变为

$$\begin{cases} \frac{dE_{fd}}{dt} = -\frac{E_{fd}}{T_2} + \frac{K_2}{T_2} u_2, \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} E_{fd} - \frac{1}{T_{d0}} E'_q - \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}} I_d, \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a \omega_0} \omega + \frac{1}{T_a \omega_0} c_1 + \frac{c_2}{T_a \omega_0} L - \frac{1}{T_a \omega_0} P_e. \end{cases} \quad (40)$$

由于 E'_q 不容易测量,不利于设计状态反馈控制器,这里选取电压的误差 ΔU 作为状态变量,只需将式(40)中第3项的 E'_q 转换成 ΔU 即可.

根据变量数据之间的关系有式(41)成立.

$$U = E'_q - c_3 \delta. \quad (41)$$

U 与 ΔU 之间的关系为

$$\Delta U = U - U_0, \quad (42)$$

式中 U_0 为定子绕组端电压初始值.

将式(41)代入式(42)得

$$E'_q = U_0 + \Delta U + c_3 \delta. \quad (43)$$

将式(43)代入式(40)得

$$\begin{cases} \frac{dE_{fd}}{dt} = -\frac{E_{fd}}{T_2} + \frac{K_2}{T_2} u_2, \\ \frac{d\Delta U}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} E_{fd} - \frac{1}{T_{d0}} \Delta U - \frac{1}{T_{d0}} c_3 \delta - \\ \quad c_3 \omega + \left(c_3 - \frac{1}{T_{d0}}\right) - \frac{X_d - X'_d}{T_{d0}} I_d, \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a \omega_0} \omega + \frac{1}{T_a \omega_0} c_1 + \frac{c_2}{T_a \omega_0} L - \frac{1}{T_a \omega_0} P_e. \end{cases} \quad (44)$$

式(44)写成矩阵形式为

$$\dot{x}' = A' x' + B'_1 w' + B'_2 u_2, \quad (45)$$

式中:

$$x' = \begin{bmatrix} E_{fd} \\ \Delta U \\ \delta \\ \omega \end{bmatrix}, \quad A' = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{d0}} & -\frac{1}{T_{d0}} & -\frac{c_3}{T_{d0}} & -c_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_b}{T_a \omega_0} \end{bmatrix},$$

$$B'_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{X_d - X'_d}{T_{d0}} & 0 & 0 & c_3 - \frac{1}{T_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & \frac{c_2}{T_a \omega_0} & -\frac{1}{T_a \omega_0} & \frac{c_1}{T_a \omega_0} \end{bmatrix},$$

$$B'_2 = \begin{bmatrix} \frac{K_2}{T_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad w' = \begin{bmatrix} I_d \\ L \\ P_e \\ 1 \end{bmatrix}.$$

定义动态性能评价信号为

$$\begin{cases} z'_\infty = C'_1 x' + D'_{11} w' + D'_{12} u_2, \\ z'_2 = C'_2 x' + D'_{21} w' + D'_{22} u_2, \end{cases} \quad (46)$$

式中:

$$C'_1 = \begin{bmatrix} q_{14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{17} \end{bmatrix},$$

$$C'_2 = \begin{bmatrix} q_{24} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{26} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{27} \end{bmatrix}, \quad D'_{12} = \begin{bmatrix} r_3 \\ r_4 \\ r_5 \\ r_6 \end{bmatrix},$$

$$D'_{22} = \begin{bmatrix} r_7 \\ r_8 \\ r_9 \\ r_{10} \end{bmatrix}, \quad D'_{11} = D'_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$C'_1, C'_2, D'_{11}, D'_{12}, D'_{21}, D'_{22}$ 为加权矩阵, $q_{ij} > 0 (i = 1, 2; j = 4, 5, 6, 7)$ 和 $r_i > 0 (i = 3, 4, \dots, 10)$ 为加权系数. 通过改变加权系数选择最优的性能组合,包括独立电力系统稳定性、电压调节精度及励磁系统的低能量损耗等.

由式(45)(46)可得基于混合 H_2/H_∞ 控制理论的增广被控对象为

$$P' = \begin{bmatrix} A' & B'_1 & B'_2 \\ C'_1 & D'_{11} & D'_{12} \\ C'_2 & D'_{21} & D'_{22} \end{bmatrix}. \quad (47)$$

对于被控对象 P' , 有 H_2/H_∞ 状态反馈控制器

$$u_2 = F' x' = [f'_1 \ f'_2 \ f'_3 \ f'_4] \begin{bmatrix} E_{fd} \\ \Delta U \\ \delta \\ \omega \end{bmatrix} =$$

$$f'_1 E_{fd} + f'_2 \Delta U + f'_3 \delta + f'_4 \omega, \quad (48)$$

即为所求柴油发电机组非线性 H_2/H_∞ 电压控制律.

Step 3 设计非线性H₂/H_∞综合控制器.

将式(38)和式(48)联立起来就获得了柴油发电机组非线性H₂/H_∞综合控制器^[3~7,9~12]

$$\begin{cases} u_1 = \\ \frac{1}{K_1}L + \frac{T_a T_1}{c_2 K_1} f_1 \delta + \frac{T_a T_1}{c_2 K_1} f_2 (\omega - 1) \omega_0 + \\ \frac{T_b T_1}{c_2 K_1} f_3 \omega - \frac{T_1}{c_2 K_1} \frac{E'_q U}{X'_d} f_3 \sin \delta - \\ \frac{T_1}{c_2 K_1} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} f_3 \sin(2\delta) + \frac{T_1}{c_2 K_1} f_3 c_1 + \\ \frac{T_1}{K_1} f_3 L + \frac{E'_q U \omega_0 T_1}{c_2 K_1 X'_d} \cos \delta (\omega - 1) + \\ \frac{U^2 \omega_0 T_1 (X'_d - X_q)}{c_2 K_1 X'_d X_q} \cos(2\delta) (\omega - 1), \\ u_2 = f'_1 E_{fd} + f'_2 \Delta U + f'_3 \delta + f'_4 \omega. \end{cases} \quad (49)$$

式(49)考虑了转速和电压的耦合作用, 并且对两者进行综合控制, 可以提高转速和电压的动态精度, 改善独立电力系统的稳定性.

4 计算机仿真结果(Results of computer simulation)

本文设计的柴油发电机组综合控制系统的主要参数如下:

柴油发电机组的功率为1250 kW; 额定转速为 $n = 1500 \text{ r/min}$; 机组转动惯量 $J = 71.822 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 机组阻尼系数 $D = 5.54$; 发电机磁极对数 $p = 2$; 柴油机额定扭矩为11.9 kN·m; 输出轴的最大行程为10 mm.

同步发电机的额定电压为390 V; 额定电流为2310 A; 功率因数为0.8; 额定频率为50 Hz; 励磁机励磁电压为83 V, 励磁电流为7.7 A.

设计基于混合H₂/H_∞控制理论的非线性综合控制器, 取式(31)的干扰信号系数 $d_1 = 0.1$, 取式(32)的加权系数 $q_{11} = 0.002$, $q_{12} = 0.4$, $q_{13} = 0.5$, $r_1 = 0.01$, $q_{21} = 0.002$, $q_{22} = 0.4$, $q_{23} = 0.5$, $r_2 = 0.01$.

相应的矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 314 \\ 0 & 0 & -0.4328 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} 0.002 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$D_{12} = D_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.01 \end{bmatrix}.$$

利用LMI工具箱, 求得状态反馈控制器

$$F = [-0.3582 \quad -35.1042 \quad -157.7578]. \quad (50)$$

取式(46)的加权系数 $q_{14} = 0.1$, $q_{15} = 2800$, $q_{16} = 0.1$, $q_{17} = 0.1$, $q_{24} = 0.1$, $q_{25} = 2800$, $q_{26} = 0.1$, $q_{27} = 0.1$, $r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 1$, $r_7 = r_8 = r_9 = r_{10} = 1$.

相应的矩阵为

$$A' = \begin{bmatrix} -0.4545 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0011 & -0.0011 & -0.0002 & -0.2043 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0014 \end{bmatrix},$$

$$B'_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0021 & 0 & 0 & 0.2032 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -0.0004 & -0.0028 & 0.0042 \end{bmatrix},$$

$$C'_1 = C'_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$D'_{12} = D'_{22} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T.$$

利用LMI工具箱, 求得状态反馈控制器

$$F' = [-0.027 \quad -697.798 \quad -0.023 \quad -0.025]. \quad (51)$$

将式(50)和式(51)代入式(49)便得到柴油发电机组非线性H₂/H_∞综合控制器.

加权函数的优化是H₂/H_∞控制的难点, 须经过反复试选. 每次试选后, 利用LMI工具箱求状态反馈系数, 代入仿真模型, 进行特性试验, 以获取最好的综合性能指标. 对所设计的系统进行了计算机仿真, 图3和图4分别给出了系统在突加100%负荷电压和角速度的动态特性曲线, 图5和图6分别给出了系统在突减100%负荷电压和角速度的动态特性曲线, 两个变量均为标么值, 其中: 1号曲线代表非线性H₂/H_∞综合控制器的作用结果, 2号曲线代表常规控制器的作用结果.

突加100%负荷时, 应用非线性H₂/H_∞综合控制器的动态指标为: 动态调速率 $\Phi = 0.15\%$, 稳定时间 $T = 0.3 \text{ s}$, 动态调压率 $\Phi = 11.49\%$, 稳定时间 $T = 0.2 \text{ s}$; 应用常规控制器的动态指标为: 动态调速率 $\Phi = 7\%$, 稳定时间 $T = 3 \text{ s}$, 系统的动态调压率 $\Phi = 12.31\%$, 稳定时间 $T = 1.5 \text{ s}$. 突减100%负荷时, 应用非线性H₂/H_∞综合控制器的动态指标为: 动态调速率 $\Phi = 0.23\%$, 稳定时间 $T = 0.3 \text{ s}$, 系

统的动态调压率 $\Phi = 11.96\%$, 稳定时间 $T = 0.3\text{ s}$; 应用常规控制器的动态指标为: 动态调速率 $\Phi = 4.77\%$, 稳定时间 $T = 3\text{ s}$, 动态调压率 $\Phi = 12.36\%$, 稳定时间 $T = 1.5\text{ s}$. 通过计算机仿真可以看到运用非线性 H_2/H_∞ 综合控制器后, 动态调速率和调压率在突加、突减负荷时都有所下降, 稳定时间大幅度缩短.

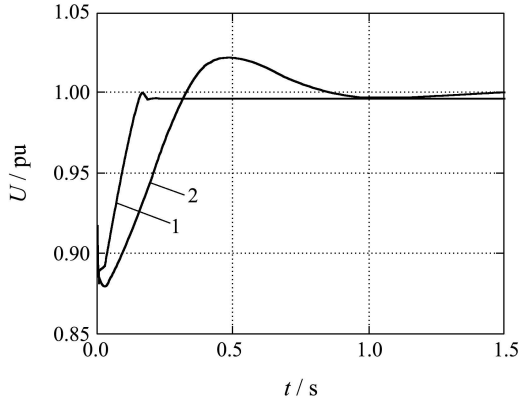


图3 突加100%负荷时系统的电压动态响应
Fig. 3 Voltage dynamic response of system on suddenly increasing 100% load

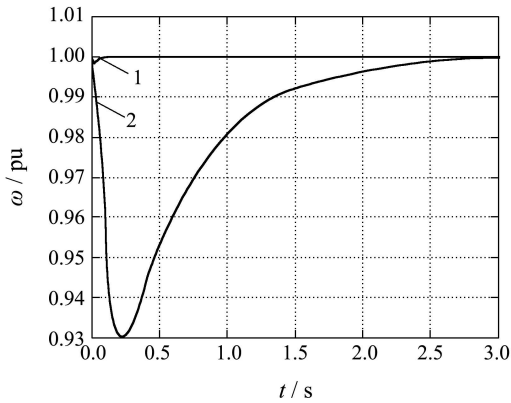


图4 突加100%负荷时系统的角速度动态响应
Fig. 4 Angular velocity dynamic response of system on suddenly increasing 100% load

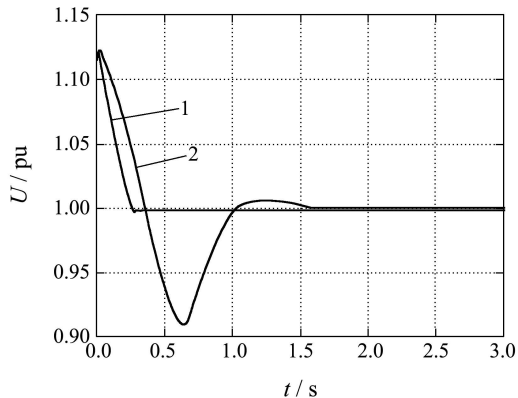


图5 突减100%负荷时系统的电压动态响应
Fig. 5 Voltage dynamic response of system on suddenly decreasing 100% load

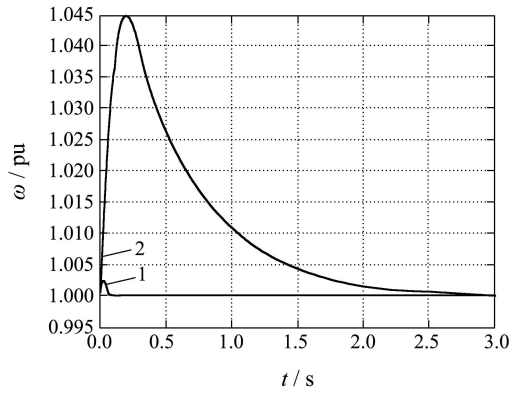


图6 突减100%负荷时系统的角速度动态响应
Fig. 6 Angular velocity dynamic response of system on suddenly decreasing 100% load

为了验证非线性 H_2/H_∞ 综合控制器的鲁棒性, 图7和图8分别给出了系统在突加不同负荷时电压和角速度的动态特性曲线, 其中1号曲线代表突加50%负荷时的响应曲线, 2号曲线代表突加100%负荷时的响应曲线. 从仿真结果可以看到, 非线性 H_2/H_∞ 综合控制器针对突加不同负荷时均表现出良好的控制效果, 这表明本文设计的控制器具有较强的鲁棒性.

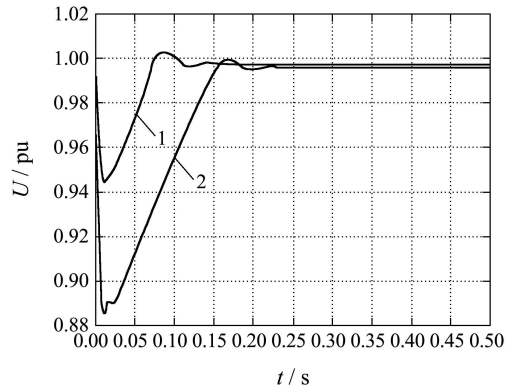


图7 突加不同负荷时系统的电压动态响应
Fig. 7 Voltage dynamic response of system on suddenly increasing different load

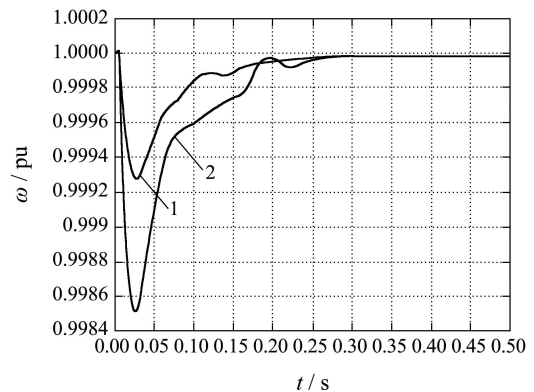


图8 突加不同负荷时系统的角速度动态响应
Fig. 8 Angular velocity dynamic response of system on suddenly increasing different load

本文运用非线性 H_2/H_∞ 综合控制器有效地提高了调速系统和调压系统的动态精度, 而动态精度的提高减弱了转速和电压之间的相互影响和相互作用, 解决了转速和电压的综合控制问题, 改善了独立电力系统的稳定性。

5 结论(Conclusion)

本文将直接反馈线性化和混合 H_2/H_∞ 控制理论用于柴油发电机组综合控制器的设计中, 建立了柴油发电机组的非线性鲁棒数学模型, 利用MATLAB软件求得了非线性 H_2/H_∞ 综合控制律。仿真结果表明, 非线性 H_2/H_∞ 综合控制器有效地提高了系统的动态精度和抑制扰动的能力, 改善了独立电力系统的稳定性。

参考文献(References):

- [1] 黄曼磊, 李殿璞, 唐嘉亨. 船舶电站柴油机调速系统 H_∞ 控制器的设计[J]. 中国造船, 2001, 2(4): 46 – 51.
(HUANG Manlei, LI Dianpu, TANG Jiaheng. Design of H_∞ controller for diesel engine speed regulation system of ship power station[J]. *Shipbuilding of China*, 2001, 42(4): 46 – 51.)
- [2] 黄曼磊, 王常虹. 船舶电站柴油发电机组的非线性数学模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(1): 15 – 19, 47.
(HUANG Manlei, WANG Changhong. Nonlinear mathematical model of diesel-generator set on ship[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, 27(1): 15 – 19, 47.)
- [3] 蔡超豪. 非线性 H_∞ 励磁控制器的设计[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 50 – 52.
(CAI Chaohao. Design of nonlinear H_∞ excitation controller[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(3): 50 – 52.)
- [4] 蔡超豪. 静止无功补偿器的 H_2/H_∞ 保性能控制器设计[J]. 电力科学与工程, 2006, 22(1): 62 – 66.
(CAI Chaohao. Design of H_2/H_∞ guaranteed cost controller for SVC[J]. *Electric Power Science & Engineering*, 2006, 22(1): 62 – 66.)
- [5] 孙郁松, 孙元章, 卢强, 等. 水轮机调节系统非线性 H_∞ 控制规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 56 – 59, 65.
(SUN Yusong, SUN Yuanzhang, LU Qiang, et al. Research on nonlinear robust control strategy for hydroelectric generator's valve[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(2): 56 – 59, 65.)
- [6] 李文磊, 井元伟, 刘晓平. 汽轮发电机主汽门开度非线性鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(3): 387 – 390.
(LI Wenlei, JING Yuanwei, LIU Xiaoping. Nonlinear robust control for turbine main steam valve[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(3): 387 – 390.)
- [7] 王进华. 混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 45 – 53.
(WANG Jinhua. Design of mixed H_2/H_∞ controller[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(1): 45 – 53.)
- [8] 黄曼磊, 李殿璞, 刘宏达. 柴油机双脉冲调速器的仿真研究[J]. 船舶工程, 2002, 24(3): 36 – 38.
(HUANG Manlei, LI Dianpu, LIU Hongda. Simulation research on double-pulse speed governor of diesel engine[J]. *Ship Engineering*, 2002, 24(3): 36 – 38.)
- [9] 王进华. 线性不确定系统的给定阶最优控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 602 – 606.
(WANG Jinhua. Given order optimal controller design for linear uncertain systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 602 – 606.)
- [10] 史明光, 陈无畏. 基于博弈论的 H_2/H_∞ 混合控制及其在汽车主动悬架中的应用[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 882 – 888.
(SHI Mingguang, CHEN Wuwei. Mixed H-two/H-infinity control based on game theory and its application to the vehicle active suspension system[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 882 – 888.)
- [11] 孙运全, 孙玉坤, 刘贤兴, 等. H_2/H_∞ 保性能控制理论在静止无功发生器控制中的应用[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 641 – 646.
(SUN Yunquan, SUN Yukun, LIU Xianxing, et al. H-two/H-infinity cost-guaranteed control for the static synchronous compensator[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(6): 641 – 646.)
- [12] 张勇, 唐功友, 赵友刚, 等. 一类大时滞非线性网络控制系统的 H_∞ 保成本控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(7): 800 – 804.
(ZHANG Yong, TANG Gongyou, ZHAO Yougang, et al. Cost-guaranteed H-infinity control for a class of nonlinear networked control systems with long time-delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(7): 800 – 804.)

作者简介:

黄曼磊 (1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为船舶电力系统、船舶电力推进、鲁棒控制理论与应用、电力系统混沌控制, E-mail: mlhuang51@163.com;

宋克明 (1982—), 男, 硕士, 目前研究方向为船舶电力系统、电机与电器、鲁棒控制理论与应用;

魏志达 (1982—), 男, 硕士, 目前研究方向为船舶电力系统、电机与电器、鲁棒控制理论与应用。