

柴油发电机组非线性 H_2/H_∞ 调速器的研究

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: 船舶电力系统频率的稳定性主要取决于船舶电站柴油机调速系统的转速响应特性. 船舶电站柴油机调速系统是一个非线性控制系统, 为了分析系统的动态特性, 首先建立柴油机调速系统的非线性数学模型, 然后以此为基础设计非线性 H_2/H_∞ 调速器. 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调速器的设计, 把系统的性能要求转化为标准 H_2/H_∞ 控制问题, 获得了柴油机非线性 H_2/H_∞ 转速控制律. 计算机仿真结果表明, 设计的非线性 H_2/H_∞ 调速器有效地提高了系统的动态精度和抑制扰动的能力, 改善了船舶电力系统频率的稳定性.

关键词: 柴油发电机组; 调速器; 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 speed regulator for a diesel-generator set

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

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

Abstract: The frequency stability of a ship power system is determined by the speed response characteristic of the diesel engine speed regulation system, which is a nonlinear control system. To analyze the dynamic characteristic of this system, a nonlinear mathematical model is built first, and then, a nonlinear H-two/H-infinity controller is designed. In combining the direct feedback linearization with the mixed H-two/H-infinity control theory to design the speed regulator for the diesel-generator, we transform the specifications of the system to that of a standard H-two/H-infinity control problem, and then develop a nonlinear H-two/H-infinity speed control law for the diesel engine. The computer simulation results show that the nonlinear H-two/H-infinity speed regulator effectively improves the dynamic precision of the system and suppresses the load disturbance, thus providing desirable frequency stability for a ship power system.

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

1 引言(Introduction)

船舶电站通常以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. 同步发电机的交流频率由柴油机的转速决定, 通过分析柴油机的转速响应特性可以获得同步发电机频率的变化规律. 船舶电力系统频率的稳定性主要取决于柴油机调速系统的转速特性.

H_∞ 控制理论是于80年代初期开始迅速发展的一门鲁棒控制理论, 经过许多研究人员10多年的努力, 已经成为分析和设计不确定系统的一种强有力的工具. H_∞ 控制理论虽然能较好地解决系统的鲁棒性问题, 但这是以牺牲系统的其它性能为代价的, 控制器的设计具有一定的保守性. 鉴于此, Bernstein于1989年提出了混合 H_2/H_∞ 控制的设计思想. 由于这一方法能较好地解决系统的鲁棒性和系

统性能问题, 因而一提出就得到广泛关注, 并取得了很大发展, 成为控制理论及应用研究的热点问题之一. 混合 H_2/H_∞ 控制减小了 H_∞ 控制的保守性, 具有较好的时域和频域特性.

由于船舶电站柴油机调速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. 柴油发电机组参数和结构的不确定性决定了它是一个模型不确定的控制对象, 这些不确定因素将会影响所设计控制器的最终使用效果. 因此, 柴油发电机组参数和结构的不确定问题是保证船舶电力系统安全稳定以及控制器设计过程中迫切需要解决的问题.

利用直接反馈线性化的方法对非线性系统线性化, 即把所有的非线性因素集中到一个含有控制量的微分方程中, 将这些非线性因素用一个虚拟控制

量来代替,使得原非线性系统实现线性化.本文直接指定虚拟控制量,简化了计算.鉴于混合 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难题,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,从而获得柴油机非线性 H_2/H_∞ 转速控制律,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,提高柴油机调速系统动态精度的目的,从而改善船舶电力系统频率的稳定性.

2 柴油机调速系统的非线性数学模型(Nonlinear mathematical model of diesel engine speed regulation system)

基于非线性 H_2/H_∞ 调速器的柴油机调速系统原理图如图1所示.柴油机调速系统由柴油机、发电机、非线性 H_2/H_∞ 调速器、执行器和供油机构组成.

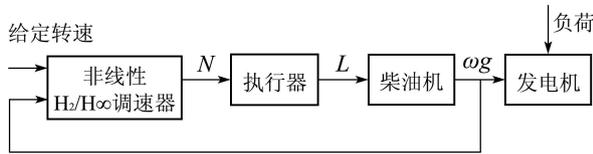


图1 基于非线性 H_2/H_∞ 调速器的柴油机调速系统原理图
Fig. 1 Principle diagram of diesel engine speed regulation system based on nonlinear H_2/H_∞ speed regulator

首先分别建立执行器和柴油发电机组的数学模型,然后在两者模型的基础上,对非线性 H_2/H_∞ 调速器进行设计.

执行器将非线性 H_2/H_∞ 调速器的控制信号 u ,转换成与输入信号成比例的输出轴位移 L ,定义执行器的时间常数为 T_1 ,增益为 K_1 ,则其传递函数可表示为

$$G_1(s) = \frac{L(s)}{u(s)} = \frac{K_1}{1 + T_1 s}. \quad (1)$$

相应的微分方程为

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{L}{T_1} + \frac{K_1}{T_1} u. \quad (2)$$

柴油机的输入量是执行器输出轴位移 L ,而输出量是柴油机曲轴角速度 ω_g ,建立柴油发电机组的运动方程,就是求取 ω_g 随 L 的变化规律^[1,2].

在平衡工况时,柴油机主力矩 M_1^0 应与发电机阻力矩 M_2^0 保持平衡,即 $M_1^0 = M_2^0$.若主力矩 M_1 或阻力矩 M_2 改变,平衡工况被破坏,则机组加速或减速,产生惯性力矩、恢复力矩和阻尼力矩.机组的运动方程可表示为

$$J \frac{d\omega_g}{dt} + D p \omega_g = M_1 - M_2. \quad (3)$$

式中: J —机组转动惯量(包括柴油机、发电机及传动装置等转动惯量); ω_g —柴油机曲轴角速度; D —与发电机阻尼绕组电阻成正比的阻尼系数; p —发电机磁极对数; M_1 —柴油机主力矩; M_2 —发电机阻力矩.

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.综合柴油机的速度特性与调整特性得到 M_1 的表达式为

$$M_1 = k_i \omega_g + b_i - aL. \quad (4)$$

式中: k_i, b_i —常数,对于各个分段, k_i, b_i 取不同的值, $i = 1, 2, \dots, n$; a —常数, $a = \frac{M_1^e}{L_e}$; M_1^e —柴油机的最大扭矩, N·m; L_e —执行器输出轴的最大行程, mm.

取额定转速所在的分段的表达式为

$$M_1 = k_1 \omega_g + b_1 - aL. \quad (5)$$

发电机阻力矩 M_2 标志着同步发电机的负荷量,突加某一负荷意味着突加一个转矩 M_2 .

把式(5)代入式(3)得

$$J \frac{d\omega_g}{dt} + D p \omega_g = k_1 \omega_g + b_1 - aL - M_2. \quad (6)$$

在船舶电力系统动态稳定性分析中,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(6)标么化得

$$T_a \frac{d\omega}{dt} = T_b \omega + c_1 - c_2 L - M_2. \quad (7)$$

其中:

$$T_a = \frac{J \omega_{g0}^2}{S_B}, T_b = \frac{k_1 \omega_{g0}^2 - D p \omega_{g0}^2}{S_B},$$

$$c_1 = \frac{b_1 \omega_{g0}}{S_B}, c_2 = \frac{a \omega_{g0}}{S_B},$$

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

$$M_2 = \frac{P_e}{\omega}. \quad (8)$$

式中 P_e 为同步发电机的输出功率.将式(8)代入式(7)得

$$T_a \frac{d\omega}{dt} = T_b \omega + c_1 - c_2 L - \frac{P_e}{\omega}. \quad (9)$$

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(9)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(9)变为

$$T_a \frac{d\omega}{dt} = T_b \omega + c_1 - c_2 L - P_e. \quad (10)$$

式(10)两边同除以 T_a 得到

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a} \omega + \frac{1}{T_a} c_1 - \frac{c_2}{T_a} L - \frac{1}{T_a} P_e. \quad (11)$$

凸极同步发电机的输出功率为

$$P_e = \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X'_q}{X'_d X'_q} \sin(2\delta). \quad (12)$$

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

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0. \quad (13)$$

其中: ω 为标么值, δ 和 t 为实际值, $\omega_0 = 100\pi$.

将式(12)代入式(11),并与式(2)和式(13)联立就得到柴油机调速系统的非线性数学模型

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a} \omega + \frac{1}{T_a} c_1 - \frac{c_2}{T_a} L - \frac{1}{T_a} \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta - \frac{U^2 (X'_d - X'_q)}{2T_a X'_d X'_q} \sin(2\delta), \\ \frac{dL}{dt} = -\frac{L}{T_1} + \frac{K_1}{T_1} u. \end{cases} \quad (14)$$

3 非线性H₂/H_∞调速器的设计(Design of nonlinear H-two/H-infinity speed regulator)

由于式(14)具有非线性特性,这里应用直接反馈线性化的方法,对式(14)进行线性化.令

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

则式(14)可写成

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \omega_0 x_3 + d_1 w, \\ \dot{x}_3 = \frac{T_b}{T_a} x_3 - \frac{c_2 K_1}{T_a T_1} u + \frac{c_2}{T_a T_1} L - \frac{E'_q U \omega_0}{T_a X'_d} \cos \delta (\omega - 1) - \frac{U^2 \omega_0 (X'_d - X'_q)}{T_a X'_d X'_q} \cos(2\delta) (\omega - 1). \end{cases} \quad (15)$$

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

$$v = \frac{c_2}{T_a T_1} L - \frac{c_2 K_1}{T_a T_1} u - \frac{E'_q U \omega_0}{T_a X'_d} \cos \delta (\omega - 1) - \frac{U^2 \omega_0 (X'_d - X'_q)}{T_a X'_d X'_q} \cos(2\delta) (\omega - 1). \quad (16)$$

则式(15)变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \omega_0 x_3 + d_1 w, \\ \dot{x}_3 = \frac{T_b}{T_a} x_3 + v. \end{cases} \quad (17)$$

式(17)写成矩阵形式为

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 v. \quad (18)$$

式中:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_0 \\ 0 & 0 & \frac{T_b}{T_a} \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

定义动态性能评价信号为

$$\begin{cases} z_\infty = C_1 x + D_{11} w + D_{12} v, \\ z_2 = C_2 x + D_{21} w + D_{22} v. \end{cases} \quad (19)$$

式中:

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

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

$$D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_1 \end{bmatrix}, D_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_2 \end{bmatrix},$$

$C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ 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,包括船舶电力系统稳定性、频率调节精度及控制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 $T_\infty(s)$ 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 z_2 的闭环传递函数 $T_2(s)$ 的 H_2 范数尽可能小,以保证用 H_2 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 H_2/H_∞ 控制问题。

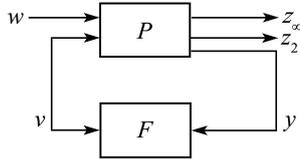


图2 H_2/H_∞ 控制问题的模型

Fig. 2 Model of H_2/H_∞ control problem

由式(18)(19)可得基于混合 H_2/H_∞ 控制理论的增广被控对象为

$$P = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

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 H_2/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 H_2/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(γ_0, ν_0 表示最小化的扰动抑制度)。

1) 最优 H_∞ 控制。

$$\|T_\infty\|_\infty = \sup_\omega \bar{\sigma}[T_\infty(j\omega)] < \gamma_0, \quad (21)$$

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 H_2 控制。

$$\|T_2\|_2 = \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{tr}[T_2^T(j\omega)T_2(j\omega)]d\omega \right)^{\frac{1}{2}} < \nu_0, \quad (22)$$

即 H_2 范数极小化, $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵 (\cdot) 的迹。

3) H_2/H_∞ 控制。

闭环系统极点位于左半开复平面,且使得性能指标 $\alpha\|T_\infty\|_\infty^2 + \beta\|T_2\|_2^2$ 最小化。

对于被控对象 P , 有 H_2/H_∞ 状态反馈控制器:

$$v = Fx = [f_1 \ f_2 \ f_3] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = f_1x_1 + f_2x_2 + f_3x_3. \quad (23)$$

将式(16)与式(23)联立解得

$$u = \frac{1}{K_1}L - \frac{T_aT_1}{c_2K_1}Fx - \frac{E'_qU\omega_0T_1}{c_2K_1X'_d} \cos\delta(\omega - 1) - \frac{U^2\omega_0T_1(X'_d - X_q)}{c_2K_1X'_dX_q} \cos(2\delta)(\omega - 1). \quad (24)$$

即为所求得柴油机非线性 H_2/H_∞ 转速控制律^[3~8]。将 x_1, x_2, x_3 代入式(24)即得柴油机非线性 H_2/H_∞ 转速控制律的实用化形式:

$$u = \frac{1}{K_1}L - \frac{T_aT_1}{c_2K_1}f_1\delta - \frac{T_aT_1}{c_2K_1}f_2(\omega - 1)\omega_0 - \frac{T_bT_1}{c_2K_1}f_3\omega + \frac{T_1}{c_2K_1} \frac{E'_qU}{X'_d} f_3 \sin\delta - \frac{T_1}{c_2K_1}f_3c_1 + \frac{T_1}{c_2K_1} \frac{U^2}{2} \frac{X'_d - X_q}{X'_dX_q} f_3 \sin(2\delta) + \frac{T_1}{K_1}f_3L - \frac{E'_qU\omega_0T_1}{c_2K_1X'_d} \cos\delta(\omega - 1) - \frac{U^2\omega_0T_1(X'_d - X_q)}{c_2K_1X'_dX_q} \cos(2\delta)(\omega - 1). \quad (25)$$

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

本文设计的柴油机调速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 $n = 1500$ r/min;机组转动惯量 $J = 71.822$ kg·m²;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。

设计基于混合 H_2/H_∞ 控制理论的非线性转速控制器,取式(18)的干扰信号系数 $d_1 = 0.1$,取式(19)的加权系数

$$q_{11} = 0.001, q_{12} = 0.3, q_{13} = 0.4, r_1 = 0.01, \\ q_{21} = 0.001, q_{22} = 0.3, q_{23} = 0.4, r_2 = 0.01.$$

加权函数的优化是 H_2/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。

相应的矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 314 \\ 0 & 0 & -0.4328 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix}, \\ D_{12} = D_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.01 \end{bmatrix}.$$

利用LMI工具箱, 求得状态反馈控制器:

$$F = [-0.1565 \quad -25.7953 \quad -135.8669]. \quad (26)$$

将 F 值代入式(25)便得柴油机非线性 H_2/H_∞ 调速器.

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和突减100%负荷时的动态特性曲线. 曲线中包括角速度、功角、输出轴位移、功率4个变量的变化规律, 其中功角的单位为 $^\circ$, 输出轴位移的单位为mm, 其余变量均为标么值.

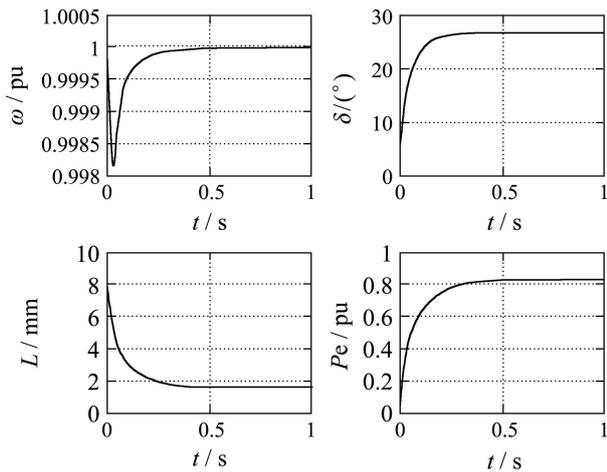


图 3 应用非线性 H_2/H_∞ 调速器突加100%负荷时系统的动态响应

Fig. 3 Dynamic response of system on suddenly increasing 100% load applying nonlinear H_2/H_∞ speed regulator

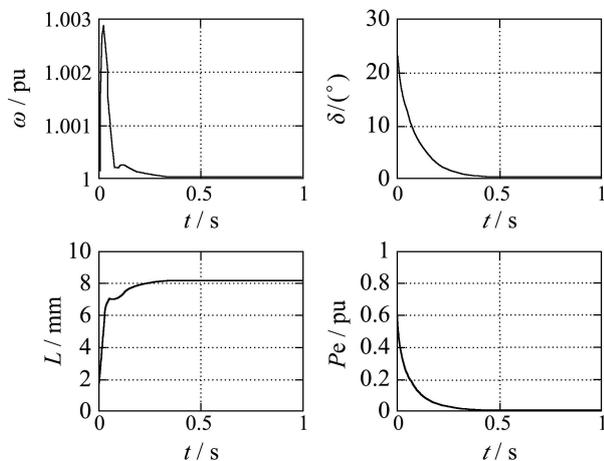


图 4 应用非线性 H_2/H_∞ 调速器突减100%负荷时系统的动态响应

Fig. 4 Dynamic response of system on suddenly decreasing 100% load applying nonlinear H_2/H_∞ speed regulator

在突加100%负荷时, 柴油机的转速很快下降到最小值, 由于非线性 H_2/H_∞ 调速器的作用, 转速很快恢复到所规定的范围内, 系统的动态调速率 $\Phi =$

0.18%, 稳定时间 $T = 0.6$ s. 在突减100%负荷时, 柴油机的转速很快上升到最大值, 由于非线性 H_2/H_∞ 调速器的作用, 转速很快恢复到所规定的范围内, 系统的动态调速率 $\Phi = 0.29%$, 稳定时间 $T = 0.4$ s.

该柴油机调速系统采用常规的电子调速器时, 突加100%负荷时动态调速率 $\Phi = 7%$, 稳定时间 $T = 3$ s; 突减100%负荷时动态调速率 $\Phi = 4.82%$, 稳定时间 $T = 3$ s, 图5和图6分别给出了系统在突加和突减100%负荷时的动态特性曲线. 通过计算机仿真可以看到运用非线性 H_2/H_∞ 调速器后, 动态调速率在突加、突减负荷时都明显下降, 稳定时间大幅度缩短. 调速系统动态精度的提高, 保证了船舶电力系统频率的稳定. 由于频率与电压相互影响、相互作用, 调速系统精度的提高减弱了频率对电压的影响, 有利于保持船舶电力系统电压的稳定.

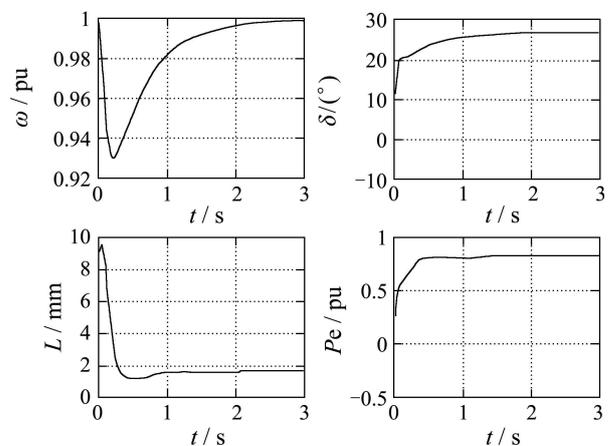


图 5 应用电子调速器突加100%负荷时系统的动态响应
Fig. 5 Dynamic response of system on suddenly increasing 100% load applying electronic speed regulator

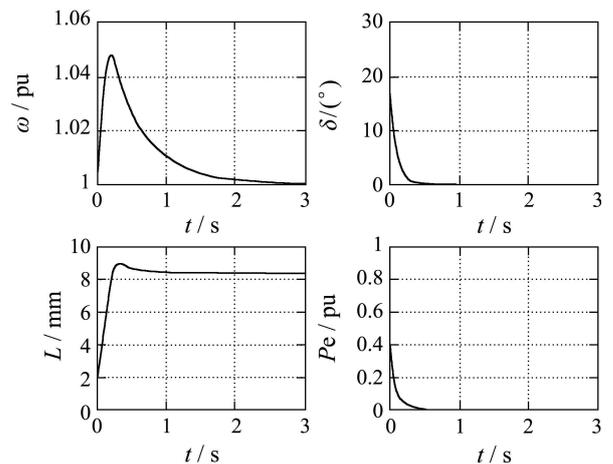


图 6 应用电子调速器突减100%负荷时系统的动态响应
Fig. 6 Dynamic response of system on suddenly decreasing 100% load applying electronic speed regulator

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调速器的设计中,建立了柴油机调速系统的非线性鲁棒数学模型,利用MATLAB软件求得了非线性 H_2/H_∞ 控制律.仿真结果表明,非线性 H_2/H_∞ 调速器有效地提高了系统的动态精度和抑制扰动的能力,改善了船舶电力系统频率的稳定性.

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,2001,42(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,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.)
- [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 and 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 Chinese Society for Electrical Engineering*, 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] 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.)

作者简介:

黄曼磊 (1969—),男,博士,教授,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.