

基于差分进化算法的矿用电动轮自卸车 柴油发电机组转速 H_2/H_∞ 控制器优化设计

廖高煜, 周少武*, 李苏城

(湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 柴油发电机组是矿用电动轮自卸车动力系统的核心部分. 为了研究电动轮自卸车动力系统的稳定性, 首先建立了柴油发电机组调速系统的数学模型, 然后在此基础上设计非线性 H_2/H_∞ 控制器. 传统 LMI 方法求解 H_2/H_∞ 控制器时, 存在引入附加条件的缺点. 因此, 采用一种改进的多目标差分进化算法 (IMOSADE) 对 H_2/H_∞ 控制器参数进行优化. 数值仿真结果表明 IMOSADE 算法得到的控制器具有更好的鲁棒性.

关键词: 矿用电动轮自卸车; 柴油发电机组; H_2/H_∞ 控制; 差分进化算法

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)01-0062-08

The Optimal Design of H_2/H_∞ Controller for Diesel Generator Set of Mining Electric Wheels Dump Truck Based on Differential Evolution Algorithm

Liao Gaoyu, Zhou Shaowu, Li Sucheng

(Hunan University of Science and Technology, School of Information and Electrical Engineering, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The diesel generator set is the most important part of the power system of the mining electric wheel dump truck. To analyze the stability of the electric wheels dump truck power system, a mathematical model of diesel generator set is established, and then, a nonlinear H_2/H_∞ controller is designed. The additional conditions are introduced when using the traditional LMIs method. Therefore, the parameters of H_2/H_∞ controller are optimized by using an improved version of multiobjective self-adaptive differential evolution (IMOSADE). Therefore, the robust performance of the system can be improved. The results of numerical simulation show that the robust performance of the controller is optimized by using the present method.

Keywords: electric wheels dump truck; diesel generator set; H_2/H_∞ control; differential evolution

近年来,我国煤炭产业发展迅速,对大型矿用电动轮自卸车的稳定性要求越来越高.大型矿用电动轮自卸车的稳定性主要取决于柴油发电机组的调速特性.由于大型矿用电动轮自卸车的柴油发电机组和牵引电机均具有非线性特性,因此,大型矿用电动轮自卸车动力系统是一个具有强非线性的复杂动态系统.

20 世纪 90 年代提出的 H_2/H_∞ 控制理论可以使系统获得良好的鲁棒稳定性.采用 H_2 性能指标能使系统获得较好的动态性能,采用 H_∞ 性能指标能较好的保证系统的抗扰能力^[1].近年来,线性矩阵不等式 (LMI) 方法是求解 H_2/H_∞ 控制问题的主要方法^[2,3].但 LMI 方法存在一定的缺点,LMI 方法需要将非线性系统线性化,再迭代求解 Lyapunov 方程.因此,LMI 方法一次只能计算一个解^[4,5],计算效率较低.同时 LMI

收稿日期:2018-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577057)

*通信作者,E-mail:shaowuzhou@163.com

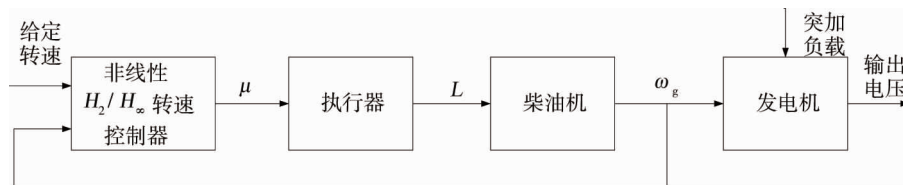
方法要求对象的参数集是凸集,在解决实际问题的过程中,不可避免的引入附加条件,结果具有一定的保守性^[6].因此,对于混合 H_2/H_∞ 多目标优化控制问题,LMI 方法难以估计到问题的 Pareto 最优前沿^[7].

现代智能优化算法的提出,为求解多目标优化问题提供了一种新方法.将现代智能优化算法应用于多目标鲁棒控制器的优化设计,是求解鲁棒控制难点问题的有效途径^[8,9].

差分进化算法(DE)是由 Rainer Storn 和 Kenneth Price 共同提出的一种在连续空间中进行随机搜索的优化算法^[10].文献[11]提出了一种多目标自适应差分进化算法(MOSADE).文献[12]提出了一种改进版的多目标自适应差分进化算法.与 LMI 方法相比,应用 IMOSADE 算法能降低系统的保守性,使控制系统获得更好的鲁棒性.计算机仿真结果表明,应用 IMOSADE 算法得到的 H_2/H_∞ 控制器的控制效果比 LMI 方法得到的控制器的控制效果更好,提升了系统动态性能和抗扰能力,有效的改善了大型矿用电动轮自卸车系统转速的稳定性.

1 柴油机转速控制系统的数学模型

柴油机转速的 H_2/H_∞ 控制系统由非线性 H_2/H_∞ 转速控制器,执行器,柴油机和发电机 4 个部分构成.其系统原理图如图 1 所示.



μ - 控制器输出的控制信号, L - 执行器输出轴位移, ω_g - 柴油机角速度

图 1 柴油机转速控制系统原理图

非线性 H_2/H_∞ 控制器输出的控制信号 μ 与执行器输出轴位移 L 构成的传递函数为

$$G_1(s) = \frac{L(s)}{\mu(s)} = \frac{K_0}{1 + T_1 s} \quad (1)$$

变换成微分方程为

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{L}{T_1} + \frac{K_0}{T_1} \mu \quad (2)$$

式中: K_0 是执行器的增益; T_1 是时间常数.

以执行器的输出轴位移 L 为输入量,以柴油机角速度 ω_g 为输出量,建立柴油发电机组的运动方程^[13,14].柴油发电机组的动力学方程为

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

式中: J 为转动惯量; D 为发电机阻尼绕组的阻尼系数; P 为磁极对数; M_1 为主力矩; M_2 为阻力矩.

对于具有非线性特征的柴油机的转矩转速特性,本文采取分段线性法来描述,每一分段内视为线性关系,表达式为

$$M_i = d_i \omega_g + b_i - aL \quad (4)$$

式中: d_i, b_i 为常数,不同线性分段中, d_i, b_i 的取值不同; $a = \frac{M_1^c}{L_e}$, M_1^c 为柴油机的最大输出扭矩, L_e 为执行器的最大输出行程.

取额定转速分段来近似取代柴油机的转矩转速特性,表达式为

$$M_1 = d_1 \omega_g + b_1 - aL \quad (5)$$

式中: d_1, b_1 为 d_i, b_i 在额定转速分段对应的常数值.

将式(5)带入式(3),得

$$J \frac{d\omega_g}{dt} + DP\omega_g = d_1\omega_g + b_1 - aL - M_2. \quad (6)$$

将式(6)标么化,取角速度的基准值为 ω_0 ,取功率的基准值为额定视在功率 S_B ,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a}\omega + \frac{1}{T_a}c_1 - \frac{1}{T_a}c_2L - \frac{1}{T_a}M_2. \quad (7)$$

式中: $T_a = J \frac{\omega_0^2}{S_B}$; $T_b = \frac{d_1\omega_0^2 - DP\omega_0^2}{S_B}$; $c_1 = \frac{b_1\omega_0}{S_B}$; $c_2 = \frac{a\omega_0}{S_B}$; ω 和 M_2 为标么值, L 和 t 为真实值.

功角 δ 与角速度标么值 ω 的关系式为

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0. \quad (8)$$

式(2),式(7),式(8)联立可得柴油发电机组的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{dL}{dt} = -\frac{L}{T_1} + \frac{K_0}{T_1}\mu; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_b}{T_a}\omega + \frac{1}{T_a}c_1 - \frac{1}{T_a}c_2L - \frac{1}{T_a}M_2; \\ \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0. \end{cases} \quad (9)$$

电动轮自卸车在实际工作条件下,电机的部分参数会随着运行状态的改变而变化,其中转子电阻的阻值 R_r 的变化尤为明显.由于电动轮自卸车长期工作在矿上等不平坦地区,急加速和急减速的频率较大,且必须长期工作在低转速的工作条件下,因此系统发热严重,引起转子电阻 R_r 的变化较大.

转子电阻 R_r 随温度呈非线性变化^[15],在电动轮自卸车实际工作过程中,由于环境的复杂性,转子电阻的阻值也存在不确定性扰动.转子电阻随温度变化曲线如图2所示.

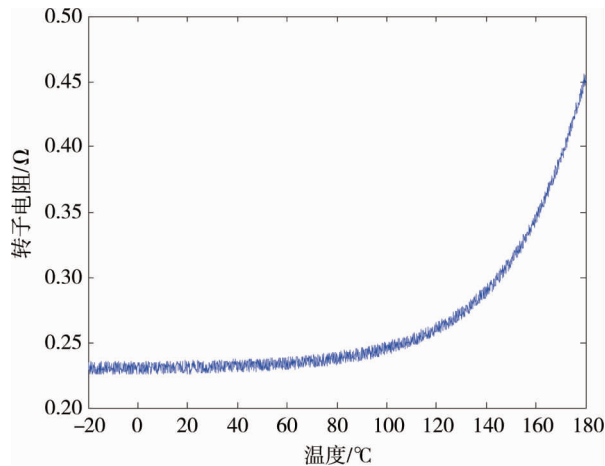


图2 转子电阻随温度变化曲线图

2 H_2/H_∞ 转速控制器的设计

H_2 范数和 H_∞ 范数是最优控制理论中的2个重要性能度量指标. H_2 范数主要用于分析研究控制系统的瞬态性能,当系统存在不确定性和非线性扰动时, H_∞ 范数用于分析系统的鲁棒稳定性^[16,17].而在实际过程中, H_2 和 H_∞ 性能指标很难同时达到最优,因此,本文将混合 H_2/H_∞ 控制问题转化为一个多目标优化问题.

把式(9)写成矩阵形式:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\boldsymbol{\omega}_1 + \mathbf{B}_2\boldsymbol{\omega}_2. \quad (10)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{Bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 \\ -\frac{c_2}{T_a} & \frac{T_a}{T_b} & 0 \\ 0 & \omega_0 & 0 \end{Bmatrix}; \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} L \\ \omega \\ \delta \end{Bmatrix}; \mathbf{B}_1 = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{c_1}{T_a} & -\frac{1}{T_a} \\ -\omega_0 & 0 \end{Bmatrix}; \boldsymbol{\omega}_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ M_2 \end{Bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{Bmatrix} \frac{K_0}{T_1} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \boldsymbol{\omega}_2 = \{\mu\}.$$

定义动态性能信号:

$$\begin{cases} Z_\infty = \mathbf{C}_1\mathbf{x} + \mathbf{D}_{11}\boldsymbol{\omega}_1 + \mathbf{D}_{12}\boldsymbol{\omega}_2; \\ Z_2 = \mathbf{C}_2\mathbf{x} + \mathbf{D}_{21}\boldsymbol{\omega}_1 + \mathbf{D}_{22}\boldsymbol{\omega}_2. \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{A}, \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{D}_{11}, \mathbf{D}_{12}, \mathbf{D}_{21}, \mathbf{D}_{22}$ 为加权矩阵, Z_2, Z_∞ 为评价信号.

设计状态反馈控制器:

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{K}\mathbf{x}. \quad (12)$$

式中: $\mathbf{K} = [K_1, K_2, K_3]$, 使得从 $\boldsymbol{\omega}_1$ 到 Z_∞ 的闭环传递函数的 H_∞ 范数不超过给定数值上界, 同时使得从 $\boldsymbol{\omega}_2$ 到 Z_2 的闭环传递函数的 H_2 范数尽可能小^[16].

3 差分进化算法

3.1 差分进化算法的一般流程

差分进化算法是一种非常高效的优化算法, 在处理连续参数的全局优化问题上得到了广泛的应用^[18]. 差分进化算法主要包括 3 种操作方式: 变异操作, 交叉操作和选择操作.

1) 变异操作: 在第 g 代种群中随机选择 3 个个体, 记为 $X_{i1}^g, X_{i2}^g, X_{i3}^g$, 然后 3 个个体结合, 得到目标个体 X_i^g 的变异向量 \mathbf{V}_i^g , 过程如式(13)所示:

$$\mathbf{V}_i^g = X_{i1}^g + F(X_{i2}^g - X_{i3}^g). \quad (13)$$

式中: F 为变异常数, 取值范围常为 $[0.4, 1]$.

2) 交叉操作: 随机生成常数 $C \in [0, 1]$, 并在 $[1, D]$ 中随机选择一个整数 R_j (D 为设计向量的维度), 将种群中的每一个向量与对应变异向量进行交叉操作, 得到试验向量 \mathbf{U}_i^g , 过程如式(14)所示:

$$u_{i,j}^g = \begin{cases} v_{i,j}^g, j = R_j \text{ or } R_{i,j} \leq C; \\ x_{i,j}^g, \text{其他}. \end{cases} \quad (14)$$

式中: $u_{i,j}^g, v_{i,j}^g, x_{i,j}^g$ 分别为 $\mathbf{U}_i^g, \mathbf{V}_i^g, \mathbf{X}_i^g$ 的第 j 个元素.

3) 选择操作: 将得到的试验向量和目标个体带入适应度函数 $f(x)$, 选择其中较优结果作为下一代.

3.2 IMOSADE 算法

文献[12]提出的 IMOSADE 算法, 在多目标自适应差分进化算法的基础上, 提出了新的参数自适应的自主学习能力, 将连续多代都产生更优结果的突变和交叉常数, 作为参数自主学习的对象. 该方法有效提升了算法的收敛速度. 其参数自主学习策略为

$$\begin{cases} F_i^{g+1} = F_i^g + R_1(F_b^g - F_i^g); \\ C_i^{g+1} = C_i^g + R_2(C_b^g - C_i^g). \end{cases} \quad (15)$$

式中: R_1, R_2 是 $[0.1]$ 中的随机常数; F_i^g, C_i^g 为第 g 代个体的第 i 个变异和交叉常数; F_b^g, C_b^g 为第 g 代个体的最优突变和交叉常数.

文献[11]中还提出了一种基于拥挤熵的外部精英存档保留策略, 这种新的外部精英存档保留策略可用式(16)描述.

$$\begin{cases} C_{E_i} = \sum_{j=1}^k \frac{(c_{i,j} E_{i,j})}{(f_j^{\max} - f_j^{\min})}; \\ E_{i,j} = - \left[\frac{d_{l_{i,j}}}{c_{i,j}} \log_2 \left(\frac{d_{l_{i,j}}}{c_{i,j}} \right) + \frac{d_{u_{i,j}}}{c_{i,j}} \log_2 \left(\frac{d_{u_{i,j}}}{c_{i,j}} \right) \right]; \\ c_{i,j} = d_{l_{i,j}} + d_{u_{i,j}}. \end{cases} \quad (16)$$

式中: C_{E_i} 为第 i 个解的拥挤熵; $E_{i,j}$ 为第 i 个解的分布熵; $c_{i,j}$ 为第 i 个解的上方相邻解与下方相邻解在第 j 个目标上的距离; f_j^{\max}, f_j^{\min} 为第 j 个目标函数的最大值和最小值; k 为优化目标个数, $d_{l_{i,j}}$ 为第 i 个解为与下方相邻解在第 j 个目标上的距离; $d_{u_{i,j}}$ 为第 i 个解分别与上方相邻解在第 j 个目标上的距离。

以 H_2/H_{∞} 控制问题中的 H_2 范数和 H_{∞} 分数作为多目标优化问题的 2 个优化目标, IMOSADE 的算法流程图如图 3 所示。

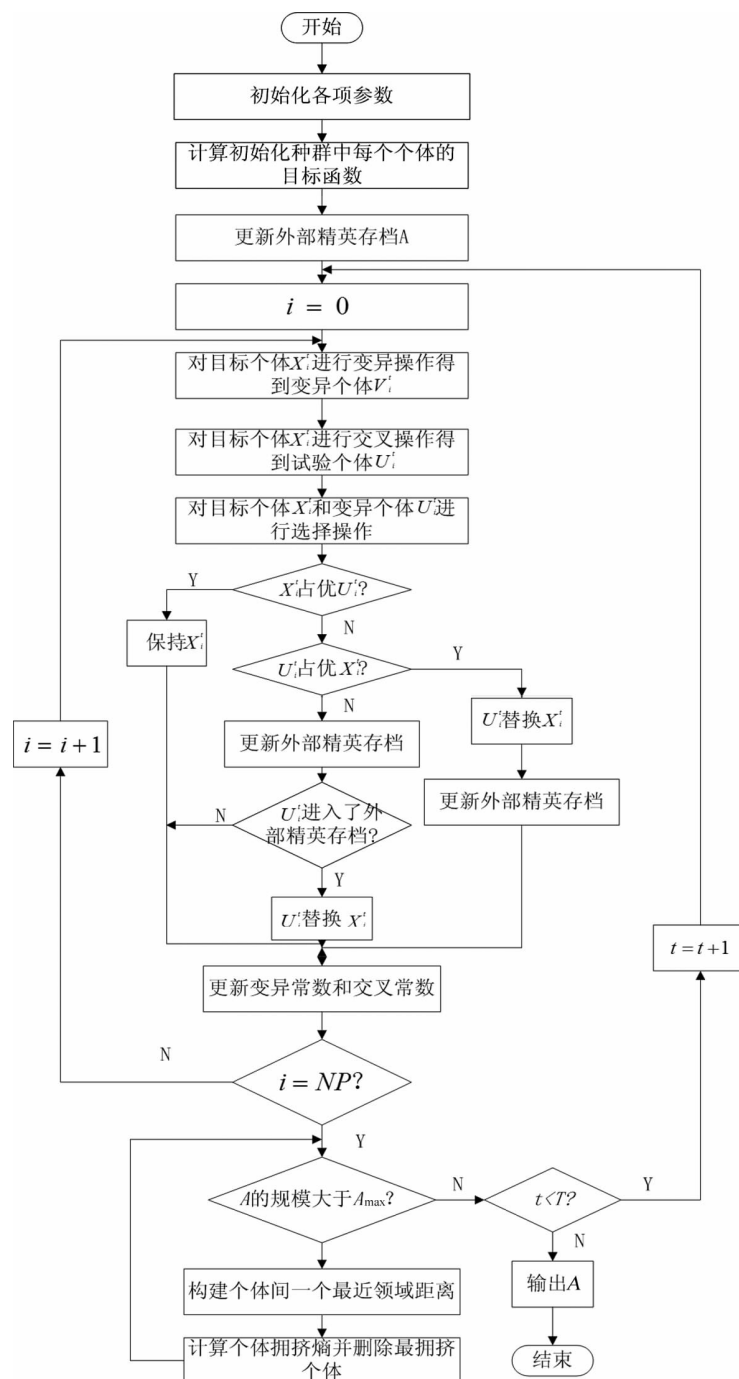


图 3 IMOSADE 算法流程图

4 数值仿真

为验证 IMOSADE 算法得到的控制器的效果,并与 LMI 方法得到的控制器效果对比,使用文献[13]和文献[14]中使用的柴油发电机型号,柴油发电机组的主要参数如表 1 所示.

表 1 柴油发电机组主要参数

额定功率/kw	额定转速 /(rad/min)	机组阻尼 系数	磁极对数	额定扭矩 /(kN·m)	机组转动惯量 /(kN·m ²)	输出轴最大 行程/mm
1 250	1 500	5.54	2	11.9	71.822	10

执行器的增益 $K_0 = 0.2$, 时间常数 $T_1 = 0.05$, $S_B = 900.9$ kVA, $\omega_0 = 50\pi$.

经过反复试取加权函数,带入仿真,获取最好的性能指标.

$$\text{取 } C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.7 \\ 0 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.04 \end{bmatrix}, D_{12} = D_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.001 \end{bmatrix}, D_{11} = D_{21} = 0.$$

msfsyn 函数是 LMI 工具箱中提供求解多目标输出反馈控制问题的函数.

运用 msfsyn.m 函数可求得一个 H_2/H_∞ 控制器为

$$K = [-509, 60\ 083, 1\ 204]. \quad (17)$$

运用 IMOSADE 算法可得到多个 H_2/H_∞ 控制器:

$$K_1 = [-381, 67\ 658, 1\ 751]; K_2 = [-556, 72\ 465, 1\ 757];$$

$$K_3 = [-394, 67\ 802, 1\ 711]; K_4 = [-396, 67\ 852, 1\ 703].$$

在此只列出 4 个可行的控制器.

选择第一个作为 IMOSADE 算法得到的控制器进行仿真.

$$K_{\text{IMOSADE}} = [-381, 67\ 658, 1\ 751]. \quad (18)$$

对所设计系统的稳定性进行了计算机仿真.系统启动时柴油机转速如图 4 所示.

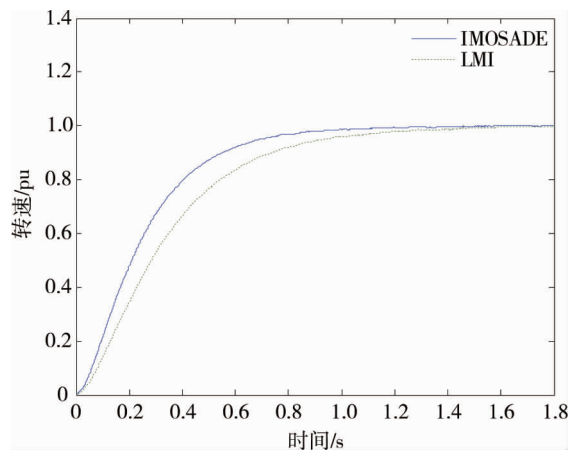


图 4 系统启动时柴油机转速变化率

从图 4 中可以看出,在系统启动过程中,系统受转子电阻的扰动的影响,使得转速存在一定的波动,但系统存在一定的抗扰能力,能够快速到达稳定状态.应用 IMOSADE 算法得到的控制器相较于 LMI 方法得到的控制器,能使柴油机的启动速度更快,并且能够使转速更快到达稳定状态.

在柴油发电机组到达稳定状态并运行一段时间后,突加和突减 88% 负荷时,研究柴油机转速和功角的变化规律,得到仿真结果如图 5 和图 6.

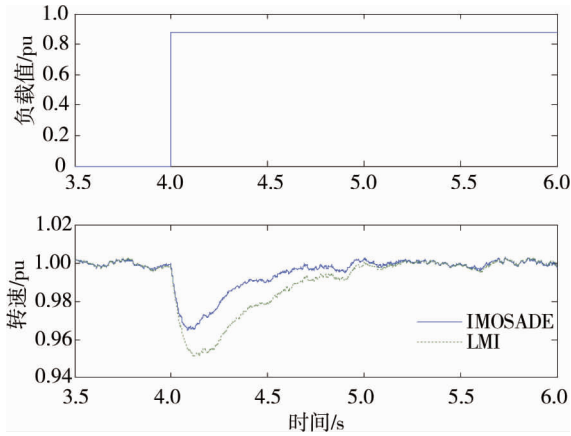


图 5 突加负载时柴油机角速度的变化规律

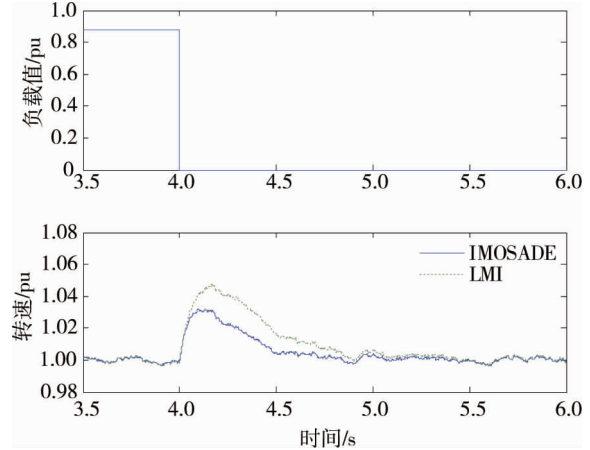


图 6 突减负载时柴油机角速度的变化规律

图 5,图 6 为系统突加和突减负载时的系统转速仿真图.当柴油发电机组到达稳定状态后,突加或突减 88% 负荷时,在应用 IMOSADE 算法得到的控制器的控制下柴油机转速的瞬态变化率比应用 LMI 方法得到的控制器的控制下的柴油机转速的瞬态变化率小,在 IMOSADE 算法得到的控制器的控制效果下,瞬态变化率约为 $\Phi_{IMOSADE} = 3.2\%$,而应用 LMI 得到控制器的瞬态变化率约为 $\Phi_{LMI} = 4.7\%$.同时,恢复到规定范围所需的稳定时间较也较短,柴油机在 IMOSADE 得到的控制器的控制效果下,稳定时间 $T_{IMOSADE} = 0.433\text{ s}$,而 LMI 得到控制器的控制下的稳定时间 $T_{LMI} = 0.741\text{ s}$.

图 7,图 8 为系统突加、突减负载时,功角随时间的变化规律.当柴油发电机组到达稳定状态后,突加或突减 88% 负荷时,应用 IMOSADE 算法得到的控制器的控制效果相较于应用 PSO 算法得到的控制器的控制效果,能使系统更快到达新的平衡状态,并且功角的相对变化量更小,在 IMOSADE 得到的控制器的控制效果下,功角的相对变化量变化为 $\Phi_{IMOSADE} = 1.76^\circ$,而在 LMI 得到的控制器的控制效果下,功角的相对变化率为 $\Phi_{LMI} = 3.41^\circ$.

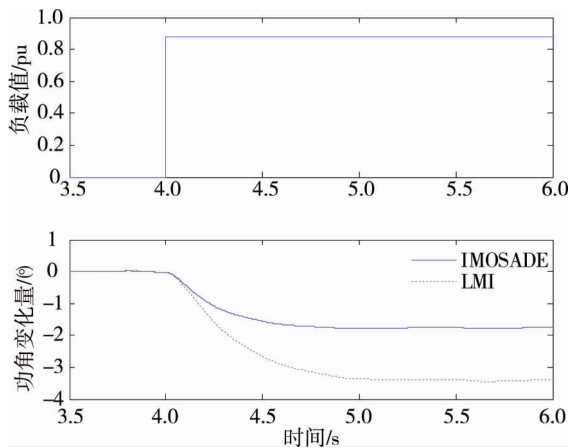


图 7 突加负载时功角的变化规律

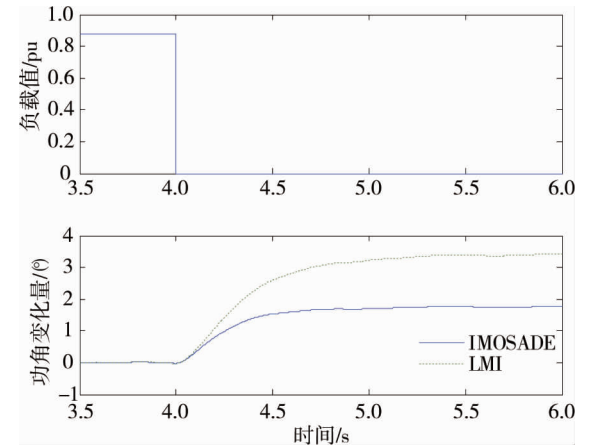


图 8 突减负载时功角的变化规律

5 结论

- 1) IMOSADE 算法一次计算可到多个有效解,提高了求解 H_2/H_∞ 控制问题的效率.
- 2) 在运用 IMOSADE 算法求解 H_2/H_∞ 控制问题中,避免了 LMI 方法的保守性,通过数值仿真能够看出 IMOSADE 算法得到控制器具有更优的控制效果.

参考文献:

- [1] 吴忠强,赵习博,王昕懿.风柴独立微电网频率 H_2/H_∞ 优化控制研究[J].电机与控制学报,2017,21(9):96-102.
- [2] Shi K, Liu C, Wang F, et al. Mixed H_2/H_∞ State Feedback Attitude Control of Microsatellite Based on Extended LMI Method [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2016, 23(5):15-22.
- [3] 刘颖明,朱江生,姚兴佳,等.基于 H_2/H_∞ 混合优化的大型风电机组变桨距鲁棒控制技术研究[J].太阳能学报,2015, 36(3):714-719.
- [4] Pereira G J, Araujo H X. Robust output feedback controller design via genetic algorithms and LMIs: the mixed H_2/H_∞ problem[C]// American Control Conference. Boston; 2004:3309-3314.
- [5] Sun C C, Chung H Y, Chang W J. H_2/H_∞ robust static output feedback control design via mixed genetic algorithm and linear matrix inequalities[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2005, 127(10):715-722.
- [6] 刘善伍,张学钢,陈宏宇.卫星姿控系统的鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制问题研究[J].航天控制, 2017, 35(4):37-41.
- [7] Frederico G G, Reinaldo M P, Felipe C, et al. Design of mixed H_2/H_∞ control systems using algorithms inspired by the immune system[J]. Information Science, 2007, 177(20):4368-4386.
- [8] Chung H Y, Chan S C. GA-based H_2/H_∞ static output feedback design with average performance concept and techniques of family of polynomials[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3):5859-5865.
- [9] Ho S J, Ho S Y, Shu L S. OSA: orthogonal simulated annealing algorithm and its application to designing mixed H_2/H_∞ optimal controllers[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part A, 2004, 34(5):588-600.
- [10] Rainer S, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4):341-359.
- [11] Wang Y, Wu L, Yuan X. Multi-objective self-adaptive differential evolution with elitist archive and crowding entropy-based diversity measure[J]. Soft Computing, 2010, 14(2):193-209.
- [12] Wu L, Wang Y, Zhou S. Design of mixed H_2/H_∞ optimal control systems using multiobjective differential evolution algorithm[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2013, 11(3):521-528.
- [13] 宋克明,黄曼磊,魏志达.船舶电站柴油发电机组 H_2/H_∞ 综合控制器的研究[J]. 船电技术, 2007, 27(6):325-328.
- [14] 黄曼磊, 宋克明, 魏志达.柴油发电机组非线性 H_2/H_∞ 综合控制器 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6):885-893.
- [15] 韦文祥.高性能感应电机无速度传感器矢量控制系统研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [16] 吴敏,桂卫华.现代鲁棒控制[M].长沙:中南工业大学出版社,1998
- [17] 梅生伟,申铁龙,刘康志.现代鲁棒控制理论与应用[M].北京:清华大学出版社,2003
- [18] Skanderova L, Fabian T, Zelinka I. Differential evolution dynamics modeled by longitudinal social network [J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 26(3):523-529.