

磁悬浮直线电动机 H_∞ 鲁棒控制器及其蚁群算法优化设计

蓝益鹏[†], 刘宇菲

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 磁悬浮永磁直线电动机在结构上取消了机械传动的中间环节, 具有磁悬浮和直接驱动的特点. 针对磁悬浮永磁直线电动机由于悬浮高度不同, 在磁悬浮和直接驱动运行过程中存在自身参数摄动和外界干扰突出的问题, 设计基于蚁群算法的 H_∞ 鲁棒控制器, 以保证系统对这些不确定性具有良好的鲁棒性. 建立包含磁悬浮永磁直线电动机参数摄动和外界干扰的状态空间模型. 推导出无须满足正则条件约束的Riccati不等式, 给出 H_∞ 鲁棒控制器的解析表达式. 针对 H_∞ 控制器中加权矩阵选择的困难, 采用蚁群算法对加权矩阵进行寻优. 最后在MATLAB环境下对控制系统进行仿真研究. 仿真实验表明基于蚁群算法的磁悬浮永磁直线电动机控制系统的性能比优化前有较明显改善, 说明该方法的可行性和有效性.

关键词: 磁悬浮永磁直线电动机; 鲁棒控制; 蚁群优化; Riccati不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Magnetic levitation linear motor H -infinity robust controller design and optimization of ant colony algorithm

LAN Yi-peng[†], LIU Yu-fei

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning 110870, China)

Abstract: Magnetic levitation permanent magnet linear motor has the characteristics of magnetic suspension and direct drive, and in the structure of the motor the mechanical transmission of the intermediate links is cancelled. For the existence of parameters perturbation and outstanding external disturbance in the process of magnetic levitation and direct drive running which due to suspension height is different, H -infinity robust controller based on ant colony algorithm is designed to ensure that the system has good robustness to these uncertainties. Establish the state space model of the magnetic levitation permanent magnet linear motor contains parameter perturbation and external disturbance. Riccati inequality that does not need to satisfy the regularity condition is deduced, and the analytical expression of robust H -infinity controller is given. For difficulties in selecting weighted matrix of H -infinity controller, using ant colony algorithm for optimization. Finally, simulation of control system is studied in the matlab environment, the simulation result shows that the performance of maglev linear motor control system based on ant colony algorithm is obviously improved than before, illustrates the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: maglev magnet linear motor; robust control; ant colony optimization; Riccati inequality

1 引言(Introduction)

永磁直线电动机伺服系统消除了机械运动的中间环节, 是高速精密数控加工的理想驱动元件^[1-3], 但是, 如何克服摩擦对系统的影响是一个备受关注的难题.

磁悬浮永磁直线电动机是在永磁直线电机的基础上设计的特种直线电动机, 以实现伺服系统的直接驱动与无摩擦进给. 该直线电机设计在工作点附近按照悬浮高度可以增磁或去磁, 具有特定的悬浮高度控制系统, 在悬浮高度一定后, 通过调节电枢电流来控制

电磁推力.

由于取消了中间环节以及处于磁悬浮运行方式, 特别是由于要运行在不同的悬浮高度, 电动机本身更容易受到自身参数变化和外部扰动的影 响, 即对不确定性的影响更加敏感^[4-6], 因此, 如何设计适当的控制器来保证电动机的稳定运行显得更为重要. 鲁棒控制能够保证系统对不确定性的鲁棒性, 被广泛用于电机的控制. 但是, 鲁棒控制中加权系数的选取对系统性能具有重要的影响, 迄今为止尚无统一而有效的方法, 大多是采用试凑的方法获得, 难以得到很好的控制效

果. 遗传算法有很强的寻优能力, 具有广泛的适应性和良好的鲁棒性^[7], 但不适合用于维数较高的控制问题, 特别是, 待优化参数较多时编码和解码都有很大困难.

蚁群算法(ant colony algorithm)是一种基于种群的启发式仿生进化系统. 蚁群算法包含适应阶段和协作阶段^[8-10]. 在适应阶段, 各候选解根据积累的信息素不断调整自身结构. 在协作阶段, 候选解之间通过信息素交流, 从而产生满足 H_∞ 鲁棒性能的加权矩阵.

综上所述, 本文提出一种基于蚁群算法的磁悬浮直线电动机 H_∞ 鲁棒控制器设计. 建立包含磁悬浮永磁直线电动机参数摄动和外界干扰的状态空间模型. 进而推导出 H_∞ 鲁棒控制器的解析表达式. 对加权矩阵采用蚁群算法进行寻优. 最后对控制系统进行仿真研究.

2 磁悬浮永磁直线电机 H_∞ 鲁棒控制器的设计(H-infinity robust controller design for magnetic levitation linear motor)

2.1 数学模型(Mathematical model)

磁悬浮永磁直线电动机设计在工作点附近按照悬浮高度可以增磁或去磁, 具有特定的悬浮高度控制系统, 是一个包括 d 轴电流、悬浮高度(位置)的双闭环系统. 在悬浮高度一定后, 通过调节电枢电流来控制电磁推力.

磁悬浮永磁直线电动机进给系统的数学模型描述为

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{K_f}{G} i_q - \frac{1}{G} (F_1 + F_d), \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_q - \frac{n_p \pi \Psi_f}{\tau L} v + \frac{1}{L} u_q, \\ \frac{ds}{dt} = v, \end{cases} \quad (1)$$

其中: G 为动子质量, F_d 为端部效应力, F_1 为负载阻力, v 是动子线速度, s 为动子位移, R_s 为动子电阻, τ 为极距, π 为常数, L 为 d, q 轴电感, Ψ_f 为永磁体基波励磁磁链, n_p 为极对数, K_f 为电磁推力系数, u_q, i_q 分别为 q 轴动子电压和电流. 令

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \ x_2 \ x_3]^T, \quad x_1 = v, \\ x_2 &= i_q, \quad x_3 = \int_0^T v dt. \end{aligned}$$

由于电机中电枢回路电流引起电阻温度上升, 导致 R_s 变化, 并且磁路饱和程度不同, 引起电感 L 变化, 且永磁体充磁的不均匀性, 特别是悬浮高度不同, 导致 Ψ_f 发生变化. 因此需要考虑参数摄动问题. 相应地被控对象的状态空间实现为

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_f}{M} & 0 \\ \frac{n_p \pi \Psi_f}{\tau L} (1 + \Delta_1(t)) & -\frac{R_s}{L} (1 + \Delta_2(t)) & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} (1 + \Delta_3(t)) \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega, \\ z = \begin{bmatrix} \sqrt{q_1} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{q_2} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{q_3} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{\rho} \end{bmatrix}, \\ y = x, \end{cases} \quad (2)$$

y 为系统输出, z 为评价信号, u 为控制输入; $\Delta_1(t), \Delta_2(t), \Delta_3(t)$ 分别为不确定性参数摄动, $\delta_1 = \max \Delta_1(t), \delta_2 = \max \Delta_2(t), \delta_3 = \max \Delta_3(t)$. 上式简写为

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + \Delta A)x + B_1 w + (B_2 + \Delta B)u, \\ z = C_1 x + D_{12} u, \\ y = x, \end{cases} \quad (3)$$

其中: 摄动矩阵

$$[\Delta A \ \Delta B] = E \Sigma [F_a \ F_b], \quad (4)$$

C_1 和 D_{12} 为加权系数矩阵, $C_1 = \text{diag} \{ \sqrt{q_1}, \sqrt{q_2}, \sqrt{q_3} \}$, $D_{12} = [0 \ 0 \ \sqrt{\rho}]^T$, q_1, q_2, q_3, ρ 分别是状态变量和控制输入的加权系数. 不难验证, 此时不满足 $D_{12}^T [C_1 \ D_{12}] = [0 \ I]$ 的正则条件, 下面推导该控制器的解析表达式.

2.2 H_∞ 鲁棒控制器设计(Design of H-infinity robust controller)

设计电动机的 H_∞ 鲁棒控制器

$$u = Kx, \quad (5)$$

使:

- 1) 闭环系统内部稳定;
- 2) 满足 H_∞ 性能指标 $\|T_{zw}(s)\|_\infty < 1$.

将控制器及摄动矩阵代入式(3)并整理得到

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_k + \Delta A_k)x + B_1 w, \\ z = C_k x, \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_k &= A + B_2 K, \quad \Delta A_k = E \Sigma F_K, \\ F_K &= F_a + F_b K, \quad C_k = C_1 + D_{12} K, \end{aligned} \quad (7)$$

则 H_∞ 鲁棒性能准则

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty = \|C_K (sI - A_k - \Delta A_K)^{-1} B_1\| < 1. \quad (8)$$

根据文献[11], 则存在适当的正定矩阵 P , 使得

$$\begin{aligned} P(A_k + \Delta A_k) + (A_k + \Delta A_k)^T P + \\ PB_1 B_1^T P + C_k^T C_k < 0 \end{aligned} \quad (9)$$

对于任何的 $\Sigma \in \Omega$ 成立.

在正则条件 $D_{12}^T [C_1 \ D_{12}] = [0 \ I]$ 约束下, 得出的Riccati不等式及相应的控制器表达式, 由于考虑正则条件, 旨在用与原问题邻近问题的解去逼近原问题的解, 这种方法存在误差, 而且不具有一般性, 在具体模型中的应用受到限制. 并且, 在优化问题中很难得到满足正则条件的参数, 为此, 下面给出一般情况下的Riccati不等式以及相应控制器的解析表达式.

定理 1 对于给定的被控对象(3)和(4), 存在状态反馈控制器 K 和对称正定阵 P , 使得式(9)对于任意的 $\Sigma \in \Omega$ 都成立的充分必要条件是存在标量 $\varepsilon > 0$, 使得Riccati不等式

$$\begin{aligned} A^T P + PA + P(BB^T + \varepsilon^{-1}EE^T)P + C_1^T C_1 + \\ \varepsilon F_a^T F_a - (PB_2 + \varepsilon F_a^T F_b + C_1^T D_{12})(D_{12}^T D_{12} + \\ \varepsilon F_b^T F_b)^{-1}(B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1) < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

有正定解, 则由式(3)–(5)组成的闭环系统内部稳定, 且满足 H_∞ 鲁棒性能准则式(8), 相应控制器为

$$\begin{aligned} K = \\ -(D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1}(B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1). \end{aligned} \quad (11)$$

证 1) 必要性. 将式(7)代入式(9), 展开得

$$\begin{aligned} A^T P + PA + (B_2 K)^T P + PB_2 K + PB_1 B_1^T P + \\ (C_1 + D_{12} K)^T (C_1 + D_{12} K) + [E \sum (F_a + \\ F_b K)]^T P + P[E \sum (F_a + F_b K)] < 0. \end{aligned} \quad (12)$$

根据文献[12]的引理2.1, 得

$$\begin{aligned} A^T P + PA + K^T (B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1) + \\ (PB_2 + \varepsilon F_a^T F_b + C_1^T D_{12})K + K^T (D_{12}^T D_{12} + \\ \varepsilon F_b^T F_b)K + P(B_1 B_1^T + \varepsilon^{-1}EE^T)P + \\ C_1^T C_1 + \varepsilon F_a^T F_a < 0. \end{aligned} \quad (13)$$

在上式两边同时加上项

$$\begin{aligned} (PB_2 + \varepsilon F_a^T F_b + C_1^T D_{12})(D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1} \cdot \\ (B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1), \end{aligned}$$

整理得

$$\begin{aligned} A^T P + PA + P(BB^T + \varepsilon^{-1}EE^T)P + C_1^T C_1 + \\ \varepsilon F_a^T F_a + N^T (D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)N - (PB_2 + \\ \varepsilon F_a^T F_b + C_1^T D_{12})(D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1} \cdot \\ (B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1) < 0, \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} N = K + (D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1} \cdot \\ (B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1). \end{aligned}$$

令 $N = 0$, 得到控制器为

$$\begin{aligned} K = \\ -(D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1}(B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1). \end{aligned}$$

2) 充分性. 假设存在适当的 $\varepsilon > 0$ 使Riccati不等式(10)有对称正定解 P , 构造控制器 K 如式(11), 由式(10)和恒等式

$$\begin{aligned} K + (D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1}(B_2^T P + \\ \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1) = 0 \end{aligned}$$

得

$$\begin{aligned} A^T P + PA + P(BB^T + \varepsilon^{-1}EE^T)P - (PB_2 + \\ \varepsilon F_a^T F_b + C_1^T D_{12})(D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1}(B_2^T P + \\ \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1) + C_1^T C_1 + \varepsilon F_a^T F_a + [K + \\ (D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1}(B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + \\ D_{12}^T C_1)]^T (D_{12}^T D_{12} + \varepsilon F_b^T F_b)^{-1}[K + (D_{12}^T D_{12} + \\ \varepsilon F_b^T F_b)^{-1}(B_2^T P + \varepsilon F_b^T F_a + D_{12}^T C_1)] < 0, \end{aligned}$$

即式(14)成立, 得到式(13)与式(12)成立, 所以式(9)成立. 根据Riccati不等式与 H_∞ 性能指标的等价性, 可知式(8)成立, 所以式(9)对于任意的 $\Sigma \in \Omega$ 都成立.

证毕.

通常情况下加权系数矩阵 C_1 和 D_{12} 的选取是随机选择, 通过不断调试来确定, 很难得到良好的控制效果. 这里采用蚁群算法寻找最佳的加权矩阵, 使控制系统的性能指标达到最优.

3 蚁群算法在控制器参数优化中的应用(The application of ant colony algorithm in controller parameters optimization)

3.1 蚁群算法(Ant colony algorithm)

蚁群算法的思想来源于蚂蚁之间的交流方式. 蚂蚁会在自己走过的路上留下一定数量的信息素, 信息素会随着时间而挥发, 但如果另一只蚂蚁同样经过该路径时会增强该路径上的信息素. 在任何一个路口, 蚂蚁会按照概率选择任意一个方向, 信息素浓度高的路径具有较大的概率^[13-15].

蚂蚁的状态转移概率按下式定义:

$$P_{ij} = \begin{cases} (\tau_j)^\alpha (\eta_{ij})^\beta, & \eta_{ij} > 0, \\ 0, & \eta_{ij} \leq 0, \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_{ij} 表示从区域 i 转移到区域 j 的概率; τ_j 为 j 区域的吸引强度; η_{ij} 定义为 $f(x_i) - f(x_j)$, 即目标函数的差值; 参数, α, β 为启发式因子, 是给定的常数, 分

别表示蚂蚁在运动过程中各个区域吸引强度和期望值在蚂蚁选择搜索区域中所起的不同作用。

初始时刻, 蚂蚁位于随机位置, 进行一次循环后进行信息素更新, 更新方程为

$$\tau_j(t+1) = (1-\mu)\tau_j(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_j^k, \quad (16)$$

$$\Delta\tau_j^k = \begin{cases} Q_1 L_j^k, & L_j^k > 0, \\ 0, & L_j^k < 0, \end{cases}$$

式中: m 为蚂蚁数量; μ 为信息素挥发系数, 取值在0到1之间; Q_1 为信息素增加强度, 取值为一个常数; $\Delta\tau_j^k$ 反映了第 k 只蚂蚁在本次循环中在区域 j 的吸引强度的增加; L_j^k 表示本次循环中目标函数的变化量:

$$L_j^k = f_{\max} - f_{\min}, \quad (17)$$

对函数的寻优借助于 m 只蚂蚁在解空间区域内的不断移动来进行, 经过Num次迭代后, 输出最优解。

3.2 蚁群算法实现 H_∞ 鲁棒控制器的参数优化 (Ant colony algorithm achieve optimization of robust H-infinity controller parameters)

3.2.1 评价函数的设计(The design of the evaluation function)

不管是蚁群算法还是其他优化方法, 都是要求系统的某一性能指标达到最优, 所以评价函数的设计直接影响到算法的性能。本文选取如下位移响应与期望值的绝对误差的积分作为评价函数^[16]:

$$\min J = \int_0^\infty t|e(t)|^2 dt. \quad (18)$$

将上式离散化, 得

$$\min J = T^2 \sum_{i=1}^N i|e(t)|^2, \quad (19)$$

式中: T 为仿真步距, N 为采样点总数。

3.2.2 待优化参数范围的形成(The rang formation of optimil parameters)

在蚁群算法中, 待优化的参数必须有个明确的范围。本文中, 蚁群算法的搜索范围是以原来调试整定的参数值为中心, 向两边扩展而成

$$\begin{cases} q_1 : [(1-\lambda)q_1, (1+\lambda)q_1], \\ q_2 : [(1-\lambda)q_2, (1+\lambda)q_2], \\ q_3 : [(1-\lambda)q_3, (1+\lambda)q_3], \\ \rho : [(1-\lambda)\rho, (1+\lambda)\rho], \end{cases}$$

其中 λ 为任意常数。这样可以利用原来调试整定的参数值为基础, 使蚁群算法迅速搜索到最优解。

3.2.3 初始化(Initialization)

确定待优化参数的取值范围, 设置蚁群初始参数, 记所有初始解上的初始化信息强度为1, 在参数的取

值范围内随机产生 Y 组初始解, 每组解对应一只蚂蚁, 包含控制器4个待优化参数。每组解都有一个邻域, 蚂蚁先在邻域内进行局部搜索, 每次搜索都记录最小的评价函数值, 邻域的半径随着搜索增加而减小, 最后收敛于一组解。局部搜索后再进行全局搜索。蚁群算法和 H_∞ 控制器中的加权系数之间通过评价函数相联系, 加权系数的改变将会影响到系统的响应, 即就是影响到误差, 进而影响评价函数。

4 仿真研究(Simulation research)

在MATLAB环境下, 编写蚁群算法的m文件。将解Riccati不等式的m文件编辑为函数文件, 调用磁悬浮直线电动机的simulink仿真模型, 获得用于优化的误差和采样时间, 建立求评价函数值的函数文件, 在蚁群搜索的程序中调用上述函数, 作为搜索依据。

磁悬浮永磁直线电动机的相关参数:

$$M = 50 \text{ kg}, R_s = 1.6878 \Omega, L = 25.92 \text{ mH}, \\ n_p = 3, \Psi_f = 0.1754 \text{ Wb}, \tau = 33 \text{ mm}, \gamma = 1.$$

当悬浮高度在0 mm~1.5 mm之间变化时, 对样机进行实际测试得到参数摄动最大值为

$$\delta_1 = 7.5\%, \delta_2 = 12.5\%, \delta_3 = 10\%.$$

优化前系数加权矩阵 C_1 和 D_{12} 的各个元素为

$$q_1 = 5.04, q_2 = 595 * 10^5, q_3 = 6.243 * 10^3, \\ \rho = 0.4093.$$

优化前控制器 K 为

$$K = [0.341 \quad -441.0944 \quad -20.8626].$$

蚁群算法相关参数为

蚂蚁数量 $m = 50$, 信息素挥发系数 $\mu = 0.95$, $Q_1 = 1$. 迭代80次得到

$$q_1 = 6.3, q_2 = 742.1 * 10^5, q_3 = 5.14 * 10^3, \\ \rho = 0.4.$$

求得优化后控制器 $K = [0.523 \quad -449.045 \quad -19.516]$. 仿真结果如图1-7所示。

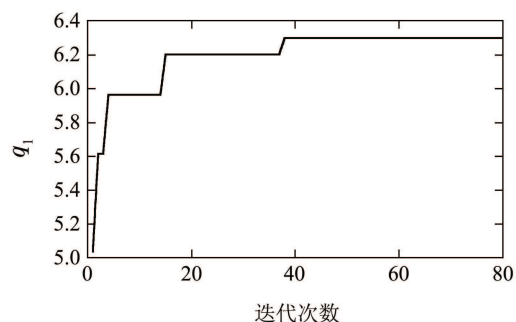


图1 参数 q_1 优化曲线

Fig. 1 Optimization curve of parameter q_1

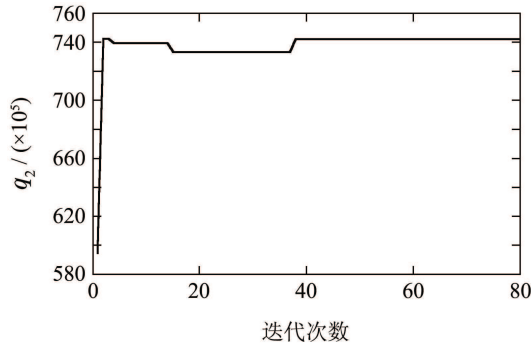


图 2 参数 q_2 优化曲线

Fig. 2 Optimization curve of parameter q_2

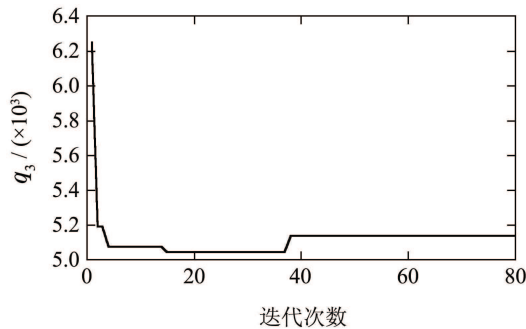


图 3 参数 q_3 优化曲线

Fig. 3 Optimization curve of parameter q_3

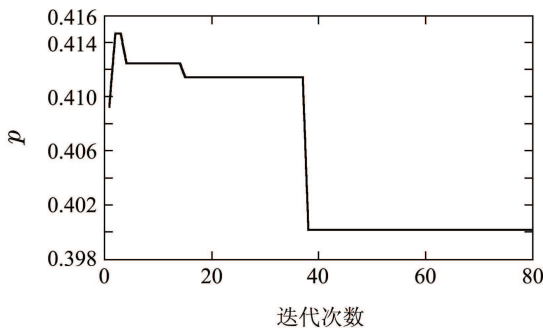


图 4 参数 ρ 优化曲线

Fig. 4 Optimization curve of parameter ρ

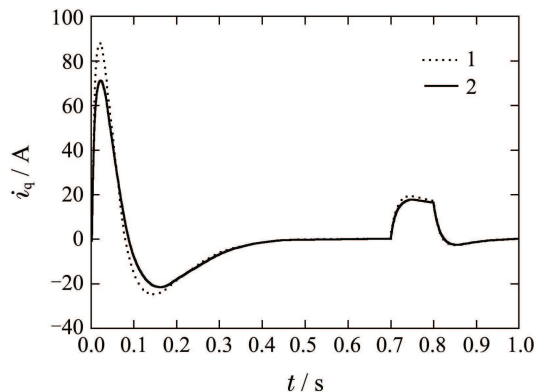


图 5 电流响应曲线

Fig. 5 Current response curve

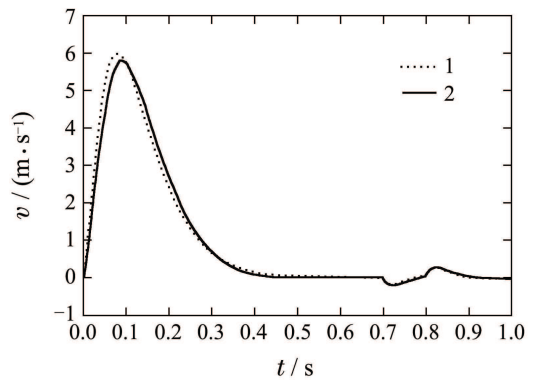


图 6 速度响应曲线

Fig. 6 Speed response curve

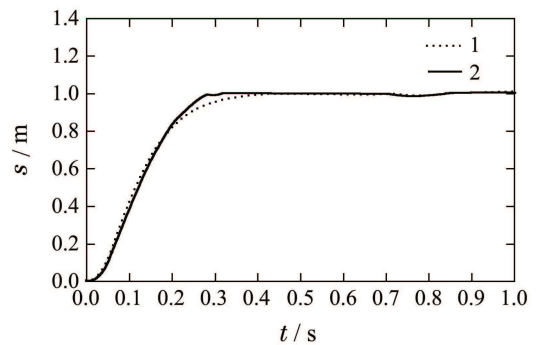


图 7 位移响应曲线

Fig. 7 Displacement response curve

图1—4分别为参数 q_1, q_2, q_3, ρ 的优化曲线, 由图中可知, 参数开始存在较大波动, 迭代40次后收敛于一定值. 图5—7分别为在考虑参数摄动的情况下系统的电流, 速度, 位移响应曲线. 1线为优化前的系统响应, 2线为优化后系统响应. 如图所示: 优化前, 系统达到稳定所需时间较长, 位移曲线响应速度慢, 调节时间长; 优化后, 系统的位移响应速度加快, 这主要是由于优化前后的控制器 K 取值不同所引起的. 表明优化后的系统对不确定性的影响具有更强的鲁棒性.

5 结论(Conclusions)

论文对基于蚁群算法的磁悬浮直线电动机 H_∞ 鲁棒控制器设计问题进行了研究, 得到如下的结论:

1) 针对磁悬浮永磁直线电动机的特殊运行方式, 特别是要运行在不同的悬浮高度, 存在着参数摄动突出的问题, 建立了包含磁悬浮永磁直线电动机参数摄动和负载阻力、端部效应力的数学模型, 进而得到描述系统鲁棒控制的状态空间模型.

2) 推导出无须正则条件约束, 更具有一般意义的 Riccati 不等式, 证明了系统 H_∞ 鲁棒控制器的定理, 给出了控制器的解析表达式.

3) 对 H_∞ 控制器中加权矩阵选择的困难, 提出采用蚁群算法对加权矩阵进行寻优. 以位移和期望之间的误差作为评价函数, 通过迭代获得了加权矩阵参数, 为加权矩阵选择提供科学依据.

4) 在MATLAB下对控制系统进行了仿真实验研究,表明基于蚁群算法的磁悬浮直线电动机控制系统的性能比优化前有较明显改善,说明该方法的可行性和有效性。

参考文献(References):

- [1] 林家春, 李伟, 赵彤, 等. 永磁直线同步电动机推力波动抑制策略 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 449 – 452.
(LIN Jiachun, LI Wei, ZHAO Tong, et al. Force ripple suppression strategy in permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 449 – 452.)
- [2] 曹荣敏, 周惠兴, 侯忠生. 数据驱动无模型自适应直线伺服系统精密控制和实现 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 310 – 316.
(CAO Rongmin, ZHOU Huixing, HOU Zhongsheng. Data-driven model-free adaptive precision control for linear servo system [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 310 – 316.)
- [3] 王光辉, 陈杰, 蔡涛, 等. 多目标分解随机粒子群优化算法及其在直线电机优化设计中的应用 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(6): 693 – 701.
(WANG Guanghui, CHEN Jie, CAI Tao, et al. A multi-objective decomposition-based stochastic particle swarm optimization algorithm and its application to optimal design for linear motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(6): 693 – 701.)
- [4] 张月玲, 党选举. 基于死区迟滞函数的永磁同步直线电机滑模控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 67 – 74.
(ZHANG Yueling, DANG Xuanju. Sliding mode control based on dead zone hysteresis function for permanent magnet synchronous linear motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(3): 67 – 74.)
- [5] ZHANG D L, CHEN Y P, ZHOU Z D. Robust adaptive motion control of permanent magnet linear motors based on disturbance compensation [J]. *Electric Power Application*, 2007, 1(4): 543 – 548.
- [6] 陈一秀, 王永初. 直线伺服系统的鲁棒性能控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 174 – 178.
(CHEN Yixiu, WANG Yongchu. Study on robust guaranteed cost control for linear motor servo system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(24): 174 – 178.)
- [7] 周明. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
(ZHOU Ming. *The Principle and Application of Genetic Algorithm* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.)
- [8] 孟祥萍, 片兆宇, 沈中玉, 等. 基于方向信息素协调的蚁群算法 [J]. 控制与决策, 2013, 28(5): 782 – 786.
(MENG Xiangping, PIAN Zhaoyu, SHEN Zhongyu, et al. Ant algorithm based on direction-coordinating [J]. *Control and Decision*, 2013, 28(5): 782 – 786.)
- [9] 刘少伟, 王洁. 一种改进的蚁群算法在TSP问题中的应用研究 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(9): 155 – 157.
(LIU Shaowei, WANG Jie. An improved ant colony algorithm in the application of TSP problem research [J]. *The Computer Simulation*, 2007, 24(9): 155 – 157.)
- [10] 段海滨. 蚁群算法原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
(DUAN Haibin. *The Principle and Application of Ant Colony Algorithm* [M]. Beijing: Science Press, 2005.)
- [11] 申铁龙. H_∞ 控制理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
(SHEN Tielong. *H-infinity Control Theory and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.)
- [12] 孙平. 鲁棒 H_∞ 控制理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
(SUN Ping. *Robust H-infinity Control Theory and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.)
- [13] 赵娟平, 高宪文, 符秀辉, 等. 移动机器人路径规划的改进蚁群优化算法 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(4): 457 – 461.
(ZHAO Juanping, GAO Xianwen, FU Xiuhui, et al. Improved ant colony algorithm of path planning for mobile robot [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(4): 457 – 461.)
- [14] 杨勇, 宋晓峰, 王建飞. 蚁群算法求解连续空间优化问题 [J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 573 – 576.
(YANG Yong, SONG Xiaofeng, WANG Jianfei. Ant colony algorithm to solve the continuous space optimization problems [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(5): 573 – 576.)
- [15] CHRISTIAN B. Ant colony optimization introduction and recent trends [J]. *Physics of Life Reviews*, 2005, 2(4): 353 – 373.
- [16] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于ITAE指标的PID参数整定方法比较研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 206 – 210.
(XU Feng, LI Donghai, XUE Yali. Based on ITAE index of PID parameter setting method of comparative study [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(8): 206 – 210.)

作者简介:

蓝益鹏 (1962–), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电机及其控制、鲁棒控制的研究, E-mail: lanyipeng@163.com;

刘宇菲 (1990–), 女, 硕士研究生, 主要从事磁悬浮永磁直线电动机控制研究, E-mail: liuyufei.19900914@163.com.