

基于遗传算法的电动助力转向系统鲁棒 H_∞ 控制

臧怀泉, 王媛媛

(燕山大学 河北省工业计算机控制工程重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对电动助力转向系统(EPS)中存在的模型不确定性和路面干扰问题, 提出了基于遗传算法的鲁棒 H_∞ 控制方法. 构建了EPS系统数学模型, 以驾驶员获得较小的干扰波动和卓越的鲁棒性为控制目标, 运用鲁棒 H_∞ 方法极小化干扰问题, 将系统设计中加权函数的选取表示成多目标问题, 用遗传算法对其优化求解, 得到鲁棒控制器. 分析了受到路面干扰时, 方向盘把持转矩的响应情况. 仿真结果表明, 遗传优化后的EPS鲁棒控制器有效地增强了系统的鲁棒稳定性, 提高了系统的抗干扰能力, 使驾驶员获得满意的路感, 提高了行驶安全性.

关键词: 电动助力转向系统; 鲁棒控制; 遗传算法; 路感

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Robust H-infinity control for electric power steering based on genetic algorithm

ZANG Huai-quan, WANG Yuan-yuan

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: To deal with the model uncertainties and road disturbances in the electric power steering (EPS) system, we propose a robust H-infinity control scheme based on genetic algorithm. In this scheme, the model of the EPS system is built and the robust H-infinity method is applied to minimize the impact of road disturbances to the driver's steering wheel for obtaining the maximal robustness. The weighted matrices in the design are obtained by optimizing multiple objectives using the genetic algorithm. The torque on the steering wheel produced by the road disturbance is analyzed. Simulation results show that this robust controller enhances the robustness and the ability of disturbance rejection, consequently, improving the driving safety and comfort for the driver.

Key words: electric power steering; robust control; genetic algorithm; road feeling

1 引言(Introduction)

电动助力转向系统以其高效、节能、环保等优点, 逐渐成为汽车转向系统的主导, 其控制方法从经典控制向现代控制发展^[1]. 运用传统控制理论来设计控制策略, EPS(electric power steering)数学模型的精确性决定了设计指标的可实现性. 但在实际情况中, EPS系统本身存在不确定性, 转向系统、助力电机的精确测试比较困难, 加上汽车运行工况的变化, 系统特性会发生变化, 故所建立的数学模型与实际系统存在误差及不确定性. 因此, 传统控制理论不能满足EPS系统的设计目标和要求^[2]. 近年来, 鲁棒 H_∞ 控制相继应用到了EPS系统中, 其优点是模型存在不确定性时, 所设计的控制器仍能使系统控制性能良好^[3]. 采用 H_∞ 环路成型技术设计EPS控制器, 形成循环过程, 减少了输入对输出的干扰影响, 但未考虑汽车运行工况的变化^[4]; 建立EPS状态空间方程, 运用鲁棒控制理论设计控制器, 在一定程度上弥

补了现代控制理论对数学模型依赖过高的缺陷^[5]; 提出混合 H_2/H_∞ 控制, 兼顾系统鲁棒性能和动态性能^[6]. 但在鲁棒控制器的设计过程中, 加权函数的选取一般采用试凑的方法, 非常依赖于设计者的经验, 很难实现最优. 加权函数的优劣直接影响转向系统的控制品质, 因此, 如何提高鲁棒控制过程中加权函数的优化选取是EPS鲁棒 H_∞ 控制中的一个重要研究课题.

本文提出基于遗传算法的EPS鲁棒 H_∞ 控制算法, 运用遗传算法优化选取加权函数. 遗传算法(GA)是一种基于生物遗传和进化机制的适合于复杂系统优化的自适应概率优化技术^[7]. 本文把EPS鲁棒控制中各设计目标转化成不等式约束, 将加权函数的选取表示成多目标问题, 并用遗传算法优化加权阵参数, 最终得到最优的 H_∞ 控制器. 基于遗传算法的鲁棒控制充分考虑了模型的不确定性, 增强了系统鲁棒稳定性. 系统仿真结果说明了控制策略的有效性

和正确性.

2 EPS系统分析及动态模型的构建(EPS analysis and dynamic model)

为分析问题方便, 把前轮及转向机构向转向柱简化^[8], 得到简化后的EPS系统动力学模型, 如图1所示. 假设转向系统润滑良好, 忽略系统特性参数的变化及各部件间的非线性摩擦力的影响^[9], 建立如下转向系统的数学模型:

$$J_s \ddot{\theta}_s + B_s \dot{\theta}_s = T_d - K_s(\theta_s - \theta_c), \quad (1)$$

$$J_c \ddot{\theta}_c + B_c \dot{\theta}_c = T_a + K_s(\theta_s - \theta_c) - T_r, \quad (2)$$

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = T_m - T_a/G, \quad (3)$$

$$U = R_i + L_i + K_e \dot{\theta}_m, \quad (4)$$

$$T_c = K_s(\theta_s - \theta_c), \quad (5)$$

$$T_r = K_c \theta_c, \quad (6)$$

$$T_m = K_t i. \quad (7)$$

式中: T_d 为方向盘输入转矩, T_m 为电动机电磁转矩, T_a 为作用到转向柱的助力, T_c 为扭矩传感器测试值, T_r 为作用到转向柱的阻力, θ_s 为方向盘转角, θ_c 为转向小齿轮转角, θ_m 为电动机转角, $J_s = 0.0459 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 为转向柱转动惯量, $B_s = 0.361 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 为转向柱阻尼系数, $K_s = 20 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 为扭矩传感器刚度系数, $J_c = 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 为转向小齿轮转动惯量, $B_c = 0.3 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 为转向小齿轮阻尼系数, $K_c = 62.22 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 为转向小齿轮刚度系数, $J_m = 0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 为电动机转动惯量, $B_m = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 为电动机阻尼系数, U 为电动机电压, i 为电动机电流, $R = 0.15 \Omega$ 为电动机电阻, $L = 0.0015 \text{ H}$ 为电动机电感, $K_t = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$ 为电动机转矩常数; $K_e = 0.02 \text{ V} \cdot \text{s}$ 为电动机反电势系数, $G = 30$ 为传动比.

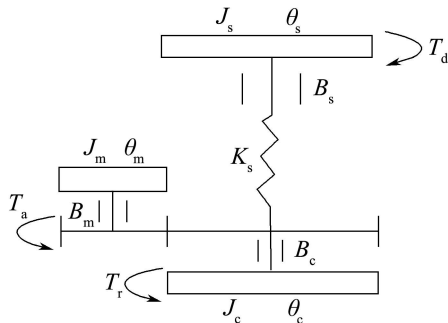


图1 EPS系统动力学模型
Fig. 1 EPS system dynamics model

考虑系统速度匹配关系有 $\theta_m = G\theta_c$; 车速一定时, 电压 U 与 T_c 成正比: $U = K_a \cdot T_c$, K_a 为助力增益.

根据电动助力转向系统的微分方程建立系统的状态空间方程. 定义系统的状态变量为 $x = [\theta_s \ \theta_s \ \dot{\theta}_c \ \dot{\theta}_c \ i]^T$, 输入量为 $u = [T_d \ T_m]^T$, 输出量为 $y = [T_c \ \theta_c]^T$. 系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx + Du. \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_s}{J_s} & -\frac{B_s}{J_s} & \frac{K_s}{J_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_s}{G^2 J_m + J_c} & 0 & -\frac{K_s + K_c}{G^2 J_m + J_c} - \frac{G^2 B_m + B_c}{G^2 J_m + J_c} & \frac{G K_t}{G^2 J_m + J_c} \\ \frac{K_a K_s}{L} & 0 & -\frac{K_a K_s}{L} & -\frac{G K_e}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_m} & 0 \end{bmatrix}^T, \quad C = \begin{bmatrix} K_s & 0 & -K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = 0,$$

从 $u = [T_d \ T_m]^T$ 到 $y = [T_c \ \theta_c]^T$ 传递函数矩阵可由公式 $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ 得到, 可写为如下形式:

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

3 EPS鲁棒H_∞控制研究(EPS robust H_∞ control research)

EPS鲁棒H_∞混合灵敏度控制模型可以用图2所示的系统来描述, 其中 $G(s)$, $K(s)$ 分别代表EPS系统和输出反馈控制器; u, y, ω 分别代表控制信号、观测信号和外部干扰输入, $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ 表示指标评价输出. 从参考输入 ω 到跟踪误差 e 、控制输入 u 和量测输出 y 的闭环传递函数^[10]分别为

$$S(s) = [I + G(s)K(s)]^{-1}, \quad (10)$$

$$R(s) = K(s)[I + G(s)K(s)]^{-1}, \quad (11)$$

$$T(s) = G(s)K(s)[I + G(s)K(s)]^{-1}. \quad (12)$$

式中: $S(s)$ 和 $T(s)$ 分别是系统的灵敏度函数和补灵敏度函数, 则 $S(s) + T(s) = I$. EPS系统的控制目标是保证驾驶员获得较小的干扰波动、系统具有卓越的鲁棒性. 因此, 引入表征抑制干扰的加权函数 $W_S(s)$ 、表征抑制控制信号输入过大的加权函数 $W_R(s)$ 、表征系统鲁棒稳定性的加权函数 $W_T(s)$. 系统广义被控对象为

$$P = \begin{bmatrix} W_S & -W_S G \\ 0 & W_R \\ 0 & W_T \\ I & -G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中:

$$A = A, \quad B_1 = 0, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_m} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} -W_S K_s & 0 & W_S K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -W_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} W_T K_s & 0 & -W_T K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_T & 0 & 0 \\ -K_s & 0 & K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} W_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_S & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, D_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & W_R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_R \end{bmatrix}^T,$$

$$D_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T, D_{22} = 0.$$

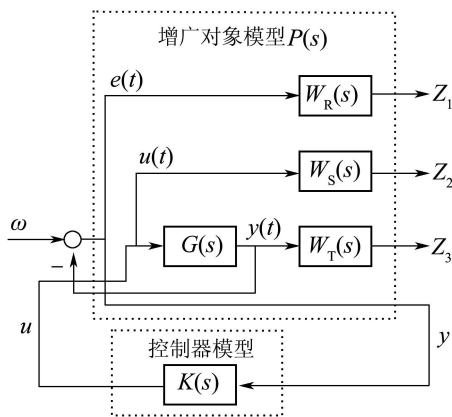


图2 鲁棒H_∞混合灵敏度控制
Fig. 2 Robust H-infinity mixed sensitivity control

系统从参考输入 ω 到评价输出 $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ 的传递函数阵为

$$T_{z\omega} = \begin{bmatrix} W_S S \\ W_R R \\ W_T T \end{bmatrix}. \quad (14)$$

混合灵敏度控制问题就是寻找正则的有理函数控制器 $K(s)$,使控制信号 $u = K(s)y$,且 $T_{z\omega}$ 满足 $\|T_{z\omega}\|_\infty \leq \gamma$, γ 一般取值为1.定义3个加权函数分别为

$$W_S(s) = a_1 \frac{b_1 s + 1}{c_1 s + 1},$$

$$W_R(s) = a_2, W_T(s) = a_3 \frac{b_3 s + 1}{c_3 s + 1}.$$

4 遗传优化的鲁棒H_∞控制(Genetic optimization of robust H_∞ control)

4.1 染色体编码与解码(Chromosome coding and decoding)

利用遗传算法求解多目标优化问题,首先要对加权函数进行编码以构成个体,个体中必须同时包含3个加权函数的信息.给定如下参数集确定3个加

权阵:

$$\begin{cases} H = (a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, b_{1i}, b_{2i}, c_{1i}, c_{2i}), \\ i = 1, \dots, m, \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} a_{ji} \in R_j, b_{mi} \in R_m, c_{ni} \in R_n, \\ j = 1, 2, 3, m = 1, 2, n = 1, 2, \end{cases} \quad (16)$$

其中: a_{ji}, b_{mi}, c_{ni} 表示加权函数的各个系数, m 表示群体大小, R_j, R_m, R_n 分别表示 a_{ji}, b_{mi}, c_{ni} 的搜索域.

采用二进制编码方法对上述参数集中的每个参数进行编码,每个参数分别转换成10位二进制数 $a'_1, a'_2, a'_3, b'_1, b'_2, c'_1, c'_2$,并把它们串接在一起构成一个70位的染色体或个体^[11], $g_r = \{a'_1, a'_2, a'_3, b'_1, b'_2, c'_1, c'_2\}$.通过选择、交叉、变异的进化操作过程优化得到个体,每个个体一旦给定,就确定了3个加权函数.个体经过解码后得到的表现型可简记为 $W = (W_S, W_R, W_T)$.

4.2 适应度函数的确定(Determination of fitness function)

为有效地抑制干扰影响和精确跟踪输入信号, $W_S(s)$ 应具有高增益低通特性; $W_T(s)$ 反应鲁棒稳定性要求,应具有高通滤波特性; $W_R(s)$ 一般取为实常数.综合以上条件,加权函数的选取可表示为满足一组不等式约束的最小化问题:

1) 鲁棒控制设计的总指标:

$$\delta_1 = 20 \times \log[\bar{\sigma}[P(j\omega)]].$$

$\bar{\sigma}(\cdot)$ 表示最大奇异值.当 $\delta_1 < 0$ 时,取 $\phi_1 = \bar{\sigma}[P(j\omega)]$;当 $\delta_1 \geq 0$ 时,取 $\phi_1 = 1000$.

2) 抗干扰能力:

$$\delta_2 = 20 \times \log[\bar{\sigma}[W_S(j\omega) \cdot S(j\omega)]].$$

当 $\delta_2 < 0$ 时,取 $\phi_2 = \bar{\sigma}[W_S(j\omega) \cdot S(j\omega)]$;当 $\delta_2 \geq 0$ 时,取 $\phi_2 = 10$.

3) 鲁棒性要求:

$$\delta_3 = 20 \times \log[\bar{\sigma}[W_T(j\omega) \cdot T(j\omega)]],$$

$$\delta_4 = 20 \times \log[\bar{\sigma}[W_R(j\omega) \cdot R(j\omega)]].$$

当 $\delta_3 < 0$ 时,取 $\phi_3 = \bar{\sigma}[W_T(j\omega) \cdot T(j\omega)]$;当 $\delta_3 \geq 0$ 时,取 $\phi_3 = 10$;当 $\delta_4 < 0$ 时,取 $\phi_4 = \bar{\sigma}[W_R(j\omega) \cdot R(j\omega)]$;当 $\delta_4 \geq 0$ 时,取 $\phi_4 = 10$.

4) $W_S(j\omega)$ 和 $W_T(j\omega)$ 的频带不重叠:

$$\delta_5 = 20 \times \log[\bar{\sigma}[W_S^{-1}(j\omega)] + \bar{\sigma}[W_T^{-1}(j\omega)]].$$

当 $\delta_5 < 0$ 时,取

$$\phi_5 = 20 \times \log[\bar{\sigma}[W_S^{-1}(j\omega)] + \bar{\sigma}[W_T^{-1}(j\omega)]];$$

当 $\delta_5 \geq 0$ 时,取 $\phi_5 = 1000$.

5) 闭环系统阶跃响应:

$$\text{当 } e(t) > 0 \text{ 时, } \phi_6 = \int_0^\infty |e(t)| dt; \text{ 当 } e(t) < 0 \text{ 时,}$$

$\phi_6 = \int_0^\infty (|e(t)| + 50|e'(t)|)dt$; $\phi_7 = 5t_r$. 其中: $e(t)$ 为系统误差, t_r 为上升时间.

综合上述不等式约束的性能指标的目标函数: $f = \sum_{i=1}^7 \phi_i$, 按照最小搜索, 定义适应度函数的表现形式为 $F = 1/f$. 当 f 的值越小时, 适应度函数 F 的值越大, 且保证为正数.

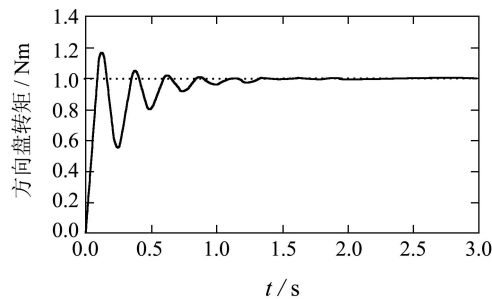
遗传算法的运行参数为: 群体大小 $M = 100$; 遗传代数 $G_e = 100$; 交叉概率 $P_c = 0.8$; 变异概率 $P_m =$

$$K(s) = \frac{2.1 \times 10^5 (s + 1717)(s + 101)(s + 7)(s + 3)(s^2 + 7s + 650)}{(s + 3.62)(s + 1700)(s + 358)(s + 99)(s + 0.13)(s^2 + 11s + 35)},$$

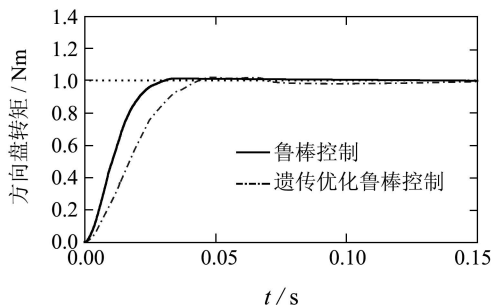
此时, $\|T_{zw}\|_\infty = 0.7511 < 1$, 满足鲁棒控制总指标.

5 仿真结果(Simulation results)

在MATLAB/Simulink环境下, 结合设计所求的控制器, 建立EPS仿真系统. 图3为控制前后系统的阶跃响应. 从图3中可以看出, 加入鲁棒H_∞控制时, 方向盘转矩输出信号超调减小, 达到稳定时间减小; 优化后系统完全消除了超调, 且很快达到稳定.



(a) 未加控制时



(b) 加入控制时

图3 方向盘的阶跃响应

Fig. 3 The step response of the steering wheel

为分析鲁棒H_∞控制的EPS系统抵抗路面干扰的能力, 采用固定方向盘转矩的方法, 研究作用在转向齿轮上的来自路面的干扰激励对方向盘把持转矩的影响. 路感为驾驶员在操纵汽车过程中所感受到的转向盘力矩和汽车对转向盘输入的响应.

0.1.

采用MATLAB遗传算法工具箱得到优化的加权函数分别为

$$W_S(s) = \frac{236(0.0039s + 1)}{7.69s + 1}, W_R(s) = 0.0107,$$

$$W_T(s) = \frac{0.661(0.0088s + 1)}{0.0006s + 1}.$$

应用混合灵敏度求解器mixsyn设计得出鲁棒控制器为

当汽车以80 km/h的速度在公路上直线行驶, 方向盘转矩固定为0, 行驶平稳, 在突然遇到路面有石头或水洼等复杂路况时, 轮胎受到来自路面的干扰冲击, 通过方向盘把持转矩受影响的程度来分析系统的控制性能.

仿真结果如图4所示, 直线行驶时优化前后方向盘转矩, 优化后的系统抑制干扰能力强, 保证汽车快速稳定的直线行驶, 提高了行驶安全性.

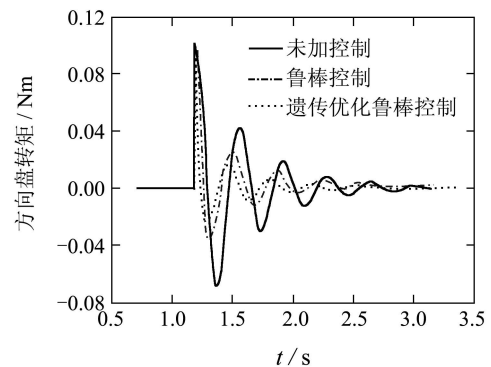


图4 直线行驶时方向盘转矩

Fig. 4 Steering wheel torque in straight driving

汽车以80 km/h的速度在弯道上行驶时, 方向盘转矩固定为1, 行驶平稳, 在突然遇到路面有石头或水洼等复杂路况时, 轮胎受到来自路面的干扰冲击, 通过方向盘转矩受影响的程度来分析系统的控制性能. 为分析问题方便, 定义安全系数 $\lambda = (t_s - t_{sK})/t_s \times 100\%$, t_s 为未加控制时的过渡过程时间, t_{sK} 为加入控制后的过渡过程时间.

由图5可知, 优化后的系统相比优化前抗干扰能力提高, 能快速有效的抑制干扰波动. 由表1可以看到, 系统受干扰冲击后, 优化后比优化前的过渡过程时间减小了0.06 s, 这段时间内, 汽车少行驶了1.33 m, 优化后比优化前的安全系数提高了3个百分点.

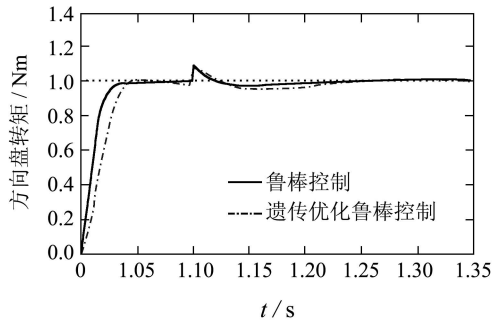


图5 弯道行驶时方向盘转矩

Fig. 5 Steering wheel torque in curved driving

表1 系统有关参数

Table 1 Parameters of the system

车速80km/h 复杂路况	过渡过程 时间 t_s/s	到达稳定所行 驶的路程 s/m	安全系数 $\lambda/\%$
未加控制	1.7	37.8	0
鲁棒控制	0.11	2.44	94
遗传优化后	0.05	1.11	97

6 结论(Conclusion)

遗传算法优化的鲁棒 H_∞ 控制系统,对电动助力转向系统中存在的模型不确定性和路面干扰影响的敏感性降低,具有较好的鲁棒性.它改善了系统的响应特性,提高了系统对外界各种环境路面干扰的适应能力.仿真结果证明这种方法是有效的.不论是直线行驶还是弯道行驶,有干扰时,电动助力转向控制系统表现出了满意的控制性能,驾驶员获得了较好的转向路感.

参考文献(References):

- [1] BURTON A W. Innovation drivers for electric power-assisted steering[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2003, 23(6): 30 – 39.
- [2] KOHNO T, TAKEUCHI S, MOMIYAMA M, et al. Development of electric power steering (EPS) system with H_∞ control[C] // *SAE Paper*. Beijing: Society of Automotive Engineers of China, 2000–01–0813.
- [3] 宋磊, 杨剑影, 段志生. 多模型切换系统 H_∞ 鲁棒控制器的设计与应用[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(11): 1531 – 1536.

- (SONG Lei, YANG Jianying, DUAN Zhisheng. Design and application of H_∞ robust controller for multi-model switching system[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(11): 1531 – 1536.)
- [4] MORADKHANNI M, HAIRI-YAZDI M R, SALAMSI F R. H_∞ loop-shaping control of an electric power steering system[C] // *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Switzerland: AIM, 2007: 1 – 6.
- [5] 赵治国, 余卓平, 孙泽昌, 等. 电动助力转向系统 H_∞ 鲁棒控制研究[J]. *汽车工程*, 2005, 27(6): 730 – 735.
(ZHAO Zhiguo, YU Zhuoping, SUN Zechang, et al. A research on H_∞ robust control strategy for electric power steering system[J]. *Automotive Engineering*, 2005, 27(6): 730 – 735.)
- [6] 赵万忠, 施国标, 林逸, 等. 基于混合 H_2/H_∞ 控制的电动助力系统转向路感[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(4): 142 – 147.
(ZHAO Wanzhong, SHI Guobiao, LIN Yi, et al. Road feeling of electric power steering system based on mixed H_2/H_∞ control[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(4): 142 – 147.)
- [7] KOZÁK S, SMEMERSHEIMER R, KOZÁKOVÁ A. Robust genetic algorithm approach to modelling and control[C] // *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing, Portugal*. [S.l.]: [s.n.], 2005: 358 – 363.
- [8] 田大庆, 殷国富. EPS动力学状态空间建模及 H_∞ 控制鲁棒性设计仿真[J]. *四川大学学报*, 2005, 37(2): 125 – 128.
(TIAN Daqing, YIN Guofu. Dynamic model and H_∞ controller robust design and simulation for EPS system based on state space[J]. *Journal of Sichuan University*, 2005, 37(2): 125 – 128.)
- [9] 陈龙, 袁朝春, 江浩斌. 基于 μ 综合鲁棒控制的EPS车辆操纵稳定性研究[J]. *汽车工程*, 2008, 30(8): 705 – 708.
(CHEN Long, YUAN Chaochun, JIANG Haobin. A study on the handling stability of vehicles with EPS based on μ synthesis robust control[J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(8): 705 – 708.)
- [10] 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.
(MEI Shengwei, SHEN Tielong, LIU Kangzhi. *Modern Robust Control Theory and Application*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [11] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
(LEI Yingjie, ZHANG Shanwen, LI Xuwu, et al. *MATLAB Genetic Algorithm Toolbox and Application*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.)

作者简介:

臧怀泉 (1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为控制系统设计、复杂动态系统建模、微机控制系统硬件及软件的设计与开发等, E-mail: hqzang@hotmail.com;

王媛媛 (1980—),女,硕士研究生,主要研究方向为控制系统设计、计算机仿真研究等, E-mail: wwwxyyy@163.com.