

Study on EPS Road Feel Intensity Controller Based on H_∞ Robust Control Theory

Jing-Peng Hu¹, Cong Wang²

1. School of Electrical and Information Engineering, China

2.University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

1. e-mail huijingpeng518@163.com, 2.e-mail yqx1945@yeah.net

Abstract: EPS system is a nonlinear MIMO system. Road feel is controlled by nonlinear factors such as cars and tires sport and its feedback force. After the EPS basic system structure is analyzed, ideal road feel intensity map is simulated by using Matlab software. And then the state space function of EPS uncertain system is analyzed. Finally road feel intensity controller($k(s)$) based H_∞ on robust control theory is designed by using Riccati functions. The research used in practice shows that: road feel intensity controller based on H_∞ robust control theory can provide timely assistance force to improve the performance of the EPS system.

Keywords: EPS; road feel intensity; control strategy; H_∞ robust control

基于 H_{∞} 鲁棒控制理论的 EPS 路感强度控制器研究

胡敬朋¹, 王聪²

1. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院 北京 100083

1. E-mail hujingpeng518@163.com, 2.E-mail ygx1945@yeah.net

【摘要】 EPS 系统是一种非线性的 MIMO 系统。路感是由整车及轮胎的运动、受力状况反馈等非线性因素所控制。在分析 EPS 系统结构的基础, 用 Matlab 软件仿真出理想路感强度图谱, 解析了 EPS 不确定系统的状态空间方程, 最终运用 Riccati 方程设计出基于 H_{∞} 鲁棒控制理论的路感强度控制器 $k(s)$ 。该成果应用于实践表明: 基于 H_{∞} 鲁棒控制理论的路感强度控制器更能及时的提供适时助力, 提高了 EPS 系统的性能。

【关键词】 EPS; 路感强度; 控制策略; H_∞ 鲁棒控制

1 引言

由于非线性的摩擦和阻尼环节, 以及许多系统内部和路面干扰因素的存在, EPS 路感实际是一个典型的非线性 MIMO 问题。显然, 传统基于简化精确模型的路感控制策略对道路条件的变化和传感器噪声带来的干扰缺乏足够的鲁棒性控制。在国外, Zaremba.A.T 分析了 EPS 系统开发中的控制和路感问题, 按照转向系统的性能要求, 提出了对校正器增益、相位滞后和零极点位置的约束。McCann 分析了 EPS 系统中助力电机参数对汽车操纵稳定性的影响, 通过采用横摆角速度和横向加速度反馈, 系统获得了良好的路感^[1,2]。国内大部分文献进行了一些理论探索。文中充分考虑到 EPS 路感实际是一个典型的非线性 MIMO 问题, 引进 H_∞ 鲁棒控制理论分析系统所产生摄动及输入扰动的问题, 介绍了一种基于 H_∞ 鲁棒控制理论的路感强度

控制器更能有效的提供适时助力, 而无须改动系统机械结构及其参数, 提高了 EPS 系统性能。

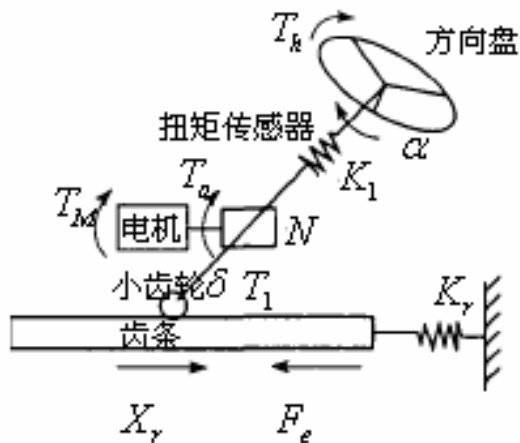


图 1. 电动转向系统

2 路感强度分析及其理想图谱

2.1 路感强度分析

“路感”(Road Feel) 是凭借方向盘(反作用)力, 将整车及轮胎的运动、受力状况反馈给驾驶者的感觉。John Baxter 首次给出的动力转向器的转向刚度和转向路感数学表达式: 刚度 $\frac{dF}{d\theta}$, 路感 $E = \frac{dT}{dF}$, 使转向路感得到了量化^[3]。把这个概念引用到 EPS 路感控制中, 可得:

$$E = K_1 \frac{\Delta T_h}{\Delta T_{load}} \quad (1)$$

现称 E 为路感强度。结合图 1 中 EPS 机械结构式中, E 可以表示为:

$$E = K_1 \frac{g}{2\pi} \cdot \frac{1}{1+K} \quad (2)$$

上式中: K_1 表示传动装置传递摩擦阻力对路感的影响, K 表示助力增益 ($K = \frac{dT_a}{dT_h}$, T_a 表示为助力矩, T_h 表示为转向盘力矩) g 为齿轮齿条式转向器的传动比。

可见, 通过调节助力增益 K 就可以改变路感强度 E 。而助力增益 K 作为电机助力值与扭矩传感器检测值比例关系。根据以上路感量化分析, 用 Matlab 软件对直线型助力特性对应的理想驾驶手力 T_h 、一车速 v 一电机助力转矩 T_a 助力特性仿真得到的三维图, 如图 2 所示

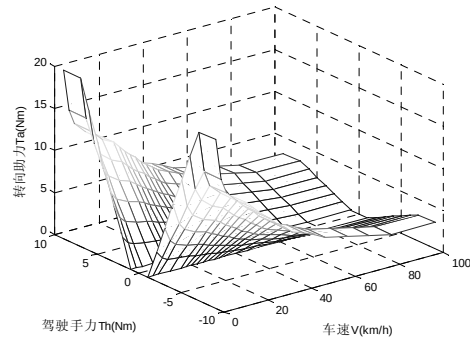


图 2. 电机助力特性图

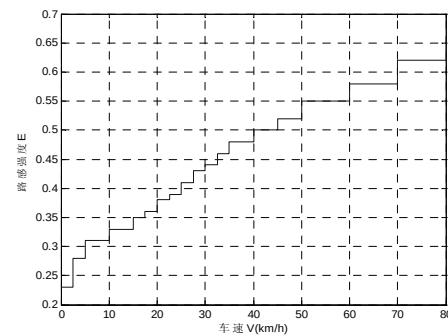


图 3. EPS 理想路感强度曲线

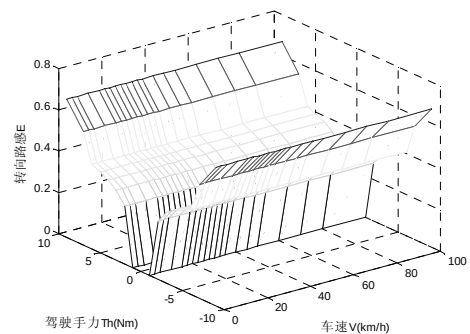


图 4 EPS 理想路感强度图谱

2.2 理想路感强度图谱

理想的路感控制还需要能够方便的调整路感。在不同车速下, 方向盘转向操舵力矩的大小也不一样。低车速转向或原地转向时, 要求方向盘转向操舵力矩尽可能小, 实现转向的轻便; 高车速转向时, 要求较大的方向盘转向操舵力矩, 以防止转向发飘。随着车速的减小, 助力转矩与方向盘转向操舵力矩之比(助力比)逐渐增加, 以保证在低车速时能够实现较为轻便的转向。由于转向阻力矩随车速的增加而减小, 为了获得较“硬”的转向感, 助力比应随车速的增加而逐渐减小, 以保证在高车速时有较大的操舵力矩^[4,5]。根据以上理想路感的分析, 用 Matlab 软件仿真较理想的线性助力类型路感 E 与车速 v 的关系应类似图 3 所示:

用 Matlab 软件仿真对应的理想驾驶手力 T_h —车速 v —路感强度 E 路感特性三维图谱如图 4 所示。

3 H_∞ 鲁棒控制理论的路感强度模型构建

3.1 EPS 不确定系统的状态空间方程

EPS 不确定系统的状态空间方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = A'x + B_1w + B_2u \\ z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u \\ u = ky \end{cases} \quad (3)$$

其中: $x \in R^n$ 是状态向量

$$(x_1 = \alpha, x_2 = \delta, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\alpha}, x_5 = \dot{\delta}, x_6 = \dot{\theta});$$

$u=[u] \in R^n$ 是控制输入;

$y=[T_c+dT_c] \in R^p$ 是测量输出;

$z=[e_a \ e_f \ u]^T \in R^r$ 是被控输出;

$w=[dT_c \ T_h \ T_R] \in R^q$ 是外部扰动和指令信号;

d_{T_c} 是传感器和 T_c 的噪声, 这里考虑的外部扰动是不确定的, 但具有有限能量^[6]。

其中:

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_s}{I_h} & \frac{K_s}{I_h} & 0 & -\frac{C_h}{I_h} & 0 & 0 \\ \frac{K_s}{M_R r_p^2} & MM & \frac{NK_m}{M_R r_p} & 0 & -\frac{C_R}{M_R} & 0 \\ 0 & k_m N & -\frac{K_s}{I_m} & 0 & 0 & -\frac{C_m R + K_a K_b}{I_m R} \end{bmatrix}$$

式中: $MM = -\frac{1}{M_R r_p} \left(K_r r_p + \frac{K_s}{r_p} + N^2 K_m / r_p \right)$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_h} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{M_R r_p} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_a}{I_m R} \end{bmatrix}, D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_f r_p \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} k_a k(s) k_s & N k_m - k_a k(s) k_s & -k_m & 0 & 0 & -c_m \\ k_s & -(k_s + k_s k_r r_p^2) & 0 & 0 & -k_s c_r r_p^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = [k_s \ -k_s \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], D_{21} = [1 \ 0 \ 0], D_{22} = 0$$

采用混合灵敏度设计方法和选择的合适的加权函数矩阵, 构造广义被控对象模型如(4)式, 并求出其鲁棒路感强度控制器 $k(s)$ 。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + BU \\ z = C_1 x + D_1 U \\ y = C_2 x + D_2 U \end{cases} \quad (4)$$

其中: $x \in R^n$ 是状态向量

$(x_1 = \alpha, x_2 = \delta, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\alpha}, x_5 = \dot{\delta}, x_6 = \dot{\theta})$, 广义被控系统的输入 $U = [d \ u]^T = [T_h \ T_R \ u]^T$, 广义被控对象的评价输出和广义控制对象测量输出分为:

$$z = y_1 = [Y_{1s} \ Y_{1r} \ Y_{1T}]^T = [w_s e \ w_R u \ w_T y]^T,$$

$$y = e = [e_a \ e_f]^T.$$

相关系数矩阵如下:

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{C_h}{I_h} & 0 & 0 \\ \frac{K_s}{M_R r_p^2} & MM & \frac{NK_m}{M_R r_p} & 0 & -\frac{C_R}{M_R} & 0 \\ 0 & k_m N & -\frac{K_s}{I_m} & 0 & 0 & -\frac{C_m R + K_a K_b}{I_m R} \end{bmatrix}$$

式中: $MM = -\frac{1}{M_R r_p} \left(K_r r_p + \frac{K_s}{r_p} + N^2 K_m / r_p \right)$

$$C_2 = \begin{bmatrix} k_a k(s) k_s & N k_m - k_a k(s) k_s & -k_m & 0 & 0 & -c_m \\ k_s & -(k_s + k_s k_r r_p^2) & -k_s c_r r_p^2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{I_h} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_R r_p} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_a}{I_m R} \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_f r_p & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = W * C_1' = \begin{bmatrix} w_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_R & 0 & 0 & * \\ 0 & 0 & 0 & w_{f0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_{Tc} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_a k(s) k_s & N k_m - k_a k(s) k_s & -k_m & 0 & 0 & -c_m \\ k_s & -(k_s + k_s k_r r_p^2) & 0 & 0 & -k_s c_r r_p^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -N k_m & k_m & 0 \\ k_s & -k_s & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2 鲁棒 EPS 路感强度控制器应用模型

由鲁棒 EPS 路感强度控制器和 EPS 路感量化分析可以得到鲁棒 EPS 路感强度控制器应用模型, 如图 5 所示。其中 w 为实际驾驶中外部扰动和指令信号, u 为控制器的输出, y 为传感器测量输出, z 为路感的传感器测量有效输入。

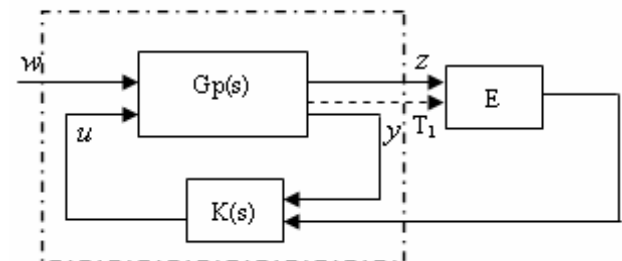


图 5. 鲁棒 EPS 路感强度控制器应用模型

4 实验与数据分析

控制器应用于吉利牌金刚 JL7152U CX MT 型实验车上得到以下参数响应数据:

表 1. 检测传感器输入/输出数据

车速 (km/h)	$k(v)$	T_a	NT_a	T_1	E
0.0-2.5	3.33	0.133	2.195	3.19	0.28
2.5-5.0	2.52	0.101	1.667	2.66	0.34
5.0-10.0	2.22	0.0891	1.47	2.47	0.37
10.0-15.0	2.00	0.0805	1.33	2.33	0.39
15.0-17.5	1.88	0.0756	1.25	2.25	0.41
17.5-20.0	1.77	0.0713	1.18	2.18	0.42
20.0-22.5	1.65	0.0667	1.10	2.10	0.44
22.5-25.0	1.55	0.0627	1.11	2.03	0.45
25.0-27.5	1.47	0.0600	0.99	1.98	0.47
27.5-30.0	1.35	0.0545	0.90	1.90	0.49
30.0-32.5	1.27	0.0515	0.85	1.85	0.50
32.5-35.0	1.18	0.0482	0.80	1.80	0.52
35.0-40.0	1.10	0.0449	0.74	1.74	0.54
40.0-45.0	1.02	0.0415	0.68	1.69	0.55
45.0-50.0	0.92	0.0376	0.62	1.62	0.58
50.0-60.0	0.82	0.0336	0.55	1.56	0.60
60.0-70.0	0.72	0.0300	0.50	1.50	0.63
70.0-80.0	0.62	0.0257	0.42	1.43	0.67
80.0 以上	0.52	0.0218	0.36	1.36	0.70

由以上实际响应,可得实际速度 v 一路感强度 E 曲线如图 6 所示。

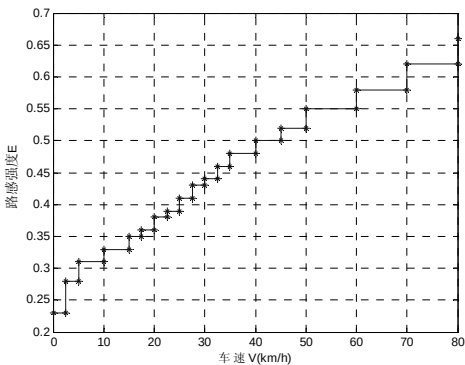


图 6. EPS 实测路感强度曲线

从图 6 中我们可以看出: (1)随着车速升高时, EPS 控制器按照图 3 的 EPS 路感强度 H_{∞} 鲁棒控制策略算法, 可自动设定助力增益参数不断减小, 使得被控系统助力比随车速的增加而逐渐减小, 被控系统获得了较

“硬”的转向感(E 值较大), 保证了在高车速时有较大的操舵力矩。而低速时, 助力增益较大, 转动灵活方便; (2)对同一个助力增益参数, 图 6 所示各个速度段路感强度 E 值和图 3 理想路感强度 E 值随车速 v 的变化规律类似, 其适时路感助力扭矩平均误差为 $A_{\text{助力误差}} = [\sum_{i=1}^{19} (\text{理想} T_{i1} - \text{实际} T_{i1})] / 19 = 0.0002(N.m)$, 因此在等同的路感前提下, 实际助力高精度的跟随理想助力。

5 结论

在分析 EPS 系统结构的基础, 用 Matlab 软件仿真出理想路感强度图谱。对 EPS 不确定系统的状态空间方程进行了解析, 设计出基于 H_{∞} 鲁棒控制理论的路感强度控制器 $k(s)$ 。该成果应用于实践表明: 基于 H_{∞} 鲁棒控制理论的路感强度控制器提供的助力与理想助力有良好的跟随性, 从而更好的改善 EPS 系统的性能。

References (参考文献)

[1] CHEN Wei-dong, Robust Tracking Control of Robot Manipulators Using Backstepping[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16 (4): P 837-838. (Ch) 陈卫东, 基于 Backstepping 的机器人鲁棒跟踪控制[J]. 系统仿真学报, 2004, 16 (4), P 837-838.

[2] ZHANG Rong-hui. Design of Navigation Controller for Cybercar Based on Visual Guidance[D].Changchun: Jilin University, 2006. (Ch)

[3] 张荣辉,视觉引导区域交通智能车辆 (Cybercar) 导航控制器设计[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

[4] DaqingTian, Guofu Yin, GangXie.Model and Robust Control Design for Electric-power Steering System. Proceeding 2004 International Conference on Intelligent Mechtronics and Automation[C].August 26~31, 2004, P 779-783.

[5] WANG Rong-ben, ZHANG Rong-hui, JIN Li-sheng, A Review on the Development and Key Technologies of Cybercars System[J]. Automotive Engineering, 2007, 29 (3), P 179-182. (Ch) 王荣本,张荣辉,金立生,区域智能交通车辆系统发展及其关键技术综述[J]. 汽车工程, 2007, 29 (3): P 79-182.

[6] LI Shi-hua,TIAN Yu-ping,Trajectory Tracking Control of Non-holonomic Mobile Robots[J]. Control and Decision, 2002, 17 (3), P 301-305. (Ch) 李世华,田玉平,非完整移动机器人的轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2002,17 (3), P 301-305.

[7] Chen Xiang, Chen Xiao-qun, Zhou Ke-min, Optimal control of electric power-assisted steering system [C]//Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications.Toronto,Canada: IEEE, 2005, P1403-1408.