

基于参数摄动的电动汽车再生制动 鲁棒混合控制研究

叶敏, 郭振宇, 程博, 曹秉刚

(西安交通大学电动车研究开发中心, 710049, 西安)

摘要: 针对电动汽车再生制动过程中系统具有参数大范围摄动和强非线性特点, 综合 H_2 最优控制和 H_∞ 鲁棒控制的优点, 提出鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制策略. 将系统主回路参数摄动到控制输入灵敏度函数的 H_∞ 范数作为鲁棒性能评价指标, 电动汽车外加扰动到电机转速传递函数的 H_2 范数作为线性高斯二次型性能指标. 仿真和对比实验结果表明, 鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制策略具有良好的控制效果, 比传统的控制方法回收了更多的能量, 同时抑制了系统参数大范围摄动、强非线性以及外界干扰的影响, 从而大大提高了系统的鲁棒稳定性.

关键词: 参数摄动; 再生制动; 鲁棒稳定性; H_2/H_∞ 混合控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0064-05

Hybrid Robust Control for Regenerative Braking of Electric Vehicles Based on Parameter Perturbation

Ye Min, Guo Zhenyu, Cheng Bo, Cao Binggang

(Research and Development Center of Electric Vehicles, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: H_2/H_∞ hybrid control is developed to attenuate the parameter perturbation and nonlinear uncertainty of electric vehicles during regenerative braking. Considering the merit and defect of the H_2 optimal control and H_∞ robust control, H_2/H_∞ hybrid control is designed to ensure both the system performance and the robust stability. The H_∞ norm of the sensitive function from the parameter perturbation of the system circuit to the control input is taken as the evaluating index of the robustness, and the H_2 norm of the transfer function from the external disturbance to the angular velocity of the motor as the index of linear quadratic Gaussian (LQG). The simulated and experimental results show that the hybrid control is endowed with good control performance to attenuate the parameter perturbation, nonlinear and the external disturbance. Furthermore the electric vehicle recycles more kinetic energy during regenerative braking with the proposed control scheme.

Keywords: parameter perturbation; regenerative braking; robust stability; H_2/H_∞ hybrid control

由于环境和能源问题备受人们的关注, 因此电动汽车已成为全世界汽车工业研究的热点, 但时至今日仍难以产业化, 主要原因是一次充电续航里程短. 再生制动是提高续航里程的有效方法, 影响再生

制动控制系统性能的主要因素有: ① 对于采用机械和再生联合制动的车辆, 机械刹车强度的不同对控制系统是一种很不利的干扰; ② 对于采用变速器的汽车, 档位的变化以及车载乘客的变化使车体质量

折算到电机转子上的转动惯量发生了巨大改变,从而使车体模型参数产生较大的摄动;③ 电池电压和行驶阻力的随机变化等各种不确定因素的存在.控制系统本身采用脉冲宽度调制(PWM)斩波方式,使得系统成为强非线性系统,因此电动汽车再生制动是一种强非线性、参数大范围摄动及存在严重外界干扰的不确定系统^[1-2].传统的控制方法,甚至现代控制方法,如模糊控制、神经网络控制等,都不能同时保证系统的性能指标和稳定性^[2].本文针对西安交通大学电动车研究开发中心研制的 XJTUEV-II 型电动汽车进行了再生制动参数摄动模型的建立与研究,提出了鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制策略,在保证系统性能指标的同时,实现了系统对非线性、参数摄动与外界干扰的抑制.

1 电动汽车再生制动参数摄动模型

XJTUEV-II 型电动汽车是由运动型汽车改装的,它保留了原车的变速箱和离合装置,驱动系统主要包括电机和直流(DC/DC)变换器.在再生制动过程中,电机在发电机工况下工作,DC/DC 变换器在升压(Boost)模式下工作.

1.1 电机模型

电机采用包头电机研究所的永磁有刷直流电机,由文献[3]得出的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_1 x_1 + B_1 v \\ \omega &= C_1 x_1 + D_1 v \\ x_1 &= (i, \omega)^T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x_1 为电机的状态向量; i 为电机电流; ω 为电机角速度; v 为电机端电压; A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 为电机状态方程的系数矩阵.在线性标称模型下

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/J \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -R & -K_b \\ K_m & -K_f \end{bmatrix}$$

$$B_1 = [1/L \ 0]^T, C_1 = [0 \ 1], D_1 = [0] \quad (2)$$

式中: L 为电机绕组电感; J 为转动惯量; R 为电机电枢电阻; K_b 为电磁时间常数; K_m 为电机转矩常数; K_f 为摩擦系数.

电动汽车静重 1 330 kg,车速 30 km/h,二档工况下折算到电机输出轴的转动惯量为 $0.35 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.在电动汽车的制动过程中,电机工作在较大的转矩和调速范围内,由于保留了原有的变速箱,因此不同档位和车速下的 J 在较大范围内变化,但均属于能量有限扰动,其摄动值 ΔJ 的 H_2 范数小于 0.2(见表 1).由于电机的发热、磁滞等现象,

电机的参数在运行过程中也将发生变化,根据厂家实验数据手册得到的电机参数摄动值如表 1 所示.

表 1 电机参数摄动值

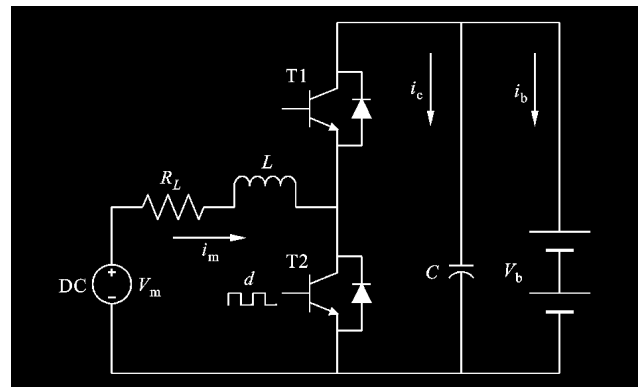
| 参数 | 标称值 | 摄动值 |
|---|-------|------------------------|
| R/Ω | 0.018 | $[0.011, 0.025]$ |
| L/mH | 0.139 | $[0.083, 0.194]$ |
| $K_b/\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{r}^{-1}$ | 0.2 | $[0.15, 0.25]$ |
| $K_m/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ | 0.2 | $[0.15, 0.25]$ |
| $J/\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | 0.35 | $\ \Delta J\ _2 < 0.2$ |
| K_f | 0.15 | $[0.09, 0.21]$ |

1.2 DC/DC 变换器模型

如图 1 所示,在再生制动过程中晶体管 T1 截止,晶体管 T2 工作于 PWM 模式,电机反电动势通过 T2、 L 和 T1 的续流二极管构成的类似 Boost 电路向蓄电池充电.以图 1 所示电流方向为正方向,再生制动标称工作点下的电路状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_2 &= A_2 x_2 + B_2 d \\ v_o &= C_2 x_2 \\ x_2 &= (i_m, V_b)^T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: x_2 为 DC/DC 变换器的状态向量; i_m 为电机电枢电流; V_b 为蓄电池端电压; v_o 为变换器输出电压; d 为 T2 的导通占空比; A_2 、 B_2 、 C_2 为 DC/DC 变换器状态方程的系数矩阵.



L, R_L : 电机绕组的电感和电阻; C : 主回路滤波电容;
 i_b, i_c : 蓄电池及滤波电容充电电流; V_m : 电机反电动势; i_m : 电机电枢电流

图 1 再生制动电路原理图

在 DC/DC 变换器标称工作点下,状态方程的系数矩阵为

$$A_2 = \begin{bmatrix} -1/(RC) & -1 \\ (1-D)^2/(LC) & 0 \end{bmatrix}, B_2 = [V_o \ 0]^T$$

$$C_2 = [-1/((1-D)RC) \quad 1/(1-D)]^T \quad (4)$$

式中: V_0 、 D 表示标称工作点的输出电压和占空比. 根据大量的理论推导与实验研究, XJTUEV-II 型电动汽车再生制动的标称工作点为: $D=0.2$, $V_0=120$ V. DC/DC 变换器状态方程系数矩阵均取自于标称对象, 即电路元器件参数确定的情况, 而电动汽车在实际运行过程中, 电机绕组中电阻和电感是不确定的, 其参数变化范围如表 1 所示. 系统主回路滤波电容(电解电容)变化范围更是严重, 其标称值为 $470 \mu\text{F}$, 但由于电气的耦合效应, 电容值的变化范围为 $[310 \mu\text{F}, 680 \mu\text{F}]$. DC/DC 变换器的参数变化可以由标称值和摄动值表示为

$$R = R_0(1 + \delta_R), C = C_0(1 + \delta_C), L = L_0(1 + \delta_L) \quad (5)$$

如图 2 所示, 广义系统的对象矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{4 \times 4}$$

系统的扰动参数为 $\Delta = \text{diag}(\delta_R, \delta_L, \delta_C)$, 系统的传递函数由 M 和 Δ 变换得到

$$T_{v_o, d} = F_L(M, \Delta) = M_{11} + M_{12}\Delta(I - M_{22}\Delta)^{-1}M_{21} \quad (6)$$

式中: I 表示单位矩阵. 由文献[4]得到 Boost 电路广义系统的对象矩阵为

$$M(s) = \begin{bmatrix} 0 & 1/(1-D) & 0 & 1/(1-D)R_0C_0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1/(1-D)R_0C_0 & 1/(1-D) \\ 1/R_0C_0 & 0 \\ 0 & (1-D)^2/L_0C_0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left\{ sI_2 - \begin{bmatrix} -1/R_0C_0 & -1 \\ (1-D)^2/L_0C_0 & 0 \end{bmatrix} \right\}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1/R_0C_0 & -(1-D)^2/L_0C_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

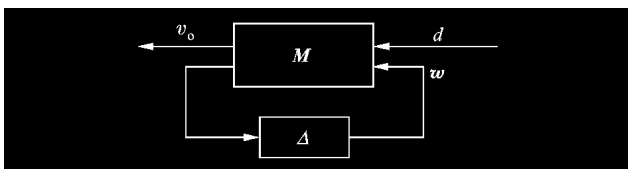


图 2 参数摄动系统的分式变换

将式(7)与式(5)代入式(6), 即可得到适于鲁棒控制器设计的 DC/DC 变换器参数摄动模型.

2 鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制^[5-6]

考虑由状态方程描述的不确定系统

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= (A^* + \Delta A^*)x + (B_1^* + \Delta B_1^*)u + B_2^*w \\ z_1 &= C_1^*x + D_1^*u \\ z_2 &= C_2^*x + D_2^*u \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: x 是系统的状态向量; u 是控制输入向量; w 是外部扰动输入向量; z_1 、 z_2 是被调输出向量; A^* 、 B_1^* 、 B_2^* 、 C_1^* 、 C_2^* 、 D_1^* 和 D_2^* 是描述标称系统模型的已知实常数矩阵; ΔA^* 和 ΔB_1^* 是反映系统模型中参数不确定性的未知实系数矩阵, 假定它们的范数是有界的, 且 $[\Delta A^* \quad \Delta B_1^*] = HF[E_1 \quad E_2]$. 其中, F 是一个满足 $F^T F \leq I$ 的不确定矩阵, H 、 E_1 和 E_2 是已知的常数矩阵, 它们反映了系统不确定性的结构信息. 鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制方法是对给定的常数 ($\gamma > 0$) 和允许的参数摄动范围设计一个状态反馈控制律

$$u = Kx \quad (9)$$

使得闭环系统满足以下的设计指标.

(1) 闭环系统是渐进稳定的.

(2) 当 $w(t)$ 为能量有限的扰动信号时, 从 $w(t)$ 到 $z_1(t)$ 的闭环传递函数 $T(z)$ 满足 $\|T(z)\|_\infty < \gamma$. 其中, $\|T(z)\|_\infty = \sup_{0 \leq \omega \leq 2\pi} \sigma_{\max}[T(e^{j\omega})]$, $\sigma_{\max}[\cdot]$ 表示矩阵 A 的最大奇异值. 当 $w(t)$ 为具有单位谱密度的白噪声时, 要求性能指标 $J(K) \leq \bar{J}(K)$, 其中 $\bar{J}(K)$ 是一个确定的常数, 它表示闭环系统在最坏情况下的 H_2 性能指标值的一个上界

$$J(K) = \sup_F \lim_{t \rightarrow \infty} E\{z_2^T(K)z_2(K)\}$$

式中: $E\{\cdot\}$ 表示矩阵的期望算子. 满足以上设计指标的控制律称为系统的鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制, 又称保性能控制.

将式(9)代入式(8)得到闭环系统

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= \bar{A}_c x + B_2^* w \\ z_1 &= C_{1c} x \\ z_2 &= C_{2c} x \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\bar{A}_c = A_c + HFE_c, C_{1c} = C_1^* + D_1^* K$$

$$C_{2c} = C_2^* + D_2^* K, A_c = A^* + B_1^* K$$

$$E_c = E_1 + E_2 K$$

如果 \bar{A}_c 是渐进稳定的,则 $\bar{J}(\mathbf{K})$ 能被表示成 $\bar{J}(\mathbf{K}) = \sup_F \text{tr}\{(\mathbf{B}_2^*)^T \bar{\mathbf{P}}(\mathbf{B}_2^*)\}$,其中 $\bar{\mathbf{P}} = \bar{\mathbf{P}}^T \geq 0$ 是由 Lyapunov 方程 $\bar{A}_c^T \bar{\mathbf{P}} \bar{A}_c - \bar{\mathbf{P}} + \mathbf{C}_{1c}^T \mathbf{C}_{1c} = \mathbf{0}$ 确定的矩阵.

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{Y} & 0 & (\mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{B}_1^* \mathbf{V})^T & (\mathbf{E}_1 \mathbf{Y} + \mathbf{E}_2 \mathbf{V})^T & (\mathbf{C}_1^* \mathbf{Y} + \mathbf{D}_1^* \mathbf{V})^T & (\mathbf{C}_2^* \mathbf{Y} + \mathbf{D}_2^* \mathbf{V})^T \\ 0 & -\alpha \gamma^2 \mathbf{I} & \alpha (\mathbf{B}_2^*)^T & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{B}_1^* \mathbf{V} & \alpha \mathbf{B}_2^* & -\mathbf{Y} + \beta \mathbf{H}\mathbf{H}^T & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{E}_1 \mathbf{B}_1^* + \mathbf{E}_2 \mathbf{V} & 0 & 0 & -\beta \mathbf{I} & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_1^* \mathbf{Y} + \mathbf{D}_1^* \mathbf{V} & 0 & 0 & 0 & -\alpha \mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{C}_2^* \mathbf{Y} + \mathbf{D}_2^* \mathbf{V} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

如果式(11)有一个可行解 $\alpha, \beta, \mathbf{Y}, \mathbf{V}$,则状态反馈控制律

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{V}\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{x}(t) \quad (12)$$

是系统的一个保性能控制律,且闭环系统的 H_2 保性能上界是 $\bar{J}(\mathbf{K}) = \text{tr}\{(\mathbf{B}_2^*)^T \mathbf{Y}^{-1}(\mathbf{B}_2^*)\}$,次优的 H_∞ 性能指标^[7]为 γ .

3 仿真与实验研究

3.1 仿真研究

利用 Matlab/Robust control tool 中“ureal”函数表示参数摄动值,建立系统模型^[8].将系统主回路参数摄动到控制输入(刹车踏板设定的电流值)灵敏度函数的 H_∞ 范数作为鲁棒性能评价指标,电动汽车外加扰动(折算到电机输出轴的转动惯量扰动)到电机转速传递函数的 H_2 范数作为 LQG 性能指标,此时,式(8)中 $\mathbf{C}_1^* = [1 \ 0]$, $\mathbf{D}_1^* = [0]$, $\mathbf{C}_2^* = [0 \ 1]$, $\mathbf{D}_2^* = [0]$,式(11)是一个具有线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题.应用 MATLAB/LMI 工具箱来求解控制器,设 $\gamma = 20$,求解控制器为

$$\mathbf{K}(s) = \frac{50s^2 + 118s}{s^3 + 33s^2 + 519s + 174} \quad (13)$$

系统的 H_2 性能指标满足 $\bar{J}(\mathbf{K}) \leq 24$, H_∞ 性能指标满足 $\|T(\mathbf{z}_1)\|_\infty < 20$.图3为电动汽车标称对象闭环系统的 Bode 曲线,设计的控制器保证了标称对象闭环系统的增益裕度为 32 dB,相位裕度为 58°.图4为系统灵敏度函数的单位阶跃响应,系统在参数摄动最坏的情况下,过渡时间虽延长至 4 s,但仍能稳定运行,且能保证一定的系统性能.仿真结果表明,鲁棒 H_2/H_∞ 混合控制在参数摄动范围内是稳定的,而且在保证系统鲁棒稳定的同时,能基本保证系统的性能指标.

3.2 实验研究

将仿真研究所得到的控制器离散化后,利用 C

对给定的常数 $\gamma > 0$ 和式(8),存在一个保性能控制律,当且仅当存在常数 $\alpha > 0, \beta > 0$,以及对称正定矩阵 \mathbf{Y} 和 \mathbf{V} 时,使得

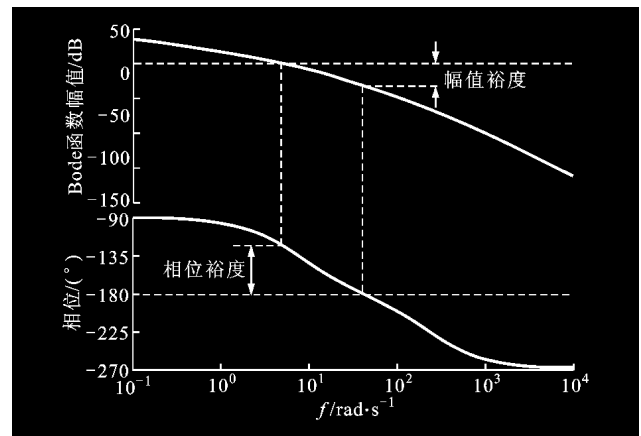


图3 闭环系统 Bode 曲线

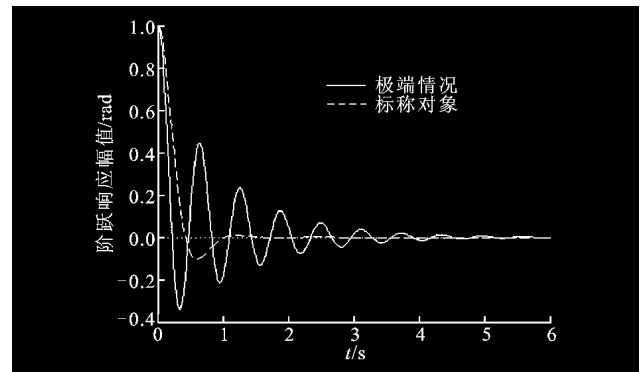
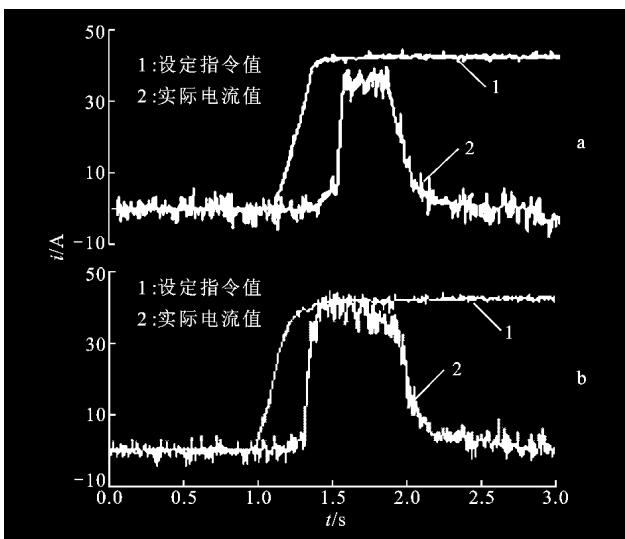


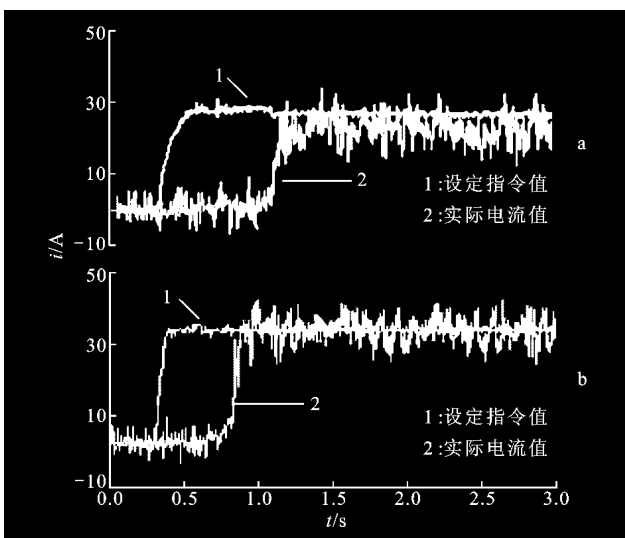
图4 灵敏度函数干扰抑制曲线

语言进行编程,植入 XJTUEV-II 型电动车的核心硬件 TMS320LF2407A DSP 芯片中,进行再生制动实验研究.把 PWM 的调制频率设为 20 kHz,此时电流环的实际运算周期为 30 ms,可完全满足电动汽车驾驶性能的实时性要求.图5与图6为电动汽车在车速为 30 km/h 时的再生制动回馈电流图,在再生制动过程中,机械刹车强度不同相当于对系统施加扰动,制动实验结果说明混合控制策略的响应速度明显快于 PI 控制方法,且基本不存在稳态误差.当紧急制动时,2 种控制结果的稳态误差在响应的后期加大,在接近 2 s 时还出现了实际值无法跟

随指令值的情况,这是由于电机本身的电气特性,在该时间车速已下降至较低,其反电动势已不再能够提供足够的电压进行升压变换,因此回收电流也就无法达到指令值。但是,本文提出的混合控制策略却依然有较好的稳态精度和控制效果,在制动过程中,蓄电池充电电流和充电时间的乘积与回收的制动能量成正比,即在相同回收电流的情况下,维持时间越长,稳态误差越小,蓄积的能量就越多。从实验结果中也可以看出,尤其是当紧急制动时,混合控制回收的制动能量远多于PI控制回收的制动能量。



a:PI控制效果;b: H_2/H_∞ 混合控制效果
图5 紧急制动工况的控制效果对比



a:PI控制效果;b: H_2/H_∞ 混合控制效果
图6 缓慢制动工况的控制效果对比

4 结论

本文针对电动汽车再生制动过程中,电池电压在较大范围内的变化、道路行驶状况复杂多变、驾驶模式以及刹车强度等不确定因素的影响,提出了基于参数摄动的 H_2/H_∞ 混合控制策略。在建立系统参数摄动模型的基础上,求解控制器并进行了仿真与实验研究。研究表明,本文提出的混合控制策略对电动汽车的再生制动控制具有良好的控制效果,不仅明显缩短了制动时间,而且保证了车辆的行驶性能,同时又回收了更多的能量,节约了能源。因此,本文提出的混合控制策略可以广泛地应用于电机驱动系统中,以实现系统的节能高效运行。

参考文献:

- [1] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002:1-4.
- [2] 曹秉刚. 电动汽车技术进展和发展趋势[J]. 西安交通大学学报,2004,38(1):1-5.
Cao Binggang. Trend of development of technology for electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004,38(1):1-5.
- [3] Jesus L R, Jorge A M. Uncertainty models for switch-mode DC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2000, 47(2):200-203.
- [4] Fitzgerald A E. 电机学[M]. 刘新正,苏少平,译. 北京:电子工业出版社,2004:286-291.
- [5] Keith G, Duncan M. Robust stabilization of normalized coprime factor plant descriptions with H_∞ bounded uncertainty [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(8):821-830.
- [6] Paolo M, Leopoldo R, Giorgio S. Small-signal analysis of DC-DC converters with sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(1):96-102.
- [7] 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京:清华大学出版社,2002:86-91.
- [8] 唐治理,雷虎民. 混合 H_2/H_∞ 鲁棒控制在飞行器控制中的应用[J]. 弹箭与制导学报,2005,25(4):11-23.
Tang Zhili, Lei Humin. The application of mixed robust control technique in aircraft control [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2005,25(4):11-23.

(编辑 管咏梅)