

电动公交车匀速下长坡再生制动控制策略优化^{*}

李华鑫^{1,2}, 张光德¹, 马强²

(1. 武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430081;

2. 湖北文理学院汽车与交通工程学院, 湖北 襄阳 441053)

摘要: 针对电动公交车下长坡再生制动过程中被控对象存在汽车质量、汽车旋转质量换算系数不确定性以及电机参数摄动的问题, 构建了电动公交车再生制动系统模型。基于线性矩阵不等式(LMI)设计了 H_∞ 鲁棒最优控制器, 并在 MATLAB/Simulink 中进行了仿真。结果表明: 采用 H_∞ 鲁棒最优控制比传统的车速-电流双闭环 PI 控制具有更好的鲁棒稳定性, 且回馈的能量提高了 2%~3%。

关键词: 不确定性; 再生制动; 线性矩阵不等式; H_∞ 鲁棒最优控制

中图分类号: U 469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)05-0113-07

Optimization of Regenerative Braking Control Strategy for Long Downhill Running of Electric Bus at Constant Speed^{*}

LI Huaxin^{1,2}, ZHANG Guangde¹, MA Qiang²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. School of Automotive and Traffic Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

Abstract: For the problems of the uncertainty of the vehicle mass and the conversion coefficient of the bus' rotating mass, and the parameter perturbation of the motor during the regenerative braking process of the electric bus during long downhill running, the model of the electric bus regenerative braking system was constructed. The H_∞ robust optimal controller was designed based on the linear matrix inequality (LMI), and simulated in MATLAB/Simulink. The simulation results showed that the H_∞ robust optimal control had better robust stability than the traditional speed-current speed-current double-closed-loop PI control, and the feedback energy was increased by 2%~3%.

Key words: uncertainty; regenerative braking; linear matrix inequality (LMI); H_∞ robust optimal control

0 引言

电动汽车制动减速或下坡时, 电动机作用于发电状态, 产生的反向电流不仅能够产生制动阻

力矩, 而且可以给蓄电池充电。文献[1]对电动汽车在坡道上单轴制动时汽车的稳定性和再生制动极限进行了研究, 对于运行频率较高的电动公交车, 在满足电机提供的最大制动强度和汽车稳

^{*} 基金项目: 湖北省技术创新专项(重大项目)(2016AAA051)

作者简介: 李华鑫(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车电机控制。

张光德(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为汽车节能与安全技术。

马强(1981—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为控制理论及其在电机驱动中的应用。

定性的前提下,可以充分利用下长坡再生制动来延长其续航里程。

在电机驱动力能够满足汽车制动稳定性的情况下,对电动汽车再生制动控制系统的主要影响因素有:(1)对于采用电液制动的电动汽车,机械制动强度过大会干扰能量回馈;(2)对于有挡位的电动汽车,挡位会引起电机转子转动惯量变化;(3)汽车总质量、电池电压、电机参数等存在不确定性^[2]。

为了提高电动汽车在不确定条件下再生制动控制系统的鲁棒性,学者们提出了不同的解决方案。文献[2]将电动汽车的制动问题转化为加权混合灵敏度问题,设计了 H_∞ 鲁棒控制器,结果表明,在稳态误差方面优于PI控制,且回馈能量提高了40%;文献[3]采用模糊PI控制,研究表明在响应速度和稳态精度方面均优于传统PI控制。文献[4]对车速-电流双闭环控制系统的电流环,设计了 H_∞ 鲁棒控制器,研究表明,在抗干扰能力和响应速度方面均优于传统的PID控制,且续航里程提高了1.8%~2.6%。文献[5]采用神经网络自适应PID控制,解决了能量回收系统中非线性、快时变的问题,提高了控制系统的鲁棒性和抗干扰能力。文献[6]采用模糊PI控制算法,提高了系统的抗干扰性和控制精度,在制动回馈中速度变化平稳、回馈效率高。

针对电动公交车在实际运行过程中速度变化范围广、负载变化大、长时间运行电机参数不确定以及频繁制动等特点,为了抑制不确定性对再生制动控制系统的影响和提高能量的利用效率,本文建立了基于线性矩阵不等式(LMI)的 H_∞ 鲁棒最优控制器。由此提高了再生制动控制系统的鲁棒性,同时蓄电池可以回收更多的能量。

1 电动公交车再生制动系统模型

电动公交车再生制动系统的模型包括:汽车动力学模型、电机数学模型和脉宽调制(PWM)控制与变换器的数学模型。

1.1 汽车动力学模型

汽车的行驶阻力包括^[7]:滚动阻力 F_f 、空气阻力 F_w 、坡道阻力 F_i 、加速阻力 F_j 。其中:

$$\begin{cases} F_f = fmg\cos\alpha \\ F_w = \frac{C_D AV^2}{21.15} \\ F_i = mg\sin\alpha \\ F_j = \frac{\delta mdV}{3.6dt} \end{cases} \quad (1)$$

则驱动力 F_t 为

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (2)$$

式中: f ——滚动阻力系数;

m ——整车质量;

g ——重力加速度;

α ——坡度角;

C_D ——空气阻力系数;

A ——迎风面积;

V ——车速;

δ ——旋转质量换算系数。

驱动轮的转矩为

$$T_t = T_e i_g i_0 \eta_T \quad (3)$$

由 $T_t = F_t r$ 可得:

$$T_e = \frac{T_t}{i_g i_0 \eta_T} = \frac{F_t r}{i_g i_0 \eta_T} \quad (4)$$

式中: T_e ——电机输出轴转矩;

i_0 ——减速器传动比;

i_g ——变速器传动比;

η_T ——传动系统的效率;

r ——车轮半径。

1.2 电机的数学模型

永磁直流电机的机械特性和调节特性都比较好,同时具有体积小、效率高、转速范围广、起动转矩较大、励磁简单等特点^[8],在电动汽车上运用广泛,因此采用永磁直流电机进行研究。永磁直流电机的模型^[9]为

$$\begin{cases} U_d = RI_d + L \frac{dI_d}{dt} + E \\ T_{em} = C_m I_d \\ T_{em} - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \\ E = C_e n \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_d ——电机端总电压;

R ——电枢总电阻;

I_d ——电枢总电流;

L ——电枢总电感;
 E ——感应电动势;
 T_{em} ——电磁转矩;
 C_m ——转矩电流比;
 T_L ——滚动阻力、坡度阻力的负载转矩与
 风阻产生的等效负载转矩之和;
 GD^2 ——电力拖动系统运动部分折算到电
 机轴上的飞轮质量;
 n ——转速;
 C_e ——电动势常数。

1.3 PWM 控制与变换器的数学模型

图 1 所示为 PWM 控制与变换器的原理图,其中,输入信号 U_c 经过 PWM 控制器输出脉冲电压 U_g , U_g 控制 PWM 变换器中 IGBT 的通断,从而控制电动机两端电压 U_d 。

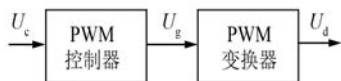


图 1 PWM 控制与变换器的原理图

对 PWM 变换器的工作原理分析可得:当 U_c 改变时, PWM 变换器输出的平均电压按线性规律变化,但其响应会有延迟,最大时延为一个开关周期。

PWM 控制器和变换器(简称 PWM 装置)可看成是一个滞后环节。当开关频率为 10 kHz 时, PWM 装置的数学模型可以近似看成是一阶惯性环节^[10]:

$$W_{PWM}(s) = \frac{U_d(s)}{U_c(s)} = \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (6)$$

式中: K_s ——PWM 装置的放大系数;

T_s ——PWM 装置的延迟时间。

1.4 电动公交车再生制动系统的状态方程

图 2 所示为电动公交车再生制动系统动态结构框图。其中, $T_1 = \frac{L}{R}$ 为电机电磁时间常数;

$T_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m}$, 为机电时间常数; $N_v = \frac{0.377 r}{i_g i_0}$ 。

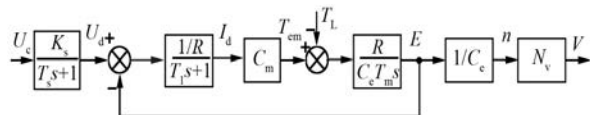


图 2 电动公交车再生制动系统动态结构框图

选取电枢电流 i_d 和汽车车速 v 作为状态变量,则电动公交车再生制动系统的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{K_s U_c}{L} - \frac{R i_d}{L} - \frac{C_e}{L} \frac{i_g i_0 v}{0.377 r} \\ \frac{dv}{dt} = \frac{3.6}{k \delta m} (C_m i_d - T_L) \end{cases} \quad (7)$$

2 H_∞ 鲁棒最优控制器的设计

2.1 具有参数不确定性的再生制动系统

在电动公交车再生制动系统的研究中,参数不确定性主要为汽车总质量、不同挡位汽车质量换算系数和电机电枢电阻,其不确定性可用参数的标称值和摄动范围来描述:

$$\begin{cases} m_s = \bar{m}(1 + \delta_m) \\ \delta_s = \bar{\delta}(1 + \delta_\delta) \\ R_s = \bar{R}(1 + \delta_R) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\bar{m}$ 、 $\bar{\delta}$ 、 $\bar{R}$ ——汽车总质量、汽车旋转质量换算系数、电机绕组总电阻的标称值;

δ_m 、 δ_δ 、 δ_R ——系统参数摄动值。

对具有参数不确定性的系统,式(7)可用状态空间方程表述:

$$\dot{x} = [A + \Delta A(t)]x + [B_1 + \Delta B_1(t)]w + B_2 u \quad (9)$$

式中: x ——系统的状态变量;

w ——外部干扰;

u ——控制输入;

A 、 B_1 、 B_2 ——已知标称矩阵;

ΔA 、 ΔB_1 ——再生制动系统参数不确定性引起的系统摄动矩阵。

$$[\Delta A(t) \quad \Delta B(t)] = E \Sigma(t) [F_a \quad F_b] \quad (10)$$

式中: E 、 F_a 、 F_b ——具有适当维数的已知矩阵;

$\Sigma(t)$ ——未知函数矩阵,且 $\Sigma \in \Omega$, Ω 为不确定性范数的有界条件。

2.2 H_∞ 鲁棒最优控制

H_∞ 控制理论是在实有理函数空间中,以某函数的无穷范数作为评价控制系统性能的指标,通过对无穷范数进行优化,从而使设计的控制器具有鲁棒性的理论。当利用被控对象的数学模型 G 来设计控制器时,由于参数的变化和不确定性,为了便于设计和计算,把对象的模型简化,导致对象的数学模型 G 存在误差 ΔG ^[11]。 H_∞ 控制的核心

思想是:利用系统不确定性的增广对象模型,设计出使闭环传递函数的无穷范数最小的控制器,从而使系统保持稳定^[12]。

对于任意给定的 $T_1 > 0$, $w(t)$ 满足如下的有界条件:

$$\int_0^{T_1} w^T(t) w(t) dt < \infty \quad (11)$$

干扰抑制性能指标为

$$\int_0^{T_1} \{x^T(t) Q x(t) + R u^2(t)\} dt < \varepsilon \int_0^{T_1} w^T(t) w(t) dt \quad (12)$$

对于满足式(11)的干扰信号 $w(t)$ 成立,其中 $\varepsilon > 0$ 为给定常数, $Q > 0$, $R > 0$ 为加权矩阵。

Q 和 R 用来调节干扰抑制效果和控制输入信号的矛盾。根据二次型最优控制理论可知, ε 越小意味着系统对于干扰 w 的抑制性能越好。

定义抑制干扰评价信号:

$$z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \quad (13)$$

其中: $C_1 = \begin{bmatrix} Q^{1/2} \\ 0 \end{bmatrix}$; $D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ R^{1/2} \end{bmatrix}$, 基于 Ricati 方程的状态反馈求解,对由式(9)和式(13)组成的广义被控对象,假设控制目标函数不含噪声干扰项,则 $D_{11} = 0$ 。

对于式(9)中的被控对象,设计了状态反馈控制器 K :

$$u = Kx \quad (14)$$

使得闭环系统满足:(1) 对于任意的 $\Sigma \in \Omega$, 闭环系统内部稳定;(2) 对于任意的 $\Sigma \in \Omega$, 由 w 到 z 的传递函数 $G_{zw}(s)$ 满足 $\min \|G_{zw}(s)\|_{\infty} = \gamma_0$ 。其中, $\|G_{zw}(s)\|_{\infty} = \|C_1 + D_{12}K\| [sI - (A + B_2K)]^{-1} N_1\|_{\infty}$, γ 为一正常数。

2.3 加权矩阵对系统鲁棒性的影响

式(12)中的 Q 和 R 分别为再生制动控制系统的状态变量和输入变量的加权矩阵。研究表明^[13]: (1) 加权矩阵 Q 固定时,随着 R 的增大,系统的上升时间减少,稳态误差减小,但系统的超调量却增大,过渡过程时间延长。(2) 加权矩阵 R 固定时,随着 Q 中相关元素的增大,系统的上升时间延长,稳态误差增大,但系统的超调量与过渡时间却减少。该实验选取:

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 2.25 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

2.4 H_{∞} 鲁棒控制器参数确定

电动公交车再生制动系统模型如式(9),其

$$\text{中: } x = \begin{bmatrix} i_d \\ v \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{C_e i_g i_0}{0.377 L r} \\ \frac{3.6 C_m}{k \delta m} & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{3.6}{k \delta m} \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} \frac{K_s}{L} \\ 0 \end{bmatrix}; k = \frac{r}{i_g i_0 \eta}。$$

该研究采用文献[14]中的电动公交车。汽车的主要参数如表1所示。

表1 汽车的主要参数

参数名称	参数值
主传动比 i_0	6.17
变速器传动比 i_g	5.568(一档)、4.356(二档)、1.643(三档)、1.000(四档)、0.814(五档)
车轮半径 r/m	0.363
空气阻力系数与迎风面积的乘积 $C_D A/m^2$	3.48
滚动阻力系数 f	0.013
旋转质量换算系数 δ	1.05
机械效率 η	0.9
改装后整车质量 m/kg	3 875
电枢电阻 R/Ω	0.026 5
电枢电感 L/H	0.000 19

由汽车的主要参数计算可得:

$$A = \begin{bmatrix} -139.474 & -70\ 287.868 \\ 0.038\ 52 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.059 \end{bmatrix};$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1\ 136\ 842.105 \\ 0 \end{bmatrix}。$$

3 仿真及结果分析

3.1 仿真结果

评价函数 $z = C_1 x + D_{12} u$ 中,

$$C_1 = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 1.5 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

建立并求解以下优化问题:

$$\min \gamma \text{ s.t. } \begin{bmatrix} AX + B_2 W + (AX + B_2 W)^T & B_1 & (C_1 X + D_{12} W)^T \\ B_1^T & -I & 0 \\ C_1 X + D_{12} W & 0 & -\gamma \end{bmatrix} < 0$$

$$X > 0 \quad (15)$$

式(15)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,可用 LMI 工具箱中的求解器 mincx 来求解该优化问题,相应的最小扰动抑制度为 $\sqrt{\gamma}$ 。

若式(15)存在一个可行解 X^* 、 W^* ,则状态反馈控制器为 $K=W^*(X^*)^{-1}$ 。

求得 X 和 W 的可行解为

$$X = \begin{bmatrix} 17.224 & 81 & -0.746 & 6 \\ -0.746 & 6 & 0.129 & 0 \end{bmatrix},$$

$$W = [-0.044 \quad 1 \quad 0.007 \quad 9]。$$

最小的扰动抑制度 $\gamma_0 = \min \gamma = 1.531 \quad 7$,则状态反馈矩阵 $K = [0.000 \quad 1 \quad 0.061 \quad 8]$ 。

3.2 H_∞ 鲁棒最优控制与传统的车速-电流双闭环 PI 控制对比

图3所示为加速踏板给定信号,在0~20 s 加速踏板给定信号为3 V,电动公交车在水平路面上处于加速行驶状态;在20~40 s 加速踏板给定信号为0 V,电动公交车进入下长坡再生制动行驶状态;在40~50 s 电动公交车回到水平路面上,此时加速踏板的给定信号仍然保持在3 V。

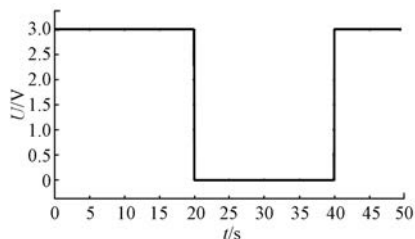


图3 加速踏板的给定信号

图4、图5和图6分别给出了电动公交车变速器传动比由4.356变为5.568时 H_∞ 鲁棒最优控制和车速-电流双闭环 PI 控制的车速对比曲线及回馈电流曲线。由图4可以看出, H_∞ 鲁棒最优控制在4 s 时车速就达到了12.64 km/h,而双闭环的PI控制需要8 s,说明采用 H_∞ 鲁棒最优控制比双闭环PI控制速度响应更快。由图5和图6可以看出,在下长坡再生制动过程中,双闭环PI控制的回馈电流出现了波动,由59.0 A 减小至58.5

A,而鲁棒控制回馈电流保持在59.6 A,说明采用 H_∞ 鲁棒最优控制鲁棒稳定性更强。再生制动过程中蓄电池的充电电流和充电时间的乘积与回收制动能量成正比,在充电电压和充电时间相同的情况下,采用 H_∞ 鲁棒最优控制比双闭环PI控制回收的能量提高了3%。

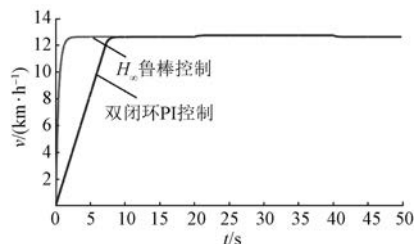


图4 传动比 $i_g = 5.568$ 时 H_∞ 鲁棒控制和双闭环 PI 控制车速对比

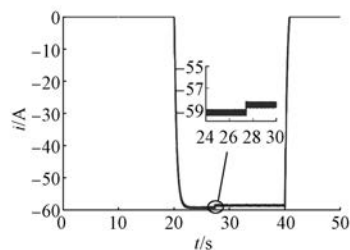


图5 传动比 $i_g = 5.568$ 时双闭环 PI 控制回馈电流

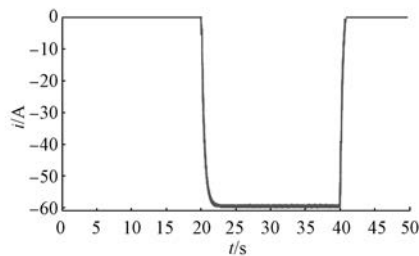


图6 传动比 $i_g = 5.568$ 时 H_∞ 鲁棒控制回馈电流

图7、图8和图9分别给出了电动公交车质量由3 875 kg 变为4 500 kg 时 H_∞ 鲁棒最优控制和车速-电流双闭环PI控制车速对比曲线及回馈电流曲线。对比图7和图4可知,仿真结果变化较小。但从图8、图9可以看出,在下长坡再生制

动过程中,采用 H_∞ 鲁棒最优控制的回馈电流维持在 88 A,而采用双闭环 PI 控制的电流出现了波动,最终稳定在 86.6 A。由此说明采用 H_∞ 鲁棒最优控制的鲁棒稳定性更强,在充电电压和充电时间相同的情况下,采用 H_∞ 鲁棒最优控制比双闭环 PI 控制回收的能量提高了 2%。

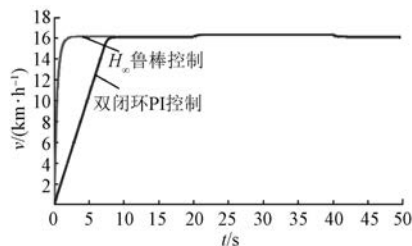


图7 质量 $m=4\ 500\text{ kg}$ 时 H_∞ 鲁棒控制和双闭环 PI 控制车速对比

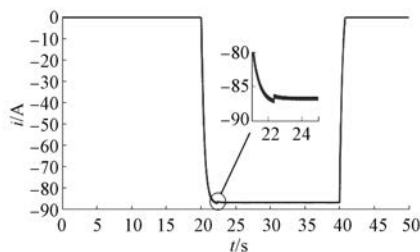


图8 质量 $m=4\ 500\text{ kg}$ 时双闭环 PI 控制回馈电流

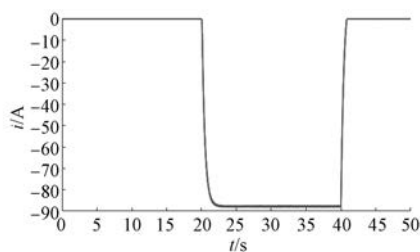


图9 质量 $m=4\ 500\text{ kg}$ 时 H_∞ 鲁棒控制回馈电流

图 10、图 11 和图 12 分别给出了电动公交车机电枢电阻由 $0.026\ 5\ \Omega$ 变为 $0.033\ 0\ \Omega$ 时 H_∞ 鲁棒最优控制和车速-电流双闭环 PI 控制的车速对比曲线及回馈电流曲线。对比图 10 和图 4 可知,仿真结果变化较小。从图 11、图 12 可以看出,在下长坡再生制动阶段,采用 H_∞ 鲁棒最优控制回馈电流稳定在 76.0 A,采用双闭环 PI 控制的回馈电流出现较小波动,最终稳定在 74.5 A。由此说明采用 H_∞ 鲁棒最优控制的鲁棒稳定性更

好,在充电电压和充电时间相同的情况下,采用 H_∞ 鲁棒最优控制比车速-电流双闭环 PI 控制回收的能量提高了 2%。

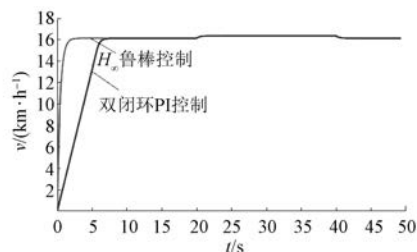


图 10 电阻 $R=0.033\ \Omega$ 时 H_∞ 鲁棒控制和双闭环 PI 控制车速对比

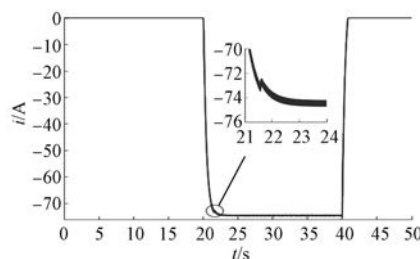


图 11 电阻 $R=0.033\ \Omega$ 时双闭环 PI 控制回馈电流

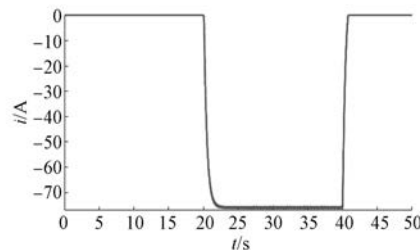


图 12 电阻 $R=0.033\ \Omega$ 时 H_∞ 鲁棒控制回馈电流

4 结 语

本文针对电动公交车下长坡再生制动过程中被控对象存在汽车质量、汽车旋转质量换算系数不确定性和电机参数摄动的问题,提出了基于 LMI 的 H_∞ 鲁棒最优控制策略。在建立参数不确定性模型的基础上,求解鲁棒控制器并进行了仿真。结果表明:基于 H_∞ 鲁棒最优控制的电动公交车在水平路面加速行驶时速度响应更快,在下长坡再生制动的过程中能够抑制一定范围内参数的不确定性,与传统的车速-电流双闭环的 PI 控制相比,具有较好的鲁棒性,并且在相同的时间内,

回收的能量比车速-电流双闭环 PI 控制提高了 2% ~ 3%。

【参考文献】

- [1] 李玉芳, 王龙. 电动汽车坡道单轴制动稳定性与再生制动极限控制研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2): 192.
- [2] 白志峰, 张传伟, 李舒欣, 等. 电动汽车驱动与再制动制动的 H_∞ 鲁棒控制[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(3): 256.
- [3] 李舒欣, 曹秉刚, 白志峰, 等. 电动汽车再生制动的模糊 PI 控制实验研究[J]. 电气技术, 2006(1): 52.
- [4] 周好斌, 龙波, 白志峰, 等. 能量回收电动助力车鲁棒控制器研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(5): 567.
- [5] 安强. 神经网络 BP PID 在电动车能量回收技术中的运用[C] // 2011 西部汽车产业学术会议暨四川省第十届汽车学术年会论文集, 2012: 21.
- [6] 崔方, 刘芳华, 邱忠华, 等. 基于 DSP 的电动车用无刷直流电机控制器的设计[J]. 电机与控制应用,

2014, 41(4): 52.

- [7] 余志生. 汽车理论[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [8] 邱国平, 邱明. 永磁直流电机实用设计及应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9] 丁学文. 电力拖动运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [10] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统[M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [11] 严运兵, 吴浩, 赵慧. 汽车防抱死制动系统的 H_∞ 鲁棒控制[J]. 汽车工程, 2014, 36(4): 453.
- [12] 潘霞远, 刘希喆, 吴捷, 等. 永磁同步直线电机的鲁棒 PID 控制[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(9): 34.
- [13] 沈宪章, 张法全, 邱道尹, 等. 线性最优控制系统鲁棒性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(4): 53.
- [14] 汪贵平. 纯电动汽车驱动与制动能量回收控制策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.

收稿日期: 2018-12-18

(上接第 106 页)

- [14] WANG J, CHENG H S, LI R T. Characterization and experimental assessment of the effects of parasitic elements on the MOSFET switching performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 573.
- [15] LEMMON A, MAZZOLA M, GAFFORD J, et al. Instability in half-bridge circuits switched with wide band-gap transistors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2380.
- [16] SADIK D P, KOSTOV K, COLMENARES J, et al. Analysis of parasitic elements of SiC power modules with special emphasis on reliability issues[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(3): 988.
- [17] 张斌锋, 许津铭, 钱强, 等. SiC MOSFET 特性及其应用的关键技术分析[J]. 电源学报, 2016, 14(4): 39.

- [18] 巴腾飞, 李艳, 梁美. 寄生参数对 SiC MOSFET 栅源极电压影响的研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 64.
- [19] 曾正, 邵伟华, 陈昊, 等. 基于栅极驱动回路的 SiC MOSFET 开关行为调控[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1165.
- [20] 梁美, 郑琼林, 可翀, 等. SiC MOSFET、Si CoolMOS 和 IGBT 的特性对比及其在 DAB 变换器中的应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 41.
- [21] DONG Z, WU X, SHENG K, et al. Impact of common source inductance on switching loss of SiC MOSFET [C] // 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 2015.
- [22] Cree Inc. SiC MOSFET datasheet, document library 2015[Z/OL]. <http://www.wolfspeed.com/>.

收稿日期: 2019-02-20