

能量回收电动助力车鲁棒控制器研究

周好斌^{1,2}, 龙波¹, 白志峰¹, 蒋辉¹, 曹秉刚¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安石油大学材料工程学院, 710065, 西安)

摘要: 针对电动助力车频繁启动和刹车造成的制动能量浪费等问题, 在研究和建立了永磁无刷直流电机驱动、制动电路结构和数学模型的基础上, 设计了能量回收电动助力车控制器. 针对速度-电流双闭环调速控制系统的内环电流环, 应用鲁棒控制理论设计了 H_∞ 鲁棒控制器, 并应用了 PID 控制器的闭环系统进行了比较. 结果表明, H_∞ 鲁棒控制器在系统建模中的参数不确定性抑制、抗干扰、响应速度等方面均优于传统的 PID 控制器, 而且应用 H_∞ 控制器可使助力车续行里程比例提高到 1.8%~2.6%.

关键词: 电动助力车; 能量回收; H_∞ 鲁棒控制器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0567-04

Robust Controller for Energy Regenerating Electric Vehicle

Zhou Haobin^{1,2}, Long Bo¹, Bai Zhifeng¹, Jiang Hui¹, Cao Binggang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Material Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the analysis of driving and regenerating circuit for the brushless DC motor, the regenerating controlling system is designed to lower the energy dissipation due to frequent starting and braking. Focusing on the speed-current double closed loops system, H_∞ controller is developed. The experimental results show that H_∞ outperforms the traditional PID controller for resisting perturbation, accelerating, response, and the controller enables to extend the mileage by 1.8% to 2.6%.

Keywords: electric vehicle; energy regenerating; H_∞ robust controller

针对电动助力车续行里程短、在市区运行时会频繁的起制动, 以及采用机械摩擦制动产生的能量浪费等问题, 研究设计了能量回收电动助力车的控制系统, 使电动机能够根据需要分别工作于驱动和发电状态. 当电动机处于发电状态时, 其电流方向与驱动状态时的电流相反, 从而将整车运行的动能转化为电能回馈到蓄电池中, 不仅延长了续行里程, 而且没有机械刹车的噪声污染. PID 控制器具有原理简单、使用方便等优点, 但也有其固有的缺点, 在控制非线性、时变、耦合及参数和结构不确定的复杂过程时, 效果不好, 主要原因是 PID 控制器对系统未建模部分的鲁棒控制能力较差.

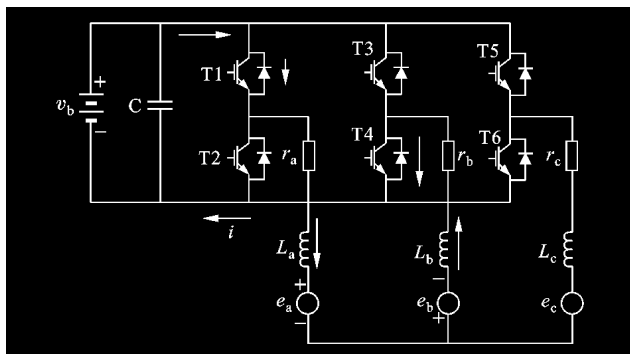
鲁棒控制理论^[1]设计思想的精髓是对系统的频域特性进行整形, 并在设计过程中考虑数学模型所具有的不确定性误差^[2], 假设模型频率特性与实际被控对象的频率特性, 或者模型参数与实际对象的参数具有一定范围内的偏差, 然后用解析的手段来设计控制器, 使得这一误差范围内的所有被控对象均能满足理想的性能要求.

本文对 H_∞ 鲁棒控制器进行了研究, 将 H_∞ 鲁棒控制技术应用到能量回收电动助力车的驱动与再生制动控制系统中, 并与使用 PID 控制器的能量回收电动助力车的控制系统进行了比较.

1 驱动控制系统设计

1.1 驱动控制主电路

目前使用的直流无刷电动机一般采用两相导通规律,即根据转子位置传感器输出的3个位置信号来决定三相定子逆变器的导通和关断^[3].直流无刷电动机实质上可看作是一台用电子换相装置取代机械换相的直流电机,它的三相全桥电路结构及其驱动时的电流方向如图1所示.



v_b :电池电压; C :电容; $T1\sim T6$:场效应管; L_a, L_b, L_c :定子三相电感; e_a, e_b, e_c :定子的三相反电动势;
 r_a, r_b, r_c :定子的三相内阻; i :电枢电流
图1 驱动主电路及电流方向图

1.2 驱动数学模型

为了简化分析,以一台反电势为梯形波的三相两极永磁直流无刷电动机(BLDCM)为例(见图2),在允许的范围内作如下假设:①定子绕组为三相星形连接,无中线引出;②忽略齿槽效应,绕组均匀分布于光滑定子的内表面;③忽略磁路饱和,不计涡流和磁滞损耗;④转子上没有阻尼绕组,永磁体不起阻尼作用.

由于无刷电机在两两导通情况下等同于直流电机,因此在驱动调制情况下,对任意导通的两相建立等效电路及其数学模型^[4].假设永磁无刷直流电动机三相对称,即

$$L_a = L_b = L_c = L; e_a = e_b = e_c = e;$$

$$r_a = r_b = r_c = r$$

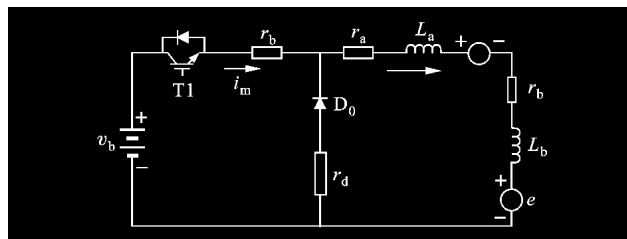
当T1导通($0 \leq t \leq dT$)时

$$2L \frac{di_m}{dt} = v_b - 2e - i_m(r_b + 2r) \quad (1)$$

式中: r 为各相电阻; T 为调制周期时间; d 为调制占空比; L 为电机的电感.电机转矩平衡方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t i_m - T_L, \text{ 且 } e = K_e \omega \quad (2)$$

式中: K_t 为转矩时间常数; K_e 为反电动势系数; ω



i_m :电流; D_0 :二极管; e :反电动势; r_d :二极管导通电阻; r_b :电池内阻
图2 驱动降压斩波电路的拓扑结构

为转子角速度; T_L 为负载扭矩; J 为转动惯量.取状态向量 $\mathbf{x} = [i_m \ \omega]^T$,输出向量为 $\mathbf{y} = i_m$,得到

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{-(r_b + 2r)}{2L} & \frac{-K_e}{L} \\ K_t/J & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} v_b/2L \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = [1 \ 0] \mathbf{x}$$

当T1截止($dT \leq t \leq T$)时

$$2L \frac{di_m}{dt} = -2e - i_m(r_b + 2r + r_d) \quad (4)$$

同理,得到T1关断情况下的状态方程

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{-(r_b + 2r + r_d)}{2L} & \frac{-K_e}{L} \\ K_t/J & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{y} = [1 \ 0] \mathbf{x}$$

对降压斩波电路作平均化处理,得到

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-2(r_b + 2r) + r_d - d(r_b + 2r + r_d)}{2L} & \frac{-K_e}{L} \\ K_t/J & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{v_b d}{2L} \\ -T_L/J \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = [1 \ 0]$$

经摄动处理、分离稳态和瞬态变量^[5]后得到

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{-2(r_b + 2r) + r_d - (1-D)(r_b + 2r + r_d)}{2L} & \frac{-K_e}{L} \\ K_t/J & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \frac{r_b + 2r + r_d}{2L} & \frac{-K_e}{L} \\ K_t/J & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_d + \begin{bmatrix} v_b/L \\ 0 \end{bmatrix} d \\ \mathbf{y} = [1-D \ 0] \mathbf{x} + [-1 \ 0] \mathbf{x}_d \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X} = [\bar{i}_m \ \bar{\omega}]$, $\bar{i}_m, \bar{\omega}$ 分别为某一稳态工作点处

的电枢电流和角速度; D 为此工作点的占空比。

2 能量回收控制系统的控制器设计

如图3所示,当电机处于再生制动情况时,控制系统采用升压斩波调制,对 T2、T4 和 T6 进行脉宽调制,实现升压斩波,将车辆制动动能转化为电能向蓄电池充电,以达到能量回收的目的,并且提高了一次充电的续驶里程。

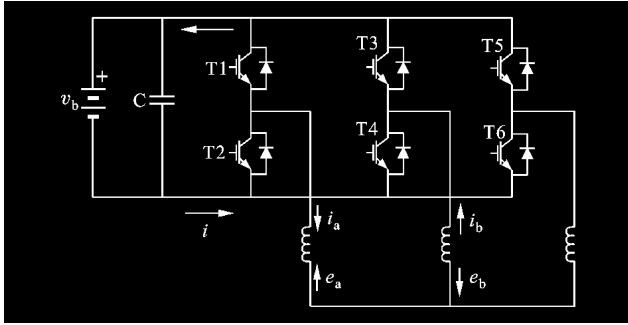


图3 回收电路及电流方向图

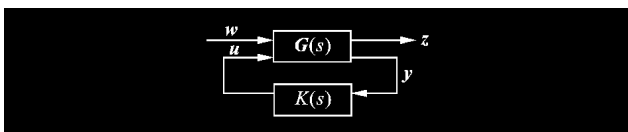
电机的制动过程相当于升压斩波,其等效电路及其推导过程和驱动电路相似,可以得到制动情况下的数学模型。同理,经摄动处理、分离稳态和瞬态变量后的线性小信号模型为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \left[\begin{array}{cc} -\frac{r_d + r_b}{2L} - \frac{2r_a - r_d - r_b}{2L}D & -\frac{K_e}{L} \\ K_t/J & 0 \end{array} \right] \begin{bmatrix} i_b \\ \omega \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{cc} -\frac{2r_a - r_d - r_b}{2L} & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right] \mathbf{X}d + \begin{bmatrix} v_b/2L \\ -T_L/J \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_b \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{2L}d \\ \mathbf{y} &= [1 - D \quad 0]\mathbf{x} + [-1 \quad 0]\mathbf{X}d \end{aligned} \quad (8)$$

3 驱动 H_∞ 鲁棒控制器设计

3.1 驱动与制动 H_∞ 鲁棒及 PID 控制器设计

在实际系统设计中,各种 H_∞ 鲁棒控制问题均可用图4来表示。



u : 控制输入; y : 测量输出; w : 干扰输入信号; z : 被控输出信号;

$G(s)$: 传递函数矩阵; $K(s)$: 待求控制器

图4 H_∞ 鲁棒控制器的标准设计

设 $G(s)$ 的状态空间实现为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{z}(t) &= \mathbf{C}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{11}\mathbf{w}(t) + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}_2\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{21}\mathbf{w}(t) + \mathbf{D}_{22}\mathbf{u}(t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为增广被控对象的状态变量; $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{D}_{11}$ 、 $\mathbf{D}_{21}$ 、 $\mathbf{D}_{22}$ 为干扰输入信号系数矩阵; $\mathbf{B}_2$ 、 $\mathbf{D}_{12}$ 为输入控制矩阵; $\mathbf{C}_1$ 、 $\mathbf{C}_2$ 为状态变量系数矩阵。

从 w 到 z 的闭环传递函数为

$$\mathbf{T}_{zw}(s) = F(\mathbf{G}(s), \mathbf{K}(s)) = \mathbf{G}_{11} + \mathbf{G}_{12}\mathbf{K}(\mathbf{I} - \mathbf{G}_{22}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{G}_{21}$$

其中

$$\mathbf{G}_{12} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2]; \mathbf{G}_{21} = [\mathbf{C}_1 \quad \mathbf{C}_2]^T$$

$$\mathbf{G}_{11} = \mathbf{A}; \mathbf{G}_{22} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{D}_{21} & \mathbf{D}_{22} \end{bmatrix}$$

3.2 H_∞ 鲁棒控制器的最优设计问题

对于给定的 $\mathbf{G}(s)$, 求 $\mathbf{K}(s)$ 使得闭环系统内部稳定且 $\mathbf{T}_{zw}(s)$ 最小, 即

$$\min_{\mathbf{K}(s)} \|\mathbf{T}_{zw}(s)\|_\infty = \gamma, \quad \gamma > 0 \text{ 且 } \gamma \rightarrow 0$$

控制系统采用双环控制, 其中内环电流环采用 H_∞ 鲁棒控制算法。设计的目标是找到一个控制器, 以保证闭环系统的 H_∞ 范数限制在一个给定的小正数下^[6]。引入加权函数

$$\mathbf{W}_1(s) = \frac{500(0.005s + 1)^2}{(0.2s + 1)^2}; \mathbf{V}(s) = 0.25s^2 \times 10^{-4}$$

利用 Matlab 提供的 hinf() 函数设计的符合混合稳定性与品质稳定性要求的控制器为

$$\mathbf{G}_c(s) = \frac{960s^2 + 81350s + 50079}{s^3 + 487s^2 + 4791s + 11915} \quad (10)$$

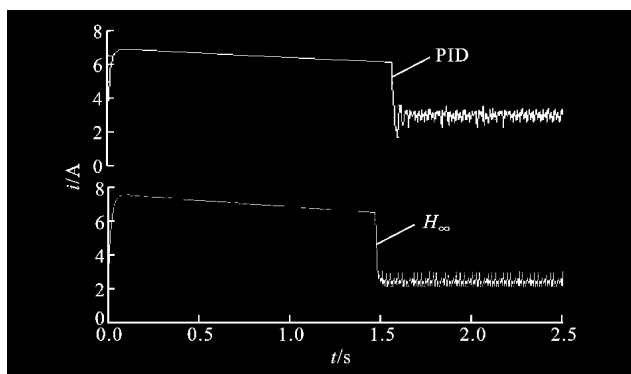
同理, 引入加权函数, 求解得到

$$\mathbf{W}_1(s) = \frac{0.4s + 130}{s + 0.01}; \mathbf{W}_2(s) = \frac{s + 50}{200}; \mathbf{W}_3(s) = 20$$

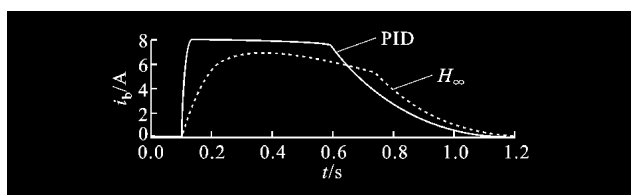
由此得到制动情况下的 H_∞ 控制器

$$\mathbf{K}_b(s) = \frac{1.386 \times 10^{-8}s^3 + 1.471s^2 + 1379s + 330.5}{s^3 + 1.165 \times 10^4s^2 + 241.7s + 1.252} \quad (11)$$

图5为2种控制器的驱动和制动阶跃响应电流仿真曲线(i 为回收电流, t 为制动时间), 仿真中选取驱动 PID 控制器的参数 $K_p = 50$, $K_i = 0.06$, $K_d = 0.0006$, 制动 PID 控制器的参数 $K_p = 30$, $K_i = 0.002$, $K_d = 0.0003$, 结果表明, H_∞ 控制器响应的快速性和稳定性都要优于 PID 控制器。 H_∞ 控制器在驱动和制动情况下, 稳态误差控制比传统的 PID 控制器效果要好, 电流控制平稳, 转矩脉动比较小。从制动情况分析来看, H_∞ 控制器可以延长回收制



(a) 2种控制器的电流波形



(b) 2种控制器制动电流波形的对比

图5 驱动和制动情况下的PID和 H_{∞} 控制器的比较

动时间,回收的能量要比PID控制器多。

3.3 能量回收的实验结果比较

本文设计的能量回收电动助力车控制系统的最终目标,是提高电动助力车的续行里程,实验通过对比方式验证了所设计的控制系统对电动助力车的续行里程的影响。实验采用车的外型、车用蓄电池、车体质量都是一样的同款型电动助力车,负载(实验人员的体重)也一致。电动助力车的配置为普通控制系统、能量回收控制系统和PID控制器。图6为电动

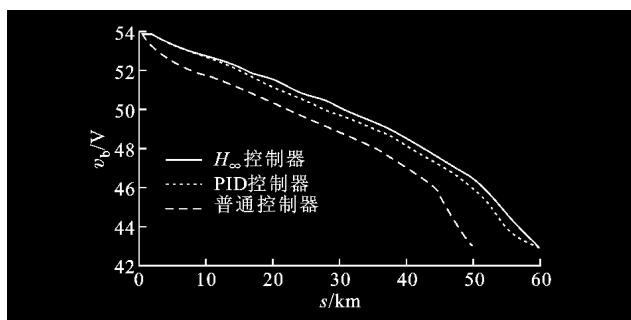


图6 电动助力车的定点刹车续行里程比较曲线

助力车(电机为上海21所研制的安乃达电机,额定电压为48V,额定功率为500W,霍尔电角度为 120°)的定点刹车续行里程的比较曲线(s 为续行里程)。

从图6中可以看出,配备了 H_{∞} 鲁棒控制器与配备了PID控制器的电动助力车相比,在延长一次充电续行里程方面所提高的比例为 $1.8\% \sim 2.6\%$ 左右。

4 结 论

本文将鲁棒控制理论和 H_{∞} 鲁棒控制器的设计方法应用于电动助力车的控制系统中,针对速度-电流双闭环调速控制系统的内环电流环,设计了 H_{∞} 鲁棒控制器,并进行了仿真实验分析,结果如下。

(1) H_{∞} 鲁棒控制器的稳态误差及响应速度均优于传统的PID控制器。通过实验对比,表明 H_{∞} 控制器对续行里程的提高比例高,针对不同的路况和额定电压不同的电动助力车, H_{∞} 控制器的提高比例在 $1.8\% \sim 2.6\%$ 左右。

(2)采用 H_{∞} 的能量回收控制器,对系统建模中的不确定性因素、参数测量的不确定性的控制,以及对外界的抗干扰能力等方面,都比传统的PID控制器好,说明 H_{∞} 控制器具有很强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 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,2003:45.
- [2] 申铁龙. H_{∞} 控制理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996:55-79.
- [3] 张深. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社,1996:59-69.
- [4] 李竞成. 电动汽车驱动与再生制动研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院,2003.
- [5] 白志峰. 电动车蓄电池-超级电容复合电源系统研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院,2006.
- [6] 周克敏,Doyle J C,Glover K. 鲁棒与最优控制[M]. 北京:国防工业出版社,2002:109-123,245-248,369-389.

(编辑 管咏梅)