

汽车电子机械制动系统设计与仿真^{*}

杨坤 李静 郭立书 李幼德

【摘要】 给出了汽车电子机械制动系统(EMB)执行系统的设计方法并在 Matlab/Simulink 下建立了其仿真模型。EMB 控制系统采用由压力环、转速环及电流环串连而成的三闭环结构,给出了其设计方法。对目标压力阶跃输入、半余弦输入以及脉冲输入 3 种典型工况进行了仿真,结果表明 EMB 系统除了在消除制动间隙时,制动压力具有较大的超调外,均能很好地跟随目标制动压力的变化,验证了所设计 EMB 系统的合理性;EMB 系统与液压制动系统的对比表明,EMB 系统对制动压力的调节更迅速,精度更高。

关键词: 汽车 电子机械制动 设计 仿真

中图分类号: U463.5

文献标识码: A

Design and Simulation of Electromechanical Brake System

Yang Kun¹ Li Jing¹ Guo Lishu² Li Youde¹

(1. Jilin University, Changchun 130025, China 2. Zhejiang Asia-pacific Mechanical & Electrical Co., Ltd., Hangzhou 311203, China)

Abstract

The actuator and controller of electromechanical brake (EMB) were designed. The simulation model of EMB was built in Matlab/Simulink. The controller of motor adopted three loops control architecture with cascaded force, speed and current control loops, and the design method of controller was given. Computer simulation on three-typical-condition of step input, half cosine input and pulse input has been carried out. The results showed that the brake pressure of EMB could follow the target accurately and the performance of EMB is good. The comparison of hydraulic brake and EMB showed that EMB could regulate brake force more quickly and accurately.

Key words Automobiles, Electromechanical brake, Design, Simulation

引言

为提高汽车制动性能,汽车电子机械制动系统(electromechanical brake,简称 EMB)已成为国外汽车零部件厂商的研究热点,国内多所科研院所也纷纷开展了相应的理论研究^[1]。EMB 改变了汽车制动系统的工作模式,取消了液压回路,具有传动效率高、安全可靠、节能、环保的优点。针对 Jetta GTX 前轮制动器提出 EMB 执行器、控制系统的设计方法,并通过 3 种典型工况的仿真分析及与液压制动

系统的对比,验证所设计 EMB 的合理性及 EMB 的优越性。

1 电子机械制动系统设计

1.1 EMB 执行系统

图 1 为 EMB 的执行系统示意图。采用无刷直流电动机驱动行星齿轮减速装置,运动转换装置采用滚珠丝杠将旋转运动转化为直线运动,从而产生制动器制动力矩,压力传感器用于监测制动盘制动压力反馈信号。

收稿日期: 2007-08-20

^{*} 霍英东教育基金会资助项目(项目编号:111080)和吉林大学“985 工程”资助项目

杨坤 吉林大学汽车工程学院 博士生, 130025 长春市

李静 吉林大学汽车工程学院 副教授

郭立书 浙江亚太机电股份有限公司 博士后, 311203 杭州市

李幼德 吉林大学汽车工程学院 教授

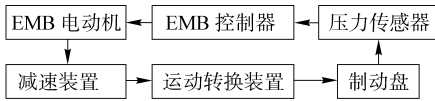


图 1 EMB 执行系统组成示意图

Fig. 1 Schematic drawing for components of EMB actuator

EMB 执行系统设计流程如图 2 所示,目标车型为 Jetta GTX,针对其前轮制动器设计了 EMB 执行系统。Jetta GTX 前轮轮缸最大制动压强 15 MPa,活塞直径为 48 mm。为保证制动钳与制动盘充分脱离,初步选定 EMB 的制动间隙为 0.3 mm,消除制动间隙的时间为 0.1 s。选用的滚珠丝杠型号为 FF3206,滚珠采用 5 列。设计得到的 EMB 执行系统的其他主要参数如表 1 所示。

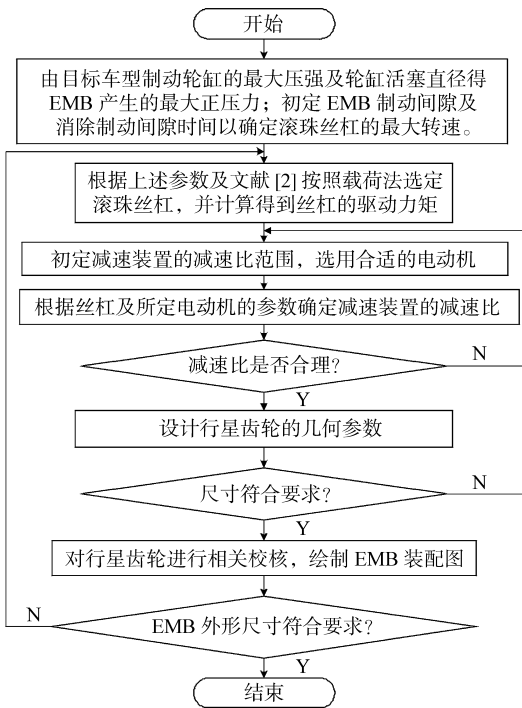


图 2 EMB 执行系统设计流程图

Fig. 2 Flow chart for design of EMB actuator

表 1 EMB 执行系统的主要参数

Tab.1 Key parameters of EMB actuator

参数	数值
最大制动盘压力/kN	27.13
滚珠丝杠螺纹导程/mm	6
电动机的力矩常数/ $N \cdot m \cdot A^{-1}$	0.287
电动机的电压常数/ $V \cdot (r \cdot \min^{-1})^{-1}$	30.0×10^{-3}
电动机的电枢电感/mH	1.1
电动机的电枢电阻/ Ω	0.56
电动机的持续堵转扭矩/ $N \cdot m$	2.16
减速装置减速比	12.5

1.2 EMB 控制系统

EMB 控制系统的功能为:快速消除制动间隙;对制动力进行快速、准确的调节。图 3 所示的 EMB 控制系统是由压力控制环、转速控制环和电流控制

环串连而成的三闭环结构,三环均为 PI 控制^[3-4]。其中,外环是决定系统主要性质的基本控制环,但内环也起着重要的作用:对本环的控制量进行限幅以保护电动机;对环内的扰动及时进行调节,使其更有利于外环控制。

EMB 控制系统设计方法是:在确定各环控制目标的前提下,从内环开始,一环一环地向外扩展,首先设计电流控制环,然后将电流环当作转速调节系统中的一部分设计转速控制环,最后把转速控制环当作压力调节环中的一部分,设计得压力控制环。

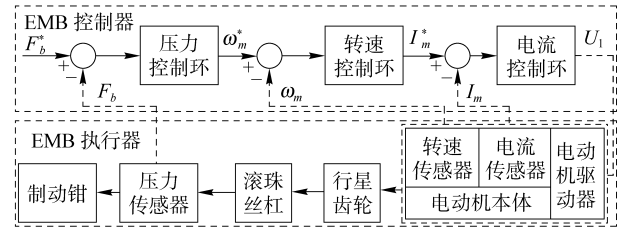


图 3 EMB 控制系统结构框图

Fig. 3 Block diagram for construction of EMB controller

在设计控制系统时,对各控制环的要求如下:对压力控制环,制动压力超调不能大于 5%,同时还要使消除制动间隙的时间小于 0.1 s;对转速控制环,要求在启动过程中要使电流维持饱和,从而能够快速消除制动间隙;电流控制环,超调量不大于 2%。本文设计的 EMB 控制系统中,电流控制环、转速控制环、压力控制环的比例系数和积分系数分别为:0.945、610、1.9、8.6、8.6、6。

2 电子机械制动系统的数学模型

2.1 电动机模型

图 4 为无刷直流电动机等效电路图。

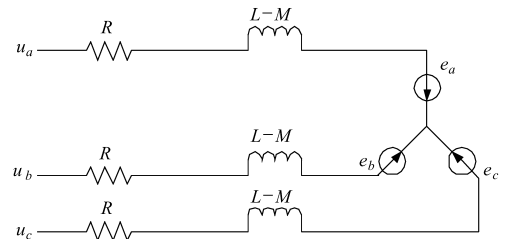


图 4 无刷直流电动机等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of brushless DC motor

电动机工作时,有

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_m = \left(\frac{d\theta_m}{dt} \right)^{-1} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

$$J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} = T_m - T_f \quad (3)$$

式中 u_a, u_b, u_c ——定子相绕组电压

i_a, i_b, i_c ——定子相绕组电流

e_a, e_b, e_c ——定子相绕组反电动势

R ——电枢电阻 p ——微分算子

L ——每相绕组的自感

M ——每两相绕组间的互感

θ_m ——转轴角位移 T_f ——负载转矩

T_m ——电动机产生的转矩

B_m ——电动机和反射到电动机轴上负载的等效粘滞摩擦系数

J_m ——电动机和反射到电动机转轴上负载转动惯量

本文在建模过程中,梯形波反电动势的求取采用了分段线性法^[5]。

2.2 减速装置模型

减速装置模型的输入是电动机转轴转过角度,输出是丝杠转过的角度 θ ,即

$$\theta = \theta_m / i \quad (4)$$

式中 i ——减速装置减速比

2.3 运动转换装置模型

运动转换装置滚珠丝杠是丝杠转动,螺母移动,所以运动转换装置模型为丝杠转过角度与螺母移过距离之间的运动关系,以及滚珠丝杠工作所需的驱动力矩与丝杠轴向工作载荷之间的关系,即

$$S = \theta l / (2\pi) \quad (5)$$

$$M_t = Fl / (2\pi\eta) \quad (6)$$

式中 S ——螺母移过的距离

l ——丝杠的螺纹导程 M_t ——驱动力矩

F ——轴向工作载荷 η ——正传动效率

3 典型工况仿真

为了验证所设计 EMB 系统的性能,对目标压力阶跃输入、半余弦输入以及脉冲输入 3 种典型工况下 EMB 的制动情况进行了仿真研究,然后在 Matlab/Simulink 下搭建考虑制动管路压力传播、电磁阀响应滞后及轮缸制动压力变化率的液压制动模型^[6],并对二者进行了对比分析。

图 5 为在 1 s 时进行 0~27.13 kN 阶跃输入时的仿真结果。驾驶员在紧急制动时,往往会把制动踏板迅速踩到底,即相当于阶跃输入。由图可知,制动压力的超调小于 5%,而消除制动间隙及制动压

力增加到最大值所需的时间为 0.1 s,这比液压制动系统快得多。另外,开始时,制动力的超调比较大,这是因为在消除制动间隙前,电动机的负载很小,同时为了快速消除制动间隙,电动机的电流较大,所以其转速较快,从而使得压力超调量较大。由上可知,快速消除制动间隙与压力超调是相互对立的,所以在设计控制系统时,需要对二者进行折衷。

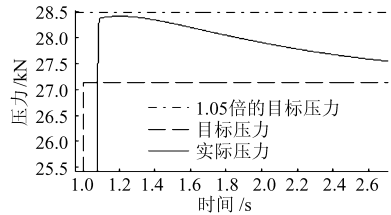


图 5 阶跃输入的仿真结果

Fig.5 Simulation result of step input

图 6 为半余弦输入,峰值为 27.13 kN、周期为 3.14 s 的仿真结果,目的是验证制动过程中制动力输入连续变化的情况。由图可知,消除制动间隙后,制动压力可以很好的跟随目标压力。刚开始产生了较大的超调,这仍是由于快速消除制动间隙所致。

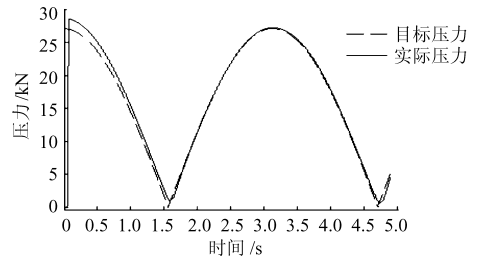


图 6 半余弦输入时的仿真结果

Fig.6 Simulation result of half cosine input

为了研究频繁剧烈调节制动力时 EMB 的特性,图 7 为峰值 27.13 kN、频率 1 Hz 的脉冲输入时的仿真结果。与半余弦输入情况相同,消除制动间隙后,制动压力可以很好地跟随目标压力。

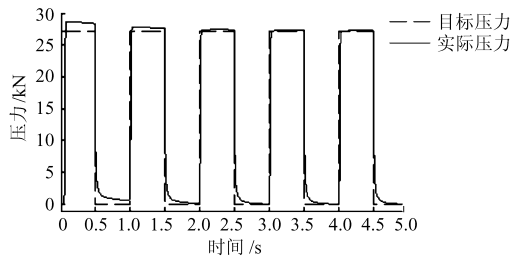


图 7 脉冲输入时的仿真结果

Fig.7 Simulation result of pulse input

另外,上述仿真中仅给出了幅值为 27.13 kN 时的结果,因为通过仿真发现,如果幅值最大时能满足要求,那么其他情况也能满足要求。

图 8~图 10 为 EMB 系统与液压制动系统在输入各种频率的脉冲信号时的对比。仿真时,液压系

统的主缸压力取为最大值,即使增减压速率最大。由图8可知,刚开始消除制动间隙时,EMB的压力超调量要比液压制动系统的压力超调大得多,但其增压速率要比液压系统快得多,减压时EMB比液压系统要快,但相差不大。由图9、10可知,随着制

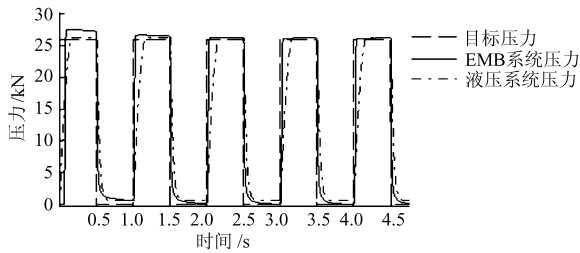


图8 1 Hz脉冲输入时的仿真结果

Fig.8 Simulation result of pulse input of 1 Hz

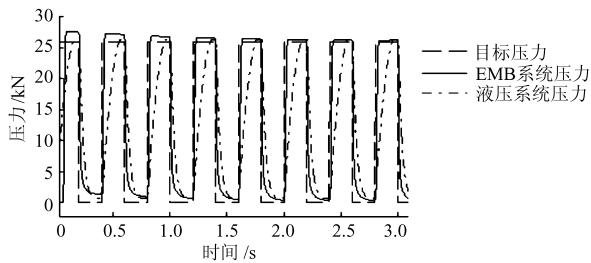


图9 2.5 Hz脉冲输入时的仿真结果

Fig.9 Simulation result of pulse input of 2.5 Hz

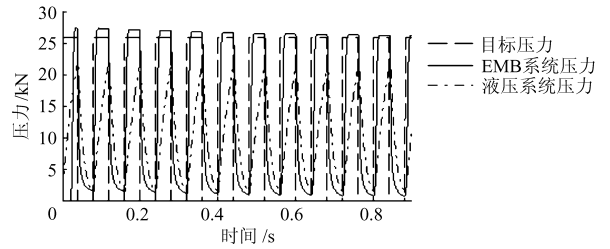


图10 5 Hz脉冲输入时的仿真结果

Fig.10 Simulation result of pulse input of 5 Hz

动频率的增加,液压系统逐渐不能跟随目标制动力,而EMB系统则能一直跟随目标制动压力,这证明EMB调节制动力的精度更高,速度更快。

4 结论

(1)给出了EMB执行器的设计流程,控制系统采用三闭环控制方法,并给出了设计方法。

(2)仿真结果表明,在各种典型输入下,EMB除了在消除制动间隙时,制动压力具有较大的超调外,均能很好地跟随目标制动压力的变化。通过与液压制动系统的对比发现,EMB系统对制动压力的调节速度与精度比液压制动系统高。

参 考 文 献

- 林逸,沈沉,王军,等. 汽车线控制动技术及发展[J]. 汽车技术,2005,12(12):1~3.
Lin Yi, Shen Chen, Wang Jun, et al. Automotive by-wire control technology and development[J]. Technology of Vehicle, 2005, 12(12):1~3. (in Chinese)
- 张展. 非标准设备设计手册:第一册[M]. 北京:兵器工业出版社,1993:1 510~1 511.
- 周渊深. 交直流调速系统与MATLAB仿真[M]. 北京:中国电力出版社,2004:81~85.
- Chris Line, Chris Manzie, Malcolm Good. Control of an electromechanical brake for automotive brake-by-wire systems with an adapted motion control architecture[C]. SAE Paper 2004-01-2050, 2004.
- 纪志成,沈艳霞,姜建国. 基于Matlab无刷直流电机系统仿真建模的新方法[J]. 系统仿真学报,2003,15(12):1 745~1 749.
Ji Zhicheng, Shen Yanxia, Jiang Jianguo. A novel method for modeling and simulation of BLDC system based on Matlab[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(12):1 745~1 749. (in Chinese)
- 刘溧. 汽车ABS仿真试验台的开发与液压系统动态特性的研究[D]. 长春:吉林工业大学,2000.
Liu Li. Construction of ABS test-bed and research on dynamic characteristics of hydraulic system[D]. Changchun: Jilin University of Technology, 2000. (in Chinese)