

纯电动城市客车 EMB 执行机构驱动电机 制动性能分析

申 锋, 赵朝会, 应凯文
(上海电机学院 电气学院, 上海 200240)

摘 要: 传统气压制动系统存在压缩机、制动油箱和空气管路, 占据较大空间, 而采用电子机械制动 (EMB) 系统代替, 不但可以减小空间, 还能实现对夹紧力的快速响应和精确控制。以纯电动城市客车为目标车型, 讨论了 EMB 执行机构方案, 根据传统气压盘式制动器最大夹紧力推导出电机的堵转转矩和空载转速。据此设计了永磁无刷直流驱动电机, 堵转转矩为 $10 \text{ N}\cdot\text{m}$, 空载转速为 370 r/min 。在 Maxwell 2D 中搭建驱动电机有限元模型, 分析电机在消除间隙阶段和夹紧力增加阶段的制动性能。结果表明所设计的驱动电机制动性能可满足要求。

关键词: 电子机械制动 (EMB) 执行机构; 驱动电机; 堵转转矩; 空载转速; 制动性能

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)01-0114-05

Braking Performance Analysis of Drive Motor of EMB Actuator for Pure Electric Urban Bus

SHEN Feng, ZHAO Chaohui, YING Kaiwen

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The traditional pneumatic brake system occupies large space for the compressor, brake reservoir and air pipe. Replacing the pneumatic brake system with electro-mechanical brake (EMB) system could reduce the space significantly. In addition, it could reduce the latency time and control the clamping force precisely. Taking electric urban bus as the research target, the scheme of EMB actuator was discussed. The locked torque and the no-load speed were deduced according to the maximum clamping force of the traditional pneumatic disc brake. Based on this, a permanent magnet brushless direct current (BLDC) drive motor was designed, with the locked torque of $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ and no-load speed of 370 r/min . Then the finite element model of motor was established by using Maxwell 2D, and the braking performance during the phases of eliminating clearance and clamping force increasing was analyzed. The results showed that the braking performance of the designed drive motor could meet the requirements.

Key words: electro-mechanical brake (EMB) actuator; drive motor; locked torque; no-load speed; braking performance

0 引 言

制动系统是汽车系统的重要组成部分, 而执行机构作为制动系统实施制动力的执行元件, 其性能好坏直接影响车辆行驶的安全。作为线控制

动系统^[1-2]的分支, 电子机械制动 (EMB) 系统能够完全控制车轮的制动力, 可显著提高汽车的制动性能^[3-4]。与传统气压式制动系统相比, EMB 系统具有响应快、控制灵活、结构紧凑和环保等优点^[5]。EMB 系统主要由电子踏板、制动控制单元

作者简介: 申 锋 (1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机本体设计。

赵朝会 (1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子及电力传动。

和执行机构组成。执行机构包括驱动电机、减速增矩部件和运动转换装置。驱动电机直接提供动力,减速增矩部件负责将电机输出力矩放大,并通过运动转换装置将旋转运动转换为制动衬片的平动,最终在制动盘上产生夹紧力。

随着现代电力电子和计算机技术的快速发展,永磁无刷直流电机(BLDCM)在工业领域的应用日益广泛^[6]。由于 BLDCM 具有结构紧凑、转矩惯性比大、功率密度大等优点,使其适合作为 EMB 执行机构驱动电机^[7]。

目前有关汽车 EMB 执行机构的研究主要集中在小型汽车上,涉及到执行机构方案设计和夹紧力控制。文献[8]以轿车前轮制动器为对象,确定了 EMB 总体结构方案,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真模型,提出 EMB 电机的控制方法并验证控制效果。文献[9]设计了适用于小型轿车的 EMB 制动器,对 EMB 进行模态分析,排除因激振频率与零部件固有频率重合而产生共振的可能性。文献[10]完成了轿车 EMB 执行器的设计,运用 ADAMS 建立起制动器动力学模型,得到了制动器主要性能参数,从执行机构轻量化的角度对 EMB 综合性能进行优化。以上方案大都采用有刷直流电机作为 EMB 驱动电机,不利于实现制动力的精确控制。文献[11-13]详细阐述了 EMB 方案、工作原理以及减速增矩部件和运动转换装置的结构,但缺乏对 EMB 执行机构驱动电机的研究。

一些文献也对 EMB 执行机构驱动电机进行了研究。为了减小执行机构轴向空间,将电机转子加工成空心结构,充分利用电机的内部空间^[14-15];也可以通过电机与运动转换装置的特殊布置来达到减小空间的目的^[16-18]。

本文针对纯电动城市客车 EMB 执行机构,总结已有方案的结构特点,探讨了 EMB 执行机构方案,推导了驱动电机参数,据此设计了 EMB 永磁无刷直流驱动电机,并对其制动性能进行分析。

1 传统气压盘式制动器

图 1 所示为传统气压盘式制动器,由制动气室、钳体、支架、摩擦衬片、制动盘等组成。车辆制动时,驾驶员踩下制动踏板,在一系列机械传输机构的帮助下制动气室中的气体推动摩擦衬片,使



图 1 气压盘式制动器

摩擦衬片与制动盘接触,制动器完成制动动作,实现车轮制动。但气压式制动系统存在着明显缺点:(1)制动踏板和执行机构之间是传统的机械连接,执行机构反应慢,制动效能低;(2)空气管路多,占用空间大,质量大;(3)管路存在泄漏隐患,有污染环境的风险。

2 EMB 执行机构方案

EMB 执行机构如图 2 所示。该方案制动过程为:驱动电机沿某一方向旋转,输出的力矩经行星齿轮减速器放大,在力矩的带动下圆锥齿轮组转动,带动偏心连杆运动,连杆施加径向驱动力作用于摩擦衬片,直到摩擦衬片与制动盘接触。之后摩擦衬片和制动盘建立摩擦,摩擦衬片受到制动盘的摩擦力向切向方向运动,斜坡板随之切向运动,滚柱上移,径向驱动力迅速增大,导致摩擦衬片和制动盘间的摩擦力迅速增大,直至制动盘停止转动。

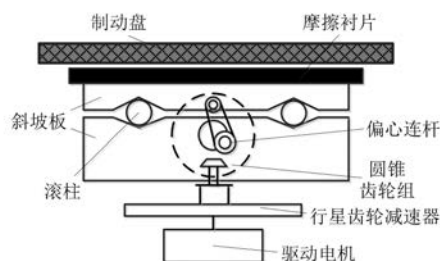


图 2 EMB 结构示意图

该方案具有自增力功能:摩擦衬片与制动盘之间的接触建立后,在摩擦力的作用下,摩擦衬片将会切向移动,由于滚柱的存在,会对摩擦衬片产生一个径向作用力,即自增力。该方案不仅可以满足电动城市客车对大制动力矩的需求,还降低了整车对驱动电机功率和输出转矩的要求,减少电机对整车供电系统的电能损耗。

3 驱动电机参数推导

根据某纯电动城市客车气压盘式制动器相关参数来确定电机堵转转矩、空载转速 2 个基本参数。气压盘式制动器主要参数如表 1 所示。

表 1 气压盘式制动器主要参数

参数名称	参数值
适用车长/m	9~12
最大夹紧力/kN	180
气室规格/mm	外径 170, 轴向长度 220
衬片摩擦因数	0.38

3.1 堵转转矩

车辆制动时摩擦衬片受力情况如图 3 所示。图 3 中, F_j 为夹紧力的反作用力; F_z 为自增力; F_q 为偏心连杆驱动力; F_m 为制动盘施加在摩擦衬片上的摩擦力; θ 为斜坡板倾斜角; ϕ 为偏心连杆偏角。4 个力达到动态平衡, 将 F_z 沿坐标轴分解为 F_{zx} 和 F_{zy} , F_q 沿坐标轴分解为 F_{qx} 和 F_{qy} 。

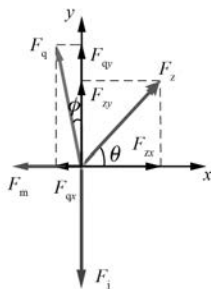


图 3 摩擦衬片受力

气压盘式制动器最大夹紧力为 180 kN, 即 $F_j = 180$ kN, 斜坡倾斜角 θ 取 45° , 摩擦力产生的增力为

$$F_{zx} = \frac{\mu F_j}{\tan \theta} = 68.4 \text{ kN} \quad (1)$$

式中: μ ——摩擦衬片摩擦因数。

偏心连杆驱动力的径向分量 F_{qy} 约为 100 kN, ϕ 通常较小, 约为 8.4° , 可得偏心连杆驱动力为

$$F_q = \frac{F_{qy}}{\cos \phi} = 101.08 \text{ kN} \quad (2)$$

可得圆锥齿轮转矩为

$$T = F_q \cdot \cos 80^\circ \cdot r = 87.76 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3)$$

式中: r ——圆锥齿轮偏心半径, 取 5 mm。

则电机输出转矩为

$$T_m = \frac{T}{k} = 9.984 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4)$$

式中: k ——减速器传动比, 取 8.8。

因此电机堵转转矩不小于 T_m 。

3.2 空载转速

EMB 执行机构作用时间由消除摩擦衬片和制动盘间隙时间和夹紧力增加时间组成。制动间隙为 1 mm, 消除间隙时间 0.2 s。由制动间隙和消除间隙时间可得消除间隙阶段偏心连杆轴向移动的平均速度 $v = 5$ mm/s, 预估圆锥齿轮组转速 $n_y = 40$ r/min, 则电机空载转速为

$$n_0 = k n_y = 352 \text{ r/min} \quad (5)$$

因此电机空载转速应不小于 n_0 , 据此估计电机额定转速为 300 r/min。

3.3 驱动电机参数

除了得到堵转转矩和空载转速, 整车供电系统额定电压为 24 V, 电流不允许超过 20 A。最终得到电机参数如表 2 所示。

表 2 推导电机参数

参数名称	参数值
额定功率/W	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	300
额定电压/V	24
堵转转矩/(N·m)	10
峰值电流/A	20

4 制动性能分析

4.1 驱动电机模型

根据表 2, 在 Maxwell 中搭建无刷直流驱动电机模型, 具体参数如表 3 所示。

表 3 电机模型参数

参数名称	参数值
槽数	36
极数	4
定子外径/mm	141
定子内径/mm	92
电枢长度/mm	40
气隙厚度/mm	0.5
电枢材料	M19_24G
极弧系数	0.7
励磁方式	表贴径向充磁
磁钢材料	XG196/96
磁钢厚度/mm	3
供电方式	三相星型六状态
绕组方案	双层整数槽分布绕组

定子外径为 141 mm, 电枢长度为 40 mm, 对照表 1 可知, 电机体积明显小于气室体积, 即用 EMB 执行机构取代气压盘式制动器后, 执行机构体积能明显减小。

4.2 静态磁密验证

对电机的空载磁场进行分析, 电机磁力线分布如图 4 所示, 可知磁力线走向符合要求。对气隙磁密进行傅里叶分解, 可得基波分量为 0.827 T, 符合 BLDCM 静态气隙磁密标准。

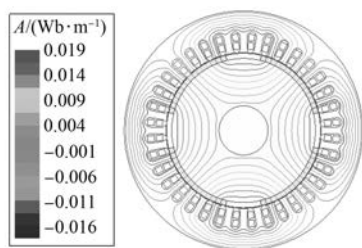


图 4 电机磁力线分布

4.3 制动性能分析

4.3.1 间隙消除阶段

在消除间隙阶段, 电机处于空载运行状态, 转速波形如图 5 所示。

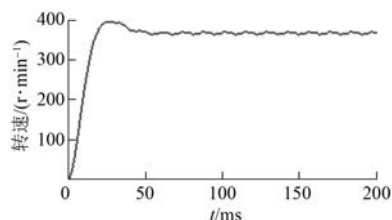


图 5 电机转速随时间变化曲线

由图 5 可知电机空载电流近似为零。空载转速在 0.05 s 后趋于稳定, 约为 370 r/min, 能够在规定时间内消除间隙。

4.3.2 夹紧力增加阶段

在夹紧力增加阶段, 电机处于堵转状态。给电机加上很大负载, 模拟电机堵转工况, 绕组电流、转矩波形如图 6、图 7 所示。

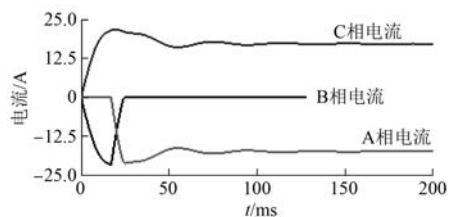


图 6 电机绕组电流随时间变化曲线

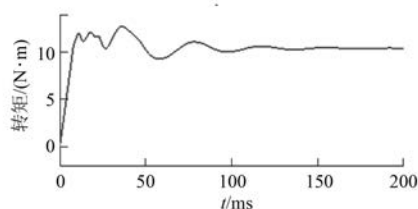


图 7 电机转矩随时间变化曲线

由图 6、图 7 可知, 电机堵转力矩约为 10.3 N·m, 满足制动力矩要求, 堵转电流约为 17.5 A, 在整车供电系统允许的电流范围内。

5 结 语

本文以纯电动城市客车 EMB 执行机构为研究对象, 探讨了 EMB 执行机构方案, 推导了驱动电机参数, 设计了 BLDCM, 分析了其制动性能, 得出以下结论。

(1) 研究了纯电动城市客车用 EMB 执行机构替代传统气压盘式制动器的可能性。该执行机构适用于车长 9~12 m 的车型。

(2) 根据城市客车气压盘式制动器最大夹紧力推导出了驱动电机参数。

(3) 设计了一种永磁无刷直流驱动电机, 堵转转矩为 10 N·m, 空载转速为 370 r/min。仿真表明: 所设计电机在消除间隙阶段和制动力增加阶段的制动性能满足要求。

【参考文献】

- [1] ANWAR S. Generalized predictive control of yaw dynamics of a hybrid brake-by-wire equipped vehicle [J]. *Mechatronics*, 2005, 15(9): 1089.
- [2] TANELLI M, ASTOLFI A, SAVARESI S M. Robust nonlinear output feedback control for brake by wire control systems [J]. *Automatica*, 2008, 44(4): 1078.
- [3] SCHENK D E, WELLS R L, MILLER J E. Intelligent braking for current and future vehicles [C] // 1995 SAE International Congress and Exposition, 1995: 43.
- [4] JONNER W D, WINNER H, DREILICH L, et al. Electrohydraulic brake system; the first approach to brake-by-wire technology [C] // 1996 SAE International Congress and Exposition, 1996: 105.
- [5] WEI Z, XU J, HALIM D. Clamping force control of sensor-less electro-mechanical brake actuator [J].

- 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2017: 764.
- [6] 夏长亮, 刘均华, 俞卫, 等. 基于扩张状态观测器的永磁无刷直流电机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 139.
- [7] LIANG B, ZHU Y, LI Y, et al. Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control for braking systems with electro-mechanical actuators based on radial basis function[J]. Energies, 2017, 10(10): 1637.
- [8] 赵一博. 电子机械制动系统执行机构的研究与开发[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [9] 傅云峰. 汽车电子机械制动系统设计及其关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [10] 卢甲华. 汽车 EMB 系统性能分析与优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [11] SEVERINSSON L, LINDQVIST A. Park lock and pad wear adjusting arrangement for electrically actuated brake: US9732813B2[P]. 2017-08-15.
- [12] BAUMANN D, HOFMANN D, VOLLERT H, et al. Self boosting electromechanical friction brake: US8002088[P]. 2011-08-23.
- [13] WINKLER T, KLIMT A, HESS T, et al. Combined vehicle brake with electromechanically actuable parking brake: US20110162935A1[P]. 2011-07-07.
- [14] WIMMER G H, VÖLKEL J. Operating device for an electromechanically actuated disk brake: US6889800B2[P]. 2005-05-10.
- [15] HILZINGER J, SCHUMANN F, BLOSCH G, et al. Electromechanical wheel brake device: US6806602B2[P]. 2004-10-19.
- [16] PARK G, CHOI S, HYUN D. Clamping force estimation based on hysteresis modeling for electro-mechanical brakes [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(5): 883.
- [17] LEE S M, PARK J H, NAM K H, et al. Design of wedge in the electro-mechanical brakes for commercial vehicles to boost braking friction forces [J]. Tribology and Lubricants, 2018, 34(2): 55.
- [18] CHOE B D, HWANG W H, HUH K S. Modeling of EMB (electro mechanical brake) to emulate gearbox fault and control [J]. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 2012, 20(6): 33.

收稿日期: 2018-08-20

(上接第 63 页)

- [7] 储剑波, 胡育文, 黄文新, 等. 一种抑制永磁同步电机转速脉动的方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 43.
- [8] CHEN D, ZHANG J, QIAN Z. Research on fast transient and $6n \pm 1$ harmonics compensating repetitive control scheme for three-phase systems[C] // Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2012: 4746.
- [9] WU X H, PANDA S K, XU J X. Design of a plug-in repetitive control scheme for eliminating supply-side current harmonics of three-phase PWM boost rectifiers under generalized supply voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(7): 1800.
- [10] TSAI M C, YAO W S. Design of a plug-in type repetitive controller for periodic inputs [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 547.
- [11] ZHANG B, WANG D, ZHOU K, et al. Linear phase lead compensation repetitive control of a CVCF PWM inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1595.
- [12] CHEN D, ZHANG J, QIAN Z. An improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency-adaptive capability [J]. Transactions of Electro-Technical Society, 2012, 60(2): 814.
- [13] 陈东, 张军明, 钱照明. 一种具有频率变化适应性的并网逆变器改进型重复控制方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 64.
- [14] ZOU Z X, ZHOU K, WANG Z, et al. Frequency-adaptive fractional-order repetitive control of shunt active power filters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1659.

收稿日期: 2018-10-11