

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.05.011

一种抑制无刷直流电机转矩脉动的新方法

谢少华, 瞿遂春

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 对无刷直流电机转矩脉动产生的原因进行全面分析, 提出增加前级直流变换器抑制转矩脉动的新方法, 使用 buck 直流变换器, 通过调整逆变器的母线电压来抑制转矩脉动, 在 MATLAB/Simulink 环境下基于该方法搭建无刷直流电机仿真模型, 并对系统进行仿真分析。仿真结果表明, 该方法能够有效抑制无刷直流电机转矩脉动。

关键词: 无刷直流电机; buck; 转矩脉动; 系统仿真

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)05-0051-05

A Method to Suppress Torque Ripple of Brushless DC Motor

Xie Shaohua, Qu Suichun

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Analyzes comprehensively the torque ripple causes of brushless DC motor, and proposes a new method of adding the first stage DC converter to control torque ripple. By using buck DC converter and adjusting bus voltage of the inverter to suppress the torque ripple, on the basis establishes brushless DC motor model in MATLAB/Simulink and simulates the system. The result indicates that the method suppresses the torque ripple of brushless DC motor effectively.

Keywords: brushless DC motor; buck; torque ripple; system simulation

0 引言

无刷直流电机 (brushless direct current motor, BLDC) 一般采用高性能的永磁体励磁, 具有转高的功率重量比、结构简单和调速性能优越等特点, 伴随着永磁新材料与电力电子技术特别是大功率开关器件的不断发展, 无刷直流电机的应用领域不断拓展。当前, 无刷直流电机调速方式主要是通过脉宽调制技术直接控制逆变器上的开关管来实现电机的调速。但是, 基于该方法的调速方式的无刷直流电机存在转矩脉动大的问题, 转矩脉动会导致速度波动, 电机振动, 降低电机运行品质, 极大制约了 BLDC 在高精度与高稳定系统中的应用。

文献[1]对无刷直流电机转矩脉动原因进行了分

析, 主要包括电磁转矩产生原理导致的转矩脉动、电流换向转矩脉动和齿槽转矩脉动。文献[2]针对目前抑制 BLDC 的转矩脉动主要方法进行总结, 主要包括转矩直接控制、重叠换相法、最佳开通角法、PWM (plus width modulation) 斩波法、电流预测控制法、自适应控制的转矩估算器、卡尔曼滤波法和神经网络控制。文献[3]提出滑模观测器控制方法, 该方法能够通过滑模观测对补偿电流进行有效控制, 实现对电机转矩脉动的抑制。但是, 以上方法都是基于改进三相桥臂开关管的控制方式或采用先进的控制策略进行闭环控制, 无可避免地存在过补偿或欠补偿的问题, 在实际运用中, 降低了转矩脉动的抑制效果, 难以达到比较理想的控制效果。

本文从功率变换器的角度, 提出基于 buck 电路

收稿日期: 2015-08-17

作者简介: 谢少华 (1989-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型电机及其驱动控制,

E-mail: 1449468450@qq.com

的抑制无刷直流电机转矩脉动的方法。该方法通过在前级加 buck 电路实现调压,保持母线电压稳定,从而实现对无刷直流电机转矩脉动的抑制。最后,进行了仿真分析,仿真结果表明,新的方法能够有效地抑制电机的转矩脉动。

1 传统功率变换器的 BLDC 转矩脉动分析

1.1 运行原理

BLDC 的功率变换器主电路结构如图 1 所示。BLDC 一般具有梯形波的反电动势,控制方式采用常见的三相六状态的导通方式,当反电动势波形为理想梯形波时,为了产生恒定的电磁转矩,相电流必须是 120° 电角度的理想方波,并且两者的相位必须严格对应,在传统的控制电路中,以 PWM 调制技术直接控制逆变桥上的 6 个功率开关管,从而实现电机的换相和调压功能。

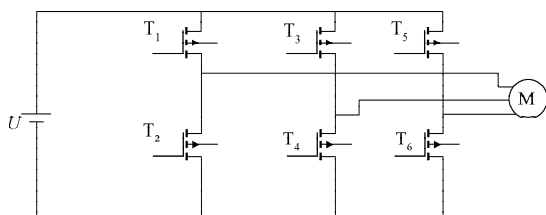


图1 功率变换电路

Fig. 1 Power converter circuit

电磁转矩表达式为

$$T = (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) / \omega,$$

式中: T 为电动机的电磁转矩;

ω 为电动机的机械角速度;

i_A, i_B, i_C 为定子相绕组电流, A;

e_A, e_B, e_C 为定子相绕组电动势, V。

1.2 非换相期间

由文献[4]对 4 种基本 PWM 调制分析可知,当非导通相端电压高于直流母线电压或低于 0 V 时,该非导通相就会有续流现象产生,同时,需要指出的是,不同的 PWM 调制方式其产生续流区间是有所不同的,对于无刷直流电机的电磁转矩而言,这个续流是有害的,它的存在,会导致换相期间的电磁转矩减小,使非换相期间电磁转矩产生脉动。表 1 为 4 种调制方式非导通相续流产生相区的对比表。当 PWM 调制方式变化时,转矩脉动区间也随之变化。转矩脉动随调制方式的变化规律如表 1 所示,从变化规律可以看出,不论何种 PWM 控制方式,只要逆变器采用 PWM 控制方式,则在非换相期间,截止相的续流作用始终存在,此续流将会参与到总的电磁转矩的

合成中去,续流的存在,破坏了原有两相电流合成的电磁转矩的平衡,进而引起了电机的电磁转矩脉动。

表1 4种调制方式非导通续流产生相区间对比

Table 1 The comparison of the generation of the non conduction continuous flow in the four modulation modes

| 调制方式 | 非导体区间 | | | |
|------------|----------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| | $0 \sim \pi/6$ | $5\pi/6 \sim \pi$ | $\pi \sim 7\pi/6$ | $11\pi/6 \sim 2\pi$ |
| H_ON-L_PWM | 有 | 有 | 无 | 无 |
| H_PWM-L_ON | 无 | 无 | 有 | 有 |
| PWM_ON | 有 | 无 | 有 | 无 |
| ON_PWM | 无 | 有 | 无 | 有 |

1.3 换相期间

根据 R. Carlson 等在经典文献[5]所做出的定量分析,在只考虑电感的情况下可知,因换相引起的转矩波动与 E/U 的比值有关,由文献[6]可以得到如下结论:

当 $U \geq 4E$ 时,可以通过调节逆变桥上开关管的 PWM 占空比来消除转矩脉动,同时, PWM 调制波的占空比和换相转矩脉动的振幅存在正比例关系。然而,对于某一无刷直流电机控制系统而言,母线为定值,反电动势系数也是固定值,要满足 $U \geq 4E$ 条件,电机只有在低速区段才能满足,在实际的运用中,就有很窄的一段低速范围才能满足条件,这样,对于逆变桥上的开关管工作在 PWM 调制方式下的无刷直流电机,就不能在较宽的调速范围内有效地减小换相转矩脉动。

当 $U < 4E$ 时,此时即电机工作中高速区段,则不管 PWM 信号如何变化,换相电磁转矩脉动的方向始终与输出的电磁转矩相反,即在整个换相期间内,转矩脉动对平均电磁转矩是起到减小的作用,无法通过逆变桥上开关管的 PWM 调制方式来改善换相转矩脉动。

2 新型功率变换器的 BLDC 转矩脉动分析

新型控制方法是在逆变器前级加 buck 电路,将逆变器的调压功能分离出来,逆变器只负责换相,调压由前级的直流变换器来实现。新的控制电路的主电路结构如图 2 所示,通过控制 buck 电路的开关管的占空比大小,来实现连续调节直流母线电压 U ,具体关系为

$$U = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T} E = aE,$$

式中: t_{on} 为开关管的通态的时间;

t_{off} 为开关管处于断态的时间;

T 为开关周期;

α 为导通占空比;

E 为电源电压。

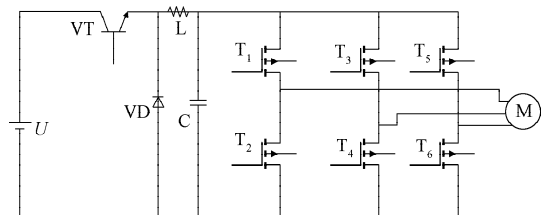


图2 基于buck功率变换电路

Fig. 2 Buck-based power converter

后级三相逆变器上的开关管采用恒通的工作方式，即每一状态区间内处于开通的2个开关管不进行PWM调制，各开关管的导通顺序为： T_1, T_2 ； T_2, T_3 ； T_3, T_4 ； T_4, T_5 ； T_5, T_6 ； T_6, T_1 。一个周期有6种导通状态，导通的周期均为 120° 电角度。

2.1 非换相期间

在新型的控制方式下，由于三相逆变器工作在恒通的方式下，逆变器不需要工作在PWM调制下，截止相在非换相期间没有续流流过，在非换相期间，电机的合成磁场仅由导通的两相电流合成决定，从根本上杜绝了截止相续流对总的合成电磁转矩的影响，进而能够抑制BLDC在非换相期间的转矩脉动。

2.2 换相期间

由文献[7-8]可知，在新的控制方式下，电机在整个转速范围内均有 $U \leq 4E$ ，此时根据上文的分析可知，换相转矩脉动始终为负，因而在整个换相期

间的平均电磁转矩减小，同时，当逆变器上的开关管采用PWM调制，开关管的PWM信号有效电平为1时的电磁转矩脉动比开关管PWM有效电平为0时的小。因此，为了减小转矩脉动，当 $U \leq 4E$ 时，逆变器的开关管应工作在恒通的方式。总结上述的情况可知，逆变器上开关管在恒通工作方式下能够获得比逆变器上开关管在PWM调制下更小的换相转矩脉动。

3 基于新型功率变换器的BLDC系统仿真与结果分析

3.1 新型功率变换器的BLDC在Simulink下建模仿真

在Matlab/Simulink环境下对本文提出的抑制脉动转矩的方法进行仿真建模，如图3所示。仿真系统主要由无刷直流电机模块，逆变桥模块，换相逻辑控制模块等组成。

电机模型采用永磁同步电机，将反电动势波形设置为 120° ，即为无刷直流电机，电路参数： C 为 $600 \mu\text{F}$ ， L 为 20 mH 。电机参数：额定电压为 450 V ，电机极对数为5，额定转速为 2500 r/min ，相绕组电阻为 2.8Ω ，电感为 8 mH ，通过输出的位置信号来控制三相绕组的导通顺序，前级的buck电路实现电机的调压调速。调节buck电路中IGBT的开关频率来实现对电机的调压调速。

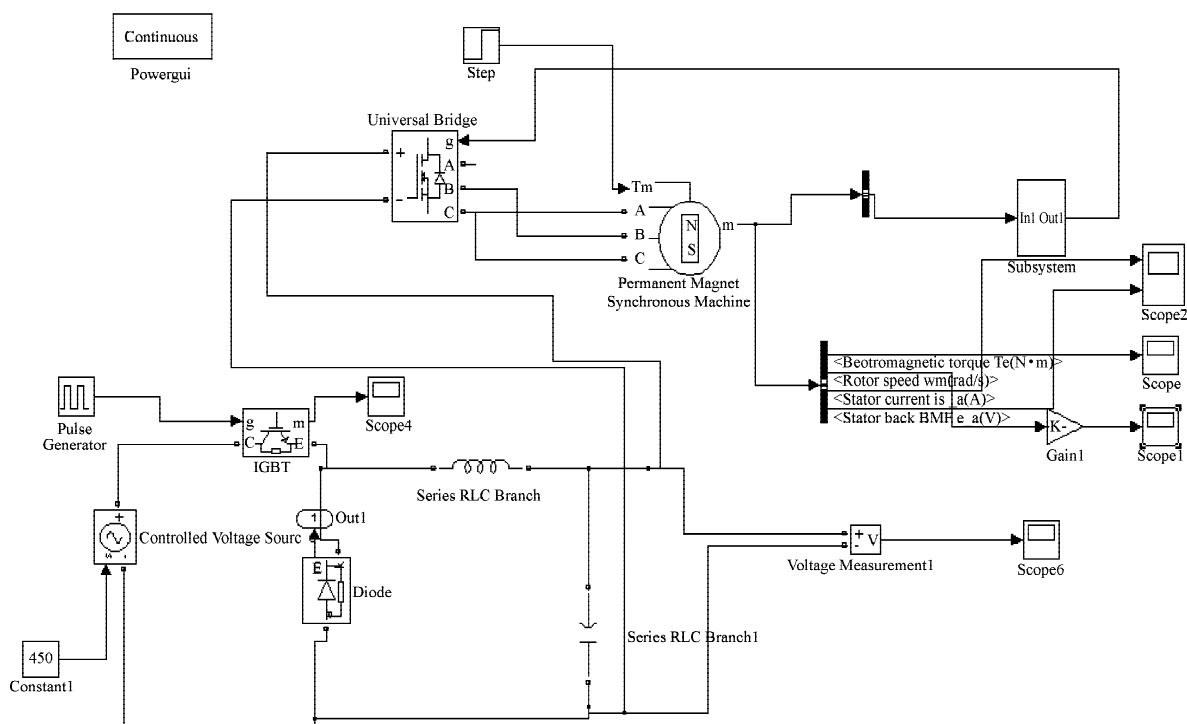


图3 基于buck的Simulink模型图

Fig. 3 The Simulink model based on buck

3.2 换向逻辑控制模块

无刷直流电机使用三路霍尔位置传感器, 感应转子位置, 每经过 60 电角度霍尔状态变化一次, 控制逻辑根据三路霍尔信号, 判断出转子位置, 然后

决定三相桥式开关管的开关状态。换相逻辑模块在 Simulink 中的模型如图 4 所示, 霍尔元件和与门极触发信号输出关系如表 2 所示。

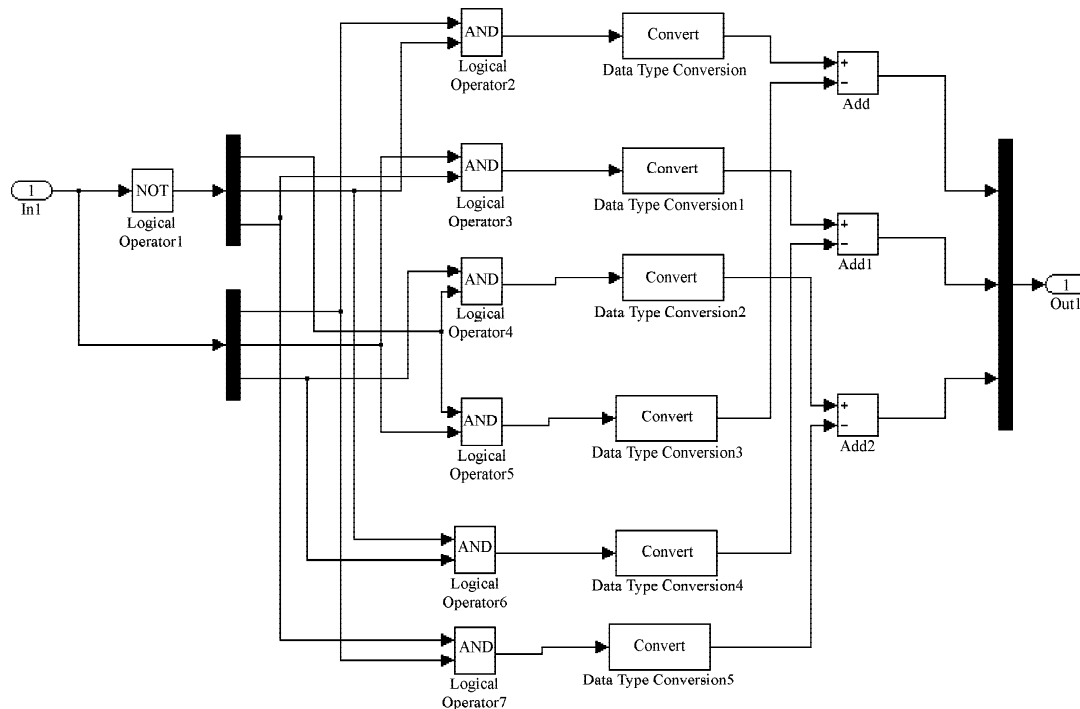


图4 换相逻辑模块

Fig. 4 Phase change logic module

表2 霍尔信号与开关管触发信号关系

Table 2 The relationship between Holzer signal and switch tube trigger signal

| 位置传感器 | | | 逆变桥开关管驱动信号 | | | | | |
|-------|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A | B | C | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

3.3 仿真结果与分析

在 Matlab/Simulink 中, 分别对传统 PWM 调制控制电路与新的控制电路进行仿真, 两者仿真均在转速为 2 000 r/min 条件下进行。传统 PWM 调制控制电路相电流仿真波形如图 5 所示, 传统 PWM 调制控制电路电磁转矩仿真波形如图 6 所示, 基于 buck 控制电路的相电流仿真波形如图 7 所示, 基于 buck 控制电路的电磁转矩仿真波形如图 8 所示。

从图 5 与图 6 的相电流图可知, 加前级 buck 变换的相电流脉动为 25%, 无 buck 变换的相电流脉动

为 45%, 有 buck 变换的电流脉动更小, 由于无刷直流电机的转矩 T 与相电流成正比例关系, 电流脉动小, 电磁转矩脉动也小。

从图 7 与图 8 的电磁转矩波形图可知, 无 buck 电路的转矩脉动为 50%, 有 buck 电路的转矩脉动为 24%。由二者比较可知, 经过前级加 buck 调节直流母线电压, 实现调速控制的方法能够获得更小的转矩脉动。

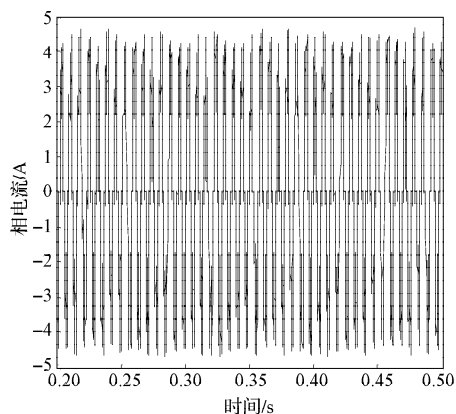


图5 传统控制相电流仿真波形

Fig. 5 Phase current simulation waveform of traditional control

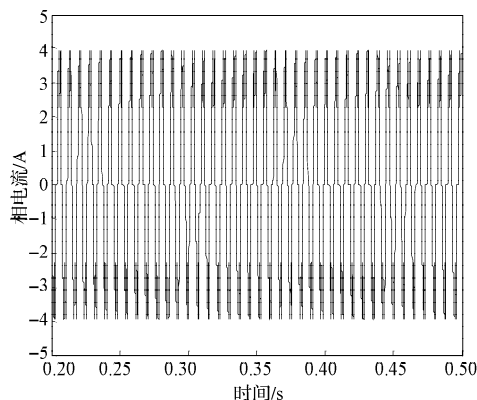


图6 传统控制电磁矩仿真波形

Fig. 6 Electromagnetic torque simulation waveform of traditional control

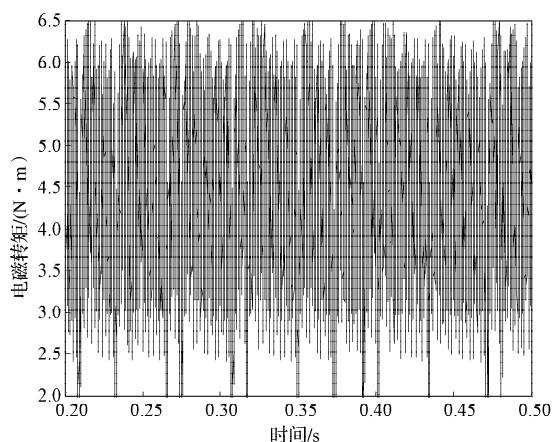


图7 基于buck控制相电流仿真波形

Fig. 7 Phase current simulation waveform of buck control

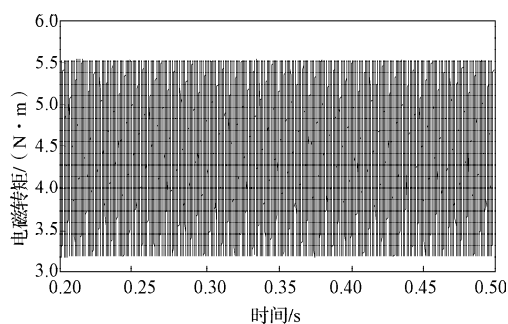


图8 基于buck控制电磁矩仿真波形

Fig. 8 Electromagnetic torque simulation waveform of buck control

4 结语

针对无刷直流电机转矩脉动的问题, 提出了一种基于buck变换器的电路结构, 将三相逆变器的调压功能转移至前级的buck电路中, 三相逆变器仅起到换相作用, 从而能够有效地抑制无刷直流电机在换相期间与非换相期间的转矩脉动。通过在

MATLAB/Simulink环境中作对比仿真, 结果表明, 该方法能够有效的抑制转矩脉动, 为解决无刷直流转矩脉动问题提供了新的思路与方法。

参考文献:

- [1] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 10-15.
Tan Jiancheng. Technology of Permanent Magnet Brushless DC Motor[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011: 10-15.
- [2] 周杰, 侯燕. 无刷直流电机转矩脉动抑制方法综述[J]. 机电产品开发与创新, 2007, 20(3): 35-37.
Zhou Jie, Hou Yan. Review on the Methods of Torque Ripple Attenuation of Brushless DC Motor[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2007, 20(3): 35-37.
- [3] 苗敬利, 黄晓光. 抑制无刷直流电机转矩脉动的滑模观测器控制[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(32): 33-35.
Miao Jingli, Huang Xiaoguang. Inhibition of Brushless DC Motor Torque Ripple of the Sliding Mode Observer Control [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(32): 33-35.
- [4] 周美兰, 李志, 苏革航. 无刷直流电机PWM调制方式对非换相期间转矩脉动的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(6): 20-24.
Zhou Meilan, Li Zhi, Su Gehang. Effect of Brushless DC Motor PWM Modulation Modes on Non-Commutation Torque Ripple[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19(6): 20-24.
- [5] Carlson R, Lajoie M M, Fagundes J C. Analysis of Torque Ripple Due Phase Commutation in Brushless DC Machines[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1992, 14(28): 36-39.
- [6] 齐蓉, 林辉, 陈明. 无刷直流电机换相转矩脉动分析与抑制[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(3): 16-19.
Qi Rong, Lin Hui, Chen Ming. Analysis and Attenuation on Commutation Torque Ripples of Brushless DC Motor [J]. Electric Machines and Control, 2006, 10(3): 16-19.
- [7] 林平, 韦鲲, 张仲超. 新型无刷直流电机换相转矩脉动抑制控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 15-18.
Lin Ping, Wei Kun, Zhang Zhongchao. A Novel Control Scheme to Suppress the Commutation Torque Ripple in BLDCM[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(3): 15-18.
- [8] 黄兆. 无刷直流电机转矩脉动抑制研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
Huang Zhao. Torque Ripple Suppression of Brushless DC Motor[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.

(责任编辑: 申剑)