

# 无刷直流电机 PWM 调制方式研究

孙立军, 孙雷, 张春喜, 罗有明

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:**介绍了永磁无刷直流电机(BLDCM)常用的 PWM 调制方式,分析了调制方式对电枢电流的影响,总结了关于无刷直流电机 PWM 调制方式目前的研究成果,对各种调制方式的优缺点进行了讨论,并通过仿真实验进行了验证.

**关键词:**无刷直流电机; PWM 调制方式; 电枢电流

**中图分类号:** TM33      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-2683(2006)02-0120-04

## Study on PWM Modulation Mode of Brushless DC Motor

SUN Li-jun, SUN Lei, ZHANG Chun-xi, LUO You-ming

(Electrical & Electronic College, Harbin Univ. Sci. Tech., Harbin 150040, China)

**Abstract:** PWM modes used in the brushless DC motor control system are introduced, and different effects of the armature current with the PWM modes are analyzed. The recent research results for PWM modes of the brushless DC motor are summarized. At the same time, by discussing the advantages and the disadvantages of the different PWM modes, and the simulation results can prove the conclusion above.

**Key words:** BLDCM; PWM mode; armature current

三相无刷直流电动机的主电路目前多采用三相六拍桥式逆变电路. 三相无刷直流电动机绕组通常采用  $120^\circ$  导通型工作方式.  $120^\circ$  导通型, 在任意时刻只有两相绕组处于通电状态, 绕组利用率低一些, 但产生的转矩要比三相正弦波无刷直流电动机  $180^\circ$  导通型大, 同时转矩脉动也相对大些.

无刷直流电机的转速调节是通过脉宽调制(PWM)技术来实现的. 对于三相无刷直流电机而言, 不同的 PWM 调制方式关系到截止相续流电流的产生与否, 从而对电枢电流和电磁转矩的影响也是不同的<sup>[1]</sup>. 为了使无刷直流电机表现出更好的性能, 对无刷直流电机的 PWM 调制方式进行研究和改进是很有必要的.

### 1 PWM 调制方式分类

对于其功率逆变器为桥式电路结构的三相无刷

直流电动机而言, PWM 信号实现调压调速的调制方式有两种<sup>[2]</sup>: 半桥调制和全桥调制. 对功率逆变桥的所有开关元件  $T_1 \sim T_6$  进行脉宽调制, 即“全桥调制”. 在任意时刻, 只对功率逆变桥的上半桥  $T_1, T_3, T_5$  (或下半桥  $T_2, T_4, T_6$ ) 进行脉宽调制, 即“半桥调制”. 对于半桥调制, 又分为“对称半桥调制”和“不对称半桥调制”. 对称半桥调制是指将每一个功率管的开关状态分为两个不同阶段, 前  $60^\circ$  保持全通(或调制), 后  $60^\circ$  进行调制(或全通), 即上下桥臂对称调制. 不对称半桥调制是指在  $120^\circ$  区间内要么只对上半桥调制, 要么只对下半桥调制.

### 2 PWM 调制方式对电枢电流的影响

对于永磁方波无刷直流电动机而言, 其理想的反电势、相电流波形如图 1 所示. 图 1 中的  $e_A, e_B, e_C$

收稿日期: 2005-09-14

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(E0022)

作者简介: 孙立军(1967-), 男, 哈尔滨理工大学副教授.

波形分别为电机三相绕组的反电势,  $i_A, i_B, i_C$  分别为三相绕组的电流。

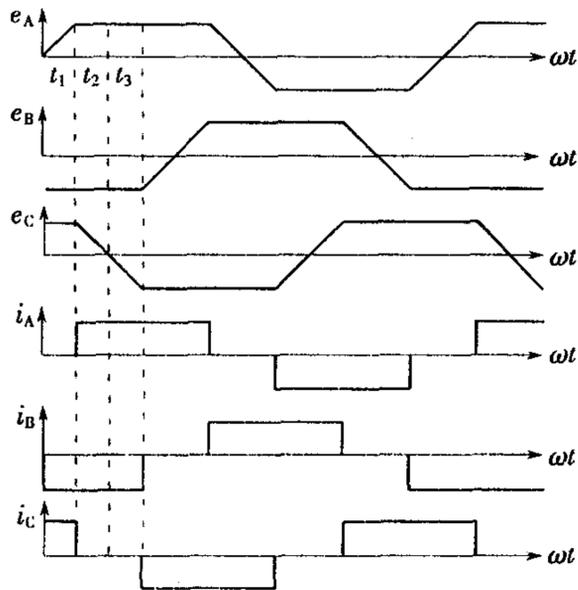


图1 无刷直流电机电势、电流的理想波形

不同的调制方式对电枢电流的影响是不同的, 进而对转矩的影响也不同. 下面分别对半桥调制和全桥调制这两种 PWM 调制方式进行分析.

在不对称半桥调制时, 以  $T_1, T_6$  导通的  $60^\circ$  (电角度) 时间为例, 此时 A, B 两相为导通相, C 相为截止相,  $e_A, e_B, e_C$  波形见图 1 的  $t_1 \sim t_3$ . 电机运行时, 设  $E$  为相反电势幅值,  $E < U_d/2$ . 假设  $T_1$  接受导通信号,  $T_6$  接受 PWM 信号. 在这段时间中,  $e_C$  从  $+E$  变到  $-E$ . 当  $T_6$  导通时, 电流从电源经  $T_1$ 、电机 A, B 相及  $T_6$  形成回路, 此时三相中点  $O$  的电位  $U_0 = U_d/2$ ;  $T_6$  截止时, 电流经  $T_1$ 、A 相, B 相及二极管 D3 续流形成回路, 在  $T_6$  截止且续流电流并未衰减到零时, 三相中点  $O$  的电位  $U_0 = U_d$ , 设  $U_c$  为 C 相端电压, 这时:  $U_c = U_0 + e_c = U_d + e_c > U_d$ , 所以  $T_5$  的反并联二极管 D5 正偏, 从而导致 C 相导通, 这就是非换向期间的截止相导通现象. 同理, 设  $T_6$  接受导通信号,  $T_1$  接受 PWM 信号, 经过分析可知, 当  $T_1$  截止时,  $U_c < 0$ , 二极管 D2 正偏, C 相仍然会导通. 由于电机运行当中, 截止相也续流导通, 导致电机此时处于三相同步导通状态, 这将引起电机电枢绕组内电流发生较大的波动, 从而也使电机转矩脉动增大. 无论是不对称半桥调制还是对称半桥调制, PWM 信号只对导通周期内的一对元件的一个起作用, 所以不对称半桥调制方式和对称半桥调制方式在  $t_1 \sim t_3$  时间内对截止相的影响作用其实是相同的. 也就是说, 在对称半桥调制时仍然会出现截止相续流导通的现象. 但是由于对称半桥调制时上下桥臂的调制是对称的, 电压和电流对称, 所以电流和转矩的脉动比不对称半桥调制时要小.

全桥调制时, 仍以  $t_1 \sim t_3$  时间为例, PWM 信号对  $T_1$  及  $T_6$  都起作用.  $T_1, T_6$  导通时的电流与半桥调制时相同, 此时, 中点  $O$  的电位  $U_0 = U_d/2$ ; 当  $T_1, T_6$  同时截止时, 电机 A, B 两相的电流通过 D4, D3 及电容构成回路, 中点  $O$  的电位仍然有  $U_0 = U_d/2$ . 所以 C 相端电压在  $U_d/2 + E$  到  $U_d/2 - E$  间变化, 即  $60^\circ$  电角度内, 都有  $0 < U_c < U_d$ , 所以 D2 与 D5 均处于反偏状态, 从而 C 相不会导通. 也就是说全桥调制时不存在非换向期间的截止相导通现象. 同时由于在电机运行期间, 中点  $O$  的电位不会发生变化, 所以电流波动较小, 电机转矩脉动也较小.

通过以上对电路的分析可知, 如要避免截止相导通, 就必须使截止相的端电压不要超过直流母线电压, 也不要低于零电压. 这样, 连接在该相上的上下桥臂二极管均不会正向导通, 从而杜绝了续流电流的产生<sup>[3]</sup>.

### 3 无刷直流电机 PWM 调制方式的改进

由于半桥调制存在截止相导通的问题, 致使电机截止相电流的正负半波不对称, 产生附加电流, 又因为它与相电势反相, 故产生负转矩, 导致了转矩脉动增大, 削弱了电机合成转矩, 降低了电机的效率.

全桥调制时, 电机始终只有两相导通, 截止相不会产生续流, 并且电机中性点电压在电机运行期间始终不会改变, 电流波动小, 转矩脉动也较小. 但全桥调制下开关管的开关频率远远高于半桥调制下开关管的开关次数, 因而损耗较大, 这在一定程度上限制了它的应用.

截止相导通现象是半桥调制下必然存在的问题, 在调制方式不改变的情况下, 这种现象无法消除. 全桥调制虽然不会出现截止相导通的现象, 但这种调制方式所带来的开关损耗问题也必须引起重视. 为了同时解决这两个问题, 近年来学者提出了许多新的 PWM 调制方式, 其中  $30^\circ$  调制方式是一个热点<sup>[4]</sup>.  $30^\circ$  调制又被称为“PWM\_ON\_PWM”调制, 就是每只开关管在开通前  $30^\circ$  和后  $30^\circ$  期间进行 PWM 调制, 中间  $60^\circ$  区间保持恒通.

实际上,  $30^\circ$  调制的工作原理就是, 在截止相反电势大于零时, 上桥臂斩波, 下桥臂全通; 反电势小于零时, 下桥臂斩波, 上桥臂全通, 这样就使截止相的端电压不会超过直流母线电压, 也不会低于零电压, 从而不会产生截止相导通的现象.  $30^\circ$  调制既完全消除了截止相导通的现象, 又降低了开关损耗,

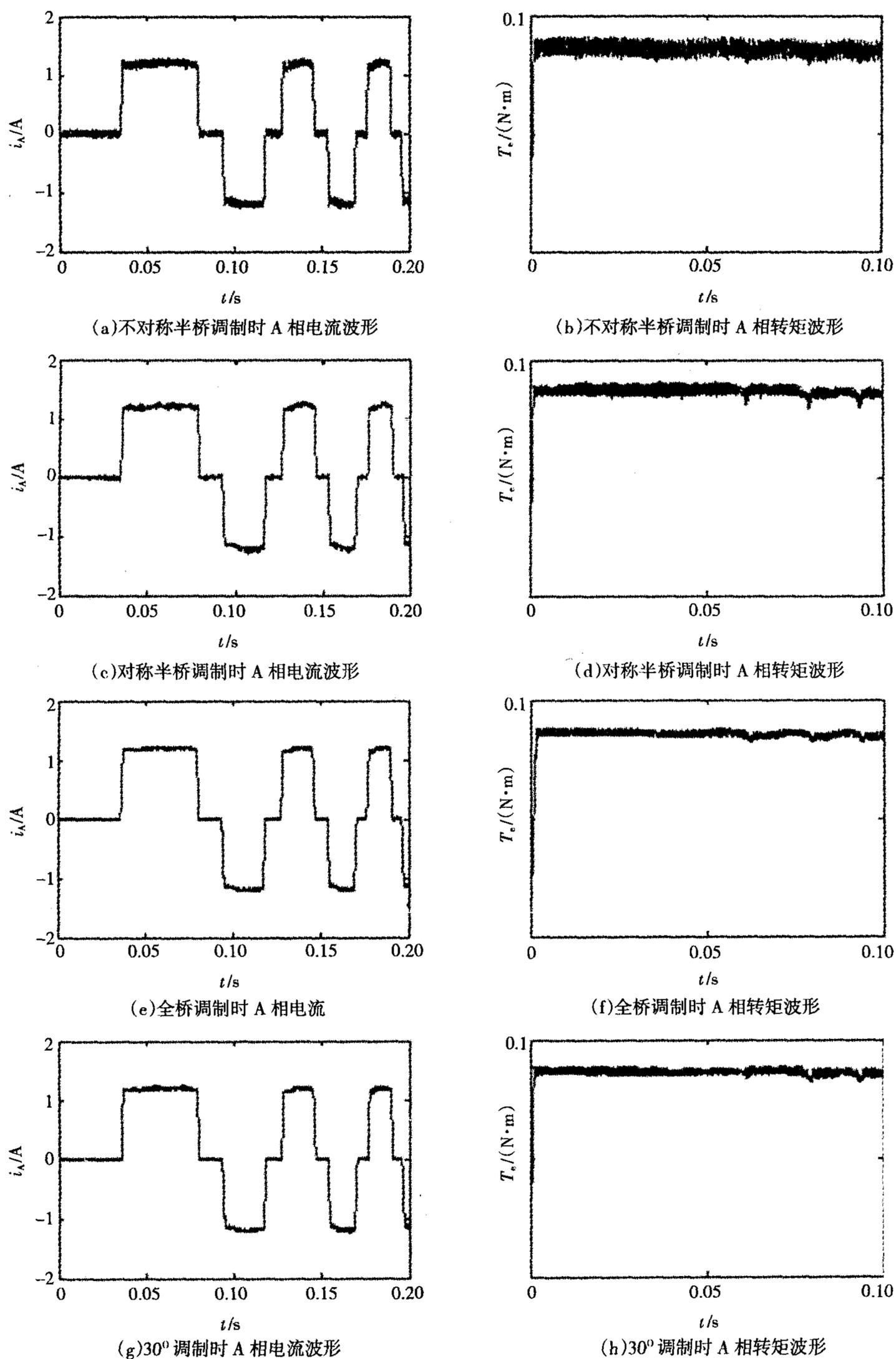


图2 各种调制方式下 A 相电流波形和转矩波形

是综合了全桥调制和半桥调制两者优点的一种调制方式。

$30^\circ$  调制也带来了新问题, 因为常规的三相无刷

直流电机安装了三路位置传感器, 每路位置传感器输出正负交替的方波信号, 正方波和负方波各持续  $180^\circ$  电角度, 三路位置传感器的输出信号互差  $120^\circ$  电角

度.通过检测三路位置传感器输出的逻辑组合信号,对各个开关管进行开关控制,使三相电枢绕组在任意时刻有两相通电,从而获得连续的跳跃式定子磁场,定转子磁场相互作用产生电磁转矩,使电机旋转.无刷直流电机每隔  $60^\circ$  电角度,三路位置传感器输出信号的逻辑组合才变化一次.而要实现  $30^\circ$  调制,就必须使位置传感器输出信号的逻辑组合每  $30^\circ$  电角度就变化一次,这样才能在  $120^\circ$  电角度区间内实现“PWM\_ON\_PWM”调制.所以,在  $30^\circ$  调制时需要再加装三路位置传感器,才能满足控制要求.在这种情况下,电动机系统就会变得复杂,同时也增加了成本.

#### 4 仿真结果分析

在 Matlab6.5 的 Simulink 环境下,建立无刷直流电机的仿真模型<sup>[5]</sup>,如图 3 所示.

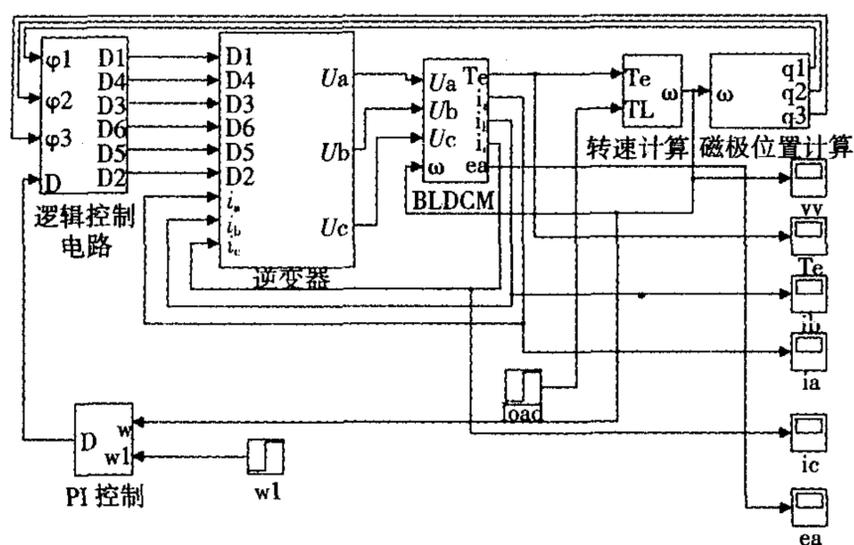


图3 无刷直流电动机控制系统仿真模型

#### 参考文献:

- [1] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [2] 张相军,陈伯时. 无刷直流电机控制系统中 PWM 调制方式对换相转矩脉动的影响[J]. 电机与控制学报,2003,7(2):87-91.
- [3] 邱建琪,史涪激,陈永校. PWM 调制方式对永磁无刷直流电机电磁转矩的影响[J]. 电器工业,2003(12):37-39.
- [4] 韦鲲,任军军,张仲超. 应用于无刷直流电机的新 PWM 调制方式[J]. 电气传动,2005,35(2):37-40.
- [5] 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):1745-1749.

利用此模型对 PWM 调制方式进行仿真.在仿真中,无刷直流电机的参数设置为:三相 4 极,Y 连接,额定转速  $n_N = 3000\text{r/min}$ ,额定电压  $U_N = 220\text{V}$ ,额定电流  $I_N = 1.2\text{A}$ ,额定功率  $P_N = 240\text{W}$ ,电枢回路总电阻  $R = 9.96\Omega$ ,电机平均等效电感  $L = 65.48\text{mH}$ ,电动势常数  $K_e = 0.03606\text{V/rad}$ ,转动惯量  $J = 0.0074\text{N}\cdot\text{m}^2$ .

由图 2a, b 看出,不对称半桥调制时,截止相出现了明显的续流电流,使得相电流和转矩都出现了较大的波动.在图 2c, d 中,对称半桥调制虽然与不对称半桥调制相比,电流和转矩的波动明显减小,但并未完全消除截止相的续流现象,电流和转矩仍有一定的波动.而全桥调制时,电流和转矩都没有出现较大的波动,如图 2e, f 所示.图 2g, h 为  $30^\circ$  调制时的电流波形和转矩波形,其形状与全桥调制相近,波形比半桥调制有了明显地改善.

#### 5 结语

本文对无刷直流电机全桥调制和半桥调制这两类常规 PWM 调制方式以及近年来出现的  $30^\circ$  调制方式做了详细的介绍和分析,并对这几种 PWM 调制方式进行了仿真验证.在无刷直流电机的控制过程中,选取合适的 PWM 调制方式可以减小电磁转矩脉动,提高无刷直流电机的性能.

(编辑:付长纓)