

无刷直流电机无位置 传感器控制技术的研究

作者：张相军

专业：控制理论与控制工程

导师：陈伯时



上海大学出版社

2001 年上海大学博士学位论文

无刷直流电机无位置 传感器控制技术的研究

作 者： 张相军

专 业： 控制理论与控制工程

导 师： 陈伯时

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2001)

R&D on Sensorless Control Technology for Brushless DC Motor

Candidate: Zhang Xiangjun

Major: Control Theory and Control Engineering

Supervisor: Prof. Chen Boshi

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

- | | | |
|--------|-----------------|--------|
| 主任：陈敏逊 | 教授，上海交大电子信息工程学院 | 200030 |
| 委员：邵丙衡 | 教授，同济大学电气工程系 | 200331 |
| 周国兴 | 教授，同济大学电气工程系 | 200092 |
| 许宏刚 | 教授，上海宏港港口设计研究院 | 200082 |
| 陶生桂 | 教授，同济大学电气工程系 | 200331 |
| 汤天浩 | 教授，上海海运学院 | 200135 |
| 朱平平 | 教授，上海大学机械自动化学院 | 200072 |
| 导师：陈伯时 | 教授，上海大学 | 200072 |

评阅人名单:

陈敏逊	教授, 上海交大	200030
贺益康	教授, 浙江大学	310027
许镇琳	教授, 天津大学	300072

评议人名单:

邵丙衡	教授, 同济大学	200331
龚幼民	教授, 上海大学	200072
周谦之	教授, 华东冶金学院	243002
汤天浩	教授, 上海海运学院	200135

答辩委员会对论文的评语

张相军同学的博士学位论文《无刷直流电机无位置传感器控制技术的研究》深入系统地分析了无刷直流电机在不采用位置传感器时的换相和控制等问题,从理论、仿真和实验等方面分析和比较了反电势检测方法、PWM 脉冲切换模式和换相控制对系统性能的影响,并提出切实可行的改进方法。论文的研究内容,具有理论意义和实用价值。

论文的主要工作体现在以下几个方面:

1. 提出“延迟 $90^\circ - \alpha$ ”和“超前 $60^\circ - \gamma$ ”的换相方法。采用软、硬件相结合的换相方法,大大提高了换相控制的灵活性与换相的可靠性,对系统的稳定性和扩大调速范围都有良好的效果。
2. 详细分析了换相转矩脉动的成因,提出在换相过程中采用恒压控制(恒通方式)换相转矩脉动补偿方法,以减小换相转矩脉动。
3. 分析和比较不同 PWM 切换方式对电机换相的影响,提出对 PWM 脉冲强迫输出方式下的恒定占空比算法,以消除换相死区。
4. 比较四种 PWM 调制方式,并经优化得到具有实用价值的 on_pwm 调制方式。

在答辩中能正确地回答答辩委员会所提出的问题。以上工作表明,张相军同学具有坚实宽广的专业基础知识和系统深入的专业知识,具有较强的独立科研能力。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会无记名投票，一致同意通过论文答辩，并建议授予张相军同学工学博士学位。

答辩委员会主席：**陈敏逊**

2001年3月7日

摘 要

无刷直流电动机利用电子换相代替机械换相,不但具有直流电动机的调速性能,而且体积小、效率高,在许多领域已得到了广泛应用.采用无位置传感器控制技术之后,不但克服了外置式位置传感器的诸多弊病,而且进一步拓宽了无刷直流电机的应用领域.目前,无刷直流电机无位置传感器控制已成为无刷直流电机控制技术的发展方向.

本文纵观了无刷直流电动机的兴起、发展与现状,概括了无刷直流电动机无位置传感器控制技术的现有水平及存在的问题,以研制、开发全直流变速调速空调产品为依托,从理论和实践两个方面对这些问题展开了较为全面的研究和讨论.

(1) 针对反电动势过零点检测方法和换相点检测方法中存在的不足,分别提出了“延迟 $90^\circ - \alpha$ 换相”和“超前 $60^\circ - \gamma$ 换相”的方法.同时,本文提出的软件、硬件相结合的换相原理突破了单纯依靠硬件电路换相的局限性,拓宽了系统的调速范围,提高了系统的稳定性和可靠性.

(2) 本文详细阐述了无刷直流电机控制系统中的换相转矩脉动问题,分析了造成换相转矩脉动的原因,通过理论推导,创造性地给出抑制换相转矩脉动的方法,并利用计算机仿真手段及实验对这种换相转矩脉动抑制方法进行了验证.实际生产应用证明了这种方法的可行性和实用性.

(3) 详细分析了 PWM 脉冲的不同切换方式对电机换相控制的影响,提出消除换相死区的具体算法——“强迫输出方式下的

三状态恒定占空比算法”。实验结果表明,这种方法能够消除由 PWM 脉冲切换延时所造成的换相死区,提高系统的稳定性和可靠性。

(4) 根据无刷直流电动机无位置传感器控制系统中 PWM 调制方式的特点,着重论述了四种调制方式对反电动势电流及换相转矩脉动的影响。通过理论分析,比较四种调制方式的优劣,给出结论。PSPICE 仿真和实验结果充分证明了所获结论的正确性。同时,通过对国内外同类产品进行测试,印证了结论。

(5) 推导并分析了无刷直流电机动态数学模型及其控制特性,建立了以单神经元自适应控制器为调节器的转速闭环控制系统。分析表明,单神经元自适应控制器能够提高系统的鲁棒性。

关键词 无刷直流电动机,无位置传感器,反电动势,换相控制,换相转矩脉动,换相死区,PWM 调制方式,单神经元自适应控制

Abstract

Brushless DC motor with permanent magnet excitation, in which electrical commutator is used instead of mechanical, has the same good characteristics of speed control as traditional DC motor. Brushless DC motors have found wide application due to their high power density and ease of control. Moreover, the machines have high efficiency over wide speed range. Attachment of sensorless control not only overcomes a lot of disadvantages generated by the sensor, but also expands the application range of brushless DC motor further. At present, sensorless control has become a development trend of control technique for brushless DC motors.

This dissertation makes a comprehensive view of the rising, development and present situation of control technique for brushless DC motor, and summarizes the present level and shortages of sensorless control technique. Depending on the Research and development of all DC variable speed air-conditioner, this dissertation researches and discusses the following problems in theory and practice:

(1) "Lagging $90^\circ - \alpha$ commutation" and "leading $60^\circ - \gamma$ commutation" methods are bring forward to overcome the shortages existing in the traditional zero back EMF sensing and commutation point sensing respectively. At the same time, the commutation method realized by combining the software and hardware breaks through the limitation of commutation method depending on pure hardware sensing circuit, then the speed-variable range is expanded

and the stability and reliability of the control system are increased.

(2) The principle of commutation torque ripples is analyzed. According to the analysis and deduction, a compensation method is put forward creatively to reduce the torque ripples generated by commutation. Simulation and experimental results with compensation prove that the compensation method is correct and practical.

(3) The influences of different switching mode of PWM are discussed. Then a practical method, “three-state algorithm of invariable duty cycle under forced output mode” is brought out to eliminate the commutation dead band generated by switching among the output interfaces of PWM waveform. Experimental results prove that this method is effective.

(4) In the control system of BLDC motors, different PWM mode has different influence on the pulsating current generated by BEMF in the switch-off phase, which may make commutation error in the commutation control and then decline the reliability and the stability of the control system. The principle of BEMF current is analyzed and the best PWM mode in five given types to reduce its influence on the commutation control is selected. Simulation and experimental results prove that the selection is correct and practical.

(5) The dynamic model of brushless DC motor is investigated, and the close-loop speed control system with single neural adaptive controller used as speed regulator is established. Analysis shows that single neural adaptive controller can improve the robustness of the control system.

Keywords brushless DC motor, senserless control, BEMF (back electromagnetic force), commutation control, commutation torque ripples, commutation dead band, PWM mode, single neural adaptive control

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 无刷直流永磁同步电动机的组成及工作原理	2
1.3 无刷直流电机的无位置传感器控制	10
1.4 无刷直流电机的发展历史及现状	18
1.5 国内及从国外引进设备中存在的问题	23
1.6 变频空调控制系统的控制要求	28
1.7 课题背景及本文的主要研究成果	30
第二章 无刷直流电机无位置传感器控制中磁极位置的检测方法	34
2.1 引言	34
2.2 反电动势过零点检测方法	35
2.3 电机中性点电压对检测电路的影响	46
2.4 反电动势换相点检测方法	48
2.5 实验结果	58
2.6 本章小结	61
第三章 无刷直流电机换相转矩脉动的分析及其抑制方法	63
3.1 引言	63
3.2 换相过程对无刷直流电机电磁转矩的影响	63
3.3 换相转矩脉动值的分析	66
3.4 工程近似条件下的换相转矩脉动分析	72
3.5 换相过程中采用恒压控制以抑制转矩脉动	76
3.6 本章小结	83
第四章 消除无刷直流电机控制系统中换相死区的方法研究	84

4.1	引 言	84
4.2	TMS320F241 型 DSP 芯片的 PWM 生成原理 及切换方式	85
4.3	PWM 脉冲切换方式对换相控制的影响	88
4.4	实验结果	98
4.5	本章小结	100
第五章	调制方式对无位置传感器无刷直流电机控制 系统的影响	101
5.1	引 言	101
5.2	关断相的电流组成	103
5.3	调制方式对反电动势电流生成过程的影响	107
5.4	实验结果	123
5.5	调制方式对换相转矩脉动的影响	126
5.6	其他厂家产品测试分析	135
5.7	本章小结	136
第五章	单神经元自适应控制器在无位置传感器无刷直流 电机控制系统中的应用	137
6.1	引 言	137
6.2	单神经元智能控制系统	138
6.3	无刷直流电机动态数学模型	141
6.4	无位置传感器无刷直流电机单神经元 自适应 PID 控制	143
6.5	本章小结	149
第七章	总结与展望	151
参考文献		154
致 谢		163

第一章 绪 论

1.1 引 言

永磁同步电动机调速系统输入频率的控制方式有两种:一种为频率他控式,另一种为频率自控式^[82]。采用频率他控式时,同步电动机的供电变频器输出频率是由转速给定信号决定的,而频率自控式则不然,变频器的频率输出不是由外部给定的,而是由电机本身的转速决定的,即根据电机磁极位置检测器的输出信号实现频率自控。频率自控式永磁同步电动机又称“无换向器电动机”,按电机电枢中感应电动势的波形又可分为两种:一种为正弦波形,称为三相交流永磁同步电动机(又称正弦电机)^[64];一种为梯形,称做无刷直流电动机(又称方波电机)。现代电力电子技术的发展为永磁同步电动机实现无刷控制打下了坚实的基础,并扩大了其应用领域。正弦电机虽然控制复杂,但定位准确,多用于工业机器人、数控机床用伺服电机等要求高精度、高动态性能的场合。而无刷直流电机结构简单,控制方便,成本较低,多用于拖动家电设备、电动车辆、办公自动化等只要求调速而对性能指标要求不高的场合。

无刷直流电机之所以能够自同步运行且具有有刷直流电机良好的调速性能,是因为电力电子逆变器功率器件的导通与关断(对应电机换相)取决于电机转子的位置,因此电机转子位置信号

必不可少。为了获得转子位置信号,传统的永磁无刷直流电机往往采用电磁式、光电式、霍尔磁敏式等各种外置式位置传感器进行检测。但外置式位置传感器增大了电机体积及成本,不能适应高温、高湿、污浊空气等恶劣的工作环境,且电机连线多,宜受干扰。因此,外置式转子位置传感器在一定程度上限制了永磁无刷直流电动机的推广和应用。如果省去外置式位置传感器而采用其他方法检测电机转子的位置,必能促进无刷直流电机的发展,这样,无刷直流电机无位置传感器的控制就被提到日程上来。

本章首先介绍无刷直流电动机的组成及其工作原理,介绍无位置传感器无刷直流电机的控制方法和转子定位与起动方法,分析现有国内及引进的设备中存在的问题,最后根据全直流变转速空调控制系统的控制要求确定了研究方向及重点,建立了实验系统,并列举本文的主要研究成果。

1.2 无刷直流永磁同步电动机的组成及工作原理

1.2.1 无刷直流永磁同步电动机的组成

无刷直流电动机的组成原理框图如图 1-1 所示。

无刷直流电动机是一种自控变频的永磁同步电动机,就其基本组成结构而言,可以认为是由电力电子开关逆变器、永磁同步电动机和磁极位置检测电路三者组成的“电动机系统”。普通直流电动机的电枢通过电刷和换向器与直流电源相连,电枢本身的电流是交变的,而无刷直流电机用磁极位置检测电路和电力电子开关逆变器取代有刷直流电机中电刷和换向器的作用,即用电子换向取代机械换向。由位置检测器(有位置传感器或无位置传感

器)提供电机转子磁极的位置信号,在控制器中经过逻辑处理产生相应的开关状态,以一定的顺序触发逆变器中的功率开关,将电源功率以一定的逻辑关系分配给电动机定子各相绕组,使电动机产生持续不断的转矩^[58]。

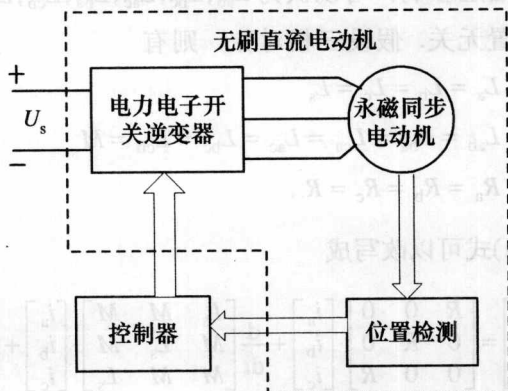


图 1-1 无刷直流电动机的原理框图

1.2.2 无刷直流电动机的工作原理

在电机反电动势为梯形波的无刷直流电动机中,电力电子开关逆变器输出方波电压或电流,并与电机反电动势保持适当的相位关系,从而产生有效电磁转矩。逆变器多用三相全控桥式电路,当电机采用三相星形绕组时,由三相定子变量建立的永磁无刷直流电机模型如下:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

式中, e_a, e_b, e_c 为定子各相反电动势(V); i_a, i_b, i_c 为定子各相电流(A); u_a, u_b, u_c 为定子各相电压(V); R_a, R_b, R_c 为定子各相绕组电阻(Ω); L_a, L_b, L_c 为定子各相绕组自感(H); $L_{ab}, L_{bc}, L_{ac}, L_{ba}, L_{cb}, L_{ca}$ 为定子各相绕组间的互感(H). 由于转子是永磁的, 忽略它的磁阻影响, 可以认为 $L_{ab}, L_{bc}, L_{ac}, L_{ba}, L_{cb}, L_{ca}$ 为常数, 与转子位置无关. 假设三相对称, 则有

$$L_a = L_b = L_c = L_s$$

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ca} = L_{ac} = L_{bc} = L_{cb} = M$$

$$R_a = R_b = R_c = R,$$

于是, (1.1)式可以改写成

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

又因为

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

则 $Mi_b + Mi_c = -Mi_a$, $Mi_c + Mi_a = -Mi_b$, $Mi_a + Mi_b = -Mi_c$, 代入(1-2)式, 整理后得

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

其中 $L = L_s - M$. 由此可得无刷直流电机的等效电路及三相全控桥式主电路原理图如图 1-2 所示.