

文章编号: 1008 - 1658(2007)01 - 0038 - 05

无刷直流电动机控制技术研究

王 芳, 厉 虹

(北京机械工业学院 计算机及自动化系, 北京 100085)

摘 要: 无刷直流电动机 (brushless direct current motor BLDCM) 是新型机电一体化电机, 其鲜明的特征和使用技术越来越受到关注, 已成为微特电机明显的发展趋势。采用综述的方法介绍了无刷直流电动机控制技术研究意义, 总结了国内外无刷直流电动机控制技术研究现状和研究成果, 随着控制理论和控制技术的发展, 无刷直流电动机在调速范围、转矩脉动、系统鲁棒性等性能方面都在不断提高。不论是它的开发、研究还是推广、普及仍有很多工作可做。

关键词: 无刷直流电动机; PD 控制; 智能控制; DSP

中图分类号: TM 921. 2 **文献标识码:** A

Development of control technology of brushless direct current motor

WANG Fang, LI Hong

(Department of Computer Science & Automation, Beijing Institute of Machinery, Beijing 100085, China)

Abstract Brushless direct current motor (BLDCM) is the new integrated mechatronics motors with more and more focus on its technology characteristic and practical application. It also has become the development tendency of small and special electrical machinery. The significance of the control technology research of brushless direct current motor is introduced in the article. The present condition and research achievement on the control technology of brushless DC motor both at home and abroad are summarized. With the improvement of the control theoretics and technology, the performance of robustness of system, torque ripple, and speed range have all been improved. It is still a long way to go both in its exploitation and research.

Key words: BLDCM; PD control; intelligent control; DSP

无刷直流电动机具有调速性能好、控制方法灵活多变、效率高、启动转矩大、过载能力强、无换向火花、无无线电干扰、无励磁损耗及运行寿命长等诸多优点。近年来, 由于永磁材料性能提高、制造成本价格下降、电力电子技术发展及对电机性能要求等因素的影响, 无刷直流电动机的应用领域迅速扩展。

随着大规模集成电路的普及, 各具特色的无刷直流电动机专用集成电路控制芯片纷纷涌现, 将各种功能的电子控制电路集成在一片控制芯片中, 既使控制电路体积大大减小, 又减少了整个装置的调试工作量。随着电力电子工业的发展, 无刷直流电动机的应用将更加普及^[1]。

1 无刷直流电动机控制策略研究

1.1 无刷直流电动机的速度/位置控制

目前国内外学者对无刷直流电动机的研究大多集中在其速度和位置控制技术上。无刷直流电动机速度伺服系统的结构如图 1 所示, 系统采用电流、速度双闭环控制, 电流环采用传统的 PI 控制, 速度环既可采用 PI 控制, 也可根据运行条件选择合适的控制策略。

无刷直流电动机位置伺服系统的结构如图 2 所示, 系统采用速度、位置双闭环控制, 速度环可采用速度伺服系统中的各种控制策略进行控制, 为了提高系统的快速响应性, 位置环常采用变结构控制。

收稿日期: 2006 - 10 - 12

作者简介: 王 芳 (1982 -), 女, 山西晋城人, 北京机械工业学院计算机及自动化系硕士研究生, 主要从事检测与自动化装置的研究。

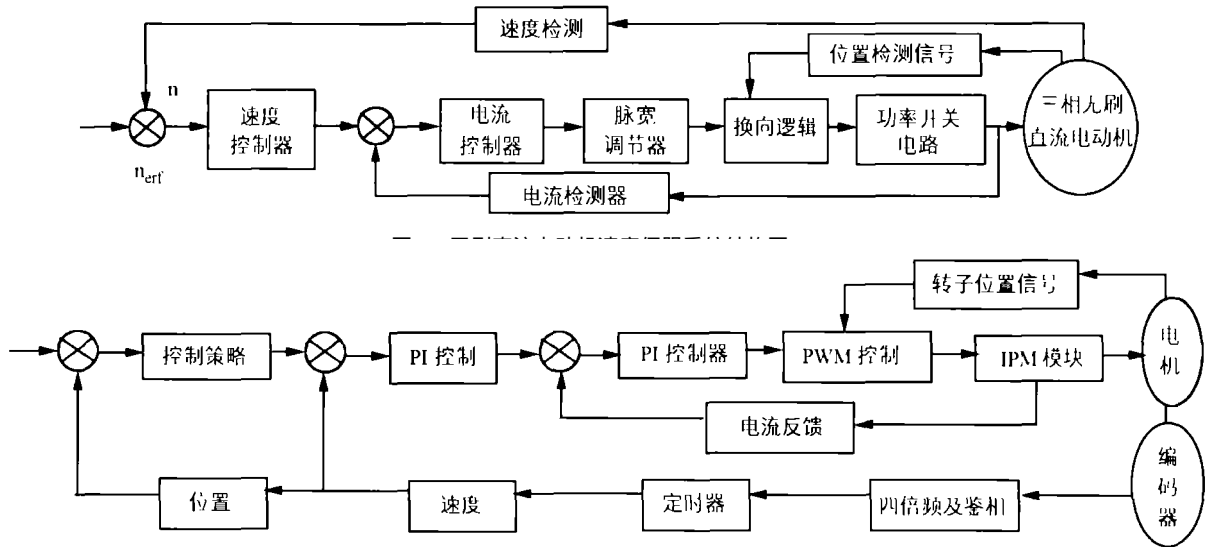


图 2 无刷直流电动机位置伺服系统结构图

1.2 无刷直流电动机的控制策略

受控制理论和控制器件的限制,无刷直流电动机很长时间内一直采用经典 PD 控制,该控制方法可使系统性能满足各种静、动态指标,但系统的鲁棒性不尽人意。面对日益复杂的控制对象,为进一步提高无刷直流电动机调速系统的快速性、稳定性和鲁棒性,智能控制方法受到更多关注。近年来电机控制专用数字信号处理器(DSP)又成为另一被广泛使用的控制方法,DSP实现的电机伺服系统可以只用一片 DSP 代替单片机和各种接口,且 DSP 芯片有快速的运算能力,可以实现更复杂、更智能化的算法;可以通过高速网络接口进行系统升级和扩展;可以实现位置、速度和电流的全数字化控制。

1.2.1 PD 控制

PD 控制具有控制结构简单,参数容易整定的优点,在工业领域应用最为广泛。在设计 PD 控制器时,分析比较 PD 参数 K_p , K_i , K_d 对系统的影响,通过参数的调整使系统的暂态特性达到最优^[2]。在无刷直流电动机速度闭环控制方案中,PD 控制器虽然容易使用,但易受干扰,采样精度和数字量上、下限的影响易产生积分饱和而失去调解作用。而采用非线性变速积分 PD 算法时,可将 PD 控制器输出限制在有效输出范围内,避免其超出执行机构动作范围而发生饱和。这种算法消除了一般 PD 控制器算法中的饱和现象,使电机调速稳定,并具有快速跟随性,同时也使电机具有恒转矩调速特性^[3]。

1.2.2 智能控制

智能控制是控制理论发展的高级阶段,智能控制系统具有自学习、自适应、自组织功能等,能够解

决模型不确定性问题、非线性控制问题以及其他较复杂的问题。无刷直流电动机是一个多变量、非线性、强耦合的研究对象,利用智能控制可以取得较满意的控制效果。

无刷直流电动机中主要采用的模糊控制策略有:基于简单模糊控制器、模糊 - PI 复合控制器、模糊 PD (PD 控制器、自适应、自组织、自学习模糊控制器和集成及智能模糊控制器的速度控制方法^[4]。

模糊控制不依赖于被控对象精确的数学模型,对系统动态响应有较好的鲁棒性,但难以消除系统稳态误差,而 PD 控制方法可以很好地解决这一不足,若将两者结合起来则系统同时兼有两种方法的优点。在无刷直流电动机控制系统中,电流环采用经典 PI 调节,速度环采用模糊控制和 PD 混合结构,将 PD 控制器分解为模糊 PD 控制器和传统的积分环节,既保留了经典 PD 控制器的特性,又增加了模糊 PD 控制器快速响应的特点,做到了响应快和静态无误差,完善了 PD 功能^[5]。

传统的 PD 控制要想取得好的控制效果就必须调整好比例、积分、微分系数之间的关系,使它们既相互配合又相互制约。神经网络具有任意非线性表示能力,可以通过学习来实现具有最佳组合的 PD 控制,针对神经网络控制器在大误差范围内电流过早饱和,不利于响应快速性的缺点,加入模糊控制来改善性能,提高响应的快速性。在 PD 调节的基础上结合模糊逻辑和神经网络,设计神经模糊控制器,其基本思路是:利用模糊控制的鲁棒性和非线性控制作用;对作为实现模糊规则的神经网络(NN)的输入进行预处理,根据系统的运行状态,通过神经网络在线调节 PD 控制器的参数,从而达到性能指标

的最优化^[6]。图 3 所示为神经网络模糊 PD 控制系统结构。

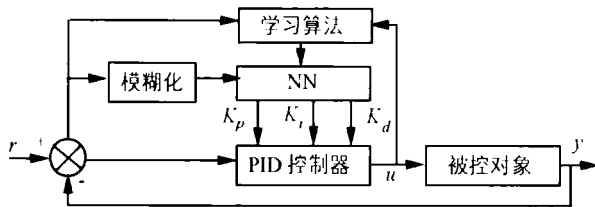


图 3 神经网络模糊 PD 控制系统结构

在速度和电流双闭环控制系统中,为了提高系统的快速响应能力,由基于模糊自适应理论设计的控制器来代替 P 速度调节器。模糊自适应控制器由模糊速度控制器和模糊辨识器两部分组成,模糊速度控制器用参数可调的模糊基函数表示,模糊辨识器根据辨识得到的估计输出与被控对象实际输出之差在线实时调整,并同时预测被控对象的输出^[7]。基于神经网络控制和小波变换检测故障的无刷直流电动机系统,采用三层前馈式人工神经网络来实现无刷直流电动机电流、电压的双闭环控制,利用离线和在线训练结合方式对神经网络进行训练,通过在线学习能够在保证系统稳定性的同时,对扰动和参数变化进行有效的抑制补偿。利用离散小波变换的时域特性和连续小波变换检测信号边沿的原理进行无刷直流电动机运行状态和故障状态的检测,可以有效地提高控制系统的动静态性能、稳态精度和可靠性^[8]。

1.2.3 无传感器控制

从控制系统的成本、维护性、可靠性等方面考虑,无传感器的传动系统对提高系统的可靠性具有更重要的意义,成为近年的研究热点。无传感器控制技术的关键在于速度/位置的观测与估计。由于无刷直流电动机在任意时刻,定子的三相绕组只有两相绕组同时有励磁电流,而另外一相绕组的感应电动势幅值较小,杂波较多,因此更适于无传感器控制。

由于取消了霍尔元件等位置传感器,保证此类电机的稳定运行成了关键问题。电机在不同的工作频率、启动及过流状态下需要满足一定的稳定运行条件,PLL 锁相环以及 PWM 速度反馈网络也会影响电机工作的稳定性^[9]。无位置传感器无刷直流电动机的锁相稳速控制方法可以实现对电机的高精度稳速控制,既无需检测电机转子位置的传感器,也不用检测电机转速的光电码盘,而是由电机电枢绕组的反电动势经整形后直接作为转速反馈信号,系统一经锁定,电机的转速就跟随参考信号的频率变

化,其稳速精度达到与晶体振荡器提供频率一样的稳定精度^[10]。基于三次谐波检测法的无位置传感器无刷直流电动机控制系统,可以实现开环、转速负反馈以及电压负反馈加电流正反馈三种调速方法。开环方式适合于转速精度要求不高的场合,转速负反馈方式适合于机械特性要求比较硬、转速精度要求比较高的场合,而电压负反馈电流正反馈方式则应用于动态性能要求比较高的场合^[11]。由于位置传感器直流电压波形的信号失真对无刷直流电动机的性能也有影响^[12],因而使无位置传感器的研究显得更为重要。

1.2.4 DSP 控制器

在基于 DSP 的无刷直流电动机控制系统中,一片 DSP 就可代替单片机和各种接口,且由于 DSP 芯片的快速运算能力,可以实现更复杂、更智能化的算法;可以通过高速网络接口进行系统升级和扩展;可以实现位置、速度和电流环的全数字化控制,可以方便地通过 SC 接口的扩展能力与上位机进行通讯,组成多机系统结构。以 TMS320LF2407 为核心的永磁无刷直流电动机控制系统设计,包括 PWM 斩波电路结构及功率开关器件的选择,驱动电路,保护电路,及软件编程^[13]。利用 TMS320LF2407 的运动控制接口形成单片 DSP 控制的电机系统,使用霍尔元件检测转子磁极位置,形成电子换向逻辑,通过数字 P 速度和电流控制器控制电机速度。实验证明使用 DSP 实现无刷直流电动机控制,不仅比传统的模拟电路成本低,而且结构简单,方便扩展^[14]。基于 TMS320LF2407 DSP 数字信号处理芯片、智能功率模块 IPM 的无位置传感器的无刷直流电动机调速系统,采用 P 控制算法提高了系统的实时性和控制精度,可以实现无刷直流电动机的无级调速^[15]。

1.3 无刷直流电动机的制造材料

无刷直流电动机的电枢绕组放在定子上,转子采用永磁材料。永磁材料的使用,大大减小了无刷电动机的重量、简化了结构、提高了性能,使其可靠性得以提高。无刷电动机与永磁材料的发展是分不开的,磁性材料经历了铝镍钴、铁氧体、钕铁硼(NdFeB)等几个阶段。钕铁硼永磁材料的应用,进一步减少了电机的用铜量,促使无刷电机向高效率、小型化、节能的方向发展。但随着永磁电机的发展,仍有磁路结构设计计算、驱动控制、不可逆退磁等几大问题需要研究和分析。

永磁体磁化时的几何状态对无刷直流电动机的影响是很大的,选取以不同方式磁化的永磁体进行

研究时,由于磁化方式不同,每块永磁体都产生了独特的磁域。另外永磁体磁化的几何结构对永磁体性能有极大的影响^[16,17]。无刷直流电动机在不同磁化状态下有不同的性能,例如矩形磁化状态下的转矩会引发低电流,而正弦磁化产生的磁化电流最小,可使无刷直流电动机具有最好的机械特性^[18]。在实际应用中如何减小电机的体积是迫切需要解决的问题,大量的分析比较实验证明可以通过使用永磁体或者改进绕组方法来达到这个目的^[19]。

2 无刷直流电动机的应用研究

无刷直流电动机是一种新型的直流电动机,与传统的直流电机相比,无刷直流电动机具有优越的性能,在许多领域得到了广泛应用。

在精密电子设备和器械中的应用

用来存放各种信息数据的计算机外存设备,其各种存储器的主轴电动机均采用高档精密无刷直流电动机,特别是用于硬盘驱动器的主轴电机,能悬浮于盘片上下两侧以高速驱动磁盘稳定旋转,这对无刷直流电动机零部件和装配精度提出了很高要求。无刷直流电动机还广泛应用于医疗器械、激光打印机、复印机、卫星太阳能帆板驱动、医疗监控设备等领域。

在家用电器中的应用

近年来的变频式空调机中使用了多台无极调速无刷直流电动机。无论是压缩机拖动,还是在风机、加湿机中,都逐步采用无刷直流电动机拖动方式,既提高机械可靠性,又降低成本。此外在热水器、吸尘器、洗衣机、电风扇、搅拌机中使用无刷直流电动机可实现多功能自动操作,提高家电产品的自动化程度和效率。

在工业系统中的应用

在许多工业系统中,往往需要能精确定位又要快速动作的执行机构。在这些系统中采用无刷直流电动机的伺服控制,不仅提高了生产效率,而且大大改善了产品质量,例如,在毛巾印花机中,采用两套带光学编码器的无刷直流电动机伺服控制系统,定位准确,印花清晰,生产效率大大提高。

无刷直流电动机还广泛应用于其它领域,如航空工业、军事国防等等。

现代控制理论的发展和运用促使许多新型交流伺服电机控制方法诞生,交流伺服电机是一个多变量、非线性、强耦合的控制对象,仅仅采用一般的控制方法,很难达到较高的性能要求。由于无刷直流

电动机具有一系列的优点,应用领域宽广,更适合于高性能的交流伺服系统,因此对无刷直流电动机交流伺服系统控制策略及应用的研究具有重要的价值和意义。

3 无刷直流电动机的发展展望

无刷直流电动机虽然已经发展到相当成熟的阶段,但是相对于其他类型电动机,还是一种新型电动机,是多学科技术相结合的产物,它的驱动、控制更是和电子技术息息相关。不论是开发、研究还是推广、普及都有很多工作要做^[20]。

对于无刷直流电动机,应该进一步改进的问题中首先是转矩脉动。尤其是用于视听设备、电影机械、计算机中的无刷直流电动机,更要求运行平稳,没有噪声。这些应用场合中的电动机,大多为小功率、小尺寸的电动机,尺寸紧凑,改动更为困难。为了改进性能,利用计算机进行模拟、分析、计算、比较。研究气隙磁场形状和磁极结构,选择合适的极对数和槽数以及合适的槽口尺寸。美国研究人员利用定子电流谐波的最优权重的设计方法,通过电流调节器等装置有效减少了电磁转矩及齿槽引起的转矩脉动。

电动机性能的改进离不开高性能材料的应用,首先应该提及的是永磁材料性能的提高。研制和采用磁性能更好,温度特性更佳、防锈防腐特性更强、价格更便宜的稀土材料是一个关键。在加工技术方面首先应该提到的是充磁技术,应该保证气隙磁场形状,保证性能。其他的还有加工的一致性,精确度,高效等等。

针对无刷直流电动机交流伺服系统的特点,目前采用的控制策略虽然取得了较满意的控制效果,但都不是尽善尽美的。而智能化、全数字化是控制系统发展的主要方向,模糊控制、神经网络、遗传算法和自学习控制的发展将使系统性能更加优越,无位置传感器算法、智能控制策略和电机专用 DSP 构成了无刷直流电机控制的主旋律。

随着微电子技术和现代控制理论的迅速发展以及在电机控制中的成功应用,作为高性能交流伺服系统发展主要方向的无刷直流电动机,困扰其性能提高的转矩脉动、电流控制等问题将会会有一个突破性的进展。

4 总结

无刷直流电动机的控制吸引了大量的研究人

员,国内外可以查到的期刊达上千篇,通过阅读大量文献,总结了国内外直流无刷电动机各种控制技术,主要集中在传统 PD 控制算法、无位置传感器算法、智能控制策略和电机专用 DSP 控制器上,电机的控制技术是在不断进步,不断发展的,从而使无刷直流电动机的研究得到了长足的发展,其应用领域更加宽广,但对高性能的直流无刷电动机的研究仍在进行,我们需要不断探索无刷直流电动机控制的新方法。

总之,无刷直流电动机虽然已经发展到相当成熟的阶段,相对于其它类型电动机,这是一种新型电动机,有着更优越的性能。无刷直流电动机是机电一体化产品,是多学科技术相结合的产物。它的驱动、控制更是和电子技术息息相关。因此,不论是它的开发、研究还是推广、普及都有很多工作要做。

参考文献:

- [1] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用 [M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社, 2004
- [2] Ushakumari S, Chandramohan nair P S Closed Loop Performance of a Permanent Magnet Brushless dc Motor Incorporation the Nonlinearity in Torque-Balance Equation (Transient Operation) [J]. Electric Power Components and Systems, 2002 (30): 1249 - 1260
- [3] 谢世杰,陈生谭,楼顺天. 数字 PD 算法在无刷直流电动机控制器中的应用 [J]. 现代电子技术, 2004, 169 (2): 59 - 61
- [4] 叶长青,尹华杰. 无刷直流电机速度的模糊控制方法 [J]. 电气传动, 2006, 3 (36): 3 - 7
- [5] 史浩,潘再平. 无刷直流电动机模糊控制系统及仿真分析 [J]. 微电机, 2005, 38 (5): 42 - 44
- [6] 杜军,万健如,许镇琳. 神经网络模糊控制在无刷直流电动机中的研究与实现 [J]. 控制与检测, 2005 (12): 70 - 72
- [7] 纪志成,沈艳霞,姜建国. 一种新型的无刷直流电动机调速系统的模糊 PI 智能控制 [J]. 电机与控制学报, 2003 (3): 249 - 254
- [8] 李先祥,徐小增,肖红军. 基于小波神经网络控制的无刷直流电动机调速系统 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 9 (25): 127 - 129
- [9] 汪洋,谭弗娃. 无位置传感器无刷直流电动机稳定运行控制 [J]. 微特电机, 2004 (3): 32 - 34
- [10] 季小尹,张万红. 无位置传感器无刷直流电动机的锁相稳速控制 [J]. 微特电机, 2004 (1): 29 - 30
- [11] 胡文华,彭韬,陆云波,等. 无位置传感器无刷直流电动机的调速控制方法 [J]. 微电机, 2004, 2 (37): 28 - 31
- [12] Kim Tae Heoung, Lee Ju. Influence on brushless DC motor performance due to signal distortion of the position sensor and DC link voltage ripple [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2004 (19): 287 - 291
- [13] 尹衍辰,范瑜. 基于 DSP 的永磁无刷直流电动机控制器设计 [J]. 微电机, 2005, 2 (38): 43 - 45
- [14] 敖银辉. 基于 DSP 的无刷直流电动机控制系统研究 [J]. 广东工业大学学报, 2004, 4 (21): 6 - 8
- [15] 石晓艳,刘淮霞. 基于 DSP 控制无传感器的无刷直流电动机调速系统 [J]. 煤矿机械, 2006, 2 (27): 301
- [16] Yoon T, Lieu D K Magnetization Patterns of Permanent Ring Magnets in Brushless DC Motors [J]. Electric Power Components and Systems, 2005 (33): 127 - 144
- [17] Hur Jin, Jung In-Soung, Sung Ha-Gyeong, et al Performance analysis of a brushless dc motor due to magnetization distribution in a continuous ring magnet [J]. Journal of applied physics, 2003 (10): 8778 - 8780
- [18] Jang G H, Chang J H. Numerical modeling of the magnetization of a permanent magnet and its effect on the electromechanical performance of a brushless direct current motor [J]. Journal of applied physics, 2002 (10): 8308 - 8310
- [19] Lee Kab-Jae, Kim Sol, Lee Ju, et al Effect of maximum torque according to the permanent magnet configuration of a brushless dc motor with concentrated winding [J]. Journal of applied physics, 2003 (10): 8698 - 8700
- [20] 曲家骥. 展望 21 世纪的无刷直流电动机 [J]. 微特电机, 1999 (4): 41 - 43