

大功率变频高速搅拌机的研制

赵建刚¹, 韩天夫^{1,2}, 许云博¹

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 论述了将变频调速技术应用于设计制作大功率变频高速搅拌机, 通过改变电压频率和电压幅值来达到电机调速目的的新型控制技术。介绍了以 89C51 单片机为控制核心, 以 SA866 专用 SPWM 控制芯片和 PS21255 智能功率模块为主控模块的大功率数字式变频调速器和小体积大功率一体化变频专用高速电机的设计, 以及变频调速的多级谐波抑制、小体积大功率高速变频电机散热和噪声抑制等问题的解决方法。

关键词: 变频调速; 大功率搅拌机; SPWM(正弦脉宽调制); IPM(智能功率模块)

中图分类号: TH763.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2007)10-0036-05

Study on High-power and High-speed Frequency Conversion Mixer/ZHAO Jian-gang¹, HAN Tian-fu^{1,2}, XU Yun-bo¹
(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: This paper simply discussed upon speed regulating by frequency converting used in design and manufacture of high-power and high-speed frequency conversion mixer, and the new control technology about the speed regulation of motor by changing the frequency and the amplitude of voltage. Designs are introduced on high-power digital frequency-converting speed regulator by using the single chip computer 89C51 as the control core, taking SPWM controlling chip special for the SA866 and PS21255 IPM power module as the mainly controlling module and high-speed conversion motor with small volume and high-power. The settlement to multistage harmonic suppressing for speed regulating by frequency conversion, and heat dispersion and noise suppressing for high-speed and small-volume conversion motor are also presented.

Key words: speed regulating by frequency converting; high-power mixer; SPWM (sinusoidal pulse-width modulation); IPM (Intelligent Power Module)

1 概述

在石油钻探、化工行业的室内研究和现场, 为了将多种组分混合均匀, 通常需要使用搅拌机对其进行一定时间的搅拌。在对钻探泥浆的流变性、堵漏性、失水量等性能进行测试前, 需要使用最高转速达 11000 r/min 的高速搅拌机对泥浆进行高速搅拌。根据实验目的和组分的不同, 进行高速搅拌的速度和时间也不一样。在变频调速技术成熟之前, 主要采用直流串级电机作为高速搅拌机的原动力, 这主要存在以下问题:

(1) 直流串级电机使用碳刷和滑环进行换流, 当转速超过 3000 r/min 时, 会发出刺耳的摩擦噪声, 长期使用会严重损害实验人员的听力;

(2) 由于直流串级电机使用碳刷, 不但需要定时进行清理积碳, 而且直流串级电机工作时电流大, 易烧转子, 使用寿命低;

(3) 直流串级电机需要使用碳刷和滑环进行换

流, 工作时有电火花产生, 不适合在有油气等危险场所使用;

(4) 使用直流串级电机进行调速, 要获得硬的转矩特性, 则需要安装测速发电机之类的测速装置, 并要有一套负反馈控制电路, 导致控制电路复杂, 成本高, 且不易实现 0~15000 r/min 的宽范围调速。

随着现代电子技术的发展, 国外交流变频调速技术在许多行业得到了应用。与传统直流调速相比, 变频调速有诸多优点: 噪声低, 免维护, 调速范围宽, 调速精度高, 运行效率高, 节电, 便于实现智能化, 操作方便且便于同其他设备联接等。

随着石油这种能源的日益紧缺, 各国除了加大勘探开发范围之外, 勘探深度也在不断增加, 如在大庆、新疆塔里木和东海石油勘探中, 钻探深度已超过 7000 m, 为了保证钻井安全, 泥浆密度已超过 3.0 g/cm³, 泥浆越来越稠, 常规直流搅拌机暴露的缺点越来越多, 已无法满足现实的需要, 迫切需要开发能克

收稿日期: 2007-04-22; 改回日期: 2007-07-19

基金项目: 北京探矿工程研究所青年基金项目

作者简介: 赵建刚(1969-), 男(汉族), 内蒙古丰镇人, 北京探矿工程研究所仪器开发部主任、高级工程师, 地球探测与信息技术专业, 硕士, 从事钻探设备器具的研究与开发工作, 北京市海淀区学院路 29 号, zhaojg@cugb.edu.cn。

服以上缺点的大功率变频高速搅拌机。

针对上述现实需求,我们将现代电子技术的最新发展成果——变频调速技术应用于设计、制作大功率变频高速搅拌机,本文论述了以改变电机频率和改变电压来达到电机调速目的的新型转速控制技术,设计了以 89C51 单片机为控制核心,以 SA866 专用 SPWM (sinusoidal pulse-width modulation) 正弦脉宽调制控制芯片和 PS21255 智能功率模块为主控模块的大功率变频调速控制器和小体积大功率一体化变频高速专用电机,解决了变频调速的多级谐波抑制、小体积大功率一体化变频高速电机散热和噪声抑制等问题,并研制生产了单轴、双轴、四轴 3 种规格的变频高速搅拌机。该系列大功率变频高速搅拌机具有功率大、体积小、噪声低、调速范围宽、动态响应快、运行效率高、免维护、操作方便等特点,其最高转速达到 12000 r/min,可无级调速、定时搅拌,功率可达 1000 W,数字显示转速和定时时间。该系列产品在中海油、中石油、中石化等多家单位的实验室及钻井平台上得到了很好的现场应用。

2 大功率变频高速搅拌机的设计

2.1 变频调速技术的基本概念

具体地说,变频调速技术是一种以按比例同时改变电机频率和电压来达到电机调速目的的技术。众所周知,目前,无论哪种机械调速,都是通过电机来实现的。从大范围来分,电机有直流电机和交流电机。过去的调速,大多用直流电机,这是由于直流电机调速容易实现。但直流电机具上述缺点。

与直流电机相比,三相鼠笼式交流电机不但简单可靠,而且在高速工作时噪声小。因此有人就想,如果把可靠简单的鼠笼式交流电机用来调速那该多好!因而就出现了诸如定子调速、变极调速、滑差调速、串级调速等交流调速方式。但这些调速方式有无法宽范围调速、不易实现微电脑自动控制、调速系统在不同行业之间无法通用等问题。

变频调速与传统直流调速相比,具有噪声低、调速范围宽、调速精度高、动态响应快、运行效率高、操作方便、便于实现智能化和节电等一系列优点。

2.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 变频器工作原理

异步电动机的电磁转矩是由定子主磁通和转子电流相互作用而产生的,定子绕组通过电流时产生旋转磁场,在转子绕组内感应出电动势,因而产生了感应电流,该电流与定子旋转磁场相互作用,便产生了磁场力。而实际上对于异步电动机,旋转磁场的

转速(即:同步转速) n_0 与转子的转速 n_1 是有差别的,两者之差与同步转速的比值,我们称之为转差率,用 S 来表示,即:

$$S = (n_0 - n_1) / n_0 \quad (1)$$

$$n_0 = 60f/p \quad (2)$$

式中: f ——电流频率; p ——电机极对数。

所以转子的速度 n_1 可用下式表示:

$$n_1 = (60f/p)(1 - S) \quad (3)$$

由上式可知,只要改变异步电动机的供电频率,电机的转速便会发生改变,交流变频调速就是根据这一基本原理来运行的。

异步电动机在运行时产生的感应电动势 E_1 为:

$$E_1 = 4.44kN_1\Phi \quad (4)$$

式中: k ——电机绕组系数; N_1 ——每相定子绕组匝数; Φ ——每极磁通。

由于定子阻抗上的压降很小,可以忽略,这样,我们便可以得到压缩机定子电压 U_1 :

$$U_1 \approx E_1 = 4.44kN_1\Phi \quad (5)$$

即: $\Phi = [1/(4.44kN_1)](U_1/f)$ (6)

由上式可知,磁通 Φ 与 U_1/f 成正比。对于磁通 Φ ,我们通常是希望其保持在接近饱和值,如果进一步增大磁通 Φ ,将使电机的铁心饱和,从而导致电机中流过很大的励磁电流,增加电机的铜损耗和铁损耗,严重时会使绕组过热而损坏电机。而磁通 Φ 的减小,则铁心未得到充分的利用,使得输出转矩下降。这样,由上式可知,要保持 Φ 恒定,即要保持 U_1/f 恒定,改变频率 f 的大小时,电机定子电压 U_1 必须随之同时发生变化,即在变频的同时也要变压。这种调节转速的方法我们称为 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency),简称为 V/F 变频控制。现在变频调速的控制方法基本上都是采用这种方法来实现变频调速的。图 1 为一典型变频调速的 $V-f$ 曲线图,具体的 $V-f$ 曲线由负载和电机的性能共同决定。

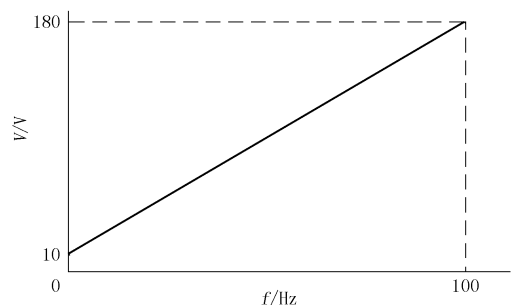


图 1 典型变频调速的 $V-f$ 曲线图

利用 V/F 变频控制方法实现的变频调速控制

电路原理如图2所示。图中220 V/50 Hz的市电经整流滤波后得到310 V左右的直流电,控制电路通过控制加在A+、A-、B+、B-、C+、C-六个高频大功率三极管基极的矩形驱动脉冲,就可以将直流电逆变为控制电机运转的三相变频电源。

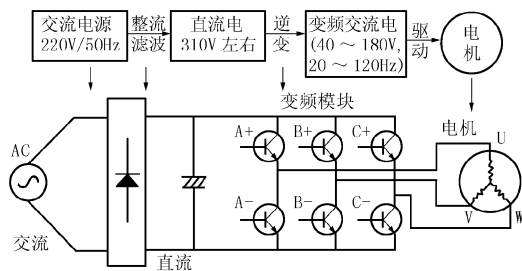


图2 变频调速控制原理图

根据上述原理,可以得到简单脉宽调制(PWM)控制方式,即在输出电压每半个周期内,把输出电压的波形分成若干个脉冲波,由于输出电压的平均值与脉冲的占空比(脉冲的宽度除以脉冲的周期称为占空比)成正比,所以在调节频率的同时,不改变脉冲电压幅度的大小,而是改变脉冲的占空比,可以实现变频也变压的效果。这种方法称为PWM(Pulse Width Modulation)调制,PWM调制可以直接在逆变器中完成电压与频率的同时变化,控制电路比较简单。

但是由于PWM调制方式输出的电压波形和电流波形都是非正弦波,具有许多高次谐波成分,这样就使得输入到电机中的能量得不到充分利用,增加了铜损耗和铁损耗。为了使输出的波形接近于正弦波,提出了正弦波脉宽调制(SPWM)。

所谓SPWM调制,简单地来说,就是在进行脉宽调制时,使脉冲序列的占空比按照正弦波的规律进行变化,即,当正弦波幅值为最大值时,脉冲的宽度也最大,当正弦波幅值为最小值时,脉冲的宽度也最小(如图3所示)。这样,输出到电动机的脉冲序列就可以使得负载中的电流高次谐波成分大为减小,从而提高了电机的效率,并减小电机运转时的噪声和发热量。SPWM波形的特点概括起来就是“等幅不等宽,两头窄中间宽”。

对于变频电路而言,其核心部分主要集中在变频驱动模块上。这一部分是指用来完成直流到交流的逆变过程,用于驱动变频电机运转的逆变桥及其周围电路。变频调速通常采用6个IGBT绝缘栅门控双极型功率晶体管模块构成上下桥式驱动电路。在实际应用中,多采用IPM(Intelligent Power Module)模块加上周围的电路,如开关电源电路等组成。IPM是一种智能功率模块,它将IGBT连同其驱动电

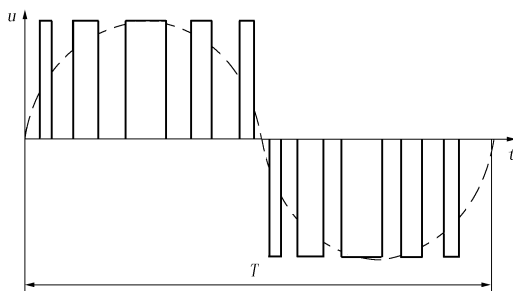


图3 SPWM正弦波脉宽调制波形示意图

路和多种保护电路封装在同一模块内,这样不但简化了设计,而且提高了整个系统的可靠性。

2.3 大功率变频高速搅拌机总体设计思路

在设计大功率变频高速搅拌机时,主要考虑了以下几个方面的因素:一是可靠性,即设计的大功率变频高速搅拌机故障率要低;二是整机体积要小、质量要轻;三是成本要低,所需要的元器件易于在市场上购买,且价格低,同时,所需要的机械部件要易于加工;四是实现的技术不应太复杂;五是后期维修和保养方便。

基于上述考虑,我们在研制、开发大功率变频高速搅拌机时,采用了如下主要的技术路线:采用以Intel 89C51单片机为控制的核心;采用SA866专用SPWM正弦脉宽调制控制芯片和PS21255智能功率模块为主控模块设计专用变频调速器,变频调速器的转速控制做成操作简单、方便的“傻瓜型”;与电机厂家合作研制低噪声、小体积、大功率、一体化、高速变频专用电机;变频调速器与搅拌头采用分体结构,便于安装和运输;研制单轴、双轴、四轴多种规格的变频高速搅拌机,以适应不同用户的需要。

2.4 关键技术

要实现上述目标,需要解决以下关键技术。

2.4.1 高速变频专用电机的设计

设计的高速变频专用电机首先要噪声低,这要从多方面加以解决:搅拌轴与电机主轴采用一体化加工,保证搅拌轴的对称性,减小高速旋转时搅拌轴的摆动所造成的噪声;选用噪声低、优质、寿命长的高速轴承;电机定子的布线槽采用特殊结构和材料,以尽可能降低高次谐波的幅度,减少由于高次谐波产生的噪声。

2.4.2 变频调速控制器的设计

采用SA866专用SPWM正弦脉宽调制控制芯片和PS21255智能功率模块为主控模块设计变频调速器。由于采用了功能强大的SA866和PS21255专用芯片,大大简化了整个变频调速器的设计,而且

使得主控 CPU 只需发出简单的几条指令即可实现复杂的变频调速功能。

SA866 是专用于交流异步电机 SPWM 控制的集成电路,它除了根据设定参数产生合乎要求的 SPWM 脉冲外,还集成了多种保护功能,并可在紧急情况下,如短路和过载时快速关断 SPWM 脉冲,保护逆变器和电机。而且它可以独立运行,无须微处理器控制,它的输出频率以及加速、减速频率都可由外接电位器在线连续调节。同时,所有需定义的参数如载波频率、死区时间、最小脉宽、调制波形、 V/f 曲线等均存储在外接的廉价 EEPROM 中,上电时自动读入 SA866 中。SA866 有 6 种工作模式,与微处理器配合使用,基本做到了低价格、多功能。

与常规的 IGBT 模块相比,PS21255 具有很多特点:内含驱动电路,且驱动电路离 IGBT 较近,减少信号传输阻抗,受外界干扰小;本模块内部采用自举电路,从而摆脱了控制电源不共地的限制,使用一个电源,即可实现方便的控制;内含各种保护,使内部 IGBT 因故障损坏的概率大大降低;采用陶瓷绝缘结构,扁平封装,可以直接安装在散热器上,散热效果好;端子布局合理,便于安装。

2.4.3 定时搅拌电路的设计

由于在实验室或现场对不同类型的泥浆进行搅拌时,需要定时搅拌的时间并不一样,所以,要在变频调速的基础上,设计一套数显定时搅拌电路,并与主控 CPU 相结合,构成一套完整的具有定时搅拌功能的变频高速搅拌系统。

2.4.4 整机的动平衡和低噪声设计

由于搅拌轴工作于高速状态,所以整机的动平衡设计也很重要,否则易造成振动而发出噪声;同时,由于搅拌头是中空结构,易形成共振而产生共鸣。所以,整机采用对称结构进行一体化铸造,并在搅拌头的空腔内壁上涂附一层复合材料来吸收噪声;同时,电机与搅拌头之间采用硅橡胶进行柔性连接,以进一步减小噪声。

2.5 主要技术指标

为使该项目的研究成果具有较好的市场前景,并能满足不同用户的需要,所研制、开发的变频高速搅拌机要成为调速方便、噪声低、数字定时,功率大,且带有缓起动功能的新一代数字式大功率变频高速搅拌机。其具体技术指标为:调速范围 $0 \sim 15000$ r/min,多挡调速;定时范围 $1 \sim 99$ min,数码显示和设置;整机噪声 < 20 dB;功率 $250 \text{ W} \times 4$;控制方式为分体结构,4 个搅拌头可单独控制转、停;质量 < 30 kg。

3 大功率变频调速器的设计

3.1 交流电动机变频调速

交流电动机的转速 N 为:

$$N = N_0 = 60F/P \quad (\text{同步电动机}) \quad (7)$$

$$N = N_0(1 - S) = 60F/P \cdot (1 - S) \quad (\text{异步电动机}) \quad (8)$$

式中: F ——频率; P ——极对数; S ——转差率。

由转速公式可见,只要设法改变三相交流电动机的供电频率 F ,就十分方便地改变了电动机的转速 N_0 ,比改变极对数 P 和转差率 S 两个参数要简单得多,特别是近 20 多年来,静态电力变频调速器突飞猛进的发展,使得三相交流电动机变频调速成为当前电气调速的主流。

实际上仅仅改变电动机的频率并不能获得良好的变频特性。这是因为:如果电压不变,频率下调,会使电机气隙磁通 Φ 饱和;反之,如果电压不变,频率向上调,则使磁通减弱。所以,真正应用变频调速时,一般需要同时改变电压和频率,以保持磁通基本恒定。因此,变频调速器又称为 VVVF 装置。

3.2 大功率变频调速器的设计

针对大功率变频高速搅拌机对变频调速器的实际要求,在本项目研究中,采用了多功能高集成度专用 SPWM 控制芯片 SA866 和智能功率模块 PS21255 作为变频调速主控模块,研制开发了一种新型大功率变频调速控制器。

我们设计开发的变频调速控制器工作原理如图 4 所示。该机采用单相交流 220 V、50 Hz 供电,经整流滤波后送入逆变桥,再由逆变桥将该直流电逆变成三相 VVVF 电源,以驱动电机。整个系统可以划分为主电路和控制电路 2 部分。

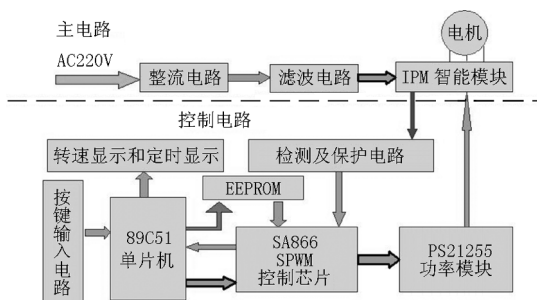


图 4 变频调速控制器工作原理图

主电路采用二极管整流,大容量的电解电容滤波,IPM 模块为主电路的核心部分,它包含 6 个 IGBT 构成三相逆变桥,且各自有自己的驱动电路和保护电路,整个模块还有短路及控制电路欠压保护功能。它的输入可以兼容 TTL 电平输入。

控制电路主要包括控制电源和以 SA866 为核

心的 SPWM 波发生及驱动电路。控制电源采用 7805 和 7815 提供直流稳压电源。SA866 通过 10 位数模转换器可实现转速的连续调节。SA866 所有的运行参数,包括载波频率、波形、最小脉冲宽度、死区脉宽和 V/f 曲线等都是通过外接的 EEPROM 编程。由于输入电压和反馈能量都将直接反映在直流环节上,所以,整个系统的电压电流检测及保护取样均集中在直流环节。驱动逆变桥所需的 PWM 信号则由 SA866 提供,经反向后送给 IPM 模块。

4 现场应用试验

在大功率变频高速搅拌机设计、调试完成后,将其组装好,进行了较为充分的室内、外实验,收集了用户的使用意见,并据此对一些考虑不够细的地方进行了完善和提高。

4.1 室内实验

各部分组装调试完毕后,在室内进行了为期 1 周的实验,主要包括变频调速器在单轴、双轴、四轴 3 种组合模式下,对不同密度的钻探泥浆样品进行 3000、4000、6000、8000、10000、11000、12000 r/min 不同转速的搅拌测试,证明搅拌机的实际转速与设定值相符,在合理的误差范围之内(详见表 1)。整机各部分性能优良,带负载能力强,噪声低,操作方便,可靠性高,达到了预期的设计目标。

表 1 搅拌机的实际转速与设定值对比表 $/(r \cdot \min^{-1})$

设定值	实测值 1	实测值 2	实测值 3
3000	3001.6	3001.5	3001.7
4000	4001.8	4001.8	4001.9
6000	6002.8	6002.9	6002.7
8000	8003.1	8003.0	8003.1
10000	10003.8	10003.6	10003.7
11000	11004.1	11004.3	11004.0
12000	12004.9	12004.5	12004.8

4.2 生产实验

在室内进行了较为充分的实验后,该机在中海油、中石化、中石油 3 大石油公司及其他行业的多个实验室进行了实验,证明所设计的变频高速搅拌机具有噪声低、转速控制精确、外表美观、操作方便、寿命长的优异性能。图 5 为该搅拌机在中海油服塘沽基地实验室使用现场情况。

5 结论

本项目以北京探矿工程研究所青年基金项目“大功率变频高速搅拌机的研制”为依托,进行了较为充分的前期技术和市场调研,以在完成其他科研



图 5 单轴变频高速搅拌机正在中海油服塘沽基地实验室使用

项目中积累的一些经验为基础,进行了细致的相关研究,目前已圆满完成了预期的研究目标和任务。具体结论如下:

(1) 以 AT89C51 单片机为控制核心,采用 SA866 专用 SPWM 控制芯片和 PS21255 智能功率驱动模块,结合使用其他一些专用控制模块,研制成了大功率变频调速控制器,并具有完善的过流、过压和自动保护功能。

(2) 设计了该电机的定子骨架材料和绕线分布、转子材料和结构等技术参数,主要解决了电机在高转速下的低噪声、小体积大功率、多级谐波抑制、散热等问题。

(3) 通过整机一体化平衡设计、硅胶连接减振、内壁喷涂吸声材料等手动,设计了能抑制噪声的搅拌头。

(4) 本项目研究、设计的大功率变频高速搅拌机具有缓起功能,最高转速达到 15000 r/min,可定时搅拌,功率可达 1000 W,数字显示转速和定时时间。通过室内、外实验和用户较长时间实际使用,证明其具有功率大、体积小、噪声低、调速范围宽、动态响应快、运行效率高、免维护、操作方便等特点,且该系列产品在中海油田服务股份有限公司、中国海洋石油渤海研究院、中石油勘探开发研究院等多家单位的实验室得到了很好的现场应用,并取得了较好的社会效益和经济效益。

参考文献:

- [1] 余永权. 89 系列 Flash 单片机原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,1997.
- [2] 邓明,魏文博,谭捍东. 海底天然大地电磁场的探测[J]. 测控技术,2003,22(1).
- [3] 张燕宾. 电动机变频调速[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [4] 佟纯厚,王占奎,韩安荣,等. 交流调速风机水泵节电技术[R]. CECE'91 50P.
- [5] 赵永成. 机电传动控制[M]. 北京:中国计量出版社,2003.
- [6] 宛如意. 大功率水泵变频调速节能的探讨[R]. CECE'96 29P.
- [7] 王占奎. 变频调速应用百例[M]. 北京:科学出版社,1999.