

直联式空压机 PWM 变占空比控制^{*}

钟美鹏^{1,2} 郑水英³ 潘晓弘¹

(1. 浙江大学现代制造工程研究所, 杭州 310027; 2. 嘉兴学院机电分院, 嘉兴 314001;
3. 浙江大学化工机械研究所, 杭州 310027)

【摘要】 研究了一种用直流无刷电动机驱动的直联式空压机, 借鉴直接转矩控制的思想, 根据直联式空压机负载的特点, 提出了一种基于单片机的脉宽调制(PWM)变占空比控制方法。根据空压机负载, 将控制周期中的每一拍设置成不同的占空比。给出了基于 Simulink 的仿真计算, 仿真结果表明, 这种控制方法简单可行, 直联式空压机转速波动较小, 且有较好的稳定性和抗干扰能力。试验结果表明, PWM 变占空比控制能达到节约成本, 提高效率, 减小转速波动的效果。

关键词: 直联式空压机 直流无刷电动机 变占空比 脉冲宽度调制

中图分类号: TH45; TM921.52

文献标识码: A

Changing Duty Ratio PWM Control of Direct-drive Air Compressor

Zhong Meipeng^{1,2} Zheng Shuiying³ Pan Xiaohong¹

(1. Institute of Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing College, Jiaxing 314001, China
3. Institute of Chemical Machinery, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

The direct-drive air compressor drove by permanent magnet brushless D. C. motor (BLDCM) was designed and manufactured. Volume and its weight of direct-drive air compressor drove by permanent magnet BLDCM are little but its efficiency is high. To improve air compressor's efficiency, BLDCM is used to drive the air compressor. The aim of this paper is to reduce the cost and enhance the efficiency of air compressor, thus based on the direct torque control method, a simple open loop control method to change duty ratio according to the resistant torque was provided. Duty ratios of control cycle beat are different because of the different air compressor load. The duty ratio increase and decrease with the change of air compressor. The system was simulated by Simulink. The simulation results show that the fluctuation of compressor's rotating speed is small using this control method, and it has robustness.

Key words Direct-drive air compressor, BLDCM, Changing duty ratio, Pulse width modulation

引言

空压机是量大面广的高能耗产品, 总耗电量极大^[1]。出于生产成本和可靠稳定的考虑^[2], 目前我国的微型空压机绝大部分采用普通的异步感应电动机

驱动^[3], 但小功率电动机通常效率低下(65%~80%), 能源浪费非常严重^[4]。直流无刷电动机由于采用永磁转子, 其效率较高, 与相同尺寸的感应式电动机相比, 能够提供高得多的连续转矩。

魏欣等将合成电压矢量的思想引入占空比控制

收稿日期: 2008-06-06 修回日期: 2008-08-04

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2005AA415280)和浙江省科研工业项目(2006C21049)

作者简介: 钟美鹏, 博士生, 嘉兴学院讲师, 主要从事机械制造研究, E-mail: zhongmeipeng@yahoo.com.cn

通讯作者: 郑水英, 教授, 主要从事化工机械研究, E-mail: zhengsy@zju.edu.cn

技术中^[5]。Schmidt Chris 等分别设计了不同的模糊控制器来确定占空比,这些方法虽然比较容易实现,但没有精确的数学模型^[4,6]。杨昭等分析了空压机变频技术的节能原理及变频空压机的性能^[7],但没有考虑空压机每周期中负载波动大的问题。

本文提出采用变占空比控制直流无刷电动机的方式。考虑到空压机阻力矩与电动机转角以及空压机排气压力都有着特定不变的关系,由单片机输出控制信号,根据空压机阻力矩曲线,设定一个周期的不同区域采用不同的占空比,以实现电动机带负载较平稳地运转。

1 直联式空压机负载力矩分析

直联式空压机运转时,活塞同时受到气体力 p 、往复惯性力 F 及往复摩擦力 R_s 的作用,这些力都是沿气缸中心线方向,它们的和就是直联式空压机列的综合活塞力 p_Σ ,综合活塞力通过活塞杆、连杆传递到曲柄销上,这个连杆力又可分解为垂直于曲柄方向的切向力和沿着曲柄方向的法向力(图 1),切向力通过偏心块形成的作用在主轴上的力矩就是负载力矩。由上述分析和图 1 可以推导出单个气缸形成的负载力矩为

$$M_T = Tr = p_\Sigma r \left(\sin\alpha + \frac{\lambda \sin 2\alpha}{2\sqrt{1-\lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) \quad (1)$$

式中 T ——作用在偏心块上的切向力
 r ——偏心块的偏心距(相当于曲柄半径)
 α ——电动机轴转角
 λ ——曲柄半径与连杆长度之比

对动式空压机的相对列活塞作相对方向的运动,2个气缸同时压缩,同时排气,因此两列气缸的负载力矩叠加公式为

$$M_T(\alpha) = M_{T1}(\alpha) + M_{T2}(\alpha) \quad (2)$$

对置式空压机的相对列活塞作同方向运动,一个气缸吸气时,另一个气缸在压缩或排气,两列气缸的负载力矩叠加形式为

$$M_T(\alpha) = M_{T1}(\alpha) + M_{T2}(\alpha + 180^\circ) \quad (3)$$

直联式空压机负载力矩的计算结果如图 2 所示。对动式空压机的高压缸和低压缸同时排气,此

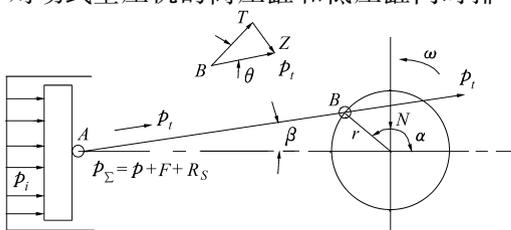


图 1 空压机作用力原理图

Fig.1 Forces principle of air compressor

时 2 个缸同时处于最大负载状态,2 个波峰叠加,因此图 2 中出现了很大的负载力矩峰值。对置式布置时,当一个气缸压缩或排气时(最大负载状态),另一个气缸处于吸气状态(最小负载状态),因此负载力矩波动相对较小。

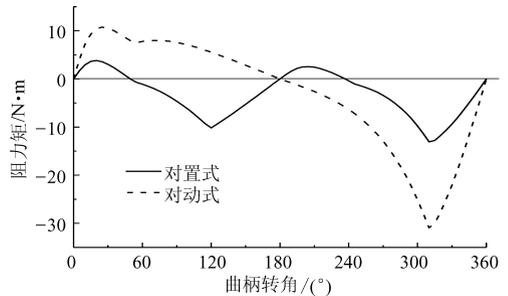


图 2 直联式空压机阻力矩

Fig.2 Resistance torque of air compressor

2 直联式空压机变占空比控制

2.1 转矩方程

电动机的电压平衡方程为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 u_a, u_b, u_c ——定子相电压
 e_a, e_b, e_c ——定子反电动势
 i_a, i_b, i_c ——定子相电流
 R_a, R_b, R_c ——定子相电阻
 L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} ——定子绕组自感
 $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$ ——定子绕组互感
 根据电压平衡方程和电动机转动角速度 ω 可以计算出电动机的输出转矩

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (5)$$

忽略电动机转动时的粘滞阻尼和直联式空压机的旋转摩擦力矩,直联式空压机转矩方程可写为

$$\frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} = p_\Sigma r \left(\sin\alpha + \frac{\lambda \sin 2\alpha}{2\sqrt{1-\lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) + J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

式中 J ——电动机转子和直联式空压机转子的转动惯量

2.2 PWM 变占空比控制

直接转矩控制是根据阻力矩的大小,通过调整电压矢量开关适时控制电磁力矩的输出,借鉴这一思想,本文提出通过控制直流无刷电动机的功率管

开关顺序实现输出力矩跟随阻力矩的变化。但在具体实现方法上,两者是不同的。直接转矩控制需要转矩观测器和滞环比较器跟踪阻力矩的大小,变换电压矢量的实质是调整功率角,进而实现对电磁力矩的控制;而变占空比控制是通过安装时确定直联式空压机连杆的起始位置与电动机磁极之间的位置关系,根据机械角度可知阻力矩大小,直联式空压机级数和电动机极对数确定后,直流无刷电动机每一拍对应的阻力矩大小就可确定,通过实验和计算在程序中给出该拍占空比的大小。其实质是根据阻力矩的需要控制每一电压矢量幅值的大小。

为了确定储气罐中的压力,单片机每隔一段时间会检测一次压力传感器的信号大小,当单片机感应到储气罐中的压力变化时,会根据所测压力通过查表确定该条件下各拍的占空比。直联式空压机处于运行状态时,如果储气罐中的压力大于设定值的上限,单片机会发出指令,停止电动机的运转。直联式空压机处于停止状态时,如果储气罐中的压力小于设定值的下限,单片机会发出指令,起动电动机,并使其在设定转速下运行。

本文采用对置直联式空压机,对于2对极的电动机和2级压缩的直联式空压机,这种方法比较合适。因为对置直联式空压机可以通过调节压力比使两级压缩的阻力曲线相似,直联式空压机的1个周期对应电动机的2个电周期,因此电动机2个电周期内的阻力矩相似,相应拍的占空比可以相同。第1、2拍的占空比最小,电动机的输出力矩也最小,第4拍和第5拍的占空比设置成最大,电动机的输出力矩也最大,这样控制的结果就可以使电动机转速的波动降到最低。当排气压力一定时,每个周期相应拍的占空比也是一定的,因此控制系统的设计非常简单,所需单片机资源少。

具体方法如下:

(1)通过活塞、连杆与电动机轴的安装,确定活塞位置与电动机转角之间的相互关系,从而可以计算出如图2所示的在某排气压力条件下直联式空压机往复一个周期的阻力矩曲线。

(2)将直联式空压机的一个周期分解为若干个区域,例如,针对2对极直流无刷电动机驱动的2级压缩直联式空压机,可以将其往复运动的一个周期分解为12个等间隔区域,如图3所示,每个区域对应三相六拍电动机的一个拍。当然,根据需要可以有多种不同的区域分隔方法,如分隔成6个区域、24个区域等。

(3)由于直联式空压机的阻力矩曲线是已知的,因此每一个区域的平均阻力矩也是确定的,根据

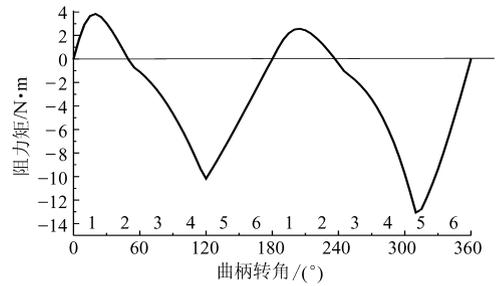


图3 变占空比控制原理示意图

Fig. 3 Principle of changing duty ratio PWM control

每一个区域对应的平均阻力矩,可以确定该区域PWM信号的占空比。对平均阻力矩较大的区域,如直联式空压机的排气阶段,PWM信号的占空比也较大,使电动机的输出转矩也随之增大,反之,在直联式空压机的吸气和膨胀过程,阻力矩较小,PWM信号的占空比就减小,电动机的输出转矩也相应减小。某一时刻的占空比计算式为

$$D = k_i \frac{p_1 D_0}{p_0} \quad (7)$$

式中 D ——此时刻占空比

p_1 ——此时刻压强 p_0 ——标定压强

k_i ——此时刻在 i 拍系数

D_0 ——标定压强时平均占空比

(4)驱动直联式空压机的直流无刷电动机采用三相六拍、上桥臂PWM调制的方法运行,逆变器由控制系统输出的信号驱动。单片机在实际控制过程中,先通过压力传感器确定当前直联式空压机的排气压力,然后确定该排气压力当前区域的PWM信号的占空比,最后将占空比合适的PWM信号以及逆变器各路的驱动信号输出到逆变器6个功率开关管的驱动脚上,从而驱动电动机运转。

3 变占空比控制仿真

该仿真模型包括直流无刷电动机、直联式空压机、IGBT功率管组成的逆变电路和6路控制信号。直流无刷电动机采用SimPowerSystem中提供的BLDCM模型,其参数为:定子电阻 $R_s = 2.875 \Omega$,定子电感 $L_s = 2.5 \times 10^{-3} \text{ H}$,磁场强度 $B = 0.275 \text{ Wb/m}^2$,转动惯量 $J = 2.5 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,摩擦系数 $\mu = 1 \times 10^{-3}$,电动机为4对极。直联式空压机的阻力矩由S-function模块Torque编程实现,直联式空压机进气压力为0.098 MPa,排气压力为2.5 MPa,转速1500 r/min。控制信号为上桥臂调制、下桥臂常开,PWM信号中不同区域的占空比变化通过S-function函数PWM-control实现。母线电压设为300 V。Simulink仿真框图如图4所示。

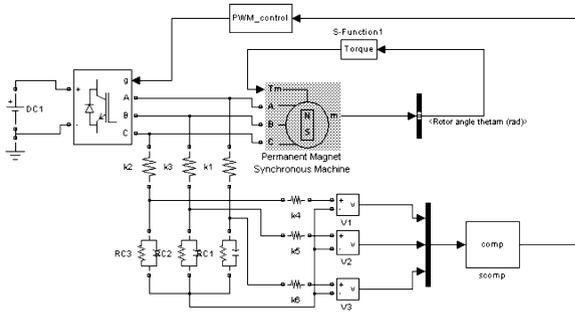


图4 Simulink 仿真框图

Fig. 4 Simulation in Simulink

为了改善直联式空压机的工作特性,采用改变占空比的控制方法,即占空比不仅仅随着转速的变化而变化,同时根据阻力矩特性在所划分的不同区域内占空比也不同。将排气阶段的占空比加大,吸气和膨胀阶段占空比相应减小,压缩阶段的占空比也适当减小。空压机背压 1.0 MPa 时仿真计算结果如图 5 的实线所示,可见变占空比控制的转速波动大大降低,而且反向输出力矩也几乎不见了,输出转矩基本上就是所需要的转矩。这样直联式空压机的运转更加平稳,无反向力矩的干扰,电动机效率也会更高。变占空比控制使所需电动机的输出功率减小,同时负力矩的显著减小大大降低了电动机的能

耗,这就为减小电动机的体积、降低成本、并提高整机的效率提供了可能。

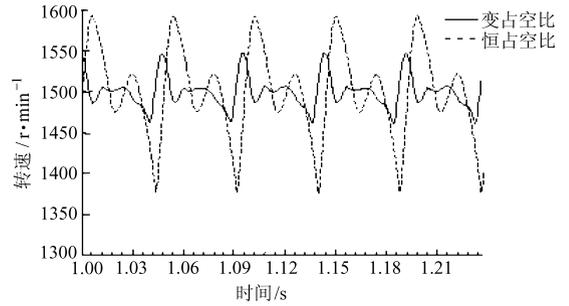


图5 直联式空压机仿真转速曲线

Fig. 5 Simulation rotate speed of compressor

4 试验与结果

试验装置如图 6 所示。为了测量转速波动,在曲柄轴的伸出端安装了一个带 60 个齿的测速盘,转动时,通过传感器获取测速盘齿产生的脉冲信号,计算脉冲与脉冲之间的时间间隔,就可以得到转子的瞬态转速。传感器选用上海卓意公司的位移传感器 VB-Z980108,量程为 2 mm。由计算机和相应的 A/D 卡实现信号的采集和处理。功率测量采用数字电参数测量仪。

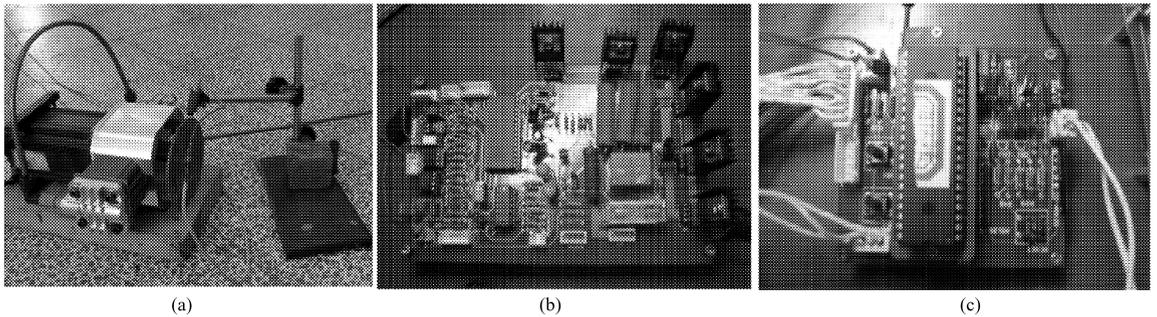


图6 试验装置

Fig. 6 Test device

(a) 无刷电动机拖动的直联式空压机 (b) 驱动电路 (c) 单片机及其外围电路

图 7 给出了直流无刷电动机驱动直联式空压机的变占空比和恒占空比两种控制在背压 1.0 MPa 下的转速波动曲线。可以看出,变占空比转速较平稳,与仿真结果相符。图 8a 是 1.0 MPa 直联式空压机背压变占空比时三相电流,图 8b 是恒占空比三相

电流,通过 0.5 Ω 电阻引出测量的电流,也就是说 1 V 代表 2 A 电流。可以看出变占空比电流幅值比恒占空比小。变占空比和恒占空比两种控制在背压 1.0 MPa 下的空压机输入功率如图 9 所示。

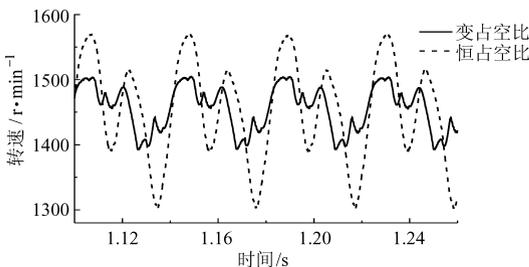


图7 空压机试验转速

Fig. 7 Experiment rotate speed of compressor

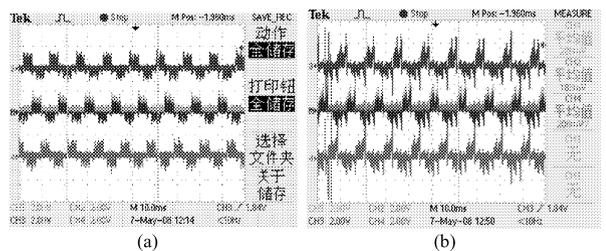


图8 空压机试验电流

Fig. 8 Experiment current of compressor

(a) 变占空比 (b) 恒占空比

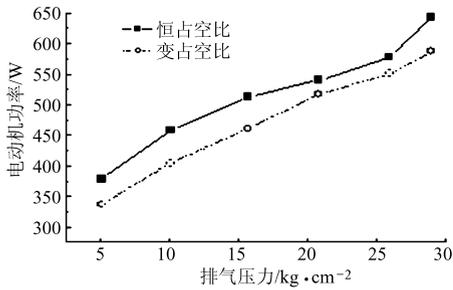


图9 直联式空压机气体压力与电动机功率关系

Fig.9 Relation between air pressure in air compressor and motor power

从图7和图9结果可以看出,变占空比的转速波动比恒占空比的波动小得多,功率消耗可以节约10%左右。从直联式空压机的运行情况来看,变占空比控制的直流无刷电动机驱动的直联式空压机运行相当平稳,噪音和振动都符合要求,放在光滑的平地上运行,不会发生移动的现象。变占空比控制的直流无刷电动机驱动直联式空压机效率高、重量轻、体积小、节能效果明显。

参 考 文 献

- 1 韩建海,则次俊郎. 小型空压机直接驱动型气动位置控制系统[J]. 机械工程学报,2003,39(6):67~69.
Han Jianhai, Noritsugu Toshiro. Pneumatic position control system directly driven by a miniature air compressor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(6):67~69. (in Chinese)
- 2 方玉莹,左言言. 空气压缩机振动的分析研究[J]. 农业机械学报,2002,33(3):95~97.
Fang Yuying, Zuo Yanyan. Vibration analysis of an air compressor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002,33(3):95~97. (in Chinese)
- 3 Lee J H, Kim J. Sound transmission through cylindrical shell of hermetic compressors[C]// Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference at Purdue, West Lafayette: Purdue University Press, 2000: 933~940.
- 4 Schmidt Chris, Kissock Kelly. Modeling and simulation of air compressor energy use[C]//2005 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry: cutting the high cost of energy, 2005,1: 131~142.
- 5 魏欣,陈大跃,赵春宇. 一种基于占空比控制技术的异步电机直接转矩控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 92~97.
Wei Xin, Chen Dayue, Zhao Chunyu. A new direct torque control strategy of induction motors based on duty ratio control technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 92~97. (in Chinese)
- 6 Arias A, Romeral J L, Aldabas E, et al. Fuzzy logic direct torque control[C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2000,1: 253~258.
- 7 杨昭,谭晶莹,李喜宏,等. 冷库压缩机变频技术节能原理与经济效益分析[J]. 压缩机技术,2005(5): 24~26.
Yang Zhao, Tan Jingying, Li Xihong, et al. Study on refrigerator's compressor with frequency conversion and its economical efficiency[J]. Compressor Technology,2005(5): 24~26. (in Chinese)