

压缩机用直线振荡电机频率跟踪控制

李伟业^{1,2}, 宫逸凡³, 徐伟³, 罗英露¹, 何明杰⁴

(1. 襄阳中车电机技术有限公司, 湖北 襄阳 441047; 2. 武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070; 3. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 4. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要:作为一种新型压缩机, 直线压缩机具有效率高、体积小、噪声和震动小的优势, 但要发挥其效率高的优点, 需对驱动频率进行控制, 以跟踪其机械谐振频率。针对该特性, 提出了一种基于二阶广义积分器(SOGI)和双相关相位检测算法的直线振荡电机频率跟踪控制算法。该控制算法与基于位移电流积平均值(ASCP)的频率跟踪控制算法相比, 具有动态响应快、变工况下运行稳定的优点, 且增强了对外界干扰的抑制效果, 提高了控制系统的稳定性。仿真和实验表明, 所提出的控制算法可以快速跟踪电机固有频率, 验证了理论的合理性和有效性。

关键词: 谐振频率跟踪; 直线压缩机; 二阶广义积分器; 相位检测算法

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24372

Frequency Tracking Control of Linear Oscillation Motor for Compressor

LI Weiye^{1,2}, GONG Yifan³, XU Wei³, LUO Yinglu¹, HE Mingjie⁴

(1. Xiangyang CRRC Motor Technology Co., Ltd., Xiangyang 441047, Hubei, China; 2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China)

Abstract: As a new type of compressor, linear compressor has the advantages of high efficiency, small volume, low noise and little vibration. However, in order to give full play to its advantages of high efficiency, it is necessary to control the driving frequency to track its mechanical resonance frequency. According to this characteristic, a frequency tracking control algorithm of linear oscillation motor based on second-order generalized integrator (SOGI) and double correlation phase detection algorithm was proposed. Compared with the frequency tracking control algorithm based on the average value of stroke-current product (ASCP), the control algorithm has the advantages of fast dynamic response and stable operation under variable working conditions, enhances the suppression effect of external interference and improves the stability of the control system. Simulation and experiments show that the proposed control algorithm can quickly track the natural frequency of the motor, which verifies the rationality and effectiveness of the theory.

Key words: resonant frequency tracking; linear compressors; second-order general integrator (SOGI); phase detection algorithm

在冰箱等制冷设备中, 85%以上的电能消耗来自压缩机, 所以, 若想研发出节能环保的制冷设备, 应从研究高效压缩机入手^[1-2]。目前主流的

旋转式压缩机采用机械传动装置, 将转子的旋转运动转变为活塞的直线往复运动, 过程中会产生能量损耗, 同时传统的旋转式压缩机还存在结构

基金项目: 四川省重点研发项目(2021YFG0081); 深圳国际合作研究项目(GJHZ20210705142539007);

深圳市自然科学基金面上项目(JCYJ20190809101205546); 湖北省重点研发计划(2021BAA017);

湖北省中央引导地方科技发展专项(2021BGE041)

作者简介: 李伟业(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为永磁电机的研究和产品开发, Email: liwy@csrzc.com

通讯作者: 宫逸凡(1999—), 男, 硕士, 主要研究方向为直线振荡电机, Email: yifangong@hust.edu.cn

复杂、振动和噪声大等问题和缺陷^[3]。

直线压缩机作为一种高效的新型压缩机,它取消了曲轴、连杆等机械传动机构,并将电机与压缩机合二为一。由于减少了中间环节的能量损耗,直线压缩机的效率比旋转式压缩机高 15%~25%,电机效率可以达到 90% 以上。同时,由于不存在运动模式的转变,直线压缩机工作时的噪声和震动也得到了很大程度的减小^[3]。

在运行过程中,直线压缩机的工作效率会随着气体负载的变化而发生变化,当电机驱动频率等于压缩机的机械谐振频率时,电机的工作效率达到最大^[4]。故为实现直线压缩机的高效运行,应实时跟踪其机械谐振频率。

对于早期的直线压缩机,在设计时采用固定频率驱动,在负载变化时不能实时跟踪其谐振频率而导致效率降低。Robert 教授首次提出针对速度、平衡位置和相位进行控制的三变量反馈控制系统。而后,Tae-Won Chun 指出直线压缩机系统工作在其机械谐振频率时效率最高。2008年,Tae-Won Chun 进一步提出了基于位移电流积平均值(average value of stroke-current product, ASCP)的相角检测方法,从而实现对电机的谐振频率跟踪控制,但该算法运算量较大且动态响应性能不佳^[5]。在前人研究的基础上,中南大学的张涛等^[6]提出了一种基于波形拟合(waveform fitting phase detection, WFPD)的相角检测方法,提高了频率跟踪控制的计算精度,然而其计算量和所需的数据存储空间相当巨大,实用性不佳。

根据上述分析,本文从现有方法的缺陷与不足出发,针对当前控制算法的运算量大、响应速度不佳的问题,通过分析其较大运算量的来源,以及动态响应时驱动频率振荡与波动出现的原因,结合直线振荡电机的工作原理,深入探究其系统特性,提出了一种基于二阶广义积分器和双相关算法的直线压缩机谐振频率跟踪算法。本控制算法延续了位移电流乘积的控制思路,在原有基础上成功地将系统驱动频率的跟踪控制与电机电流和位移的幅值变化相解耦,提高了算法控制的稳定性和动态响应的速度,同时对控制算法进行优化,有效地减少了运算量,降低了对主控芯片的要求。通过仿真和实验验证了控制系统的合理性和有效性。

1 直线振荡电机模型

1.1 工作原理

图1所示为定子永磁型动铁式横向磁通直线振荡电机^[7]的工作原理示意图。图中时刻,电枢磁场使左侧磁通减弱,右侧磁通增强,转子铁心将会向磁供能大的一侧移动,从而产生一个轴向的力。当通入交变电流时,即可产生交变的电枢磁场,使转子受到左右周期变化的轴向力,从而推动其作直线往复运动^[8-9]。

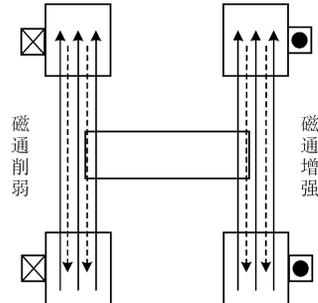


图1 直线振荡电机工作原理

Fig.1 Principle of linear oscillation motor

1.2 数学模型

图2所示为直线振荡电机等效电路图,可知其电路模型为

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

式中: i 为电机电流; u 为输入电压; R 为绕组电阻; L 为绕组电感; e 为永磁体磁链变化产生的反电动势。

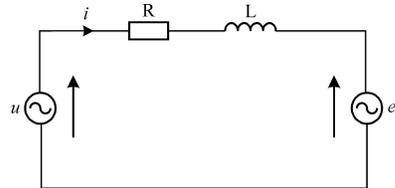


图2 直线压缩机等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of linear compressor

图3所示为直线压缩机等效机械模型。

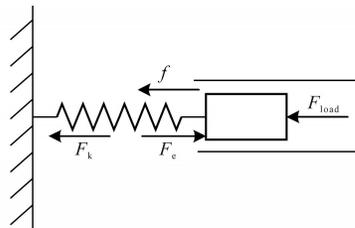


图3 直线压缩机等效机械模型

Fig.3 Equivalent mechanical model of linear compressor

根据机械模型列写直线压缩机的机械运动方程:

$$F_e = m \frac{d^2x}{dt^2} + c_m \frac{dx}{dt} + k_m x + F_{load} \quad (2)$$

式中: m 为活塞质量; x 为活塞位移; t 为运行时间; F_e 为电磁推力; c_m 为机械阻尼系数; k_m 为弹簧弹性系数; F_{load} 为气体负载力。

电机的电磁推力与电枢绕组电流成正比,定义该比例系数为推力系数 k_i ,则有:

$$F_e = k_i \cdot i \quad (3)$$

由电路方程部分的分析可得,反电势被定义为永磁体磁链关于时间的变化率,通过推导有:

$$e = \frac{d\Psi_m}{dt} = \frac{d\Psi_m}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = k_i v \quad (4)$$

式中: Ψ_m 为永磁体磁链; v 为转子的速度。

在压缩机运行中气体的负载力是在不断变化的,对负载力的线性化处理如下:

$$F_{load} = c_g \cdot \frac{dx}{dt} + k_g x \quad (5)$$

式中: c_g 为气体等效摩擦系数; k_g 为气体等效弹性系数。

由此,系统的整体动力模型可以表示为

$$F_e = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} k = k_m + k_g \\ c = c_m + c_g \end{cases}$$

式中: k 为系统等效弹性系数; c 为系统等效摩擦系数。

1.3 系统特性分析

定义 $Z_e = R_e + jX_e = R + j\omega L$ 为电路阻抗, $Z_m = R_m + jX_m = c + j(\omega m - k/\omega)$ 为系统的等效机械阻抗,电机的工作效率如下式:

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{k_i^2 c_g}{k_i^2 c + R_e (c^2 + X_m^2)} \quad (7)$$

式中: η 为电机运行效率; P_{in} 为电机输入电功率; P_{out} 为电机输出机械功率。

随驱动频率变化的参数只有 X_m ,且当压缩机的负载确定时,其余参数均为固定值,即电机在同一工作状况下的工作效率仅与驱动频率相关。当 $X_m = 0$ 时系统效率有最大值,可得此时的驱动频率 $\omega = \sqrt{k/m} = \omega_0$,即输入电压频率等于系统谐振频率时,压缩机工作效率最高。此时,位移信号与电流的关系如下:

$$\frac{X'}{I'} = \frac{k_i}{-jR_m \omega} = \frac{jk_i}{R_m \omega} \quad (8)$$

式中: X' 为位移相量; I' 为电流相量。

由式(8)可知,位移与电流的相位差为 -90° 。在空载时,电机工作效率及电流位移相位差关于驱动频率的变化关系如图4所示。

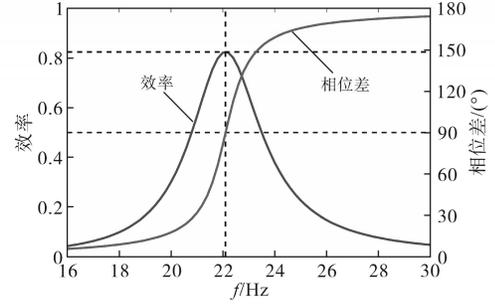


图4 系统工作特性图

Fig.4 System operating characteristics

2 谐振频率跟踪控制

从1.3节的分析可知,当系统效率最高时,电机的驱动频率等于系统的机械谐振频率,同时,电流超前位移 90° 。为了使电机保持最高工作效率,本文采用基于二阶广义积分器(SOGI)和双相关算法的谐振频率跟踪技术,使电机的驱动频率有效跟踪其机械谐振频率。

2.1 二阶广义积分正交信号发生器

图5所示为二阶广义积分器的原理图^[8],该二阶广义积分器输出两个相位差为 90° 的正交信号,其中,输出信号 v' 与输入信号相位一致,而输出正交信号 qv' 相位滞后输入信号 90° ,两输出信号幅值相同^[10]。

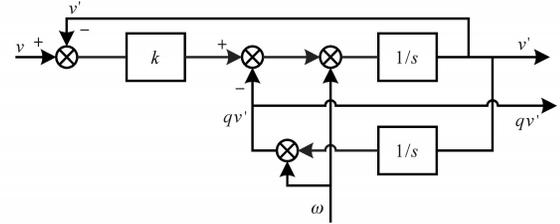


图5 二阶广义积分器

Fig.5 Second order generalized integrator

2.2 双相关相位检测算法

2.2.1 相关分析法相位测量

相关分析法原是一种模拟测相方法,设:

$$\begin{cases} x(t) = A_0 \sin(kt + \theta) \\ y(t) = B_0 \sin(kt + \theta + H) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x(t)$, $y(t)$ 分别为两个同频率的正弦信号; A_0 , B_0 分别为其幅值; θ 为 $x(t)$ 的初相位; H 为两信号之间的相位差。

可以得到 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的互相关函数估计值为

$$\begin{aligned} \hat{R}_{xy}(f) &= 1/T \int_0^T A_0 \sin(kt + \theta) B_0 \sin(kt + \theta + H) dt \\ &= A_0 B_0 / 2 \cos(H) \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知,当两同频信号进行互相关处理后,可提取二者之间的相位信息,而非同频信

号,如噪声及其它干扰信号之间是不相关的,可以通过互相关处理而消除。因此,经过互相关处理可以消除两信号中噪声干扰的影响,提取出两信号的相位差信息。

2.2.2 改进的双相关分析法相位测量

为了提高相关算法的计算精度,采用双相关算法,即输入与输出分别与参考信号 $\sin(t + \theta)$ 和 $\cos(t + \theta)$ 相关。该算法的实现需要产生两个同频、正交的参考信号,两者分别与信号 $y(t)$ 作相关函数运算:

$$\begin{cases} \hat{R}_{xy1} = \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t)y(t)dt = \frac{A_0B_0}{2} \cos(H) \\ \hat{R}_{xy2} = \frac{1}{T} \int_0^T x_2(t)y(t)dt = \frac{A_0B_0}{2} \sin(H) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\hat{R}_{xy1}, \hat{R}_{xy2}$ 分别为两个输入信号的相关函数。将 $\hat{R}_{xy1}, \hat{R}_{xy2}$ 进行除法运算,即可得到代求相位差的余切值。该算法虽然在相关计算的基础上增加了一定的计算量,但降低了采集的随机性误差,同时,最终的计算结果中并不带有两信号的幅值项,从而使计算的精度大大提高。

2.3 谐振频率跟踪控制器设计

根据 2.2 节的分析,考虑采用双相关算法进行谐振频率跟踪控制。该算法具有优越的抗干扰能力,可以减小由噪声及外界环境带来的影响。同时,该算法使最终的计算值中不含位移和电流的幅值项,避免了在工作状态改变时,位移和电流幅值变化给计算带来的不良影响,减少了变工况下驱动频率的波动。同时,控制系统采用余切作为反馈值,相比于余弦,余切波形的变化规律相反,在过零点附近斜率最小,保证了稳态工作时的稳定性,当远离谐振工作点时斜率迅速加大,从而使控制系统具有更好的动态响应。

但是,使用双相关算法最大的问题便是运算量过大,处理器要完成两个信号的定积分计算,给实验所使用的单片机芯片带来了不小的压力。

通过分析可知,双相关算法的核心在于将其中一个信号正交处理后,与另一个信号进行计算,分别得到带有相位差正弦和余弦的量。以其中一路信号为例,位移与电流信号的乘积为

$$x(t) \cdot i(t) = \frac{x_m i_m}{2} [\cos(2\omega t + \theta) + \cos\theta] \quad (12)$$

式中: x_m, i_m 分别为活塞位移、电机电流的幅值。由式(12)可知,位移电流信号的乘积由一个频率

为 2ω 的交流分量和一个直流分量组成的,而直流分量中含有算法所需的余弦信息,因此需设法去除交流分量而只留下直流分量。双相关相位检测算法通过求定积分来去除交流分量,使用低通滤波器(low-pass filter, LPF)也能获得同样的效果,同时,其运算量相比于定积分要小很多。

改进后的谐振频率跟踪控制系统的控制框图如图 6 所示,首先将电流信号 $i(t)$ 通过二阶广义积分正交信号发生器,得到相互正交的两个信号 $i'(t)$ 和 $qi'(t)$,再将其分别与位移信号 $x(t)$ 相乘后通过低通滤波器处理,得到位移电流相位差的正弦与余弦,之后将二者相除,得到相位差的余切,从而通过 PI 控制器对频率进行控制。

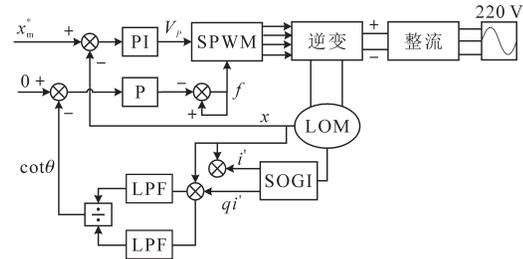


图6 频率跟踪算法控制框图

Fig.6 Control block diagram of frequency tracking algorithm

3 仿真与实验验证

3.1 仿真分析

基于上述理论分析,建立 Matlab 仿真模型,其中直线振荡电机参数为:绕组电阻 $R=18.4 \Omega$,绕组电感 $L=0.755 \text{ H}$,活塞质量 $m=1.0245 \text{ kg}$,推力系数 $k_f=28 \text{ N/A}$,等效弹性系数 $k=19750 \text{ N/m}$,等效阻尼系数 $c=9 \text{ N/(m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。

对电机变振幅工况下的工作状态进行仿真,初始状态设置为振幅频率双闭环控制,初始状态频率设置为 20 Hz ,振幅设置为 5 mm ,当 $t=2 \text{ s}$ 时将振幅提高到 7 mm ,观察系统动态响应情况。仿真结果如图 7 所示。由图 7 可见,电机启动后频率迅速上升至谐振频率,约 22.1 Hz ,同时振幅上升至给定值 5 mm 。在给定振幅改变后,系统经过较短时间回归稳态,位移和电流也很快达到预期值。

3.2 实验结果

为验证理论分析及仿真结果的正确性,采用如图 8 所示直线压缩机实验平台进行实验验证。直线压缩机由 120 W 直线振荡电机和负载气缸组成,控制部分则由驱动电路板和主控制板组成。主控芯片采用 arm 公司的 STM32F407VE。

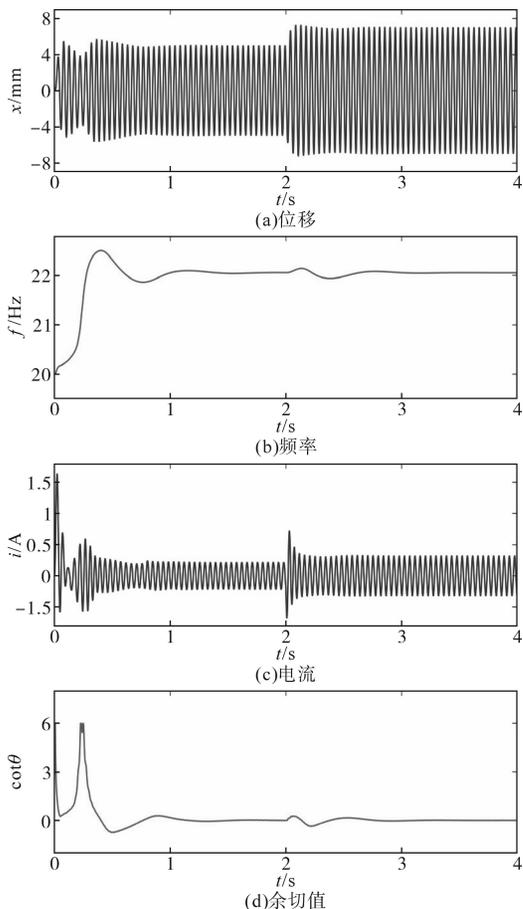


图7 变振幅工况仿真结果

Fig.7 Simulation results of variable amplitude operating conditions

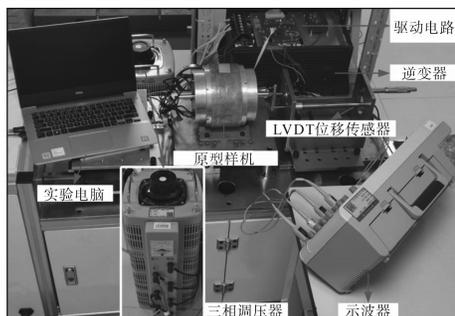


图8 直线压缩机实验平台

Fig.8 Linear compressor experimental platform

当电机工作在谐振频率点,电流和位移信号如图9所示。达到稳态后,电机电流信号超前转子位移信号约 90° ,与上述理论分析及仿真结果相吻合。

在变工况实验中,电机频率设置为20 Hz,振幅设置为5 mm,当电机工作达稳定状态后,将振幅设置升高到7 mm,观察其动态响应情况。将SOGI频率跟踪算法与ASCP频率跟踪算法控制效果进行对比,如图10所示。其中,图10a~图10c为ASCP频率跟踪控制算法的实验结果,图10d~图10f为SOGI频率跟踪控制算法的实验结果。

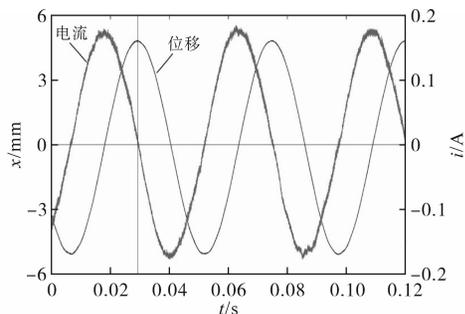


图9 $f=22.1$ Hz时电流位移实验结果

Fig.9 Experimental result of current and position at $f=22.1$ Hz

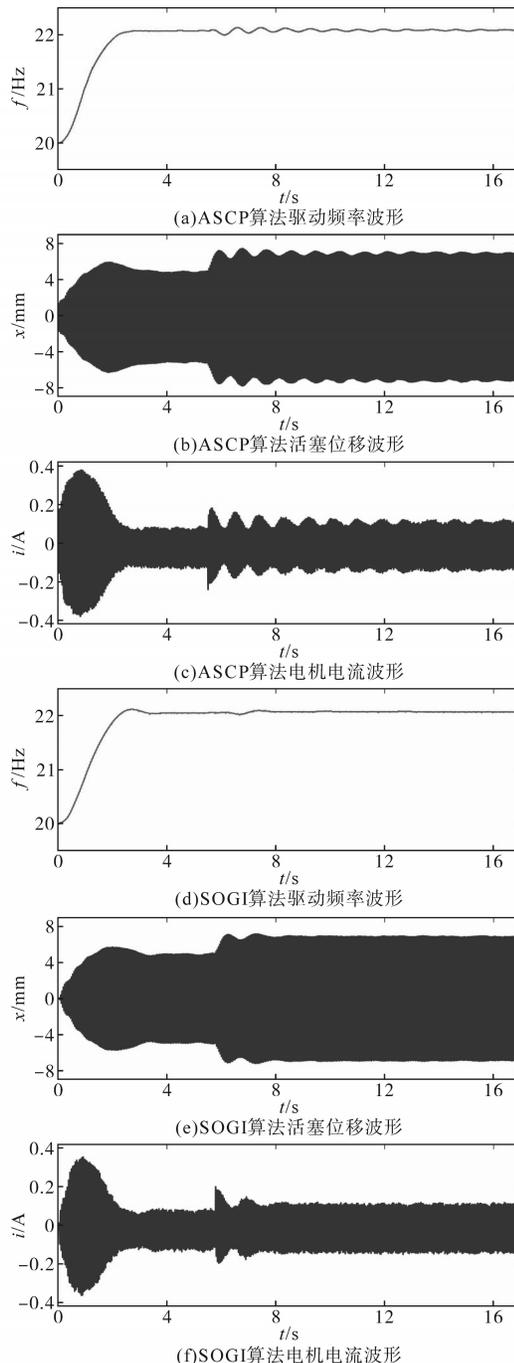


图10 变振幅工况对比实验结果

Fig.10 Comparison test results of variable amplitude operating conditions

由图 10 可知,在工况改变时,与 ASCP 频率跟踪控制算法相比, SOGI 频率跟踪算法的动态响应速度明显加快,且频率的波动得到了抑制。与此同时,在 SOGI 频率跟踪算法的控制下,电机电流和活塞位移的动态响应情况也得到了改善,没有出现 ASCP 频率跟踪控制算法中的较长时间抖动情况。随后电机进入谐振工作点,系统的工作情况非常稳定,位移和电流波形几乎没有抖动情况,与 ASCP 算法相比,各项工作参数的稳定性也有很大的提高。其动态和稳态性能均十分理想。

4 结论

本文主要针对直线压缩机系统中的动力部分——直线振荡电机进行控制方面的研究。文中对直线压缩机进行谐振频率跟踪控制,通过对传统谐振频率跟踪算法的分析,得出其运算量较大及动态性能不佳的原因,从而对算法进行改进和创新,提出了一种基于二阶广义积分器和低通滤波器的谐振频率跟踪算法。根据直线压缩机于谐振工作点处位移电流差 90° 的特性,将控制系统中的驱动频率跟踪与电机电流和活塞振幅的变化相解耦,从而有效地解决了电机启动及改变负载时频率跟踪的波动问题。与此同时,该控制算法进一步提升了系统的抗干扰能力,也大大减小了控制程序的运算量。

通过仿真和实验验证,在工作状态改变时,电机驱动频率在控制系统的作用下能够快速且准确地跟踪机械谐振频率,通过对比实验结果,验证了该算法相比于 ASCP 频率跟踪算法在动态响应及运行稳定性方面的优势。

参考文献

- [1] 马小路,王志雄,段彦敏,等. 高效电机及电机系统推广效果分析[J]. 电气传动, 2022, 52(18): 10-16.
MA Xiaolu, WANG Zhixiong, DUAN Yanmin, et al. Analysis on promotion effect of high-efficiency motor system[J]. Electric Drive, 2022, 52(18): 10-16.
- [2] 刘细平,丁卫中,袁长征,等. 空调压缩机低速无位置传感器控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(2): 3-8.
LIU Xiping, DING Weizhong, YUAN Changzheng, et al. Low speed no-position sensor control strategy for air conditioning compressor [J]. Electric Drive, 2021, 51(2): 3-8.
- [3] LI Xiang, XU Wei, YE Caiyong et al. Comparative study of transversal-flux permanent magnetic linear oscillatory machines for compressor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7437-7446.
- [4] CHUN Tae-Won, AHN Jung-Ryol, YOO Jae-Yoo et al. Analysis and control for linear compressor system driven by PWM inverter[C]//Industrial Electronics Society, IECON 2004.30th Annual Conference of IEEE, 2004: 263-267.
- [5] CHUN Tae-Won, AHN Jung-Ryol, LEE Hong-Hee et al. A novel strategy of efficiency control for a linear compressor system driven by a PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 296-301.
- [6] ZHANG Tao, YU Hua. A novel strategy of resonant frequency tracking control for linear compressor[C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney, NSW, Australia, 2017: 1-6.
- [7] 李想,徐伟,叶才勇. 新型定子永磁型动铁心式横向磁通直线振荡电机[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6209-6217.
LI Xiang, XU Wei, YE Caiyong. Novel stator-magnet moving-iron transversal-flux linear oscillatory machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6209-6217.
- [8] XU Wei, LI Xiang, ZHU Jianguo, et al. 3D modelling and testing of a stator-magnet transverse-flux linear oscillatory machine for direct compressor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8474-8486.
- [9] LI X, XU W, LIAO K, et al. Design of stator-magnet moving-iron transverse-flux linear oscillatory machine considering asymmetric saturation[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(3): 3464-3477.
- [10] 辛振,赵仁德,郭宝玲. 基于二阶广义积分器-锁频环的异步电机同步角频率估计方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 116-122.
XIN Zhen, ZHAO Rende, GUO Baoling. New induction motor synchronous angular frequency estimation method based on second order generalized integrator-frequency locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 116-122.

收稿日期:2022-05-17

修改稿日期:2022-10-17