DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.04.005

涡旋压缩机轴向平衡电磁力的自适应提前跟踪研究*

蔡炯炯,曹 阳,程楷一,祝 亮,王子辉,蒋惠忠
(浙江科技学院 自动化与电气工程学院,浙江 杭州 310023)

摘要:针对涡旋压缩机动静涡盘间轴向气体分离力的平衡需求问题,对涡旋压缩机轴向气体分离力变化规律进行了研究,提出了采用电磁线圈产生电磁力动态平衡的方案。分析了带铁芯电磁力机构动态跟踪控制时的滞后现象及其原因,在总结传统 PID 控制与传统的滞后系统控制方法基础上,研究了提前跟踪 PID 动态电磁力控制方法,给出了控制框图,分析了其稳定性,推导了时域实现方法;分析了不同参数值对控制性能的影响,根据跟踪的评价方法,给出了寻找提前跟踪步数量最优值的自适应提前跟踪 PID 算法;搭建了电磁机构和控制系统实验平台,对该控制方法进行了实验验证。研究结果表明:采用提前跟踪 PID 动态电磁力控制方法可以较好地动态跟踪目标曲线;所需的最优提前步数量随着频率的变化而变化,不同频率所需的最优提前跟踪量可由提出的自适应算法确定。

关键词:涡旋压缩机;轴向力;电磁力;提前跟踪控制
中图分类号:TH45;TP273 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-4551(2020)04-0365-06

Adaptive advance tracking of electromagnetic force for vortex machine axial balance ofscroll compressor

CAI Jiong-jiong, CAO Yang, CHENG Kai-yi, ZHU Liang, WANG Zi-hui, JIANG Hui-zhong
(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the requirement of axial gas separation force balance between dynamic and static scroll discs of scroll compressor, the variation law of axial gas separation force of scroll compressor was studied, and the scheme of dynamic force balance using electromagnetic method was put forward. The lag phenomena and corresponding causes in dynamic tracking control of electromagnetic force with iron core were analyzed. After the summarizing of traditional PID controls and the traditional control methodsfor lagging system, the dynamic electromagnetic force control method with advance tracking PID was discussed. The control block diagram was firstly given out, and then its stability was analyzed, the time domain implementation method was also deduced. The influence of different parameters on the control performance was analyzed, after which an adaptive advance tracking PID algorithm was presented to find the optimal number of tracking steps in advance. The experimental platform of electromagnetic mechanism and control system was built, and the control method was verified by experiments. The results show that the dynamic electromagnetic force control method based on the adaptive advance tracking PID algorithm can better track the target curve dynamically. The optimal number of advance steps required varies with frequency, and the optimal steps of advance tracking required for different frequencies can be determined by the proposed adaptive algorithm.

Key words: scroll compressor; axial force; electromagnetic force; advance tracking control

收稿日期:2019-08-28
基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY17E070002、LQ17E070002)
作者简介:蔡炯炯(1979-),男,浙江余姚人,博士,副教授,主要从事新型电磁机构及其控制系统方面的研究。E-mail:caijj@zust.edu.cn

0 引 言

其容积率高、精密可靠的优点,涡旋压缩机因被广泛应用于制冷、航空航天与新能源等领域[1]。但其涡盘在高速运行下,在平动方向和轴向的高精度的动态密封要求,对设计和加工带来了极大挑战,阻碍了其往高压力、大容量、长寿命和无油方向的发展。

就轴向而言,其轴向气体分离力随主轴转角和压缩机出口气体压力的变化而大幅度变化,因此,要实现高性能轴向动态密封[2],对涡旋压缩机动态的轴向气体分离力进行动态精密平衡,是轴向密封的关键技术之一。目前,涡旋压缩机轴向力的平衡方法中,有采用弹簧背压式[3]、推力轴承式、气体背压式[4-5]等,这些方案在一定程度上能实现轴向力的平衡,但也存在难以实现高频响高性能动态调节,或性价比不高的问题。对此,笔者提出一种采用电磁力动态平衡涡旋压缩机轴向气体分离力的方案,研究其动态跟踪控制方法。

涡旋压缩机的轴向气体分离力是周期性动态变化的,平衡所需的电磁力在高动态变化下其非线性特性,特别是在磁滞因素的影响下,会随着主轴转动频率的提高逐渐变得不可忽略,带来明显的滞后性。

对典型的大惯性、大滞后、非线性系统的跟踪控制,已有较多的研究成果。动态矩阵预测控制基于取测对象的阶跃响应为模型,采用反馈矫正滚动实施优化控制[6]。史密斯(Smith)预估控制,通过引入一个与被控对象并联的补偿器,对纯滞后问题进行削弱与补偿[7];通过对电磁系统迟滞特性研究,建立 Preisach 模型[8-9]、Prandtl-Ishlinskii(PI)模型[10]和 Krasnoselskii-Pokrovskii(KP)模型[11]等唯象模型,和基于磁滞原理 J-A 模型[12]等,可较好提高系统动态控制响应能力。上述控制方法或者模型,均需要对系统预先进行详细复杂分析,确定系统模型结构,并以实验数据进行参数识别。

在传统 PID 控制中,本文采用引入提前跟踪的思想,通过提前闭环跟踪对冲对象和控制环节引入的滞后量;并在提前量的确定上,提出自适应提前步数量寻找的方法,通过逐次迭代改进,找出最优的步数提前量,并且在不同频率时可以实现自行调整优化。

1 涡旋机轴向力平衡动态电磁力特征

涡旋压缩机动、静涡盘之间的内部压缩腔在工作时,会使动、静涡盘受到轴向气体力的作用,该气体力会使动、静涡盘分离,有使两者之间的轴向间隙增大的趋势,会导致制冷剂泄漏增加,降低压缩效率。

涡旋压缩机涡旋盘所受的气体轴向分离力是涡旋压缩机固有机理所致,无法消除。笔者针对目前涡旋压缩机动静涡盘间轴向力平衡或平衡方法性能上的不足,提出了一种电磁力平衡方案。

1.1 涡旋压缩机轴向力电磁平衡方案

涡旋压缩机轴向气体力电磁平衡方案示意图如图 1 所示。

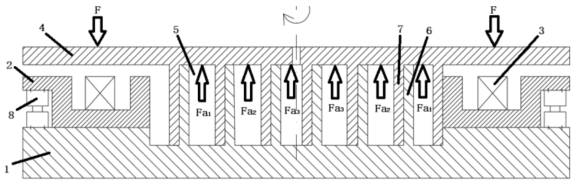


图 1 涡旋压缩机轴向气体力电磁平衡方案示意图

1 - 静涡盘底板;2 - 吸力线圈铁芯;3 - 吸力铜线圈;4 - 动涡盘上被吸铁芯;5 - 压缩腔;6 - 静涡盘涡卷;7 - 动涡盘涡卷;8 - 压力传感器

涡旋压缩机中,工质的压缩是通过动、静涡盘上的涡卷互相啮合运动来实现的。多个压缩腔同时进行不同阶段的压缩循环,压缩腔内部压力对动涡旋盘产生与角度有关的动态变化的轴向气体分离力:$F_a = F_{a1} + F_{a2} + F_{a3}$;在该分离力作用下,两个涡盘之间有分离的趋势,通过采用安装于动静涡盘上的环形电磁铁,通过高性能控制可以快速高动态平衡气体分离力,又不至于过压导致强烈摩擦,实现近零摩擦力的动态接触密封。

1.2 涡旋盘上轴向气体力跟踪目标轨迹

轴向气体分离力与涡旋盘上涡卷的结构参数和运动位置相关,各个压缩腔内压力对浮动动涡盘的推力之和即为动涡盘所受轴向气体力。由于压缩腔面积与压力随着主轴转角转动实时发生变化,轴向气体力也会随之发生变化。

一般的轴向气体力可表示为:

$$F_a(\theta) = \begin{cases} \pi p_s P^2 \left[\dfrac{A_1}{\pi p^2}(\rho_1 - 1) + \sum_{i=2}^{N} \left(2i - 1 - \dfrac{\theta}{\pi}\right)(\rho_i - 1) \right] \\ \quad 0 \leqslant \theta \leqslant \theta^* \\ \pi p_s P^2 \left[\dfrac{A_1}{\pi p^2}(\rho_1 - 1) + \sum_{i=2}^{N} \left(2i - 1 - \dfrac{\theta}{\pi}\right)(\rho_i - 1) \right] \\ \quad \theta^* \leqslant \theta \leqslant 2\pi \end{cases} \tag{1}$$

式中:p_s— 吸气口压力,MPa;P— 渐开线节距,mm;A_1— 中心压缩腔轴向气体力的作用面积,mm^2;N— 渐

开线的圈数;ρ_i— 第 i 个压缩腔的压力比;θ^* — 不同排气压力对应转角。

将模型样机参数代入公式,可以计算得到轴向气体力 F_a 随主轴转角 θ 的变化关系。此处取:$N = 3$,$p_s = 2$ MPa,$P = 12$ mm。

轴向力转角关系图如图 2 所示。

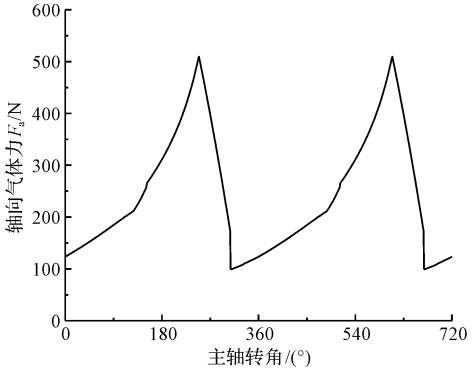


图 2　轴向力-转角关系图

由图 2 可以看出:轴向气体分离力随着主轴转角呈现周期的变化规律,该气体力在一个周期内变化较大,用恒力的弹簧平衡效果很差,采用气体背压在高速运转时动态性能极难匹配。

1.3　电磁力动态伺服跟踪的特点

使用环形电磁铁产生合适的动态电磁力轨迹,用于平衡如图 2 所示的气体分离力时,除了要设计合适的拓扑和结构尺寸外,还需要合适的控制策略,特别需要解决在动态跟踪过程中,因滞后而带来的控制难点。滞后的原因主要有以下二点:

(1)铁芯磁滞带来的滞后。

采用图 1 所示的环形电磁铁可以产生高动态性能电磁力,可用于平衡涡旋机中气体分离力。但是电磁系统中控制电流与电磁力之间存在相位上的滞后。

电流-电磁力动态关系曲线图如图 3 所示。

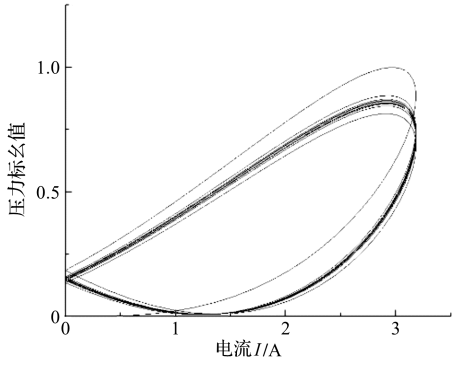


图 3　电流-电磁力动态关系曲线图

这种电磁力与励磁电流、气隙之间非线性关系,并非是遵循着简化的电磁力计算公式给出的理想模式,而是需要采用基于磁化原理的物理模型来表述,需要测定较多参数。不采用模型进行动态控制,难以对其进行有效的跟踪。

(2)离散控制系统导致的滞后。

轴向力控制系统采用力反馈控制,对于电磁压力的采样是周期采样,即该系统具有典型的离散系统特点,系统的运行轨迹总是会产生多个采样步数的滞后误差,系统会出现一个长度为 h 的时滞。针对离散系统不同的采样频率,时域上的时滞 h 在离散系统中的表达步数 N 也是不尽相同的。

基于上述原因,带铁芯电磁力动态系统具有不可忽视的滞后特征。若采用在常规闭环中引入误差微分项来解决,虽然微分项能够在误差到来之前,针对即将到来的误差发出一个提前的修正信号,但是微分存在着将高频的干扰信号同时放大的缺点;若在涡旋压缩机轴向力平衡控制器中大比重使用微分,会造成涡旋压缩机的抖动,严重影响涡旋压缩机轴向力平衡的效果。

2　动态电磁力控制方法

采用提前补偿算法提高系统快速响应性能时,通过曲线提前跟踪,对控制环节和对象本身引起的系统电压-电流、电流-力之间的滞后补偿对冲,将针对滞后进行补偿的环节转移到了闭环控制回路之外,因而,其不会对系统稳定性产生不利影响。

通过对提前动态跟踪 PID 方法时域模型进行分析,笔者研究了提前跟踪效果的评价指标,并由此提出了自适应提前步数寻优的跟踪算法。

2.1　提前跟踪 PID 方法

基于传统伺服控制系统中常规的 PID 能够实现基本的定位精度,但是由于滞后问题的存在,输入与输出之间存在延时。若在 PID 反馈控制的基础上,增加提前跟踪环节,在保证系统稳定性的前提下,可对冲控制环节和对象引起的大惯性,提高系统动态性能。

系统的控制器框图如图 4 所示。

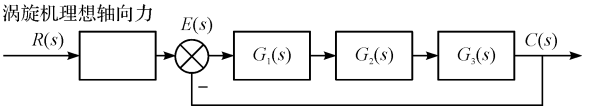


图 4　提前跟踪 PID 方法控制框图

图 4 中:在电磁铁电磁吸力动态控制中,PID 控制环节为 $G_1(s)$,驱动电路可以简化等效成惯性环节 $G_2(s)$,控制对象的电流与电磁力之间的关系等效成带延迟特性的 $G_3(s)$。

可将其与系统的控制目标 $R(s)$,反馈量 $C(s)$ 组

成一个闭环系统,并在系统输入中增加提前跟踪环节,来进行分析。

图 4 所示的闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)e^{\tau s}}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \tag{2}$$

若不加步数提前函数,则系统的闭环传递函数为:

$$H_1(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)e}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \tag{3}$$

式中:$G_1(s)$—PID 调节环节;$G_2(s)$—直流斩波电路传递函数;$G_3(s)$—电磁吸力传递函数。

比较 $H(s)$ 和 $H_1(s)$,加入了超前环节之后系统的闭环特征方程根为:

$$D(s) = 1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s) = 0 \tag{4}$$

系统的闭环特征方程没有改变,对于系统稳定性能不会有影响,即:

$$e^{\tau s} = \frac{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)}{G_1(s)G_2(s)G_3(s)} \tag{5}$$

当 $H(s) = 1$ 时,系统输出完全跟随输入信号,伺服将到达理想状态。为使系统达到期望性能,需找到系统提前跟踪时间 τ 最佳值。在嵌入式硬件执行的离散控制中,具体为找到提前跟踪步数 N 的最优值。

2.2　提前跟踪控制方法的时域实现

对离散系统进行分析设计时,以一阶的预测方法通过迭代的方式进行。在用离散系统实现如 2.1 所示的控制策略时,提前跟踪是通过对被跟踪目标的信号进行步数提前来实现的,即采用 $K + N$ 时刻的目标位置所需的力来决策 K 时刻的控制量。其中,N 的值取系统滞后的步数 τ 值与系统采样周期的比例,通过系统不断迭代优化,寻找系统能够达到最佳跟踪性能的最优解,以实现系统稳定运行。

例如,将涡旋压缩机工作时轴向力的每个周期按时间离散成 360 个点,即式(1) 中涡旋压缩机轴向力可表示为 $F_\alpha(K)$,$K = 0,1,2,3,\cdots,359$;则提前跟踪 PID 方法时域的误差的值取为:

$$e(K) = F_\alpha(K + N) - F(K) \tag{6}$$

其 PID 控制环节的输出为:

$$y(K) = K_p e(K) + K_i \sum_{j=0}^{k} e(j) + K_d[e(K) - e(K-1)] \tag{7}$$

在上述公式中,需要设置调节的参数有 PID 反馈环节 K_p,K_i,K_d 的值。K 的取值范围为 0 ~ 359,呈现周期性;系统提前步数 N 的选取需要根据实际跟踪性能来优化选取。

2.3　提前跟踪 PID 控制器最优化性能指标

涡旋压缩机轴向力电磁平衡系统中,存在一定程度的延时,常规 PID 无法消除该延时量,仅仅由系统本身决定,针对系统提前步数量 N 的选择需要一个评判标准,以完成系统提前步数的最佳值确定。

笔者采用系统最小方差的性能评价方法,在涡旋压缩机一个运算周期内,系统不断采样当前电磁吸力 $F(k)$ 大小,并且与理想平衡力 $F_a(K)$ 进行比较。

PID 超前预测平衡优化性能指标为:

$$\min Err = \frac{\sum_{i=1}^{k}(F(i) - F_a(i))^2}{k} \tag{8}$$

系统超前预测步数 N 的值在阈值中不断迭代寻优,以 $\min Err$ 值作为依据,确定系统最适合的超前预测步数 N 的值,并将该参数保存至系统内存中。当系统启动时,首先从处理器内存中寻找是否有与当前工况配合的 N 值,当 N 存在时,即可直接调用当前 N 值进行超前预测 PID 运算,从而提高系统的运算速度。

2.4　自适应提前跟踪 PID 算法流程

最佳提前量 N 自动寻找的提前跟踪 PID 算法工作流程图如图 5 所示。

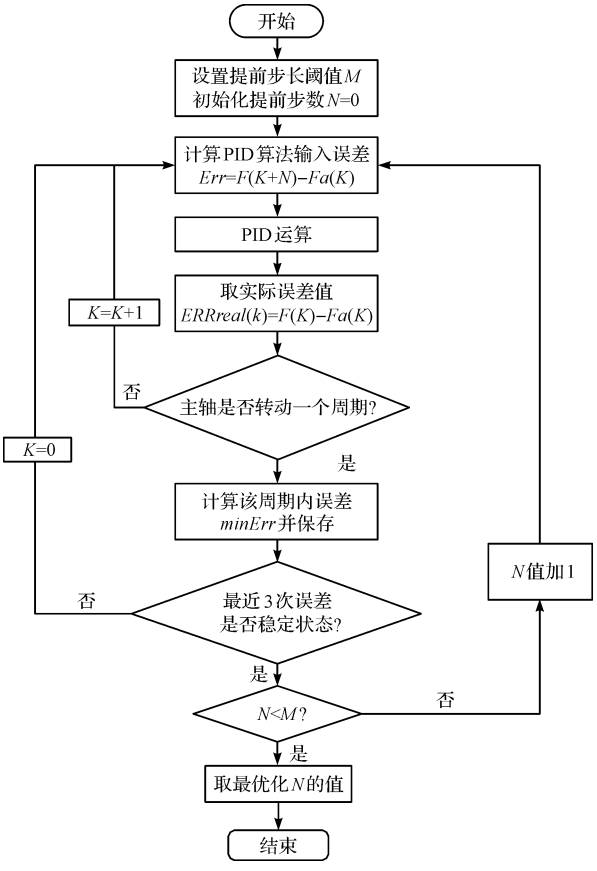


图 5　自适应提前步数量寻优算法流程图

基于前期做出相关分析工作之后,笔者确定在一定工况下系统的最大提前补偿量的阈值 M(目标压缩机最大延时时间),当系统开始运行时,系统依据当前

反馈量与理想值的误差,进行 PID 运算并保存涡旋机主轴转角一周期内的误差 minErr。

依据上述式(8) 评价系统控制效果,由最近 3 次系统误差值判断系统是否为稳定状态。当系统稳定时保存当前指标,系统提前步数 N 迭代加一;当系统迭代完成,搜索全部评价指标值,找到误差最小值,确定该值对应的 N 值为最优提前步数。

3　实验及结果分析

模拟实验平台的关键参数如表 1 所示。

表 1　模拟实验平台关键参数

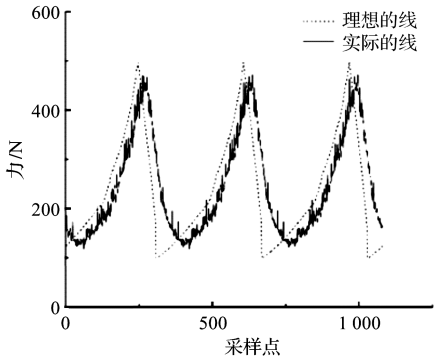
参数名称	参数
电磁线圈匝数	200
线圈电感 /mH	8
线圈电阻 /Ω	1.7
额定吸力 /N	500
工作电压 /V	80

笔者分别采用常规PID控制器与带自适应提前步数的 PID 控制器,对涡旋压缩机动静涡盘之间轴向平衡力曲线进行跟踪。

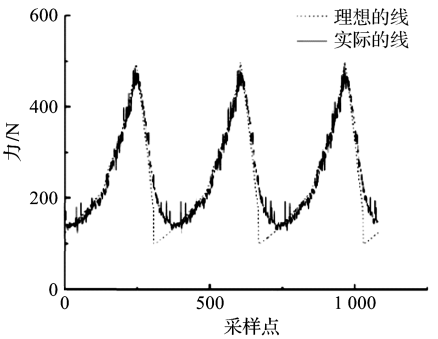
在控制系统调节过程中,采用试凑法,对 PID 参数进行整定,具体为:$K_p = 10$,$K_i = 0.01$,$K_d = 0.05$;控制的 PWM 周期 $T = 50$ μs。

3.1　动态力系统跟踪控制效果

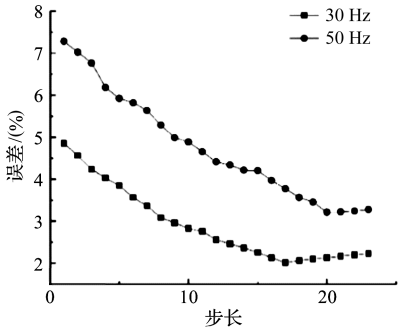
在涡旋机轴向力平衡电磁伺服控制实验中,其动态力跟踪实验效果如图 6 所示。



(a) 50 Hz常规PID跟踪曲线



(b) 50 Hz最优预测提前跟踪控制曲线



(c) 不同频率下系统步数迭代寻优曲线

图 6　动态力系统跟踪控制效果

由图 6 可知:在目标曲线频率 50 Hz 时,在常规 PID 控制时,系统存在明显的相位滞后的现象;当系统步数提前跟踪算法控制介入时,系统寻优至最佳位置;

当系统旋转频率为 50 Hz 时,控制量最优提前步数为 20,目标曲线频率不同时,所需的最优提前步数也有所改变;如当目标曲线频率为 30 Hz 时,系统最优提前步数变为 17。

除了最优提前量的差异,当频率发生变化时,系统控制误差评价占比也有所变化。

因此,采用提前跟踪控制可以有效地提高系统曲线的跟踪效果。

3.2　不同算法下系统积分误差

在实验过程中,笔者记录下每个控制周期中对应的每个角度值的压力的大小,将读回的运行数据的绝对误差积分指标 IAE(integrated absolute error)进行对比。

涡旋压缩机轴向力平衡控制算法实验结果如表 2 所示。

表 2　涡旋压缩机轴向力平衡控制算法实验结果

算法	IAE/N(f=50 Hz)	IAE/N(f=30 Hz)
常规 PID 控制算法	97.63	48.57
自适应步数提前 PID 算法	32.23	19.55

根据表 2 可知:基于使用自适应步数提前跟踪 PID 控制跟踪目标曲线,可以提高系统的跟踪运行精度,通过不断的迭代优化寻优,找到最适合系统的提前步数,最终系统的相位滞后的情况有了明显的好转,改善了依靠单纯的 PID 调节,减少了电压电流以及电流电磁力之间产生的系统相位差,提升了涡旋压缩机涡旋盘之间的轴向力平衡的性能。

4　结束语

为实现涡旋压缩机轴向动态密封,需动态平衡动

静涡盘间周期性变化的轴向气体分离力,在研究了涡旋压缩机轴向气体分离力变化规律后,笔者提出了采用电磁机构产生电磁力快响应动态平衡的方案;针对高力密度带铁芯电磁力机构动态跟踪控制时的滞后现象及其原因,提出了一种自适应提前跟踪 PID 闭环跟踪控制方法,并搭建了相应的实验系统,对所提出的控制方法进行了实验验证。

研究结果表明:

(1)采用电磁伺服机构,可快速地跟踪目标曲线,实现涡旋机轴向力的高性能动态平衡;

(2)采用提前跟踪的 PID 控制方法可以克服滞后问题,较好地跟踪周期性的动态曲线;与传统 PID 控制相比,可以提高系统的控制效果,准确性得到了显著的改善;

(3)对不同频率或者周期,采用自适应调节方法可以较好地按照相位滞后的大小,自动调节系统的提前步数。

参考文献(References):

[1] 杨启超,李连生,赵远扬,等. 涡旋压缩机轴向动态间隙的实验测量[J]. 西安交通大学学报,2008,42(7):795-798,847.

[2] 王建吉,刘 涛,孙旖彤,等. 涡旋压缩机齿顶密封条摩擦磨损性能的研究[J]. 流体机械,2018,46(4):1-5.

[3] 余 洋. 涡旋压缩机动力特性及仿真模拟研究[D]. 兰州:兰州理工大学能源动力工程学院,2014.

[4] 曹 斌. 基于分形理论的涡旋压缩机涡旋盘端面摩擦特性研究[D]. 兰州:兰州理工大学石油化工学院,2018.

[5] 刘兴旺,王 博,曾 强,等. 电动汽车涡旋压缩机变工况背压平衡系统研究[J]. 流体机械,2019,47(8):16-22.

[6] 丁宝苍. 预测控制的理论与方法[M]. 北京:机械工业,2008.

[7] 尹 超,李茂军,张 静. 变频恒压供水系统的 Smith 预估复合控制[J]. 电机与控制应用,2013,40(4)58-61.

[8] ADLY AA,MAYERGOYA I,BERGQVIST A. Preisachmodelinofmagnetostrictive hysteresis[J]. **Journal of Applied Physics**,1991,69(8):5777-5779.

[9] GE P,JOUANEH M. Generalized preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuator[J]. **Precision Engineering**,1997,20(2):99-111.

[10] Al J M, RAKHEJA S,SU Chun-yi. An analytical generalized Prandtl-Ishlinskii model inversion for hysteresiscompensation in micropositioning control [J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**,2011,16(4):734-744.

[11] 王湘江,王兴松. 基于 KP 模型的 GMA 迟滞系统辨识与补偿[J]. 中国机械工程,2008,19(10):1167-1173.

[12] JILES D, ATHERTON D. Ferromagnetic hysteresis[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 1983, 19(5): 2183-2185.

[**编辑**:方越婷]

本文引用格式:

蔡炯炯,曹 阳,程楷一,等. 涡旋压缩机轴向平衡电磁力的自适应提前跟踪研究[J]. 机电工程,2020,37(4):365 - 370.

CAI Jiong-jiong, CAO Yang, CHENG Kai-yi, et al. Adaptive advance tracking of electromagnetic force for vortex machine axial balance ofscroll compressor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(4):365 - 370.