

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.010

工业计量泵数字变频动态补偿控制研究

陈以恒,王申健,陶柳青,何德峰,余世明*

(浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310023)

摘要:针对工业计量泵在负载波动情况下的定量控制精度和驱动模块发热问题,对计量泵的工作模型和驱动电机的控制方法进行了研究,提出了一种数字变频动态补偿方法。首先采用霍尔磁钢和霍尔传感器,实时观测计量泵驱动电机的转速变化,将电机的转速波动转换为时间波动,然后对转换后的时间环路运用抗积分饱和 PI 算法调节转矩电流,再运用相同的方法在电流环路中调节电压,实现了对转速的动态补偿,最后将计量泵动态补偿前后定量控制精度和驱动电机温升的测试结果进行了对比分析。研究结果表明,该控制方法可对驱动电机实施有效的动态补偿,既能减小计量泵定量控制的相对误差,又能降低无功损耗和驱动模块发热。

关键词:计量泵;抗积分饱和 PI 算法;动态补偿

中图分类号:TH38;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0474-04

Dynamic compensation-based control of industrial metering pumps

CHEN Yi-heng, WANG Shen-jian, TAO Liu-qing, HE De-feng, YU Shi-ming

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the problems of low control accuracy and the overheated driving module under load fluctuation, a dynamic compensation method of digital frequency conversion was presented by the working model of the metering pump and the control method of the driving motor. Firstly, using the Hall magnet and the Hall sensor, the speed fluctuation of the driving motor to a metering pump observed in real time, and the motor speed fluctuation was converted into time fluctuation. Then the torque current of the changed time loop through anti-integral saturation PI algorithm was regulated, and the same method was used to regulate motor voltage in current loop in order to realize the dynamic compensation of the motor speed. Finally, control accuracy of metering pump quantitative control precision and driving motor temperature rise before and after dynamic compensation were compared and analyzed. The results indicate that the method is able to control driving motor effectively by dynamic compensation, it can not only reduce the metering pump's relative error in quantitative control, but also reduce the reactive power loss and avoid the over heat of the driving module.

Key words: metering pumps; anti-integral saturation PI algorithm; dynamic compensation

0 引言

隔膜计量泵作为流体计量和精确投加的理想设备,广泛应用于石油、化工、环保、制药、食品、造纸、水处理等行业中^[1],该计量泵通常采用三相异步电机驱动。传统流体投加多采用固定频率(通常为 50 Hz)的加压泵、节流电磁阀和减压电磁阀来实现流量自动调节,其优点是方法简单、易于实现,缺点是难以达到精确的工艺配比,严重影响产品质量,且易使驱动电机发

热造成不必要的能量消耗。为克服传统流体投加的不足,实现节能减排和精确定比投加,需要寻找新的投加方案和控制方法。

近年来,随着对计量泵投加精度的深入研究,各种基于计量泵精确调节的控制方法也得到迅速发展。文献[2]对传统隔膜计量泵低精度的原因进行分析,提出采用计量泵变频控制系统,其变频器内置 PID 控制模式可使系统更为稳定,从而提高计量精度。文献[3]提出一种新型膜驱动变频计量泵,该泵采用变频调速,通过调节电动机转速以改变柱塞冲次从而调节

收稿日期:2017-02-16

基金项目:浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)资助项目(作者未提供)

作者简介:陈以恒(1996-),男,浙江温岭人,主要从事电子、电气与自动化方面的研究。E-mail: 497367544@qq.com

通信联系人:余世明,男,教授,博士生导师。E-mail: ysm@zjut.edu.cn

流量,具有较精确的流量调节功能,但驱动膜片的变形对计量精度有一定的影响。文献[4-5]设计计量泵机电一体化控制系统,结合单片机技术和传感器技术,实现计量泵的闭环调节,有效提高计量泵的调节精度。

本研究将在分析往复式隔膜计量泵的工作原理的基础上,提出一种计量泵数字变频动态补偿方法。笔者针对蜗轮蜗杆传动系统的动力输出轴承受非线性脉动负载的特点^[6-7],运用霍尔磁钢和霍尔传感器,实时检测电机转速的波动情况,通过闭环控制时间环路调节转矩电流;再运用抗积分饱和PI算法调节电压,使电机在脉动负载下平稳运转,以降低驱动模块发热,提高流体定比投加精度;最后给出实验结果,以证实该补偿方法的合理性和有效性。

1 往复式隔膜计量泵结构和原理

1.1 计量泵的工作原理

往复式隔膜计量泵是一种机械隔膜计量泵,属于容积式泵^[8],主要由电机、传动机构(减速机)和泵头3部分组成。

其工作原理图如图1所示。

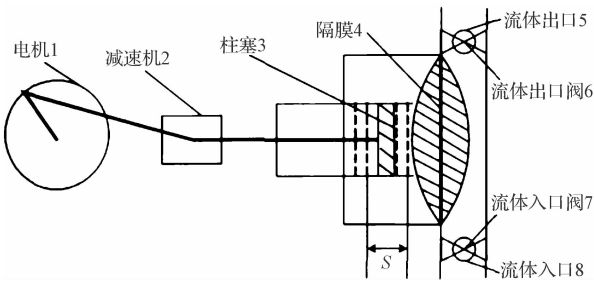


图1 往复式隔膜计量泵工作原理图

电机通过减速机的旋转运动驱动柱塞做往复运动,柱塞带动隔膜做凹凸变化,使隔膜室内的容积发生周期性变化,从而完成流体输送。

当柱塞自右向左移动时,带动隔膜向左做凹变化,使得泵缸内形成负压,流体经流体入口阀流入泵缸;当柱塞自左向右移动时,带动隔膜向右做凸变化,挤压泵缸内的流体,使其从流体出口阀排出。

1.2 计量泵工作时的负载变化

计量泵流体传送部分在一个往复行程过程中,其输出轴的负载变化较大,具有明显的非线性脉动特征。计量泵的驱动电机减速机动力输出轴在旋转一周的过程中。

图2中,带箭头的线段长度表示扭矩大小,假设动力输出轴顺时针旋转。右半部分ABC段表示吸入流体,此时扭矩较小,且基本上保持不变;左半部分CDA段表示挤压流体排出隔膜腔,从C点到D点扭矩逐渐增大,到达D点时最大;然后,再从D到A的过程中,扭矩又逐渐减小,到达A点时最小,此时隔膜腔内的流体全部排出。从A点开始,又将流体吸入隔膜腔

内,再重复上述过程。
负载变化情况示意图如图2所示。

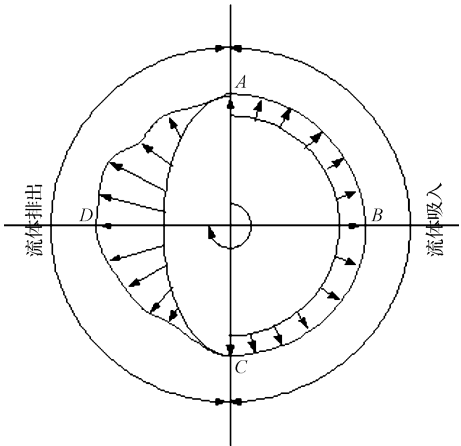


图2 电动机减速机动力输出轴旋转一周过程中负载变化情况示意图

2 动态补偿控制

2.1 电机转速波动与时间波动转换

传统的电机转速的矢量控制方法,需先对转速进行测量。本研究采用无传感器磁场定向控制技术^[9],通过检测相电流的值估计反电动势,进而计算出电机的转速 n ,但在转速较低的情况下,反电动势为零,此时无法估算转速。除此之外,采用无传感器磁场定向控制技术估算转速时需要进行二次滤波,这将导致所求得的转速是平均转速而不是瞬时转速,因此无法反映转速在负载波动时的变化情况,这为直接的转速控制方法带来困难。为解决这一问题,本研究将控制量进行转换,将转速波动转换为时间波动,在时间环路上进行闭环控制,进一步实现对电机转速进行补偿。

考虑文献[10]中霍尔传感器的测速原理,本研究通过在电机转子轴上均匀安装若干个磁钢,用霍尔传感器实时观测转速。

假设在三相异步电机转子轴上均匀安装 M 个永久磁钢,如图3所示。

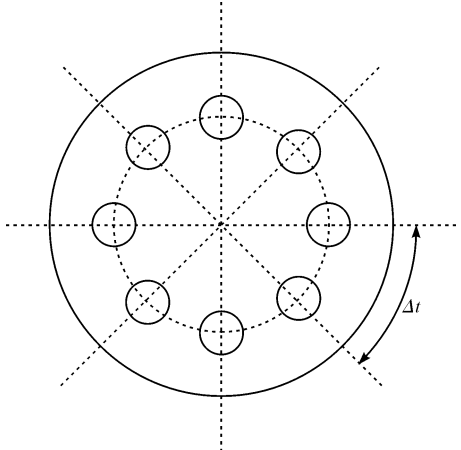


图3 电机转子轴上磁钢安装示意图

设电机蜗轮蜗杆减速器的传动比为 r , 隔膜腔容积的最大变化量为 $\Delta V(L)$, 电机转速为 $n(r/min)$, 则 1 min 的流量体积为:

$$Q = \frac{60n}{r} \Delta V \quad (1)$$

电机以转速 $n(r/min)$ 旋转时, 电机转过相邻两磁钢距离的时间间隔为:

$$\Delta t = \frac{60r}{nM} \quad (2)$$

由式(2)可知, 当电机的工作模型和工作条件确定后, 时间间隔 Δt 由 n 决定。当负载增加时, 转速 n 减小, 使得 Δt 变大, 反之, Δt 变小。

根据上述分析, Δt 的变化间接反应了负载的变化, 因此可在时间环路上对电机进行控制, 通过调节转矩电流进而调节电压, 实现对电机转速进行补偿。

2.2 动态补偿控制器设计

在无传感器磁场定向控制的速度环中, 设期望的流量值为 Q_{ref} , 由式(1) 计算出参考转速 n_{ref} , 再由式(2) 可计算出参考时间 Δt_{ref} , 当负载出现波动时, Δt_{ref} 与 Δt 的差值不为零。令 $e_t = \Delta t_{ref} - \Delta t$, e_t 作为时间环路 PI 调节器的输入, 转矩电流 I_q 作为输出。

在电流环路中, 电流偏差 $e_i = I_{ref} - I$ 作为输入, 转

矩电压作为该环路的输出, 输出电压经反 Park 变换可控制 PWM 波的占空比, 进而实现对电机转速的控制。

当电机在启动、停止或大幅度增减设定值时, 短时间内系统输出很大的偏差, 这会使 PI 运算的积分积累很大, 从而引起强烈的积分饱和效益, 这会造成系统振荡、调节时间延长等不利结果。为解决这一问题, 本研究在控制回路中设计的 PI 调节器中均采用抗积分饱和 PI 算法。当 PI 控制器的输出不饱和时, PI 控制器采用普通的积分算法。当 PI 控制器输出饱和时, 通过把积分输出负反馈到其输入, 使积分输出迅速收敛到零^[11]。

设控制器的无限输出为 U , 有限输出为 Out , 有限输出的上、下限分别为 Out_{max} 和 Out_{min} , 当前时刻输入控制器的偏差为 e_k , 限制累积积分为 R_k , R_k 的初始值为 0, 抗积分饱和 PI 算法如下:

$$\begin{cases} U = R_{k-1} + K_p e_k \\ Out = \begin{cases} Out_{max} & U \geq Out_{max} \\ Out_{min} & U \leq Out_{min} \\ U & \end{cases} \\ R_k = R_{k-1} + K_i e_k + K_C (Out - U) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K_i = K_p T / T_i$, 积分饱和修正系数 $K_C = K_i / K_p = T / T_i$ 。

实际系统的矢量控制流程图如图 4 所示。

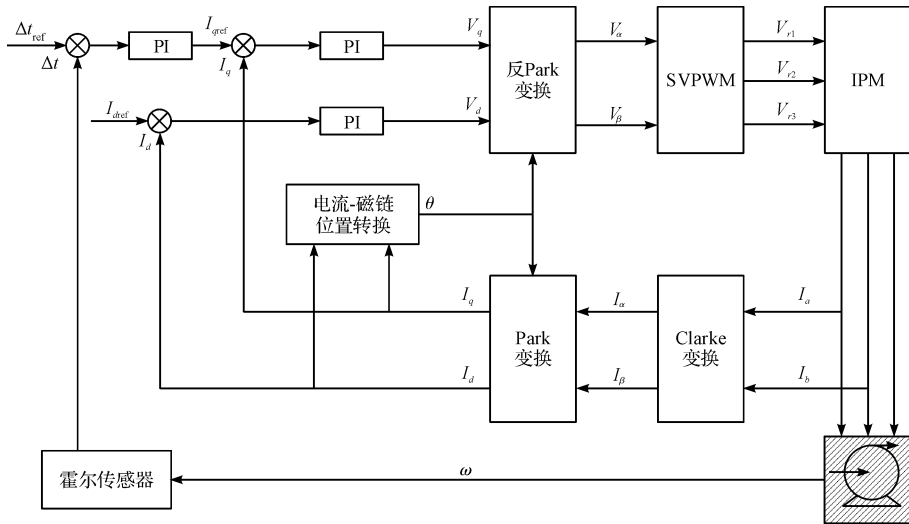


图 4 动态补偿闭环控制流程图

3 实验及结果分析

为验证本研究提出的补偿方法的正确性和有效性, 笔者将所设计的控制方法用 C 语言编写程序, 写入控制器芯片。在此基础上, 笔者结合项目组已有的研究成果, 采用电机专用 DSP 芯片, 开发了工业计量泵专用多功能数字变频控制器, 具有连续、定量、周期、信号、测试、标定、自调、关联等多种工作模式。

在计量泵定量工作前, 需对其进行标定。标定的工作原理为: 控制器设定电机固定旋转 N 圈, 由于计量泵上安装有 M 个霍尔磁钢, 完成一次标定操作产生

的脉冲个数 $n = M \cdot N$, 用量杯测量所流出的流体体积, 假设为 $L(mL)$, 将该值输入控制器并保存到 EEPROM 中。计量泵定量投加时, 只需将期望的流量值通过按键输入, 控制器根据标定值 L , 通过内置算法自动计算出所需转动的圈数, 并驱动电机按计算圈数运行, 完成一次定量投加工作。

本实验中, 标定值测量结果为 462 ml, 期望流量值设定为 2 000 ml。实验条件: 常温、常压, 电机功率。分别在 20 Hz、40 Hz、60 Hz 3 种不同的工作频率下进行定量测试。

将控制器与计量泵连接后, 搭建的实验装置如图

5 所示。



图5 计量泵多功能数字变频控制实验装置

加入动态补偿技术前后的实验数据如表1所示。

表1 动态补偿前后流量定量值的对比

测量 序号	电机工作 频率/Hz	补偿前流量 定量值/ml	补偿前定量 误差/(%)	补偿后流量 定量值/ml	补偿后定量 误差/(%)
1	20	2 035	1.75	1 980	-1
2	20	2 030	1.5	1 980	-1
3	20	2 015	0.75	1 990	-0.5
4	40	2 060	3	2 010	0.5
5	40	2 065	3.25	2 010	0.5
6	40	2 070	3.5	2 010	0.5
7	60	2 045	2.25	1 990	-0.5
8	60	2 070	3.5	1 990	-0.5
9	60	2 030	1.5	1 995	-0.25

当计量泵接有负载时,低频工况会引起电机发热,该实验在驱动电机工作频率为15 Hz,出口压力为0.3 MPa的工况下对电机的温升进行测试,温度测量仪器使用以热敏电阻为感温元件的温度计,在电机运行时间分别为1 h、2 h、3 h时对电机温升进行测量,测试实验结果如表2所示。

表2 动态补偿前后电机温升的对比

电机运行时长/h	补偿前电机温升/℃	补偿后电机温升/℃
1	53	46
2	62	51
3	65	53

通过上述实验数据,可知本研究提出的动态补偿方法能有效减少计量泵的定量流量误差,提高了其流

量计量精度。当电机长时间运行时,发热状况得到改善,有助于提高计量泵在复杂环境下运行的稳定性。

4 结束语

本研究提出一种计量泵数字变频动态补偿方法,针对蜗轮蜗杆传动系统的动力输出轴承受非线性脉动负载的特点,采用廉价的霍尔磁钢和霍尔传感器观测转速,克服无传感器磁场定向控制技术在低转速时无法估计转速的局限性,并将传统的转速环变成反映电机瞬时波动的时间环。

本研究通过在多个环路中运用抗积分饱和PI算法实现了对冲击负载引起的电机转速波动进行补偿,保证了电机的平稳运转,从而减轻了对机械传动系统的冲击破坏,降低了无功损耗和驱动模块发热,有效提高了其流体定比投加精度。

参考文献(References):

[1] YU Shi-ming, WU Jiang-jiang, ZHANG Duan. Robust non-fragile PID controller design for the stroke regulation of metering pumps[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011,19(1):83-88.

[2] 张悦. 高精度隔膜计量泵的研制[J]. 水泵技术,2012(2):8-11.

[3] 侯磊,李德俭,王克华,等. 新型膜驱动变频计量泵的研制[J]. 石油机械,1999(6):36-37.

[4] 狄海廷,邵俊鹏,郑文斌. 计量泵机电一体化控制系统设计[J]. 哈尔滨理工大学学报,2005,10(5):37-39.

[5] 瞿军,李科杰. 基于单片机的计量泵流量控制系统的研制[J]. 仪表技术与传感器,2004(7):25-28.

[6] 路芳,周知进,吴健兴. 基于AMESM的自带步进电机的轴向变量柱塞泵的结构设计及其流量控制研究[J]. 液压气动与密封,2015(7):8-10.

[7] 何胜君. 计量泵及影响其计量因素的分析[J]. 合成技术及应用,1994,9(1):52-55.

[8] 张刚. 隔膜计量泵不稳定运行的处理[J]. 设备管理与维修,2002(8):20.

[9] 王晓燕,李庆玲,蒋金星. 基于扩展反电动势的PMSM无传感器磁场定向控制技术[J]. 电机技术,2011(5):23-28.

[10] 郭清,王元昔. 霍尔传感器在直流电机转速测量中的应用研究[J]. 传感器与微系统,2011,30(7):54-56.

[11] 杨立永,陈智刚,李正熙,等. 新型抗饱和PI控制器及其在异步电动机调速系统中的应用[J]. 电气传动,2009,39(5):20-23.

[编辑:李辉]

本文引用格式: