



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104251201 A

(43) 申请公布日 2014. 12. 31

(21) 申请号 201310265564. 3

(22) 申请日 2013. 06. 28

(71) 申请人 伊顿公司

地址 美国俄亥俄州

(72) 发明人 陈亦伦 程小猛

(74) 专利代理机构 北京市中咨律师事务所

11247

代理人 张亚非 杨晓光

(51) Int. Cl.

F04B 49/06 (2006. 01)

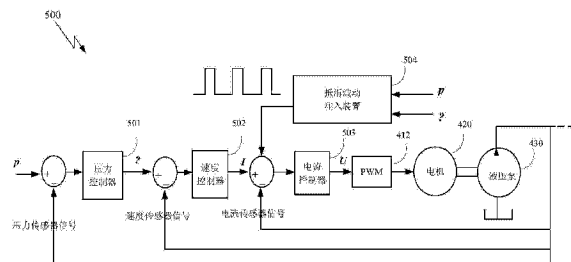
权利要求书2页 说明书7页 附图7页

(54) 发明名称

基于变频器的泵的控制系统和方法以及泵系统

(57) 摘要

本发明公开了一种基于变频器的泵的控制系统及相应的控制方法,该控制系统通过变频器控制电机,该电机驱动泵,该控制系统包括:抵消波动注入模块,其向控制路径注入抵消波动信号,该抵消波动信号使得泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。本发明还公开了一种泵系统,包括:变频器;电机;以及泵,其中,所述变频器包括本发明的上述控制系统。



1. 一种基于变频器的液压泵的控制系统,该控制系统通过变频器控制电机,该电机驱动泵,该控制系统包括:

抵消波动注入模块,其向控制路径注入抵消波动信号,该抵消波动信号使得泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。

2. 根据权利要求1的控制系统,还包括电流控制器,该电流控制器接收第二控制信号和来自电机输入端的电流传感器的电流反馈信号的组合,并向电机提供第一控制信号。

3. 根据权利要求2的控制系统,其中,所述抵消波动注入模块将所述抵消波动信号与所述第二控制信号和电流反馈信号相组合,以提供给所述电流控制器。

4. 根据权利要求2的控制系统,还包括速度控制器,该速度控制器接收第三控制信号和来自电机输出端的速度传感器的速度反馈信号的组合,并直接或间接向电流控制器提供所述第二控制信号,其中,

所述抵消波动注入模块将所述抵消波动信号与所述第三控制信号和速度反馈信号相组合,以提供给所述速度控制器。

5. 根据权利要求2-4中任何一个的控制系统,还包括压力控制器,该压力控制器接收第四控制信号以及来自泵输出端的压力传感器的压力反馈信号的组合,并直接或间接向电流控制器提供所述第二控制信号。

6. 根据权利要求1的控制系统,其中,所述抵消波动信号为电机轴的转角的周期函数。

7. 根据权利要求6的控制系统,其中,所述周期函数的参数是根据泵输出端的压力测量值和电机输出端的转速测量值自适应地确定的。

8. 根据权利要求7的控制系统,其中,所述周期函数的参数是通过查找表确定的,该查找表将所述压力测量值与转速测量值的多个组合映射到相应的所述周期函数的参数。

9. 根据权利要求7的控制系统,其中,所述周期函数的参数是使用在线自适应算法确定的,在该在线自适应算法中,针对压力测量值与转速测量值的多个组合中的每个组合,自适应地调整所述周期函数的参数,直至泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。

10. 根据权利要求6-9中任何一个的控制系统,其中,所述泵为柱塞泵,且所述抵消波动信号表示为:

$$f(\theta) = A_0 \cos(2N\theta + \theta_0),$$

其中,  $\theta$  为电机轴的转角,  $N$  为柱塞数,  $A_0$  和  $\theta_0$  为待确定的参数。

11. 一种基于变频器的泵的控制方法,该控制方法通过变频器控制电机,该电机驱动泵,该控制方法包括:

向控制路径注入抵消波动信号,该抵消波动信号使得泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。

12. 根据权利要求11的控制方法,其中,所述控制路径中包括电流控制器,该电流控制器接收第二控制信号和来自电机输入端的电流传感器的电流反馈信号的组合,并向电机提供第一控制信号。

13. 根据权利要求12的控制方法,其中,所述抵消波动信号与所述第二控制信号和电流反馈信号相组合,以被提供给所述电流控制器。

14. 根据权利要求12的控制方法,其中,所述控制路径中还包括速度控制器,该速度控制器接收第三控制信号和来自电机输出端的速度传感器的速度反馈信号的组合,并直接或

间接向电流控制器提供所述第二控制信号,其中,

所述抵消波动信号与所述第三控制信号和速度反馈信号相组合,以被提供给所述速度控制器。

15. 根据权利要求 12-14 中任何一个的控制方法,其中所述控制路径中还包括压力控制器,该压力控制器接收第四控制信号和来自泵输出端的压力传感器的压力反馈信号的组合,并直接或间接向电流控制器提供所述第二控制信号。

16. 根据权利要求 11 的控制方法,其中,所述抵消波动信号为电机轴的转角的周期函数。

17. 根据权利要求 16 的控制方法,其中,所述周期函数的参数是根据泵输出端的压力测量值和电机输出端的转速测量值自适应地确定的。

18. 根据权利要求 17 的控制方法,其中,所述周期函数的参数是通过查找表确定的,该查找表将所述压力测量值与转速测量值的多个组合映射到相应的所述周期函数的参数。

19. 根据权利要求 18 的控制方法,还包括:以离线测试方法建立所述查找表,在所述离线测试方法中,针对压力测量值与转速测量值的多个组合中的每个组合,调整所述周期函数的参数,直至泵输出中的压力波动至少部分地抵消,从而获得对应于压力测量值与转速测量值的多个组合中的每个组合的所述周期函数的参数。

20. 根据权利要求 17 的控制方法,其中,所述周期函数的参数是使用在线自适应算法确定的,在该在线自适应算法中,针对压力测量值与转速测量值的多个组合中的每个组合,自适应地调整所述周期函数的参数,直至泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。

21. 根据权利要求 16-20 中任何一个的控制方法,其中,所述泵为柱塞泵,且所述抵消波动信号表示为:

$$f(\theta) = A_0 \cos(2N\theta + \theta_0),$$

其中,  $\theta$  为电机轴的转角,  $N$  为柱塞数,  $A_0$  和  $\theta_0$  为待确定的参数。

22. 一种泵系统,包括:

变频器;

电机;以及

泵,

其中,所述变频器包括根据权利要求 1-10 中任何一个的控制系统。

## 基于变频器的泵的控制系统和方法以及泵系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及泵,具体涉及一种基于变频器(VFD)的泵的控制系统和方法以及泵系统。

### 背景技术

[0002] 由液压泵产生的流速波动或压力波动(脉动)是液压系统中的系统振动和噪声的来源。压力波动也是对运动控制的扰动,其影响到运动的精度和可重复性。

[0003] 图1示意性地示出了不同类型的液压泵的结构及流速波动模式。如图所示,对于外齿轮泵、轴向柱塞泵和叶轮泵来说,尽管所要求的流速是恒定的,但实际流速却是随着泵的转动而波动的。这是由于泵的机械结构造成的。

[0004] 噪声影响到人类的听觉健康;振动降低了整个系统的可靠性;且降低的精度直接影响到液压机械生产的产品质量。从各方面来看,压力波动减少了向客户提供的价值。因此,减少压力波动已成为学术界和工业界试图解决的核心问题之一。

[0005] 目前用于减少流速和压力波动的大多数方法基于新颖的机械设计或者额外的诸如消声器或蓄能器等波动补偿器。这些方法通常不得不在成本、能量效率和系统动态响应之间进行权衡。例如,修改阀板设计的方法降低了能量效率;增加预压缩室增加了制造和部件成本,且降低了效率;在泵出口处增加蓄能器或消声器增加了部件成本和空间,降低了泵的动态性能。

[0006] 可见,本领域中需要一种能够更有效和低成本地降低泵的噪声和振动的解决方案。

### 发明内容

[0007] 在本发明的一个方面,提供了一种基于变频器的泵的控制系统,该控制系统通过变频器控制电机,该电机驱动泵,该控制系统包括:抵消波动注入模块,其向控制路径注入抵消波动信号,该抵消波动信号使得泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。

[0008] 在本发明的另一个方面,提供了一种基于变频器的泵的控制方法,该控制方法通过变频器控制电机,该电机驱动泵,该控制方法包括:向控制路径注入抵消波动信号,该抵消波动信号使得泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。

[0009] 在本发明的又一个方面,提供了一种泵系统,包括:变频器;电机;以及泵,其中,所述变频器包括本发明的上述控制系统。

[0010] 本发明的优点包括以下各项中的至少一项:有效地降低泵系统的噪声和振动,增加了系统的控制精度、稳定性、可重复性和工作寿命,提升了客户价值;是一种低成本的解决方案;不会损害系统的动态性能;不需要附加的部件和额外的空间。

### 附图说明

[0011] 图1示意性地示出了不同类型的液压泵的结构及流速波动模式;

- [0012] 图 2 示意性地示出了本发明的基本思想；  
 [0013] 图 3 示意性地示出了由柱塞泵产生流速波动的原理；  
 [0014] 图 4 示出了根据本发明的实施例的液压泵系统的示意图；  
 [0015] 图 5 示出了根据本发明的一个实施例的控制系统的示意图；  
 [0016] 图 6 示出了根据本发明的另一个实施例的控制系统的示意图；以及  
 [0017] 图 7 示出了在测试演示液压泵系统中来自压力传感器的测量数据的图示。

### 具体实施方式

[0018] 下面参照附图描述本发明的实施例。在下面的描述中，阐述了许多具体细节以便使所属技术领域的技术人员更全面地了解和实现本发明。但是，对所属技术领域的技术人员明显的是，本发明的实现可不具有这些具体细节中的一些。此外，应当理解的是，本发明并不局限于所介绍的特定实施例。相反，可以考虑用下面所述的特征和要素的任意组合来实施本发明，而无论它们是否涉及不同的实施例。因此，下面的方面、特征、实施例和优点仅作参考之用，而不应看作是权利要求的要素或限定，除非在权利要求中明确提出。

[0019] 考虑到目前越来越多的液压泵使用变频器来驱动，以实现灵活的速度或转矩控制，本发明提出了一种通过应用于变频器的控制方案来减轻液压泵的噪声和振动的解决方案，其不需要额外的硬件成本。图 2 示意性地示出了本发明的基本思想。如图所示，液压泵系统接收恒定转速信号，但产生了带有波动的液体流速。本发明的解决方案通过向液压泵的控制系统注入抵消波动信号，从而使液压泵输出的流速中的波动被显著抵消。

[0020] 图 3 示意性地示出了由柱塞泵产生流速波动的原理。如图所示，当柱塞泵以恒定速度转动时，其产生的瞬时流速并不是恒定的，而是具有显著变化。这是由柱塞泵的配流盘结构的机械特性造成的。如图所示，当柱塞通过配流盘上的阻尼槽时，将产生显著的回流，从而造成流速波动。这种流速波动转而产生压力波动，并沿整个液压路径传播。流速波动是更为基础的，但不易被传感器捕获。相反，压力传感器很常见，容易获得且容易安装。

[0021] 液压泵出口处的瞬时流速可由下式表示：



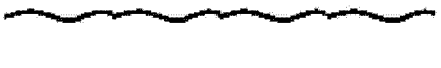





$$[0022] \begin{cases} q_{\text{total}} = q_a + q_k + q_b \\ q_a + q_k \propto \omega \\ q_b \propto A \sqrt{p_H + p_L} \end{cases}$$

[0023] 其中， $q_{\text{total}}$  表示总流速， $q_a$  表示平均流速， $q_k$  表示动态流速变化， $q_b$  表示由回流产生的流速波动， $\omega$  表示泵的转速（即电机的转速）， $A$  表示柱塞缸的等效横截面积， $p_H$  表示发生回流时的高压， $p_L$  表示发生回流时的低压。

[0024] 由  $q_k$  表示的动态流速变化是由于柱塞在柱塞缸中的非线性运动引起的流速波动，如由图中示出的，该波动的幅度较小，因此  $q_a$  与  $q_k$  之和可近似为与泵的转速成正比的恒定值。而由  $q_b$  表示的由回流产生的流速波动的幅度较大，是柱塞泵中的主要噪声和振动源，其主要依赖于泵中液体的压力特性，具体地与发生回流时高低压之间的压力差成正比。针对柱塞泵的本发明的基本思想可简单概括为：当回流发生时，增加电机的转速。下表示意性

地示出了这一点。

[0025]

	当电机转速信号恒定时	应用了本发明控制方法后
$\omega$		
$q_a+q_k$		
$q_b$		
$q_{total}$		

[0026] 如该表所示,在电机转速信号恒定时, $q_a$ 与 $q_k$ 之和也基本恒定,而 $q_b$ 的波动幅度较大,从而使 $q_{total}$ 的波动幅度也较大。在使用本发明的方法注入抵消波动信号后,电机转速信号中将出现幅度大致相同且方向相反的波动,从而使 $q_a$ 与 $q_k$ 之和中也出现这样的波动,这样当 $q_a$ 与 $q_k$ 之和与 $q_b$ 迭加时两者中的波动将相互抵消,从而使得 $q_{total}$ 的波动幅度显著减小。

[0027] 现参照图4,其示出了根据本发明的实施例的液压泵系统400的示意图。如图所示,该液压泵系统400包括:电机控制器410,电机420,以及液压泵430,其中电机控制器410控制电机420的运转,而电机420驱动液压泵430。

[0028] 所述液压泵430为应用任何场合的任何一种适当的液压泵,如柱塞泵、外齿轮泵、叶轮泵等。所述电机420为适合于由变频器驱动的任何一种适当的电机,如交流伺服电机。所述电机控制器410也可称为电机驱动器,且在本发明的实施例中,为变频器。如图所示且如本领域的技术人员所知的,变频器包括数字信号处理(DSP)控制器411和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)驱动电路412。DSP控制器411根据用户输入的转速、压力等指令产生脉宽调制(PWM)信号,所述PWM信号控制IGBT驱动电路412中各晶体管的通断,从而以适当的电流和/或电压驱动电机旋转。

[0029] 根据本发明的实施例的控制系统位于DSP控制器411中,且由DSP控制器411中的软件代码来实现。当然,也可以考虑所述软件代码已被固化在DSP控制器硬件中,这样该控制系统将由硬件来实现。

[0030] 现参照图5,其示出了根据本发明的一个实施例的控制系统500的示意图。如图所示,该控制系统500包括压力控制器501、速度控制器502、电流控制器503、以及抵消波动注入模块504。

[0031] 压力控制器501接收第四控制信号(例如,来自于用户设定的液压泵出口处的目标压力值)以及来自液压泵出口处的压力传感器的压力反馈信号这两者的组合作为输入,并输出第三控制信号。所述压力控制器501可以为任何一种适当的现有的(或新开发的)压力控制器,例如PID(比例积分微分)控制器等。

[0032] 速度控制器502接收压力控制器501所输出的第三控制信号以及来自电机输出端的速度传感器的速度反馈信号这两者的组合作为输入,并输出第二控制信号。所述速度控制器502可以为任何一种适当的现有的(或新开发的)速度控制器,例如PI(比例积分)控制器等。

[0033] 电流控制器 503 接收速度控制器 502 输出的第二控制信号、来自电机输入端的电流传感器的电流反馈信号、以及来自抵消波动注入模块 504 的电流抵消波动信号这三者的组合作为输入,并输出第一控制信号。所述第一控制信号通过 PWM 驱动电路(即 IGBT 驱动电路)驱动电机旋转,进而驱动液压泵运转。所述电流控制器 502 可以为任何一种适当的现有的(或新开发的)电流控制器,例如 PI 控制器等。由于电机输入端的电流正比于电机的转矩,因此对电流的控制相当于对转矩的控制,且电流控制器也可称为转矩控制器。

[0034] 根据本发明的该实施例,所述抵消波动注入模块 504 根据电机轴的转角信号  $\theta$ 、电机转速信号  $\omega$  以及液压泵的出口压力信号  $p$  产生电流抵消波动抵消信号,并将该电流抵消波动信号注入到控制系统的电流回路中,即与电流控制器 503 输入端的第二控制信号、电流反馈信号组合后提供给电流控制器 503。所述电机轴的转角信号  $\theta$  可以来自于安装在电机上的角度传感器或位置传感器,所述电机转速信号  $\omega$  可以来自于安装在电机上的速度传感器,或者是通过计算转角信号  $\theta$  的时间变化率而得到,所述液压泵的出口压力信号  $p$  可以来自于安装在液压泵输出端的压力传感器。

[0035] 现参照图 6,其示出了根据本发明的另一个实施例的控制系统的示意图。如图 6 所示,该控制系统包括压力控制器 501、速度控制器 502、电流控制器 503、抵消波动注入模块 604。该控制系统与图 5 所示的控制系统的区别在于抵消波动注入模块 604 将速度抵消波动信号注入到速度回路中,而不是注入到电流回路中。

[0036] 压力控制器 501 与图 5 所示实施例中的压力控制器 501 相同,故不再详细描述。

[0037] 速度控制器 502 接收压力控制器 501 所输出的第三控制信号、来自电机输出端的速度传感器的速度反馈信号、以及来自抵消波动注入模块 604 的速度抵消波动信号这三者的组合作为输入,并输出第二控制信号。

[0038] 电流控制器 503 接收速度控制器 502 输出的第二控制信号、来自电机输入端的电流传感器的电流反馈信号这两者的组合作为输入,并输出第一控制信号。所述第一控制信号通过 PWM 驱动电路驱动电机旋转,进而驱动液压泵运转。

[0039] 根据本发明的该实施例,所述抵消波动注入模块 604 根据电机轴的转角信号  $\theta$ 、电机转速信号  $\omega$  以及液压泵的出口压力信号  $p$  产生速度波动抵消信号,并将该速度波动抵消信号注入到控制系统的速度回路中,即与电流控制器 503 输入端的第二控制信号、电流反馈信号组合后提供给电流控制器 503。

[0040] 根据本发明的实施例,该控制系统的核心模块为抵消波动注入模块 504、604,该模块之外的所有其他模块可以是在工业机器及其他相关应用中广泛使用的“压力闭环控制”的常规实现。此外,如本领域技术人员可知的,图 5 和 6 中所示和以上描述的控制系统的结构仅为示例,而不是对本发明的限制。例如,压力控制器 501 与速度控制器 502 之间的位置关系可以与图示和描述的相反,该控制系统可以不包含所述压力控制器 501 和速度控制器 502 中的任一个或两个,该控制系统还可以包括其他的控制器、其他组件或控制回路,等等。

[0041] 本发明的上述两个实施例(即将速度抵消波动信号注入速度回路中,或者将电流抵消波动信号注入电流回路中)的选择可取决于液压泵出口压力(或流量)波动在时间域中的频率。一般而言,电流控制回路的带宽(可高达 1KHz)要远远高于速度控制回路的带宽(约 100Hz)。根据经验,对于具有 9 个柱塞的柱塞泵来说,当转速小于 300rpm 时,可采用速度抵消波动信号注入方法。当转速小于 3000rpm 时,可采用电流抵消波动信号注入方法。

[0042] 如上所述,抵消波动注入模块 504、604 的功能是获得来自压力传感器的压力信号和角度传感器的角度信号,并由此计算抵消波动信号,以修改第二或第三控制信号。由于液压泵输出的流量和压力中的波动生成取决于液压泵的内部结构,因此,根据本发明的实施例,所述抵消波动注入模块 504、604 产生的抵消波动信号为电机轴转角的周期函数,而不是时间的周期函数。该抵消波动信号的波形可以为诸如方波、三角波、正弦波等常规波形。以柱塞泵为例,正弦波形式的该抵消波动信号可表示如下:

$$[0043] \quad f(\theta) = A_0 \cos(2N\theta + \theta_0)$$

[0044] 其中,  $\theta$  为电机轴的转角,  $N$  为柱塞数,  $A_0$  和  $\theta_0$  为待确定的参数。

[0045] 可以使用多种方法来确定该周期函数的参数  $A_0$  和  $\theta_0$ 。理论和实验结果均显示  $\theta_0$  与液压泵的机械结构直接相关,仅需要测量一次,是固定的。 $A_0$  是取决于电机和液压泵的运行状态(包括电机的转速及液压泵的出口压力)的参数。

[0046] 根据本发明的一个实施例,一种确定所述参数的方法是进行充分的测试以构建查找表,并使用查找表来确定所述周期函数的参数。具体地,在测试过程中,针对电机转速  $\omega$  和液压泵出口压力  $p$  的大量不同测量值组合中的每个组合,指定参数  $A_0$  和  $\theta_0$  的值的不同组合,并将具有不同参数值组合的抵消波动信号注入到控制系统的控制路径中,并测量液压泵的出口压力中的波动,从而可获得产生最小的出口压力波动的参数值组合。这样,就可以建立查找表,该查找表中列出了电机转速  $\omega$  和液压泵出口压力  $p$  的测量值的不同组合与适当的参数  $A_0$  和  $\theta_0$  的值的组合之间的映射关系。这样,在液压泵系统的运行过程中,所述抵消波动注入模块 504、604 就可以根据所测量的电机转速  $\omega$  和液压泵出口压力  $p$  在查找表中找出相应的参数  $A_0$  和  $\theta_0$  的值,从而产生具有该参数值的抵消波动信号,以注入到控制系统的控制路径中。在这种方法中,由于包含参数值的查找表是在液压泵系统的实际生产过程之前的测试过程中形成的,因此可称为离线确定方法。

[0047] 根据本发明的另一些实施例,可以使用自适应调整算法来确定所述周期函数的参数。所述自适应调整算法可以是任何一种已知的自适应控制方法,例如最小均方(LMS)方法或递归最小二乘(RLS)方法等。此类方法的基本思想是通过主动对系统设定不同的参数,测量系统在不同参数下的输出结果,并根据输出结果的变化方式和分布来辨识系统的参数。在本发明的这些实施例中,该自适应调整算法可以针对电机转速  $\omega$  和液压泵出口压力  $p$  的测量值的任一特定组合,通过不断设定和调整参数值  $A_0$  和  $\theta_0$  并测量相应的液压泵出口压力中的波动,来获得适当的参数值  $A_0$  和  $\theta_0$ 。这种方法可以在液压泵系统的实际生产运转中辨识所述周期函数的参数,因此是一种在线方法。由于这类自适应调整算法在本领域中是公知的,因此不再详细描述。

[0048] 以上描述了根据本发明的实施例的液压泵系统以及基于变频器的液压泵控制系统。应指出的是,以上描述仅为示例,而不是对本发明的限制。在本发明的其他实施例中,该系统可具有更多、更少或不同的模块,且各模块之间的连接、包含和功能关系可以与所描述的不同。

[0049] 如本领域的技术人员根据以上描述可知的,本发明还提供了一种基于变频器的液压泵的控制方法,该控制方法通过变频器控制电机,该电机驱动液压泵,该控制方法包括:向控制路径注入抵消波动信号,该抵消波动信号使得液压泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。



[0050] 根据本发明的实施例,所述控制路径中包括电流控制器,该电流控制器接收第二控制信号和来自电机输入端的电流传感器的电流反馈信号的组合,并向电机提供第一控制信号。

[0051] 根据本发明的实施例,所述抵消波动信号与所述第二控制信号和电流反馈信号相组合,以被提供给所述电流控制器。

[0052] 根据本发明的实施例,所述控制路径中还包括速度控制器,该速度控制器接收第三控制信号和来自电机输出端的速度传感器的速度反馈信号的组合,并直接或间接向电流控制器提供所述第二控制信号,其中,所述抵消波动信号与所述第三控制信号和速度反馈信号相组合,以被提供给所述速度控制器。

[0053] 根据本发明的实施例,所述控制路径中还包括压力控制器,该压力控制器接收第四控制信号和来自泵输出端的压力传感器的压力反馈信号的组合,并直接或间接向电流控制器提供所述第二控制信号。

[0054] 根据本发明的实施例,所述抵消波动信号为电机轴的转角的周期函数。

[0055] 根据本发明的实施例,所述周期函数的参数是根据泵输出端的压力测量值和电机输出端的转速测量值自适应地确定的。

[0056] 根据本发明的实施例,所述周期函数的参数是通过查找表确定的,该查找表将所述压力测量值与转速测量值的多个组合映射到相应的所述周期函数的参数。

[0057] 根据本发明的实施例,该控制方法还包括:以离线测试方法建立所述查找表,在所述离线测试方法中,针对压力测量值与转速测量值的多个组合中的每个组合,调整所述周期函数的参数,直至液压泵输出中的压力波动至少部分地抵消,从而获得对应于压力测量值与转速测量值的多个组合中的每个组合的所述周期函数的参数。

[0058] 根据本发明的实施例,所述周期函数的参数是使用在线自适应算法确定的,在该在线自适应算法中,针对压力测量值与转速测量值的多个组合中的每个组合,自适应地调整所述周期函数的参数,直至液压泵输出中的压力波动至少部分地被抵消。

[0059] 根据本发明的实施例,所述液压泵为柱塞泵,且所述抵消波动信号表示为:

$$[0060] \quad f(\theta) = A_0 \cos(2N\theta + \theta_0)$$

[0061] 其中,  $\theta$  为电机轴的转角,  $N$  为柱塞数,  $A_0$  和  $\theta_0$  为待确定的参数。

[0062] 通过建立一测试演示液压泵系统,并在其上运行根据本发明的实施例的控制系统和控制方法,本发明的控制系统和控制方法得到验证。该测试演示液压泵系统包括一可编程变频器,一交流伺服电机,以及一双排量 Eaton 420 工业泵。其中,变频器的最大电流为 120A;电机的额定电流为 1500rpm,额定转矩为 108Nm,额定电流为 53.3A,惯量(包括泵)为 0.079kgm<sup>2</sup>;泵的最大排量为 49cc。

[0063] 抵消波动信号注入是在速度回路上进行的。工作循环是压力保持@ 154bar。在压力保持期间的泵排量被设为约 25cc。电机转速被观察为约 125rpm 以提供系统泄流。注入的信号被选择为正弦信号。幅度  $A_0$  和相位  $\theta_0$  是通过来自充分测试的查找表确定的。

[0064] 图 7 示出了在测试演示液压泵系统中来自压力传感器的测量数据的图示。上半部分的图是具有本发明的波动抵消信号注入的压力信号与不具有本发明的波动抵消信号注入的压力信号的比较。从图中可见,本发明的波动抵消信号注入可减少高达 60% 的压力波动。下半部分的图是对波动信号的频谱分析。从该图可见,波动仅包含部分谐波。最主要

的谐波(二次谐波)已被本发明的波动抵消信号注入完全消除,这对压力波动减少作出了贡献。

[0065] 虽然以上描述了本发明的示例性实施例,但本发明并不局限于此。所属技术领域的技术人员可以做出各种改变和修改,而不脱离本发明的精神和范围。例如,可以设想本发明的技术方案也适用液压泵之外的其他流体泵。本发明的范围仅由权利要求限定。

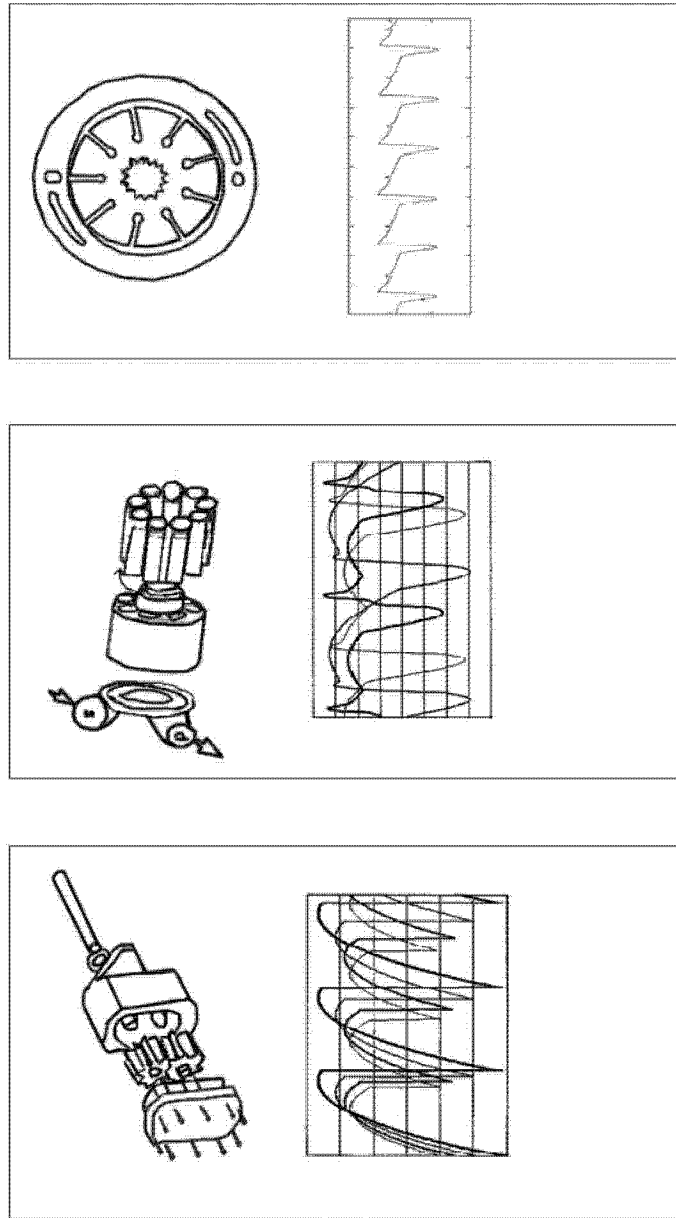


图 1

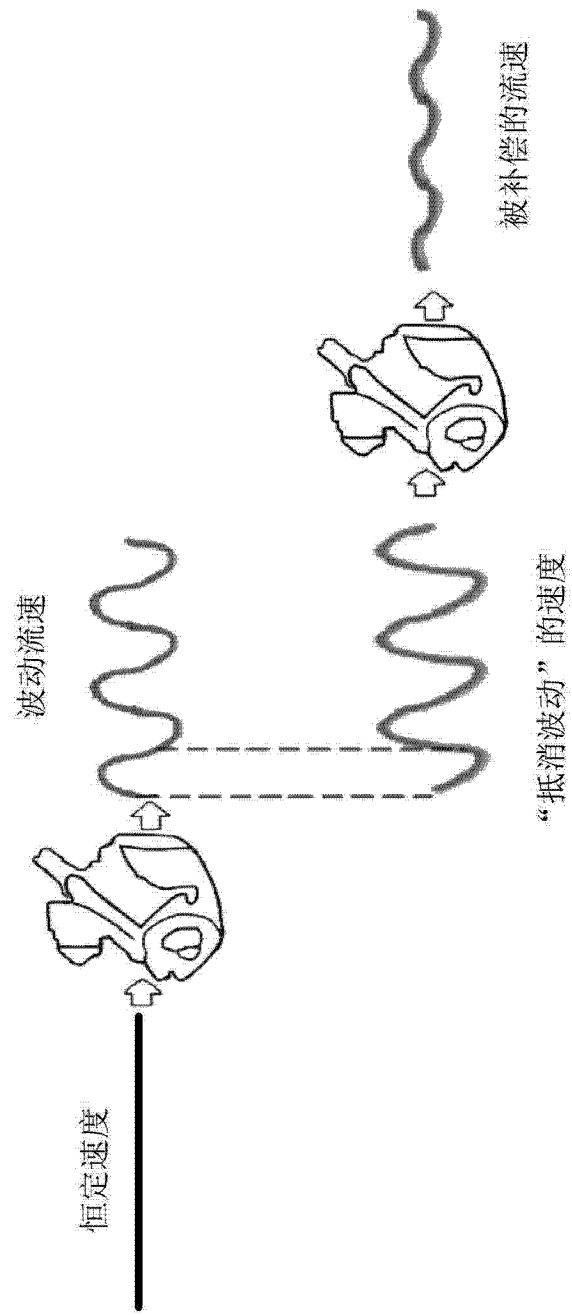


图 2

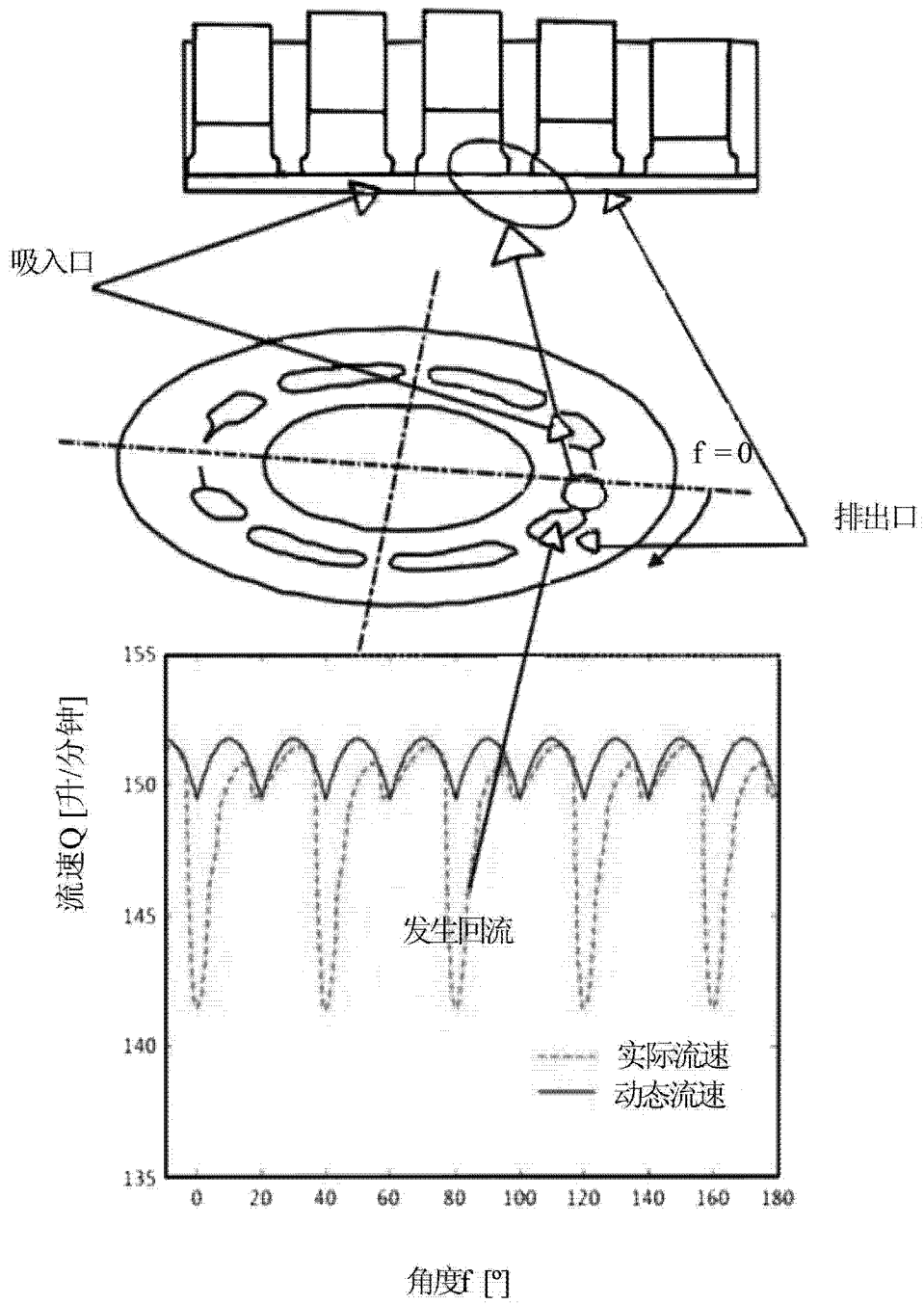


图 3

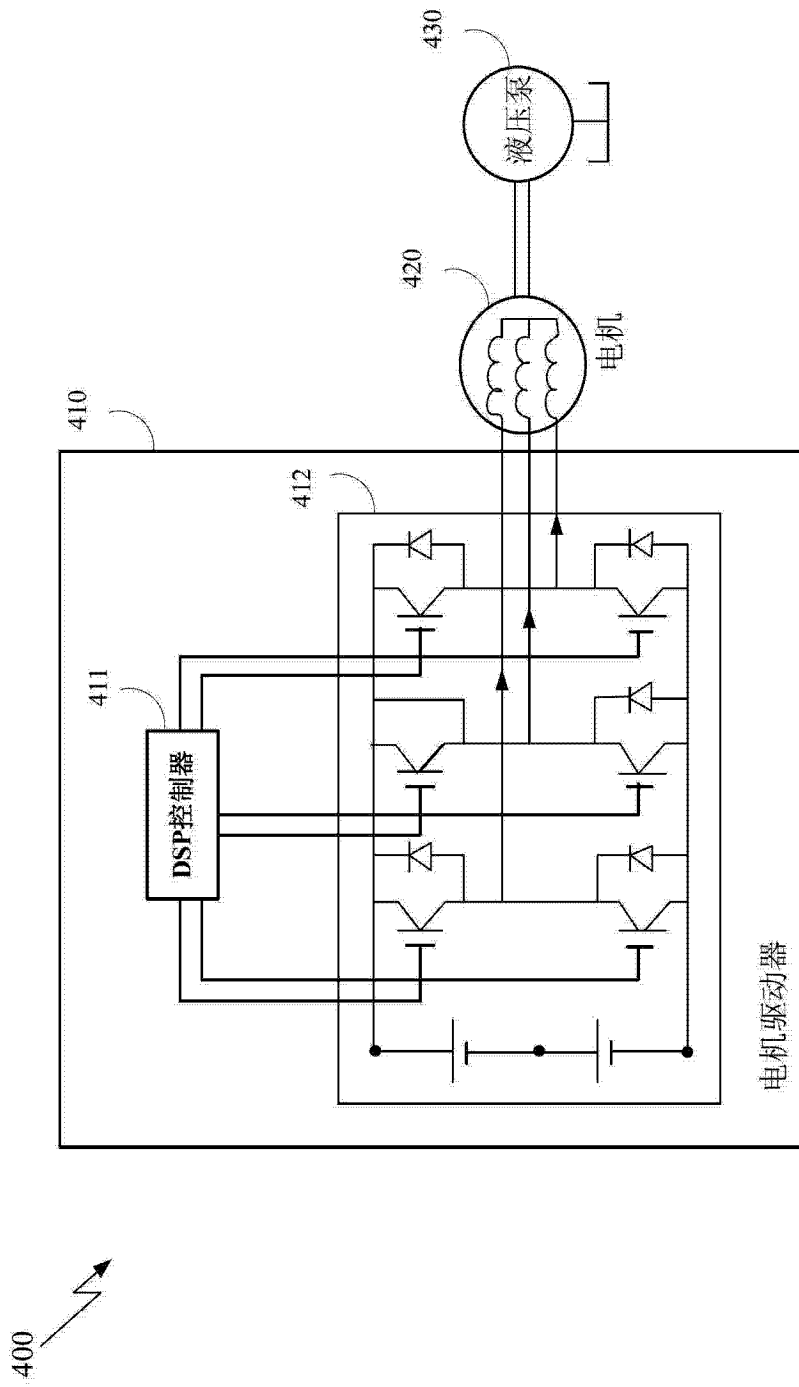


图 4

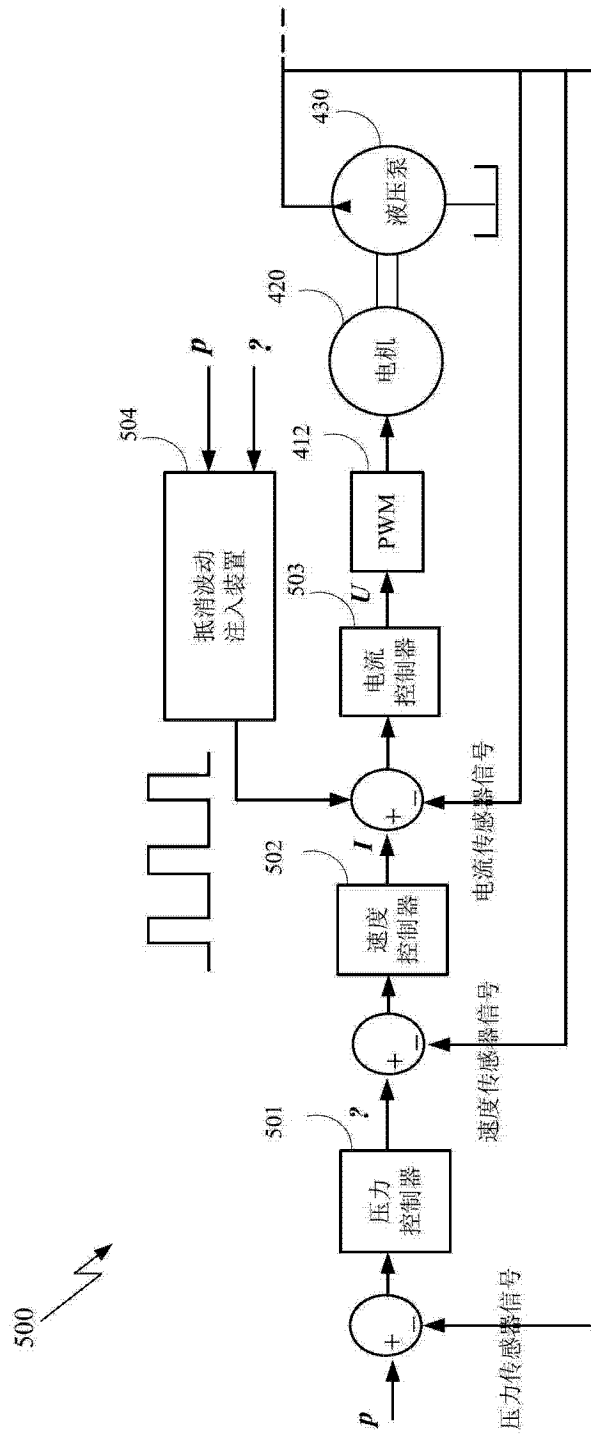


图 5

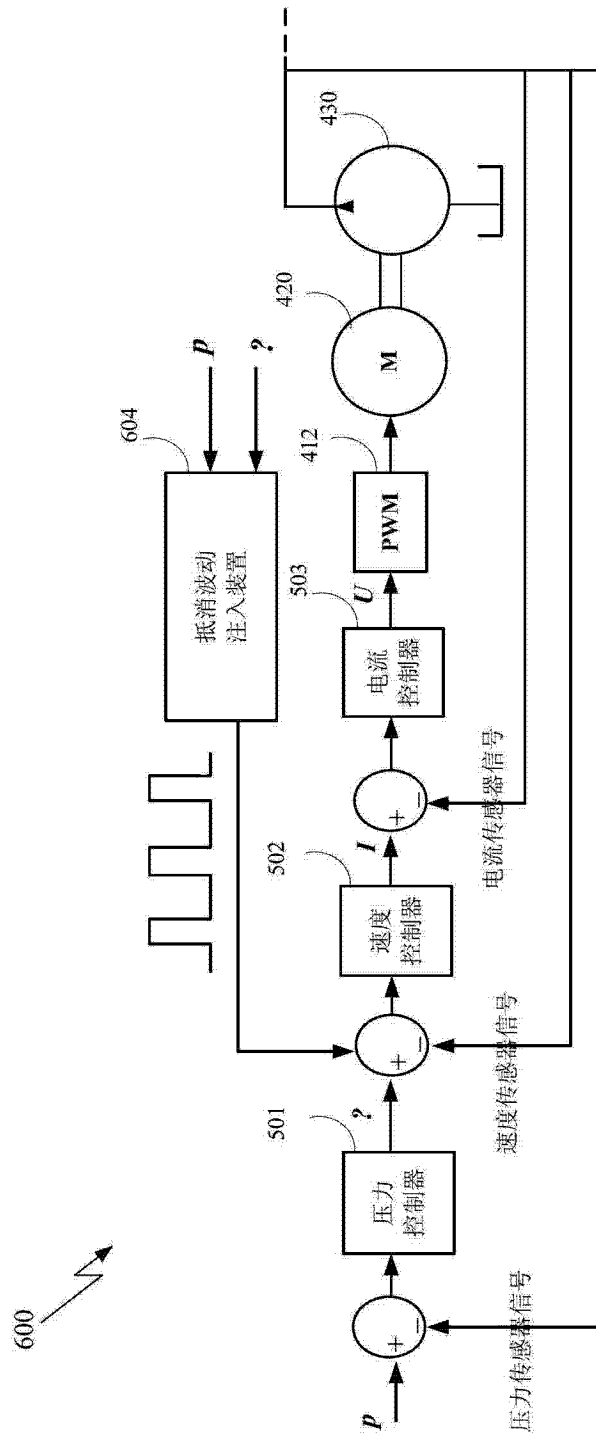


图 6



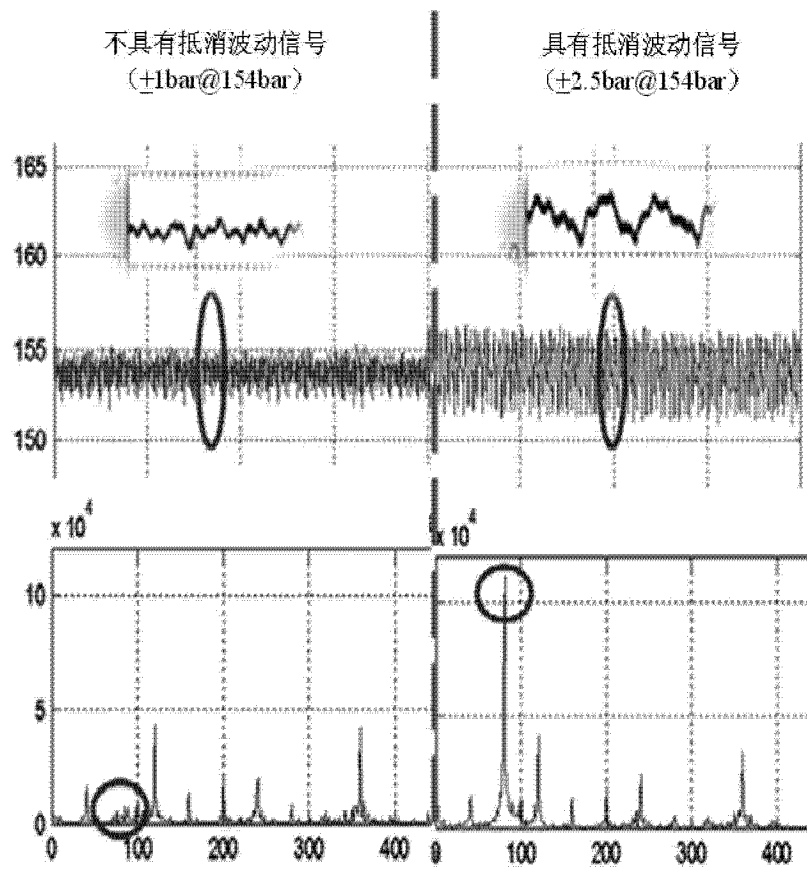


图 7