(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106958556 A
(43)申请公布日 2017.07.18

(21)申请号 201710248008.3

(22)申请日 2017.04.17

(71)申请人 燕山大学
地址 066004 河北省秦皇岛市海港区河北大街西段438号

(72)发明人 俞滨 巴凯先 孔祥东 朱琦歆 王东坤 刘雅梁

(74)专利代理机构 秦皇岛一诚知识产权事务所（普通合伙）13116
代理人 崔凤英

(51)Int.Cl.
F15B 15/14(2006.01)
F15B 15/20(2006.01)
F15B 11/08(2006.01)

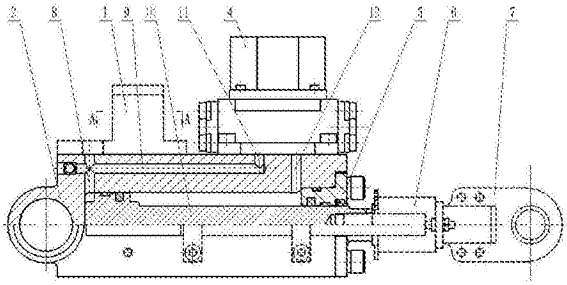
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

一种用于机器人的一体化液压驱动器及其控制方法

(57)摘要

本发明公开一种用于机器人的一体化液压驱动器及其控制方法，其液压驱动器的伺服缸为单出杆液压缸，伺服缸缸体上部安装喷嘴挡板伺服阀和油路连接块，伺服缸与油路连接块连接处的缸体上设有相应油道与喷嘴挡板伺服阀上的进油口、控制油口和回油口连通；力传感器安装在伺服缸活塞杆前端，位移传感器的壳体固定在伺服缸缸体上，探头固定在与力传感器同侧的伺服缸活塞杆上；其控制方法是力传感器和位移传感器配合使用，实时监测伺服缸输出力和位移两状态量，由负载压力观测器计算系统负载压力，最终经控制器使伺服缸的输出等于系统的输入。本发明采用阀控非对称缸结构，并省去了伺服缸两腔的压力传感器，其结构更加紧凑，其功重比及可控性均具有优势。



CN 106958556 A

1.一种用于机器人的一体化液压驱动器，包括伺服缸、油路连接块、喷嘴挡板伺服阀、位移传感器、力传感器，喷嘴挡板伺服阀和油路连接块安装在伺服缸的缸体上部，其特征在于：

所述的伺服缸为单出杆液压缸，伺服缸与油路连接块连接处的缸体上设有径向的流道C、流道H、流道J和四个固定油路连接块的螺纹孔，伺服缸与喷嘴挡板伺服阀连接处的缸体上设有径向的流道E、流道G、流道L、流道M、定位销孔和四个固定喷嘴挡板伺服阀的螺纹孔，伺服缸靠近油路连接块一侧的缸体内设有轴向的流道D、流道N和流道Q，流道D分别与流道C和流道E相通，流道N分别与流道J和流道M相通，流道Q分别与流道H和流道L相通；

所述的油路连接块上并列开设有：水平向的进油流道R和回油流道W，垂直向的流道V和流道Z，进油流道R和流道V相通，回油流道W和流道Z相通；油路连接块上的流道V和伺服缸缸体上的流道J连通，油路连接块上的流道Z和伺服缸缸体上的流道H连通；

所述的喷嘴挡板伺服阀上设有进油口P、控制油口A、控制油口B和回油口T；

所述的力传感器安装在伺服缸活塞杆前端，所述的位移传感器的壳体固定在伺服缸缸体上，探头固定在与力传感器同侧的伺服缸活塞杆上，所述伺服缸活塞杆可进行伸出或缩回运动；

所述伺服缸活塞杆的伸出运动：进油时，系统油液经进油管道和油路连接块上的进油流道R和流道V流入伺服缸缸体内的流道J，经伺服缸缸体内的流道N和流道M进入喷嘴挡板伺服阀的进油口P，经过喷嘴挡板伺服阀的内部流道后，从其控制油口A再流入伺服缸缸体内的流道E11，经伺服缸缸体内的流道D9和流道C8后，最终进入伺服缸的左腔；回油时，系统油液由伺服缸的右腔流出进入伺服缸缸体内的流道G后流入喷嘴挡板伺服阀的控制油口B，经喷嘴挡板伺服阀的内部流道后，从喷嘴挡板伺服阀的回油口T流出喷嘴挡板伺服阀，再流进伺服缸缸体流道L，经过伺服缸缸体内的流道Q和流道H流入油路连接块的流道Z，最后经油路连接块中的回油流道W流回回油管道；

所述伺服缸活塞杆的缩回运动：进油时，系统油液经进油管道和油路连接块上的进油流道R和流道V流入伺服缸缸体内的流道J，经伺服缸缸体内的流道N和流道M进入喷嘴挡板伺服阀进油口P，经过喷嘴挡板伺服阀的内部流道后，从其控制油口B再流入伺服缸缸体内的流道G，并最终进入伺服缸的右腔；当回油时，油液由伺服缸的左腔流出进入伺服缸缸体内的流道C、流道D和流道E后流入喷嘴挡板伺服阀的控制油口A，经喷嘴挡板伺服阀的内部流道后，从喷嘴挡板伺服阀的回油口T流出喷嘴挡板伺服阀，再流进伺服缸缸体流道L，经过伺服缸缸体内的流道Q和流道H流入油路连接块的流道Z，最后经油路连接块中的回油流道W流回回油管道。

2.一种用于机器人的一体化液压驱动器的控制方法，其特征在于，包括以下步骤：

(1)位移传感器和力传感器对伺服缸输出的位移及力信号进行检测，通过与系统的输入量进行比较后得到偏差；

(2)负载压力观测器通过输入的位移和力信号，经内部负载压力控制算法得到控制系统的负载压力；

(3)控制器通过抗扰控制算法和系统偏差获得控制喷嘴挡板阀的阀芯位移信号，最终完成对上述偏差的纠正，使得伺服缸的输出等于系统的输入。

3.根据权利要2所述的一种用于机器人的一体化液压驱动器的控制方法，其中步骤(2)

中所述的负载压力控制算法，具体算法如下：

当伺服缸活塞杆伸出时，$\begin{cases} p_1 = \dfrac{F/A_1 + n^3 p_s}{1+n^3} \\ p_2 = \dfrac{n^2 p_s - n^2 F/A_1}{1+n^3} \end{cases}$；

当伺服缸活塞杆缩回时，$\begin{cases} p_1 = \dfrac{np_s + F/A_1}{1+n^3} \\ p_2 = \dfrac{p_s - Fn^3/A_2}{1+n^3} \end{cases}$；

负载压力为：$p_L = |p_1 - p_2|$

式中，p_1为伺服缸左腔压力，A_1为伺服缸左腔面积，p_2为伺服缸右腔压力，A_2为伺服缸右腔面积，F为力传感器检测力，$n = A_2/A_1$，p_s为系统压力，p_L为负载压力。

一种用于机器人的一体化液压驱动器及其控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于液压技术领域，涉及液压驱动型足式机器人关节运动的一种高集成性的一体化液压驱动器。

背景技术

[0002] 机器人按其所完成的主要功能可以分为四类：操作机器人、移动机器人、信息机器人和人机机器人。其中，操作机器人用于模拟人手和手臂的动作来完成各种工艺操作；移动机器人又可细分为轮式机器人、履带式机器人和足式机器人，其在工业生产中常用来完成运输及上、下料等任务，并且这种机器人多半装有操作手，以完成现场操作任务；信息机器人是指以计算机系统为基础的智能行为模拟装置；人机机器人和人之间存在双向闭环联系，这些联系包括联肢机械手、装在人腿上的助行机械足及生物电控或声控假肢等。以上这些机器人的动作都是通过关节运动来完成的，而机器人关节运动的驱动方式一般分为三种：电力驱动、气压驱动和液压驱动。由于液压驱动有推力大、功重比高、系统刚度好、精度高、响应快、易于在大速度范围内工作等优点，使得液压驱动型机器人在诸多领域更具优势，因此，液压驱动方式也变得尤为重要。

[0003] 传统机器人关节的驱动方式一般为非集成式阀控缸结构，伺服阀/比例阀与伺服缸通过管路连接，该非集成式阀控缸结构有以下缺点：1、控制阀至液压缸之间的管路过长，降低了对液压缸的控制性能及系统的固有频率；2、系统的接头过多，容易导致泄漏而影响整个机器人系统的可靠性。

[0004] 授权公告号CN103233932B的中国发明专利公开了一种高集成性液压驱动单元结构，克服了非集成式阀控缸的一些缺点，其结构采用了阀控双出杆伺服缸结构，但由于机器人关节运动时具有正向出力大、回程出力小的特点，使得该液压驱动器的对称伺服缸结构在机器人关节实际应用过程中，其外形尺寸及功重比均不为最优。为此，有必要设计出一种针对机器人的新型一体化液压驱动器，以解决现有的液压驱动器功重比不够大和集成度不够高等缺点。

发明内容

[0005] 针对现有技术的不足，本发明旨在提供一种具有较大功重比和较高集成度的用于机器人关节运动的一体化液压驱动器。

[0006] 本发明目的是通过以下技术方案实现的：

[0007] 一种用于机器人的一体化液压驱动器，包括伺服缸、油路连接块、喷嘴挡板伺服阀、位移传感器、力传感器，喷嘴挡板伺服阀和油路连接块安装在伺服缸的缸体上部，所述的伺服缸为单出杆液压缸，伺服缸与油路连接块连接处的缸体上设有径向的流道C、流道H、流道J和四个固定油路连接块的螺纹孔，伺服缸与喷嘴挡板伺服阀连接处的缸体上设有径向的流道E、流道G、流道L、流道M、定位销孔和四个固定喷嘴挡板伺服阀的螺纹孔，伺服缸靠近油路连接块一侧的缸体内设有轴向的流道D、流道N和流道Q，流道D分别与流道C和流道E

相通，流道N分别与流道J和流道M相通，流道Q分别与流道H和流道L相通；所述的油路连接块上并列开设有：水平向的进油流道R和回油流道W，垂直向的流道V和流道Z，进油流道R和流道V相通，回油流道W和流道Z相通；油路连接块上的流道V和伺服缸缸体上的流道J连通，油路连接块上的流道Z和伺服缸缸体上的流道H连通；所述的喷嘴挡板伺服阀上设有进油口P、控制油口A、控制油口B和回油口T；所述的力传感器安装在伺服缸活塞杆前端，所述的位移传感器的壳体固定在伺服缸缸体上，探头固定在与力传感器同侧的伺服缸活塞杆上，所述伺服缸活塞杆可进行伸出或缩回运动。

[0008] 所述伺服缸活塞杆的伸出运动：进油时，系统油液经进油管道和油路连接块上的进油流道R和流道V流入伺服缸缸体内的流道J，经伺服缸缸体内的流道N和流道M进入喷嘴挡板伺服阀的进油口P，经过喷嘴挡板伺服阀的内部流道后，从其控制油口A再流入伺服缸缸体内的流道E11，经伺服缸缸体内的流道D9和流道C8后，最终进入伺服缸的左腔；回油时，油液由伺服缸的右腔流出进入伺服缸缸体内的流道G后流入喷嘴挡板伺服阀的控制油口B，经喷嘴挡板伺服阀的内部流道后，从喷嘴挡板伺服阀的回油口T流出喷嘴挡板伺服阀，再流进伺服缸缸体流道L，经过伺服缸缸体内的流道Q和流道H流入油路连接块的流道Z，最后经油路连接块中的回油流道W流回回油管道；所述伺服缸活塞杆的缩回运动：进油时，系统油液经进油管道和油路连接块上的进油流道R和流道V流入伺服缸缸体内的流道J，经伺服缸缸体内的流道N和流道M进入喷嘴挡板伺服阀进油口P，经过喷嘴挡板伺服阀的内部流道后，从其控制油口B再流入伺服缸缸体内的流道G，并最终进入伺服缸的右腔；当回油时，油液由伺服缸的左腔流出进入伺服缸缸体内的流道C、流道D和流道E后流入喷嘴挡板伺服阀的控制油口A，经喷嘴挡板伺服阀的内部流道后，从喷嘴挡板伺服阀的回油口T流出喷嘴挡板伺服阀，再流进伺服缸缸体流道L，经过伺服缸缸体内的流道Q和流道H流入油路连接块的流道Z，最后经油路连接块中的回油流道W流回回油管道。

[0009] 一种用于机器人的一体化液压驱动器的控制方法，力传感器和位移传感器配合使用，实时监测伺服缸输出力和位移两状态量，并通过压力观测器计算系统的负载压力，包括以下步骤：

[0010] (1)位移传感器和力传感器对伺服缸输出的位移及力信号进行检测，通过与系统的输入量进行比较后得到偏差；

[0011] (2)负载压力观测器通过输入的位移和力信号，经内部负载压力控制算法得到控制系统的负载压力；

[0012] (3)控制器通过抗扰控制算法和系统偏差获得控制喷嘴挡板阀的阀芯位移信号，最终完成对上述偏差的纠正，使得伺服缸的输出等于系统的输入。

[0013] 在步骤(2)中所述的负载压力控制算法，具体算法如下：

[0014] 当伺服缸活塞杆伸出时，$\begin{cases} p_1 = \dfrac{F/A_1 + n^3 p_s}{1+n^3} \\ p_2 = \dfrac{n^2 p_s - n^2 F/A_1}{1+n^3} \end{cases}$；

[0015] 当伺服缸活塞杆缩回时，$\begin{cases} p_1 = \dfrac{np_s + F/A_1}{1+n^3} \\ p_2 = \dfrac{p_s - Fn^3/A_2}{1+n^3} \end{cases}$；

[0016] 负载压力为：$p_L = |p_1 - p_2|$

[0017] 式中，p_1为伺服缸左腔压力，A_1为伺服缸左腔面积，p_2为伺服缸右腔压力，A_2为伺服缸右腔面积，F为力传感器检测力，$n = A_2/A_1$，p_s为系统压力，p_L为负载压力。

[0018] 由于采用上述技术方案，本发明的一种用于机器人的一体化液压驱动器，可满足足式机器人关节运动高响应、高精度的控制要求，而且结构更紧凑，功重比更高，能集成多个传感检测元件来实时检测液压驱动器的各状态量，从而提高该液压驱动器的控制性和可靠性。

[0019] 本发明提出的一种用于机器人的一体化液压驱动器与现有技术相比，具有下述有益效果：

[0020] 1、由于喷嘴挡板伺服阀、力传感器、位移传感器等元器件均是直接集成在伺服缸上，因此，该液压驱动器的集成度高，体积小，重量轻，并且伺服阀与伺服缸之间的连接管路是直接在伺服缸缸体上加工而成的，从而不仅克服了由于非集成式阀控缸所引起的管路接头损坏和泄漏等故障，而且提高了机器人运动的动态响应。

[0021] 2、由于力传感器和位移传感器的检测是实时的，一方面，可通过检测回来的实时偏差和采用状态反馈在线修正控制器中的控制参数，最后将控制参数输入到喷嘴挡板伺服阀中，从而达到期望的控制效果；另一方面，将采集回来的位移和力信号输入到负载压力观测器中，可计算得到系统的负载压力，从而为高精度控制提供条件；综上，两传感器的配合使用提高了机器人的控制性能和可靠性。

[0022] 3、采用了阀控非对称缸结构，其伺服缸采用的为单出杆液压伺服缸，在同种工况条件下，相比于阀控双出杆伺服缸的驱动器，本发明的驱动器出力更大，同时，由于本发明省去了驱动器的一侧出杆，该驱动器的结构更加紧凑，使其在长度方向的尺寸更短，从而使得其在机器人关节处的布置可以更加灵活。

[0023] 4、通过设计负载压力观测器和检测位移和力信号来间接计算得到系统的负载压力，省去了用于检测伺服缸两腔压力的两个压力传感器，从而达到与之相同的控制效果；压力传感器的省略和负载压力观测器的使用不但达到了高精度控制的要求，而且使得本发明的液压驱动器的结构更加简化、体积进一步减小。

附图说明

[0024] 图1为液压驱动器三维装配图。

[0025] 图2为液压驱动器结构装配图。

[0026] 图3为伺服缸缸体俯视图。

[0027] 图4为伺服缸缸体左视图。

[0028] 图5为图2的A-A向剖视图。

[0029] 图6为液压驱动器原理图。

[0030] 图7为负载压力观测器原理图。

[0031] 图8为液压驱动器位置控制方法示意图。

[0032] 图9为液压驱动器力控制方法示意图。

[0033] 图中:1-油路连接块,2-伺服缸缸体,3-位移传感器,4-喷嘴挡板伺服阀,5-伺服缸端盖,6-力传感器,7-杆端关节轴承组件,8-流道C,9-流道D,10-伺服缸活塞杆,11-流道E,12-流道G,13-固定油路连接块的螺纹孔,14-流道H,15-流道J,16-固定喷嘴挡板伺服阀的螺纹孔,17-流道L,18-流道M,19-定位销孔,20-流道N,21-流道Q,22-进油流道R,23-流道V,24-回油流道W,25-流道Z。

具体实施方式

[0034] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述:

[0035] 如图1-2所示,一种用于机器人的液压驱动器是由油路连接块1、伺服缸缸体2、位移传感器3、喷嘴挡板伺服阀4、伺服缸端盖5、力传感器6、杆端关节轴承组件7及伺服缸活塞杆10组成;油路连接块1和喷嘴挡板伺服阀4并列安装在伺服缸缸体2的上部,位移传感器3的壳体固定在伺服缸缸体2上,探头固定在与力传感器6同侧的伺服缸活塞杆10上,力传感器6安装在伺服缸活塞杆10的前端,杆端关节轴承组件7安装在力传感器6的前端;

[0036] 如图2～6所示,所述的伺服缸为单出杆液压缸,其上安装有:油路连接块1、位移传感器3、喷嘴挡板伺服阀4、力传感器6和杆端关节轴承组件7,伺服缸与油路连接块1连接处的缸体上设有径向流道C8、流道H14、流道J15和四个固定油路连接块的螺纹孔13,伺服缸与喷嘴挡板伺服阀4连接处的缸体上设有径向流道E11、流道G12、流道L17、流道M18、定位销孔19和四个固定喷嘴挡板伺服阀的螺纹孔16,伺服缸靠近油路连接块1一侧的缸体内设有轴向流道D9、流道N20和流道Q21,流道D9分别与流道C8和流道E11相通,流道N20分别与流道J15和流道M18相通,流道Q21分别与流道H14和流道L17相通;油路连接块1上并列开设有:水平向进油流道R22和回油流道W24,垂直向流道V23和流道Z25,进油流道R22和流道V23相通,回油流道W24和流道Z25相通;油路连接块的流道V23和伺服缸缸体上2的流道J15连通,油路连接块的流道Z25和伺服缸缸体上的流道H14连通;喷嘴挡板伺服阀4的进油口P与伺服缸缸体2上的径向流道M18连通,出油口T与径向流道L17连通,控制油口A与径向流道E11连通,控制油口B与径向流道G12连通。

[0037] 如图7所示,所述的负载压力观测器通过检测伺服缸输出位移和力信号来间接得到负载压力。首先,通过由位移传感器和力传感器检测的信号输入到判断函数中,经过判断函数得到力传感器检测信号的流向;然后得到伺服缸两腔的压力,最后,将伺服缸两腔压力相减即得到系统的负载压力。

[0038] 如图7～9所示,在无外界干扰的理想情况下,伺服缸的输出量应和系统的输入量相等。但当系统受到外干扰时,伺服缸的输出量就不再和系统的输入量相等,此时就需要对偏差量进行检测和消除以达到系统期望的输入量。位移传感器3和力传感器6可对伺服缸的输出位移及力信号进行检测,通过与系统的输入量进行比较后得到偏差,控制器通过抗扰控制算法(该控制算法以位移、力信号和负载压力为输入)和系统偏差获得控制喷嘴挡板阀的阀芯位移信号,最终完成对偏差的纠正,使得伺服缸的输出等于系统的输入。采用以上控制方式,可以实现一体化液压驱动器的位置闭环控制和力闭环控制。如图8所示,当采用位

置闭环控制时，位移传感器实时检测伺服缸输出位移，并与系统输入位移进行比较实现位置闭环控制，此时，力传感器可实时检测液压驱动器的受力情况，将传感器检测到的位移、力信号输入到负载压力观测器中经内部负载压力控制算法得到系统的负载压力，控制器通过力抗扰控制算法(该控制算法以位移、力信号和负载压力为输入)和系统偏差获得控制喷嘴挡板阀的阀芯位移信号，最终完成对位置偏差的纠正，使得伺服缸的输出位移等于系统的输入位移，采用该控制策略可大幅消减力干扰对伺服缸输出位移精度及响应的影响；如图9所示，当采用力闭环控制时，力传感器实时检测伺服缸输出力，并与系统输入力进行比较实现力闭环控制，此时，位移传感器可实时检测液压驱动器的运动位置，将传感器检测到的位移、力信号输入到负载压力观测器中经内部负载压力控制算法得到系统的负载压力，控制器通过位置抗扰控制算法(该控制算法以位移、力信号和负载压力为输入)和系统偏差获得控制喷嘴挡板阀的阀芯位移信号，最终完成对力偏差的纠正，使得伺服缸的输出力等于系统的输入力，采用该控制策略可大幅消减位置干扰对伺服缸输出力精度及响应的影响。由于位移传感器3和力传感器6可对伺服缸的输出位移及输出力进行实时及高精度检测，所以该液压驱动器的可控性及控制精度极高。

[0039] 本发明的工作流程如下：

[0040] (1)液压驱动器伸出运动(伺服缸活塞杆伸出运动)

[0041] 进油：系统油液经进油管道和油路连接块1上的流道R22和流道V23(其与伺服缸缸体的流道J15相对应)流入伺服缸缸体2内的流道J15，经伺服缸缸体内的流道N20和流道M18(其与喷嘴挡板伺服阀4的进油口P相对应)进入伺服阀进油口P，经过喷嘴挡板伺服阀4的内部流道后从其控制油口A再流入伺服缸缸体内的流道E11(其与喷嘴挡板伺服阀4的控制油口A相对应)，经伺服缸缸体内的流道D9和流道C8后，最终进入伺服缸的左腔。(经过的流道顺序为：系统进油管道→流道R22→流道V23→流道J15→流道N20→流道M18→伺服阀进油口P→伺服阀控制油口A→流道E11→流道D9→流道C8→伺服缸左腔)

[0042] 回油：油液由伺服缸的右腔流出进入伺服缸缸体内的流道G12(其与喷嘴挡板伺服阀4的控制油口B相对应)后流入喷嘴挡板伺服阀4的控制油口B，经伺服阀的内部流道后，从喷嘴挡板伺服阀4的回油口T流出伺服阀，再流进伺服缸缸体流道L17(其与喷嘴挡板伺服阀4的回油口T相对应)，经过伺服缸缸体内的流道Q21和流道H14流入油路连接块1的流道Z25(其与伺服缸缸体内的流道14相对应)，最后经油路连接块1中的流道W24流回回油管道，从而完成液压驱动器的伸出运动。(经过的流道顺序为：伺服缸右腔→流道G12→伺服阀控制油口B→伺服阀回油口T→流道L17→流道Q21→流道H14→流道Z25→流道W24→回油管道)

[0043] (2)液压驱动器缩回运动(伺服缸活塞杆缩回运动)

[0044] 进油：系统油液经进油管道和油路连接块1上的流道R22和流道V23(其与伺服缸缸体的流道J15相对应)流入伺服缸缸体内的流道J15，经伺服缸缸体内的流道N20和流道M18(其与喷嘴挡板伺服阀4的进油口P相对应)进入伺服阀进油口P，经过喷嘴挡板伺服阀4的内部流道后从其控制油口B再流入伺服缸缸体内的流道G12(其与喷嘴挡板伺服阀4的控制油口B相对应)，并最终进入伺服缸的右腔。(经过的流道顺序为：系统进油管道→流道R22→流道V23→流道J15→流道N20→流道M18→伺服阀进油口P→伺服阀控制油口B→流道G12→伺服缸右腔)

[0045] 回油：油液由伺服缸的左腔流出进入伺服缸缸体内的流道C8、流道D9和流道E11

(其与喷嘴挡板伺服阀4的控制油口A相对应)后流入喷嘴挡板伺服阀4的控制油口A,经伺服阀的内部流道后,从喷嘴挡板伺服阀4的回油口T流出伺服阀,再流进伺服缸缸体流道L17(其与喷嘴挡板伺服阀4的回油口T相对应),经过伺服缸缸体内的流道Q21和流道H14流入油路连接块1的流道Z25(其与伺服缸缸体内的流道H14相对应),最后经油路连接块1中的流道W24流回回油管道,从而完成液压驱动器的缩回运动。(经过的流道顺序为:伺服缸左腔→流道C8→流道D9→流道E11→伺服阀控制油口A→伺服阀回油口T→流道L17→流道Q21→流道H14→流道Z25→流道W24→回油管道)。

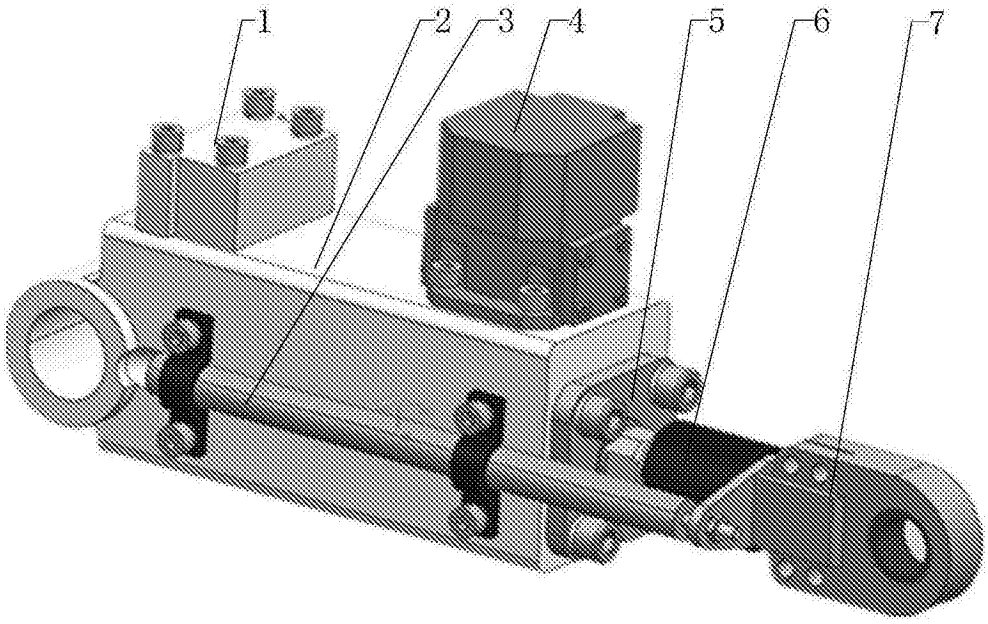


图1

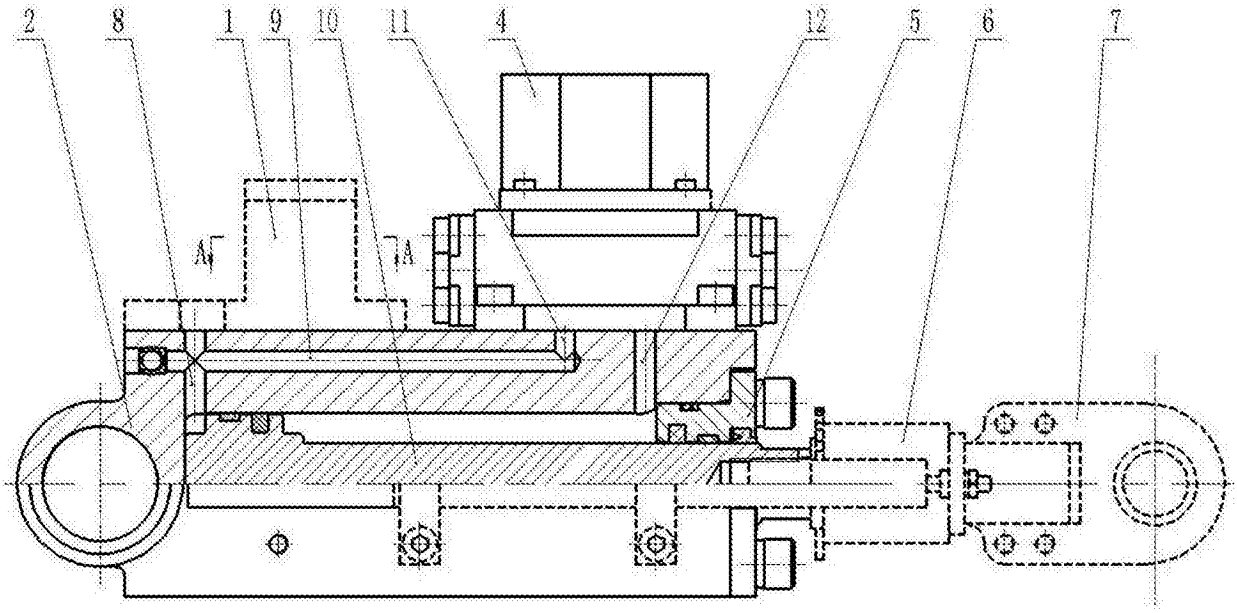


图2

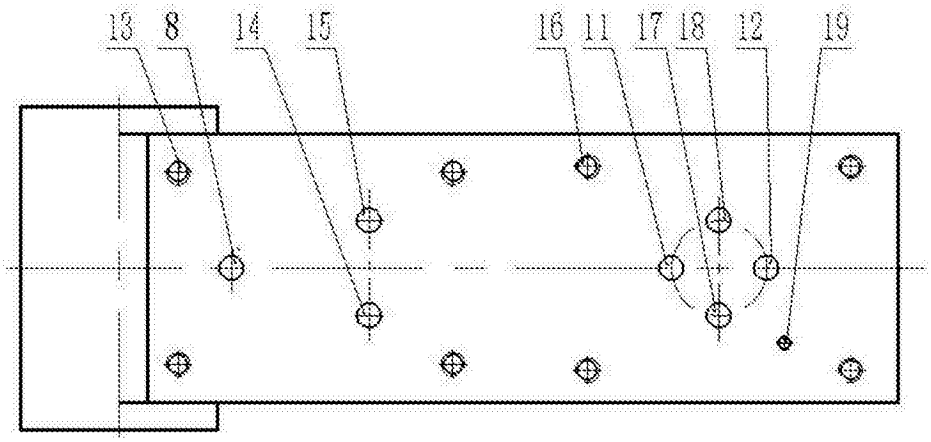


图3

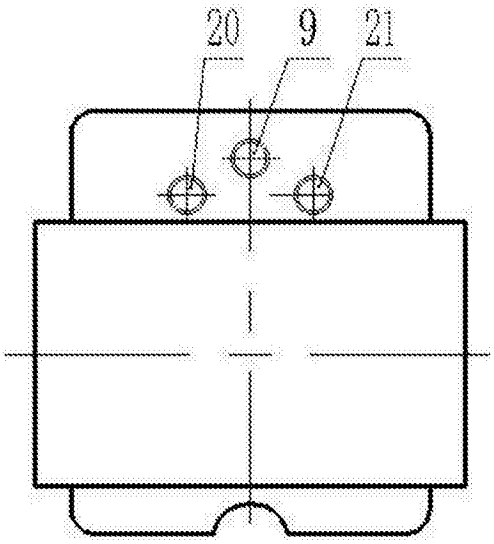


图4

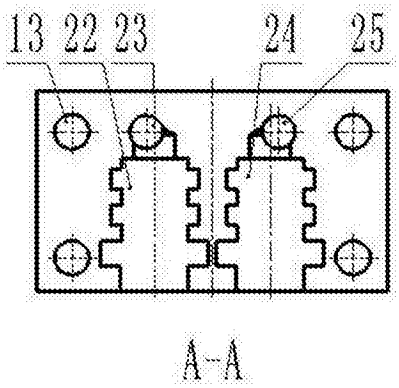


图5

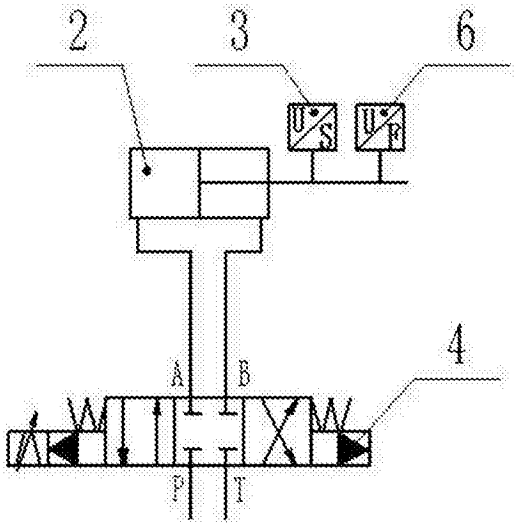

2
3
6
4
A
B
P
T

图6

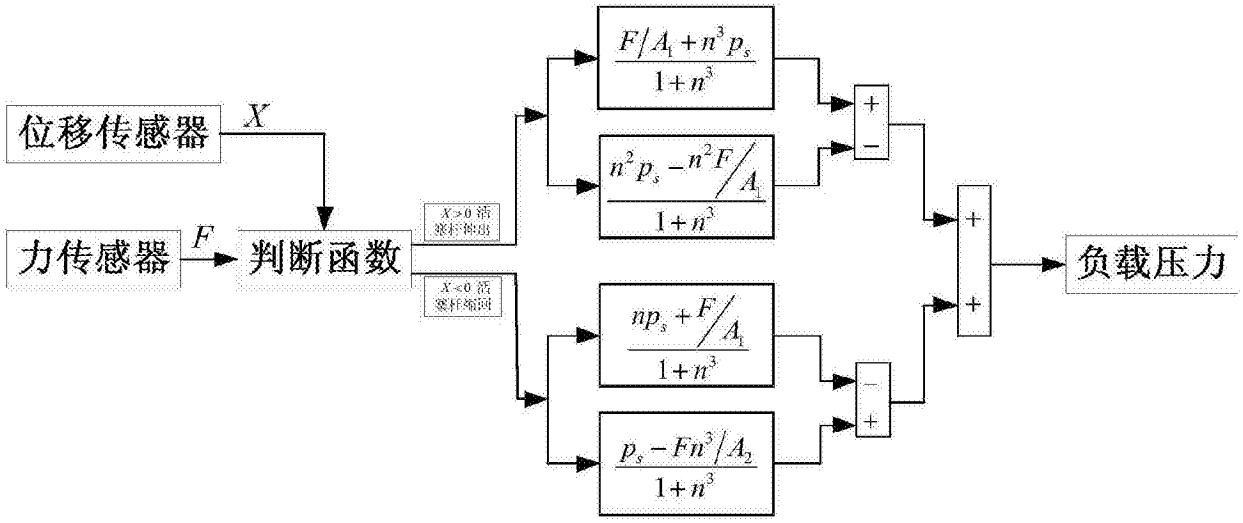

位移传感器
X
力传感器
F
判断函数
X>0 活塞杆伸出
X<0 活塞杆缩回
$\frac{F/A_1+n^3p_s}{1+n^3}$
$\frac{n^2p_s-n^2F/A_1}{1+n^3}$
$\frac{np_s+F/A_1}{1+n^3}$
$\frac{p_s-Fn^3/A_2}{1+n^3}$
负载压力

图7

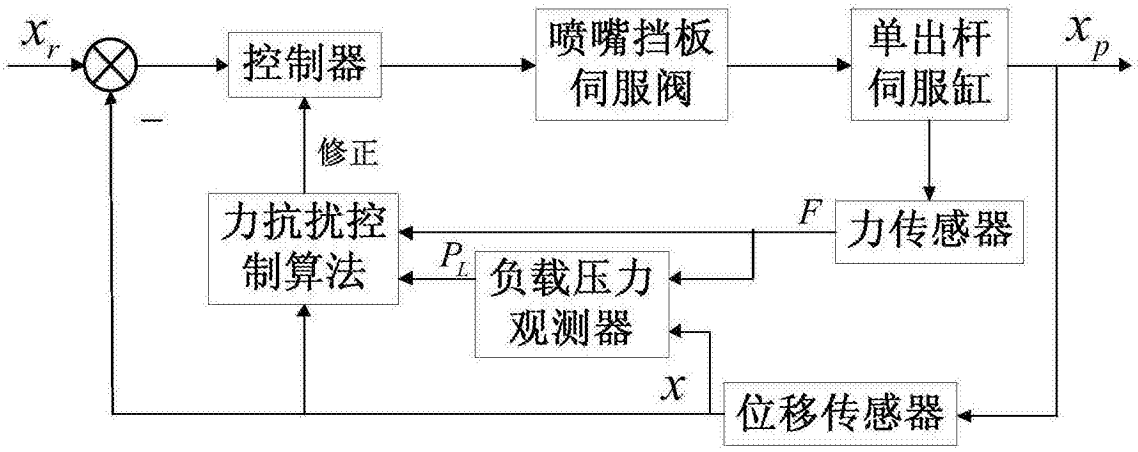

x_r
控制器
喷嘴挡板
伺服阀
单出杆
伺服缸
x_p
修正
力抗扰控
制算法
P_L
负载压力
观测器
F
力传感器
x
位移传感器

图8

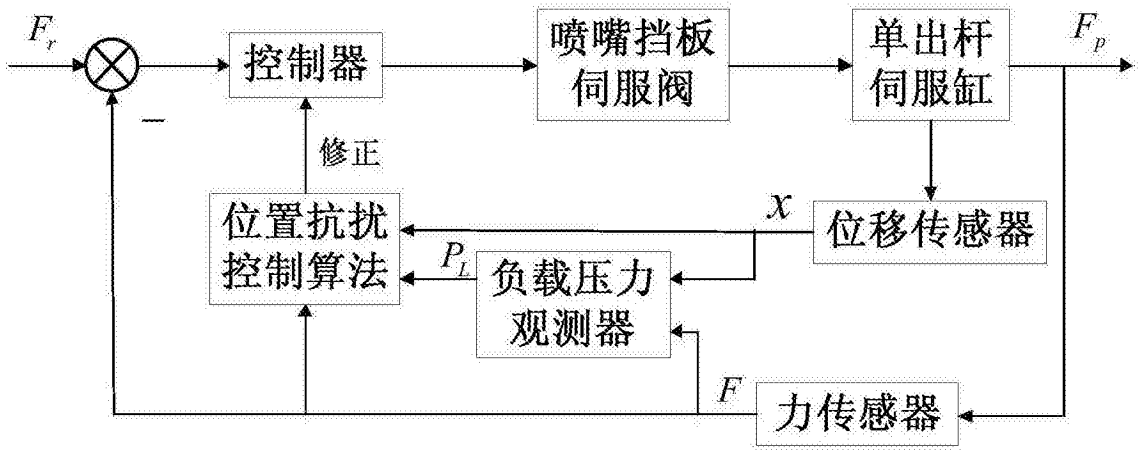

F_r
控制器
喷嘴挡板
伺服阀
单出杆
伺服缸
F_p
修正
位置抗扰
控制算法
P_L
负载压力
观测器
x
位移传感器
F
力传感器

图9