

数字配流式液压马达配流特性研究*

泮健 施光林

(上海交通大学机电控制与物流装备研究所, 上海 200240)

【摘要】 研究一种采用高速电磁开关阀组实现数字式配流的液压马达。首先分析该数字配流式液压马达的运行机理与结构特点;接着在柱塞运动学分析的基础上,根据配流过程分区建立了其逆时针和顺时针旋转的数学模型,分析了两个方向旋转模型之间的差异。针对所提出的模型进行了仿真,并在此基础上研究了数字配流式液压马达转向切换过程的特性。初步讨论了高速开关阀的开关频率对液压马达性能的影响,并将该马达与传统液马达进行了对比。通过样机试验,证明了仿真结果的正确性和有效性。

关键词: 液压马达 数字式配流 高速电磁开关阀 数学模型

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0203-06

Distribution Characteristics of Hydraulic Motor with Digital Distribution

Pan Jian Shi Guanglin

(Institute of Mechatronics and Logistics Equipment, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

A hydraulic motor with digital distribution mechanism based on high speed solenoid valves (HSV) was introduced. Firstly, the operating principle and the structure characteristics of the proposed hydraulic motor were described. Then, the mathematical model of the proposed hydraulic motor was established according to the distribution process for counter-clockwise and clockwise rotation by analyzing the piston dynamics of each plunger. The differences of the two distribution process were analyzed. The related simulation was conducted and the direction changing process of the proposed hydraulic motor was studied. The experiments were carried out to validate the effectiveness of the simulation results. Finally, the influence of the frequency of HSV was discussed and the performance was compared between the proposed motor and the traditional one.

Key words Hydraulic motor, Digital distribution, High speed solenoid on-off valve, Mathematical model

引言

目前广泛使用的低速大扭矩液压马达常见的配流方式为轴配流和端面配流^[1-2]。虽然阀配流的方式在径向柱塞泵上有所应用^[3],但是本文所研究的数字配流式液压马达是采用高速电磁开关阀组来代替传统液压马达配流机构而形成的一种新型液压马达^[4-5]。由于目前没有合适的高压大流量的高速电磁开关阀,因此选择了低速液压马达作为改造的对象。

一般在液压马达数学模型的研究中,把液压马达整体作为一个元件,建立以流量为输入,转速为输出的传递函数模型^[6-7]。本文通过分析数字配流式液压马达工作原理,根据液压马达的配流过程(高速电磁开关阀工作在全开或全闭状态),将其曲轴旋转过程分解为各个角度区间。然后,在各个角度区间内分析对应柱塞动态,直到建立液压马达曲轴旋转整个过程的模型。开展液压马达双向旋转配流特性对比仿真研究,并进行转向切换特性研究。

收稿日期: 2010-11-19 修回日期: 2010-12-03

* 国家自然科学基金资助项目(50775137)

作者简介: 泮健, 博士生, 主要从事机电液一体化研究, E-mail: pauljames@sohu.com

1 数字配流式液压马达运行机理

数字配流式液压马达采用装有高速电磁开关阀的阀块来取代原有的配流盘。结构如图1所示。该马达采用两个高速电磁开关阀来控制一个柱塞腔的进、回油。在进油区间内,高压油从P口进入阀块,到达5个进油开关阀(1、3、5、7、9)的入口。当对应的开关阀通电时,高压油便通过开关阀进入柱塞腔。当柱塞腔处于回油区间时,油液通过对应的5个回油开关阀(2、4、6、8、10),然后从阀块上的O口回油箱。根据传统液压马达的配流过程,可以得出液压马达曲轴处于不同角度区间时10个高速电磁开关阀的通电状态表,即新型液压马达配流状态表,如表1和表2所示。图中I、II、III、IV、V分别为液压马达本体的柱塞腔。

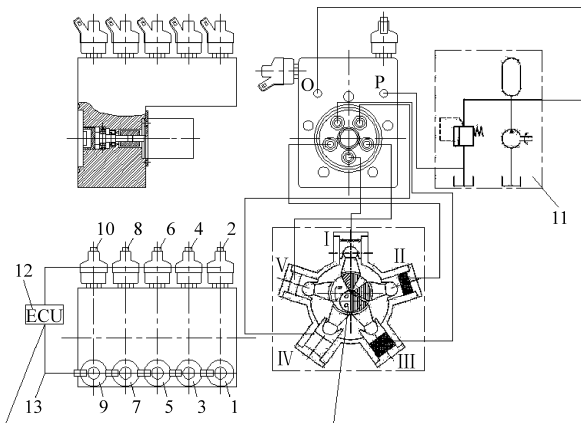


图1 数字配流式液压马达结构简图

Fig.1 Structure diagram of hydraulic motor with digital distribution mechanism

1、3、5、7、9. 进油开关阀 2、4、6、8、10. 回油开关阀 11. 油源
12. 电子控制单元 13. 控制线

表1 逆时针旋转配流状态

Tab.1 Distribution for counter-clockwise rotation

角度/(°)	进油腔	回油腔
[0,36)	I、II、III	IV、V
[36,72)	I、II	III、IV、V
[72,108)	V、I、II	III、IV
[108,144)	V、I	II、III、IV
[144,180)	IV、V、I	II、III
[180,216)	IV、V	I、II、III
[216,252)	III、IV、V	I、II
[252,288)	III、IV	V、I、II
[288,324)	II、III、IV	V、I
[324,360)	II、III	IV、V、I

表2 顺时针旋转配流状态

Tab.2 Distribution for clockwise rotation

角度/(°)	进油腔	回油腔
[324,360)	IV、V、I	II、III
[288,324)	V、I	II、III、IV
[252,288)	V、I、II	III、IV
[216,252)	I、II	III、IV、V
[180,216)	I、II、III	IV、V
[144,180)	II、III	IV、V、I
[108,144)	II、III、IV	V、I
[72,108)	III、IV	V、I、II
[36,72)	III、IV、V	I、II
[0,36)	IV、V	I、II、III

2 数学模型

在推导液压马达数学模型时基于以下假设:液压马达回油压力恒定;进油高速电磁开关阀的阀前压力恒定(大小为 p_s);不计柱塞腔各个运动部件间摩擦;不计液压马达内外泄漏;10个高速电磁开关阀特性相同。

首先推导逆时针旋转模型。根据配流状态表1,当曲轴角度处于 $[0^\circ, 36^\circ)$ 时,进油的柱塞腔为3个。那么,通过3个高速电磁开关阀的流量为

$$q_i = \alpha q_{\max} \sqrt{\frac{p_s - p_i}{p'_s}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中 α ——开关阀驱动信号占空比,在研究配流过程中 $\alpha = 1$

q_{\max} ——所选用的高速电磁开关阀在额定压力下的最大流量

p_s, p_i ——油源压力和柱塞腔压力

p'_s ——高速电磁开关阀额定压力

通过开关阀的流量进入相应的柱塞腔,由流量连续性方程可得

$$q_i = A \frac{ds_i}{dt} + \frac{V_{i0} + As_i}{\beta_e} \frac{dp_i}{dt} \quad (2)$$

式中 A ——柱塞腔面积 s_i ——柱塞位移

V_{i0} ——柱塞控制腔初始体积,主要由流道容积和液压马达本体柱塞腔体积组成

β_e ——油液体积弹性模量

根据柱塞运动学分析^[1]有

$$s_i = e \left[1 - \cos\varphi_i + \frac{K}{4} (1 - \cos 2\varphi_i) \right] \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (3)$$

其中 $\varphi_i = \varphi + (i - 1) \frac{2\pi}{5}$

式中 K, e ——与液压马达结构有关的常数

φ ——液压马达曲轴转角

由于单个柱塞产生的扭矩为

$$M_i = A p_i e \left(\sin \varphi_i + \frac{K}{2} \sin 2\varphi_i \right) \quad (4)$$

结合曲轴上的转矩平衡方程,得

$$\sum_{i=1}^5 M_i - B_p \frac{d\varphi}{dt} - T_L = J \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (5)$$

式中 B_p ——粘性阻尼系数 T_L ——外负载

J ——负载惯量

联立式(1)~(5),则有

$$\begin{cases} s_i = e \left[1 - \cos \varphi_i + \frac{K}{4} (1 - \cos 2\varphi_i) \right] \\ \alpha q_{\max} \sqrt{\frac{p_s - p_i}{p'_s}} = A \frac{ds_i}{dt} + \frac{V_{i0} + A s_i}{\beta_e} \frac{dp_i}{dt} \\ \sum_{i=1}^5 M_i - B_p \frac{d\varphi}{dt} - T_L = J \frac{d^2\varphi}{dt^2} \end{cases} \quad (6)$$

选择状态变量为

$$x_1 = \varphi \quad x_2 = \frac{d\varphi}{dt} \quad x_3 = p_1 \quad x_4 = p_2 \quad x_5 = p_3$$

得到对应的状态方程组为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{J} \left\{ A e \left[\sum_{i=1}^3 x_{i+2} \left(\sin \varphi_i + \frac{K}{2} \sin 2\varphi_i \right) + p_r \left(\sin \varphi_4 + \frac{K}{2} \sin 2\varphi_4 \right) + p_r \left(\sin \varphi_5 + \frac{K}{2} \sin 2\varphi_5 \right) \right] - B_p x_2 - T_L \right\} \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{q_{\max} \sqrt{\frac{p_s - x_3}{p'_s}} - A e x_2 \left(\sin \varphi_1 + \frac{K}{2} \sin 2\varphi_1 \right)}{V_{10} + A e \left[1 - \cos \varphi_1 + \frac{K}{4} (1 - \cos 2\varphi_1) \right]} \beta_e \\ \frac{dx_4}{dt} = \frac{q_{\max} \sqrt{\frac{p_s - x_4}{p'_s}} - A e x_2 \left(\sin \varphi_2 + \frac{K}{2} \sin 2\varphi_2 \right)}{V_{20} + A e \left[1 - \cos \varphi_2 + \frac{K}{4} (1 - \cos 2\varphi_2) \right]} \beta_e \\ \frac{dx_5}{dt} = \frac{q_{\max} \sqrt{\frac{p_s - x_5}{p'_s}} - A e x_2 \left(\sin \varphi_3 + \frac{K}{2} \sin 2\varphi_3 \right)}{V_{30} + A e \left[1 - \cos \varphi_3 + \frac{K}{4} (1 - \cos 2\varphi_3) \right]} \beta_e \end{cases} \quad (7)$$

当曲轴转角处于第 2 个角度区间 ($36^\circ \leq \varphi < 72^\circ$) 时,进油柱塞腔变为 I 和 II,回油柱塞腔为 III、IV 和 V。此时,有 $p_3 = p_4 = p_5 = p_r$ 。选择的状态变量为

$$x_1 = \varphi \quad x_2 = \frac{d\varphi}{dt} \quad x_3 = p_1 \quad x_4 = p_2$$

得第 2 个角度区间的状态方程。该方程组形式上与状态方程组(7)类似,只是进油与回油的柱塞腔数目不同。依次得出全部角度区间内的状态方程,从

而得到液压马达逆时针旋转的数学模型。

由表 2 可知,当改变高速电磁开关阀的通电相序时,液压马达的转向将改变。由于液压马达各个柱塞腔空间位置是对称的,因此若忽略一些加工误差以及流道的差异,液压马达顺时针与逆时针的模型应该是对称的。下面从定量的角度进行分析。由式(4)可知,单个柱塞腔的扭矩取决于两个因素:柱塞腔压力和曲轴转角。柱塞腔压力是模型中的状态量,由模型的求解来确定,只要初始值与模型相同,该状态量的变化轨迹也相同。下面考虑与曲轴转角相关的部分,记

$$\gamma_i = \sin \varphi_i + \frac{K}{2} \sin 2\varphi_i \quad (8)$$

根据约定,当液压马达顺时针旋转时,有 $\varphi' = -\varphi$ 。因此,对应的 γ'_i 为

$$\gamma'_2 = \sin \left(-\varphi + \frac{2\pi}{5} \right) + \frac{K}{2} \sin \left(-2\varphi + \frac{4\pi}{5} \right) \quad (9)$$

对式(9)进行恒等变化,得

$$\begin{aligned} \gamma'_2 &= \sin \left(-\varphi + \frac{2\pi}{5} \right) + \frac{K}{2} \sin \left(-2\varphi + \frac{4\pi}{5} \right) = \\ &= - \left(\sin \left(\varphi - \frac{2\pi}{5} \right) + \frac{K}{2} \sin \left(2\varphi - \frac{4\pi}{5} \right) \right) = \\ &= - \left(\sin \left(\varphi + \frac{8\pi}{5} \right) + \frac{K}{2} \sin \left(2\varphi + \frac{16\pi}{5} \right) \right) = -\gamma_3 \end{aligned} \quad (10)$$

同理, $\gamma'_3 = -\gamma_4, \gamma'_4 = -\gamma_3, \gamma'_5 = -\gamma_2$ 。因此,液压马达在顺时针旋转时,产生的驱动扭矩与逆时针旋转时的大小相等,方向相反。如果假设马达两个方向的粘性阻尼相同,并且不考虑柱塞腔尺寸以及流道尺寸等几何参数的差异,那么两个方向的模型是对称的。

3 模型仿真

在建立液压马达数学模型后,可以进行相应的仿真来初步研究液压马达的特性。仿真参数如表 3 所示,逆时针旋转时,第 1 个角度区间内的仿真模型

表 3 仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters

参数	数值
偏心距 e/m	0.005
曲轴半径 R/m	0.035
回油压力 p_r/MPa	1
连杆长度 l/m	0.03
柱塞直径 d/m	0.045
开关阀最大流量 $q_{\max}/L \cdot \min^{-1}$	6
油源压力 p_s/MPa	5
油液体积弹性模量 β_e/MPa	800
粘性阻尼系数 $B_p/N \cdot m \cdot s \cdot \text{rad}^{-1}$	2.1
负载惯量 $J/N \cdot m \cdot s^{-2}$	0.5

如图2所示。依次对各个角度区间内的模型进行仿真,可以得出与表1相对应的转速动态变化过程。

如果不考虑柱塞腔间差异,仿真结果如图3所示。由图3可知,液压马达转速从零开始增大,到达

最大值 105.3 r/min 后开始减小,到达局部最低点 82.3 r/min 后又开始上升,最后稳定在 [87.5 r/min, 88.5 r/min] 范围内;并且转速脉动随着工作柱塞腔数目的交替而周期变化。

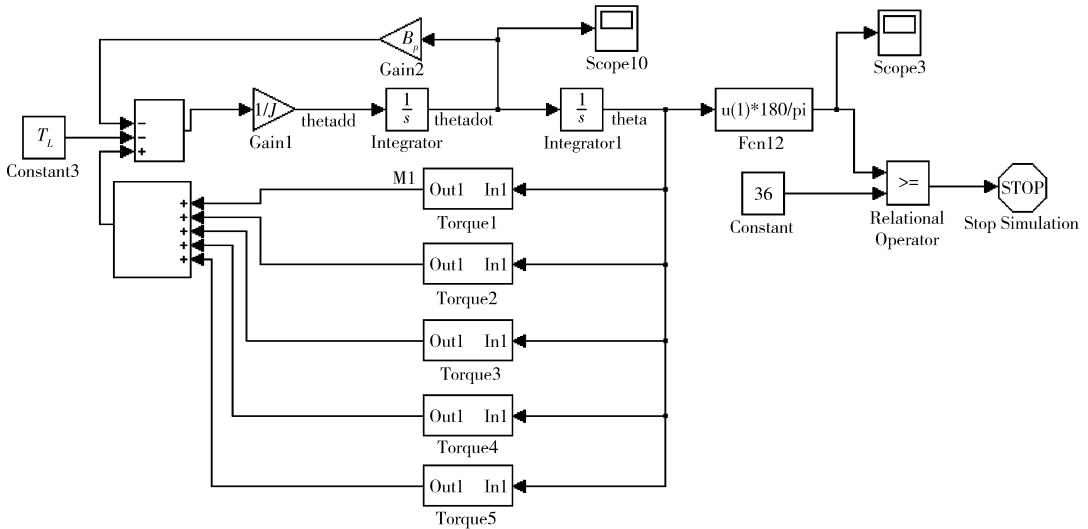


图2 仿真模型

Fig.2 Simulation model

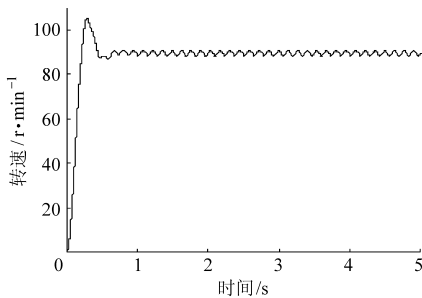


图3 逆时针旋转动态仿真曲线

Fig.3 Dynamic curve of counter-clockwise rotation

同理,对液压马达顺时针旋转的配流过程进行仿真。两个方向的仿真结果对比如图4所示。由前面的模型分析可知,不考虑控制腔体积差异的时候,两个方向的动态过程是对称的。图4中的仿真曲线证明了这一结论。

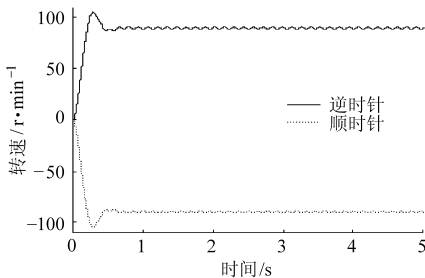


图4 双向配流对比仿真曲线

Fig.4 Comparison of two rotation directions

如果考虑马达柱塞腔之间的差异,那么模型中的对称性将受到破坏,仿真的结果如图5所示。由

图5可以看出,两个方向旋转并不完全对称。但是,两者变化的趋势相同。与图4的结果相比,明显的差别在于周期脉动的频率减小了。原因在于考虑容腔差异后,同样是3个柱塞腔进油,比如I、II、II或V、I、II,却有不同效果。

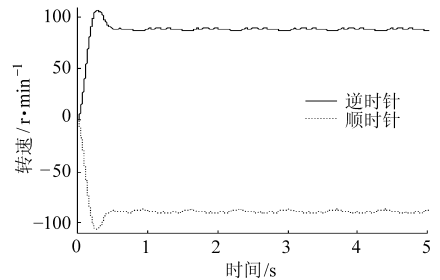


图5 考虑容腔差异的双向配流对比仿真曲线

Fig.5 Comparison of two rotation directions with consideration of volume differences

从数字配流式液压马达双向配流过程的仿真结果可以看出,按照表1和表2进行配流的液压马达可以正常运行。既然可以通过改变高速电磁开关阀的通电相序来获得不同的旋转方向,那么同样可以在马达的运行过程中对液压马达进行旋转方向的切换。

假设数字配流式液压马达首先按照逆时针方向旋转,然后在某个时间突然切换配流状态表,将旋转方向切换为顺时针。具体仿真结果如图6所示。由图6的结果可知,数字配流式液压马达转向切换,确实可以通过切换配流状态表来完成。

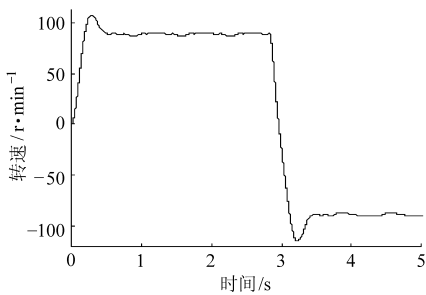


图 6 转向切换仿真曲线

Fig. 6 Simulation curve of direction change

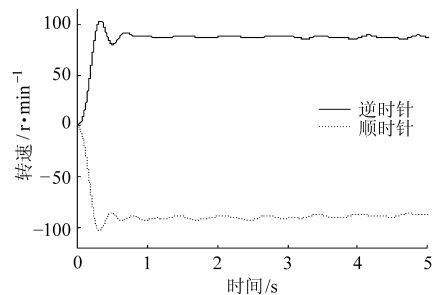


图 8 双向旋转试验曲线

Fig. 8 Experimental results of two directions

4 试验验证

从仿真的结果中可以看出,数字配流式液压马达可以完成传统液压马达的配流功能,使得液压马达正常运行。同时,可以在软件中通过切换配流状态表来方便地改变旋转方向。为了验证这些仿真结果的正确性,开发了该数字配流式液压马达样机,如图 7 所示。

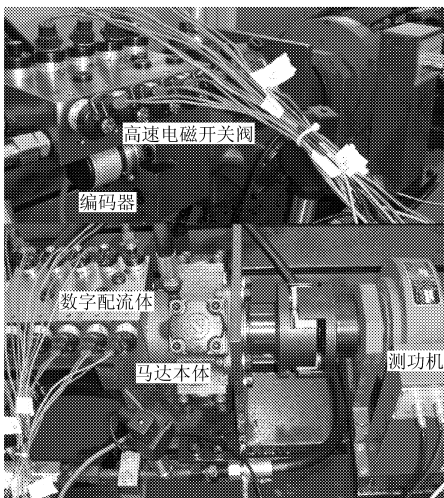


图 7 数字配流液压马达样机

Fig. 7 Model machine of digital distribution hydraulic motor

在该液压马达的样机上分别采用配流表 1、2 进行双向配流试验,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,在逆时针转速动态曲线中,首先到达一个峰值 102.5 r/min 后开始下降,到达局部最低点 80.2 r/min 后又重新上升,最后在一个小范围 [85.5 r/min, 88.6 r/min] 内波动,这一结果与仿真结果基本一致。另外可见,顺时针转动过程与逆时针转动过程基本趋势一致,但并不能完全对称,这主要与液压马达各个柱塞腔的初始容积以及流道容积有关,在仿真过程中已经得到证明。

此外,对液压马达进行换向试验,结果如图 9 所示。在图 9 中,首先液压马达按照逆时针方向旋转,经过一段时间后,切换配流状态表便使得液压马达换向为顺时针旋转。可见,数字配流式液压马达确实可以通过切换配流状态表实现双向旋转。这与仿

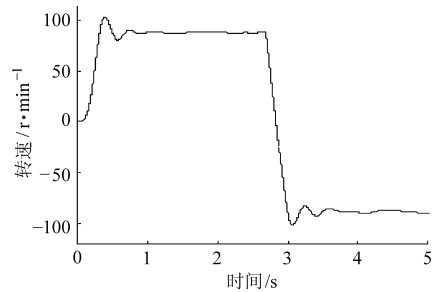


图 9 转向切换试验曲线

Fig. 9 Experimental results of direction change

真的结果也是一致的。

对比图 5 和图 8、图 6 和图 9,可以看出本文提出的液压马达动态数学模型是正确有效的。

5 讨论

前文主要研究了液压马达的配流特性,此时高速电磁开关阀工作在全开或全闭状态。当然,采用高速电磁开关阀后,该液压马达还具有另外一个重要的特性,即通过改变高速电磁开关阀的控制信号占空比来调节液压马达的转速。这时,高速电磁开关阀工作在 PWM 状态。对 PWM 信号而言,有两个主要参数,即占空比 α 和开关频率 f 。

对于不同开关频率 f 而言,即使在相同的占空比下,高速电磁开关阀的流量也不完全相同,以表 4 为例进行说明。由表 4 可以看出,同样是 60% 的占空比,50 Hz 时平均流量为 3.13 L/min,20 Hz 时平均流量为 3.24 L/min。

表 4 不同频率、不同占空比下的平均流量

Tab. 4 Average flow rate under different frequencies and duty cycles L/min

开关频率/Hz	占空比/%	
	80	60
50	4.36	3.13
20	4.52	3.24
10	4.59	3.33

对于数字配流式液压马达而言,由于不同开关频率的信号在同样占空比下的流量差别并不明显,

因此开关频率对液压马达响应时间以及切换时间的影响并不大。

另一方面,开关频率的变化对于液压马达转速稳定性有较明显的影响。对高速电磁开关阀而言,开关频率越高流量的不均匀性越小。以空载 80% 控制信号占空比为例,开关频率越低,液压马达的转速波动范围越大,如表 5 所示。

表 5 开关频率对液压马达转速稳定性的影响

Tab.5 Influence of on-off frequency on rotary speed

开关频率/Hz	转速/ $r \cdot \min^{-1}$
50	68 ~ 72
20	64 ~ 74
10	66 ~ 76

此外,采用高速电磁开关阀实现配流的液压马达,与传统液压马达相比,少了配流副的摩擦,因此,可以获得更低的转速。在不同负载转矩的情况下,测得液压马达最低转速如表 6 所示。从表 6 中可以看出,数字配流式液压马达的最低转速比传统液压马达大大降低了。

6 结束语

本文在介绍数字配流式液压马达特点与机理的基础上,分角度区间建立了液压马达的动态数学模

表 6 液压马达最低转速对比

Tab.6 Comparison of the lowest rotary speed

负载/ $N \cdot m$	最低转速/ $r \cdot \min^{-1}$	
	传统液压马达	数字配流式液压马达
0	46	3
10	63	9
20	70	15

型,并在模型的基础上进行了仿真。结果表明,数字配流式液压马达可以按照提出的配流状态表正常工作。并且,如果不考虑柱塞腔容积与流道容积差异等因素的影响,液压马达双向配流过程是完全对称的。在考虑这些差异时,双向配流出现一定程度的不同。此外,还进行了转向切换的仿真,结果表明数字配流式液压马达可以通过改变高速电磁开关阀的通电相序方便地完成转向切换。本文最后讨论了高速电磁开关阀开关频率对液压马达响应时间,切换时间以及稳定性的影响,并将数字配流式液压马达与传统液压马达进行了对比。结果表明,同样占空比下,开关频率越小,该液压马达转速波动越大;该液压马达的在不同负载下的最低转速相比传统液压马达明显降低了。仿真的结果在所开发的数字配流式液压马达样机上得到了较好的验证。

参 考 文 献

- 1 陈卓如. 低速大扭矩液压马达理论、计算与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1989: 3 ~ 5.
- 2 李勇,施光林,陈兆能. 新型液压马达配流盘受力分析与计算[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1):173 ~ 176.
Li Yong, Shi Guanglin, Chen Zhaoneng. Mechanical analysis and calculation of new-style distribution valves in hydraulic motors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):173 ~ 176. (in Chinese)
- 3 岳艺明,孔晓武. 阀配流式径向柱塞泵动态性能的仿真研究[J]. 机床与液压, 2005, 33(8):103 ~ 105.
Yue Yiming, Kong Xiaowu. Dynamic simulation of a flat valve type radial piston pump[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2005, 33(8):103 ~ 105. (in Chinese)
- 4 孟庆堂. 低速大扭矩液压马达的数字式配流与调速机构研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
Meng Qingtang. Research on digital distribution and speed adjusting mechanism of low speed high torque hydraulic motor [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- 5 孟庆堂,施光林,泮健. 一种数字配流与调速式低速大扭矩液压马达[J]. 机床与液压, 2008, 36(10):1 ~ 3.
Meng Qingtang, Shi Guanglin, Pan Jian. A new type of low speed high torque hydraulic motor using digital distribution and speed adjusting[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2008, 36(10):1 ~ 3. (in Chinese)
- 6 吴振顺. 液压控制系统[M]. 北京:高等教育出版社, 2008:78 ~ 80.
- 7 蒋文斌,刘寿康,邹柏华. 基于 Matlab/Simulink 的液压马达低速稳定性仿真研究[J]. 矿冶工程, 2008, 28(1):94 ~ 96.
Jiang Wenbin, Liu Shoukang, Zou Baihua. Research on simulation of hydraulic motor's low speed stability based on Matlab/Simulink[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(1):94 ~ 96. (in Chinese)