

DOI: 10.7652/xjtuxb201412003

混合型多泵多速马达传动输出特性的研究

闻德生, 刘巧燕, 刘忠迅, 陈功, 杨小勇, 杜永帅

(燕山大学机械工程学院, 066004, 河北秦皇岛)

摘要: 为了使定量泵输出多级定流量、不用减压阀适应多个压力以及定量马达输出多级定转速和定转矩, 设计了集多个单泵、单马达于一体具有高比功率的多泵多速马达, 并在此基础上提出了混合型多泵多速马达传动理论。根据多泵、多速马达的特点对其进行了分类, 分析了各类泵和马达在不同工作方式下的输出特性, 又进一步得出决定多泵输出特性的流量系数以及多速马达输出特性的转速、转矩系数。分析了排量系数对传动的的影响。结果表明: 通过改变工作方式能够使流量系数和转速、转矩系数在一定范围内变化, 变化范围取决于排量系数; 比例型多速马达的差动连接会产生死点和差动反向, 应确保转矩系数大于零。所设计的新型多泵多速马达在农业机械、行走机械、加工机械等领域有着广泛的应用前景。

关键词: 多泵; 多速马达; 传动; 差动连接; 排量系数; 输出特性

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)12-0015-06

Output Characteristics of Mix Type Multi-Pump and Multi-Motor Driving System

WEN Desheng, LIU Qiaoyan, LIU Zhongxun, CHEN Gong, YANG Xiaoyong, DU Yongshuai
(School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: A multi-pump and multi-motor system with high power density, which consists of several single pumps and motors, is designed to make the constant displacement pump output multi flows, to work in different pressures without a reducing valve, and to make the constant displacement motor output with multi speeds and torques. Transmission theory of the mix type multi-pump and multi-motor driving system is presented. Components are classified according to their characteristics, and their output performances in different connections are studied. Coefficients of the speed, torque and flow that determine the output quality are achieved. The effects of the displacement coefficient on the transmission are also analyzed. The results show that the output coefficients change within a certain range depending on the displacement coefficient, and that the torque coefficient should be greater than zero to avoid the dead center and the reversal point, which will occur in differential connections. This new multi-pump and multi-motor driving system is expected broad applications in the fields of agricultural machinery, mobile machines and processing machinery.

Keywords: multi-pump; multi-motor; transmission system; differential connection; displacement coefficient; output characteristics

液压传动系统的应用非常广泛^[1-2]。目前,各个行业广泛应用的液压传动系统都采用的是单泵和单马达^[3-6],这在实际应用中存在着一些问题:①一个系统需要多个不同的定流量,但一个定量泵无法实现,需要多个定量泵;②一个系统需要多个变流量,但一个变量泵无法实现,必须用多个变量泵;③当多个不同压力的系统用同一泵供油时,就必须使用减压阀;④单泵难以实现多执行机构在不同压力、流量下同步,更难以实现奇数不同缸径同步;⑤现有定量马达难以实现输出多个定转速、扭矩。面对这些难题,开发新型的液压传动是解决实际问题的方法之一。本文在发明专利多泵多速马达^[7-9]的基础上,提出了混合型多泵多速马达传动系统,同时对其输出特性进行了研究。

1 多泵、多速马达的原理及分类

多泵多速马达具有独特的结构^[10-13],根据壳体内所含单泵、单马达的特点,分为比例型与并联型2类。

一个壳体内有若干个不同排量单泵的泵为比例型多泵(作马达用时为比例型多速马达)。比例型多泵如图1所示,双定子泵由一个转子对应2个定子,并且一个转轴带动内、外多个排量成比例的单泵。

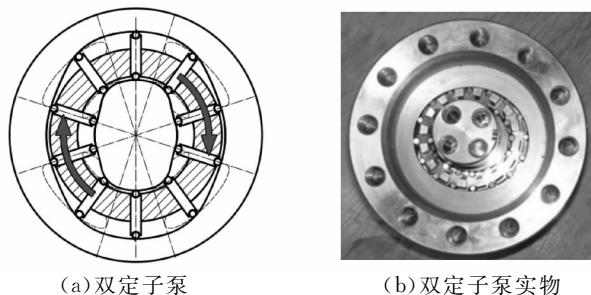


图1 比例型多泵

一个壳体内有若干个相同排量单泵的泵为并联型多泵。内外啮合齿轮泵属于比例型多泵。图2为多输入齿轮泵。其中,外啮合齿轮泵属于并联型多

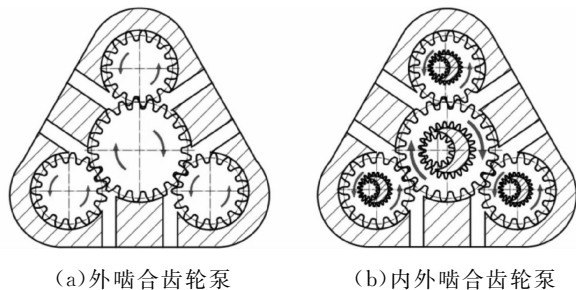


图2 多输入齿轮泵

泵,每组啮合的齿轮均满足液压泵的形成条件,可以形成排量相同的单泵。

2 混合型多泵多速马达传动

2.1 混合型多泵多速马达传动的组成

混合型多泵多速马达传动是建立在比例型、并联型多泵基础上的(对于元件的性能参数如内泄漏、波动性等,我们已经进行了一系列的研究^[14-20]),其传动示意图如图3所示,通过控制阀类与典型回路,多泵能实现同时驱动多个系统,多速马达能实现多种工作方式的切换,输出多级定转速、定转矩。

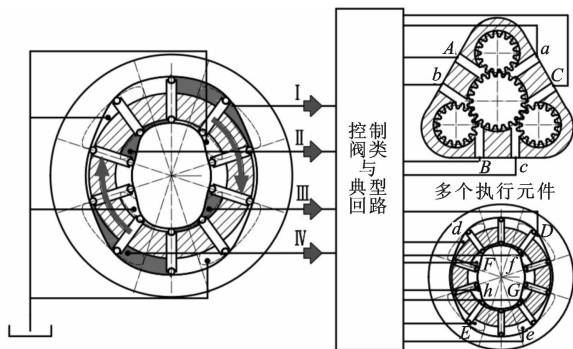


图3 混合型多泵多速马达传动示意图

混合型多泵多速马达实物连接照片如图4所示。



图4 多泵多速马达实物连接照片

2.2 多泵多速马达的符号规定

为设计混合型多泵多速马达传动图,对多泵多速马达的名称与职能符号做出以下规定。

(1)由 R 个单泵组成的并联型多泵,称为 R 并联多泵(R 为正整数);由多种排量单泵组成的比例型多泵,称为 $T_1-T_2-\dots-T_R$ 比例多泵, T 为相同排量单泵数量,且排量 T_R 最大, T_1 最小。

(2)规定并联型在一个壳体内形成几个单泵,就在圆圈内画几对三角;比例型用双圆圈区别不同排量的单泵,并用同轴符号将圆圈连接。3 并联多泵与2-2 比例多速马达如图5所示。

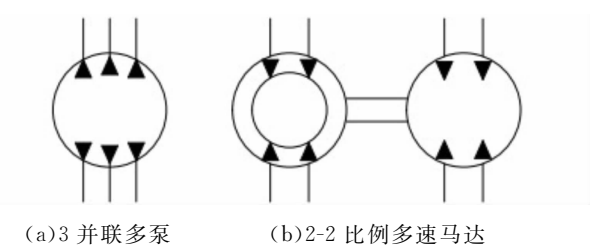


图 5 多泵多速马达符号示例

3 多泵多速马达的工作方式

在混合型多泵多速马达传动系统中,为满足不同的工作需求,通过不同连接方式的切换,多泵能够输出多种流量,多速马达能够输出多级转矩。

3.1 多泵的供油方式

多泵通过不同的连接方式可实现:①一个泵对一个系统供应多级定流量;②一个泵对多个系统不用减压阀提供多个不同的压力分别工作。

以 3 并联多泵为例,当其向一个系统供油时,可输出 3 种流量,连接方式如图 6 所示。

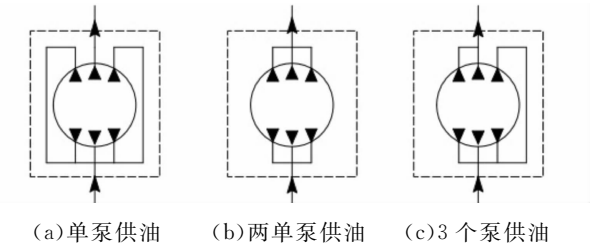


图 6 3 并联多泵工作方式

对于 R 并联多泵,设单泵排量为 q_0 ,电机转速为 n ,可得每种连接方式下的输出流量为

$$Q_1 = nq_0; Q_2 = 2nq_0; \cdots; Q_R = Rnq_0 \quad (1)$$

由式(1)可知,切换 R 并联多泵的连接方式可实现 R 级流量的输出,同时最多可向 R 个系统供油,不用减压阀适应 R 种不同工作压力。

再以 2-2 比例多泵为例,部分连接方式如图 7 所示。

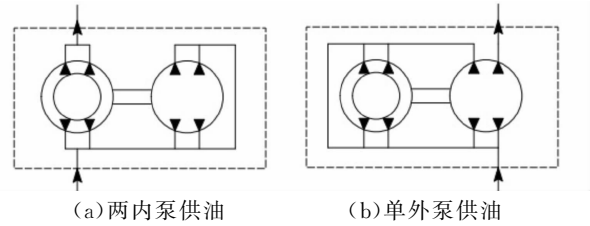


图 7 2-2 比例多泵的部分连接方式

设内泵与外泵的排量分别为 q_1 和 q_2 且 $q_1 < q_2$,则内泵、外泵单独供油时的输出流量为

$$Q_1^* = nq_1; Q_2^* = nq_2; \frac{Q_2^*}{Q_1^*} = \frac{q_2}{q_1} = C_2 \quad (2)$$

式中: C_2 为 2-2 比例多泵的排量系数。

对于 $T_1-T_2-\cdots-T_R$ 比例多泵,设 q_R 为最大单泵的排量,且排量随角标 R 的减小依次减小。由式(2)得

$$\frac{Q_R^*}{Q_1^*} = \frac{q_R}{q_1} = C_R \quad (3)$$

式中: C_R 为常数,是 $T_1-T_2-\cdots-T_R$ 比例多泵的排量系数。

根据式(2)、(3)可推得多泵在一定电机转速下输出流量的一般表达式

$$Q = (C_1X_1 + C_2X_2 + \cdots + C_RX_R)Q_1^* \quad (4)$$

式中: $C_1=1$; $X_1, X_2, \cdots, X_R$ 分别为参与工作的不同排量的单泵数量; $(C_1X_1 + \cdots + C_RX_R)$ 为多泵的流量系数。

式(4)对 2 种类型的多泵均适用,为并联多泵时 $C_R=1$ 。流量系数直接影响着多泵的输出特性,分析式(4)可知,其值由排量系数与工作方式决定,受两方面耦合因素的影响。首先,排量系数是多泵的固有参数,取决于各单泵之间的排量比,由多泵的结构特点与式(3)可知,排量系数的极限范围为 $[1, \infty)$ 。为了突出液压传动比功率大的优点,实现元件单位体积功率输出的最大化,往往希望比例多泵的排量系数在满足强度要求下尽量接近 1。其次,不同多泵的可选工作方式数量不同,排量系数也不同,如 1-1 比例多泵、2-2 比例多泵,这使得可选工作方式的数量随排量系数一同变化。综上所述,要合理确定流量系数的取值应综合考虑实际工作要求等条件,先根据流量系数式(4)得出多泵输出流量表,然后选择工作方式与排量系数。根据式(4)可得 2-2 比例多泵在不同组合方式下的流量系数,如表 1 所示。

表 1 2-2 比例多泵在不同组合方式下的流量系数

序号	内泵数	外泵数	流量系数
1	0	1	C_2
2	0	2	$2C_2$
3	1	0	C_1
4	1	1	$C_2 + C_1$
5	1	2	$2C_2 + C_1$
6	2	0	$2C_1$
7	2	1	$C_2 + 2C_1$
8	2	2	$2C_2 + 2C_1$

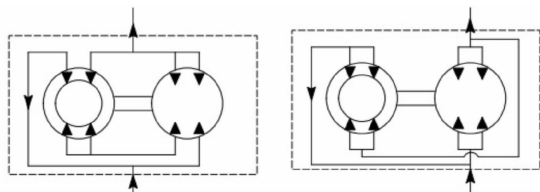
根据表1、2-2比例多泵能实现8种可选连接方式,应根据实际需求,确定流量系数后,综合考虑排量系数,并选定工作方式。

3.2 多速马达的执行方式

混合型多泵多速马达传动中,在输入流量一定的条件下,多速马达通过切换连接方式能够实现多种转速转矩的输出,为便于计算,设马达进出口压差均为 Δp ,输入流量为 Q 。

多速马达有普通工作方式与差动工作方式。当多速马达中各单马达的通油方向一致时,可形成多速马达的普通连接方式。普通工作方式与多泵对单一系统供油时的连接方式类似,故不再赘述。

若向比例型多速马达的部分单马达正向通油,部分反向通油,如图8所示,总排量较小的单马达在总排量较大的单马达带动下实现了泵的功能,形成了差动。比例型多速马达有多种差动方式。



(a) 2个单马达间的差动 (b) 4个单马达间的差动

图8 2-2比例多速马达的2种差动连接方式

2-2比例多速马达的内、外马达单独工作时,输出的转矩、转速分别为

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{\Delta p q_1}{2\pi} \\ n_1 &= \frac{Q}{q_1} \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} M_2 &= \frac{\Delta p q_2}{2\pi} \\ n_2 &= \frac{Q}{q_2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由 $q_2 > q_1$,可得

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{q_2}{q_1} = \frac{n_2}{n_1} = C_2 \quad (6)$$

同理,对于 $T_1-T_2-\cdots-T_R$ 比例多速马达,根据式(3)、(5)、(6)可推得多速马达输出转速、转矩的一般公式为

$$\left. \begin{aligned} M &= (C_1 X_1 + X_2 C_2 + \cdots X_R C_R) M_1 \\ n &= \frac{n_1}{(C_1 X_1 + X_2 C_2 + \cdots X_R C_R)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $C_1 = 1$; $(C_1 X_1 + \cdots + C_R X_R)$ 为转矩系数; $1/(C_1 X_1 + \cdots + C_R X_R)$ 为转速系数。

式(7)对2种类型多速马达的所有连接方式均适用。普通连接时, X 值均为正;差动连接时,反接单马达的 X 值为负,正接单马达的 X 值为正;为并联多速马达时, $C_R = 1$ 。转矩系数、转速系数的选

取同流量系数相似,故仅列出马达的输出表,如表2所示,其余不再赘述。

表2 2-2比例多速马达不同组合方式下转速、转矩的系数

序号	内马达数	外马达数	转矩系数	转速系数
1	1	1	$C_2 - C_1$	$1/(C_2 - C_1)$
2	1	2	$2C_2 - C_1$	$1/(2C_2 - C_1)$
3	2	1	$C_2 - 2C_1$	$1/(C_2 - 2C_1)$
4	2	2	$2C_2 - 2C_1$	$1/(2C_2 - 2C_1)$
5	0	1	C_2	$1/C_2$
6	0	2	$2C_2$	$1/2C_2$
7	1	0	C_1	$1/C_1$
8	1	1	$C_2 + C_1$	$1/(C_2 + C_1)$
9	1	2	$2C_2 + C_1$	$1/(2C_2 + C_1)$
10	2	0	$2C_1$	$1/2C_1$
11	2	1	$C_2 + 2C_1$	$1/(C_2 + 2C_1)$
12	2	2	$2C_2 + 2C_1$	$1/(2C_2 + 2C_1)$

对于并联型的多速马达,由于各单马达排量相同,不能实现差动,故并联型多速马达不适用于差动连接工况。

4 排量系数对混合型多泵、多速马达传动的影响

在混合型多泵多速马达传动中会出现死点、差动反向、重复输出的问题,这都与排量系数有关。

4.1 死点和差动反向

死点和差动反向将导致传动失败,这是不允许出现的。以2-2比例多速马达为例,如图9所示。

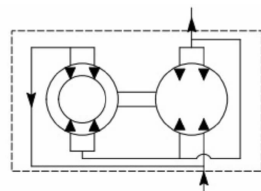


图9 两内一外马达差动连接

根据式(7),此时输出转矩为

$$M = (-2C_1 + C_2) M_1 \quad (8)$$

当 $-2C_1 + C_2 = 0$ 时,通过正反输入的高压油使马达产生的转矩相互抵消,出现死点。

当 $-2C_1 + C_2 < 0$ 时,将产生相反的转速、转矩,这与通油方向有关。

对于 $T_1-T_2-\cdots-T_R$ 比例多速马达,当转矩系数等于零时出现死点;当转矩系数变为负值时,将出现差动反向。

4.2 重复输出

同一比例型多泵或多速马达,在不同连接方式下,若元件的流量系数或转矩系数相同,便会出现重复输出,称之为内重复。传动系统中还存在外重复。以 2-2 比例多泵对 2-2 比例多速马达传动为例,如图 10 所示(阀未画出)。

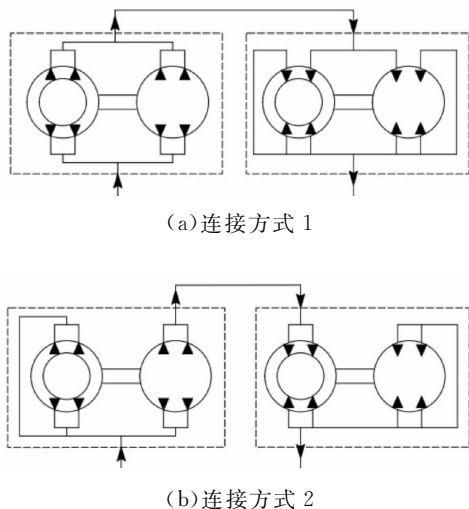


图 10 2-2 比例多泵对 2-2 比例多速马达传动的 2 种连接方式(阀未画出)

根据式(4)、(7),图 10a、10b 的输出转速分别为

$$\left. \begin{aligned} n_a &= \frac{(2C_1 + 2C_2)}{(C_1 + C_2)} A \\ n_b &= \frac{2C_2}{2C_1} A \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: A 为常数,与多泵和多速马达的参数及电机转速有关。

显然当 $C_2 = 2$ 时,由式(9)可得 $n_a = n_b$ 。在不同连接方式下,流量系数与转矩系数之比相等时,将会出现外重复,应予以避免。

综上所述,死点、差动反向、重复都与排量系数相关,排量系数的取值将直接影响多泵多速马达传动的有效连接数量与输出特性,因此在设计多泵多速马达传动系统时,应考虑这一重要参数。

5 结 论

本文通过对混合型多泵多速马达传动系统的分析,可以得出以下结论:

(1)混合型多泵多速马达传动是一种新型的传动方式,有着独特的性能与优点;

(2)比例型和并联型的多泵、多速马达均在一个壳体内形成多个泵(马达),是形成混合型多泵、多速马达传动的基础,同时还增加了液压元件的序列;

(3)多泵作为动力源可不用减压阀对多个不同类型传动系统提供流量,适应不同的工作要求,也可对一个系统输出多种不同的定流量;

(4)混合型多泵多速马达传动系统的输出质量很大程度上取决于排量系数,因此应予以重视。比例型的多速马达可以形成差动连接,增加了马达的输出数量,扩大了混合型多泵、多速马达传动的使用范围。

参考文献:

- [1] 李壮云. 液压元件与系统 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [2] 王益群, 张伟. 流体传动及控制技术的评述 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 95-99.
WANG Yiqun, ZHANG Wei. Summary of fluid power transmission and control technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 95-99.
- [3] 黎克英, 陆祥生. 叶片式液压泵和马达 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [4] 张军, 许贤良, 章晓飞. 低速大扭矩 I 型复合齿轮转子马达的机理研究 [J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 44-47.
ZHANG Jun, XU Xianliang, ZHANG Xiaofei. Theoretical study on the first kind of compound gear rotator motor with low speed and high torque [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 44-47.
- [5] 李少年, 魏列江, 冀宏, 等. 改进定子曲线对高压子母叶片泵特性的影响 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 219-223.
- [6] KIM G W, WANG K W. Enhanced control performance of a piezoelectric-hydraulic pump actuator for automotive transmission shift control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D Journal of Automobile Engineering, 2010, 224(2): 161-174.
- [7] 闻德生, 王远, 张少波, 等. 非对称型多泵多速马达特性的理论分析 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(12): 10-13
WEN Desheng, WANG Yuan, ZHANG Shaobo, et al. The theoretical analysis of the characteristics of asymmetric multi-pump and multi-speed motor system [J]. Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(12): 10-13.
- [8] 闻德生, 吕世君, 刘晓晨, 等. 等宽双定子泵和马达的原理研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1840-1844.

- WEN Desheng, LÜ Shijun, LIU Xiaochen, et al. Theoretic research on variable displacement of equal width double-stators pump and motor [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40 (11): 1840-1844.
- [9] 闻德生. 轴转动等宽曲线双定子多速马达: 中国, CN101847917B [P]. 2011-12-21.
- [10] WEN Desheng, WANG Zhili, ZHANG Yong, et al. Single-acting double-stator multi-pumps and multi-motors [J]. Journal of Chongqing University: English Edition, 2010, 9(4): 208-214.
- [11] WEN De-sheng, WANG Zhi-li. Output speed and flow of double-acting double-stator multi-pumps and multi-motors [J]. Journal of Zhejiang University: Science A Applied Physics & Engineering, 2011, 12 (4): 301-309.
- [12] WEN De-sheng. Theoretical analysis of output speed of multi-pump and multi-motor driving system [J]. Science China: Technological Sciences, 2011, 54(4): 992-997.
- [13] 闻德生, 张勇, 王志力, 等. 三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(3): 81-84.
- WEN Desheng, ZHANG Yong, WANG Zhili, et al. Rotating speed and torque of triple acting multi-pump and multi motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(3): 81-84.
- [14] 闻德生, 常雪, 张少波, 等. 双定子单作用液压马达转矩脉动研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 238-242.
- WEN Desheng, CHANG Xue, ZHANG Shaobo, et al. Analysis of torque pulsation for double-stator single-acting multi-motors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (2): 238-242.
- [15] 闻德生, 郑珍泉, 杨杰, 等. 双作用双定子凸轮转子叶片电动机转矩脉动分析 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2013, 34(5): 524-528.
- WEN Desheng, ZHENG Zhenquan, YANG Jie, et al. Torque ripple analysis of double action CAM rotor blade motor with double stator [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2013, 34 (5): 524-528.
- [16] 闻德生, 张少波, 王远, 等. 双作用滑块型双定子马达内漏特征与优化 [J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31 (3): 242-247.
- WEN Desheng, ZHANG Shaobo, WANG Yuan, et al. Characteristics of internal leakage in double-acting double-stator slider motors and optimization [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 242-247.
- [17] 闻德生, 周瑞彬, 高俊峰, 等. 双定子多作用力偶液压马达的原理分析 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48 (5): 67-71.
- WEN Desheng, ZHOU Ruibin, GAO Junfeng, et al. Principle of double-stator multi-acting couple hydraulic motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(5): 67-71.
- [18] 闻德生, 徐添, 杜孝杰, 等. 多泵/多马达容积调速回路的理论分析 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(9): 1294-1298.
- WEN Desheng, XU Tian, DU Xiaojie, et al. Theoretical analysis of volume speed-regulating circuit of multi-pump and multi-motor [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(9): 1294-1298.
- [19] 闻德生, 郭高峰, 杜孝杰, 等. 新型液压多泵在液压调速系统中的节能分析 [J]. 中国机械工程, 2011, 22 (24): 2966-2969.
- WEN Desheng, GUO Gaofeng, DU Xiaojie, et al. Research on energy-saving methods for hydraulic speed-regulating circuit based on multi-pump [J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(24): 2966-2969.
- [20] 闻德生. 液压元件的创新与应用 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.

[本刊相关文献链接]

- 闻德生, 周瑞彬, 高俊峰, 等. 双定子多作用力偶液压马达的原理分析. 2014, 48(5): 67-71 + 106. [doi: 10.7652/xjtuxb201405012]
- 闻德生, 张勇, 王志力, 等. 三作用多泵多马达输出转速和转矩的理论分析. 2011, 45(3): 81-84. [doi: 10.7652/xjtuxb201103015]
- 闵为, 冀宏, 王峥嵘, 等. 单级压力调节阀的阻尼孔射流响应特性分析. 2014, 48(6): 80-85. [doi: 10.7652/xjtuxb201406014]
- 吴越, 杨志刚, 刘勇, 等. 压电振子对压电泵极限输出压力的影响. 2013, 47(4): 64-72. [doi: 10.7652/xjtuxb201304013]
- 孙毅, 李阳, 姜继海. 柱塞泵滑靴卡盘与球碗的受力分析及试验研究. 2013, 47(2): 103-108. [doi: 10.7652/xjtuxb201302018]
- 于安才, 姜继海. 液压混合动力挖掘机回转装置控制方式的研究. 2011, 45(7): 30-33. [doi: 10.7652/xjtuxb201107006]
- 任燕, 阮健, 贾文昂. 2D 阀控电液激振器偏置控制的特性分析. 2010, 44(9): 82-86. [doi: 10.7652/xjtuxb201009017]

(编辑 刘杨 苗凌)