

新型液压多泵在液压调速系统中的节能分析

闻德生 郭高峰 杜孝杰 徐添 赵超

燕山大学,秦皇岛,066004

摘要:针对液压系统的节能问题,提出了几种基于新型液压元件(多泵)的调速回路节能方法。这几种方法采用的核心元件是多泵,该泵可在一个泵体内形成多个不同流量的泵,有多个进油口和多个出油口,可根据执行元件的不同工况要求切换油路的连接方式,使泵的输出功率与负载功率合理匹配,从而达到提高回路效率、减少能耗的目的。阐述了单作用多泵双压节流调速回路、双作用多泵数字节流调速回路、多泵数字容积调速回路等几种新型回路的工作原理,并对多泵数字节流调速回路在恒载下的功率特性进行了分析比较,结果表明,这几种回路不同程度上减小了功率损失,提高了回路的效率。

关键词:多泵/多马达传动;节能方法;多泵调速回路;功率匹配

中图分类号:TH137.32

文章编号:1004—132X(2011)24—2966—04

Research on Energy-saving Methods for Hydraulic Speed-regulating Circuit Based on Multi-pump

Wen Desheng Guo Gaofeng Du Xiaojie Xu Tian Zhao Chao

Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: Based on a new hydraulic component (multi-pump), several novel speed-regulating circuits were proposed. The core component of these circuits is multi-pump in which more pumps with different flows are formed. It has more inlet ports and more outlet ports, according to various working conditions of the actuator needed, it changes the connection of pipes, which makes the pumps output power match the load power reasonably, by doing so, the problem of too much power loss can be solved. The operating principle of single-acting multi-pump and double-pressure throttle speed-regulating circuit, the double-acting multi-pump digital control inlet throttle speed-regulating circuit and the double-acting multi-pump digital control stepless speed-regulating circuit were stated, then the power performance of the multi-pump digital control inlet throttle speed-regulating circuit under constant load was analyzed. The results show that these circuits reduce the loss of power and improve the efficiency.

Key words: multi-pump and multi-motor drive system; energy-saving method; multi-pump speed-regulating circuit; power match

0 引言

液压传动以其传动平稳、调速方便、功率体积比大等优良特性在许多领域得到了广泛应用,但是液压传动系统的效率较低,因此,节能一直是液压传动中的重要研究课题之一^[1-3]。在液压调速技术中,节流调速、容积调速及其派生的各种调速回路占据主导地位。一般的容积调速没有溢流和节流损失,效率较高,但需要一套复杂的变量机构,对介质要求较高,噪声也大。近年来发展起来的变频液压调速技术虽然能从全局上提高效率,但国内研究尚不成熟,应用领域还不广,且成本较高^[4-5]。节流调速回路具有结构简单、工作可靠、成本低、使用维护方便、调速范围大等优点,但由

于其能量损失大、效率低、发热量大,故一般仅用于功率不大的场合,其应用领域受到限制^[6]。所以,探讨液压调速系统的节能途径与方法具有重大现实意义。本文从多泵传动原理出发,提出了几种基于新型液压元件(多泵)的调速回路方案。

1 多泵工作原理

该类新型泵的主要特点是在一个壳体内形成了内泵和外泵,单作用时一对内外泵,双作用时两对内外泵,多作用时多对内外泵,泵的个数等于 $2 \times n$,其中 n 为作用数。这些泵可以独立向系统供油,也可联合向系统供油,在控制系统的控制之下,当其中一个泵工作时其余泵卸荷,这就只有一个流量输出数,多个泵不同组合就形成了多个不同的流量输出数,形成多输出泵。多泵的结构及

收稿日期:2011—08—29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975246)

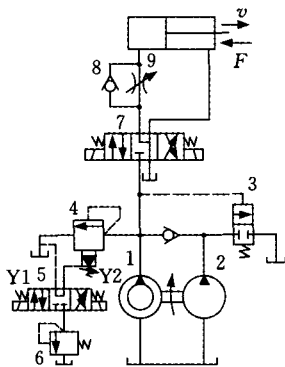
工作原理见文献[7]。

2 单作用多泵双压节流调速回路节能技术

对于存在快慢速交替工作工况的液压机械，采用传统单定量泵节流调速的方法控制时系统效率较低。此类系统的特点是，高速时载荷小，低速时载荷大，且最高速度与最低速度相差悬殊。而设计系统时，必须按工作循环中的最高速度与最大载荷选择液压泵。因此系统运行时，液压泵始终按恒定的最大流量向系统供油，从而导致系统重载慢速工况时，大部分油液高压溢流，容积效率降低。此类系统的效率通常在30%以下，从而造成了极大的能源浪费和系统工作稳定性的下降^[8]。本文提出的基于单作用多泵的双压节流调速回路特别适用于这种工况，能有效地降低系统能耗，提高效率。

2.1 多泵双压节流调速回路原理

单作用多泵双压节流调速回路系统原理如图1所示，回路中的动力元件选用单作用多泵，此种泵在一个壳体内形成了一个较小流量的内泵和一个相对较大流量的外泵，可以根据系统要求的两级工进速度选择两泵的流量比例系数。回路利用压力传感和远程控制原理对系统进行双级压力控制，特别适合两种工进速度、两级负载的液压设备。当液压缸轻载高速工作时，电磁铁 Y1 通电，



1. 内泵 2. 外泵 3. 卸荷阀 4. 高压溢流阀
5、7. 电磁换向阀 6. 低压溢流阀 8. 单向阀 9. 单向节流阀

图1 单作用多泵双压节流调速回路

系统压力由低压溢流阀6决定，压力传感卸荷阀3处于下位，内泵1与外泵2同时向系统供油；液压缸重载低速工作时，电磁铁 Y2 通电，系统压力由高压溢流阀4决定，压力传感卸荷阀3切换至上位，内泵1单独向系统供油，外泵2经压力传感卸荷阀3卸载压力；当液压执行器短期停留时，Y1、Y2同时断电，2台泵均经溢流阀4卸载压力，从而实现了多泵输出功率与负载功率相适应（相匹配），达到了节能的目的。

2.2 回路功率分析比较

假设回路中节流阀和溢流阀除流过阀口的流量外无漏损，不计管路中的功率损失。下面对多泵双压节流调速回路与普通单定量泵双压节流调速回路在两种工况下进行节能分析。

根据不同工况，设轻载高速工况下液压缸所需的流量和压力分别为 q_1 、 p_1 ，重载低速工况下液压缸所需要的流量和压力分别为 q_1 、 p_2 (p_1 和 p_2 分别由高压溢流阀和低压溢流阀调定)。普通单定量泵双压节流调速回路选择额定流量为 q_1 的定量单泵为系统供油，而多泵双压节流调速回路中，选择内泵额定流量为 q_2 、外泵额定流量为 q_3 的多泵，令 $q_1 = q_2 + q_3$ 。

2.2.1 普通单定量泵双压节流调速回路功率分析

轻载高速工况时系统功率为

$$P_1 = p_1 q_1$$

重载低速工况时系统功率为

$$P_2 = p_2 q_1$$

2.2.2 多泵双压节流调速回路功率分析

轻载高速工况时系统功率为

$$P'_1 = p_1 (q_2 + q_3) = p_1 q_1 = P_1$$

重载低速工况时系统功率为

$$P'_2 = p_2 q_2 = p_2 (q_1 - q_3) = P_2 - p_2 q_3 = P_2 - \Delta P$$

式中， ΔP 为节省的功率。

由分析可知，在高速轻载工况下，两种回路的功率相同；而在低速重载工况下，多泵双压节流调速回路比普通单泵节流调速回路节省 ΔP 的溢流损失，从而实现了节能。

上述双压节流调速回路只适用于两级负载、两级工进速度的回路系统。对于有多级压力、多级速度的回路系统可采用多作用的多泵和控制阀来实现。图2所示为采用双作用的多泵各泵单独供油的四级负载压力回路。

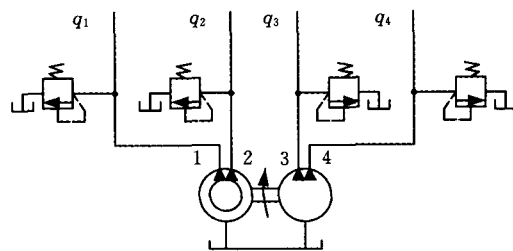


图2 双作用多泵四级负载压力回路

3 双作用多泵数字控制节流调速回路节能技术

对于功率和调速范围都很大的大流量液压系统，采用定量泵节流调速显然是不合理的，这时，

一般采用变量泵容积调速回路、多泵数字控制的分级或无级调速回路。统计资料表明,当系统流量很大时,变量泵系统效率高的长处往往被其造价高、噪声大的短处所抵消。普通的多泵数字回路一般包含 3 台以上的定量泵组,依靠泵组的不同组合使回路输出不同等级的流量,以满足系统不同阶段、不同工况下的不同流量的需要。下面介绍的多泵数字调速回路是采用一个多作用的多泵代替原来的定量泵组,与原来的定量泵组相比,减小了装机容量,简化了管路布局,降低了成本。

由于多泵的结构形式很多,不同作用的多泵出油口数也不同,由其组成的节流调速回路也不尽相同,所以此处以双作用多泵为例,介绍由其组成的节流调速回路的原理和功率特点。

3.1 双作用多泵节流调速回路系统原理

图 3 是基于双作用多泵的节流调速回路系统原理图。与普通节流调速回路相比,其特点是采用双作用多泵替代普通的定量泵。此泵可在一个壳体内形成两个流量相同的内泵和两个流量相同的外泵,通过可编程控制器 PLC 控制 4 个电磁换向阀对这 4 个泵进行卸荷或供油控制,自动产生工作循环中各阶段所需要的流量,同时通过调节节流阀的开口面积即可实现无级调速。采用多泵数字控制技术的液压系统具有容积调速的特点,其实质是流量匹配。

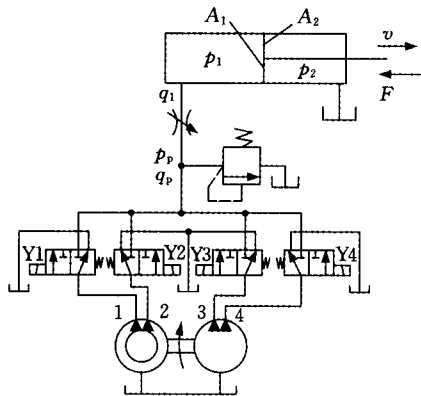


图 3 双作用多泵节流调速回路

3.2 双作用多泵节流调速回路功率特性分析

假设回路中液压泵和液压缸的效率均为 1, 节流阀和溢流阀除流过阀口的流量外无漏损, 不计管路中的功率损失。下面分析液压缸在恒载下回路的功率特性并与普通节流调速回路进行比较。

当液压缸在恒载下工作时, 工作压力 p_1 、液压泵供油压力 p_p 、节流阀工作压差 Δp_{T1} 都是定值, 工作流量 q_1 只随节流阀通流截面积变化。假设无杆腔面积 $A_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 的液压缸所需要的

速度 v 的范围为 $0 \sim 12 \text{ m/min}$, $p_p = 6 \text{ MPa}$, 不考虑管路及换向阀的泄漏。对于多泵调速回路, 选择内外泵流量比例系数为 0.5、额定流量为 15 L/min 的双作用多泵, 则单个内泵额定流量为 2.5 L/min , 单个外泵额定流量为 5 L/min 。根据液压缸的速度要求 ($0 \sim 12 \text{ m/min}$), 调节 4 个换向阀的通断, 使多泵按表 1 所示的工况工作。

表 1 双作用多泵各泵工作状况

$v(\text{m/min})$	q_1 (L/min)	电磁铁通断			
		Y1	Y2	Y3	Y4
0~2	0~2	+	+	-	-
2~4	2~4	+	+	-	-
4~6	4~6	+	-	+	-
6~8	6~8	-	-	+	+
8~10	8~10	+	-	+	+
10~12	10~12	+	+	+	+

注：“+”表示电磁铁通电，“-”表示电磁铁断电。

普通节流回路系统选择相同额定流量 (15 L/min) 的普通定量泵为系统供油。

根据多泵中各泵的工作状况求得一系列 q_p 的值, 又由回路的输入功率公式 $P_p = p_p q_p$ 继而可求得 P_p 的不同状态值。以速度 v 为横坐标, 功率 P 为纵坐标, 经分析可得到两种回路在恒载下的功率特性曲线如图 4、图 5 所示^[9]。

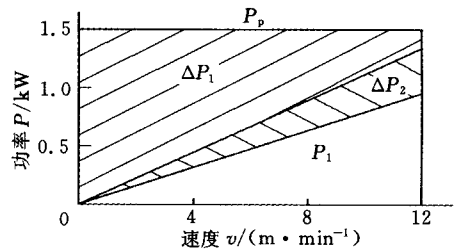


图 4 普通节流调速回路在恒载下的功率特性

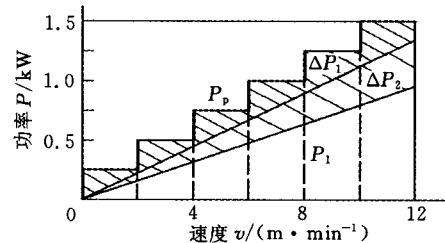


图 5 双作用多泵节流调速回路在恒载下的功率特性

同理, 当改用三作用、四作用等多作用多泵时, 由于泵的出油口增加, 连接方式增加, 使泵的供油量可以更好地匹配液压缸的所需流量, 溢流损失会更小, 回路会有更多的高效工作点和更高的效率, 节能效果更好。

4 多泵数字控制无级容积调速回路节能技术

上述多泵数字控制节流调速回路虽然近似地

达到了流量匹配,但仍然存在节流和溢流损失,回路效率的提高受到限制。如果将图3中的节流阀去掉,加上一个小流量的变量泵,则形成了图6所示的双作用多泵数字控制无级容积调速回路。

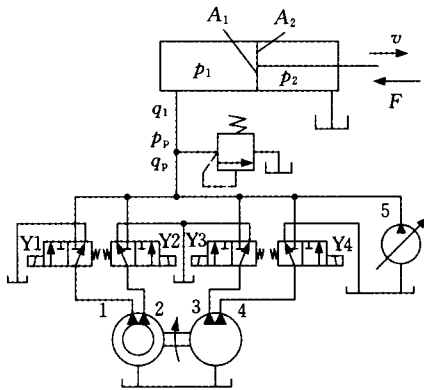


图6 双作用多泵数字控制无级调速回路

选择内外泵流量比例系数为0.5的双作用多泵,假设内泵额定流量为 q_0 ,则外泵额定流量为 $2q_0$,泵的总额定流量为 $6q_0$ 。变量泵的额定流量选为 q_0 ,图6中溢流阀作安全阀使用。当不使用变量泵5时,通过PLC控制4个电磁换向阀对这四个泵进行卸荷或供油控制,回路可提供按等差级数排列的6级流量,如表2所示,因而可以实现液压缸的6级变速,构成双定子泵数字控制的有级容积调速回路。当启用变量泵时,则此回路可以完成 $0 \sim 7q_0$ 的无级调速,构成双定子泵数字控制的无级容积调速回路。无论是有级调速还是无级调速,此回路在液压缸正常工作时均没有溢流和节流损失,系统效率大大提高,节能效果良好。这种回路在塑料注射机、挤压机、机床机械、行走机械等多种液压系统中将会有广阔的应用前景。

表2 双作用多泵数字控制有级容积调速回路流量矩阵表

电磁铁	Y1	-	+	+	+	-	+	+
	Y2	-	-	+	-	-	-	+
	Y3	-	-	-	+	+	+	+
	Y4	-	-	-	-	+	+	+
总流量		0	q_0	$2q_0$	$3q_0$	$4q_0$	$5q_0$	$6q_0$
工作泵	1	-	+	+	+	-	+	+
	2	-	-	+	-	-	-	+
	3	-	-	-	+	+	+	+
	4	-	-	-	-	+	+	+

注:“+”表示电磁铁通电或液压泵向系统供油;“-”表示电磁铁断电或液压泵卸荷

5 结论

(1)由定量多泵组成的节流调速回路中,泵和

负载之间有多个流量匹配高效工作点,溢流损失很小,与普通节流调速回路相比降低了溢流损失,提高了回路的效率。

(2)在由定量多泵和小流量变量泵组成的多泵数字控制容积调速回路中,去除了节流阀的应用,通过多泵油口的不同组合和改变小流量泵的排量实现了无级容积调速,工作时没有溢流和节流损失,系统效率得到进一步提高。

参考文献:

- [1] Lu Yongxiang. Historical Progress and Prospects Offluid Power Transmission and Control[C]//Proceedings of 5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Beijing: International Academic,2001:62-68.
- [2] Kaya D, Alptekin Yagmur E, Suleyman Yigit K, et al. Energy Efficiency in Pumps[J]. Energy Conversion and Managerment,2008,49:1662-1673.
- [3] Lee Sang-Yul, Hong Yeh-Sun. Effect of CrSiN Thin Film Coating on the Improvement of the Low-speed Torque Efficiency of Hydraulic Piston Pump[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202:1129-1134.
- [4] Xu Bing, Yang Jian, Yang Huayong. Comparision of Energy-saving on the Speed Control of the VVVF Hydraulic Elevator with and without the Pressure Accumulator[J]. Mechatronics, 2005, 15: 1159 - 1174.
- [5] 彭天好,徐兵,杨华勇. 变频液压技术的发展及研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版),2004,38(2):215-221.
- [6] 王丽凤. 节流调速系统的工作点分析[J]. 煤矿机械, 2007,28(7):66-68.
- [7] 闻德生,高俊,王志力,等. 双作用多泵多马达传动中马达输出转矩分析[J]. 中国机械工程,2010,21(23):2836-2838.
- [8] 张利平,周兰午,刘芬,等. 定量泵液压系统节能方法研究[J]. 中国机械工程,2001,12(增刊):36-38.
- [9] 王积伟,章宏甲,黄谊. 液压传动[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2007.

(编辑 苏卫国)

作者简介:闻德生,男,1954年生。燕山大学机械工程学院教授。研究方向为新型液压元件和液压传动的新型应用领域。获中国发明专利8项,实用新型专利5项。出版专著4部,发表论文80余篇。郭高峰,男,1985年生。燕山大学机械工程学院硕士研究生。杜孝杰,男,1985年生。燕山大学机械工程学院硕士研究生。徐添,男,1986年生。燕山大学机械工程学院硕士研究生。赵超,男,1985年生。燕山大学机械工程学院硕士研究生。