

二次调节流量耦联系统功率匹配研究

刘宇辉, 姜继海

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:根据二次调节技术的特点,提出了1种二次调节静液传动流量耦联系统,实现对制动动能和重物势能的能量回收与重新利用。介绍了该系统的基本组成、工作原理和特点。建立了用液压蓄能器子系统实现能量回收的二次调节流量耦联系统的数学模型,分析了该系统的功率匹配原理,并进行了试验研究。试验结果表明:该系统可以实现以系统消耗功率最小为目标的能量最优功率匹配以及以电动机性能最优为目标的电动机性能最优功率匹配。

关键词:二次调节;流量耦联系统;功率匹配;液压蓄能器

中图分类号:TH 137 **文章编号:**1005-9830(2007)06-0701-05

Matching Power of Flow Coupled System with Secondary Regulation

LIU Yu-hui, JIANG Ji-hai

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In view of the characteristics of the secondary regulation technique, a flow coupled system with secondary regulation (FCSSR) is studied to realize the energy recovery about braking energy and potential energy. The system composition, working principle and characteristics are analysed. A mathematical model of FCSSR is established, and the principle of power matching is studied. Experimental results indicate FCSSR can realize the optimum matching power with the aim of minimum energy consumption or electrical motor optimum performance.

Key words: secondary regulation; flow coupled system; power matching; hydraulic accumulator

在一些动力传动系统中,存在负载力的方向与执行元件运动方向相同的负值负载工况,此时负载可以变成动力源,例如抽油机的抽油杆、电梯和提升机的轿箱等的下降过程。负值负载的存在使系统易产生超速情况,对传动系统的控制性能产生不利影响。从能量流的角度出发,解决带有

负值负载的问题有2种方法,一种方法是把负值负载所提供的机械能转化为其他形式的能量无偿地消耗掉;另一种方法是把这些能量回收起来以备再利用。用能量回收方法解决负值负载问题不但能节约能源,还可以减少系统的发热和磨损,提高设备的使用寿命。

收稿日期:2007-05-14 修回日期:2007-10-08

基金项目:国家自然科学基金(50375033)

作者简介:刘宇辉(1970-),男,黑龙江泰康人,副教授,博士生,主要研究方向:液压控制系统,E-mail: liuyuhui@hit.edu.cn;通讯作者:姜继海(1957-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,主要研究方向:流体传动及控制方面的研究,E-mail: jjhlxw@hit.edu.cn。

二次调节流量耦联系统能方便地实现对重物势能和制动动能的回收,解决上述工况中的负值负载问题。该文主要研究用液压蓄能器实现重物势能回收的二次调节流量耦联静液传动系统的基本组成、工作原理和特点,分析该系统中液压蓄能器、电动机和负载之间的功率匹配关系,为节能型二次调节技术的进一步研究奠定基础。

1 二次调节流量耦联系统工作原理

1.1 二次调节流量耦联静液传动系统概念

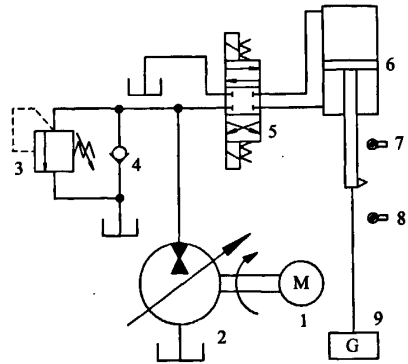
二次调节静液传动技术的一般定义是在恒压网络中对二次元件(液压马达/泵)无节流的进行闭环控制的液压传动技术^[1-4]。该文将二次调节技术由压力耦联系统扩展到流量耦联系统,引入二次调节流量耦联静液传动系统的概念如下:二次调节流量耦联静液传动系统是在流量耦联系统中对具有四象限工作能力的能量转换元件进行无节流闭环控制的系统。

二次调节流量耦联系统是二次调节技术与流量耦联系统的结合,其目的是发挥各自的优势,提高系统的控制性能,同时提供某些工况下能量回收的可能性。二次调节流量耦联静液传动系统是对原来基于压力耦联系统的二次调节静液传动系统的扩展,进一步扩大二次调节静液传动技术的应用领域。

1.2 二次调节流量耦联系统工作原理和特点

图1所示为执行元件是液压缸的二次调节流量耦联系统。系统的压力取决于液压缸所带负载,通过调节二次元件2的排量实现对液压缸速度的控制。利用行程开关发出讯号使换向阀换向,实现液压缸的往复运动。当负载运动有位能变化时,具有四象限工作能力的二次元件2在提升重物时工作在液压泵工况,向负载输出能量;在重物下降时,二次元2工作在液压马达工况,可将重物势能进行回收,回收的能量可以根据回收方式的不同转换成其它形式的能量,被储存待用或直接在下一个工作周期中被利用。二次调节流量耦联系统有3种能量回收形式,分别是用液压蓄能器实现的液压能回收、用机械(惯性飞轮)实现的机械能回收和用电动机实现的电能回收。

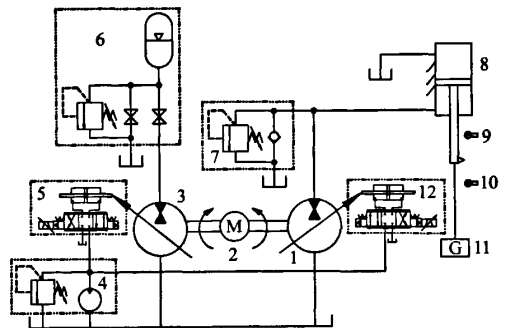
3种能量回收方式中,液压蓄能器回收具有成本低、能量存储密度大、安全可靠等特点,在工程中具有广阔的应用前景,该文主要研究此种方法。



1.电动机; 2.二次元件; 3.溢流阀; 4.单向阀; 5.换向阀; 6.液压缸; 7,8.行程形状; 9.负载

图1 二次调节流量耦联系统原理图

图2所示为用液压蓄能器实现能量回收的二次调节流量耦联静液传动系统原理图。这种能量回收形式是把液压缸和负载的势能通过二次元件3和液压蓄能器组成的能量回收子系统的作用转化为液压能。在液压缸下行的过程中,液压缸在负载重力作用下输出高压油驱动工作在马达工况的二次元件1,二次元件1与电动机一起驱动二次元件3,此时二次元件3工作在液压泵工况,向液压蓄能器中充压,实现了重物势能到液压能的转换和回收。当下个工作循环提升负载时液压蓄能器释放能量,实现已回收能量的再利用。



1,3.二次元件; 2.电动机; 4.控制油路子系统; 5.电液控制组件; 6.液压蓄能器组件; 7.安全阀组件; 8.液压缸; 9,10.行程开关; 11.负载

图2 二次调节流量耦联系统液压能回收形式原理图

2 二次调节流量耦联系统数学模型

该文建立驱动垂直负载的二次调节流量耦联静液传动系统的数学模型,采用液压蓄能器子系统实现能量的回收与重新利用,系统原理图参见

图 2。系统工作过程分为提升负载和负载下降 2 个过程,下面分别进行分析。

2.1 提升负载的数学模型

(1) 二次元件 1 在泵工况时的输出流量 q_1

$$q_1 = D_1 n - (C_{ip1} + C_{ep1}) p_1 \quad (1)$$

式中: n 为电动机的转速, D_1 为二次元件 1 的实际控制排量, C_{ip1} 为二次元件的内泄漏系数, C_{ep1} 为二次元件的外泄漏系数, p_1 为液压缸有杆腔的压力。

(2) 液压缸 8 的流量连续性方程

$$q_1 = A_c \frac{dy}{dt} + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} + C_{ic} p_1 \quad (2)$$

式中: A_c 为液压缸有杆腔有效作用面积, y 为活塞杆的位移, C_{ic} 为总泄漏系数, $C_{ic} = C_{ic} + C_{ec}$, C_{ic} 为内泄漏系数, C_{ec} 为外泄漏系数, β_e 为工作液体的体积弹性模量, V_0 为液压缸中位时有杆腔的容积。

由式(1)和(2)得二次元件 1 和液压缸的流量连续性方程

$$D_1 n - (C_{ip1} + C_{ep1}) p_1 = A_c \frac{dy}{dt} + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} + C_{ic} p_1$$

整理得

$$D_1 n = A_c \frac{dy}{dt} + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} + C_{pc} p_1 \quad (3)$$

式中: C_{pc} 为二次元件 1 的出油腔到液压缸的总泄漏系数, $C_{pc} = C_{ip1} + C_{ep1} + C_{ic}$ 。

(3) 液压缸和负载的力平衡方程

$$A_c p_1 = m_L \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} + m_L g + f \quad (4)$$

式中: m_L 为负载、活塞杆和活塞组件的总质量, B_c 为粘性阻尼系数, f 为液压缸活塞组件与缸筒、活塞杆与导向套及密封圈之间的摩擦力。

(4) 二次元件 3 马达工况时的输入流量 q_2

$$q_2 = D_2 n + C_{ia} p_2 + \frac{V_{ia}}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} \quad (5)$$

式中: D_2 为二次元件 3 的实际控制排量, C_{ia} 为从二次元件 3 到液压蓄能器油腔的总内泄漏系数, p_2 为液压蓄能器和二次元件 3 之间油路的压力, V_{ia} 为从二次元件 3 到液压蓄能器油腔的总容积。

(5) 二次元件 3 马达工况时的输出力矩 T_{ac}

$$T_{ac} = \frac{p_2 q_2}{2\pi\eta_2} \quad (6)$$

式中: η_2 为二次元件 3 的总效率。

(6) 液压蓄能器的方程

① 液压蓄能器的流量连续性方程

$$q_2 = - \frac{dV_a}{dt} \quad (7)$$

式中: V_a 为液压蓄能器气囊内气体的工作容积。

② 液压蓄能器的力平衡方程

$$(p_a - p_2) A_{ac} = m_{ac} \frac{d(q_2/A_{ac})}{dt} + B \frac{q_2}{A_{ac}} \quad (8)$$

式中: p_a 为液压蓄能器气囊内气体的工作压力, A_{ac} 为液压蓄能器油液腔的横截面积, m_{ac} 为管道和液压蓄能器中油液的质量, B 为粘性阻尼系数。

(7) 二次元件 1 在泵工况时的输入扭矩 T_{cp}

$$T_{cp} = T_{ac} + T_m - T_f \quad (9)$$

式中: T_m 为电动机的扭矩, T_f 为摩擦力矩。

2.2 负载下降的数学模型

(1) 液压缸 8 的运动方程

$$m_L g = m_L \frac{dy^2}{dt} + B_c \frac{dy}{dt} + p_1 A_c + f \quad (10)$$

(2) 二次元件 1 马达工况时的流量连续性方程

$$A_c \frac{dy}{dt} = D_1 n + C_{pc} p_1 + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} \quad (11)$$

(3) 二次元件 1 马达工况时的输出力矩 T'_{cp}

$$T'_{cp} = \frac{p_1 q_1}{2\pi\eta_1} \quad (12)$$

式中: η_1 为二次元件 1 的总效率。

(4) 二次元件 3 泵工况时的流量连续性方程

$$D_2 n = q_2 + C_{ia} p_2 + \frac{V_{ia}}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} \quad (13)$$

(5) 液压蓄能器的力平衡方程

$$(p_2 - p_a) A_{ac} = m_{ac} \frac{d(q_2/A_{ac})}{dt} + B \frac{q_2}{A_{ac}} \quad (14)$$

(6) 二次元件 3 在泵工况时的输入扭矩 T'_{ac}

$$T'_{ac} = T'_{cp} + T_m - T_f \quad (15)$$

负载上、下过程中液压蓄能器的流量连续性方程相同,不再重复叙述。

3 功率匹配分析

文献[5]提出的功率完备匹配概念,是针对具有能量回馈特性的系统提出的,是指在忽略泄漏及摩擦损失的假设下,在系统驱动负载和负载向系统回馈能量的过程中,系统提供的驱动功率与负载所需功率都相等。该文在此基础上,针对具有能实现能量回收与重新利用系统,提出目标

最优功率匹配概念。

3.1 目标最优的功率匹配概念

目标最优功率匹配是指在能量回收与重新利用的系统中,综合考虑驱动负载和负载驱动全过程,实现期望目标前提下的系统功率完备匹配。例如以消耗功率最小或实现系统综合性能为目标的功率完备匹配。

对于用液压蓄能器子系统实现能量回收与重新利用的二次调节流量耦联系统,可以通过调节二次元件参数,实现液压蓄能器、电动机和负载之间功率的匹配,并能实现在系统工作过程中以能量消耗最少或电动机整体运行工况最好为目标的能量最优功率匹配和电动机性能最优的功率匹配。

3.2 能量最优的功率匹配

二次调节流量耦联系统的能量最优的功率匹配含义如下:

驱动负载(上行程)过程中,电动机和液压蓄能器驱动的工作与液压马达工况的二次元件联合作用,推动负载;负载驱动(下行程)过程中,负载势能通过能量回收子系统储存在液压蓄能器中,此时电动机不工作。若不计各种能量损失和泄漏,则负载的势能全部转化为液压能储存在液压蓄能器中,在下一个工作循环中,电动机不再输出能量,实现了液压蓄能器和负载之间的能量传递平衡。当然,能量损失是不可避免的,因此需加入电动机能量,主要补充各种损失消耗的能量,从而实现系统的功率匹配。下文对其能量消耗过程进行了分析。

(1) 提升负载的上行程过程

$$P_e + P_{ac} = P_L \quad (16)$$

式中: P_e 为电动机输出功率, P_{ac} 为液压蓄能器输出功率, P_L 为负载功率。

(2) 负载能量回馈的下行程过程

$$P_L = P_{ac} \quad (17)$$

3.3 电动机性能最优的功率匹配

二次调节流量耦联系统的电动机性能最优的功率匹配含义如下:要求电动机在上、下行程中保持工作平稳,受换向过程影响小。此时,电动机一直有稳定的功率输出,有利于改善电动机的工作状况,延长使用寿命。

其能量消耗过程分析如下:

(1) 提升负载的上行程过程,能量方程同式(16);

(2) 负载能量回馈的下行程过程

$$P_L + P_e = P_{ac} \quad (18)$$

3.4 液压蓄能器参数的确定

用液压蓄能器实现能量回收的二次调节流量耦联系统的功率匹配对具体参数而言,就是2个二次元件的排量,液压蓄能器的最高、最低工作压力和充气压力,电动机的输出功率这些参数之间的匹配关系。下面给出液压蓄能器的相关参数关系式。

(1) 液压蓄能器有效容积 ΔV

当液压蓄能器主要用于储存能量时,其放油量是作为能源补充,即有效容积 $\Delta V = V_1 - V_2$ 应满足系统的要求。

$$\Delta V = V_1 - V_2 = V_0 \frac{1 - (p_1/p_2)^{1/4}}{(p_1/p_0)^{1/4}} \quad (19)$$

(2) 液压蓄能器所能储存能量 E

液压蓄能器释放功的过程: $p_2 V_2 \rightarrow p_1 V_1$

$$E = - \int_{V_1}^{V_2} p dV = - \int_{V_1}^{V_2} p_0 (V_0/V)^{1.4} dV = \frac{p_0 V_0}{0.4} [(p_2/p_0)^{0.286} - (p_1/p_0)^{0.286}] \quad (20)$$

(3) 液压蓄能器所能释放功率 P

$$P = E/t \quad (21)$$

式中: t 为液压蓄能器释放能量的时间。

(4) 液压蓄能器充气压力、最低工作压力、最高工作压力3个压力参数之间的相互关系

从保护液压蓄能器皮囊、延长其使用寿命的角度出发,应使皮囊在系统最低工作压力下仍未膨胀得与壳体内壁完全接触;而在系统最高工作压力下,皮囊收缩后的体积仍大于充气压力的原始体积的四分之一。因此得到如下关系式

$$0.25p_2 \leq p_0 \leq 0.9p_1 \quad (22)$$

$$\Delta p \leq p_1 \quad (23)$$

4 试验研究

二次调节流量耦联静液传动系统性能测试试验台组成情况如图3所示,其工作原理图参见图2。该试验台主要由液压站、负载装置、负载驱动子系统、液压蓄能器能量回收子系统、和电液控制子系统等组成。

在负载1 t、液压蓄能器容积40 L、充气压力6 MPa的条件下进行试验。首先将与液压蓄能器相联的二次元件3的排量调为零,蓄能器能量回收子系统不工作,只利用电动机带动负载,此时测得电

动机在提升负载过程中的输出功率 $P_{e上} = 4.72$ kW, 负载下降过程中电动机输出功率 $P_{e下} = 3.60$ kW。



图 3 二次调节流量耦联系统测试试验台照片

在控制器中可以实现调节提升负载过程中二次元件 1 和 3 的排量及负载下降过程中二次元件 1 和 2 的排量。在不同试验条件下得到液压蓄能器中油液的压力曲线见图 4。各曲线对应的试验参数及测量和计算值见表 1。表 1 中 $P_{e上}$ 和 $P_{e下}$ 分别为系统在提升负载和负载下降过程中电动机消耗的功率, p_{min} 和 p_{max} 分别为液压蓄能器的最低和最高工作压力。

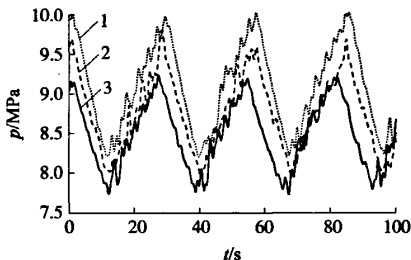


图 4 液压蓄能器中的压力曲线

表 1 试验测量及计算值

试验曲线	p_{min} /MPa	p_{max} /MPa	E /J	ΔV /L	$P_{e上}$ /kW	$P_{e下}$ /kW
曲线 1	8.2	10.0	38.3	4.2	3.60	3.85
曲线 2	8.0	9.6	34.8	3.9	3.80	3.85
曲线 3	7.8	9.1	29.2	3.5	3.85	3.85

图 4 中曲线 1、2 和 3 是在相同的负载和相同的液压蓄能器充气压力的条件下获得的试验曲线。3 组数据中提升负载过程的电动机输出功率 $P_{e上}$ 均小于液压蓄能器子系统不工作时电动机的输出功率, 可见蓄能器子系统的引入实现了重物势能的回收和重新利用, 降低了电动机的输出功率。

图 4 中曲线 3 所示的试验中, 通过适当的调节二次元件 1 和 3 的参数, 可以使电动机输出功率在提升负载和负载下降过程中相等, 这对电动机长期稳定工作及延长使用寿命非常有利, 实现了电动机最优功率匹配的目标; 在图 4 中曲线 1 所示工况下, 电动机在负载上行程过程中输出功率接近电动机空载功率 3.6 kW, 说明此时对负载做功的主要是液压蓄能器。可见通过对二次元件参数的调整能实现电动机、液压蓄能器负载的匹配, 达到降低电动机能耗的效果, 实现了能量消耗最小的能量最优功率匹配的目标。

5 结束语

对比分析了二次调节流量耦联系统与二次调节压力耦联系统的区别和联系, 建立了二次调节流量耦联系统的数学模型; 对系统的功率匹配原理进行分析后表明: 对于二次调节流量耦联系统可以实现以系统消耗功率最小为目标的能量最优功率匹配, 以及电动机性能最优的电动机性能最优功率匹配。试验研究表明: 二次调节流量耦联系统在进行能量回收与重新利用的基础上, 能实现上述目标的最优功率匹配。该文研究的内容扩大了二次调节技术的应用领域, 为二次调节技术的进一步推广应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] Nikolaus H. Dynamik Sekundärgeregelter Hydroeinheiten am eingepprägten Drucknetz [J]. O + P. Ölhydraulik und Pneumatik, 1982, 26 (2): 74 - 82.
- [2] 姜继海, 卢红影, 周瑞艳, 等. 液压恒压网络系统中液压变压器的发展历程 [J]. 东南大学学报, 2006, 36(5): 869 - 874.
- [3] Shang T. Improving performance of an energy efficient hydraulic circuit [D]. Saskatoon: Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan, 2004. 23 - 45.
- [4] 常思勤, 易纲. 一种新型电控液驱车辆的性能仿真与分析 [J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(2): 169 - 173.
- [5] 董宏林, 姜继海, 吴盛林. 液压变压器与蓄能器串联使用的优化条件及能量回收研究 [J]. 中国机械工程, 2003, 14(3): 192 - 194.