

# 桥式比例调速液压同步牵引系统及其功率特性

## Synchronizing Traction Analysis & Power Characteristic of Bridge-proportional Hydraulic System

刘彦伯<sup>1</sup> 张 玄<sup>2</sup>

(1 上海市纳米科技与产业发展促进中心, 上海 200237;

2 阿托斯上海代表处, 上海 200070)

**摘 要:**介绍一种用于大型构件同步移动的桥式比例调速液压牵引系统,阐述了系统的桥式比例调速原理和负载同步牵引常用工况(负载的提升、平移、下降)控制过程及其特点。通过建立液压牵引系统简化模型,探讨了该系统在不同工况下的功率特性,为桥式比例调速技术在液压同步牵引系统中的合理应用提供参考依据。

**关键词:**桥式比例调速 液压同步牵引 提升工况 下降工况 功率特性

**Abstract:** A bridge-proportional hydraulic system of synchronizing traction is presented in this paper, its working principle and controlling procedure have been introduced. The different power characteristics have been discussed based on its simplified model, the article should be referred by the similar synchronizing control application system.

**Key words:** bridge-proportional control hydraulic synchronization traction system lifting-state descend-ing-state power characteristic

### 0 前 言

现代施工过程中,经常需要将一些钢结构、混凝土预制件、建筑物等大型构件整体移动,如法国巴黎 TDF 塔 7 780 t 塔楼的提升、芬兰赫尔辛基 9 000 t 伞形水塔的提升<sup>[1]</sup>、上海东方明珠广播电视塔钢天线桅杆整体提升、上海大剧院钢屋架整体提升、宝钢 #2 转炉易地大修工程中的连续平移及提升<sup>[2]</sup>等。这种大型构件整体移动同步控制通常采用阀控比例调速技术<sup>[3]</sup>,系统调速方案形式多样、各具特色,本文就桥式比例调速液压同步牵引系统及其工况特点和功率特性分析探讨。

### 1 桥式比例调速液压同步牵引系统

液压同步牵引系统性能要满足大型构件整体移动工况要求:①构件垂直方向上同步提升、同步下放;②构件水平方向上平移(按负载需要分为推、拉两种形式);③构件在任一位置静止均需保持固有姿态;④牵引过程中构件姿态变化需控制在工程允许的范围;⑤牵引速度可调。

本文介绍的桥式比例调速液压同步牵引系统见图 1。该系统主要是利用桥式回路实现进油路及回油路节流调速,通过采

集和处理位移传感器数据信息,实时调整比例阀控制信号,改变节流口开度大小,实现对负载移动的同步控制;若采用两套这样的系统即可实现同步连续牵引。以下对各种工况的讨论均不考虑锚具动作。

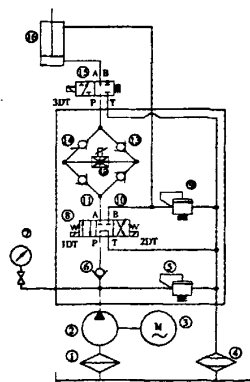


图 1 桥式比例调速液压同步牵引系统原理图

作者简介:刘彦伯 副教授,机械电子工程博士。从事机电一体化系统研究开发和微细加工技术研究。

### 1.1 同步提升工况

同步提升是液压牵引系统在工程上最常用工况。桥式比例调速液压同步牵引系统提升工况原理为:电机③驱动液压泵②,液压泵输出压力油通过单向阀⑥到达换向阀⑧,换向阀的中位M型机能可以保证泵②无负载启动;1DT得电时,压力油先后通过电磁阀的P、A口,桥式比例回路的单向阀⑪、比例阀⑫、单向阀⑬、电磁阀⑮的P、A口进入承载油缸的无杆腔,推动与负载相互锚紧的活塞杆向上运动,从而提升负载;承载油缸有杆腔的回油依次经过换向阀⑧的B、T口、回油滤油器④返回液压油箱,通过控制比例阀指令信号的大小调节负载提升速度,此时系统为进油路节流调速。安全溢流阀⑤起到限制系统最高工作压力及保护液压泵②的作用,压力表⑦可实时监测系统工作压力,低压溢流阀⑨主要用来限制有杆腔的工作压力。

当承载油缸运动到设定位置时,负载被锚紧的提升钢索锁定。系统进入承载油缸空载缩缸过程:液压泵②输出的压力油通过单向阀⑥,在2DT得电时,压力油经换向阀⑧的P、B口到达承载油缸的有杆腔,其无杆腔的回油依次通过电磁阀⑮的A、P口、桥式比例回路的单向阀⑭、比例阀⑫、单向阀⑩、换向阀⑧的A、T口以及回油滤油器④返回油箱。考虑到提升过程的效率和节能问题,空载缩缸过程中比例阀的控制信号置最大值,使开口度达到最大(满开)。如此循环往复,直到将负载提升到指定安装位置。

提升工况的承载油缸及负载运动速度是周期性变化的,在一个循环周期内,速度变化的定性描述见图2。

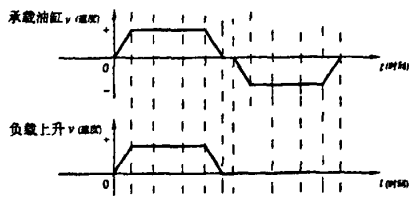


图2 提升工况承载油缸及负载速度图

### 1.2 同步下降工况

同步下降工况(以下简称下降工况)的基本动作原理与同步提升工况相反。下降工况中承载油缸的伸缸过程为空载准备阶段,此时,负载被锚紧机构锁定;承载油缸的缩缸过程为带载下降阶段,通过调节比例阀指令信号的大小来调节负载下降速度,系统为回油路节流调速。图3为下降工况承载油缸及负载在一个运动循环周期内速度变化的定性描述。

### 1.3 同步平移工况

同步平移工况(简称平移,也称同步滑移)的基本动作原理与提升工况一致,只是没有锚紧动作;但需考虑自锁装置的自锁状态。同步平移过程中必须保证将负载固有的外部形状及内

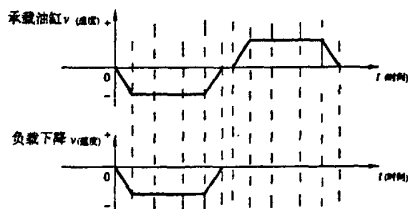


图3 下降工况承载油缸及负载速度图

部力学性能的变化控制在工程允许的范围之内。

## 2 桥式比例调速液压同步牵引系统功率特性

流体在管道中流动总要产生沿程和局部两种形式的能量损失。单位质量流体沿全流程的能量损失为流经各管段沿程损失及各种局部损失的叠加,因此在液压系统管道内流体的流速不宜太高——流速太高不仅使流动能量损失过大,而且在阀类元件动作时系统可能产生很大的液压冲击以致损坏系统,还可能使管道产生振动、噪音及气穴等;但流速也不宜过低,过低则需加大管径和阀类元件尺寸,从而使系统的质量和体积增大,成本增加;所以管内流速的设计要综合考虑。

### 2.1 负载提升工况功率特性

提升工况采用图4a所示的进油节流调速模型,通过改变进油路节流阀的过流断面面积来控制油缸运动速度,定量泵的多余流量通过安全阀溢流。图中油缸运动速度的方向为正方向,油缸所受负载力的方向与速度方向相反。设通过节流阀的流量为 $Q_1$ ,则

$$Q_1 = c_d a \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_1)} \quad (1)$$

式中, $c_d$ 、 $\rho$ 分别表示流量系数和液压油密度; $p_s$ 表示泵出口压力,即安全阀设定压力; $p_1$ 是节流阀出口压力,即油缸无杆腔压力。当承载油缸无杆腔活塞面积为 $A_1$ 时,进油节流调速回路的速度为

$$v = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{c_d}{A_1} a \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_1)} \quad (2)$$

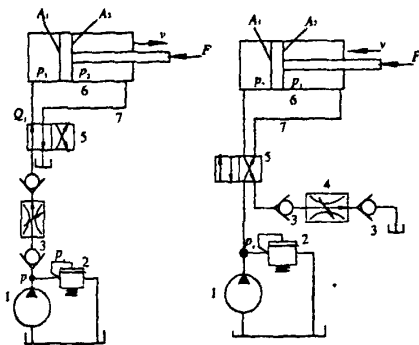
因为定量泵与安全阀构成恒压系统, $p_s$ 是常数,若负载力 $F$ 为常数,则 $F$ 与对应的 $p_1$ 也是常数;所以,液压缸活塞的运动速度 $v$ 和节流阀的过流断面面积 $a$ 成正比。

讨论功率特性时,假设:回路中液压缸和液压泵的效率为1;不考虑回路沿程损失;单向阀、节流阀和溢流阀除去流过油口的工作流量外无漏损。

设 $N$ 为泵的功率, $Q_s$ 为定量泵额定流量,则 $N = p_s Q_s$ 。而泵提供给系统的功率 $N_1$ 按消耗分为无功功率和有功功率,即

$$N = N_1 + \Delta N_1 + \Delta N_2 + \Delta N_3 \quad (3)$$

其中, $\Delta N_1$ 、 $\Delta N_2$ 、 $\Delta N_3$ 分别为节流阀、安全阀、单向阀消耗功率,统称为无功功率; $N_1$ 为油缸输出功率,亦称有功功率,且 $N_1 = F \cdot v =$



a 进油节流调速模型

b 回油节流调速模型

1-定量泵;2-安全阀;3-单向阀;4-比例阀;5-换向阀;6-液压缸;7-管路

图4 电磁比例阀调速系统能量分析模型

$p_1 A_1 v$ 。将式(1)、(2)代入得

$$N_i = p_1 c_d a \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_1)} \quad (4)$$

令  $\frac{\partial N_i}{\partial p_1} = 0$ , 解得  $p_1 = (2/3)p_s$ , 则有

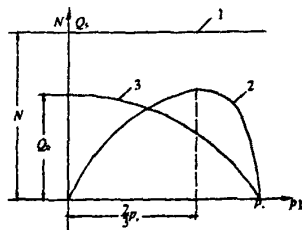
$$N_{\max} = 0.385 p_s Q_0 \quad (5)$$

其中,  $Q_0$  为系统空载流量。当  $p_1 = 0$  时,  $Q_0 = c_d a \sqrt{\frac{2}{\rho} p_s}$ , 则进油节流调速系统的效率  $\eta$  可表示为

$$\eta = \frac{N_{\max}}{N} = \frac{0.385 p_s Q_0}{p_s Q_0} = 0.385 \quad (6)$$

由于  $Q_0$  始终小于  $Q_s$ , 所以进油节流调速回路的效率最大为 0.385, 系统效率较低。图 5 为进油节流调速回路功率特性曲线, 其中, 曲线 1 和曲线 2 纵坐标之差即为系统在对工作压力下功率损失, 曲线 3 为系统在不同工作压力下泵提供的有效流量。从系统效率角度考虑, 进口节流调速回路以工作在  $p_1 = \frac{2}{3} p_s$  附近系统效率较高。

对于桥式回路的比例阀调速系统, 根据负载提升工况的工作特点可知缩缸过程是空载, 此时比例阀阀口全开 (或为恒定开口量), 可认为在提升工况的缩缸过程中比例阀只相当于一个方向阀, 不起调速作用。系统做功主要用来克服活塞上密封圈与缸筒之间的摩擦阻力、桥式回路单向阀上的压力损失、换向阀及电磁比例阀压力损失等, 其空载回油回路见图 4b。其中负载力  $F=0$ 。该过程的功率损失应考虑由于油缸有杆腔与无杆腔面积差所引起的流速变化对系统局部及沿程损失的影响, 可参见单向阀、换向阀、比例阀及管路的流量-压力损失曲线, 计算系统功率损失。此时, 系统的功率损失为系统中各阀口的局部损失及液流的沿程损失之和。

图5 进口节流调速回路的功率特性 (以  $p_1$  为自变量)

## 2.2 负载下降工况功率特性

对于负载下降工况, 比例阀起到回油节流调速的作用, 负载下降速度的控制是通过调节比例阀的指令信号实现的, 通过上位机向比例阀发送实时调整的控制指令实现负载各点下降速度同步。负载下降工况回路模型如图 4b 所示, 其中负载力  $F \neq 0$ ,  $p_1, p_2$  分别为工作油缸的有杆腔和无杆腔压力,  $Q_s$  为定量泵额定流量,  $p_s$  为下降工况安全阀设定压力, 液压泵提供给系统的总功率  $N$  为

$$N = p_s Q_0 \quad (7)$$

同理, 泵提供给系统的功率  $N$ , 按消耗分为油泵输出的有功功率  $N_1$  和溢流阀消耗功率的无功功率  $\Delta N_2$ , 即  $N = N_1 + \Delta N_2$ , 这时油泵输出的有功功率  $N_1$  可表示为

$$N_1 = N - \Delta N_2 = p_s A_2 v \quad (8)$$

式中,  $A_2$  表示油缸小腔面积,  $v$  是负载下降速度。

由式(8)可知: 当  $A_2 v = Q_0$  时,  $v_{\max} = \frac{Q_0}{A_2}$ , 溢流阀无溢流, 油泵输出的有功功率为最大, 即  $\frac{N_1}{N} = 1$ , 油泵输出油液用来填充油缸有杆腔由于运动所形成的容积变化; 当  $v > v_{\max}$  时, 系统无法正常工作; 当  $v \leq v_{\max}$  时, 泵的效率  $\eta$  (有功功率与其输出功率的比)可表示为

$$\eta = \frac{v}{v_{\max}} \quad (9)$$

而负载的下降速度  $v$  受到比例阀开口面积、油缸结构参数、油泵供油量、液压锁结构参数<sup>[4]</sup>以及溢流阀调定压力限制。

根据系统能量关系和式(7)、(8)可得电磁比例调速系统下放工况油液的温升功率为

$$N' = p_2 A_1 v + \Delta N_2 = Fv + p_s Q_0 \quad (10)$$

即油液的温升功率等于负载下降所形成的功率与液压泵的功率之和。

## 3 结束语

(1) 桥式比例调速液压同步牵引系统, 利用同一比例阀巧妙 (下转第 92 页)

允许值,加速线圈绝缘老化,甚至将电动机烧坏。负序电流是产生过热的主要原因,采用的过热判断依据为

$$t = \tau_1 [K_1 (I_1 / I_n)^2 + K_2 (I_2 / I_n)^2 - 1.05^2],$$

式中,τ<sub>1</sub>——电动机的发热时间常数;I<sub>1</sub>——CT 二次侧电动机运行电流的正序分量 (本保护采用 A、B、C 三相之最大者);I<sub>2</sub>——CT 二次侧电动机运行电流的负序分量;I<sub>n</sub>——CT 二次侧额定电流;K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>——正、负序电流发热系数,其中,K<sub>1</sub> 在电动机启动时间内可在 0~1 范围内整定,启动时间后自动变为 1,K<sub>2</sub> 可在 0~10 范围内整定,启动内与启动后此值相同。

2.6 欠电压保护

电动机低压运转时转矩急剧下降,造成电动机严重过载。当母线线电压(取线电压 U<sub>ab</sub>)低于电压整定值,并达到延时且断路器处于闭合状态低压保护动作。可由用户整定是否判断 PT 断线及 PT 断线时是否闭锁欠电压。PT 断线判断依据为:当三相电压均 < 7V 且电流大于 0.1IN 时,用于检测 PT 三相断线;当 | U<sub>a</sub>+U<sub>b</sub>+U<sub>c</sub> | > 7V,且任两个线电压的模差>18V,用于检测一相或三相断线。

3 现场技术参数设置

根据 MMPR-310Hb-2 型微机电动机保护装置整定原则,现场技术参数设置见表 1。

4 结束语

过去水泵高压电机保护采用常规继电器和熔断器构成的保护模式,其局限性在于只能反映以过电流为特征的故障,而对于电流变化不明显的情形则常发生拒动现象。微机电动机保护装置采用了数字滤波技术和良好的保护算法及其他抗干扰措施,通过对高压电机故障进行智能判断和控制相应信号输出,从“软环境”上解决上述问题,在选择性、速动性、灵敏性及准确性上达到了一个新的技术高度,同时该装置硬件、软件设计标准化、模块化,基本做到了免维护。实践表明,微机电动机保护装置应用于水泵高压电机提高了水泵机组运行的可靠性,同时也提高了排灌泵站的经济效益和社会效益,是适合于大中

(上接第 83 页)

的实现了对不同工况作业的控制,灵活地解决了不同工况对控制系统性能的特殊要求。

(2) 桥式比例调速液压同步牵引系统具有结构简单、控制方便、易于扩展、成本低等特点;同时,应用电磁比例控制技术易于实现对牵引速度的自动调节和遥控操作,控制参数易于通过软件设定,可以方便地实现负载牵引的同步控制。

(3) 进油节流调速借助比例阀控制液压缸的给油量来实现速度调节,适用于负载变化不大、正载荷且对运动平稳性要求较高的同步提升工况;但系统效率较低。回油节流调速借助比例阀控制液压缸的排油量来实现速度调节,优点是因节流阀在回油

表 1 现场技术参数

技术指标	设定范围	现场整定值
正序电流(启动内)(A)	0.5~99.99	21.5
正序电流(启动后)(A)	0.5~99.99	9.6(按非自启动)
正序保护延时(s)	0~10	0
负序定 时限限电流(A)	0.2~5	1.6
负序反 时限延时(s)	0~10	0.6
负序反 时限限电流(A)	0.2~5	未设置
负序反 时限限常数	1~9 999	未设置
返回时间(s)	10~4 000	10
发热系数 K <sub>1</sub>	0~1	0.2
额定电流(A)	0.5~5	1.99
PT 变比	1~5 000	100
零序保护电流(A)	0~2	1.5
零序保护延时(s)	0~10	0.5
久压保护电流(V)	10~90	70
久压保护延时(s)	0.2~60	0.5
堵转保护电流(A)	0.5~99.99	5.0
堵转保护延时(s)	0~60	1.0
发热时间常数	1~9 999	349
发热系数 K <sub>2</sub>	0~10	1
热报警系数	0.5~1	0.6
电动机启动时间(s)	1~99	12
CT 变比	1~5 000	25

型水泵电机的最佳保护和测控装置。

参考文献

[1] 吴功样,鲍光海.系列化智能电动机保护器 [J].上海电器技术,2005(1):34~36.  
[2] 杨 宁,胡学军.单片机与控制技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.  
[3] 汤蕴缪,史 乃,沈文财.电机理论与运行(上册)[M].北京:水利电力出版社,1982.

参考文献

[1] 乌建中,徐鸣谦.液压同步提升技术回顾与展望[J].同济大学学报(自然科学版),1997,25(2):230~233.  
[2] 刘彦伯,乌建中,张 玄.液压同步连续滑移负载转移稳定性控制[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(4):512~515.  
[3] 刘彦伯,乌建中,张 玄.液压同步连续滑移速度平稳性控制策略分析[J].机电一体化,2004,10(4):64~66.  
[4] 金朝铭.液压流体力学[M].北京:国防工业出版社,1994.