

# 第 1 章 电液比例控制系统原理与结构

电液比例控制装备是电液比例技术的应用载体,装备的功能与技术需求对电液比例控制提出了设计指标要求,促进了电液比例技术向深度和广度发展。

20 世纪 80 年代开始,比例电磁铁技术趋于成熟,该技术与液压技术相融合产生了种类丰富、规格齐全的比例电磁铁,逐步发展为液压比例阀技术。使比例电磁铁的应用逐渐推广,产生了电液比例控制技术。

比例液压阀是电信号调节的连续量控制液压阀的集合。比例液压阀包括比例压力阀、比例流量阀和比例方向阀等。比例液压阀具备普通液压阀的功能,并可接受电信号连续调节。其中,比例方向阀功能接近电液伺服阀,性能指标差一些,但是价格低一些。

电液比例控制系统也是液压控制系统集合的子集。其中,采用比例方向阀构建的运动控制系统与电液伺服控制相似,其他比例控制系统基本等同于电信号连续调节的液压传动系统,并有其自己的特点。

本章列举典型行业和典型装备的四个液压比例控制技术应用案例,在探讨液压比例控制技术细节前,从实际应用案例中认识电液比例控制系统工作原理和系统结构,进而通过与其他液压技术的比较,深化读者对电液比例控制技术的理解。

## 1.1 连铸机钢包回转台比例控制

将高温钢水连续不断地浇铸成具有一定断面形状和一定尺寸规格铸坯的生产工艺过程叫作连续铸钢。完成连续铸钢的装备叫连铸成套装备,习惯上称为连铸机。连铸机包括浇钢装备、连铸机本体装备、切割区域装备、引锭杆收集及输送装备等部分,属于典型的机电液一体化成套装备。

钢包回转台是连铸机本体中的一个部件,其主要功能是将充满钢液钢包(俗称大包)旋转到浇注工位,并换走空钢包,实现连续浇铸。

### 1.1.1 装备工作原理

连铸机钢包回转台多数采用蝶形结构,如图 1-1 所示。钢包回转台具有两个钢包臂,每个钢包臂上可以托举一个钢包。钢包回转台有两个工位:更换钢包工位和浇注工位,它们分别位于钢包回转台的两侧。浇铸作业与更换钢包作业可以同时进行,连铸机钢包回转台就是通过回转运动交换两个工位的钢包,用盛满钢液的钢包更换空钢包以实现同时作业。

连续浇铸的典型工艺流程为:首先钢包回转台转至更换钢包工位,包盖升降机构升起包盖,包盖旋转机构将其移开,进行更换钢包作业。然后在钢包回转台的更换钢包工位上换下空钢包,换上盛满钢水的钢包。当包盖旋转机构将包盖转至钢包上方时,包盖升降机构将包盖落下,盖在钢包上。等待浇注工位空闲(钢包钢液流尽)时,钢包臂托举盛满钢液的钢包旋转至浇注工位。装满钢液的钢包下降至低位,安装长水口。在钢包继续下降至浇注位置

时,打开钢包滑板,钢液将通过长水口进入中包,开始浇注。浇注完毕后,关闭钢包滑板,空钢包升起至最高位。最后钢包回转台托举空钢包旋转至更换钢包工位(同时将盛满钢液的钢包更换至浇注工位),开始下一个工作循环。

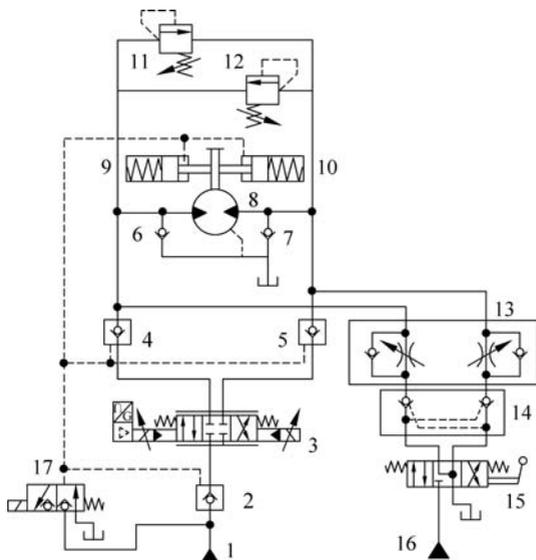


图 1-1 连铸机双臂钢包回转台

在钢包回转台上,液压系统主要有四个:钢包回转台的回转液压控制系统、钢包升降液压控制系统、钢包包盖液压控制系统和钢包水口滑板液压传动系统。

### 1. 钢包回转台回转液压控制系统

全液压钢包回转台的回转运动由液压马达驱动,液压马达受控于比例方向阀,是液压比例控制系统,如图 1-2 所示。



1—正常工作油源; 2,4,5—液控单向阀; 3—比例方向阀; 6,7—单向阀; 8—液压马达;  
9,10—液压制动缸; 11,12—防过载安全阀; 13—双单向节流阀; 14—双液控单向阀;  
15—手动方向阀; 16—事故蓄能器; 17—电磁方向阀。

图 1-2 钢包回转全液压驱动旋转系统原理图

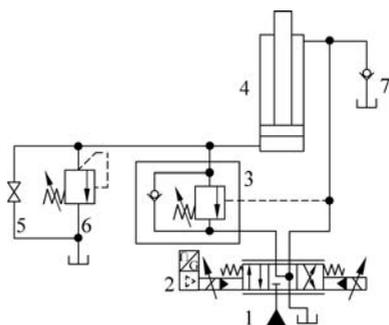
连铸机钢包回转台采用可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)控制。为了安全起见,冶金装备通常有自动和手动两套控制系统。正常工作时,双液控单向阀 14 将手动方向阀与比例控制系统隔离。

正常工作时动作顺序逻辑为:首先,PLC 控制发指令,电磁方向阀 17 通电,将液控单向阀 2、4、5 同时打开。然后,PLC 发出液压马达起动开关信号,比例放大器生成斜坡连续信号控制比例方向阀 3,平稳起动液压马达 8,驱动钢包回转台回转。行程开关检测到位情况,并发信号给 PLC,PLC 发出停止液压马达的开关信号,比例放大器生成斜坡连续信号控制比例方向阀 3,比例方向阀 3 控制液压马达平稳地停止转动。运动控制结束后,PLC 发出开关信号,控制电磁方向阀 17 断电,液压制动缸 9 和 10 将液压马达锁住。回转台的回转运动控制系统的控制方式为开环控制。

在发生事故时,人工操作手动方向阀 15,控制液压马达旋转钢包回转台运动,将钢包移动至安全位置。

## 2. 钢包升降液压控制系统

钢包升降也采用液压比例控制系统,采用比例方向阀实现运动方向与速度液压控制,如图 1-3 所示。



1—液压源; 2—比例方向阀; 3—平衡阀; 4—液压缸; 5—手动阀; 6—安全阀; 7—补油单向阀。

图 1-3 钢包回转台钢包升降系统原理图

由于钢包连同包内钢液的质量非常大,通常超过 100t,故采用普通电磁换向阀控制钢包升降将产生非常大的冲击。因此需采用液压比例控制以避免速度冲击。

设备起动时,首先 PLC 向比例放大器发出启停的开关信号,比例放大器接收开关量控制信号,并产生带斜坡函数的升速和降速连续量控制信号。然后连续量控制信号调节比例方向阀 2,控制钢包升降运动。控制模式为开环控制。

在钢包下降过程中,钢包连同钢液将产生非常大的负向负载,需要液压缸 4 无杆腔的油路中设置平衡阀 3 产生平衡压力与之抗衡。

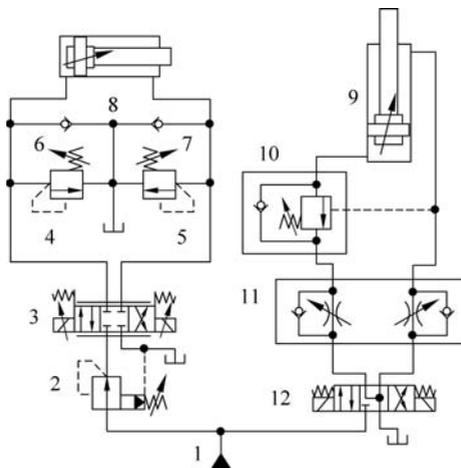
设置补油单向阀 7 的作用是防止速度失控时,液压缸有杆腔出现负压。设置安全阀 6 的作用是限制液压缸无杆腔最高压力,防止无杆腔超压损坏,导致严重事故。

## 3. 钢包包盖控制液压系统

钢液完成精炼后,在钢包上加盖能够减少热量损失,防止钢液翻溅,减少钢液氧化。

钢包加盖的典型工艺过程是当盛满钢液的钢包落到包臂上后,包盖控制液压系统将包盖旋转至钢包上方,然后将包盖下降至钢包上,将其盖上。

包盖升降系统使用电磁方向阀控制单出杆液压缸。液压缸无杆腔进油路设置平衡阀平衡包盖等因重力产生的负向负载。系统调试时,手动调节双单向节流阀,调节液压缸活塞杆速度(见图 1-4)。



1—正常工作油源; 2—减压阀; 3—比例方向阀; 4,5—安全阀; 6,7—补油单向阀; 8—包盖旋转液压缸;  
9—包盖升降缸; 10—平衡阀; 11—双单向节流阀; 12—电磁方向阀。

图 1-4 钢包包盖控制液压系统原理图

包盖旋转驱动液压系统的载荷特点是惯性载荷大,阻性载荷小。因此,需要采用减压阀降低包盖旋转比例控制系统的供油压力。为了减小包盖旋转运动的冲击和振动,可使用比例方向阀控制液压缸动作。采用比例放大器生成具有斜坡特性的控制电信号,比例方向阀控制液压缸升速和降速,平缓速度变化。包盖旋转驱动液压比例控制系统的控制方式亦为开环控制。

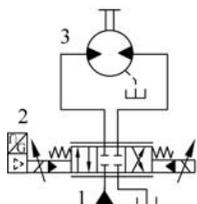
### 1.1.2 比例控制系统工作原理与结构分析

通常,装备的液压系统较为复杂,包含多个控制阀和多个液压执行元件,它们可以被拆解为多个基本控制功能的液压回路结构,每个液压回路含有一个液压控制阀或一个液压执行元件。

#### 1. 钢包回转台回转与钢包升降液压比例控制系统

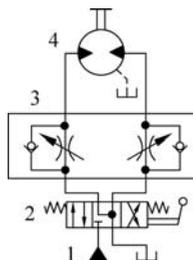
全液压钢包回转台回转运动电液比例控制系统的基本液压回路中比例方向阀控制液压马达的速度回路(见图 1-5)。与匀速运动时回转液压马达输出力矩相比,液压马达起动或制动时的惯性载荷超大,可能出现载荷驱动液压马达运动情况,因此液压马达两腔均需要安装溢流阀防止超压,并均需要安装单向阀进行补油,如图 1-2 所示。

全液压钢包回转台回转运动的手动控制系统中液压回路的基本结构为电磁换向阀控制液压马达的旋转方向回路(见图 1-6)。电磁换向阀用于控制马达旋转方向,双单向节流阀则用于调整马达转速。与之相比,比例方向阀控制模式具有明显优势,可以用电信号控制进出马达的流量双向连续变化,因而电信号可以控制马达双向连续变速。



1—液压源；2—比例方向阀；3—液压马达。

图 1-5 比例方向阀控制液压马达的速度回路



1—液压源；2—电磁换向阀；3—双单向节流阀；4—液压马达。

图 1-6 电磁换向阀控制液压马达的旋转方向回路

## 2. 钢包提升液压比例控制系统

钢包提升液压比例控制系统的基本液压回路中比例方向阀控制单出杆液压缸(见图 1-7)。该类液压缸为非对称缸,比例方向阀也采用非对称结构。

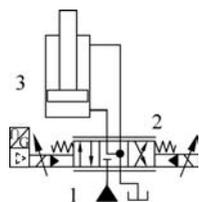
这种液压缸垂直布置,由液压缸无杆腔承受钢包及钢液因重力产生的压力载荷,同时需要在基本控制系统液压回路上增设平衡阀,以抗衡钢包及钢液重力。

为了抗衡钢包及钢水重力产生的驱动液压缸活塞向无杆腔运动的趋势,需要在液压缸无杆腔连接管路上增设补油单向阀。

液压回路上还需要增设手动截止阀,以便在故障状态时,可以人工打开手动截止阀,下放钢包至安全位置。

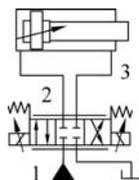
## 3. 包盖控制液压系统

包盖控制液压系统的回转运动控制部分的基本液压回路中比例方向阀控制液压缸系统(见图 1-8)。



1—液压源；2—比例方向阀；3—液压缸。

图 1-7 比例方向阀控制单出杆液压缸



1—液压源；2—比例方向阀；3—液压缸。

图 1-8 比例方向阀控制液压缸系统

由于系统惯性载荷大,匀速运行阻力小,回转运动控制系统的供油压力比较小,因此需要采用减压阀降低压力。

回转液压缸杆出力较小,惯性载荷大,可能出现载荷拖动液压缸杆运动情况。因此,在基本液压比例控制回路上需要增设溢流阀防止超压,并增设单向阀补油。

如图 1-4 所示,包盖升降运动控制部分的基本液压回路由电磁换向阀控制液压缸,属于液压传动系统。其中电磁换向阀用于控制液压缸杆运动方向,双单向节流阀则用于调整液压缸杆伸缩运动速度。

包盖升降运动控制基本液压回路上需要增设平衡阀,以平衡包盖等重力载荷。由于包盖等载荷恒定故效果良好。

### 1.1.3 比例控制系统结构特点

分析连铸机钢包回转台的液压控制系统,可以获得有关液压比例控制方面的认识如下。

(1) 应用液压比例控制系统装备的运动控制需求情况往往是复杂的,可能包含多个液压(比例)控制阀或多个液压执行元件。复杂的液压比例控制系统往往可以拆解为多个基本的(比例)控制液压回路。

(2) 基本控制液压回路包含一个液压执行元件或一个液压(比例)控制阀。例如,四通阀控制液压马达、四通阀控制非对称液压缸等。

(3) 负载情况分别有大负向负载、大惯性负载等。

(4) 比例控制方式可以采用开环控制,接收 PLC 等发出的开关量信号指令。

(5) 与液压传动系统回路一样,液压比例控制系统往往通过加装平衡阀抗衡负向负载。

(6) 开环电液比例控制系统经常与液压开关系统(液压传动系统)融合在一起,构成比例控制与开关控制的杂合(hybrid)液压系统。

## 1.2 计算机数控液压折弯机

计算机数控(computer numerical control,CNC)折弯机是冷轧钣金加工的板材成形机械,其能够利用所配备的模具(通用或专用模具)将冷态下的金属板材折弯成各种几何截面形状的工件,广泛应用于汽车、飞机制造、轻工、造船、集装箱、电梯、铁道车辆等行业的板材折弯加工工艺中。

CNC 折弯机采用计算机数控系统,能够自动化地实现滑块向下点动或连续运动,实现保压、返程和中途停止等加工动作。

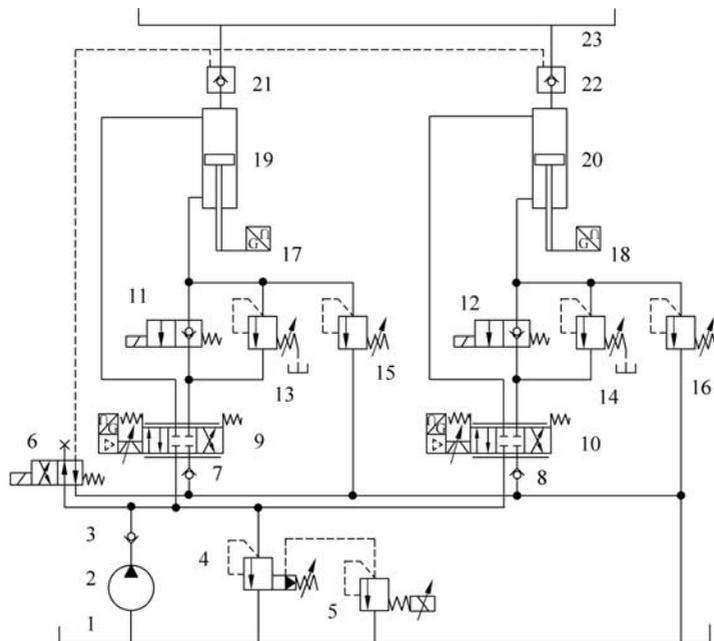
### 1.2.1 装备工作原理

CNC 液压折弯机的外形如图 1-9 所示,其机械机构主要由滑块机构、工作台等构成。其中,滑块机构由液压缸驱动,并由两个规格、尺寸相同的液压缸分别采用电液比例闭环控制,同步驱动下压折弯滑块进行折弯作业。



图 1-9 CNC 液压折弯机

CNC 液压折弯机的液压系统原理如图 1-10 所示,其液压比例控制系统为闭环运动控制系统,通过控制高频响比例方向阀来控制液压缸运行速度和位移,进而保证两支液压缸运动速度和位置同步。



1—油箱;2—液压泵;3—单向阀;4—先导式溢流阀;5—比例溢流阀;6—二位四通电磁方向阀;7、8—背压阀;9、10—高频响比例方向阀;11、12—两位两通座阀;13、14—平衡阀;15、16—安全阀;17、18—位移传感器;19、20—液压缸;21、22—充液阀;23—上置油箱。

图 1-10 CNC 液压折弯机液压系统

工作时,由分辨率为 0.005mm 的光栅尺检测液压缸杆的运行位置和相对位置,折弯机数控系统依据运动控制指令和当前执行液压缸的速度和位移反馈信号,闭环地控制两支液压缸位置精度和位移同步精度均达到 0.01mm。

依据加工钢板厚度的不同,控制程序自动调节液压系统供油压力。

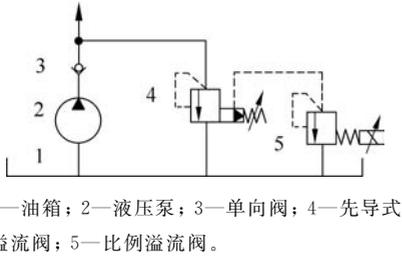
### 1.2.2 比例控制系统工作原理与结构分析

CNC 折弯机液压系统可以划分为三个基本的电液比例控制液压回路,包括一个电液比例压力控制液压回路和两个电液比例位置控制液压回路。

#### 1. 电液比例压力控制液压回路

电液比例压力控制液压回路如图 1-11 所示,其采用先导式溢流阀作为主定压阀。作为安全压力先导式溢流阀的先导级设定压力比系统最高工作压力高 1~2MPa。先导式溢流阀的外控油口接比例溢流阀,电气信号可以控制比例溢流阀的溢流压力连续变化,比例溢流阀通过外控油口控制先导式溢流阀的溢流压力连续变化。

电液比例压力控制系统如图 1-12 所示,也是开环控制方式。



1—油箱；2—液压泵；3—单向阀；4—先导式溢流阀；5—比例溢流阀。

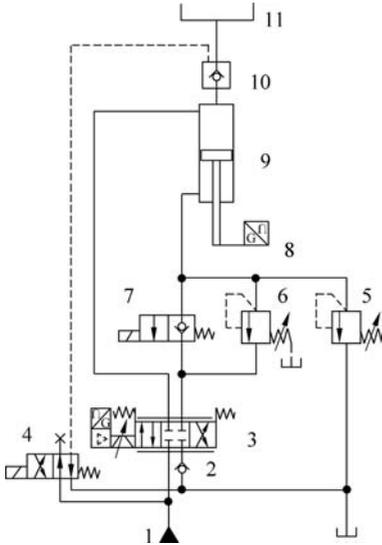
图 1-11 比例溢流阀压力控制液压回路



图 1-12 比例溢流阀压力控制系统方块图

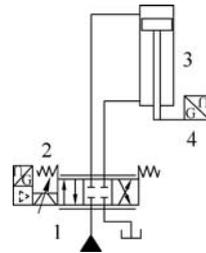
## 2. 电液比例位置闭环控制系统

CNC 折弯机运动控制液压系统可以拆分成两个相同的闭环电液比例位置控制系统,每个电液比例位置控制系统如图 1-13 所示。它的基本液压回路是四通阀控非对称缸,如图 1-14 所示,在其驱动下压折弯滑块进行折弯作业。液压缸竖直布置,空行程阶段有杆腔承受重力产生的负向负载。弯板作业时,负载力大于重力。



1—油源；2—单向阀；3—高频响比例方向阀；4—二位四通电磁换向阀；5—安全阀；6—内控顺序阀；7—二位二通座阀；8—位移传感器；9—液压缸；10—液控单向阀；11—上置油箱。

图 1-13 闭环电液比例位置控制液压回路



1—油源；2—高频响比例方向阀；3—液压缸；4—位移传感器。

图 1-14 阀控缸比例基本液压回路

电液比例位置闭环控制系统方块图如图 1-15 所示,其两个液压缸采用电液比例闭环控制。高频响比例方向阀控制液压缸运动速度和位移。通过闭环位置控制保证每支液压缸运动精度。工业装备常采用并行式的同步控制方式,两个高精度位置控制系统同步接收计算机数控系统的运动控制指令,实现高精度同步运动。

### 1.2.3 电液比例控制系统结构特点

分析 CNC 液压折弯机的液压比例控制系统,其系统结构特点如下:

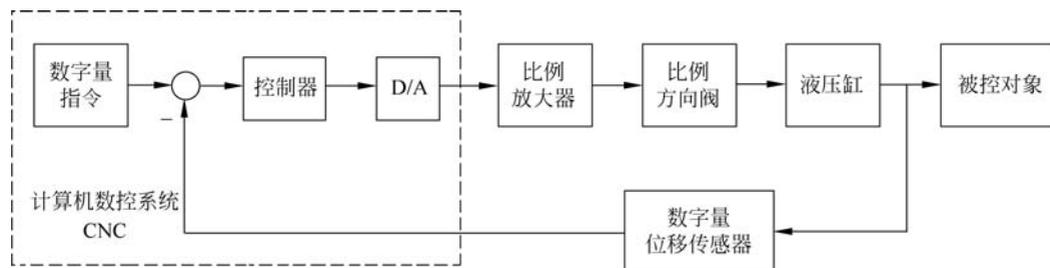


图 1-15 电液比例位置闭环控制系统方块图

(1) 液压系统压力采用先导式溢流阀控制,并使用比例溢流阀作为先导式溢流阀的外控先导阀,构建了比例溢流阀的压力控制基本回路。比例溢流阀控制方式采用开环控制。

(2) 用高频响比例方向阀构建了闭环电液比例位置控制系统,采用了四通阀控非对称缸液压基本回路。

(3) 液压回路中加装内控顺序阀平衡(重力)负向负载。

(4) 液压系统需要设计补油装置和防止超压溢流阀。

(5) 两个位置闭环比例控制系统的运动同步。

(6) 液压缸垂直布置,无杆腔在上方。

### 1.3 大惯量负向负载电液比例控制实验台

大惯量负向负载是一些行业装备的常见负载,它给这类装备设计造成困难。作为行业装备,需要在装备性能、能耗、制造成本等多方面找到技术妥协的平衡点。

大惯量负向负载电液比例控制实验台面向大惯量负向负载位置控制和加载力控制实验研究。

#### 1.3.1 装备工作原理

液压缸安装,沿向上方向驱动大惯量负载,液压缸无杆腔承受重力负载。负载质量越大,则负向负载越大。大负向载荷不利于液压闭环控制。

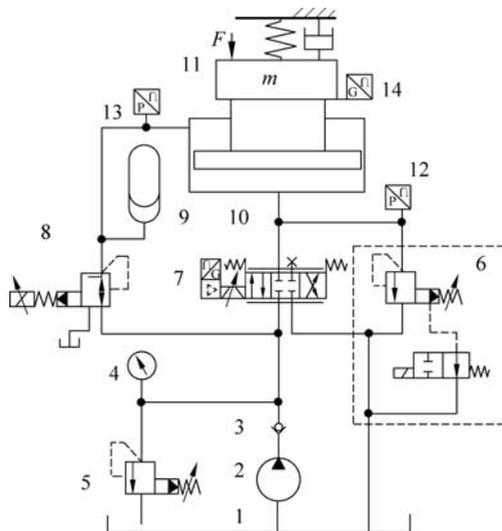
工作机机械结构只能安装非对称液压缸的情况是非常常见的。非对称缸的闭环控制是困难的,由于非对称缸活塞两侧有效作用面积不同,液压控制阀与液压缸不匹配会产生压力突变,容易产生气蚀或超压的现象。而且,有时也会出现有效作用面积的比值不能随意选择的情况。现实工程实际需要开展大惯量负向负载液压驱动与控制实验研究。

比例方向阀控制非对称缸运动的原理:液压缸有杆腔施加恒定压力,比例方向阀控制液压缸无杆腔,当活塞处于力平衡状态(也就是活塞受到合力为零)时,活塞与负载保持运动状态不变。当活塞受到合力向上,活塞驱动负载向上运动。反之,亦然。因此比例方向阀具有驱动液压缸活塞双向运动的能力。

大惯量负向负载电液比例控制实验台液压系统原理图如图 1-16 所示。采用比例溢流型减压阀(也称先导式三通比例减压阀)、蓄能器和压力传感器构建压力控制回路,对液压缸有杆腔施加恒定压力。采用比例压力控制,程序调节该压力。

活塞杆连接位移传感器,无杆腔安装压力传感器。位移传感器作反馈传感器,可以构建位置控制系统。压力传感器作为反馈传感器采集无杆腔工作压力,可以换算出活塞输出液压力(加载力),可以构建力控制系统。因此,实验台有两种工作模式:加载力控制模式和位置控制模式。

电磁溢流阀上电,防止无杆腔压力超压;电磁溢流阀断电,液压缸活塞回落。



1—油箱;2—液压泵;3—单向阀;4—压力表;5—先导式溢流阀;6—电磁溢流阀;7—高频响比例方向阀;8—比例溢流型减压阀;9—蓄能器阀;10—液压缸;11—被控对象;12,13—压力传感器;14—位移传感器。

图 1-16 大惯量负向负载电液比例控制实验台液压系统原理图

### 1.3.2 比例控制系统工作原理与结构分析

大惯量负向负载电液比例控制实验台液压系统可以拆分成两个基本的电液比例控制系统:一个是比例溢流型减压阀压力控制系统;另一个是电液比例位置/力控制系统。

#### 1. 比例溢流型减压阀构建的压力控制系统

比例溢流型减压阀压力控制液压系统原理图如图 1-17 所示。液压泵与普通溢流阀构成液压源,控制元件是比例溢流型减压阀,被控制压力油腔是液压缸有杆腔,比例溢流型减压阀将液压源减压后为液压缸有杆腔供油。

整个系统采用液压缸有杆腔压力传感器采集压力信号作为反馈信号,可以构建闭环压力控制系统。比例溢流型减压阀压力控制系统方块图如图 1-18 所示。

#### 2. 电液比例位置/加载力控制系统

电液比例位置/加载力控制液压系统工作原理图如图 1-19 所示,其控制元件是高频响四通比例方向阀。该四通比例方向阀作三通比例方向阀使用,用于控制液压缸无杆腔。

除此之外,高频响比例方向阀还用于控制液压缸无杆腔进油,从而推动活塞杆向上运动。采用液压缸两腔压力传感器采集压力信号,可以换算出活塞输出液压力(加载力),据此可以构建闭环加载力控制系统,电液比例位置/加载力控制系统方块图如图 1-20 所示。