

第 1 章 绪 论

液压控制系统是以(静)液压控制与换能元件为主要控制元件构建的控制系统。液压控制与换能元件通常指液压控制阀、控制用液压泵等。

20 世纪 60 年代 Merritt H E 将所著有关液压伺服控制内容的书籍取名为《液压控制系统》。事实上,在国内的相关教材里,通常将液压控制系统理解为一种闭环自动控制系统。

随着直驱阀、比例阀等液压控制元件技术的进步,以及可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)和运动控制器等电气控制技术的发展,工业自动化技术中一方面以液压开关阀(on/off valve)与 PLC 构成的液压顺序控制系统在工业自动化系统应用中占有更大的比重,另一方面增添了液压比例控制技术等新成员。液压比例技术诞生之初,与液压伺服技术区别明显,高频响高性能液压控制阀技术的进步逐渐填补了液压比例技术与液压伺服技术之间的空白。事实上,液压反馈控制系统成为液压控制系统的狭义概念。

在现代化装备中,液压伺服系统往往是(逻辑)顺序控制系统下面的一个子系统,装备中几乎必然存在以液压开关阀为控制元件的液压顺序控制系统,装备顺序控制系统下面的每一个逻辑选项或子系统都是一个基本的控制系统。因此,工业界的液压控制系统称呼具有更加广泛的范畴,将采用液压阀、液压泵作为控制元件构建的控制系统统称为液压控制系统,是为广义的液压控制系统概念。

顺应工业化社会发展的现状和需求,从大系统和复杂系统视角看待液压控制系统问题,本书采用这一广义概念。本书以液压反馈控制系统为主体,向液压比例控制系统和液压顺序控制系统(含液压开关控制系统)延伸,将更多以液压控制元件为核心构建的控制系统纳入液压控制系统范畴,展现包括液压反馈控制系统在内的多种液压控制在机械装备上同时存在的现实状态,推动理论与实际工程技术的统一。

动力学仍然是广义液压控制系统的基础。进一步提升液压顺序控制系统性能时往往需要探讨每个子液压控制系统的动态特性,各种液压控制系统在工业自动化系统中应用也需要以动力学为基础进行集成与整合。

液压控制技术是自动控制技术的一个重要分支。液压控制系统特点鲜明,优势明显,发挥着不可替代的作用。液压控制经常与电气控制等其他控制方式形成既相互独立又相互融合的态势。

液压控制技术是典型的机电液一体化技术,是多学科交叉融合发展的范例。例如,液压伺服控制系统以动力学系统为对象,以负反馈系统设计为手段,集成机械系统、电气系统和液压系统构建机电液一体化的动态系统。

目前,液压控制技术在装备制造、汽车工业、航天航空、兵器工业、冶金工业、船舶工业、医疗工程等多领域获得应用。

本章将阐述如下问题:开环液压控制与闭环液压控制系统,液压控制系统的分类及特点,液压控制技术的发展历程与趋势,液压控制技术的应用。

1.1 开环液压控制与闭环液压控制

与机电控制系统一样,液压控制也可以分为开环液压控制与闭环液压控制。下面以机床运动平台控制为例探讨开环控制系统与闭环控制系统。

机床运动平台是常见的控制对象。机床运动平台是机床的工作台,它安装在床身的滑动导轨上。不同类型机床对运动平台的性能要求不同,例如平面磨床的运动平台(工作台)仅要求实现平稳的水平往复运动,不需要精密控制其位移量。数控加工中心或数控铣床的运动平台(工作台)做精密进给运动,则需要精确控制平台的运动位移量,否则影响工件加工质量。

为了便于清晰探讨实际液压开环控制与液压闭环控制的异同,以机床运动平台为被控对象,分别用电磁换向阀、电磁比例方向阀和电液伺服阀作为主要控制元件,建立机床运动平台的三种常见液压控制系统。

1.1.1 用电磁换向阀构建的液压控制系统

普通平面磨床水平往复工作台可以采用如图 1-1 所示的液压控制方案。因不需要精确控制运动位移,它采用电磁换向阀构建液压控制系统。三位四通电磁换向阀作控制元件,采用行程开关或接近开关等作为指令元件,由继电器等构成逻辑运算网络,可以实现控制信号逻辑运算与功率放大,从而产生足够控制电流驱动电磁换向阀的电磁铁。

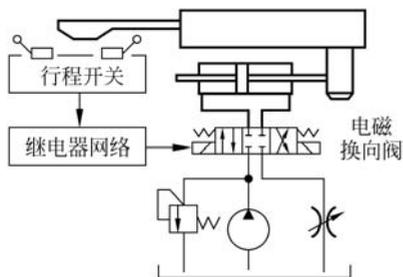


图 1-1 采用电磁换向阀的控制
系统原理图

电磁换向阀的阀芯有三个工作位置:左位、中位和右位,可以控制油路的通断与切换。对每一个阀口油路来说只有两种状态,即完全打开和完全关闭,所以电磁换向阀归类于电磁液压开关阀。

电磁换向阀只能进行打开与关断油路操作,实现运动平台启停;通过改变油路连接实现平台运动换向。无法对电磁换向阀的开度进行调节,从而实现对运动平台速度进行调速控制。

为了调节运动平台的运动速度,液压控制系统中安装一个节流阀,实现回油节流调速。通过调节阀口开度,调节节流阀压差,间接调节经过溢流阀溢流回油箱的流量,从而改变流入和流出液压缸的液流流量,调节平台的运动速度。

运动平台用节流阀调节速度,只能单独调节节流阀,并且不能采用电气控制方式实现平台速度渐变控制。平台启停、换向速度变化突然,平台振动冲击大。

采用电磁换向阀的控制系统原理方块图如图 1-2 所示。控制信号由行程开关发出,信号是逻辑控制量(0 或 1),经过继电器网络进行逻辑运算产生电磁换向阀各个电磁铁的控制信号,控制相应电磁铁供电与否,控制相应阀芯运动,实现阀芯左、中、右三个工作位置变化,输出液压控制流量,驱动液压缸,推动机床运动平台运动。

在由电磁换向阀构成的液压控制系统中,继电器等只能发出简单的控制指令。控制信号是单向流动的,只有流向被控对象的前向信号通道。这种控制系统是开环控制系统。控



图 1-2 采用电磁换向阀的控制系统原理方块图

制指令发出至被控对象响应的的时间取决于信号传递途径的每一元件的响应时间。由于控制指令信号简单,没有控制系统输出跟踪指令信号问题。某一元件若受到干扰,产生误动作,系统不能自动修正与补偿。

在这个例子中,行程开关的作用容易误解为反馈传感器的功能,实际上行程开关只是发出动作触发指令,如正向运动或反向运动。在指令发出后,离开检测位置点,行程开关是不起作用的,不能像位置传感器一样实时给出系统运动过程的位置信息,系统也不依据位置信息实时调整运动状态。这个系统回路是开环的,不是闭环的。

若装备的液压驱动与控制系统只有一个液压缸,采用逻辑顺序控制器(如 PLC)可以实现沿位置点序列或沿时间点序列的液压缸动作顺序控制,如图 1-1 和图 1-2 所示。

若装备的液压驱动与控制系统存在多个液压缸,采用逻辑顺序控制器(如 PLC)还可实现液压缸动作间的顺序协调,甚至更加复杂的控制,如图 1-3 所示。

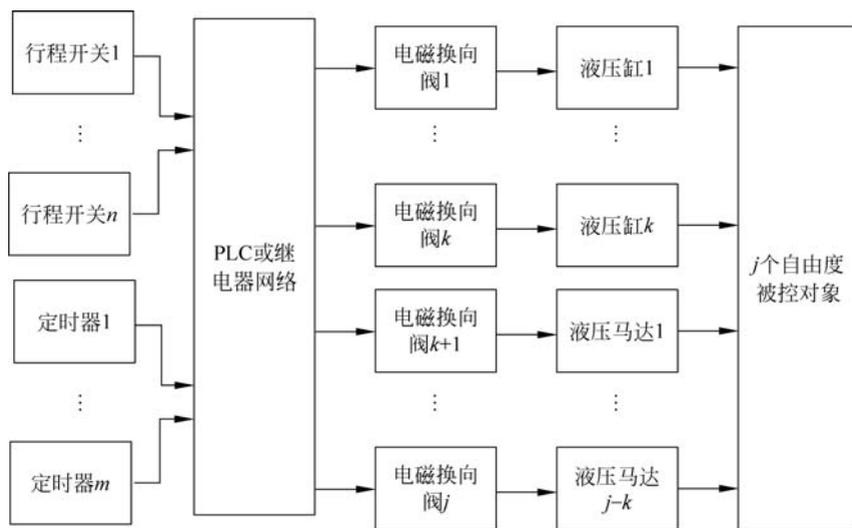


图 1-3 采用电磁换向阀控制多执行器系统原理方块图

顺序控制(sequential control)是顺序地执行一系列操作的控制系统。PLC 控制就是一种典型的顺序控制系统。例如,液压源经常采用 PLC 控制。启动液压源时顺序地依次执行启动电动机(泵)、系统升压、开启设备工作使能,关闭液压源时顺序地依次执行关闭设备工作使能、系统压力回零、停止电动机泵。液压源控制系统还包括故障检测和安全保护的逻辑运算与控制。

液压顺序控制系统每个执行动作结束后,安排等待时间使机构动态平稳至稳态,即忽略液压系统的动态过程(瞬态过程)。实际上,设备控制系统的控制率是执行器动作间的布尔代数逻辑,顺序控制的各个子系统都可看作静态系统。

1.1.2 用电磁比例方向阀构建的液压控制系统

电磁比例方向阀是性能较好、价格稍高的新型电磁液压阀。性能要求较高的运动平台控制,如数控平面磨床,也不需要精确控制工作台位移,可以采用电磁比例方向阀作为控制元件,构成如图 1-4 所示的低冲击、低振动的液压控制系统。

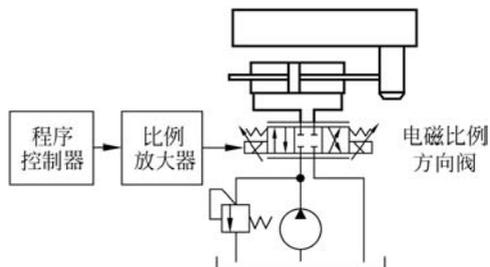


图 1-4 采用电磁比例方向阀的控制系统原理图

电磁比例方向阀采用电信号控制阀芯进行渐变移动,从而控制阀口开度渐变变化,调节比例液压阀的压降和流量等,并在一定程度上实现流量与控制信号间呈现比例变化。

程序控制器产生控制运动平台的电信号,并可以采用渐变的电信号控制和调节平台运动速度,从而改变平台在行进间的速度和运动方向。运动平台启停、换向平稳,几乎无明显冲击。

采用电磁比例方向阀的液压控制系统原理如图 1-5 所示。控制信号由程序控制器发出,信号是模拟控制量(连续电信号),经过比例放大器进行信号功率放大,控制相应比例电磁阀的对应比例电磁铁,推动其阀芯产生连续可调的位移,产生连续变化的液压控制流量驱动液压缸,推动机床运动平台移动。



图 1-5 采用电磁比例方向阀的控制系统原理方块图

在由电磁比例方向阀构建的液压控制系统中,尽管可以采用程度控制器发出渐变连续控制指令信号,但是控制信号是单向流动的,只有流向被控对象的前向信号通道。这种控制系统是开环控制系统。指令系统可以发出连续渐变信号,系统输出可以跟踪指令信号,但跟踪精度低,响应速度慢,响应速度取决于传递信号元件响应时间,不能自动补偿干扰引起的误差。

1.1.3 用电液伺服阀构建的液压控制系统

数控加工中心的工作台运动是加工过程的进给运动,需要很高的精度和响应速度。可以采用电液伺服控制系统,它采用电液伺服阀作为控制元件。

电液伺服阀是高性能液压控制元件,具有很高的控制精度、很快的响应速度,不足的是电液伺服阀价格很高。

电液伺服阀常用于电液闭环控制系统。只是在闭环控制系统调试过程中,可以临时用

开环控制方式驱动被控对象。

用电液伺服阀做控制元件建立的机床运动平台液压控制系统如图 1-6 所示。机床安装位移传感器,用于检测运动平台位置,发出位置电压信号,并经过放大后输入电子控制装置。

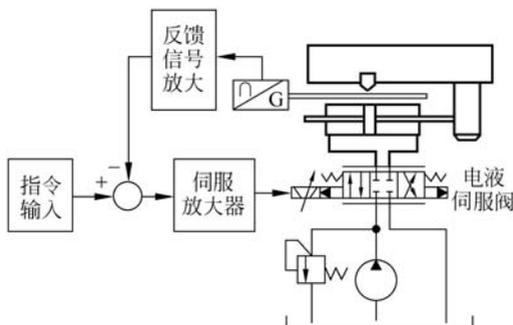


图 1-6 采用电液伺服阀的控制系统原理

控制装置将当前机床平台的位置电压信号与控制指令电压信号进行比较,产生偏差电压信号,偏差信号是连续模拟电压量,它可以精确和实时反映机床平台位置与控制指令(要求平台应处于的位置)的差别。

偏差信号经过比例放大器进行信号功率放大,控制电液伺服阀的力矩马达,高精度、高动态控制阀芯位移,产生需要的液压流量和压力驱动液压缸运动,并推动机床运动平台运动。平台运动被位移传感器检测,并送入电子控制装置。由此构成控制信号封闭循环回路,控制系统也称为闭环控制。

上述控制过程可以用方块图形象描述,如图 1-7 所示,系统是闭环控制结构。闭环液压控制系统中不仅存在控制器对被控对象的前向控制作用,还存在被控对象对控制器的反馈作用。闭环控制系统具有控制精度高、动态响应快、自动补偿外界干扰产生误差的特点。

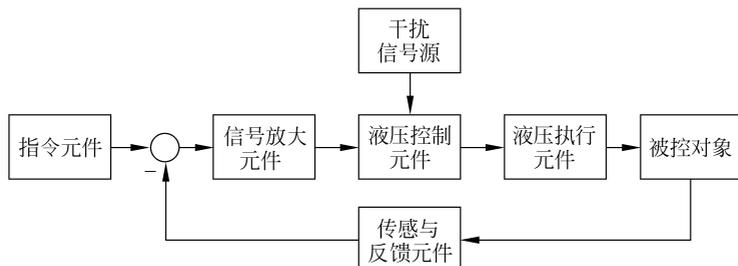


图 1-7 采用电液伺服阀的液压控制系统原理方块图

1.1.4 开环液压控制与闭环液压控制的比较

开环液压控制和闭环液压控制是液压控制的两类基本控制方式,它们各具特点。

1. 开环液压控制

采用普通液压阀和比例液压阀的开环控制系统与液压传动系统有很大的技术重合,它们几乎采用相同类型的液压元件和液压回路。

开环液压控制系统性能主要由所用液压元件的性能实现。开环系统精度取决于系统各

个组成元件的精度,系统的响应特性直接与各个组成元件的响应特性有关。

液压开环控制系统无法对外部干扰和内部参数变化引起的系统输出变化进行抑制或补偿。

从系统设计方面看,开环液压控制系统结构简单,开环液压控制系统一定是稳定的,因此系统分析、系统设计及系统安装等均相对容易,而且还可以借鉴液压传动系统的分析与设计经验。开环液压控制系统与液压传动系统具有较多的共性,区别主要是侧重点有所不同。

开环液压系统经常用于控制精度要求不高,外部环境干扰较小,内部参数变化不大,并且允许系统响应速度较慢的情况。

综上所述,开环液压控制系统是一类简单的无反馈控制方式,只存在控制器对被控对象的单方向控制作用,不存在被控对象对控制器的反向作用,不能自动补偿干扰引起的误差。

鉴于开环控制系统精度较低、响应较慢,一般不采用工作条件要求高、相对价格高、性能相对好的伺服阀构建开环控制系统。

2. 闭环液压控制

闭环液压控制系统经常采用电液伺服阀或直驱阀(direct drive valve, DDV)作控制元件。

电液伺服阀和直驱阀是高性能液压控制元件,它们内部含有闭环反馈控制系统,因而这两类阀具有很高的控制精度、很快的响应速度。

通常,闭环液压控制系统也称液压反馈控制系统,它依据反馈作用原理工作。

反馈控制的基本思想是以偏差来消除或抑制偏差,反馈控制系统是利用偏差进行工作的。通过比较元件将反馈元件检测到的被控对象信息与系统指令元件的控制指令进行比较形成偏差信号。这个偏差信号经过能量放大,从而能够驱动大功率液压控制阀,控制液压执行元件,驱动与控制被控对象。

闭环液压控制系统结构形成闭环回路。闭环控制系统存在稳定性问题,控制精度与动态响应速度均需细致设计与调试,所以闭环系统分析、系统设计及系统调试等均较为繁琐。但是采用闭环控制(反馈控制)方式,用精度相对不高、抗干扰能力相对不强的液压元件有可能构建控制精度高和抗干扰能力强的控制系统,或者在现有液压元件性能的条件下,有可能利用闭环控制获取更好的控制系统性能及控制效果。反馈控制有开环控制无法实现的优点。

反馈控制系统的前向控制通道(从偏差信号至被控对象)就是一个开环控制系统。开环液压控制是液压行业应用最广泛的液压控制方式,特别是在液压比例技术方面。闭环液压控制应用也非常普遍,除了应用于控制系统设计外,闭环控制也是许多液压传动元件(溢流阀、减压阀、顺序阀、调速阀、变量泵变量机构等)的工作机理,闭环控制系统设计嵌在液压元件设计之中。

1.2 连续量控制与开关量控制

液压机械装备中存在许许多多的物理量,这些物理量可以用变量(variable)表示,液压领域的变量可以分为连续(变)量(continuous variable)与开关(变)量(on/off variable)。连续量也称模拟(变)量(analog variable),常见的连续量有压力、流量、位移、速度、加速度、力

等。开关量操作或状态可以用布尔量(boolean variable)或数字(变)量(digital variable)的位表示,常见的开关量有电动机启停、阀门开闭、压力加压与泄压、方向正反、行程开关到位与否等。

1.2.1 液压连续量控制与开关量控制

液压控制阀也可以分为两类:连续量控制阀和开关量控制阀。连续量控制阀俗称连续阀,常见的连续量控制阀有伺服阀和比例阀等。开关量控制阀俗称开关阀,常见的开关量控制阀有电磁换向阀和电磁溢流阀等。

接下来,通过两组例子说明连续量和开关量液压控制阀的区别。例如,电磁换向阀是开关量控制阀,它利用电磁铁实现阀的油路切换,改变阀口的连通关系,阀口有两种状态:导通或断开。可控制液压执行器的运动方向改变,不能控制液压执行器速度改变。电液伺服阀是连续量控制阀,它利用负反馈控制原理不仅可以实现阀口的油路切换,改变阀口的联通关系,而且可以连续控制阀口的开度,实现完全导通与完全断开之间的阀口开度连续渐变。它可以控制液压执行器的运动方向改变,也可以控制液压执行器运动速度的改变,速度变化是连续的。例如,电磁溢流阀采用电磁铁控制溢流阀的工作状态是加压或是卸压,控制量是开关量,要么加压要么卸压,不能用电信号改变压力大小。电磁比例溢流阀采用比例电磁铁替代溢流阀的调压弹簧实现压力控制,它可以采用电信号控制溢流阀设定压力从卸载到满载连续变化,是模拟量控制。

下面还是以机床运动平台控制为例探讨连续量控制系统与开关量控制系统。

图 1-1 机床运动平台采用电磁换向阀控制,是开关量控制系统。行程开关采集机床运动平台到位与否信息,通过继电器网络的逻辑控制产生上电与断电两种电信号,控制电磁换向阀可以实现运动方向切换,但是不能渐变地改变阀开度大小,也就是不能通过电信号渐变地改变平台运动速度。

图 1-4 机床运动平台采用电磁比例方向阀控制,是连续量控制系统,比例放大器可以发出模拟量电信号,通过电磁比例方向阀连续改变液压油的流量,实现运动平台的运动速度和方向的改变。

图 1-6 机床运动平台采用电液伺服阀控制,是连续量控制系统。平台运动控制系统构成闭环控制系统,系统运动平台高精度复现运动控制指令表达的连续量。

1.2.2 连续量或开关量控制的数学基础及控制器

连续量控制的数学基础是微分方程,它可以有方块图、传递函数、状态方程、伯德图等描述方式。以微分方程为数学模型的控制系统是模拟控制系统(analog control system)。模拟量控制系统采用模拟电路或者运算放大器构建处理模拟电子信号的控制器。

现代机器装备多采用微处理器(microprocessor)作为控制系统的控制器,这类控制系统称为计算机控制系统(computer control system)。受控机电系统的物理过程是连续的,通常是动力学过程,它的数学模型是微分方程。而控制器内部微处理器运行的是数字信号,两者之间采用 A/D 和 D/A 转换器连接起来。A/D 和 D/A 转换器的主要原理是采样器和保持器,这类控制系统也称为采样数据控制系统。采样数据控制系统中,计算机控制器运算的控制规律是差分方程,控制信号是离散信号。处理离散信号的控制系统是离散控制系统。

开关量控制的数学基础是逻辑代数,也称布尔代数。开关量用布尔量 0 或 1 表示。开关量控制实现的是操作序列或事件发生次序的顺序控制(sequence control)。早期顺序控制的控制器是继电器网络,也称为继电器控制。现代的顺序控制多采用 PLC 作为控制器。

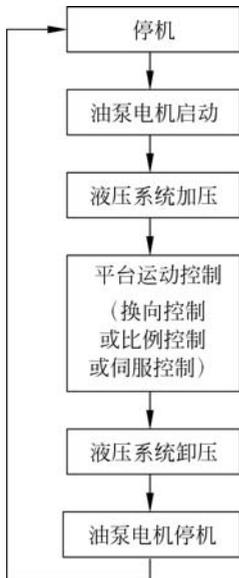


图 1-8 连续量控制与开关量控制的关系

1.2.3 机器装备上连续量控制与开关量控制的关系

对于一台机器装备而言,连续量和开关量都可能存在。对于自动化装备,开关量一定是有的,因为装备的启动与停止就是开关量控制。

图 1-1、图 1-4 和图 1-6 所示的机床运动平台都是采用液压控制方式。简单看,三个液压系统都含有液压泵、液压泵的驱动电动机、调节液压系统压力的溢流阀。除了三种装备的运动平台控制方式不同,它们的运行都包括液压泵电动机启动、液压溢流阀加压、运动平台控制使能、溢流阀卸压、液压泵电动机停机的操作过程。

平台运动控制是装备运行过程的一个子过程,它可以采用开关量控制(开关阀控制)、也可以采用连续量控制(比例控制或伺服控制)。在装备运行至运动平台控制条件具备时,进入平台控制阶段。图 1-8 描述了这个简单例子中开关量控制与连续量控制的关系。

1.3 液压控制系统分类

液压控制系统的工作液黏度等许多重要参数都是温度的变量,而温度会随工作时间和负载情况变化而发生改变,因此严格说液压控制系统是时变系统。为了分析方便,工程上通常将液压控制系统看作定常系统。

液压控制系统是自动控制系统之一,液压控制系统常常有多种分类方法。

1) 按照控制系统环路构成分类

按照控制系统环路构成是否包含反馈回路,液压控制系统可以分为闭环控制系统、半闭环控制系统和开环控制系统。

闭环控制系统的控制系统结构中包含反馈通道,形成闭合环形信号回路,俗称闭环控制。

半闭环控制系统的控制系统结构中包含闭环控制回路,也包含开环回路。常见的一种半闭环控制系统结构是将反馈传感器位置向前移,从被控对象(负载)前移至执行元件,执行元件之前构成闭环控制,执行元件与被控对象之间是开环控制。

开环控制系统的控制系统结构中不包含反馈通道,不形成闭合环形信号回路,控制信号都是从指令元件流向执行元件。

2) 液压闭环控制系统按照控制系统完成的任务分类

按照控制系统完成的任务类型,液压闭环控制系统可以分为随动控制系统、程序控制系统和调节控制系统。

随动控制系统输入控制指令信号是变化量,是可以无规律的变化量。通常要求系统输出量能够以一定精度跟踪控制指令信号变化,也称随动系统。

程序控制系统输入控制指令信号是变化量,是有规律的变化量,可以预先通过程序描述变化过程。通常要求系统输出量能够以一定精度跟踪控制指令信号变化,控制系统设计可以利用预先已知的输入信号变化规律。

调节控制系统的控制量为一个定值。通常,在外部干扰和内部参数变动条件下,要求系统输出以一定精度保持在希望数值上,也称恒值系统。

本书采用闭环控制系统或反馈控制系统的概念,它们涵盖随动系统、恒值系统、调节系统。广义的伺服控制系统等同于闭环控制系统或反馈控制系统。狭义的伺服控制系统等同于随动控制系统。

3) 按照控制系统各组成元件的线性情况分类

按照控制系统是否包含非线性组成元件,液压控制系统可以分为线性系统和非线性系统。

实际液压元件存在明显的非线性,实际液压控制系统是典型的非线性系统。

经过线性化处理的液压控制系统或液压元件模型是线性系统。

通常,非线性系统分析和设计都较困难,因此对液压控制系统进行分析与设计常用线性化模型。

4) 按照控制系统各组成元件中控制信号的连续情况分类

按照控制系统中控制信号是否均为连续信号,液压控制系统可以分为连续系统、离散系统和顺序控制系统。

仅由机械机构和液压元件构成的液压控制系统是连续系统,采用电子模拟控制器构成的电液伺服系统也是连续系统。

计算机控制电液伺服系统是采样数据控制系统,微处理器作为数字控制器是离散系统。

顺序控制系统处理布尔量,是开关量控制系统。

5) 按照被控物理量分类

按照被控物理量不同,液压闭环控制系统可以分为位置控制系统、速度控制系统、力控制系统和其他物理量控制系统。

被控对象是机械平动运动时,位置控制系统的被控物理量是位置或位移,速度控制系统的被控物理量是速度,力控制系统的被控物理量是力。

被控对象是机械转动运动时,位置控制系统的被控物理量是角位置或角位移,速度控制系统的被控物理量是角速度,力控制系统的被控物理量是力矩。

6) 按照液压控制元件或控制方式分类

按照液压控制元件类型或控制方式不同,液压反馈控制系统可以分为阀控系统(节流控制方式)和泵控系统(容积控制方式)。进一步按照液压执行元件分类,阀控系统可分为阀控液压缸系统和阀控液压马达系统;泵控系统可分为泵控液压缸系统和泵控液压马达系统。

无特别说明,本书中液压马达均指液压伺服马达;液压缸均指液压伺服缸。

7) 按照信号传递介质分类

按照控制信号传递介质不同,液压控制系统可分为机械液压控制系统、电气液压控制系统等。

机械液压控制系统(简称机液控制系统)中控制信号传递介质是机械机构和液压工作液,没有电气元器件参与控制。

电气液压控制系统(简称电液控制系统)中控制信号传递介质包含电气元器件,电气信号参与液压控制。

8) 按照液压控制元件分类

按照液压控制元件不同,工程行业有一种通俗分类,将液压控制系统分为开关阀控制系统、伺服控制系统和比例控制系统等。

开关阀控制系统的液压控制元件是开关阀,这类控制系统与液压传动系统有很大的重合。

伺服控制系统是采用电液伺服阀构建的闭环液压控制系统。

比例控制系统是采用电液比例阀构建的液压控制系统。比例控制系统有开环控制方式和闭环控制方式两种。

1.4 液压控制的特点

与其他控制方式相比,液压控制具有鲜明的特点。

1.4.1 液压控制的优点

液压控制主要优点概括如下。

1) 体积小和质量轻

液压元件具有很大的功率-重量比和力矩-惯量比(或力-质量比),因此液压系统的功率传递密度大。在同样控制功率或同样控制负载情况下,采用液压控制技术可以构建结构更紧凑、体积更小、质量更轻和动态响应更快的液压控制系统。

2) 刚度大、精度高、响应快

液压工作液体积模量大、泄漏小,液压控制系统具有很大静态刚度。液压伺服系统可以提供更大的动态刚度。液压控制系统的刚度大,则负载力干扰产生的液压执行机构位移误差较小,系统控制精度较高,响应控制指令的速度较快。

3) 驱动力大,适合重载直接驱动

液压控制系统采用静液压驱动方式,具有液压传动系统驱动力大的优点。在同样体积情况下,液压系统可以发出更大力(或力矩)。在同样负载条件下,液压控制更适合直接驱动。

4) 调速范围宽,速度控制方式多样

静液压驱动方式易于实现无级变速,调速范围宽。例如液压仿真转台的阀控马达转速范围可以实现 $0.0004 \sim 300^\circ/\text{s}$ 连续变速。速度控制有阀控方式、变转速泵控、变排量泵控等多种方式适应不同被控对象需求。

5) 自润滑、自冷却和长寿命

液压工作液具有良好润滑特性和冷却作用。液压元件工作时元件磨损小,液压工作液能够带走工作过程中产生的热量,液压控制系统具有更长的工作寿命。