

4.1 概述

执行器是过程控制系统中的实施机构，它接收控制器输出的控制信号，将其转换成位移(直线位移或角位移)或速度，以改变流入或流出被控过程介质(物料或能量)的大小，将被控变量维持在所要求的数值上，从而达到生产过程的自动化。

如果把自动控制系统与人工控制过程相比较，检测单元是人的眼睛，控制单元是人的大脑，执行单元就是人的手脚。要实现对工艺过程某一参数，如温度、压力、流量、液位等参数的调节控制，都离不开执行器。执行器一般安装在生产现场，直接与介质接触，通常在高温、高压、高黏度、强腐蚀、易结晶、易燃易爆、剧毒等场合下工作，其结构、特性和性能直接影响过程控制系统的安全性、可靠性和控制质量。因此，合理选用执行器及其辅助机构，对于过程控制系统的建立与维护非常重要。

从结构上看，执行器一般由执行机构和调节机构两部分组成。执行机构是执行器的推动部分，它按照控制器所给信号的大小，产生推力或位移；调节机构是执行器的调节部分，最常见的是调节阀，也称为控制阀，它受执行机构的操纵，改变阀芯与阀座间的流通面积，调节工艺介质的流量。一般将执行机构也称为执行器。

根据执行器所配执行机构使用的动力，执行器可分为气动、电动和液动三种。他们的执行机构不同，但调节机构大体是相同的，一般均采用控制阀作为通用调节机构。将这三种执行器进行归纳比较，详见表4-1。

表4-1 三种执行器的比较

项目类型	结构	体积	配管配线	推力	动作滞后	维护	可用场合	价格	频率响应	温度影响
气动执行器	简单	中	较复杂	中	大	简单	防火防爆	低	窄	较小
电动执行器	复杂	小	简单	小	小	复杂	不防火爆	高	宽	较大
液压执行器	简单	大	复杂	大	小	简单	注意火花	高	窄	较大

(1) 气动执行器。气动执行器以压缩空气为动力, 输入为 20~100kPa 的气压信号。特点为结构简单、动作平稳、输出推力大、安全防爆、维护方便、价格便宜。它可与气动控制仪表配套使用, 也可经电—气转换器(或电—气阀门定位器)与电动控制仪表和工业控制计算机配套使用, 尤其适用于易燃易爆的生产现场。缺点是动作时间稍长, 现场需要气源, 不宜直接与数字设备连用。

(2) 电动执行器。电动执行器以电能作为动力, 输入信号为 4~20mA 的直流电流。优点为电信号的传输速度快、距离远, 动作迅速, 可与电动仪表直接连用; 缺点是结构复杂、推力小、防燃防爆性差, 适用于缺乏气源、防爆要求不高的场合。

(3) 液动执行器。液动执行器以液压油为动力, 通常为一体式结构, 即执行机构和调节机构为统一整体。工作时需外部的液压系统支持, 运行时要配备液压站和输油管路。相对于其他两种执行器, 液动执行器的体积大、推力大, 具有传动平稳、响应快等优点, 但其一次性投资大、安装工作量多, 仅在大动力工作场合才使用。

近年来, 随着变频调速技术的发展, 一些控制系统已开始采用变频器和相应的电动机(泵、风机)等设备组成执行器, 取代控制阀, 具有显著的节能效果。

4.2 气动执行器

气动执行器是指以压缩空气为动力的执行器, 一般由气动执行机构和控制阀组成。此外, 气动执行器要接收来自控制器的模拟电信号, 需要安装电/气转换器将电信号转换为气动信号; 气动执行器一般还配有阀门定位器来提高响应速度和定位精度。本节首先介绍气动执行器的基本结构, 再对辅助机构—电/气转换器与阀门定位器进行介绍。控制阀作为通用的调节结构, 则单独放入 4.3 节中进行讲解。

4.2.1 气动执行器的基本结构

气动执行器由气动执行机构和控制阀组成, 气动执行机构接收电/气转换器(或电/气阀门定位器)输出的 20~100kPa 气压信号, 将其转换为相应的输出力和推杆位移, 控制阀将该位移信号转换为对流量的控制。

常用的气动执行机构有薄膜式和活塞式两种。其中, 活塞式执行机构依靠气缸内的活塞输出推力, 由于气缸允许较高的压力, 因此可以获得较大的推力, 并容易制成长行程的执行机构。因此, 活塞式执行机构的特点是输出推力大、行程长, 但其价格较高, 只用于特殊需要的场合。薄膜式执行机构使用弹性膜片将输入气压转换为推力, 由于输出行程较小, 只能直接带动阀门, 但其结构简单、动作可靠、维修方便、价格低廉, 获得了广泛应用。

典型的气动薄膜执行器如图 4-1 所示, 它可以分为气动薄膜执行机构与控制阀两个部分。气动薄膜执行机构主要由弹性膜片、推杆和平衡弹簧等部分组成。当 20~100kPa 的标准气压信号进入薄膜气室时, 在膜片上产生向下的推力, 并克服弹簧的反作用力, 使推

杆产生位移，直到弹簧的反作用力与薄膜上的推力平衡为止，平衡时推杆的位移与输入气压大小成比例。控制阀是执行器的实施部分，又称调节阀，它是一个局部阻力可以改变的节流件，由阀杆、阀体、阀芯及阀座等部件组成，图 4-1(b) 为常用的直通单座阀。当阀芯在阀杆的带动下在阀体内上下移动时，将改变阀芯与阀座之间的流通面积，调节通过的介质流量。气动执行器与电动执行器使用的控制阀在结构形式和功能上是相同的，其区别在于不同的执行机构。控制阀的类型与流量特性放入 4.3 节中进行讲解，另外控制阀的选型与口径计算放入第六章“单回路控制系统”中进行介绍。

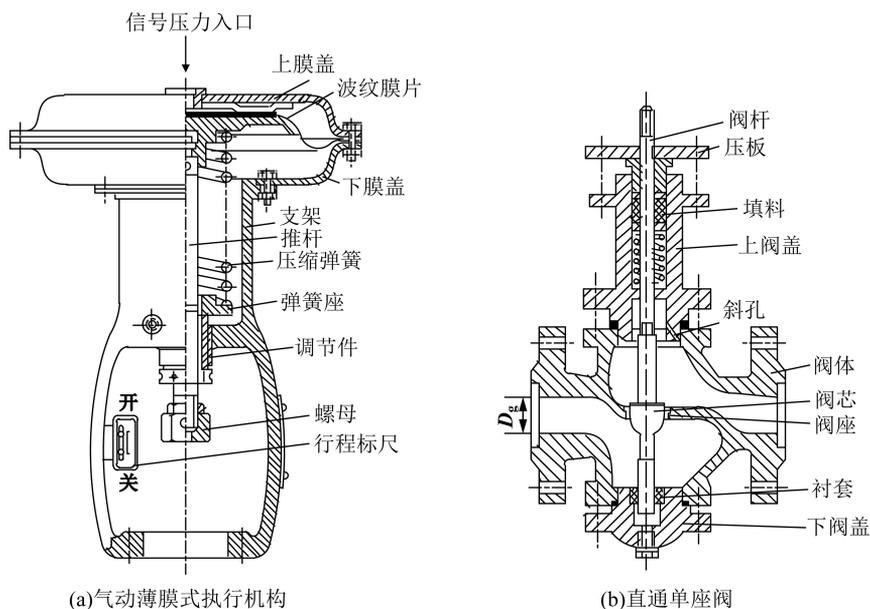


图 4-1 气动薄膜执行器的结构组成

气动薄膜执行机构分为正作用和反作用两种形式。当输入气压信号增加时，推杆向下移动，称为正作用式执行机构(ZMA)；相反，输入气压信号增加时，推杆向上移动，称其为反作用式执行机构(ZMB)。工业生产中，口径较大的控制阀一般采用正作用式执行机构。

4.2.2 气动执行器的辅助机构

1. 电/气转换器

在很多工作现场，由于防火防爆的需要，往往选择气动执行器。但控制器的输出一般为标准的电流信号，选用气动执行器需要先将 4~20mA 的标准电流信号转换为 20~100kPa 的标准气压信号。电/气转换器的作用就是将标准电流信号转换为标准气压信号，实现电动仪表与气动仪表的联用。另外也常用电/气阀门定位器，它具有电/气转换与阀门定位的双重作用。下面首先介绍实现电/气转换器需要了解的气动元件：气阻、气容、喷嘴挡板机构和气动功率放大器，再介绍电/气转换器的工作原理和结构。

(1) 气阻。气阻与电子线路中的电阻类似，表示气体在管道中流动所受阻力的大小。

气阻两端的压降可看作电路中的电压降, 气体的流量可看作电路中的电流。当流体成层流状态时, 气阻可表示为

$$R = \frac{\Delta p}{M} \quad (4-1)$$

式中, R 为气阻, Δp 为气阻两端的压降, M 为气体的质量流量。

气阻有恒气阻(如毛细管、小孔等)与可调气阻(变气阻), 以及线性气阻与非线性气阻。流过气阻的流体为层流状态时, 气阻呈现为线性; 而流过气阻的流体为紊流状态时, 气阻呈现为非线性。

(2) 气容。气容与电路中的电容类似, 是一个具有一定容积的气室, 是储能元件, 其两端的气压不能突变。类似于电路中电容与电压和电流的关系式, 气容与压降和流量的关系式可以写成

$$C_g \frac{d\Delta p}{dt} = M \quad (4-2)$$

式中, C_g 为气容, 根据理想气体状态方程, 气容可以写为

$$C_g = \frac{V_0}{RT} \quad (4-3)$$

式中, V_0 为气室的体积, R 为气体常数, T 为气体热力学温度。

由上式可见, 对于温度恒定的固定气室, 其体积不变, 温度不变, 则气容是恒值。

(3) 喷嘴挡板机构。喷嘴挡板机构的作用是把微小位移转换为相应的压力信号, 如图 4-2 所示, 它由恒节流孔(恒气阻)、节流气室和喷嘴挡板所形成的变节流孔(变气阻)组成。恒节流孔是一孔径 d 为 0.10~0.25mm, 长为 5~20mm 的毛细管, 气源压力 p_s 为 140kPa 经恒节流孔进入节流气室, 再由喷嘴与挡板间的间隙排出。气室的直径约为 2mm, 喷嘴的直径 D 为 0.8~1.2mm, 喷嘴与挡板构成变气阻, 当挡板的位置改变时, 气室压力 p_B (常称喷嘴背压) 也会改变。

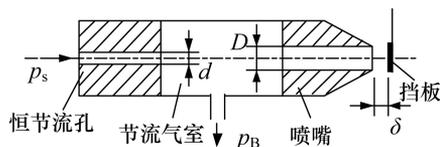


图 4-2 喷嘴挡板机构图

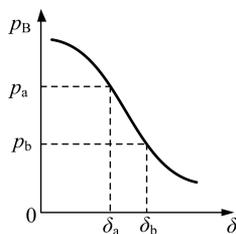
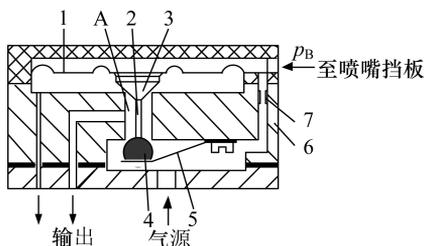


图 4-3 喷嘴背压与挡板位移特性

图 4-3 为喷嘴背压 p_B 与挡板位移 δ 的特性图, 当 δ 在 $\delta_a \sim \delta_b$ 区间变化时, p_B 与 δ 呈线性关系。 $\delta_a \sim \delta_b$ 是喷嘴挡板的工作区, 只有百分之几毫米的变化范围, 其间 p_B 有 8kPa 的变化量。可见, 喷嘴挡板机构可以把微小的位移量转换成相应的气压信号, 该气压信号经后续功率放大器放大后, 可输出 20~100kPa 的标准气压信号。

(4) 功率放大器。功率放大器将喷嘴挡板机构的输出压力和流量都进行放大, 目前广泛采用耗气式放大器, 它由壳体、膜片、锥阀、球阀、簧片、恒气阻等组成, 如图 4-4

所示。

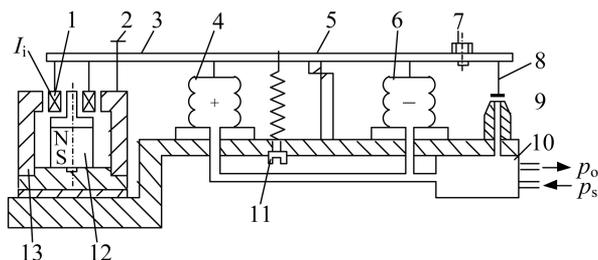


1—膜片；2—阀杆；3—锥阀；4—球阀；5—簧片；6—壳体；7—恒气阻

图 4-4 气动功率放大器的结构原理图

当输入信号(喷嘴背压) p_B 增大时,金属膜片受力产生向下的推力,此力克服簧片的预紧力,推动阀杆下移,使球阀开大,锥阀关小。从球阀进入 A 室(节流气室)的气体增多,从锥阀流出 A 室的气体减小,使 A 室的输出压力增大。该输出压力与输入压力 p_B 相对应,实现了压力信号的放大。

(5) 电/气转换器的工作原理和结构。电/气转换器是基于力矩平衡原理工作的,其结构形式有多种,现以具有正、负两个反馈波纹管的气/电转换器为例讨论其工作原理。转换器由电流—位移转换部分、位移—气压转换部分、气动功率放大器和反馈部件组成,如图 4-5 所示。



1—动圈；2—限位螺钉；3—杠杆；4—正反馈波纹管；5—十字簧片支撑；6—负反馈波纹管；7—平衡锤；8—挡板；9—喷嘴；10—气动放大器；11—调零弹簧；12—铁芯；13—磁钢

图 4-5 电/气转换器的结构图

当控制器送出的电流 I_i 进入动圈后,产生的磁通与永久磁钢在空气隙中的磁通相互作用,从而产生向上的电磁力,带动杠杆绕支承转动,使安装在杠杆右端的挡板靠近喷嘴,其背压升高,经气动放大器进行功率放大后,输出压力 p_o 。

压力 p_o 送给负反馈波纹管 6 产生向上的负反馈力, p_o 同时送给正反馈波纹管 4 产生向上的正反馈力,以抵消一部分负反馈的影响。反馈部件可以缩小小磁钢与动圈尺寸以及动圈距簧片支承的距离,大大减小了整个转换器的体积。平衡锤用以平衡整个活动系统的质量,使转换器在倾斜位置上也能正常工作,同时提高抗震性能。

因此,电/气转换器实现了电流—压力的转换:输入电流 I_i 的大小决定了喷嘴挡板间的距离 δ ,距离 δ 的大小又决定了输出气压 p_o 的大小, p_o 送到气动执行机构上最终决定控制阀的开度。

2. 阀门定位器

由于气动执行机构的动作滞后较大, 响应速度较慢、推力较小, 一般配套使用阀门定位器。如图 4-6 所示为阀门定位器的功能示意图, 其接收来自控制器的输出信号 p_0 (气动信号或电动信号), 经比例放大后输出信号 p_1 施加到执行机构上, 执行机构的位置信号再通过机械装置反馈到阀门定位器上, 使阀门定位器与执行机构构成闭环负反馈系统。

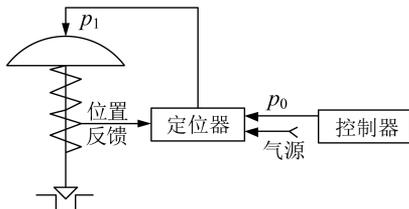


图 4-6 阀门定位器的功能示意图

阀门定位器的主要作用有以下几点。

(1) 增加执行机构的推力, 提高控制阀的定位精度。

通过提高定位器的气源压力来增大执行机构的输出力, 可克服介质对阀芯的不平衡力, 也可克服阀杆与填料间较大的摩擦力或介质对阀杆移动产生的较大阻力, 进而确保阀门位置按控制器输出信号准确定位。因此, 阀门定位器可用于高压差、大口径、高压、高温、低温及介质中含有固体悬浮物或黏性流体的场合。

(2) 克服信号的传递滞后, 加快执行机构的动作速度, 改善控制阀的动态特性。

当控制器与执行机构距离较远时, 为了克服信号的传递滞后, 加快执行机构的动作速度, 应使用阀门定位器, 使控制阀由一阶滞后环节变为纯比例环节。

(3) 改善控制阀的流量特性。

通过改变反馈凸轮的几何形状可改变控制阀的流量特性, 这是因为反馈凸轮形状的变化, 改变了执行机构对定位器的反馈量变化规律, 使定位器的输出特性发生变化, 从而改变了定位器输入信号与执行机构输出位移间的关系, 即修正了流量特性。

(4) 实现分程控制。

采用一台控制器的输出信号分别控制两台气动执行器工作时, 可使用两个阀门定位器, 使它们分别在信号的某一区段完成行程动作, 实现分程控制。假定分程点为 50%, 则控制器输出为 0~50% 时, 第一台定位器工作, 其输出为 0~100%, 第二台定位器不工作, 输出为 0; 当控制器输出为 50~100% 时, 第一台定位器保持在 100% 状态, 第二台定位器输出为 0~100%。

阀门定位器可分为气动阀门定位器、电/气阀门定位器和智能阀门定位器。其中, 电/气阀门定位器具有电/气转换器和阀门定位器的双重功能, 应用最为广泛。

(1) 电/气阀门定位器。如图 4-7 所示为电/气阀门定位器的结构原理图, 它接收控制器送出的 4~20mA 直流电流信号, 成比例地输出 20~100kPa 或 40~200kPa (大功率) 气动信号到气动执行机构。

该阀门定位器包括转换组件、气路组件、反馈组件和接线盒组件。转换组件包括永久磁钢、线圈、杠杆、喷嘴、挡板及调零装置等部件, 其作用是将电流信号转换为气压信号。气路组件包括气动放大器、气阻、压力表及自动—手动切换阀等部件, 可实现气压信号放大和自动—手动切换的功能。反馈组件包括反馈弹簧、反馈拉杆、反馈压板等部件, 其作用是平衡电磁力矩, 并保证阀门定位器输出与输入的线性关系。接线盒组件由接线

盒、端子板及电缆引线等部分组成，对于一般型和本质安全型无隔爆要求，而对于安全隔爆复合型则采取了隔爆措施。

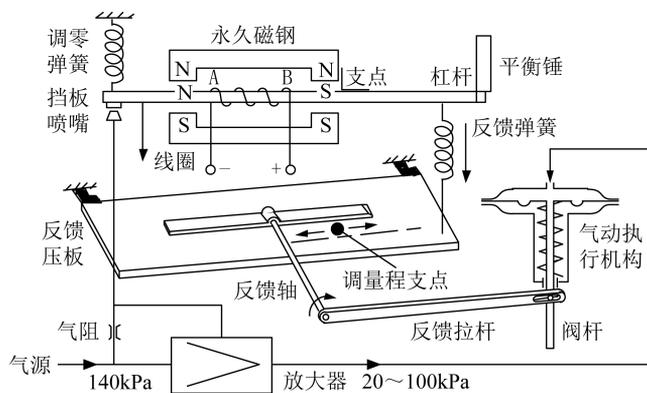
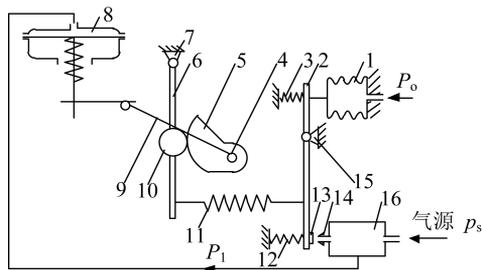


图 4-7 电/气阀门定位器

电/气阀门定位器的工作原理：来自控制器或输出式安全栅的 $4\sim 20\text{mA}$ 直流电流信号输入到转换组件的线圈中，由于线圈两侧各有一块极性方向相同的永久磁钢，所以线圈产生的磁场与永久磁钢的恒定磁场，共同作用在线圈中间的可动铁芯即杠杆上，使杠杆产生位移。当输入信号增加时，杠杆左端向下运动（逆时针偏转），固定在杠杆上的挡板便靠近喷嘴，使放大器背压升高，经放大后输出气压也随之升高。此输出作用在气动执行机构的膜头上，使阀杆向下运动。阀杆的位移通过反馈拉杆转换为反馈轴和反馈压板的角位移，并通过调量程支点作用于反馈弹簧上，该弹簧被拉伸，产生一个反馈力矩，使杠杆顺时针偏转，当反馈力矩和电磁力矩相平衡时，阀杆就稳定在某一位置，从而实现了阀杆位移与输入电流信号成比例关系的特性。调整调量程支点的位置，可以满足不同阀杆行程的要求。

(2) 气动阀门定位器。如图 4-8 所示为力平衡式气动阀门定位器。当输入波纹管 1 的信号压力 p_0 增加时，使主杠杆 2 绕支点 15 做逆时针转动，挡板 13 靠近喷嘴 14 使背压增加，并经功率放大器 16 放大后送到执行机构 8 的薄膜上，阀杆下移，带动反馈杆 9 绕凸轮支点 4 转动，反馈凸轮 5 也跟着做逆时针方向转动，通过滚轮 10 使副杠杆 6 绕支点 7 做顺时针转动，将反馈弹簧 11 拉伸，反馈弹簧对主杠杆 2 的拉力与信号压力 p_0 作用在波纹管 1 上的力达到力矩平衡时仪表达达到平衡状态。此时，信号压力 p_0 对应于一定的阀门位置。



1—波纹管；2—主杠杆；3—迁移弹簧；4—凸轮支点；5—凸轮；6—副杠杆；7—支点；8—执行机构；9—反馈杆；10—滚轮；11—反馈弹簧；12—调零弹簧；13—挡板；14—喷嘴；15—主杠杆支点；16—放大器

图 4-8 力平衡式气动阀门定位器

调零弹簧 12 是调零弹簧，调其预紧力可使挡板初始位置变化。弹簧 3 是迁移弹簧，在分程控制系统中用来改变波纹管对主杠杆作用力的初始值，以使定位器在接收不同输入信号范围(20~60kPa 或 60~100kPa)时，仍能产生相同的输入信号。

(3) 智能(数字式)阀门定位器。传统的气动阀门定位器与电/气阀门定位器均采用喷嘴挡板机构来实现力(力矩)与气动信号的转换，机械部件较多，存在以下问题。

① 因采用机械力平衡式原理工作，定位器中有很多相互作用的小零件，可动件较多，容易受温度波动的影响，误差较大。

② 耐环境性差。采用机械力平衡式原理的定位器易受外界振动的影响，外界振动传到力平衡机构，有时会使定位器难以工作。

③ 装好的控制阀由于尺寸、衬垫摩擦等是多变的，难以达到最佳工作状态。

④ 喷嘴本身是一个潜在的故障源，易被空气中的灰尘或污染颗粒堵住，使定位器不能正常工作。

⑤ 能耗大。常规定位器由喷嘴连续供给压缩空气，在执行器处于稳定状态时也要供给压缩空气，当工厂使用的执行器较多时，能耗较大，所需成本增大。

⑥ 常规定位器零点和行程的调整分别需要手动调整，反复进行，很费时间。

计算机技术的发展促使阀门定位器朝着数字化和智能化的方向发展。智能阀门定位器不仅能很好地消除或减小以上问题，而且与常规阀门定位器相比，智能阀门定位器在使用情况、性价比等方面均具有明显的优势。

如图 4-9 所示为智能阀门定位器的结构功能图。控制信号由模拟信号传输线(4~20mA)或现场总线(HART、FF、Profibus PA)引入，先经过信号调理与 A/D 转换变为数字信号，再送入微处理器进行计算。微处理器的计算结果控制电/气转换装置，使相应的开/关“压电阀”动作，驱动阀杆位移，其位移量反馈到定位器中实现闭环负反馈。阀位的检测可采用霍尔传感器、电位器式传感器或磁阻效应传感器等。

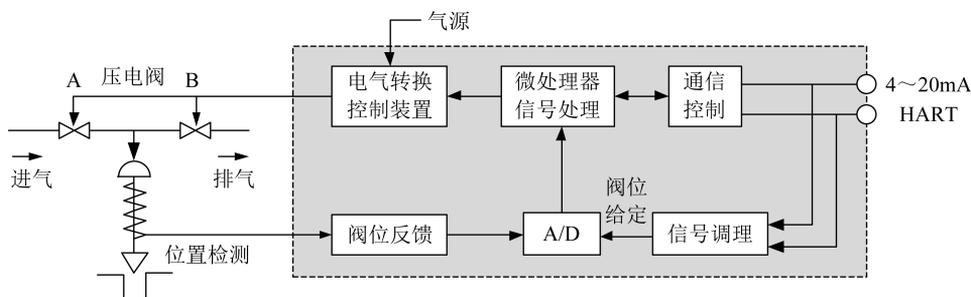


图 4-9 智能阀门定位器

与传统阀门定位器相比，智能阀门定位器以微处理器为核心进行数字化处理，尤其是采用了新型的压电阀代替传统的喷嘴挡板机构，其耗气量极小，定位精度高。以图 4-9 为例，压电阀 A 和 B 分别用来控制压缩空气进、出气动执行机构。两个阀都只有“开”和“关”两种状态，在任一时刻，阀 A、B 中只能有一个开通，另一个关闭。当阀 A 开通时，压缩空气进入薄膜气室，在膜片上产生向下的推力，阀杆向下移动，阀门关小；反之，阀 B 开通时，薄膜气室中的空气排出大气，阀杆在弹簧的作用下向上移动，阀门开大。因

此, 相对于传统定位器的连续耗气型元件(喷嘴挡板机构), 智能阀门定位器只有在减小输出压力时, 才向外排气, 因此在大部分时间内处于非耗气状态, 总耗气量很低, 相对于传统定位器来说可忽略不计。

压电阀是利用功能陶瓷片在电压作用下产生弯曲变形原理而制成的一种两位式(或比例式)控制阀。控制压电阀动作只需提供足够的电压, 电功耗几乎为零。其基本原理是依据压电材料的压电效应, 采用压电陶瓷片, 在其两侧施加 24~30V 电压, 压电陶瓷片弯曲, 形变量可达几十微米, 从而可以堵住(放开)进气口(排气口), 达到控制气流的目的。由于压电陶瓷的阻抗很高, 所以这种控制阀的优点是功耗极低, 易于实现二线制仪表和本安防爆仪表。此外, 它的动作速度快、质量轻, 在振动较大的环境中仍能可靠工作。

智能式阀门定位器一般配备有液晶显示面板和操作按键, 可实现本地显示与维护操作。另外, 可借助通信控制电路, 实现阀门定位器的远程组态、调试与诊断等功能。

4.3 控制阀

控制阀又称调节阀, 是执行器的控制部分。它是一个局部阻力可以变化的节流元件, 如图 4-1(b)所示为常用的直通单座阀。当阀芯在阀体内移动时, 改变了阀芯与阀座之间的流通面积, 即改变了阀的阻力系数, 被控介质的流量也相应地改变, 从而达到控制工艺变量的目的。本节对控制阀的工作原理、结构类型和流量特性进行了介绍, 而控制阀以及执行器的选择见 6.3 节。

4.3.1 控制阀的工作原理

从水力学的观点来看, 控制阀是一个局部阻力可以变化的节流元件。局部阻力是由阀芯和阀座间流通面积的局部缩小造成的。对于不可压缩流体, 由流体的能量守恒原理可知, 流体通过节流件(控制阀)时产生的压力损失 Δp 与流体速度的关系为

$$\Delta p = \xi \rho \frac{v^2}{2} \quad (4-4)$$

式中, v 为流体的平均流速; ρ 为流体密度; ξ 为控制阀的阻力系数, 与阀门的结构形式和开度有关。考虑到流体的平均流速 v 等于流体的体积流量 Q 除以控制阀连接管的截面积 A , 即 $v=Q/A$, 代入式(4-4)并整理, 可得流量表达式, 即

$$Q = \frac{A}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4-5)$$

从上式可以看出, 通过控制阀的流体流量除了与阀两端压差及流体密度有关, 还与阀门口径、阀芯和阀座的形状以及阀门开度有关。当控制阀体的口径、压差和流体密度不变时, 流量 Q 仅随阻力系数 ξ 而变化, 当 ξ 增大时, Q 减小, 反之 ξ 减小时, Q 增大。因此, 控制阀体就是依据执行机构输出的推杆位移量来改变阀门的开启程度, 进而改变阻力系数, 从而达到调节流量的目的。

4.3.2 控制阀的结构类型

控制阀通常由上阀盖、下阀盖、阀体、阀座、阀芯和阀杆等零部件组成。由于控制阀直接与被控介质接触，为适应各种不同的使用环境和条件，控制阀在制造材料上、阀体与阀芯的结构形状上，以及阀芯的运行方式上都有很大差异，下面分别就阀和阀芯介绍常用的几种结构形式。

1. 阀的结构形式

根据不同的使用要求，阀的结构形式很多，主要有以下几种。

(1) 直通单座阀。如图4-10(a)、(b)所示，阀体内只有一个阀芯和一个阀座。此阀的特点是结构简单，泄漏量小，可保证关闭。但压差较大时，流体对阀芯的上下作用推力不平衡（不平衡力大），从而影响阀芯移动。一般用于小口径、泄漏量要求严格和压差较小的场合。

(2) 直通双座阀。如图4-10(c)所示，阀体内有两个阀芯和两个阀座。与同口径的单座阀相比，它的流通力大20%~25%。其优点是允许压差大、不平衡力较小，缺点是泄漏量大。因此适用于阀两端压差较大、泄漏量要求不高的场合，但不适宜用于高黏度和含纤维的场合。

(3) 角型阀。如图4-10(d)所示，用于两根管道相交呈直角处的连接，其阀体为直角形，流路简单、阻力小，一般用于工作现场管道有直角拐弯要求的地方，且适用于高压差、高黏度、含悬浮物和颗粒状物料流量的控制。

(4) 三通阀。如图4-10(e)、(f)所示，阀体上有三个通道与管道相连。三通阀分为分流型与合流型，分流型为一流量进入，两流量流出；而合流型为两流量进入，一流量流出。该阀主要用于配比控制和旁路调节。另外，应注意使用中的流体温差应小于150℃，否则会使三通阀变形，造成泄露或损坏。

(5) 蝶阀。如图4-10(g)所示，也称为翻板阀。由阀体、挡板、挡板轴和轴封等部件组成。挡板靠转轴的旋转来控制流体流量，转角通常在0~70°之间。其结构紧凑、成本低、流通能力大，特别适用于低压差、大口径、大流量气体和带有悬浮物流体的场合，但泄漏量较大。

(6) 套筒阀。如图4-10(h)所示，又称笼式阀。其阀体与普通直通单座阀相似，阀内有一个圆柱形套筒，套筒壁上有一个或几个不同形状的窗孔。阀芯在套筒内上下移动，改变节流孔面积，实现流量调节。该阀不平衡力小、稳定性好、噪声低、互换性和通用性强，拆装和维修方便，不同套筒(窗口形状)有不同流量特性，得到了广泛应用。但不宜用于高温、高黏度、含颗粒和结晶的介质控制。

(7) 偏心旋转阀。如图4-10(i)所示，也称凸轮挠曲阀，其工作原理是一个偏心转动的扇形球阀，利用偏心球冠与阀座相切。打开时，球芯脱离阀座，关闭时，球芯逐步接触阀座，使球芯对阀座产生压紧力。该阀具有体积小、质量轻、使用可靠、维修方便、通用性强、流体阻力小等优点，适用于黏度较大的场合。在石灰、泥浆等流体中，具有较好的使用性能。

(8) 高压阀。如图4-10(j)所示，是一种适用于高静压和高压差控制的特殊阀门，多

为角形单座，额定工作压力可达 32MPa。为了提高阀的使用寿命，根据流体分级降压的原理，多采用多级阀芯高压阀。

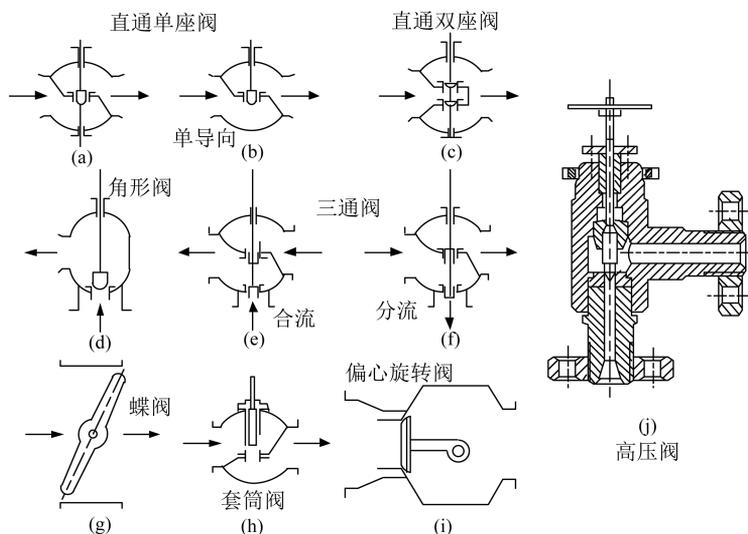


图 4-10 阀的结构形式

2. 阀芯形式

根据阀芯的动作形式可分为直行程阀芯和角行程阀芯两大类。

(1) 直行程阀芯。如图 4-11 所示，直行程阀芯可分为以下几种。

① 平板型阀芯。如图 4-11(a)所示，该阀门结构简单，具有快开特性，可做两位控制用。

② 柱塞型阀芯。如图 4-11(b)、(c)、(d)所示。图 4-11(b)所示阀芯的特点是上下可倒装，可以实现正、反控制作用，阀的流量特性常用线性和等百分比两种。图 4-11(c)所示阀芯适用于角形阀和高压阀。图 4-11(d)为球形、针形阀芯，适用于小流量阀。

③ 窗口型阀芯。如图 4-11(e)所示。适用于三通控制阀，左边的为合流型，右边的为分流型，阀的流量特性有直线、等百分比和抛物线三种。

④ 多级阀芯。如图 4-11(f)所示，把几个阀芯串接在一起，起逐级降压作用，用于高压差阀，可防止气蚀破坏作用。

⑤ 套筒阀阀芯。如图 4-11(g)所示，用于套筒阀，只要改变套筒窗口形状，即可改变阀的特性。

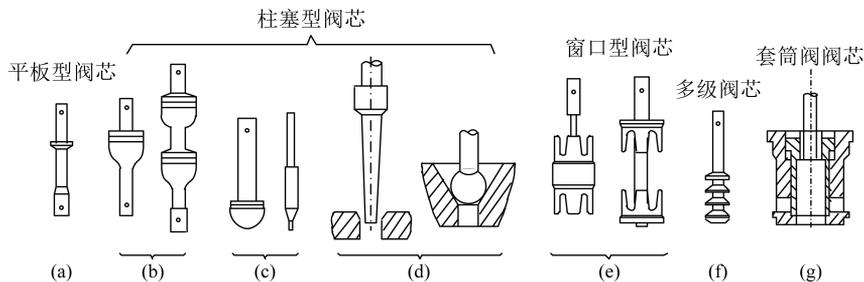


图 4-11 直行程阀芯

(2) 角行程阀芯。如图 4-12 所示为角行程阀芯，其工作原理是通过阀芯的旋转运动改变其与阀座间的流通截面。图 4-12(a) 为偏心旋转阀芯，适用于偏转阀。图 4-12(b) 为蝶形阀芯，适用于蝶阀。图 4-12(c) 为球形阀芯，适用于球阀，图中分别为 O 形球阀与 V 形球阀。

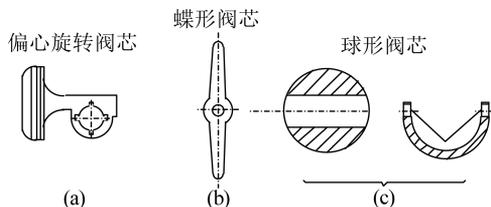


图 4-12 角行程阀芯

3. 流体对阀芯的作用形式和阀芯的安装形式

根据流体通过控制阀时对阀芯的作用方向，可分为流开阀与流闭阀，如图 4-13 所示。其中图 4-13(a)、(d) 为流开阀，图 4-13(b)、(c) 为流闭阀。流开阀稳定性好，有利于控制，一般情况下多采用流开阀。

阀芯有正装和反装两种形式：阀芯下移时，阀芯与阀座间流通截面积减小的称为正装阀；相反，阀芯下移时，流通截面积增加的称为反装阀。图 4-13 中(a)、(b) 为正装阀，(c)、(d) 为反装阀。

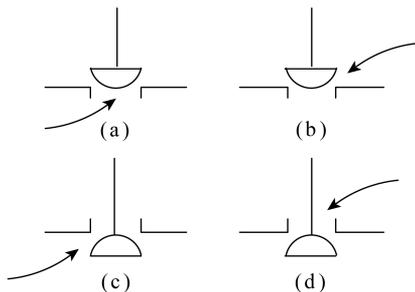


图 4-13 流开阀与流闭阀

4.3.3 控制阀的流量特性

控制阀的流量特性是指流体流过阀门的相对流量与阀门的相对开度(推杆的相对位移)之间的函数关系，即

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = f\left(\frac{l}{L}\right) \quad (4-6)$$

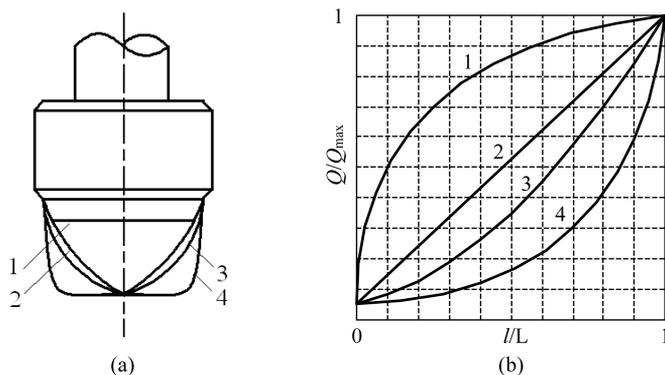
其中， Q/Q_{\max} 为相对流量，是控制阀在某开度时流量 Q 与全开时的流量 Q_{\max} 之比； l/L 为相对开度，是控制阀某一开度的阀芯位移 l 与全开时阀芯位移 L 之比。

事实上，流经控制阀的流体流量大小不仅与阀门开度有关，而且随着开度和流量的变化，阀门前后的压差也很可能变化，该压差的变化又会引起流量的变化。为此，按阀门前后压差是否变化分两种情况考虑阀门的流量特性：理想情况下，阀门前后的压差恒定不

变, 控制阀的流量大小随阀门开度的变化称为阀的理想流量特性, 也称固有流量特性; 真实情况下, 阀门前后的压差是变化的, 这时考虑控制阀的流量大小随阀门开度的变化称为阀的工作流量特性, 也称实际流量特性。

1. 理想流量特性

控制阀的理想流量特性取决于阀芯曲面的形状, 不同的阀芯曲面有不同的流量特性, 如图 4-14 所示, 常用的有直线、对数(等百分比)、抛物线和快开四种形式。



1—快开特性; 2—直线特性; 3—抛物线特性; 4—对数特性

图 4-14 阀芯曲面形状与理想流量特性

(1) 直线流量特性(线性流量特性)。控制阀的相对流量与相对开度呈直线关系, 即单位开度变化所引起的流量变化为常数, 其数学表达式为

$$\frac{d(Q/Q_{\max})}{d(l/L)} = K \quad (4-7)$$

积分可得

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = K \frac{l}{L} + C \quad (4-8)$$

式中, K 在这里为常数, 表示特性曲线的斜率; C 为积分常数。带入边界条件: $l=0$ 时, $Q=Q_{\min}$; $l=L$ 时, $Q=Q_{\max}$, 则有

$$C = \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} = \frac{1}{R}, \quad K = 1 - \frac{1}{R} \quad (4-9)$$

式中, R 为控制阀的可调比(可调范围, 可控比), 即控制阀所能控制的流量上限和流量下限之比。国产直通单座、直通双座、角形阀等控制阀的可调范围通常为 30, 而隔膜阀为 10。注意, 流量下限 Q_{\min} 并不等于控制阀的泄漏量, 流量下限 Q_{\min} 一般为流量上限 Q_{\max} 的 2%~4%, 而泄漏量仅为 Q_{\max} 的 0.1%~0.01%。

将式(4-9)带入式(4-8), 可得直线流量特性方程

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left(1 + (R-1) \frac{l}{L} \right) \quad (4-10)$$

显然, 相对流量与相对开度之间呈线性关系, 其阀芯形状与流量特性如图 4-14 中的 2 号线。在可调比 R 一定时, 若阀门开度变化量相同, 则流量变化量也相同。但流量相对变化量(流量变化量与原流量之比)是不同的, 如下例所示。

【例 4-1】 已知某控制阀的最大流量为 $100\text{m}^3/\text{h}$, 可调比 $R=30$, 在理想状态直线流量特性下, 求:

① 阀的相对开度 l/L 分别为 0.1、0.2、0.8、0.9 时的流量值。

② 阀门在小开度和大开度两种情况下, 当相对开度增加 10% 时, 相对流量增加多少? 相对于原流量值, 流量的相对变化量是多少?

解:

① 由直线流量特性方程(4-10)有

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left(1 + (R-1) \frac{l}{L} \right)$$

可算得四种相对开度下的流量值为 $Q_{0.1} = 13\text{m}^3/\text{h}$, $Q_{0.2} = 22.67\text{m}^3/\text{h}$, $Q_{0.8} = 80.67\text{m}^3/\text{h}$, $Q_{0.9} = 90.33\text{m}^3/\text{h}$ 。

② 小开度下, 阀门的相对开度由 10% 增加到 20%, 相对流量的增量为

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_{\max}} = \frac{Q_{0.2} - Q_{0.1}}{Q_{\max}} = \frac{22.67 - 13}{100} = 9.67\%$$

流量的相对变化量是指流量的增加量与原阀门开度下流量的比值, 即

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = \frac{Q_{0.2} - Q_{0.1}}{Q_{0.1}} = \frac{22.67 - 13}{13} = 74.4\%$$

大开度下, 阀门的相对开度由 80% 增加到 90%, 相对流量的增量为

$$\frac{\Delta Q_2}{Q_{\max}} = \frac{Q_{0.9} - Q_{0.8}}{Q_{\max}} = \frac{90.33 - 80.67}{100} = 9.66\%$$

流量的相对变化量为

$$\frac{\Delta Q_2}{Q_2} = \frac{Q_{0.9} - Q_{0.8}}{Q_{0.8}} = \frac{90.33 - 80.67}{80.67} = 12\%$$

由【例 4-1】可以看出, 对于直线流量特性的阀门, 在小开度和大开度两种情况下, 阀门开度均增加 10%, 流量的变化量几乎相等 ($\approx 9.67\%$), 但流量的相对变化量有很大差异: 小开度时, 流量的相对变化量大; 大开度时, 流量的相对变化量小。因此, 直线流量特性的控制阀在小开度时, 可引起流量大幅度变化; 但在大开度时, 流量变化幅度小, 控制作用较弱, 不够及时。因此, 该类控制阀不宜用于负荷变化较大的场合。

(2) 对数流量特性(等百分比流量特性)。单位相对开度变化引起相对流量变化与该点的相对流量成正比关系, 用数学表达式可表示为

$$\frac{d(Q/Q_{\max})}{d(l/L)} = K \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (4-11)$$

对上式积分并带入边界条件, 得到常数项, 最后可得对数流量特性方程为

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = R^{(l/L-1)} \quad (4-12)$$

从上式看出，相对开度与相对流量呈对数关系，故称对数特性，曲线如图 4-14 中的 4 号线所示。从特性曲线可以看出，控制阀的放大系数即曲线的斜率，随开度的增加而增大。下面以【例 4-2】讨论对数特性阀门的阀门开度与流量变化关系。

【例 4-2】 已知某控制阀的最大流量为 $100\text{m}^3/\text{h}$ ，可调比 $R=30$ ，在理想状态对数流量特性下，求：

① 阀的相对开度 l/L 分别为 0.1、0.2、0.8、0.9 时的流量值。

② 阀门在小开度和大开度两种情况下，当相对开度增加 10% 时，相对流量增加多少？相对于原流量值，流量的相对变化量是多少？

解：

① 由对数流量特性方程(4-12)得

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = R^{(l/L-1)}$$

可算得四种相对开度下的流量值为 $Q_{0.1}=4.68\text{m}^3/\text{h}$ ， $Q_{0.2}=6.58\text{m}^3/\text{h}$ ， $Q_{0.8}=50.65\text{m}^3/\text{h}$ ， $Q_{0.9}=71.17\text{m}^3/\text{h}$ 。

② 小开度下，阀门的相对开度由 10% 增加到 20%，相对流量的增量为

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_{\max}} = \frac{Q_{0.2} - Q_{0.1}}{Q_{\max}} = \frac{6.58 - 4.68}{100} = 1.9\%$$

流量的相对变化量为

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = \frac{Q_{0.2} - Q_{0.1}}{Q_{0.1}} = \frac{6.58 - 4.68}{4.68} = 40\%$$

大开度下，阀门的相对开度由 80% 增加到 90%，相对流量的增量为

$$\frac{\Delta Q_2}{Q_{\max}} = \frac{Q_{0.9} - Q_{0.8}}{Q_{\max}} = \frac{71.17 - 50.65}{100} = 19.52\%$$

流量的相对变化量为

$$\frac{\Delta Q_2}{Q_2} = \frac{Q_{0.9} - Q_{0.8}}{Q_{0.8}} = \frac{71.17 - 50.65}{50.65} = 40\%$$

由【例 4-2】可以看出，对数流量特性的阀门，在小开度和大开度情况下，流量变化量不同，但流量的相对变化量是相同的，因此称为等百分比流量特性，这种特性使该阀门在小开度和大开度情况下的控制作用是相同的。小开度时，流量小，流量的变化量也小，控制作用较为平稳；大开度时，流量大，流量的变化量也大，控制作用灵敏有效。

(3) 抛物线流量特性。单位相对开度引起相对流量变化与该点相对流量的平方根成正比关系，表示为

$$\frac{d(Q/Q_{\max})}{d(l/L)} = K \sqrt{\frac{Q}{Q_{\max}}} \quad (4-13)$$

对上式积分，并考虑边界条件，得到抛物线流量特性方程为

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left(1 + (\sqrt{R} - 1) \frac{l}{L} \right)^2 \quad (4-14)$$

控制阀的相对开度与相对流量之间为一种抛物线关系，见图 4-14 中的曲线 3。它介于直线流量特性与对数流量特性之间，有时可用对数流量特性来近似。

(4) 快开流量特性。单位相对开度引起相对流量变化与该点相对流量的倒数成正比关系，其数学表达式为

$$\frac{d(Q/Q_{\max})}{d(l/L)} = K \left(\frac{Q}{Q_{\max}} \right)^{-1} \quad (4-15)$$

积分并考虑边界条件，得到快开流量特性方程为

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left(1 + (R^2 - 1) \frac{l}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-16)$$

该特性在小开度时，流量较大，随着行程的增加，流量很快到达最大值，大约到达全行程的 1/4 时，若再增加行程，阀的流通面积不再增大而失去作用，故称为快开特性。它比较适合要求快速开闭的位式阀，其流量特性见图 4-14 中的曲线 1。

2. 工作流量特性

控制阀在使用过程中需要与工艺设备、管道等串联或并联，由于设备和管道阻力的原因引起阀门前后压差的变化，导致流量特性出现了变化，此时的流量特性变为工作流量特性。串联的阻力越大，流量变化引起的控制器前后压差也越大，特性变化得也越厉害。控制阀的工作流量特性是理想流量特性在具体环境中的衍变，一方面与阀的结构有关，另一方面取决于具体配管情况。同一控制阀，在不同工作条件下具有不同的工作流量特性，呈现出工作流量特性的多样性。

(1) 控制阀与管道串联的工作情况。图 4-15(a) 为控制阀与管道串联工作的情况，该连接形式在实际工作中是极为普遍的。图中 Δp 为系统流体介质总压差， Δp_1 为控制阀前后流体压差， Δp_2 为流体在设备和管路中产生的压差， $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$ 。

当流体介质总压差 Δp 一定时，随着阀门开度增大，阀门前后的流体压差 Δp_1 减小，流量 Q 增加，流体在设备和管路上的压差 Δp_2 将随着流量 Q 的值成平方增大，该变化见图 4-15(b)。因此，在同样的阀芯位移下，通过阀门的实际流量比理想流量情况(控制阀前后压差不变)的流量小。特别是在阀开度较大时，由于阀前后压差 Δp_1 变化厉害，阀的实际控制作用可能变得非常迟钝。

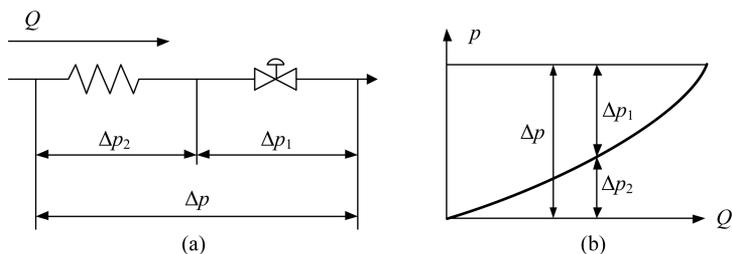


图 4-15 控制阀与管道串联工作及其压力变化情况

为了衡量控制阀实际工作流量特性相对于理想流量特性的变化程度，可用阀阻比 S 来表示

$$S = \frac{\Delta p_{1, \min}}{\Delta p} \quad (4-17)$$

式中， $\Delta p_{1, \min}$ 为阀门全开时阀门前后的流体压差。 S 表示了控制阀全开时，阀门上的压降占系统总压降的多少。这样，不同串联管道中的理想流量特性变化可用 S 来描述，如图4-16所示。

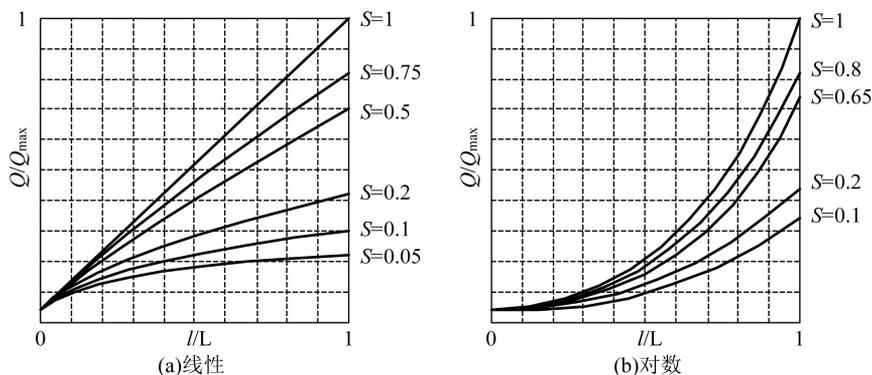


图 4-16 串联管道时的工作流量

由图可见，当 $S=1$ 时，管道阻力损失为零，系统的总压差几乎全落在控制阀上，此时工作流量特性与理想流量特性一致。随着 S 的减小，由于串联管道阻力的影响，使流量特性发生两个变化：一是阀全开时的流量减小，也就是阀的可调范围变小；另一个是使阀在大开度时的控制灵敏度降低，即特性曲线下移，使理想直线流量特性畸变为快开特性，理想对数流量特性畸变为直线特性。实际工作中，一般要求 S 大于0.3。

在工程设计中，应先根据过程控制系统的要求，确定工作流量特性，再结合配管情况，根据流量特性的畸变程度确定理想流量特性。一般当对象特性近似线性而且阀阻比大于0.6以上时，才选择直线特性阀门；其他情况大都选择对数特性阀门。该部分内容在6.3.4进行详细讨论。

(2) 控制阀与管道并联的工作情况。控制阀除了与管道设备串联工作之外，考虑到可能的手动操作或者维修的需要，往往也与管道设备并联工作，即在控制阀两端并联旁路阀，如图4-17所示。管道的总流量 Q 是控制阀的流量 Q_1 与旁路阀流量 Q_2 之和。这种情况下，控制阀的流量特性也将发生变化而成为工作流量特性。

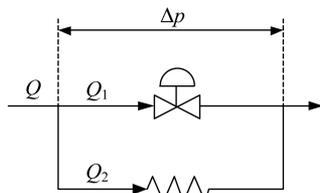


图 4-17 控制阀与管道并联工作

定义控制阀全开时的流量为 $Q_{1, \max}$ ，总管道最大流量为 Q_{\max} ，当并联管道两端的压差 Δp 一定时，两个流量的比值为

$$\chi = \frac{Q_{1, \max}}{Q_{\max}} \quad (4-18)$$

当 χ 在(1, 0)之间取不同值时，工作流量特性如图4-18所示。从图中可以看出，当 $\chi=1$ 时，旁路阀关闭，控制阀的工作流量特性与理想流量特性一致。随着旁路阀的逐步打

开, χ 的值逐渐变小, 控制阀的可调范围下降, 调节能力降低。另外, 在实际系统中, 总是同时存在着串联管道阻力的影响, 其阀上的压差随着流量的增大而降低, 导致系统的可控比更多地下降, 从而控制阀在动作过程中流量变化更小, 甚至几乎不起控制作用。可见, 阀并联与管道这种工作方式是不好的。一般认为旁路流量不应超过总流量的 20%, 即 χ 不应低于 0.8。

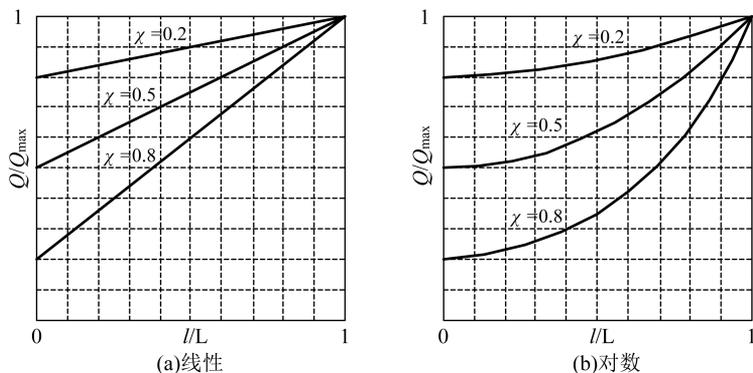


图 4-18 并联管道时的工作流量

从控制阀分别于管道和其他设备的串并联工作流量特性来看, 可以归纳以下两点。

① 控制阀与管道的串联或并联, 均使控制阀的理想流量特性发生畸变, 控制阀的可调范围变窄, 并联的情况比串联的情况更严重。

② 控制阀的调节能力降低。控制阀与管道串联时, 系统总流量减小; 控制阀与管道并联时, 虽然系统总流量增加, 但阀对流量的调节能力被削弱。

4.4 电动执行器

电动执行器由电动执行机构和调节机构(控制阀)两部分组成。其中, 调节机构与气动执行器是通用的, 不同的是电动执行器使用电动执行机构, 即使用电动机等电的动力来驱动控制阀。

最简单的电动执行器是电磁阀, 它利用电磁铁的吸合和释放, 对小口径阀门进行通断两种状态的控制。由于结构简单、价格低廉, 常和两位式简易控制器组成简单的自动调节系统, 在生产中有一定的应用。除电磁阀外, 其他连续动作的电动执行器一般都使用电动机作为动力元件, 将控制器送来的信号转变为阀的开度。

由于电动执行器与气动执行器的调节结构是通用的, 这里主要讨论电动执行机构。电动执行机构的功能是接受来自控制器的直流电流信号(0~10mA 或 4~20mA), 并将其转换为角位移(力矩)或直线位移(力), 操纵阀门或挡板等调节机构。

4.4.1 电动执行机构的工作原理与特点

电动执行机构主要有角行程和直行程两种。角行程电动执行机构将输入的直流电流信

号，通过电动机转换为相应的角位移($0^\circ \sim 90^\circ$)，用来操纵蝶阀、挡板之类的旋转式控制阀；直行程电动执行机构将直流电流信号，通过电动机转换为直线位移输出，用来驱动单座、双座和三通等直线式控制阀。两者的电气原理相同，只是减速器部分不一样。下面以角行程电动执行机构为例进行讨论。

如图 4-19 所示，为角行程电动执行机构的方框图，由伺服放大器和执行机构两大部分组成。

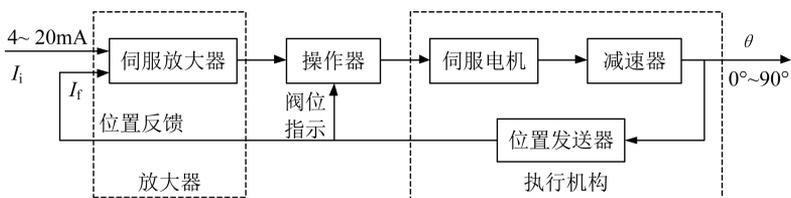


图 4-19 电动执行机构方框图

伺服放大器将输入信号 I_i 和反馈信号 I_f 相比较，所得差值信号经功率放大后，驱使两相伺服电机转动，再经减速器减速，带动输出轴改变转角 θ 。若差值为正，伺服电机正转，输出轴转角增大；若差值为负，伺服电机反转，输出轴转角减小。

输出轴转角位置经位置发送器转换成相应的反馈电流 I_f ，回送到伺服放大器的输入端，当反馈信号 I_f 与输入信号 I_i 相平衡，即差值为零时，伺服电机停止转动，输出轴就稳定在与输入信号 I_i 相对应的位置上。

输出轴转角 θ 与输入信号 I_i 的关系为

$$\theta = KI_i \quad (4-19)$$

式中， K 为比例系数。由该式可知，输出轴转角和输入信号成正比，所以电动执行机构可看成一比例环节。

电动执行机构还可通过电动操作器实现自动操作和手动操作的相互切换。当操作器的切换开关切向“手动”位置时，由正、反操作按钮直接控制电机的电源，以实现执行机构输出轴的正转和反转，进行遥控手动操作。

电动执行机构具有以下特点。

(1) 节能。气动执行机构在整个控制阀运行过程中都需要有一定的气压，虽然可采用耗量小的气动放大器等元件，但耗气量仍是巨大的。采用电动执行机构，在改变控制阀开度时，需要供电，达到所需开度时就可不再供电，因此电动执行机构比气动执行机构有明显节能的优点。

(2) 电动执行机构一般装有阀位检测装置来检测阀位(推杆位移或阀轴转角)，因此电动执行机构与检测装置等组成位置反馈控制系统，具有良好的稳定性。

(3) 电动执行机构通常设置有电动力矩制动装置，使电动执行机构具有快速制动能力，可有效克服采用机械制动造成机件磨损的缺点。

(4) 结构复杂、价格昂贵且不具有气动执行机构的本质安全性，当用于危险场所时，需考虑设置防爆、安全等措施。

(5) 电动执行机构需与电动伺服放大器配套使用，采用智能伺服放大器时，也可组成

智能电动控制阀。

(6) 适用于无气源供应的场所、环境温度会使供气管线中气体所含水分凝结的场所、需要大推力的应用场所。

近年来，电动执行机构得到了较大发展，主要是执行电机的变化。由于计算机通信技术的发展，采用数字控制的电动执行机构也已问世，例如步进电动机的执行机构、数字式智能电动执行机构等。

4.4.2 伺服放大器

伺服放大器由信号隔离器、综合放大电路、触发电路和固态继电器等组成，如图4-20所示。它将来自控制器的电流信号和位置反馈信号进行综合比较，将差值放大，以足够的功率去驱动伺服电机旋转。该伺服放大器使用信号隔离器代替原伺服放大器中的前置磁放大器，采用过零触发的固体继电器技术，具有体积小、反应灵敏、抗干扰能力强、性能稳定、工作可靠等优点。

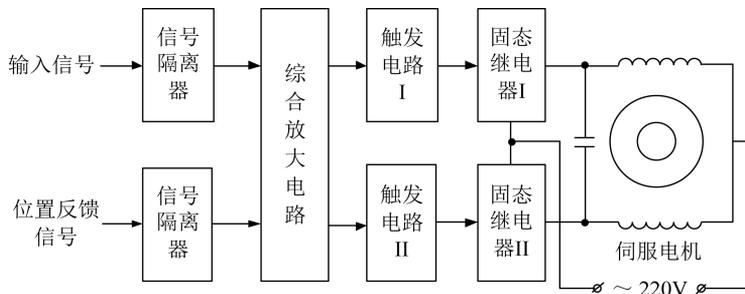


图 4-20 伺服放大器原理框图

(1) 信号隔离器。信号隔离器将输入信号、位置反馈信号与放大器电路进行相互隔离，采用光电隔离电路，将输入的4~20mA电流转换成1~5V电压，送至综合放大电路。

(2) 综合放大电路。综合放大电路由集成运算放大器 IC_1 和 IC_2 组成，如图4-21所示。 IC_1 将输入信号和位置反馈信号相减，得到偏差信号， IC_2 再将其放大。 R_{P1} 为调零电位器，调节 R_{P1} 使其在输入信号和位置反馈信号相等时，放大电路输出为零。电位器 R_{P2} 用来调整放大倍数，通常为60。

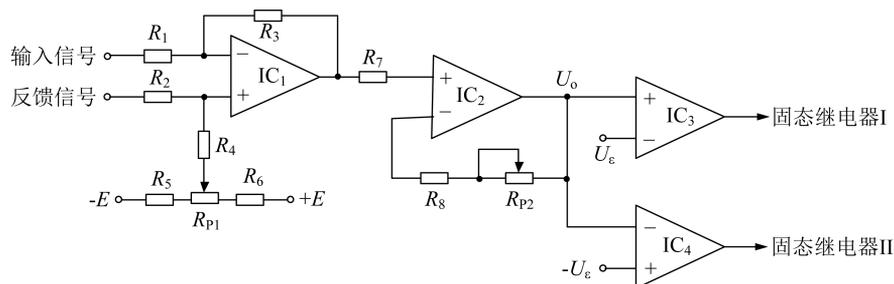


图 4-21 综合放大电路和触发电路

(3) 触发电路。触发电路由比较器 IC_3 、 IC_4 组合, 如图 4-21 所示。正偏差时, 若 $U_o > U_g$, 则 IC_3 输出为正, 使固态继电器 I 工作。负偏差时, 若 $U_o < -U_g$, 则 IC_4 输出为正, 使固态继电器 II 工作。无偏差或偏差小于死区 ($2U_g$) 时, 固态继电器 I、II 均不动作。

(4) 固态继电器。固态继电器是一个无触点功率放大器件, 由触发电路控制其功率输出, 驱动伺服电机工作。

4.4.3 执行机构

执行机构由伺服电机、减速器和位置发送器三部分组成。它接收伺服放大器或操作器的输出信号, 控制伺服电机的正、反转, 再经减速器减速后变成输出力矩去推动调节机构(控制阀)动作。同时, 位置发送器将调节机构的位移变化转换成相应的直流电流信号, 用以指示阀位, 并反馈到伺服放大器的输入端, 去平衡输入电流信号。

(1) 伺服电机。伺服电机的作用是将伺服放大器输出的电功率转换成机械转矩, 并且当伺服放大器没有输出时, 电机能可靠地制动。伺服电机特性与一般电机不同, 由于执行机构工作频繁, 经常处于启动工作状态, 因此要求电机具有低启动电流、高启动转矩的特性, 高启动转矩用来克服执行机构从静止到动作所需的足够力矩。

(2) 减速器。减速器的作用是将伺服电机高转速、小力矩的输出功率转换为低转速、大力矩的输出功率, 以推动调节机构动作。角行程的执行器多采用内行星齿轮和偏心摆轮相结合的减速器, 直行程的执行器一般采用蜗轮蜗杆和螺母丝杆结合的减速器。

(3) 位置发送器。位置发送器的作用是将执行机构输出轴的位移(如转角 $0^\circ \sim 90^\circ$) 转换为 $4 \sim 20\text{mA}$ 的直流电流信号, 用以指示阀位, 并反馈给伺服放大器。该器件主要采用了差动变压器, 它将执行机构的位移线性地转变为电压输出, 其原理如图 4-22 所示。

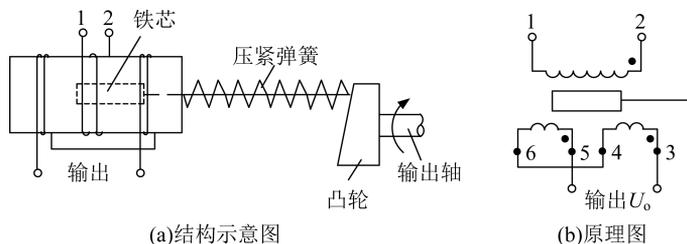


图 4-22 差动变压器

为了得到比较好的线性, 差动变压器采用三段式结构。在三段式线圈骨架上, 中间绕有一个励磁线圈, 作为原边由铁磁谐振稳压器供电。两边对称绕有完全相同的两个副边线圈, 它们反相串联, 输出为两个感应电动势的差值, 即 $U_o = U_{34} - U_{56}$ 。在线圈骨架中有一个可动铁芯, 与凸轮斜面 and 压紧弹簧相连。当输出轴转动时, 带动凸轮转动, 通过压紧弹簧使铁芯左右移动。

当铁芯处于中间位置时, 由于绕组和磁路对称, 所以两个感应电压 U_{34} 和 U_{56} 相等, 输出电压为零; 当铁芯左右移动时, 磁路对两绕组不对称, 输出电压 U_o 不为零, 其大小取决于铁芯的位置。

输出电压 U_o 经过整流滤波, 并通过电压/电流转换, 可以得到与差动变压器铁芯位置相对

应的直流电流 I_f ，其具体值与执行机构输出位移相对应，该值反馈到伺服放大器的输入端。

在新型的执行器中，位置发送器采用了新技术和新方法，如采用霍尔效应传感器直接感应阀杆的纵向或旋转位移，实现了非接触式位置—电流转换；或采用装有球轴承和特种导电塑料薄片做成的电位器，实现了位置—电流转换；或采用磁阻效应的角度传感器，实现非接触式位置—电流转换。这些新技术和新方法使位置反馈信号精度提高，装置体积减小，成本降低。

4.5 变频器

控制阀调节液体/气体流量的方法是：电动机以某额定的速度运行，拖动水泵或风机等以恒速运转，驱动液体或气体在管道中流动，位于管道某处的控制阀通过阀门的开度调节来控制流经此处的液体/气体流量。

随着交流电动机调速技术的发展，变频器作为一种新型的执行器形式，获得了广泛关注与发展。变频器是交流电气传动的一种调速装置，是将恒定电压、恒定频率的交流工频电源转换成电压和频率都是连续可调的、适合交流电动机调速的三相交流电源的电力电子变换装置。通过变频器，将原本不可调的交流电压和频率，变成可调节的交流电压和频率 (Variable Voltage and Variable Frequency, VVVF)，从而使电动机的转速可以调节，于是被电动机拖动的水泵或风机在管道中驱动液体或气体的流速和流量发生改变，进而达到调节流量的目的。

变频器和电动机、泵或风机一起构成了系统的执行器，变频器取代了传统的控制阀，实现了相同的流量调节功能，还具有显著的节能效果。变频器可以作为控制系统中的执行单元，也可作为控制单元(自身带有PID控制器等)。作为执行单元时，变频器接收来自控制器的信号，根据控制信号改变输出电源的频率；作为控制单元时，变频器本身兼有控制器的功能，单独完成调节作用，通过改变电动机电源的频率来调整电动机转速，进而达到改变流量和流速的目的。

4.5.1 变频器的基本工作原理

变频器的工作原理如图 4-23 所示。它由主回路和控制电路组成，其中主回路包括整流器、中间电路和逆变器等。

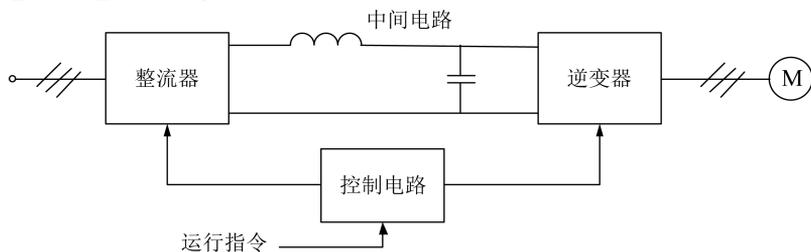


图 4-23 变频器的工作原理

整流器是将交流电变换成直流电的电力电子装置，其输入是电网进入的频率和电压不变的三相交流电(也可以是单向交流电，视负载大小而定)。中间电路采用电容和电感实现平滑滤波和储能的作用。逆变器将直流电转变为频率可调(一般为 0~50Hz)的交流电，送入电动机实现转速调节。逆变器是变频器中最重要的部分，通常由 6 个电力半导体器件组成三相桥式逆变电路。控制电路完成对逆变器的开关控制、对整流器的电压控制和各种保护功能。

工频交流电通过整流器变为脉动直流，经中间电路进行滤波而变得平滑稳定，根据控制指令，将直流电调制为某频率的交流电，然后输送给异步电动机。根据电机理论，电动机转速 n 和电源频率 f 的关系为

$$n = \frac{60f(1-s)}{p} \quad (4-20)$$

式中， p 为电动机极对数， s 为转差率。通过对电源频率 f 的改变，实现对电动机转速 n 的调节，进而改变管道中液体/气体的流量和流速。

实现交流异步电动机变频调速的控制方法主要有基本 V/F 控制、矢量控制和直接转矩控制。基本 V/F 控制用于普通的交流调速，矢量控制和直接转矩控制用于高精度、高性能的调速，如张力控制、同步控制和卷曲控制等。

变频器有通用型和专用型，替代控制阀使用的变频器主要选用专用型，即风机专用型、水泵专用型等。变频器的额定电流以负载可能出现的最大电流为标准。当出现高温、大负荷、经常启停等情况时，可选大一档的变频器。

4.5.2 变频器在过程控制中的应用

随着微电子技术和电力电子技术的飞速发展，变频器的可靠性不断提高，价格又趋于低廉。原来由水泵或风机驱动流量控制中，都是恒速运行，通过控制阀或挡板来调节流量大小，现在广泛采用变频器来替代控制阀和挡板，由变频器来控制电动机速度的变化，实现流体流动速度的快慢控制。变频器可根据负载的变化使电机实现自动、平滑的增速或减速，且效率高、调速范围宽、精度高，可兼做软启动设备，尤其是节能效率可达 40%。对于泵类和风机类负载，变频器取代控制阀已经成为一种趋势。

如图 4-24(a)所示，在液位控制系统中，传统的控制方式是采用控制阀来调节流量的大小。控制阀接收控制器送出的信号，改变阀门开度，调节水泵送出的流量。水泵是恒速运行的，这种控制方式能量损失较大。图 4-24(b)采用变频器替代控制阀，控制器送出的控制信号送入变频器，进而通过调节电机转速来控制泵的流量，当流量较低时，可以取得明显的节能效果。

目前变频器的生产技术已逐步走向成熟，一般用于控制阀使用的变频器和交流电动机功率不大、体积较小。但需要注意变频器在使用过程中产生的高次谐波和噪声。谐波主要来源于变频器的整流和逆变部分的非线性元件，因此需要采用合理的软硬件设计，采用必要的屏蔽、接地和滤波等措施，消除高次谐波与噪声。

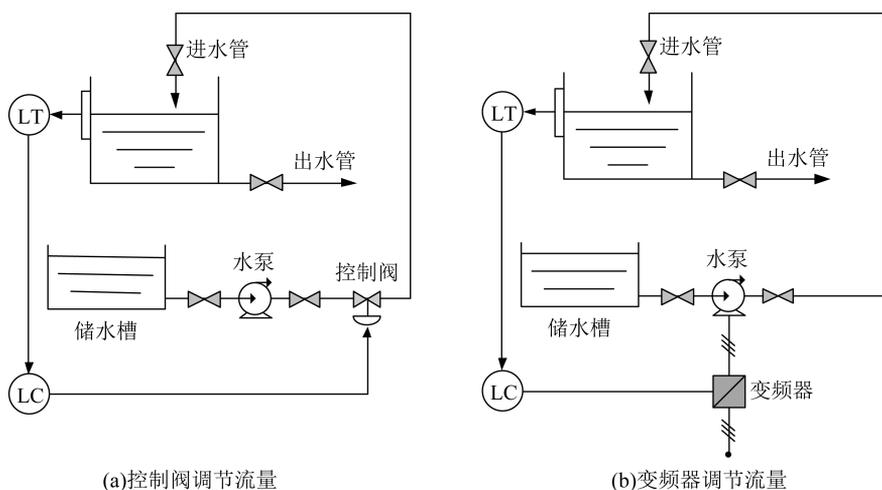


图 4-24 液位控制系统的流量调节

4.6 安全栅

在石油、化工、轻工等生产企业，很多生产车间、作业现场都存在着易燃易爆的气体、液体或固体，当它们与空气混合后，遇到高温、火星，或者电路短路，极易发生火灾和爆炸等事故，严重威胁着工作人员的生命和财产安全。因此，必须强化过程控制中的防火、防爆等措施和手段，谨防火灾、爆炸之类的事故发生。

安全栅又称防爆栅，它是一种防止电能沿控制信号线进入现场过程与仪表，并引发火灾和爆炸的安全措施，是安全场所系统与危险地点仪表之间的关联设备。它像栅栏一样，将安全场所与危险地点阻隔开来，因而取名“安全栅”。

4.6.1 安全火花防爆系统的基本概念

一般来说，火灾/爆炸的发生需要三个条件：第一，必须存在可燃性物质或爆炸性物质；第二，要有助燃性物质，主要是空气中的氧气；第三，还要有点火源，如火花、电弧和危险温度等，它提供点燃易燃易爆物质所必需的能量。通常为了防止火灾/爆炸的发生，采取的手段是控制点火源，将可能出现火花与短路的电气设备和仪表安装在安全场所。但是，由于生产设备和工艺条件的要求，仍有部分电气设备与仪表必须安装在危险现场。所以，电气设备与仪表的防火防爆就是一个难以回避的问题。

首先来看下危险场所的划分和相关仪表的选择。危险场所是由于存在易燃易爆气体、蒸汽、液体、可燃性粉尘或纤维而具有引起火灾和爆炸危险的场所。典型的危险场所，有石油化工行业中爆炸性物质的生产、加工和储存过程中所形成的环境，煤矿井下(甲烷气体环境)等。

按爆炸性混合物出现的频率、持续时间和危险程度，可将危险场所分为不同的级别。

我国对爆炸性物质的定义，基本上是按国际电工委员会的标准，分为三类：煤矿甲烷类爆炸气体为Ⅰ类，具有爆炸性气体混合物为Ⅱ类，具有爆炸性粉尘和纤维为Ⅲ类。由于爆炸性气体的物理性质、持续时间和涉及范围不同，其爆炸的可能性与危害程度也不同，所以将危险场所划分为0区、1区和2区。0区：正常情况下，爆炸性气体混合物连续、频繁或者长期存在的场所；1区：正常情况下，爆炸性气体混合物有可能存在的场所；2区：正常情况下，爆炸性气体混合物不可能出现，或者偶尔短时间存在的场所。

鉴于危险场所的等级分区，电气设备与仪表应具有相应的类型，以便选用。我国对电气设备的防爆型式划分为8种：本质安全型、隔爆型、增安型、正压型、充油型、充砂型、浇封型和无火花型。其中，本质安全型可用于0区，无火花型适用于2区，其余适用于1区。本质安全型和隔爆型为自动化仪表最为常用的类型。

隔爆型仪表具有防爆外壳，仪表电路和元件、接线端子均置于防爆壳内。防爆壳体结构稳固、强度大，隔爆接触面宽，可承受仪表内部因故障产生的爆炸冲击力，并阻止内部爆炸向外壳四周传播。它可用于1区和2区危险场所，检修或调整时，要求在不通电的情况下进行。

本质安全型仪表中的电压和电流被限制在一个允许的范围之内，即便在发生短路和元器件损坏的情况下，所产生的火花和热能也不至于引起周围爆炸性气体混合物爆炸，因此也称为安全火花防爆仪表。与结构防爆仪表相比，该类仪表的防爆等级更高，可用于0区危险场所，如氢气、乙炔等最危险的场所，广泛用于石油、化工等危险场所的控制。另外，该类仪表体积小、重量轻，不需隔爆外壳，可带电维护与调整。

本质安全型仪表与安全栅结合，可构成安全火花防爆系统(本安防爆系统)，如图4-25所示。构成一个安全火花防爆系统的条件如下。

(1) 在危险场所使用的仪表必须是本质安全型仪表，如本安型变送器、本安型执行器等；

(2) 现场仪表与非危险场所(包括控制室)之间的电路连接必须经过安全栅。

本质安全型仪表主要从仪表内部抑制危险火花，安全栅则对送往现场的电压和电流进行严格的限制，保证进入现场的电能安全可控的范围之内。

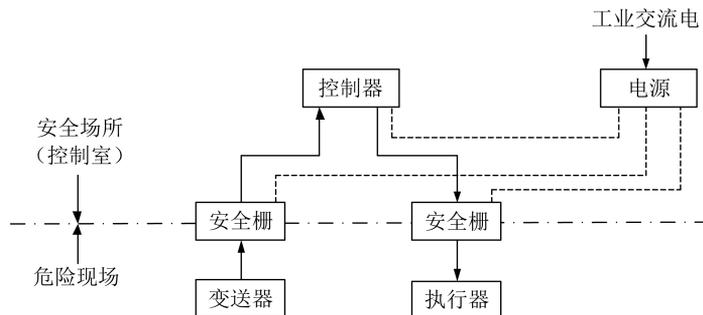


图 4-25 安全火花防爆系统的基本结构

以上两个条件缺一不可。首先，如果仅在现场采用本质安全型仪表，但对控制室引来的电源线不加以限压限流措施，在变压器接线端子上或传输途中发生短路、开路时，可能

在现场产生危险火花，引起燃烧或爆炸事故。其次，如果仅配有安全栅，但现场仪表不是本质安全型仪表，当仪表内部有较大的电感和电容储能元件，当发生短路、开路等故障时，储能元件上积累的能量可能造成危险火花，引起事故。因此，只有同时满足上述两个条件，才能保证在事故状态下，现场仪表不产生危险火花，从危险现场以外也不引入危险火花。

另外，使用本安仪表和安全栅是安全火花防爆系统的基本要求，要真正实现安全火花防爆，还需注意系统的安装和布线，按规定正确安装安全栅，并保证良好接地；正确选择连接电缆的规格和长度，其分布电容、分布电感应限制在限制值之内；本安电缆和非本安电缆应分槽(管)敷设，慎防本安回路与非本安回路混触等。详细规定可参阅安全栅使用说明书和国家有关电气安全规范。

4.6.2 安全栅的基本组成与工作原理

安全栅是本安系统中连接本安设备与非本安设备的关联设备，它一方面负责传输信号，另一方面将流入危险场所的能量控制在爆炸性气体或混合物的点火能量以下。尤其当现场的本安仪表发生故障时，安全栅能将串入到故障仪表的能量限制在安全值以内，从而确保现场设备、人员和生产的安全。

安全栅有多种构成形式，常用的有齐纳式安全栅和隔离式安全栅两种。

1. 齐纳式安全栅

齐纳式安全栅是基于齐纳式二极管反向击穿性能而工作的，如图4-26所示。 VZ_1 、 VZ_2 为齐纳二极管， R 和FU分别为限流电阻和熔断器。

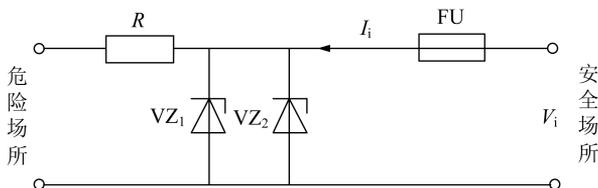


图4-26 齐纳式安全栅

在正常工作时，安全栅不起作用。当现场发生事故时，如形成短路，由限流电阻 R 限制过大电流进入危险场所；当电压过大时，齐纳二极管击穿，使危险侧电压限制在安全值以下，此时电流瞬时值急剧增加，将熔断器 FU 熔断，进而使安全场所和危险现场分离开来。

齐纳式安全栅的优点是结构简单、经济可靠、通用性强、使用方便。

2. 隔离式安全栅

隔离式安全栅通过隔离、限压和限流等措施来保证安全防爆功能。通常采用变压器隔离的方式，对输入、输出和电源电路进行电气隔离，以切断安全侧高电压窜入危险侧的通道。同时，在危险侧还设置了电压、电流限制电路，限制流入危险现场的能量。变压器隔离式安全栅的性能稳定、抗干扰能力强、可靠性高，缺点是线路复杂、体积大、成本高。

变压器隔离式安全栅分为输入式安全栅(从现场到控制室)和输出式安全栅(从控制室到现场)两个部分。

(1) 输入式安全栅。输入式安全栅也称检测端安全栅,它被置于现场变送器到控制室之间。如图 4-27 所示,输入式安全栅有信号流和电能流两条线路,安全栅一方面要从控制室向安全栅和危险现场提供工作电能,另一方面要将现场检测变送器的 4~20mA 直流电流信号经过转换送到控制室中的控制器。其中设置的限流限压装置,可实现双向(电能和信号)限制作用。

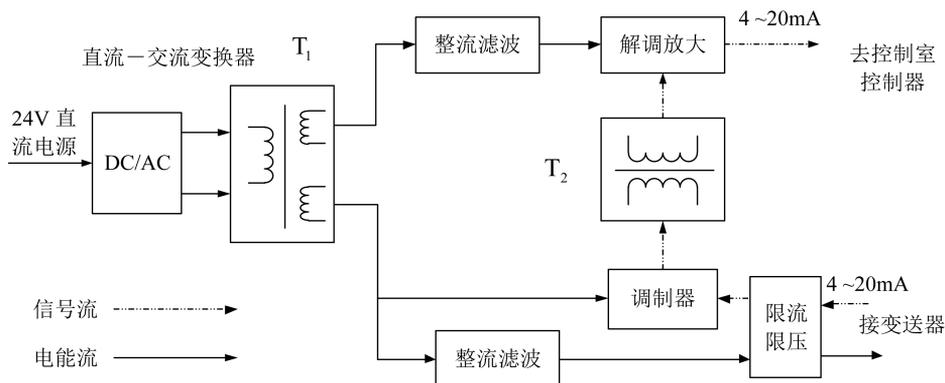


图 4-27 输入式安全栅结构框图

具体来说,在电能方面:24V 直流电源经直流—交流变换器变换为交流电压,通过变压器 T_1 实现电气隔离, T_1 的次级绕组送出的交流信号经过整流滤波变为直流信号,一方面为解调放大器提供电源,另一方面为变送器提供 24V 工作电压。在信号方面:变送器送出的 4~20mA 直流电流信号经过限流后,进入调制器,将直流信号调制为交流方波信号,再经过信号变压器 T_2 耦合到安全侧,解调放大器将交流信号还原为 4~20mA 的直流电流信号送往控制器。该安全栅实现了电源、变送器、控制器三者之间的电气隔离。

(2) 输出式安全栅。输出式安全栅也称执行端安全栅,它被置于控制室的控制器与现场执行器之间,如图 4-28 所示。

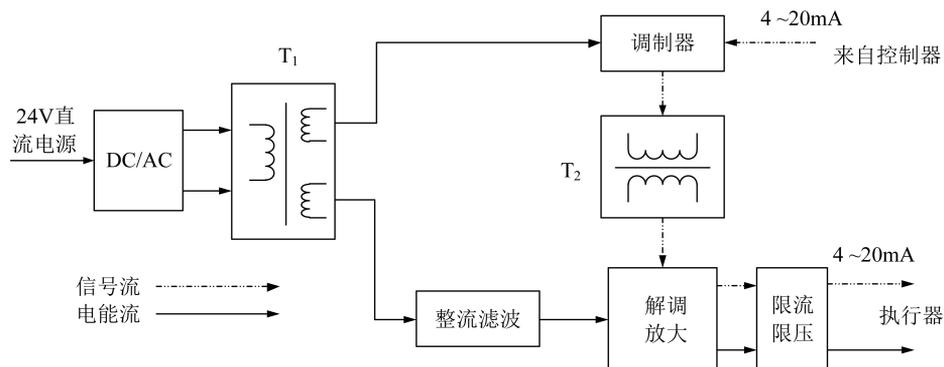


图 4-28 输出式安全栅结构框图

电能方面：24V 直流电源经直流—交流变换器变换为交流电压，通过变压器 T_1 实现电气隔离，之后分为两路，一路去调制器提供斩波电压，另一路经整流滤波变为直流信号，为解调放大器和限流限压电路提供电源。信号方面：控制器送出 4~20mA 的直流电流信号经调制变成交流方波信号，再经信号变压器 T_2 耦合到危险侧，送入解调放大器还原成同样大小的直流电流信号，再经限压限流处理送往执行器等现场仪表。

思考题与习题

- 4-1 根据使用的能源动力不同，执行器可分为哪几种？各有什么特点？
- 4-2 气动执行器由哪几部分组成？各有什么作用？
- 4-3 常用的气动执行机构有哪几种？各有什么特点？
- 4-4 简述电/气转换器的工作原理。
- 4-5 阀门定位器有哪几种？阀门定位器的应用场合？
- 4-6 简述电/气阀门定位器的工作原理。
- 4-7 简述智能阀门定位器的工作原理，说明其与电/气阀门定位器的主要区别是什么？
- 4-8 由式(4-5)阐述控制阀的工作原理。
- 4-9 什么是控制阀的可调比和流量特性？理想流量特性和工作流量特性有什么不同？
- 4-10 控制阀的常用理想流量特性有哪几种？作图表示。
- 4-11 已知某控制阀的最大流量为 $100\text{m}^3/\text{h}$ ，可调比 $R=30$ ，分别计算在抛物线流量特性和快开流量特性下：
- ① 阀的相对开度 l/L 分别为 0.1、0.2、0.8、0.9 时的流量值。
 - ② 阀门在小开度和大开度两种情况下，当相对开度增加 10% 时，相对流量增加多少？相对于原流量值，流量的相对变化量是多少？
- 4-12 什么是阀阻比？在工程实际应用中，如何选取阀门的理想流量特性？
- 4-13 控制阀与管道和其他设备分别串联和并联后，其工作流量特性发生什么变化？
- 4-14 电动执行机构有哪几种？各有什么功能？
- 4-15 简述图 4-19 电动执行机构的工作原理。
- 4-16 简述位置发送器的工作原理。
- 4-17 简述图 4-23 变频器的构成与工作原理。
- 4-18 简述变频器与控制阀两类执行元件的区别。
- 4-19 什么是安全栅？安全栅主要有哪些类型？
- 4-20 如何使控制系统实现本安防爆的要求？
- 4-21 简述图 4-26 齐纳式安全栅的工作原理。
- 4-22 简述图 4-27 输入式安全栅的工作原理。
- 4-23 简述图 4-28 输出式安全栅的工作原理。