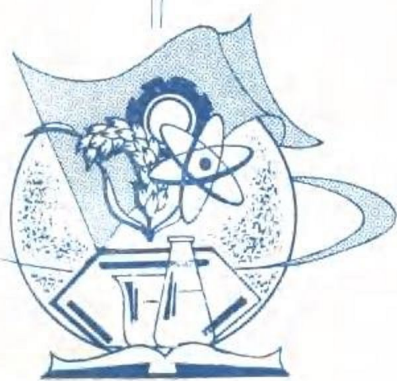


中等专业学校试用教材



气动调节仪表

兰州化学工业公司化工学校

李克勤 编

化学工业出版社

内 容 提 要

《气动调节仪表》是中等专业学校化工仪表及自动化专业的教学用书。书中除了讲述气动调节仪表的一般构成原理,气动仪表的基本元件与组件以外,主要讲述了变送单元、调节单元、显示单元(包括新型集装式仪表)、计算单元及气动执行器。系统地介绍了这些仪表的工作原理、结构、特性及调校,对它们的应用也做了必要的介绍。

本书由兰州化学工业公司化工学校李克勤编写。由兰州化学工业公司石油化工厂蔡鸿雄主审,武汉化工学校郑汉森协审。

本书也可供化工厂仪表工人阅读。

中等专业学校试用教材
气 动 调 节 仪 表
兰州化学工业公司化工学校
李克勤 编

责任编辑:陈逢阳
封面设计:任 辉

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₁₆印张14¹/₂字数342千字印数1-10,170

1985年8月北京第1版1985年8月北京第1次印刷

统一书号15063·3765(K-287)定价2.15元

前 言

本书是根据化工部化工中专化工仪表及自动化专业教材编审委员会于一九八一年七月在兰州召开会议制订的全日二年制教学大纲及一九八二年十月在武汉召开会议制定的四年制教学大纲而编写的。书中包括两种学制要求的全部内容。教学中应根据学制和教学大纲要求的内容进行。

根据审稿会的意见，书中在显示单元部分编写了QXJ-1401T型气动指示记录调节仪（属于集装式）的内容，因而没有编写教学大纲中规定的QXJ-213B型和集装式仪表简介的内容。

在各章之后都附有本章小结。因编写时间所限，书中各章均没能附录思考题，在此仅向读者至歉。

限于编者的水平，书中错误一定较多，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
一、气动仪表发展概况.....	1
二、气动仪表在自动调节系统中的作用.....	1
三、气动调节仪表的分类.....	2
四、QDZ仪表品种分类和型号命名.....	3
第二章 气动仪表的基本元件与组件	5
第一节 气动学的基本知识.....	5
一、空气的热力学过程.....	5
二、空气在节流元件中的流动.....	6
第二节 弹性元件.....	10
一、弹性元件的基本特性.....	11
二、非金属膜片.....	12
三、金属膜片与膜盒.....	15
四、波纹管.....	17
五、弹簧.....	18
第三节 气动阻容元件.....	20
一、气阻.....	20
二、气容.....	26
三、阻容元件.....	28
第四节 气动控制元件.....	31
一、普通喷嘴挡板机构.....	31
二、双喷嘴控制机构.....	35
三、负压喷嘴控制机构.....	36
第五节 气动功率放大器.....	36
一、力平衡式功率放大器.....	37
二、双恒压降力平衡功率放大器.....	39
三、节流式功率放大器.....	40
本章小结.....	43
第三章 气动变送单元	44
第一节 概述.....	44
第二节 气动差压变送器.....	44
一、差压变送器的动作原理.....	44
二、差压变送器的基本结构.....	45
三、差压变送器的特性分析.....	51

四、差压变送器的误差分析	53
五、差压变送器的调校	56
六、法兰式差压变送器	57
七、差压变送器的应用	59
第三节 压力变送器	64
一、压力变送器	64
二、绝对压力变送器	65
第四节 气动沉筒式液位变送器	65
一、检测部分	66
二、气动转换部分	67
三、沉筒式液位变送器的调校	69
第五节 气远传转子流量计	70
第六节 气动温度变送器	73
一、测量桥路	74
二、调制型晶体管直流放大器	81
三、电-气转换器	81
本章小结	81
第四章 气动调节单元	83
第一节 概述	83
一、调节器的调节规律	83
二、调节器的构成原理	89
三、调节器的分类	90
第二节 膜片式比例积分调节器	91
一、基本结构及动作原理	91
二、各组成部分的作用原理	93
三、比例积分调节器的特性分析	99
四、膜片式PI调节器的调校原则	104
第三节 膜片式比例微分调节器	108
一、膜片式正微分器	108
二、膜片式反微分器	111
第四节 波纹管式气动调节器	113
一、波纹管式三作用调节器的结构特点	113
二、波纹管式三作用调节器的特性分析	119
三、波纹管式三作用调节器调校原则	120
四、平衡杠杆波纹管式调节器	122
第五节 基地式气动调节仪表	124
一、基本结构及动作原理	124
二、调校原则	128
本章小结	128

第五章 气动显示单元	131
第一节 三针记录调节仪.....	131
一、基本结构与工作原理.....	131
二、调校原则.....	140
第二节 气动指示记录调节仪.....	142
一、仪表的结构原理.....	142
二、微分部分.....	146
三、比例积分调节器.....	148
四、如何实现无平衡无扰动切换.....	151
五、调校原则.....	156
第三节 气动色带指示仪.....	157
一、色带指示仪的结构与动作原理.....	157
二、测量机构的特性分析.....	159
第四节 气动积算器.....	161
本章小结.....	164
第六章 气动计算单元及其它单元	165
第一节 气动加减器.....	165
一、力平衡式气动加减器.....	165
二、力矩平衡式气动加减器.....	166
第二节 气动乘除器.....	169
一、QJC型乘除器.....	169
二、气动通用计算器.....	174
第三节 气动比值器.....	179
第四节 其它单元.....	180
一、气动定值器.....	180
二、电-气转换器.....	181
三、气动继电器.....	182
四、气动遥控板.....	182
五、选择器.....	183
六、气动保位阀.....	184
本章小结.....	185
第七章 气动执行器	186
第一节 气动执行器的构成原理.....	186
一、执行器在自动调节系统中的作用.....	186
二、气动执行器的构成原理.....	186
三、空化作用及其避免.....	196
第二节 气动执行器的选择与计算.....	199
一、调节阀的节流原理和流通能力.....	199
二、调节阀流通能力的计算.....	200

三、气动执行器类型的选择.....	207
四、调节阀口径的确定.....	210
第三节 阀门定位器.....	214
一、阀门定位器的用途.....	214
二、阀门定位器的结构及特点.....	215
三、反馈凸轮的设计与修正.....	219
第四节 气动执行器的测试安装和维修.....	221
一、气动执行器的测试.....	221
二、气动执行器的安装.....	222
三、气动执行器的维修.....	223
本章小结.....	223
参考文献.....	224

第一章 绪 论

一、气动仪表发展概况

生产过程自动化，就是采用某种自动化技术工具，部分地或全面地代替人来控制生产过程的进行。这不仅能把人从繁重的体力劳动中解放出来，而且可以提高产品的产量和保证产品的质量。以压缩空气为能源的仪表，称为气动仪表。它是实现生产过程自动化的技术工具之一。

在本世纪四十年代以后，气动仪表被广泛应用于工业生产。起初，生产过程自动化是采用单参数简单调节系统；所使用的仪表几乎全是现场安装的基地式大型指示、记录调节仪表。其后，由于生产的不断发展，对自动控制仪表也不断地提出了新的要求。例如，集中控制，仪表小型化、单元化，统一信号及气源等问题。因此，促使气动仪表的发展，而产生了统一信号（ $0.2\sim 1.0\text{kgf/cm}^2$ ）的气动单元组合仪表。而气动单元组合仪表，也已由Ⅰ型发展到Ⅱ型，并在向Ⅲ型发展。由于一台基地式仪表能够解决简单调节系统中的全部问题，所以它特别适用于分散的单个控制系统，所以基地式气动仪表也在发展中。

近十几年来，由于生产过程自动化的飞速发展，对仪表的性能、安装和使用等方面提出了更高的要求。因而出现了外形进一步小型化的可高密度安装的集装式仪表，以及反应速度快，结构紧凑、性能稳定、功能齐全的新的系列产品。集装式气动仪表，国外在六十年代已投入生产，我国于七十年代初开始研制，现已批量生产。

气动仪表具有结构简单、工作可靠、抗干扰能力强、安全防爆、容易维修、便于与执行器配套使用等独特的优点。所以，目前气动仪表在国内外不但被大量地使用着，而且还有广阔的发展前景。

二、气动仪表在自动调节系统中的作用

自动调节系统包括以下几个部分：被调对象、变送器、显示仪表、调节器和执行器。其方框图如图 1-1 所示。图中各方框代表的意义如下：

被调对象——也叫调节对象，就是被调节的生产设备或生产过程的某个环节。

变送器——将被调参数转换成与其成比例的测量信号（气压或位移信号）。

给定器——给出被调参数的控制值或给出被调参数变化的规律。

调节器——把变送器送来的测量信号与给定器送来的给定信号进行比较得出偏差信号，再将偏差信号按某种调节规律运算放

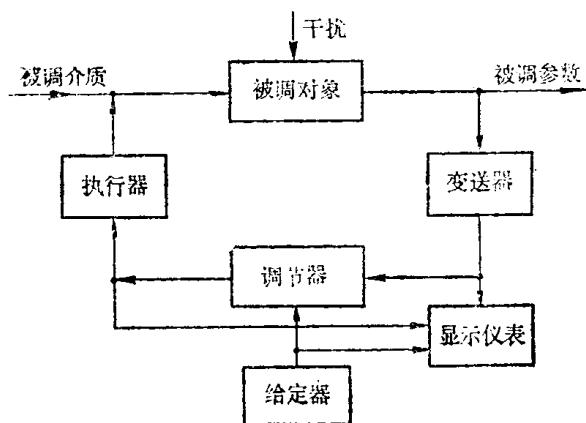


图 1-1 自动调节系统方框图

大，而输出一个控制信号去指挥执行器。

显示仪表——用以指示、记录被调参数、给定值及调节器的输出信号。

执行器——包括执行机构和调节阀。执行机构将调节器的输出信号转换成推力，用以推动调节阀；而调节阀则改变被调介质的流入量或流出量，使被调参数保持在生产需要的数值上。

在上述调节系统中，如果采用的是气动仪表，那么，我们把这些组成调节系统的气动仪表及其辅助装置，统称为气动调节仪表。

三、气动调节仪表的分类

1. 按用途分类

按被调参数和仪表的作用分为：温度、流量、压力、液位变送器和调节器等。

2. 按仪表的结构分类

按结构分为：基地式和单元组合式。

在图1-1中，除被调对象和执行器之外，可以把变送、显示、调节、给定等部分组装在同一个仪表壳体内，这就构成了基地式调节仪表。基地式调节仪表的特点在于：各组成部分之间以不可分离的机械机构（有的是用气压信号）相联系；这样，利用一台仪表就能解决一个简单调节系统的测量、记录、调节等全部问题。

从仪表的角度来看，图1-1中除被调对象而外的每一个方框，都可以构成一个独立的单元，这就形成了单元组合仪表。这样，可以根据不同的要求，把适当的一些单元进行组合而构成各种简单的或复杂的调节系统，各单元之间用统一标准信号联系起来。这些单元的总和，称为单元组合仪表。我国的气动单元组合仪表采用 $0.2 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 的统一标准气压信号。

3. 按工作原理分类

按工作原理分为：位移平衡式和力（力矩）平衡式。

位移平衡式气动仪表，通过一套机械传动机构相对位置的变化，再经控制元件（即喷嘴挡板机构）和功率放大器将位移转换成气压信号。它的特点是：代表测量值、给定值、偏差值和反馈值的都是位移量，当各位移量在比较元件上进行比较并达到平衡时，仪表工作在稳定状态。

力（力矩）平衡式气动仪表的特点是：代表测量值、给定值、偏差值和反馈值的都是气压信号；这些气压信号经弹性元件（膜片、膜盒、波纹管）转换成力而在比较机构上进行力（或力矩）平衡。力（力矩）平衡式仪表是通过比较机构（膜片组件或杠杆系统）受力不平衡，克服本身刚度的弹性反力而产生微小变形位移，再由控制元件和功率放大器将这个微小位移转换成气压信号。当各力在比较机构上进行比较并达到力（或力矩）平衡时，仪表工作在稳定状态。

位移平衡式仪表的各个位移量是用机械机构传递的，因而机构复杂、易磨损、加工要求高；又由于受到摩擦、阻力及机械间隙等的限制，其精度和灵敏度较低。而力（力矩）平衡式仪表的比较机构位移量很小，可以忽略，所以没有机械摩擦和阻力及惯性等的影响，其精度和灵敏度均较高，而且结构紧凑、具有互换性、加工要求也可相对放宽。

四、QDZ仪表品种分类和型号命名

气动单元组合仪表以“气”(Qi)、“单”(Dan)、“组”(Zu)三个字的汉语拼音字的第一个字母作代号，简称“QDZ”仪表。

QDZ仪表各单元的型号命名方法如图1-2所示。

QDZ仪表各单元的型号由两部分组成，两部分之间用短横线隔开。前一部分由三个汉语拼音大写字母组成，第一个字母均为Q，它表示是气动仪表的意思；第二个字母表示单元名称；第三个字母表示测量参数或仪表品种。而后一部分是阿拉伯数字，是制造厂用以表示产品系列、规格、结构特征等的编号。

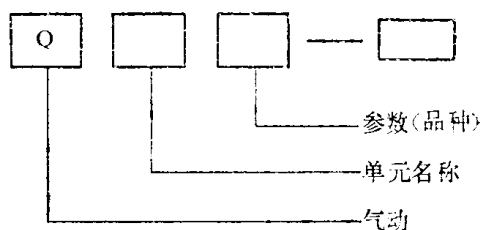


图 1-2 QDZ仪表型号命名法

QDZ仪表由下列七大类组成。

1. 变送单元 (B)

变送单元用来测量温度、压力、流量、液位等工艺参数，并将其转换成 $0.2 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 的标准气压信号，传送给其它单元。型号如：温度变送器QBW，差压变送器QBC，压力变送器QBY，法兰式差压变送器QBF等。

2. 调节单元 (T)

调节单元根据被调参数的测量值与给定值的偏差，以某种调节规律（如比例、积分、微分等）向执行器发出调节信号。型号如：比例调节器QTB、比例积分调节器QTL、比例积分微分调节器QTM（波纹管式）、微分器QTW、配比调节器QTL-P等。

3. 显示单元 (X)

显示单元用于指示、记录或积算被测量（或被调参数值），可以兼有调控中心的作用。型号如：各种指示仪、记录仪、记录调节仪表QXJ，条形指示仪和色带指示仪QXZ等。

4. 计算单元 (J)

计算单元用以实现多种代数运算（如加、减、乘、除、开方等）。型号如：加减器QJJ、乘除器QJC、比值器QJB等。

5. 给定单元 (G)

定值器用于提供调节单元所需的给定值。如手动定值器QGD、时间程序定值器QGS、参数程序定值器QGC等。

6. 辅助单元 (F)

辅助单元用以配合上述单元完成发讯、切换及遥控等辅助作用。如信号器QFX、继电器QFJ、切换开关QFK、遥控板QFB、气动阀门定位器QFD、减压阀QFY等。

7. 转换单元

气动转换单元，目前仅考虑将电信号转换为气信号。如电-气转换器DQ，它把电动单元组合仪表的 $0 \sim 10 \text{ mA}$ 直流电流信号转换成为 $0.2 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 的标准气压信号。

以上各组成单元间的相互关系如图1-3所示。各单元之间用 $0.2 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 的统一标准气压信号联系起来，而仪表的能源均采用干燥清洁的压缩空气。

QDZ仪表采用了下列共同的技术条件：

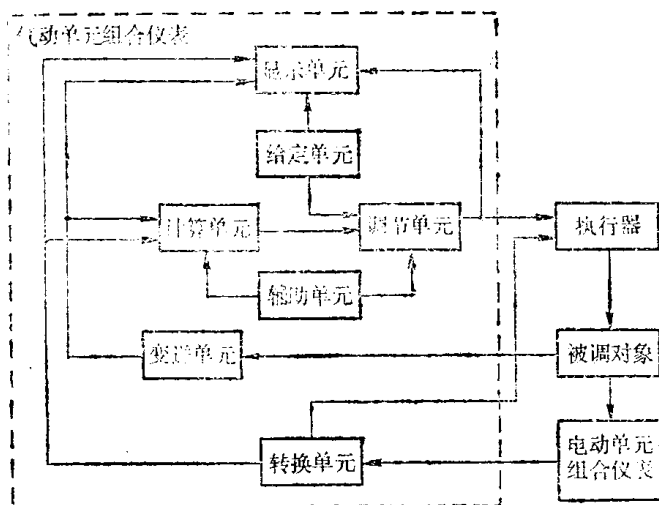


图 1-3 QDZ各单元的相互关系

1. 气源压力: 1.4kgf/cm^2 ;
2. 信号压力: $0.2\sim 1.0\text{kgf/cm}^2$;

3. 精度等级: 整套仪表的精度为1.0级;

4. 灵敏度: $0.05\sim 0.2\%$;

5. 传送时间 (输出功率): 信号通过内径为6mm、长度为60m的管道的传递时间一般不大于5秒;

6. 使用环境: ①变送器 (除温度变送器外) 工作环境温度为 $-10\sim +60^\circ\text{C}$, 其它单元为 $+5\sim$

$+50^\circ\text{C}$; 环境相对湿度不大于80~95%; ②可以在防火、防爆的场所使用; ③周围介质不对铬、镍镀层与有色金属、合金起腐蚀作用;

7. 气路导管一般采用 $\phi 6\times 1$ 的紫铜管、塑料管及尼龙1010单管和管缆。

本课程的内容以气动单元组合仪表为主, 但也列入了个别的基地式仪表。就是单元组合仪表, 也只是选取了一些目前我国常用的具有代表性的仪表。通过本课程的学习, 可以使同学们获得气动仪表的基础知识, 掌握气动单元组合仪表的结构原理、调校方法及仪表的选型和使用, 并且使学生具有自学其它类型的气动仪表和新型气动仪表的能力。

第二章 气动仪表的基本元件与组件

第一节 气动学的基本知识

气动仪表采用空气作为工作介质。压缩空气对仪表的基本元件与组件的作用，就构成整个气动仪表的工作过程。因气动仪表的工作过程涉及空气热力学、动力学过程，所以下面简要地介绍有关的基本知识。

一、空气的热力学过程

理想气体的状态方程为：

$$P \cdot V = \frac{M}{\mu} R_1 T$$

式中 P —— 气体的压力，atm；

V —— 气体的体积， m^3 ；

M —— 气体的质量，kg；

μ —— 摩尔质量，kg/mol；

R_1 —— 普适气体恒量， $R_1 = 8.21 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot m^3 / \text{mol} \cdot K$ ；

T —— 气体的绝对温度，K。

在工程上，为了方便往往不用气体的质量而采用气体的重量进行有关计算。所以，在工程上应用的理想气体状态方程为：

$$PV = \frac{G}{\mu g} R_1 T = GRT \quad (2-1)$$

式中 G —— 气体的重量；

g —— 重力加速度；

R —— 气体常数， $R = \frac{R_1}{\mu g}$ 。

对于1kgf的气体，式(2-1)可写成：

$$Pv = P \frac{1}{\gamma} = RT \quad (2-2)$$

式中 v —— 称为比容，为1kgf的气体所占有的体积，单位是 m^3/kgf ；

γ —— 气体的重度， kgf/m^3 。

在常温常压下，空气的性质很接近于理想气体，所以上述方程式是适用的。气体常数 R 的数值与式中 P 、 V 、 G 及 T 所采用的单位有关。当 P 用 kgf/m^2 ， V 用 m^3 ， G 用 kgf ， T 用 K 来表示时，干燥空气的气体常数 $R = 29.27 \text{ kgf} \cdot m / \text{kgf} \cdot K$ 。

气体的热力学过程可分为下列五种。

1. 等容过程

气体在容积保持不变时的状态变化过程,叫做等容过程。此时,式(2-2)变为:

$$\frac{P}{T} = \text{常数}$$

2. 等压过程

气体在压力保持不变时的状态变化过程,叫做等压过程。此时,式(2-2)变为:

$$\frac{T}{v} = \text{常数}$$

3. 等温过程

气体在温度保持不变时的状态变化过程,叫做等温过程。此时,式(2-2)变为:

$$Pv = \text{常数} \quad (2-5)$$

或

$$\frac{P}{\gamma} = \text{常数} \quad (2-6)$$

4. 绝热过程

气体在状态变化过程中,没有热量加入,也不放出热量,叫绝热过程。在绝热过程下,气体的状态方程式为:

$$\frac{P}{\gamma^{\kappa}} = \text{常数} \quad (2-7)$$

式中 $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$ 叫做绝热指数。 C_p 为定压比热, C_v 为定容比热。理想气体比热的大小,仅与气体的性质有关。实际气体的比热还与温度及压力有关。

5. 多变过程

在该过程中,气体与外界发生热交换,而且温度也有变化。此时气体状态方程式为:

$$\frac{P}{\gamma^n} = \text{常数} \quad (2-8)$$

n 称为多变指数。可将多变过程看成介于绝热过程与等温过程之间的过程。 $\kappa > n > 1$ 。

二、空气在节流元件中的流动

在气动仪表中,应用着很多各种结构型式的节流元件。在仪表的气动管路中,节流元件起着产生压降和改变空气流量的作用。

所以,必须了解流过节流元件的空气流量与压力降以及与节流元件结构间的关系,才能研究气动仪表的结构原理及其特性。空气在节流元件中有紊流和层流两种流动状态,所以节流元件分为紊流型非线性节流元件和层流型线性节流元件两种。

1. 空气经薄壁小孔的流动

假定空气从一容器上的薄壁小孔流出时的运动是稳定的,即在任一截面的流量、压力和温度等参数都不随时间而变

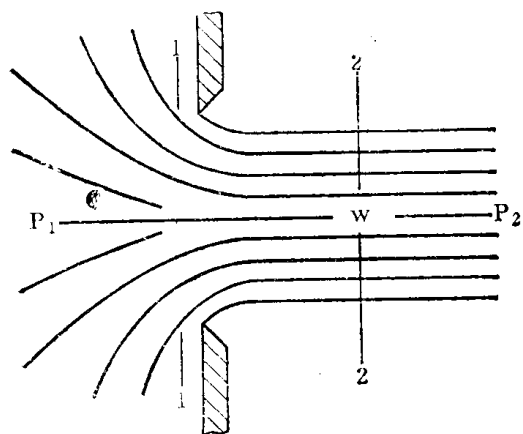


图 2-1 空气经薄壁小孔流动状态

化, 如图2-1所示。

用 w 、 P 、 g 、 γ 及 Z 分别表示流体运动的速度、压力、重力加速度及几何压头, 那么在任一截面处流体的能量总和, 按伯努利方程的微分形式表示为:

$$d\left(\frac{w^2}{2}\right) + \frac{g}{\gamma} dP + g dZ = 0 \quad (2-9)$$

将式 (2-9) 积分可得:

$$H = \frac{w^2}{2g} + \int \frac{P dP}{\gamma} + Z$$

H 为积分常数, 是运动流体所产生的全压头, 可看成是 1kgf 流体的机械能 (总能量), 它等于速度头 $\frac{w^2}{2g}$ 、静压头 $\int \frac{P dP}{\gamma}$ 及几何压头 (或称位头) Z 之和。对于图2-1中的截面1-1与2-2可分别写出:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{w_1^2}{2g} + \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{\gamma} + Z_1 \\ H_2 &= \frac{w_2^2}{2g} + \int_{P_2}^{P_2} \frac{dP}{\gamma} + Z_2 \end{aligned}$$

两式相减, 得:

$$H_1 - H_2 = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) \quad (2-10)$$

对于流动时没有摩擦力的理想流体, 两个截面上的总能量应保持不变, 即 $H_1 - H_2 = 0$ 。实际空气在流动过程中是存在摩擦力的。因此具有摩擦损失, 故 $H_1 - H_2 > 0$ 。摩擦损失一般与动能成正比, 即

$$\Delta H = \xi \frac{w_2^2}{2g} \quad (2-11)$$

式中 ΔH 为摩擦阻力损失, ξ 称为阻力系数, 其数值与节流元件的结构及流体的流动状态有关, 一般用实验方法求得。

根据能量守恒定律, 有:

$$H_1 - H_2 = \Delta H$$

于是

$$\xi \frac{w_2^2}{2g} = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) \quad (2-12)$$

因空气重度较小, $(Z_1 - Z_2)$ 近似为零。再考虑到空气从大容器经薄壁小孔流出时, 小孔前的流通截面很大, 空气流速 w_1 较小, 即 $w_1 \ll w_2$, 可将 w_1 忽略不计。所以式 (2-12) 可简化成:

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}} \sqrt{2g \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{\gamma}} \quad (2-13)$$

令 $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}}$, 称为速度系数。则

$$w_2 = \varphi \sqrt{2g \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{\gamma}} \quad (2-14)$$

在气动仪表中, 节流元件较短, 空气流速较大, 可认为空气与节流元件间没有热交换, 即流动是按绝热过程进行的。这时式 (2-7) 可写成

$$\frac{P}{\gamma^\kappa} = \frac{P_1}{\gamma_1^\kappa} \text{ 和 } \gamma = \frac{\gamma_1}{P_1^{1/\kappa}} P^{1/\kappa}$$

把所得 γ 值代入式 (2-14), 并积分, 得:

$$w_2 = \varphi \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{P_1}{\gamma_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$$

因

$$\frac{P_1}{\gamma_1} = RT_1$$

所以

$$w_2 = \varphi \sqrt{\frac{2gRT_1\kappa}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (2-15)$$

在截面2-2上的空气流量为:

$$G = A_2 \cdot w_2 \cdot \gamma_2 \quad (2-16)$$

式中 A_2 ——截面2-2上的气流截面面积;

γ_2 ——截面2-2处的空气重度。

因过程是绝热的, 故

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1}{P_1^{1/\kappa}} \cdot P_2^{1/\kappa}$$

将 γ_2 及式 (2-15) 中的 w_2 代入式 (2-16), 得

$$G = \varphi A_2 P_1 \sqrt{\frac{2g}{RT_1} \cdot \frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (2-17)$$

当空气从薄壁小孔流出时, 因惯性力的作用, 截面2-2处气流的截面面积 A_2 比小孔的

截面积 A 要小些。 $\frac{A_2}{A}$ 称为气流收缩系数 μ , 即 $\mu = \frac{A_2}{A}$ 。令 $\alpha = \mu \cdot \varphi$, 则

$$G = \alpha A P_1 \sqrt{\frac{2g}{RT_1} \cdot \frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (2-18)$$

α 称为流量系数。上式即为空气经小孔节流元件流动时, 重量流量与节流元件前后压力 P_1 、 P_2 和节流元件截面 A 之间的关系。

流量系数 α 是一个与流体流动状态、节流元件几何特征等有关的系数, 所以不能用计算的方法求出, 一般用实验方法求得。

由式 (2-18) 作出的流量 G 与压力 $\frac{P_2}{P_1}$ 之间的函数关系曲线如图 2-2 所示, 曲线的顶

点称为临界点。令 $\frac{P_2}{P_1} = \beta$, 取式 (2-18) 对 β 的微分, 并令导数 $\frac{dG}{d\beta}$ 等于零, 则在临界点

$$\beta_{\text{临界}} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

空气的绝热指数 $\kappa = 1.4$, 故其临界比 $\beta_{\text{临界}} = 0.528$ 。

$\beta > 0.528$ 的范围称为亚临界流动工况, 而 $\beta \leq 0.528$ 的范围称为超临界流动工况。在亚临界流动工况时, 流过薄壁小孔的空气流量随小孔后的压力 P_2 而变化。当 $\beta = 0.528$ 时, 小孔截面上的空气流速与音速相等。如果进一步减小 β , 小孔截面上所形成的音速使外来的扰动不能进入容器, 因此流速将不受压力 P_2 变化的影响而保持不变。在气动仪表中, 节流元件通常工作于亚临界流动工况。为保证 $\beta > 0.528$, 而将气源压力定为 1.4 kgf/cm^2 (表压力), 不能任意提高。气动单元组合仪表采用 $0.2 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 统一信号。将统一信号范围下限定为 0.2 kgf/cm^2 , 是为了避免控制元件工作在特性曲线的低压非线性区, 和消除执行机构起动的死区以提高其灵敏度。

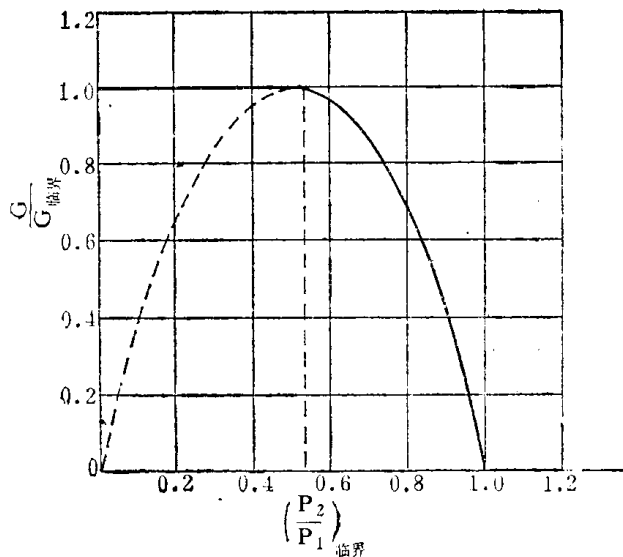


图 2-2 流量和压力比的关系曲线

在亚临界流动工况, 由式 (2-18) 计算得出的结果与实验结果是相符的。而在超临界流动工况时, 式 (2-18) 显然是不适用的, 这时就要用将 $\frac{P_2}{P_1} = \beta_{\text{临界}}$ 代入式 (2-18) 而得到的下式来计算:

$$G = \alpha A P_1 \sqrt{\frac{2g}{RT_1} \cdot \frac{\kappa}{\kappa + 1} \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}} \quad (2-19)$$

由式 (2-19) 可见, 在超临界流动工况, 流经小孔的空气流量只随小孔前的压力 P_1 而变化。

公式 (2-18) 和 (2-19) 都很复杂, 为了简化计算, 通常把空气经小孔的流动过程看成等容过程, 并取小孔后的空气重度代入, 则由式 (2-14) 和 (2-16) 可推出简化公式:

$$G = \alpha A \sqrt{\frac{2g}{RT_2} P_2 (P_1 - P_2)}$$

$$= \alpha A P_1 \sqrt{\frac{2g}{RT_2} \cdot \frac{P_2}{P_1} \left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right)} \quad (2-20)$$

此时, G 与 $\beta = \frac{P_2}{P_1}$ 的关系仍为一曲线, 在其顶点 $\beta_{\text{临界}} = 0.5$ 。在 $\beta > 0.5$ 的亚临界流动工况, 式 (2-20) 是适用的。在 $\beta \leq 0.5$ 时的超临界流动工况, 可将 $\beta = 0.5$ 代入公式 (2-20) 而得下式:

$$G = \alpha A P_1 \sqrt{\frac{g}{2RT_2}} \quad (2-21)$$

按简化式 (2-20) 和 (2-21) 计算的结果与实际值是有偏差的, 在超临界流动工况下的偏差最大。

以上讨论的内容都是紊流流动 ($Re > 2300$) 的情况, 空气流经节流元件时的流量与压力降之间为非线性关系。

2. 空气在毛细管中的流动

空气在毛细管中呈层流流动 ($Re < 2300$) 时, 空气流量与毛细管两端压降间的关系为:

$$G = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} \gamma (P_1 - P_2) \quad (2-22)$$

式中 P_1 、 P_2 ——分别为毛细管前、后空气的压力, kgf/m^2 ;

d ——毛细管内径, m ;

l ——毛细管长度, m ;

γ ——空气重度, kgf/m^3 ;

η ——空气的动力粘度, $\text{kgf} \cdot \text{s/m}^2$ 。

式 (2-22) 是在假定空气是不可压缩的, 即空气重度不变的情况下求得的。这时流经毛细管的空气流量与压降成线性关系。实际上, 空气在毛细中流动时的压力是变化的, 空气的重度也在变化, 如果以 $\gamma = \frac{P_2}{RT_2}$ 代入式 (2-22) 中时, 可见, 随着 P_2 的变化, 流量

G 与压力降 ($P_1 - P_2$) 之间就成为非线性关系了。所以, 为了获得流量与压力降间的线性关系, 应当采用比空气压力小得多的工作压力降。

对于其他结构较复杂的节流元件, 往往在一定范围内将其流量与压力降的关系作为线性关系处理, 即

$$G = K (P_1 - P_2) \quad (2-23)$$

比例系数 K 通常用实验方法测定之。

第二节 弹性元件

在气动仪表中, 弹性元件作为感测元件或转换元件, 将压力或差压信号转换成位移或力信号。因此, 了解弹性元件的结构及其特性是非常必要的。通常采用的弹性元件有: 非金属膜片、金属膜片、波纹管及弹簧等。