 新世纪高等院校精品教材

GUOCHENG KONGZHI YIBIAO

# 过程控制仪表

曹润生 黄祯地 周泽魁 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

# 过程控制仪表

曹润生 黄祯地 周泽魁 编

浙江大学出版社

## 内 容 简 介

《过程控制仪表》是高等院校化工类化工自动化及仪表专业的一门教材。作者积累多年的教学经验,在此基础上编写这本教材。全书共分六章,内容包括:调节规律,调节器,变送器,运算器,执行器及可编程调节器。其主要特点是将气动仪表和电动仪表融为一体,抓住共性,突出重点,力求少而精,着力于理论联系实际;特别是在内容上,增添了有代表性的、先进的过程控制仪表,如可编程调节器和电容式差压变送器等。

本教材适用于大专院校自动化专业和有关厂矿企业的职业教育,也可供从事自动化及仪表工作的工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

过程控制仪表 / 曹润生, 黄祯地, 周泽魁编. —2 版  
杭州: 浙江大学出版社, 2007. 12  
ISBN 978-7-308-00036-9

I. 过… II. ①曹…②黄③周… III. 过程控制—工业仪表 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177452 号

## 过程控制仪表

曹润生 黄祯地 周泽魁 编

责任编辑 邹小宁

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>

<http://www.press.zju.edu.cn>)

电话: 0571-88925592, 88273066(传真)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 德清县第二印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 23.125

字 数 561 千

版 印 次 2008 年 1 月第 2 版 2008 年 1 月第 15 次印刷

印 数 42501—43500

书 号 ISBN 978-7-308-00036-9

定 价 30.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88072522

## 前 言

随着自动化仪表的不断发展、更新换代,自动调节仪表课程的教学内容日益增多。在我国除了电动和气动单元组合仪表仍然被大量使用外,还出现了许多新型的数字式调节仪表和智能化的可编程调节器。面对这样的现实,如何组织自动调节仪表课程的教学内容,以及如何开展该课程的教学活动,就成为浙江大学化工自动化仪表教研室共同关心和研究的问题。经过多年教学改革实践,我们逐步形成了以下的想法:(1)以仪表功能为基础组织教材;(2)突出仪表构成原理;(3)注意培养学生正确地、灵活地运用仪表的能力;(4)压缩学时数。

根据以上想法,从1981年开始我们就将“气动调节仪表”和“电动调节仪表”两门课程合并为一门——“自动调节仪表”,并增加了实验的个数和实验时数,总学时数削减了40%。经5届大学本科的教学实践表明,改革后的教学质量有所提高,效果较好。本书就是在此基础上编写而成的。并取名为“过程控制仪表”。

本书与以往同类型的教科书相比较,具有如下特点:

(1)气、电结合。对具有相同功能的电动仪表和气动仪表,以仪表功能为基础组织教材,并尽量用电模拟的方法讲解气动仪表。

(2)突出仪表构成原理。从仪表功能出发,应用反馈理论,导出仪表的构成框图及其传递函数,而将具体的仪表电路或气路作为实现其传递函数运算的一种实例。

(3)注重理论联系实际。本书中例举了一些典型的、带启发性的应用实例,目的在于对理论能加深理解,对应用能举一反三。

(4)新增加了有代表性的、先进的过程控制仪表,如可编程调节器和电容式差压变送器等。

参加本书编写的有:曹润生(1、2、4章),周泽魁(3、5章),黄祯地(6章)。全书由黄祯地统稿、汇编。本书由林新民副教授审阅;在本书编写过程中,得到周春晖教授的关心和热情指导,在此一并深表谢意。

虽然我们在改革“自动调节仪表”教材中做了一些工作,但由于我们经验不足,有些规律性的东西尚未认识,因此本书难免存在缺点和错误。我们恳切地希望读者对本书提出批评、指正。

编 者

1987年4月于杭州

# 目 录

<b>第一章 调节规律</b> .....	1
<b>第一节 调节规律的表示方法</b> .....	1
一、何谓调节器的调节规律.....	1
二、调节规律的表示方法.....	2
<b>第二节 基本调节规律实现方法</b> .....	5
一、无源RC电路.....	5
二、无源RC气路.....	7
三、PID调节规律及其实现方法.....	14
<b>第三节 PID调节规律的组成方式</b> .....	45
一、串联反馈的PID运算电路.....	45
二、并联反馈的PID运算电路.....	49
三、微分先行的PID运算电路.....	50
四、实际PID调节器的阶跃响应.....	54
<b>第二章 调节器</b> .....	56
<b>第一节 电动调节器</b> .....	56
一、概述.....	56
二、DDZ—Ⅰ型DTL—121调节器.....	57
三、DTL—321调节器.....	74
四、DDZ—Ⅱ电动调节器.....	78
<b>第二节 气动调节器</b> .....	93
一、喷嘴-挡板型放大器.....	94
二、气动Ⅱ型调节器.....	98
<b>第三节 抗积分饱和及其措施</b> .....	101
一、从取代调节系统谈起.....	102
二、积分饱和及其危害.....	103
三、抗积分饱和的基本对策及其措施.....	104
<b>第四节 常规调节器的非常规应用</b> .....	116
一、简易采样调节器.....	117
二、最佳氧量调节器.....	118
<b>第三章 变送器</b> .....	122
<b>第一节 变送器的构成</b> .....	122
一、构成原理.....	122
二、变送器输出信号与电源的连接方式.....	124
<b>第二节 差压变送器</b> .....	126
一、膜盒式差压变送器.....	126

二、电容式差压变送器	143
<b>第三节 温度(温差)变送器</b>	151
一、概述	151
二、DDZ—Ⅰ型温度(温差)变送器	151
三、DDZ—Ⅱ型四线制温度变送器	158
四、DDZ—Ⅲ型两线制温度变送器	172
<b>第四章 运算器</b>	177
<b>第一节 加减器</b>	177
一、作用与构成原理	177
二、DDZ—Ⅰ型DJJ—04加减器	178
三、DDZ—Ⅱ型加减器	182
四、力平衡式气动加减器	187
<b>第二节 乘除器</b>	190
一、乘除运算的实现方法	190
二、单向矩形脉冲调宽调高乘除器	195
三、正负矩形脉冲调宽调高乘除器	214
四、气动乘除器	220
<b>第三节 开方器</b>	223
一、开方器在自动化系统中的作用	223
二、开方运算的实现方法	224
三、开方运算精度与小信号切除	225
四、DDZ—Ⅰ型开方器	226
五、DDZ—Ⅱ型开方器	228
<b>第五章 执行器</b>	233
<b>第一节 概述</b>	233
一、执行器在自动调节系统中的作用	233
二、执行器的分类及特点	233
三、执行器的构成	234
<b>第二节 执行机构</b>	234
一、电动执行机构	234
二、气动执行机构	245
三、执行机构的输出力(力矩)	247
<b>第三节 调节机构</b>	249
一、节流式调节机构的工作原理	249
二、调节机构的种类和概述	250
三、调节阀的流通能力	252
四、调节阀的可调比(可调范围)	255
五、调节阀的流量特性	257
六、闪蒸与空化	263
七、调节阀的不平衡力	264

<b>第四节 执行器的选择计算</b> .....	266
一、执行器结构类型的选择 .....	266
二、调节阀流量特性的选择 .....	267
三、调节阀口径的选择 .....	270
<b>第五节 阀门定位器</b> .....	272
一、阀位定位器的应用 .....	272
二、气动阀门定位器 .....	273
三、电/气阀门定位器 .....	276
<b>第六章 可编程调节器</b> .....	278
<b>第一节 集散型控制系统的兴起</b> .....	278
<b>第二节 可编程调节器</b> .....	281
一、概述 .....	281
二、特点 .....	282
三、基本组成 .....	283
<b>第三节 KMM可编程单回路调节器</b> .....	300
一、工作原理 .....	301
二、输入处理模块 .....	306
三、运算模块 .....	310
四、控制类型及无扰动切换功能 .....	321
五、自诊断功能与异常运行状态 .....	324
六、通信功能 .....	326
七、型号规格、主要技术数据和外形结构 .....	328
<b>第四节 KMK编程器</b> .....	332
一、KMK编程器的组成 .....	333
二、键盘和显示部分功能 .....	333
三、编程方法 .....	335
四、运算单元的增加或删除 .....	341
五、打印清单和出错显示 .....	342
六、检查功能 .....	343
<b>第五节 KMM可编程单回路调节器的应用</b> .....	343
一、自动变比例度控制系统 .....	344
二、变结构控制系统 .....	344
三、热效率控制系统 .....	346
四、双交叉燃烧控制系统 .....	348
五、内回流控制系统 .....	350
六、防喘振控制系统 .....	352
七、锅炉汽包水位三冲量控制系统 .....	355
八、采样控制系统 .....	356
九、预估补偿控制系统 .....	358
十、程序控制 .....	360
十一、模拟控制系统 .....	361

# 第一章 调节规律

## 第一节 调节规律的表示方法

### 一、何谓调节器的调节规律

图 1-1 是单回路调节系统方框图。大家知道,在该自动调节系统中,被调参数由于受干扰  $D$  (如生产负荷的改变,上下工段间出现的生产不平衡现象等)的影响,常常偏离给定值,即被调参数产生了偏差,

$$\Delta x = x - x_s \quad (1-1)$$

式中  $\Delta x$ ——偏差;  
 $x$ ——测量值;  
 $x_s$ ——给定值。

调节器接受了偏差信号后,按一定的调节规律使其输出信号发生变化,通过执行器改变调节参数  $q$ ,以抵消干扰对被调参数的影响,从而使被调参数回到给定值上来。

被调参数能否回到给定值上,或者以什么样的途径、经过多长时间回到给定值上来,这不仅与被调对象特性有关,而且还与调节器的特性有关。只有熟悉了调节器的特性,才能应用它来达到自动调节的目的。

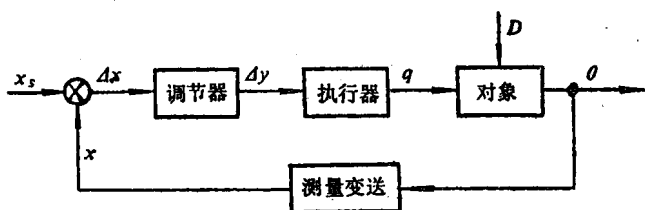


图1-1 单回路调节系统方框图

调节器的调节规律就是调节器的输出信号随输入信号(偏差)变化的规律。这个规律常称调节器的特性。

必须强调指出,在研究调节器特性时,调节器的输入是被调参数(测量值)与给定值的偏差  $\Delta x$ ,而调节器的输出是调节器接受偏差  $\Delta x$ 后,相应的输出信号的变化量  $\Delta y$ 。

对调节器而言,习惯上,

$\Delta x > 0$ , 称正偏差;

$\Delta x < 0$ , 称负偏差;

$\Delta x > 0$ , 相应的  $\Delta y > 0$ , 则该调节器称正作用调节器;

$\Delta x > 0$ , 相应的  $\Delta y < 0$ , 则该调节器称反作用调节器。

基本调节规律有比例(P)、积分(I)和微分(D)三种。由这些调节规律组成P、PI、PD和



PID等几种常用工业型调节器。

## 二、调节规律的表示方法

不少调节器输入和输出的物理量是不相同的，特别是基地式调节器，它们的输入信号可能是温度、压力等，而输出信号为20~100kPa或0~10mADC、1~5VDC等。为了用一个统一的式子表示调节器的特性，可用相对变化量来表示调节器的输入和输出，调节器的输入是偏差相对于输入信号范围的比值，输出信号是输出变化量相对于输出信号范围的比值。显然，它们都是无因次的。即

$$\left. \begin{aligned} X &= \Delta x / (x_{\max} - x_{\min}) \\ Y &= \Delta y / (y_{\max} - y_{\min}) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中  $x_{\max} - x_{\min}$ ——输入信号范围；

$y_{\max} - y_{\min}$ ——输出信号范围；

$X$ ——用相对变化量表示的调节器输入；

$Y$ ——用相对变化量表示的调节器输出；

$\Delta x$ ——调节器的输入偏差，为方便起见，后面用  $x$  表示；

$\Delta Y$ ——调节器的输出变化量，同样后面用  $y$  表示。

调节器的特性用相对变化量  $X$  和  $Y$  的关系式表示，一般有四种表示方法，即(1)微分方程表示法；(2)传递函数表示法；(3)频率特性表示法；(4)图示法。

### (一) 微分方程表示法

一般形式为  $Y = f(X)$  (1-3)

几种调节规律的微分方程表达式分别为：

比例(P)： $Y = K_P X$  (1-3a)

比例积分(PI)： $Y = K_P (X + \frac{1}{T_I} \int X dt)$  (1-3b)

比例微分(PD)： $Y = K_P (X + T_D \frac{dX}{dt})$  (1-3c)

比例积分微分(PID)： $Y = K_P (X + \frac{1}{T_I} \int X dt + T_D \frac{dX}{dt})$  (1-3d)

式中  $K_P$ ——比例放大系数；

$T_I$ ——积分时间；

$T_D$ ——微分时间。

对单元组合式调节器而言，其输入信号范围和输出信号范围分别为：

	输入信号范围	输出信号范围
QDZ调节器	20~100kPa	20~100kPa
DDZ—II调节器	0~10mADC	0~10mADC
DDZ—III调节器	4~20mADC 1~5VDC	4~20mADC 1~5VDC

因此式(1-3)可表示为

$$y = f(x) \quad (1-4)$$

式(1-3d)可表示为

$$y = K_P \left( x + \frac{1}{T_I} \int x dt + T_D \frac{dx}{dt} \right) \quad (1-4d)$$

调节器特性的微分方程表示法常用于测定调节器参数 $K_P$  (或比例度 $\delta$ )、 $T_I$ 和 $T_D$ 。

## (二) 传递函数表示法

一般表示形式为

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} \quad (1-5)$$

式中  $Y(S)$ —— $Y$ 的拉氏变换式;

$X(S)$ —— $X$ 的拉氏变换式;

$G(S)$ ——用拉氏变换式表示的调节器特性, 即调节器的传递函数;

$S$ ——拉氏变换的算子。

几种调节规律的传递函数表达式分别为:

$$P: \quad G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = K_P \quad (1-5a)$$

$$PI: \quad G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I S} \right) \quad (1-5b)$$

$$PD: \quad G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = K_P (1 + T_D S) \quad (1-5c)$$

$$PID: \quad G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (1-5d)$$

传递函数表示法常用于调节器和调节系统的分析计算。

## (三) 频率特性表示法

利用频率法分析和综合调节系统时, 需要知道调节器的频率特性, 即

$$G(j\omega) = A(\omega) e^{j\phi(\omega)} \quad (1-6)$$

式中  $A(\omega)$ ——幅频特性;

$\phi(\omega)$ ——相频特性。

只要将上面几种调节器的传递函数表达式中的 $S$ 用 $j\omega$ 代替, 就可获得相应的频率特性的复数表达式, 并且可进一步求得幅值和相角, 而表达成式(1-6)的形式。

几种调节器的频率特性表示如下:

$$P: \quad G(j\omega) = K_P \quad (1-6a)$$

$$A(\omega) = K_P, \quad \phi(\omega) = 0$$

$$PI: \quad G(j\omega) = K_P \left( 1 + \frac{1}{j\omega T_I} \right) \quad (1-6b)$$

$$A(\omega) = K_P \sqrt{1 + \left( \frac{1}{T_I \omega} \right)^2}, \quad \phi(\omega) = \arctg \left( - \frac{1}{T_I \omega} \right)$$

PD:  $G(j\omega) = K_P(1 + j\omega T_D)$  (1-6c)

$A(\omega) = K_P\sqrt{1 + T_D^2\omega^2}$ ,  $\phi(\omega) = \arctg T_D\omega$

PID:  $G(j\omega) = K_P(1 + \frac{1}{j\omega T_I} + j\omega T_D)$  (1-6d)

$A(\omega) = K_P\sqrt{1 + (T_D\omega - \frac{1}{T_I\omega})^2}$ ,  $\phi(\omega) = \arctg(T_D\omega - \frac{1}{T_I\omega})$

为便于分析计算，幅频特性常用对数表示成对数幅频特性，即

$L(\omega) = 20\lg A(\omega)$

图1-2为几种调节器的对数频率特性曲线。

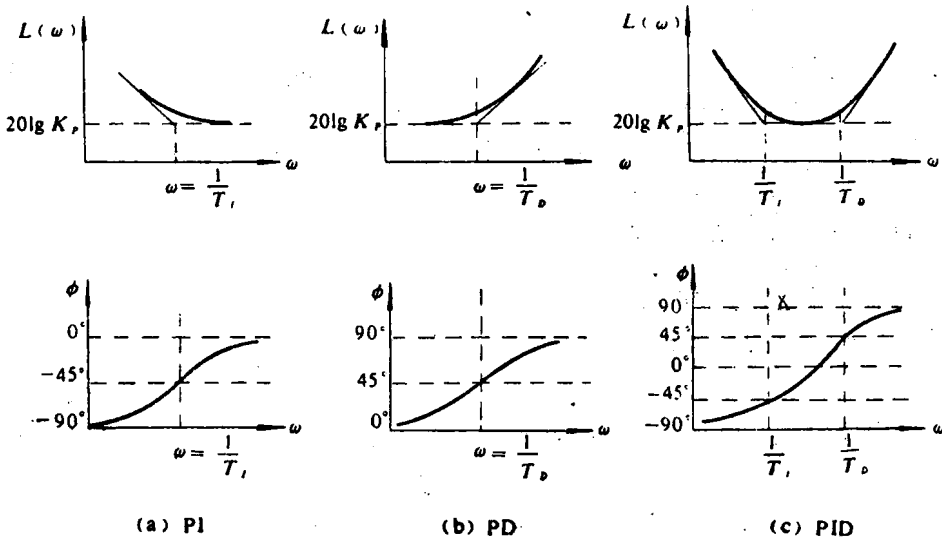


图1-2 调节器对数频率特性曲线

(四) 图示法

图1-2实际上也是调节器特性的一种图示方法，它表示在不同频率下，调节器的输出与输入间其幅值及相位的关系。虽然这种表示方法在频率法中得到应用，但不够直观。人们往往需要知道，在一定输入信号下(通常为阶跃输入信号)，调节器的输出是如何随时间变化的。

在阶跃输入下，几种工业调节器的输出随时间变化的曲线表示于图1-3。

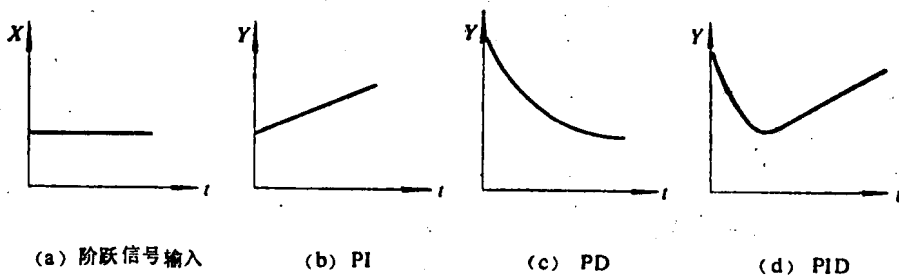


图1-3 在阶跃输入下，几种调节器的输出随时间变化曲线

调节器特性的这种图示法比较直观，用它可进行调节器参数的测定和调节器调节规律的定性分析。

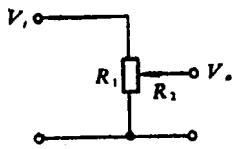
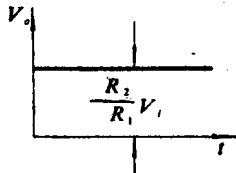
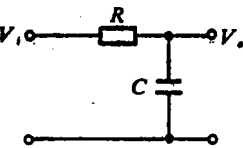
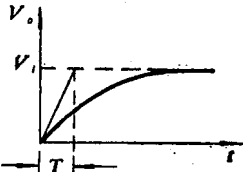
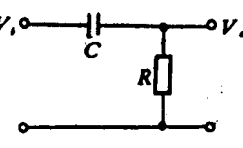
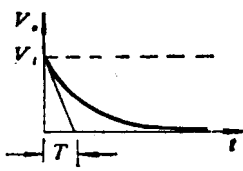
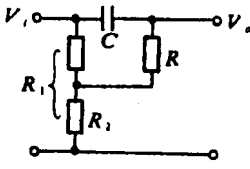
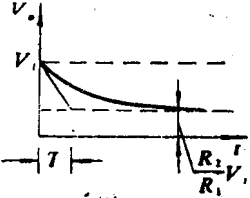
## 第二节 基本调节规律实现方法

为便于讨论基本调节规律的实现方法，先讨论由无源RC电路和无源RC气路实现的调节规律。

### 一、无源RC电路

利用电阻、电容可以组成无源的比例、积分、微分和比例微分等电路，如表1-1所示。

表1-1 无源RC基本电路

RC 电路	传递函数	阶跃响应	运算种类
	$\frac{R_2}{R_1}$		P
	$\frac{1}{RCS + 1}$		I
	$\frac{RCS}{RCS + 1}$		D
	$\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{R_1 RCS + 1}{RCS + 1}$		PD

注：表中  $T = RC$

### (一) 比例电路

表1-1a是电阻分压的无源比例电路，其传递函数为

$$G(S) = \frac{V_o(S)}{V_i(S)} = \frac{R_2}{R_1} = K_P \quad (1-7)$$

式中， $V_o(S)$ 和 $V_i(S)$ 分别为输出 $V_o$ 和输入 $V_i$ 的拉氏变换式。

由表1-1a的图可见，其比例增益 $K_P$ 不能大于1。

### (二) 积分电路

表1-1b是无源RC积分电路，它是一阶惯性环节。其传递函数为

$$G(S) = \frac{V_o(S)}{V_i(S)} = \frac{1}{TS+1} \quad (1-8)$$

式中  $T = RC$

它的阶跃响应是时间常数为 $T$ 的指数曲线，由表1-1b图可见，稳定后的电压增益为1。

### (三) 微分电路

表1-1c是无源RC微分电路，其传递函数为

$$G(S) = \frac{V_o(S)}{V_i(S)} = \frac{TS}{TS+1} \quad (1-9)$$

它可以视为理想微分 $TS$ 与一阶惯性环节 $\frac{1}{TS+1}$ 相串联。在阶跃输入下，开始的增益为1，以后按时间常数为 $T$ 的指数曲线下降，由于电容的隔直作用，稳定后输出电压为零。阶跃响应曲线见表1-1c图。

### (四) 比例微分电路

表1-1d为比例微分电路，当 $R \gg (R_1 - R_2)$ 时，可得电路的传递函数

$$G(S) = \frac{V_o(S)}{V_i(S)} = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{\frac{R_1}{R_2} RCS + 1}{RCS + 1} = \frac{1}{n} \times \frac{T_D S + 1}{\frac{T_D}{K_D} S + 1} \quad (1-10)$$

$$\text{式中 } n = K_D = \frac{R_1}{R_2}, \quad (1-11)$$

$$T_D = \frac{R_1}{R_2} RC. \quad (1-12)$$

式(1-12)中 $\frac{1}{n}$ 就是该电路的比例增益。

该电路在阶跃输入瞬间的输出电压等于输入电压，然后按时间常数为 $T$ （等于 $RC$ ）的指数曲线下降，稳态后等于输入电压的 $\frac{1}{n}$ 。

在上述几个基本电路中，由于积分电路和微分电路的特性与所要求的积分和微分调节规律有所差别，比例电路的比例增益不能小于1，因此一般不单独作为调节规律使用。但是这些电路与负反馈放大器配合，可以组成各种实用的调节器。

## 二、无源RC气路

气动仪表由气阻、气容、弹性元件和气动放大器等组成，与电子线路一样，应用气阻、气容可以组成无源RC气路。下面先介绍气阻和气容，然后介绍由它们组成的无源RC气路。

### (一) 气阻

气阻与电子线路中的电阻相似，它可以改变气体的流量，而在它两端产生压力降。在流体呈层流状态时，气阻的大小与两端的压降成正比，与流过的流量成反比，可表示为

$$R = \frac{\Delta P}{M} \quad (1-13)$$

式中  $R$  —— 气阻；

$\Delta P$  —— 气阻两端的压降；

$M$  —— 气体的质量流量。

式(1-13)与电路中的欧姆定律

$$R = V/I \quad (1-14)$$

相似。比较式(1-14)与式(1-13)可见，两者的对应关系

气阻  $R \longleftrightarrow$  电阻  $R$

气体流量  $M \longleftrightarrow$  电流  $I$

压力降  $\Delta P \longleftrightarrow$  电压降  $V$

} (1-15)

电阻有固定电阻和可变电阻（电位器）之分，气阻也有恒气阻与可调气阻之分。用符号表示如下：

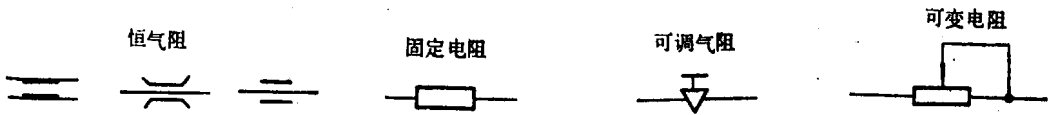


图 1-4 为几种恒气阻和可调气阻的结构图。图 1-5 为气阻的流量特性曲线图。由这些流量特性可以看出，有些气阻的压降与流量呈线性关系，也有些呈非线性关系，因此气阻有线性气阻与非线性气阻之分，而通过电阻的电流与电压呈线性关系，这就是气阻与电阻不同之处。

#### 1. 线性气阻

若通过气阻的流量与气阻两端的压力降成正比，则为线性气阻。

在流体呈层流状态下，毛细管式恒气阻与缝隙式恒气阻的阻值分别为

$$R = \frac{128 \cdot \eta \cdot l}{\pi d^4} \quad (1-16)$$

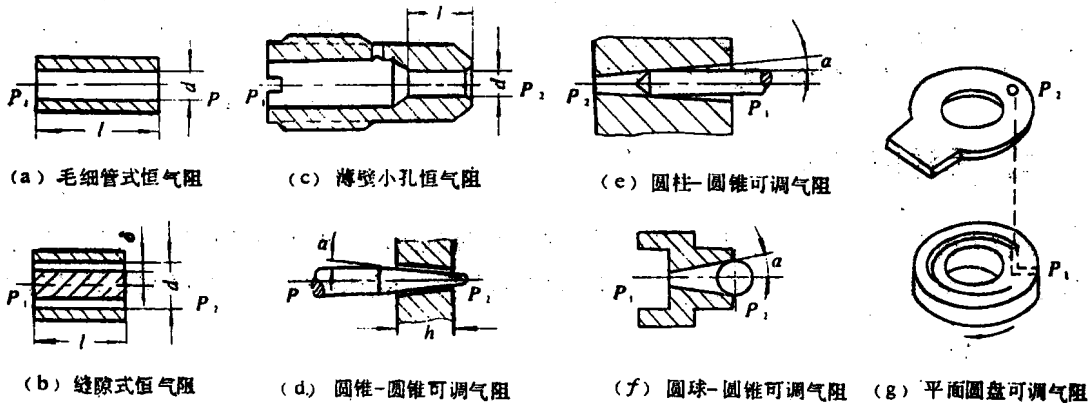


图1-4 气阻结构图

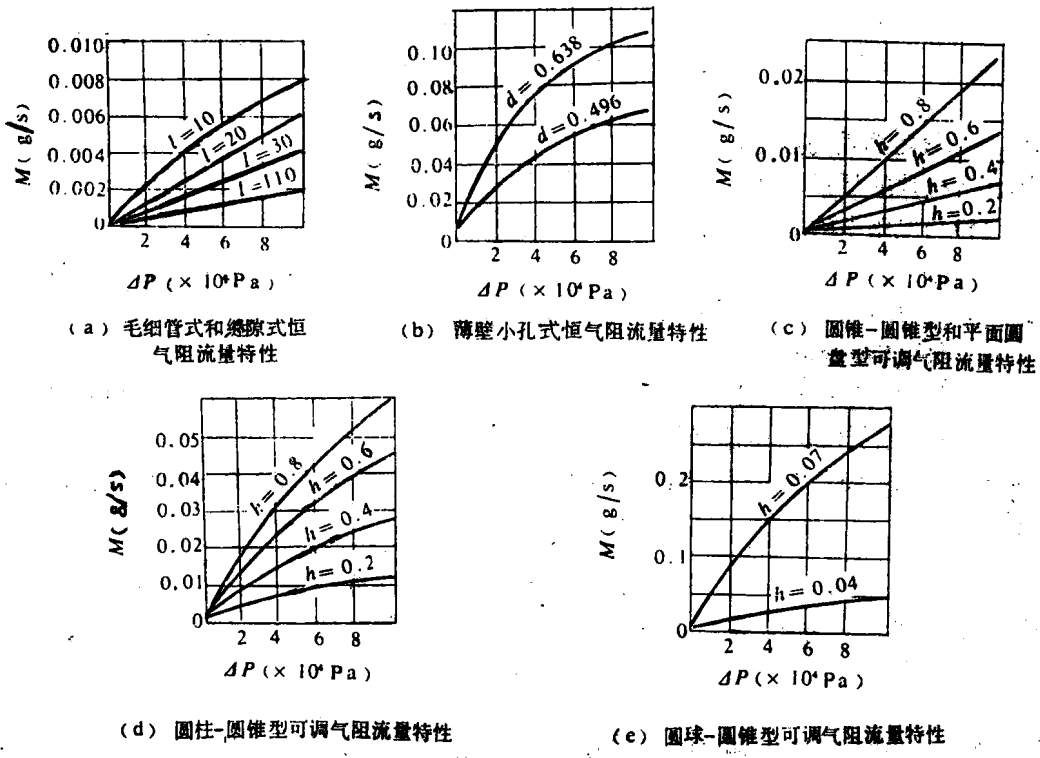


图1-5 气阻流量特性图

$$R = \frac{12 \cdot \eta \cdot l}{\pi d \delta^3} \tag{1-17}$$

式中  $R$  ——气阻；  
 $\eta$  ——工作状态下空气的动力粘度；  
 $l$  ——气阻元件的长度；  
 $d$  ——毛细管内径或缝隙中心柱的内径；  
 $\delta$  ——缝隙宽度。

由上两式可见，在层流状态时，气阻阻值的大小不仅与它的结构尺寸有关，而且还与流体的动力粘度有关，由于动力粘度随流体的温度而变化，因此气阻的阻值也受流体温度的影响。

## 2. 非线性气阻

若流过气阻的流体呈紊流状态，且不考虑流体通过气阻的密度变化时，流体的流量与气阻的压力降的开方成正比，则为非线性气阻，计算公式为

$$M = \alpha A \sqrt{2g\rho\Delta P} \quad (1-18)$$

式中  $M$ ——质量流量；

$\alpha$ ——流量系数（一般由实验测定）；

$A$ ——气阻的流通截面积；

$\rho$ ——经气阻后的流体密度

$\Delta P$ ——气阻前后的压力降；

$g$ ——重力加速度。

因为  $R = \frac{d\Delta P}{dM}$ ，代入上式，得

$$R = \frac{1}{g\rho\alpha^2 A^2} \cdot M \quad (1-19)$$

设  $k = \frac{1}{g\rho\alpha^2 A^2}$ ，它可近似为常数。则式(1-19)可写为

$$R = kM \quad (1-20)$$

由式(1-20)可知，非线性气阻的阻值随流过气阻的流量的增加而加大。

薄壁小孔式恒气阻属非线性气阻，虽然它的流量特性呈非线性，由于加工制造较方便，而且一般也能满足技术要求，所以在目前国产气动仪表中应用较多。

必须指出，线性气阻或非线性气阻是由流体的流动状态所决定的，即由雷诺数所决定。一般来说，流体的雷诺数  $Re < 2300$  时，流体呈层流状态，气阻的流量特性呈线性，当  $Re > 10000$  时，流体呈紊流状态，则气阻的流量特性呈非线性。因此，即使是毛细管式的恒气阻，当流体呈紊流状态时，它就变为非线性气阻。实际上，要精确计算气阻的大小是比较困难的，一般都由实验测定。

## (二) 气容

在电子线路中，电容的大小由使它两端升高单位电压所需增加的电量来表示。而气容是个具有一定容积的气室，它在气路中的作用与电容在电路中的作用相似，其值由升高单位气压所需增加的气体量表示，即

$$C = \frac{m}{\Delta P_c} \quad \text{或} \quad C = \frac{dm}{dP_c}$$

式中  $m$ ——气体质量；

$\Delta P_c$ ——气室中的压力增量；

$C$ ——气容量。





因为  $m = \int M dt,$

所以  $C = \frac{\int M dt}{\Delta P_c}$

气容在气路中所具有的一些性质，与电容在电路中所具有的性质相似，见表1-2。

表1-2 电容与气容的比较

比较 元件	表示方法	代数表达式	导数表达式	积分表达式	微分表达式
电 容		$C = \frac{q}{V_c}$	$C = \frac{dq}{dV_c}$	$C = \frac{1}{V_c} \int i_c dt$	$i_c = C \frac{dV_c}{dt}$
气 容		$C = \frac{m}{\Delta P_c}$	$C = \frac{dm}{dP_c}$	$C = \frac{1}{\Delta P_c} \int M dt$	$M = C \frac{dP_c}{dt}$

由表1-2可见，在电路中，电容两端的电压不能突变，而在气路中的气容中，气压也不能突变。

电容有固定电容和可变电容之分，气容也可分为固定气容与可变气容。由固定容积的气室构成固定气容，由弹性气室构成可变气容或称弹性气容（见图1-6）。

1. 固定气容

容积不变的气容称固定气容。根据气体状态方程式

$$PV = mRT \tag{1-21}$$

式中  $P$ ——气室中的绝对压力；

$V$ ——气室体积；

$m$ ——气体质量

$R$ ——气体常数；

$T$ ——气体绝对温度，K。

若气容的充气或放气的过程为等温过程，则由式(1-21)可得  $VdP = RTdm$

则  $C = \frac{dm}{dP} = \frac{V}{RT}$

由上式可见，当温度 $T$ 不变时，气容量 $C$ 与气室的容积 $V$ 成正比，由于固定气室的容积恒定，因此固定气室的气容量为一恒值。

2. 弹性气容

弹性气容在压力变化的同时，容积也发生变化，因此气容量不是一恒值。

由气体方程式(1-21)可得

$$VdP + PdV = RTdm \tag{1-22}$$

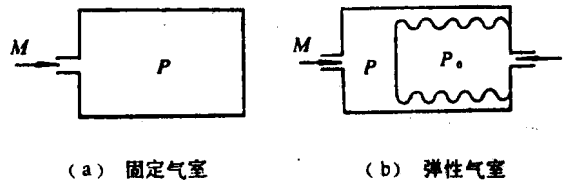


图1-6 气容结构原理图