

供热与空调自动控制的 理论与应用

作者	K M 莱瑟曼
翻译	张瑞武
校核	彦启森
	吕纪文

清华大学出版社

内 容 简 介

本书全面论述了供热与空调自动控制的基本理论与应用。书中系统地叙述了温度与湿度的测量方法,详细地介绍了经典控制理论及其在上述领域中的应用。内容包括:温度与湿度传感器及其测量仪表、控制器的构成与特性、末端控制元件、线性自动控制理论、非线性系统的分析及应用等。书后附有习题。

本书可供有关专业的高年级大学生、硕士研究生以及从事供热与空调及其自动化工作的工程技术人员和科研人员参考。

供热、通风与制冷国际丛书第15卷 供热与空调自动控制理论及应用

K.M. 莱瑟曼著

张 瑞 武 译

彦启森 吕纪文校

责任编辑 刘明华

★

清华大学出版社出版

北京 清华园

河北省香河县印刷厂排版

河北省固安县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

★

开本: 787×1092 1/32 印张: 10 1/4 字数: 227千字

1986年2月第1版 1986年2月第1次印刷

印数: 00001~50005

统一书号: 15235.150

定价: 2.10元

前 言

本书主要是依据作者过去十年在曼彻斯特大学理工学院讲授建筑设备工程的理学硕士课程中的自动控制课之经验而撰写的。虽然本书主要是面向具有工程学位水平的学生和希望了解控制理论的专业人员，可是希望它对愿意了解自动控制的理论同实践之间关系的读者都是有益的。本书是按照读者具有通晓微积分及复数的概念这种数学水平而写的。至于多变量控制的最新发展所依据的矩阵理论则超出了本书的范围。

为了控制任何物理过程，都必须测定其工况。建筑设备系统中主要关心的两个参数是温度和湿度。第一章介绍测量这两个参数的方法及传感器。

第二章是关于对建筑环境设备的一些特定领域进行控制的一系列介绍，并且简要讲述了被控制系统某些部件的动态特性。

在第三章中，阐述了气动型、电动型及电子型控制器的具体机构及回路。在第四章中，描述了它们的一般特性。

第五章给出了线性自动控制理论所依据的那些基本概念。讲述了以拉普拉斯变换函数对系统动态特性进行数学描述的方法，并且表明如何计算一个系统的暂态的及频率响应的特性。结合实例讲解了关于稳定性预测的标准方法。由于很多实际系统事实上是非线性的，所以，第六章讲了一些适

用于非线性情况下的实际分析方法。

本书中，在例题之外还有许多习题。凡附有 UMIST 标记的习题都是在最终学位试卷中采用过的，是得到教务管理人员的同意后而转载的。

书后附了范围很广泛的文献书目，以供进一步钻研有关课题的读者参考选用。附录中列出一些推演后的变换结果，对于描述实验测得的实际系统在阶跃输入信号作用下的响应是很有用的。

在写这样的一本书时，即使作者尽了最大努力，某些错误仍然可能避免不了。作者欢迎读者告以书中可能出现的任何错误，并对此负完全责任。

1980年5月于曼彻斯特

译 者 的 话

随着我国工农业生产与科学技术的迅速发展以及人民生活水平的提高,供热与空气调节不仅在保证工艺生产过程所必需的空气环境方面日益发挥重要作用,而且在保证人体健康与舒适方面也正在得到更加广泛的应用。其耗能量在整个国民经济的总能耗中占有很大的比例。为满足工艺要求并达到节能的目的,实现供热与空调的自动控制是很有必要的。本书专门论述了这方面的基本理论与应用。

作者总结了在大学中讲授有关课程之经验,从建筑设备的两个主要参数-温度与湿度的测量开始,系统地叙述了各个控制环节,包括控制器的动特性,重点分析了线性自动控制系统,最后还介绍了非线性系统一些分析方法。全书物理概念清楚,内容由浅入深,层次分明,逻辑性强,书后还附有许多习题,有利于自学。

作者为适应更多读者的需要,没有介绍现代控制理论与矩阵计算方法等,从而使本书不仅适用于高年级大学生与硕士研究生,也适用于具有大学水平,通晓微积分的工程技术人员与科研人员参考。

愿本书的出版能有助于我国供热与空调自动化技术的发展。

清华大学热能系空调教研组张瑞武

1983年6月

符 号 表

符号		单位	最早出现的章节
A	放大系数	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 摄氏度/瓦	5.4.2
A	热敏电阻的阻值系数	Ohms, 欧姆	1.1.3
A	数值常数	—	—
A_v	阀门的流量系数	m^2 ,	2.1.2
a	线性温度膨胀系数	$^{\circ}\text{C}^{-1}$, 1/摄氏度	1.1.1.1
a	安托万(Antoine)公式的系数	—	1.1.1.3
a	电阻温度系数	$^{\circ}\text{C}^{-1}$, 1/摄氏度	1.1.3
B	热敏电阻的特性系数	K,	1.1.3
B	数值常数	—	—
b	宽度	mm, 毫米	1.1.1.1
b	体积温度膨胀系数	$^{\circ}\text{C}^{-1}$, 1/摄氏度	1.1.1.2
b	安托万公式的系数	K,	1.1.1.3
b	数值常数	—	—
C	比热	$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$, 焦耳/公斤·摄氏度	
C_v	阀门的流量系数	—	2.1.2
C	控制变量	$^{\circ}\text{C}$, 摄氏度	5.1
D	微分算符	$S-1$	5.2
$D(s)$	S的分母函数	—	5.3.1
d	直径, 距离	m, 米	—
E	弹性系数	kgf/mm^2 , 公斤力/毫米 ²	1.1.1.1
e	2.71828...	—	—
e	误差信号	—	5.1
$F(s)$	传递函数	—	5.3
Gr	葛拉晓夫数	—	第9个问题
$G(s)$	传递函数	—	5.7
$H(s)$	传递函数	—	5.7
h	迟滞带的宽度	$^{\circ}\text{C}$, 摄氏度	6.1
h	传热系数	$\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, 瓦/米 ² ·摄氏度	5.2
j	$\sqrt{-1}$	—	5.3
K	放大系数	—	5.4.2

续表一

符号		单位	最早出现的章节
Kp	比例放大系数	—	4.3
K_1, K_2, K_3	阀门特性系数	—	2.1.2
K_v	阀门流量系数	—	2.1.2
L	长度	m, 米	1.1.1
L	距离—速度滞后, 纯滞后	S, 秒	5.9.3
LM	对数值	dB, 分贝	5.10.1
$L(s)$	线性传递函数	—	6.3
$L(f(s))$	$f(s)$ 的拉氏变换	—	5.3
$L^{-1}f(s)$	$f(s)$ 的拉氏逆变换	—	5.3
M	幅值比	—	5.10.1
M	矩形波的峰—峰幅值	—	6.2
m	非线性元件的输出变量	—	6.2
$N(s)$	S 的分子函数	—	5.3.1
Nu	努赛尔数	—	第 9 个问题
$N(x)$	描述函数值	—	6.3
P	S 函数的根	S^{-1}	5.3.1
P	压力	Pa, 帕或 mmHg, 毫米水银柱	—
PB	比例带	$^{\circ}\text{C}$, 摄氏度或 %	4.2
Pr	普兰特数	—	第 9 个问题
Q	热流量	W, 瓦	—
q	质量流量	kg/s, 公斤/秒	5.4
$q(t)$	线性元件在阶跃输入信号作用下的响应函数	—	6.2
R	电阻或热阻	Ohms, 欧姆 或 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, 摄氏度/瓦	—
Re	雷诺数	—	第 9 个问题
r	参考输入值, 设定值	—	5.1
r	频率比值	—	5.10.1
s	拉氏算符, $\sigma + j\omega$	S^{-1}	5.3
T	绝对温度	K	—
T	时间常数	S, 秒	5.2
Td	微分作用时间	S, 秒或 min, 分	4.3

续表二

符号		单位	最早出现的章节
T_i	积分作用时间	S, 秒或min, 分	4.3
$T(\omega)$	兹普琴函数	—	6.4.1
t	时间	S, 秒	—
X	正弦波的振幅	—	6.3
x	实数量	—	—
Y	温度控制器的辐射敏感系数	—	2.7
Z	S函数的根	S^{-1}	5.3.1
α	扩散系数	kg/s · Pa, 公斤/秒 · 帕	1.2.1
β	复数的虚部	—	5.10.1
δ	小实数	—	5.8
ζ	阻尼比	—	5.6
θ	温度	°C, 摄氏度	—
π	3.14159...	—	—
ρ	密度	kg/m ³ , 公斤/米 ³	5.2
σ	复数的实部	—	5.3
ϕ	相位差	rad, 弧度或deg, 度	6.3
ω	频率	rad/s, 弧度/秒	5.6
∞	无穷大	—	—

目 录

符号表	(1)
第一章 传感器与测量仪表	(1)
1.1 温度的感测与仪表	(1)
1.1.1 非电测法	(1)
1.1.1.1 固体膨胀式温度计	(2)
1.1.1.2 液体膨胀式温度计	(5)
1.1.1.3 蒸气压力式温度计	(9)
1.1.2 热电偶温度计	(12)
1.1.3 电阻温度计	(17)
1.2 湿度测量	(29)
1.2.1 干湿球湿度计	(30)
1.2.2 非电测型湿度传感器	(32)
1.2.3 电测型湿度传感器	(34)
第二章 应用	(39)
2.1 末端控制元件	(39)
2.1.1 气动与电动执行机构、定位器	(39)
2.1.2 阀门	(43)
2.1.3 风阀	(50)
2.2 家庭采暖的控制	(51)
2.3 锅炉与冷水机组的控制	(52)
2.4 空气调节的控制	(55)
2·4·1 分区	(58)
2·5 太阳能集热器系统的控制	(59)

2.6	建筑物的自动控制系统	(59)
2.7	车间与房间的传递函数	(61)
第三章	控制器的机构与回路	(64)
3.1	气动控制-气源	(64)
3.1.1	连续排气式比例控制器	(65)
3.1.2	不排气式比例控制器	(70)
3.1.3	三作用式气动控制器	(72)
3.2	电动控制器	(76)
3.3	电子式控制器	(80)
3.3.1	用作误差检测器的惠斯顿电桥	(81)
3.3.2	电子式比例控制器	(82)
3.4	位式温度控制器与湿度控制器	(90)
3.5	步进式控制器	(97)
3.6	时间开关	(99)
3.6.1	最佳启动控制器	(101)
3.7	散热器恒温控制阀	(102)
第四章	控制器的特性	(105)
4.1	比例控制器	(105)
4.2	比例控制的静态响应	(110)
4.3	比例、积分和微分作用与三作用控制器	(116)
4.4	连续控制器的稳定度极限	(121)
4.5	控制器参数整定值的经验选择法	(125)
4.6	双位(开/断)控制器	(129)
4.6.1	控制单一时间常数过程的无迟滞温度控制器	(129)
4.6.2	有迟滞的温度控制器	(132)
第五章	线性自动控制的基本理论	(133)
5.1	闭环负反馈控制的介绍	(133)

5.2	描述线性系统的传递函数	(137)
5.3	拉普拉斯变换	(139)
5.3.1	逆变换	(141)
5.3.2	复数零点	(147)
5.3.3	变换定理	(149)
5.4	拉普拉斯变换用于热交换器的分析	(150)
5.4.1	无控制器时热交换器的响应	(153)
5.4.2	有控制器时热交换器的响应	(155)
5.5	一阶阶跃响应	(160)
5.5.1	简单温度计温包的时间常数	(164)
5.6	二阶阶跃响应	(165)
5.6.1	二阶传递函数的动态响应	(167)
5.6.2	放大系数对稳态响应的作用	(171)
5.6.3	二阶阶跃响应过程的特性	(172)
5.7	高阶系统及其稳定性	(178)
5.8	劳斯 (Routh) 准则	(182)
5.9	多项式方程的根	(188)
5.9.1	根轨迹图	(191)
5.9.2	距离-速度滞后与佩德 (Pade) 近似法	(199)
5.10	频率响应图	(203)
5.10.1	伯德 (Bode) 图中渐近线的近似解	(217)
5.11	奈魁斯特 (Nyquist) 判据	(225)
5.11.1	应用伯德图和聂柯尔斯 (Nichols) 图的奈魁斯特判据	(231)
5.11.2	相位与放大系数的裕量	(234)
第六章	非线性系统的分析	(237)
6.1	非线性控制的介绍	(237)
6.2	阶跃响应法	(239)

6.3 描述函数法	(250)
6.3.1 理想继电器	(252)
6.3.2 具有迟滞 h 的继电器	(253)
6.4 兹普琴 (Tsytkin) 法	(255)
6.4.1 开关工作状态	(256)
6.4.2 稳定循环的分析	(257)
6.4.3 由奈魁斯特轨迹 $L(j\omega)$ 构成兹普琴轨迹 $T(\omega)$	(259)
6.4.4 振荡的振幅	(260)
6.5 三种方法的比较	(265)
习题	(267)
附录	(294)
索引 (从略)	
参考文献	(299)

第一章 传感器与测量仪表

1.1 温度的感测与仪表

建筑设备系统中需要控制的主要参数是温度，通常是指通过加热介质来控制的室内空气温度。温度测量有多种多样的方法，但是我们最感兴趣的是那些能产生机械或电气输出信号，而且这些信号可被放大并用于实现控制功能的测量方法以及在显示仪表上给出读数的方法。

为方便起见，一般将温度测量仪表分为两大类：电测类和非电测类。电测法的主要优点在于测量的精确度很高，易于远距离地传送信号并且它们与电子设备的接口也容易解决。非电测法的初投资一般比较低，并且多为自作用式，不需要外部能源，以机械位移力做为输出，因此适用于气动控制系统。

1.1.1 非电测法

利用固体材料的热膨胀特性进行温度测量的方法已应用了很多年。大多数的物质，不论固体或流体，在温度升高时都膨胀。因为这是材料的一种基本特性，所以这种膨胀是一种非常可靠并可预测的现象，不需要任何外界力就可自行表现出来。因此，这种特性用于温度测量是非常合适的。可

借，对大多数材料来讲，这种热膨胀效应是相当小的。因此，有必要设计利用膨胀效应不同的两种材料构成的温度计。用这种方法制成的温度计，其输出可以很大，而且很容易加以利用。

1.1.1.1 固体膨胀式温度计

在不大的温度范围内，绝大多数材料的线性膨胀特性可以用一个简单的方程式来描述，即：

$$L(\theta) = L_0(1 + a\theta) \quad (1.1)$$

式中， $L(\theta)$ = 当温度为 $\theta^\circ\text{C}$ 时的长度；

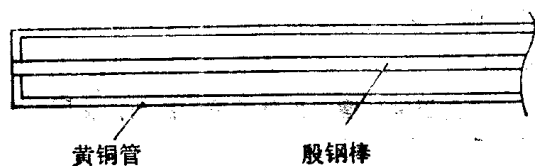
L_0 = 0°C 时的长度；

θ = 温度， $^\circ\text{C}$ ；

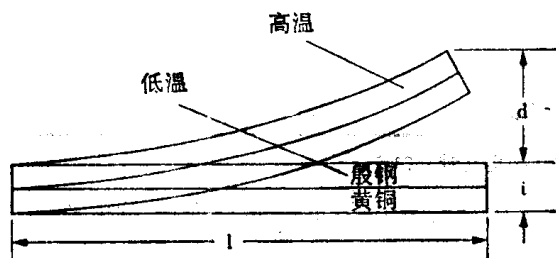
a = 相对 0°C 时的线膨胀温度系数。

在实际应用中，有时不是以 0°C 作为相对的初始温度，因此，专门指明上述公式中的膨胀系数是相对 0°C 而言是很有必要的。对于温度测量仪表，我们主要关心的是金属材料的膨胀特性。在表1.1中，给出了一些金属材料的线膨胀系数的数值。从表中可以看出，系数 a 通常是在 $10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 到 $10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$ 的范围之内。我们考虑一个在 0°C 时精确长度为一米的普通钢杆，当它被加热到 20°C 时，其长度变为 1.00022 米，增加的数值仅约为五分之一毫米。要想在排除测量仪表本身热膨胀所导致的误差的条件下，精确地测量如此微小的变化量，将是非常困难和费钱的。因此，有需要制造一种主要以殷钢为原料的仪表，因为殷钢在高达 100°C 的温度范围之内的线膨胀系数很小。这就启发人们想出，利用具有不同热膨胀系数的两种材料之微差膨胀的方法。这种原理被广泛用于

双金属片及棒状和管状元件之中。图1.1表示出在双金属片及棒状和管状元件中两种金属的安排。上述棒状和管状热元件适于作为传感器插入容器或管道中，去测量其中的流体温度。双金属片依据不同的用途可以作成多种形状，如直的悬臂式、U形、盘旋式或螺旋式，以便分别产生直线运动、角运动或旋转运动来操作电气触点或推动仪表盘上的指针。一



(a)



(b)

图1.1 (a)棒与管状元件；(b)双金属片。

个具有特定尺寸与形状的双金属片的挠曲量或作用力可利用已有的设计公式计算出来。一端被固定的直条式双金属片的自由端的挠曲量 d (毫米)可用下式计算：

$$d = 1.1 K l^2 \Delta \theta / t \quad (1.2)$$

式中, l = 实际长度, 毫米;

t = 厚度, 毫米;

$\Delta\theta$ = 温度的变化值, $^{\circ}\text{C}$;

K = 双金属片的挠曲系数, 毫米/ $^{\circ}\text{C}$ 。

双金属片的挠曲系数是这样定义的: 将一窄条双金属片像横梁那样支架起来, 在挠曲-温度曲线的线性范围内, 温度每变化 1°C , 该片的挠曲量乘以四即为其 K 值。 K 的数值大约在 4×10^{-6} 到 20×10^{-6} 毫米/ $^{\circ}\text{C}$ 的范围内。

表1.1 在正常环境温度下的线膨胀与体膨胀系数

材 料	线膨胀系数 $10^6 \text{ } \alpha / ^{\circ}\text{C}$	材 料	体膨胀系数 $10^6 \text{ } \beta / ^{\circ}\text{C}$
铝	23	乙醇(酒精)	108
铜	16.7	水银	18.1
黄铜(68Cu 32Zn)	18—19	n-戊烷	155
36%镍钢(殷钢)	9—1.5	甲苯	107
不锈钢	16	水	21
碳钢	11	二甲苯	112
玻璃(硼硅酸玻璃)	3.2		

该表摘自文献〔71〕。

双金属片悬臂梁由于不能移动而产生的作用力 P 可用下式表示:

$$P = 1.1KEbt^2\Delta\theta/4l, \text{ 公斤力} \quad (1.3)$$

式中, E = 双金属片的弹性系数, 公斤力/毫米²;

b = 片的宽度, 毫米。

E 的数值大约是在 1.3×10^4 到 2×10^4 公斤力/毫米² 的范围内。

温度的应用范围大约是从 -75°C 至 $+400^{\circ}\text{C}$ 。不过, 有

些双金属片的应用范围要比上述值小。

棒状和管状元件的挠曲的大小仅与两种材料的膨胀系数及其长度有关。这种结构能产生较大的作用力，但挠曲量较小，因此不适用于显示仪表中。通常总要利用杠杆系统放大其位移，以驱动触点的通断或关闭一个气阀。

近年来，出现一种取代双金属片的新方法，它利用的是1958年发现的形状存贮效应。这是一种称为SME黄铜的特殊黄铜合金的特性。当它完全处于马氏体状态时，加在它上面的形变，将随温度在使用范围（约 100°C ）内的升高而逐渐消失。在其温度下降时，其形变再度出现，好像该金属记住了它原有的形状。这种效应能用来产生类似双金属片的那种有用的挠曲与作用力，而且灵活程度更大。

1.1.1.2 液体膨胀式温度计

装在一个有恒定容积的容器中之液体的体积变化，可以用类似于式（1.1）的下式表示：

$$V(\theta) = V_0(1 + b\theta) \quad (1.4)$$

式中， $V(\theta)$ = 在 $\theta^{\circ}\text{C}$ 时的体积；

V_0 = 在 0°C 时的体积；

θ = 温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

b = 相应于 0°C 时的绝对体积膨胀系数， $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

在表1.1中给出了一些液体的 b 值。由该表可以看出，除水和水银外，其他材料的 b 值一般为 $10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 左右，而水和水银的 b 值仅为上述值的大约五分之一。

如果液体是装在一个体积并非恒定不变的容器中，即容器会随着温度的升高而膨胀，那么其中的液体可能出现显著