

热力过程调节器整定计算原理

〔苏联〕 E. II. 斯捷藩尼 著
陈汝钢 吕勇哉 王扬南 译

中国工业出版社

本书可供在工业对象自动调节领域内工作的工程技术人员使用。

书中讨论了确定热力对象和调节器动态特性的方法。叙述了热力过程几种常用调节器的整定计算方法。

本书系由陈汝纲、吕勇哉、王扬南三人集体翻译，其中第一章参考了杨寿彰的译稿。全部译稿曾由齐魏、郭荣江两同志进行了校订。

Е. П. Стефани

**ОСНОВЫ РАСЧЕТА НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Госэнергоиздат, Москва-1960

* * *

热力过程调节器整定计算原理

陈汝纲 吕勇哉 王扬南 译

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张19·插页2·字数384,000

1965年10月北京第一版·1965年10月北京第一次印刷

印数0001—3,210·定价(科六)2.50元

*

统一书号: 15165·4116(水电-553)

序 言

在工业中，工艺过程自动调节正获得越来越广泛的应用。随着应用自动调节器的领域日益扩大，对调节质量的要求也在不断提高。新型大功率机组以及具有高参数和超高参数工质的工艺过程的建成，使得对它们的控制大大地复杂化了。

除了必须建立合理的自动调节系统，改进自动化工具的结构和提高它们的可靠性之外，提高适用于各种调节对象的调节器的动态整定质量具有特殊意义。目前，只有比较少数的人员参加调节器结构的研究及其制造，而广大的工程技术人员都从事于调节器的整定，这种情况使解决整定计算问题的迫切性变得更为明显。因此，如果在整定调节器之前，就能结合具体对象，不单进行有根据的静态计算，而且还对它进行动态计算，则这个问题能够得到圆满解决。

近年来，已出版了大量关于调节理论问题和自动调节系统现代研究方法的书籍。但是，可以毫不夸大地指出，这些显然是较有价值 and 较为重要的专题论文和著作集，对于在动力、化工、冶金及其他工业部门中需要解决生产过程自动化具体问题的广大工程技术人员来说，并非经常都能理解的。并且，现有为数不多的参考书和基于近似方法的调节系统动态整定的一些建议，已经往往不能适应现代的要求了。

本书的目的在于部分地填补上述空白点，并为在自动化领域中工作的工程技术人员系统地介绍应用现代频率法的调节器整定计算原理。为此，本书只用了极少数对于计算所必需的数学工具。一般的方程式和公式的推导是被省略了。如果读者对公式的出处感兴趣的话，可以阅读有关调节理论的著作，以扩大自己的知识。

本书叙述了工艺对象动态特性的各种试验测定方法以及各种特性之间的相互换算方法；简要地介绍了调节系统的基本环节、调节规律和一些已被广泛采用了的调节器的动态特性的基本知识。本书以极大的篇幅直接叙述调节器整定计算的方法。所有的基本原理都用具体实例说明。

作者搜集了以捷尔任斯基命名的全苏热工研究院、中央全盘自动化科学研究院和其他单位的有关著作，以及作者在莫斯科动力学院的讲稿，作为编写本书的基本素材。

如前所述，本书适用于在工业对象自动调节领域内工作的工程技术人员，在一定程度上对高等学校有关自动装置专业的学生也有帮助。

作者对E.Γ.杜特尼柯夫，B.M.鲁辛斯基在审阅原稿时所提出的宝贵意见和建议，谨表示真挚的感谢；并对H.И.达维多夫在校订本书时所付出的巨大劳动表示深切的谢意。

作 者

目 录

序 言

第一章 调节对象动态特性的表示及試驗測定方法	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 对象的微分方程式	1
§ 1-3 時間特性	3
a) 反应曲线	3
b) 脉冲特性	6
c) 方波脉冲特性	8
§ 1-4 頻率特性	8
§ 1-5 对象动态特性的試驗測定方法	14
§ 1-6 試驗測定动态特性的仪器	18
a) 一次仪表 (发送器)	18
b) 记录仪表	19
c) 变换器	20
d) ВТН型正弦波发生器	22
e) 利用ЭПП-09型电子电位計作正弦波发生器	25
e) 射流式压力正弦波发生器	26
ж) 測定次低頻对象动态特性的仪器	29
§ 1-7 試驗的准备和进行	38
a) 試驗裝置的方案选择	38
b) 一次仪表的校驗和静态特性曲线的測定	38
c) 測定对象调节机构的特性曲线	40
d) 进行試驗的一般指示	41
§ 1-8 測定调节对象动态特性的实例	41
a) 根据反应曲线求对象的动态参数	41
b) 根据脉冲特性求对象的动态参数	43
c) 用梯形波周期性扰动确定頻率特性	43
d) 測定方波脉冲特性	46
e) 对閉环自动调节系統用正弦波扰动測定对象的頻率特性	47
第二章 动态特性的轉換	50
§ 2-1 根据微分方程求頻率特性的解析方法	50
§ 2-2 根据微分方程作反应曲线	51
§ 2-3 根据脉冲特性作反应曲线	52
§ 2-4 将反应曲线轉換成幅相特性和广义幅相特性	53
a) 第一种图解解析法	53
b) 第二种图解解析法	55

§ 2-5 确定广义频率特性	68
a) 根据微分方程或传递函数确定广义幅相特性的解析法	68
b) 根据幅相特性确定广义幅相特性的第一种图解解析法	69
c) 从频率特性曲线确定广义频率特性的第二种图解解析法	74
§ 2-6 根据对象的反应曲线求其传递函数	77
a) 概述	77
b) 计算无传递滞后、有自衡对象的步骤	79
c) 计算无传递滞后、无自衡对象的步骤	82
d) 计算有传递滞后的对象的步骤	83
§ 2-7 根据方波脉冲特性作出幅相特性曲线	93
第三章 环节及其组合	97
§ 3-1 概述	97
§ 3-2 基本环节	97
a) 非周期环节 (单容环节)	97
b) 放大环节 (无惯性环节)	99
c) 积分环节	101
d) 滞后环节	103
e) 振荡环节	105
f) 微分环节	107
§ 3-3 检向性环节和非检向性环节	110
§ 3-4 检向性环节的组合同	111
a) 串联	111
b) 并联	112
c) 混联	113
§ 3-5 有反馈环节的回路	114
§ 3-6 用环节组成工艺对象的模型	116
a) 概述	116
b) 无自衡对象的模型	119
c) 有自衡对象的模型	127
第四章 关于调节规律、它们的实现方法以及调节器动态特性的基本概念	137
§ 4-1 常用调节器的调节规律和动态特性	137
a) 比例调节规律 ($\mu = -C_1 \sigma$)	137
b) 积分调节规律 ($\mu' = -C_0 \sigma$)	137
c) 比例-积分调节规律 [$\mu' = -(C_0 \sigma + C_1 \sigma')$]	138
d) 比例-积分-微分调节规律 [$\mu' = -(C_0 \sigma + C_1 \sigma' + C_2 \sigma'')$]	139
e) 比例-微分调节规律 [$\mu = -(C_1 \sigma + C_2 \sigma')$]	140
§ 4-2 利用线性环节实现几种调节规律的方法	142
a) 实现 $\mu = -C_1 \sigma$ 的调节规律	142
b) 实现 $\mu' = -C_0 \sigma$ 的调节规律	142
c) 实现 $\mu' = -(C_0 \sigma + C_1 \sigma')$ 的调节规律	143

2) 实现 $\mu' = -(C_0 \sigma + C_1 \sigma' + C_2 \sigma'')$ 的调节规律	145
3) 实现 $\mu = -(C_1 \sigma + C_2 \sigma')$ 的调节规律	146
§ 4-3 应用带等速伺服机的调节器实现基本调节规律的实例	147
第五章 自动调节器整定参数的计算	167
§ 5-1 问题的提出	167
§ 5-2 应用带等速伺服机的调节器时过渡过程的特征	168
a) 自衡对象的无反馈调节过程	169
6) 无自衡对象的无反馈调节过程	170
e) 刚性反馈调节过程	171
2) 弹性反馈 (重定) 的调节过程	173
d) 调节器具有不灵敏区时的调节过程	176
§ 5-3 自动调节系统稳定性的计算	177
a) 关于调节系统稳定性的基本概念	177
6) 在调节器整定参数空间或特征方程式系数空间划分稳定区域	180
e) 把自动调节系统看作带有反馈环节的闭合回路	181
2) 计算稳定性的解析法	183
d) 在相对坐标图上稳定区域的划分和分析	191
e) 计算稳定性的图解解析法	198
§ 5-4 最佳调节过程的概念	200
§ 5-5 调节器最佳整定计算的解析方法	204
§ 5-6 确定调节器整定参数的计算公式	235
a) 一个整定参数的无差调节器	236
6) 一个整定参数的有差调节器	236
e) 二个整定参数的无差调节器	236
2) 二个整定参数的有差调节器	237
d) 三个整定参数的无差调节器	237
§ 5-7 确定调节器整定参数的图解解析法	242
§ 5-8 利用诺模图确定调节器的整定参数	247
a) 供两个整定参数 (弹性反馈) 调节器用的诺模图	247
6) 供三个整定参数 (惯性反馈) 调节器用的诺模图	251
§ 5-9 调节器整定参数的近似算法	254
§ 5-10 绘制调节系统过渡过程的方法	257
a) 梯形特性法	258
6) 阿庫尔兴 (Акульшин) 法	269
e) 求解闭环调节系统幅相特性的诺模图	273
附录	279

第一章 調節对象動態特性的表示 及試驗測定方法

§ 1-1 概 述

在調節对象中进行的工艺过程，在一般情况下，可以用几个被調量来表征。以鍋炉机組为例，它的被調量是蒸汽压力、溫度和汽包中的水位等等。

鍋炉机組的調節任务通常在于把被調量維持在給定值上，后者确定工艺过程的品质以及鍋炉机組的出力与外界負荷之間相适应的程度。为了維持被調量在給定值上，就必须动作相应的調節机构。例如，当机組負荷变化而引起鍋炉出口的蒸汽压力、溫度和汽包中的水位偏离給定值时，就必须改变燃料供应量，改变流过減溫器的減溫水流量以及改变进入鍋炉汽包的給水量。

一般地说，工业设备是一个具有若干个被調量的复杂对象。一个复杂对象往往可以划分成几个簡單对象（調節区域）。因此，我們以后把“調節对象”这个术语理解为簡單的基本对象，它只用一个被調量来表征，并且只有一个調節机构。

通常把被調量称为对象的“輸出量”，而出現輸出量的地方称为对象的“輸出端”。影响被調量（輸出量）的因素不单纯是来自調節机构的調節作用，而且还有外来的扰动作用。这两者都称为对象的“輸入量”。施加輸入量的地方称为对象的“輸入端”。

如果同一形式的扰动（如阶跃扰动）加到一些“輸入端”而引起不同的过渡过程，則这些“輸入端”是不相同的。几个“輸出端”可以处在同一个几何位置上（例如鍋炉机組出口处的过热蒸汽压力和溫度）。

調節对象的动态特性象調節系統中其他元件一样可以用不同的形式来表示。在这一章里将指出动态特性用微分方程、時間特性和頻率特性等形式表示的方法，以及这些特性的試驗測定方法^①。

§ 1-2 对象的微分方程式

在很多情况下，調節对象的动态特性可以写成表征輸入量与輸出量之間的函数关系的线性微分方程。微分方程式是根据确定对象暫态过程的物理定律列出的。适用于这些实际情况的相应物理定律的数学表达式就是所研究对象的原始微分方程式。

我們以图1-1,a所示的最簡單对象为例來說明微分方程的写法。

假定每秒钟流入容器的水为 Q_1 容积单位，流出容器的水为 Q_2 容积单位。

引入下列符号：

Δh ——水位对給定值的偏差；

① 这里所指的是能够用常系数线性微分方程式来描述的調節对象。

F ——容器的横截面积。

对象的平衡状态的特征是进水量和出水量相等，即

$$Q_{10} - Q_{20} = 0 \text{①}, \quad (1-1)$$

以及水位对给定值没有偏差($\Delta h = 0$)。

在进水量或出水量改变时，容器中的水位也将改变。

若令

$$Q_1 = Q_{10} + \Delta Q_1 \quad (1-2)$$

和

$$Q_2 = Q_{20} + \Delta Q_2, \quad (1-3)$$

则

$$Q_1 - Q_2 = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 = F \frac{d(\Delta h)}{dt}. \quad (1-4)$$

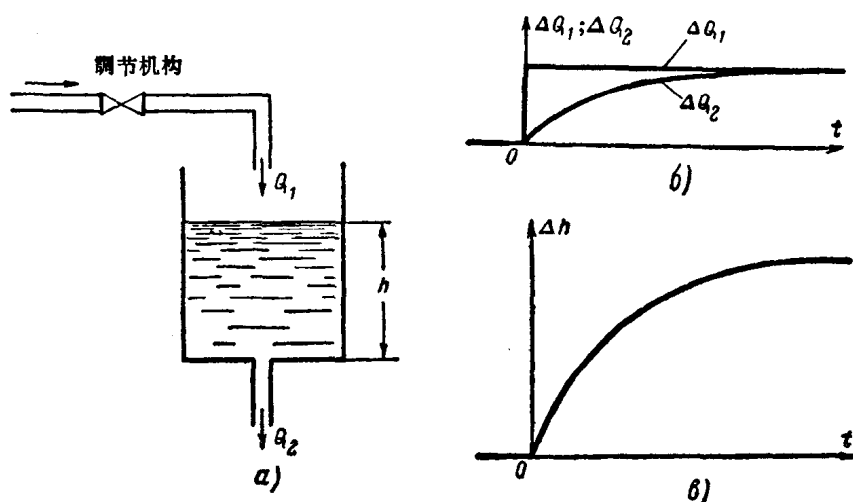


图 1-1 自衡对象的模型及其特性

在这个例子中，出水量是水位的函数：

$$Q_2 = f(h). \quad (1-5)$$

若 Δh 很小，则按一次近似可以认为：

$$\Delta Q_2 = a \Delta h, \quad (1-6)$$

式中 $a = \frac{dQ_2}{dh}$ ——常数②。

这样，方程 (1-4) 可以写成：

$$F \frac{d(\Delta h)}{dt} + a \Delta h = \Delta Q_1. \quad (1-7)$$

以后，我们采用下面的通用符号：

$\Delta h = \sigma$ ——被调量对于给定值的瞬时偏差；

$\Delta Q_1 = \lambda$ ——进水量的瞬时变化。

这时，方程 (1-7) 可以表示为：

① Q_1 和 Q_2 的下角标注 0，表示进水量与出水量之间相等，是发生在 $\Delta h = 0$ 时的意思。

② 严格说来，系数 a 是水位的函数，但当水位偏离给定值的偏差很小时可以认为它是常数。

$$T\sigma' + \sigma = k\lambda, \quad (1-8)$$

式中 $T = \frac{F}{a}$ ——时间常数, 秒;

$k = \frac{1}{a}$ ——对象的放大系数(在单位阶跃扰动^①作用下被调量在新的稳定状态下的偏差)。

在文献中, 这种最简单对象的微分方程也被写成另一种形式:

$$\sigma' + \varepsilon\rho\sigma = \varepsilon\lambda, \quad (1-9)$$

式中 $\rho = \frac{1}{k}$ ——对象的自衡系数;

$\varepsilon = \frac{1}{\rho T}$ ——反应速度(其数值等于在单位阶跃扰动^①作用下, 被调量的最大初始变化速度)。

借助微分方程式来确定对象的动态特性, 只有对比较简单的对象才是有效的。一般说来, 只有在极少数的情况下, 才能花费不多的时间组成足够准确的微分方程式。因此, 确定对象动态特性的纯粹解析方法, 在工程实践中至今还没有得到广泛应用。

§ 1-3 时 间 特 性

a) 反 应 曲 线

反应^②(特性)曲线反映着对象在受到阶跃扰动作用后被调量随时间变化的情况。它给出在对象中所进行的过渡过程特点的直观概念。

作为例子, 我们研究一些用反应曲线表示的最简单调节对象的典型动态特性。

我们重新研究图1-1, a所示的对象。当用调节机构产生扰动之后(图1-1, б), 水位立刻开始上升。但是由于水柱静压头的增加, 容器的出水量也将增加, 这就使进水量与出水量之间的差额不断地减小。因而, 水位上升的速度同时也相应地减小(图1-1, в), 当出水量重新等于进水量时, 水位上升立即停止; 对象进入了新的平衡状态。比较扰动作用前和过渡过程结束后两个平衡状态, 很容易看出新平衡状态的特点是进水量和出水量都增大了, 水位(被调量)也具有新的数值。调节对象依靠被调量的偏差来恢复被破坏了平衡状态的性质, 称为自平衡能力(自调节能力)。

这样一来, 上述调节对象具有下列动态特征:

a) 调节对象一受到扰动, 被调量立刻开始变化;

б) 在受到阶跃扰动作用后, 被调量的变化速度不断减小, 由此, 被调量变化是有限的, 会达到相当于新的平衡状态的常数值。

① 单位阶跃扰动是指幅值等于1的阶跃扰动。——校者注

② 原文Paspon的詞义是加快、加速。我国动力工程界, 长期以来均譯成“飞升”, 因此“飞升曲线”的术语延用已久。实际上, “飞升曲线”的基本概念是表示对象受到阶跃扰动作用后, 被调量随着时间变化的情况, 并没有“飞升”的含义。因此, 譯成“反应”比较恰当。此外, 这种曲线, 在英美著作中确实也称为“反应(Response)曲线”。——譯、校者注

让我们进一步来研究一个类似的对象，它与前述对象唯一的不同的不是水不象第一种情况那样从容器中自由地流出，而是用泵抽出的（图1-2, a）。

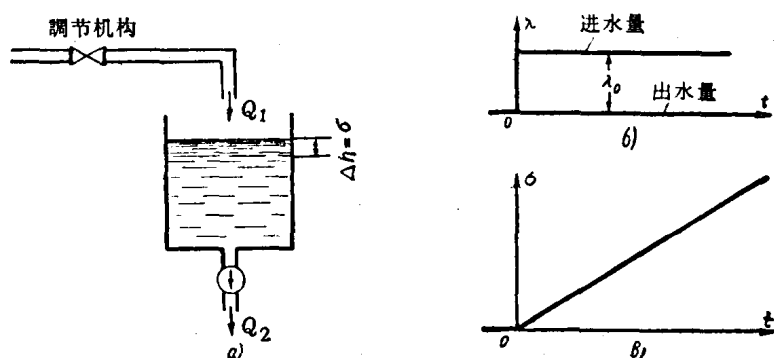


图 1-2 无自衡对象的模型及其特性

由于进入容器的水量与出水量之间的相应关系被破坏，水位就会偏离给定值。对调节机构施加作用，可以改变水位。假定在 $t=0$ 以前，容器中单位时间内的进水量和出水量相等，此时水位不变，而且相对于给定值的偏差为零：

$$\Delta h = \sigma = 0 \text{ (当 } t \leq 0 \text{ 时)}.$$

在 $t=0$ 的瞬间，把调节机构迅速地改变到另一个位置，相应增加了进水量。由此所产生的进水量与出水量的不平衡量用 λ_0 来表示。

由于阶跃扰动（如图1-2, b的曲线所示）的结果，水位（被调量）立刻开始以等速度变化（图1-2, c）。显然，在出水量为常数的情况下，水箱本身没有原因可以使水位停止增长（如果调节机构的位置保持不变）。因此扰动越大，容器截面积越小，水位上升速度就越快。

这样，这种简单调节对象便以下列动态特性作为特征：

a) 调节对象一旦受到扰动被调量就立刻开始变化；

b) 在受到恒定的阶跃扰动后，被调量以等速度无限制地一直变化下去①。

我们再来研究一个例子（图1-3）。调节机构改变进入戽斗式运输机的水流量。运输机是连续运动着的挠性传送带1，在它上面装着许多戽斗2。传送带由电动机3带动。当相应的戽斗运动到落水漏斗4的上面时，就把水倒入漏斗。当用调节机构产生一个恒定的阶跃扰动的时候（图1-3, b），容器的进水量并不立即改变，而要经过一段滞后时间 τ 。滞后时间 τ 决定于传送距离 l 和戽斗运输机传送带的运动速度 v ：

$$\tau = \frac{l}{v}.$$

经过时间 τ 之后，容器中的水位才开始变化，之后的变化规律和第一个例子完全相同。

存在滞后时间 τ 是许多工业对象极其重要的特点，在后面我们将要指出，它非常有害

① 当然，这里是把容器高度看成无限的。

地影响到自动调节的品质。

于是, 这种对象的特征是:

a) 被调量的变化不是在扰动作用后立即发生, 而是要经过一段滞后时间 τ ;

b) 在扰动作用后, 被调量的变化以不断减慢的速度进行, 因而被调量不会无限地变化下去, 而会趋向一个新的平衡值。

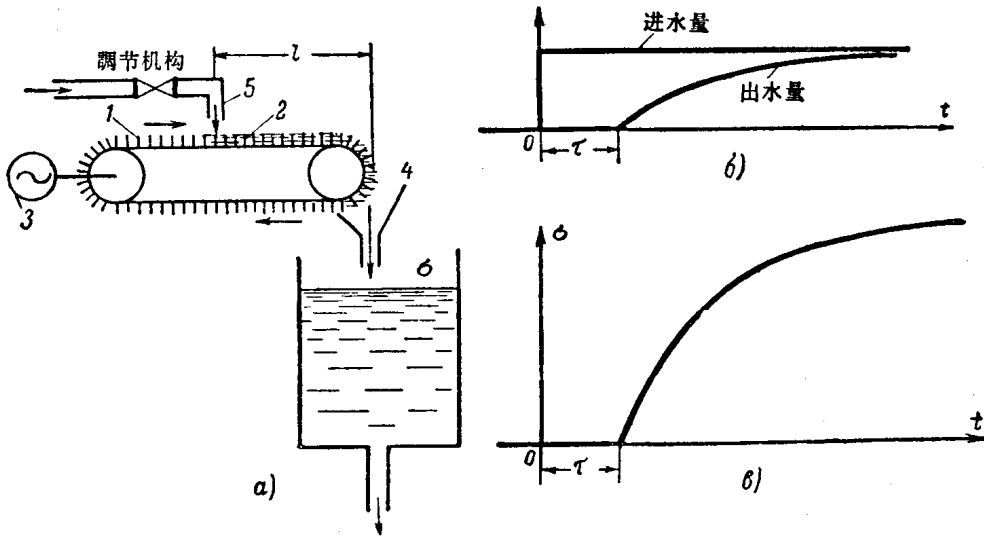


图 1-3 具有传递滞后的对象模型及其特性

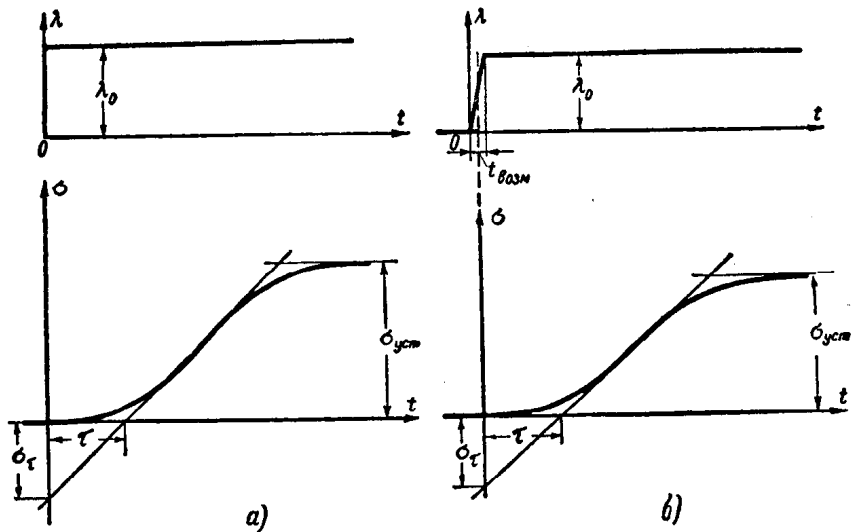


图 1-4 根据反应曲线求动态参数

一般说来, 工业调节对象的反应曲线和上述最简单对象的反应曲线不同。图 1-4 为试验测得的有自衡的复杂热力对象的典型反应曲线。为了近似计算具有这种反应曲线的对象动态特性, 可以利用前面讲过的动态参数 ε 、 ρ 和 τ 的概念, 在这种情况下, 可由下述方法来确定这些动态参数 (图 1-4, a)。

在被调量变化曲线最陡的部分作一切线, 它的斜率表征反应速度;

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{\tau}}{\lambda_0 \tau} \frac{[\text{被調量的測量單位}]}{[\text{扰动量的測量單位} \times \text{秒}]} \quad (1-10)$$

从阶跃扰动开始的瞬間^①起到切线与横坐标軸的交点之間所夹的这一段线段，确定了滞后時間 τ 。

自衡系数按下式計算：

$$\rho = \frac{\lambda_0}{\sigma_{ycr}} \frac{[\text{扰动單位}]}{[\text{被調量單位}]} \quad (1-11)$$

諸如大气压（对于压力量）， $^{\circ}\text{C}$ （对于溫度量），毫米（对于水位量）等物理量单位，或者与被調量物理本质无关、由測量被調量的一次仪表附带的变换器輸出的冲量等測量单位（对于电气变换器來說是毫伏、毫安等），都可以作为 σ 的度量单位；最后，也可以采用无因次单位（ σ 与被調量的某个固定数值相比，得无因次的相对单位）^②。

扰动可以用伺服机的行程，調节机构的行程，或者用通过調节机构的介质流量的变化等方法来表示；也可以用这些量的偏差相对值来表示（例如，把上述有关各量分別除以伺服机的最大行程，調节閥的最大开度或介质的最大流量等）。

在以后将要指出如何利用动态参数 ε 、 ρ 和 τ 进行自动調节器的近似整定計算。

用調节机构产生扰动，通常要在一段時間之內才能完成。因此，这种扰动就不能认为是阶跃形式的，它要延长一定的時間 t_{osm} （图1-4， δ ）。計算表明，若 t_{osm} 小于滞后時間 τ ^③ 时，只要有条件地把時間坐标从扰动時間的中点算起，就可以从所得的特性曲线上求得在实际上已足够准确的对象动态参数。

6) 脉 冲 特 性

在試驗条件下，往往不可能在保証被調量变化足够大的扰动持續作用下求出反应曲线，这是因为工艺过程的条件对被調量的最大偏差有一定的限制。在这种情况下，对象的动态特性可以用短時間的扰动 λ 所引起的被調量 σ 随着時間变化的曲线来表示。这种过渡过程的曲线称为脉冲特性^④。

图1-5， a 是自衡对象在脉冲扰动作用下被調量的变化曲线，而图1-5， b 是无自衡对象在脉冲扰动作用下被調量的变化曲线。

根据脉冲特性曲线可以用下列公式求出表征对象动态特性的参数，

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{\text{макс.и мин}}}{F_{\lambda}} \quad (1-12)$$

和

$$\rho = \frac{F_{\lambda}}{F_{\sigma}} \quad (1-13)$$

- 在图1-4中即坐标原点。——譯者注
- 該固有值可以是压力、溫度或液位等，但 σ 往往取成被調量的瞬时偏差值与最大值之比值，即 σ 取成相对单位，因此可以是无因次的单位。采用相对单位的变量組成无因次的动态方程，其最大的优点是动态分析結果帶有普遍意义，并且可以簡化运算，因此得到普遍应用；其最大的缺点是物理概念不明确，无法应用量綱分析来檢驗运算結果的正确性。——校者注
- t_{osm} 和 τ 在实验結束并且处理数据以后才能比較。
- 这种方法是由 И.И. 达維多夫和 Е.Н. 謝尔盖也夫斯卡娅 (ВТИ) 提出的，刊在 Известия ВТИ, 1953, №5 上。

式中 $\sigma_{\text{макс.у.мн}}$ ——被調量的最大偏差;

$F_{\lambda} = \int_0^{\infty} \lambda dt$ ——扰动变化曲线与横軸所夹的面积;

$F_{\sigma} = \int_0^{\infty} \sigma dt$ ——被調量变化曲线与横軸所夹的面积。

从脉冲扰动起点到在脉冲特性曲线上分割两块相等面积 F_1 和 F_2 (标有横的阴影线部分) 的垂直线在横軸上所截的距离便确定了滞后時間 τ 。

为了得到足够大的 $\sigma_{\text{макс.у.мн}}$ 和 F_{σ} 的值, 必須給一个較大的脉冲扰动。实际上, 这是用增大扰动的持續時間来达成的, 因此, 会引起脉冲特性一定程度的失真 (图 1-5, θ 和 δ)。扰动時間 $t_{\text{осм.у.мн}}$ 越短, 測得的特性越接近真实的脉冲特性。

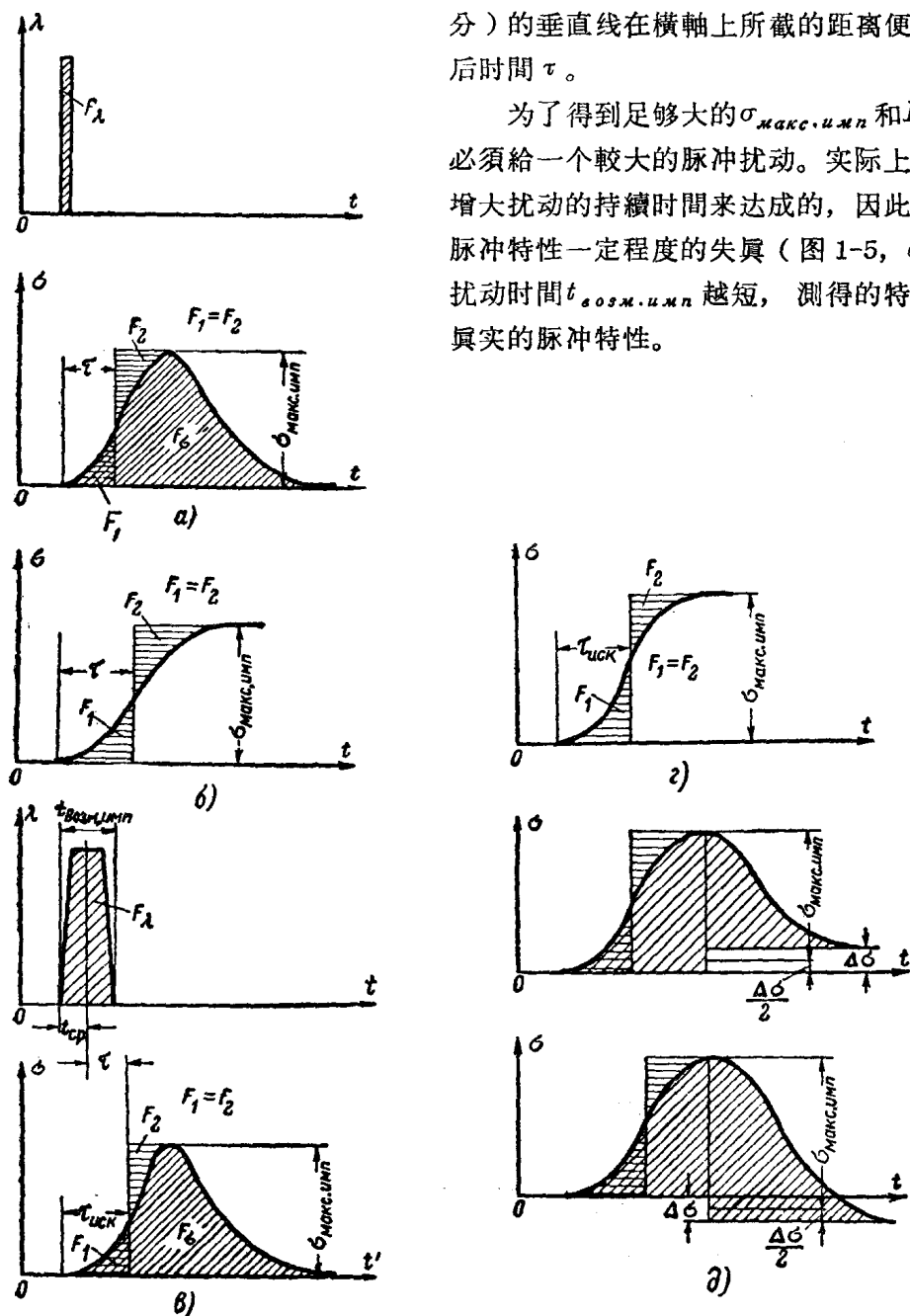


图 1-5 对象的脉冲特性

如果扰动持续时间小于滞后时间 ($t_{\text{доп.узн}} < \tau$)，则对象的动态参数 ε 、 ρ 和 τ 仍旧可从曲线上求得，并具有适用的准确度。这时，实际测得的脉冲特性象理想情况一样整理，然而滞后时间要另外计算：

$$\tau = \tau_{\text{узн}} - t_{\text{ср}}, \quad (1-14)$$

式中 $t_{\text{ср}}$ ——从脉冲扰动起点到中点的时间。

对于对称的脉冲扰动，扰动中点就与它的几何中心线重合。

计算表明，用上述推荐的公式确定典型热力对象的动态参数 ε 、 ρ 和 τ 并满足 $t_{\text{доп.узн}} < \tau$ 的条件时，误差不超过10%。

有时候，在测定自衡对象的脉冲特性时，在试验结束后，被调量并不回到初始值。这是因为在试验过程中除了人为造成的脉冲扰动之外，在运行上还会产生偶然的不消失扰动。所以说，试验结果不能认为是绝对准确的，如果被调量的初始值和终值的差值超过被调量最大偏差的20%时，则试验应该重做。如果所指出的两者之间的差值没有超过20%，那么建议按图1-5, ∂ 所示的处理方法来近似地计算参数 τ ， $\sigma_{\text{макс.узн}}$ 和 F_{σ} 。

в) 方波脉冲特性

当被调量不允许在一段很长的时间内出现较大偏差的情况下，方波脉冲特性法^①也象脉冲特性法一样获得应用。在测定方波脉冲特性时，调节对象处在过渡工况的时间较短。

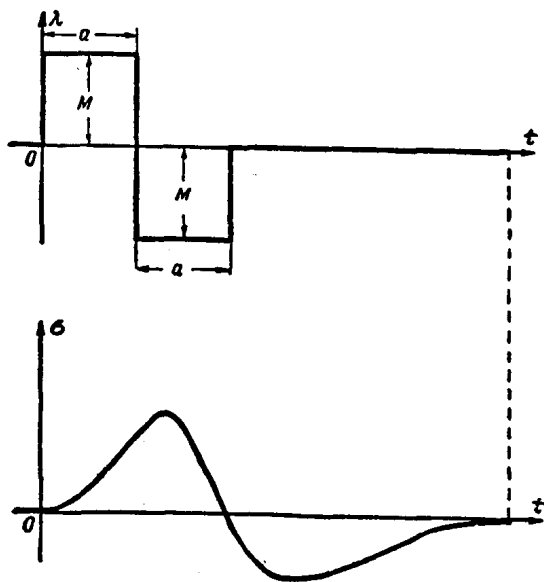


图 1-6 方波脉冲特性

因此，比起测定反应曲线的试验来说，可以较大地增加扰动的幅值 M (图1-6)。

与前述的几种时间特性不同，为了确定对象的动态特性，方波脉冲特性要用另一种方法进行“处理”，也就是说，试验测定的方波脉冲特性可以用来作为求出频率特性的原始数据。

在第二章里，将介绍利用对象的方波脉冲特性来求出调节对象的幅相特性的方法。

脉冲宽度 a 的选择 (图1-6) 放在后面 (§ 1-8) 说明。这里仅适当地指出，为了在整个频率范围内足够准确地确定频率特性，应该用不同的 a 值多做几次试验。

§ 1-4 频率特性

频率特性也和时间特性一样，可以单值地决定调节对象的动态特性，因此它可以用来

① 见 B.M. 鲁辛斯基的论文，1956。

作为进一步研究的原始资料。目前，借助频率特性来确定调节系统元件特性的方法，正在得到越来越广泛的应用。

假定，在自衡对象的输入端加上一个周期性（例如，正弦波）的振荡：

$$\lambda = \lambda_0 \sin \omega_1 t, \quad (1-15)$$

其频率为 ω_1 ，振幅为 λ_0 （图1-7，a）。

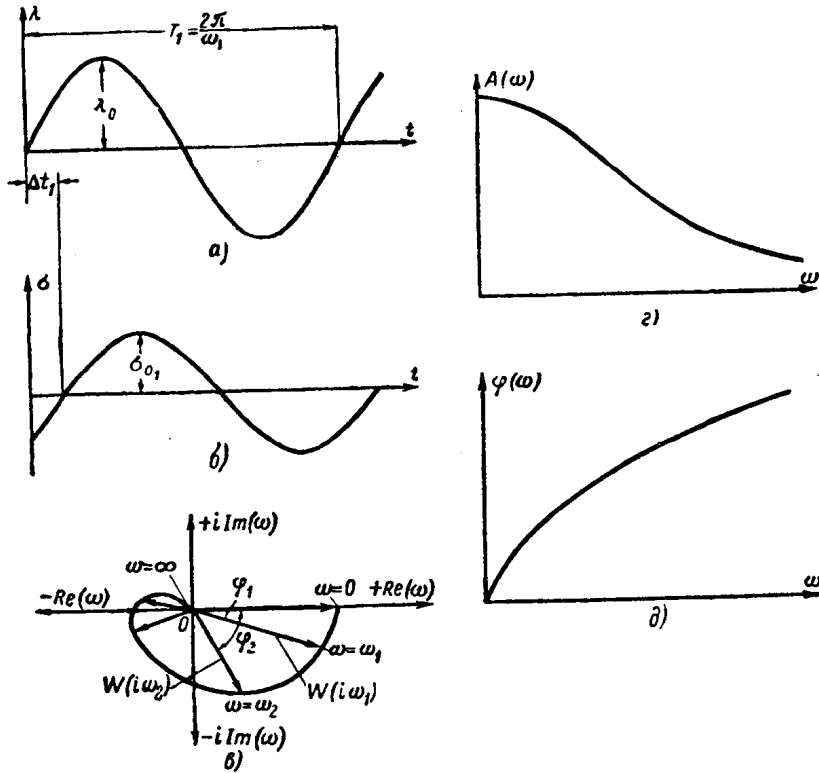


图 1-7 对象的频率特性

经过足够长的时间之后，建立了被调量的强制振荡，它的频率与 ω_1 相同，但振幅 λ 和相位则与输入的振荡量不同（图1-7，b）：

$$\sigma = (\sigma_0)_1 \sin(\omega_1 t - \varphi_1) \quad (1-16)$$

被调量振荡的振幅 $(\sigma_0)_1$ 和相位差 φ_1 决定于对象的性质、输入振荡的振幅^①和频率。

φ_1 前面的负号表示在实际的热力对象中，被调量 σ 在相位上总是落后于扰动作用的振荡 λ 。

被调量 σ 和扰动量 λ 的振荡之间的相位差 φ_1 对应着一个时间差距 Δt_1 （图1-7，a），两者之间有下列关系：

$$\varphi_1 = \omega_1 \Delta t_1 = \frac{2\pi}{T_1} \Delta t_1 \quad (1-17)$$

式中 T_1 ——振荡周期。

① 相位差与输入振荡的振幅是无关的。——译者注

輸入量和輸出量的振蕩可以写成复数形式:

$$\lambda = \lambda_0 e^{i\omega_1 t}; \quad (1-18)$$

$$\sigma = (\sigma_0)_1 e^{i\omega_1 t} e^{-i\varphi_1}. \quad (1-19)$$

以式(1-18)除式(1-19)可得:

$$W(i\omega_1) = \frac{(\sigma_0)_1 e^{i\omega_1 t} e^{-i\varphi_1}}{\lambda_0 e^{i\omega_1 t}} = \frac{(\sigma_0)_1}{\lambda_0} e^{-i\varphi_1}. \quad (1-20)$$

所得之商 $W(i\omega_1)$ 是在复变量平面上的一个矢量, 它的模是 $\frac{(\sigma_0)_1}{\lambda_0}$, 幅角(矢量和实軸之間的夹角)是 φ_1 (图1-7, σ)。

如果不改变扰动振蕩的振幅而只改变它的频率, 即:

$$\lambda = \lambda_0 e^{i\omega_2 t},$$

那末在过渡工况结束后, 重新建立了频率为 ω_2 的被調量振蕩, 但具有不同的振幅和相位:

$$\sigma = (\sigma_0)_2 e^{i\omega_2 t} e^{-i\varphi_2}.$$

这时, 将輸出量与輸入量相除所得的商

$$W(i\omega_2) = \frac{(\sigma_0)_2 e^{i\omega_2 t} e^{-i\varphi_2}}{\lambda_0 e^{i\omega_2 t}} = \frac{(\sigma_0)_2}{\lambda_0} e^{-i\varphi_2} \quad (1-21)$$

乃是在复平面上第二个矢量(图1-7, σ), 其模为 $\frac{(\sigma_0)_2}{\lambda_0}$, 而幅角为 φ_2 。

如果使频率 ω 从 0 变到 ∞ , 那末 $W(i\omega)$ 的矢端将在复平面上連續地画出一条曲线, 这条曲线称为該对象的幅相特性曲线:

$$W(i\omega) = A(\omega) e^{i\varphi(\omega)}. \quad (1-22)$$

关系式 $A(\omega)$ 表示当对象輸入端受到振幅为 1 的正弦扰动时, 其輸出端的强制振蕩的振幅随着频率起怎样变化的函数关系, 称它为幅频特性(图1-7, α)。

关系式 $\varphi(\omega)$ 表示輸出强制振蕩的相位与加在对象輸入端的諧波振蕩相位之差如何随着频率变化的函数关系, 称它为相频特性(图1-7, δ)。

热力对象对于高频振蕩显示出良好的“滤波”性能。每一个对象都存在一个最大的极限频率, 即所謂“截止”频率, 在这个频率下, 被調量的振幅小到使测量仪表无法感受到。

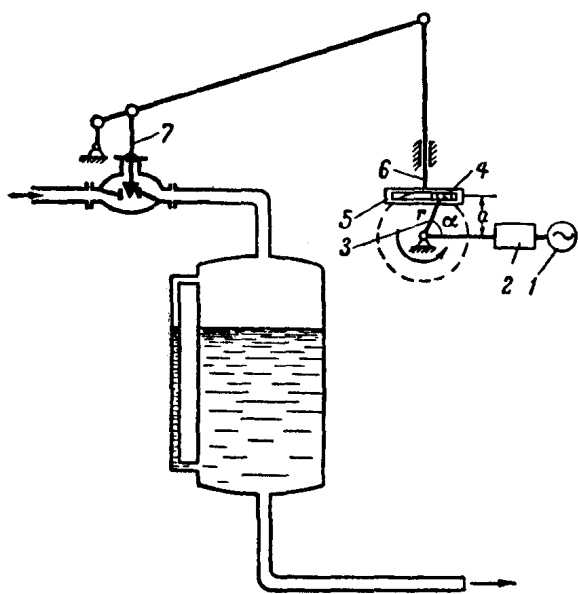


图 1-8 例1-1中的实验装置系统

例1-1 作出图1-8所示对象的幅相特性。容器中的水位变化由玻璃水位計讀出。扰动的来源是由与正弦波发生器相联接的节流閥产生的。电动机 1 通过減速箱 2 連續地使曲柄 3 轉动。在横构件 5 的槽中滑动的滑块 4 和曲柄 3 轉动接合, 使得当曲柄 3 匀速轉动时, 横构件 5 連同与其刚性连接着的拉杆 6 将

在图面的平面上作出正弦振荡:

$$a = r \sin \alpha = r \sin \omega t,$$

式中 r —— 曲柄长度;

α —— 曲柄和水平线之间的夹角。

拉杆 6 与阀杆 7 转动连接。因此, 调节机构同样按照正弦波的变化规律●改变进入容器的水量。振荡频率可以用更换减速箱的齿轮来改变, 而振幅则通过调整曲柄 3 的长度来改变。

假设, 对象处在平衡状态 ($\sigma=0$), 这时进水量和出水量均等于 20 吨/时。曲柄 3 的长度 r 调整得使横构件 5 在最高和最低位置时, 通过调节机构的进水量分别为 30 吨/时和 10 吨/时。此时, $\lambda_0=10$ 吨/时。

试验在 $\omega_1=0.001$ /秒, $\omega_2=0.002$ /秒, $\omega_3=0.004$ /秒, $\omega_4=0.008$ /秒等四个频率下进行。

试验结果整理成扰动量 λ 和被调量 σ 随时间变化的曲线, 如图 1-9 所示。由图 1-9, α 可见, 在低频时 ($\omega_1=0.001$ /秒), 水位随着进水量变化在时间上滞后 $\Delta t_1=460$ 秒, 或 $\varphi_1=25^\circ$, 这相当于振荡周期的 7% ($T_1=\frac{2\pi}{\omega_1}=6280$ 秒)。

随着振荡频率的增加, 相对滞后的数值也随之增加, 当频率 $\omega_4=0.008$ /秒时 (图 1-9, ϵ), 时间差距相当于振荡周期的 21%。换句话说, 相位差几乎达到了四分之一周期 ($\varphi_4=76^\circ$)。

在相位差随着频率提高而增大的同时, 水位振荡的振幅却不断减小, 尽管这时调节机构的振幅并未改变。当频率 $\omega_1=0.001$ /秒时, 被调量的振幅 $(\sigma_0)_1=44$ 厘米; 而在 $\omega_4=0.008$ /秒时, $(\sigma_0)_4=12$ 厘米。

试验的结果列于表 1-1 中。

表 1-1

试验序号	频率 ω (1/秒)	$A(\omega)=\frac{\sigma_0}{\lambda_0}$ (厘米/吨/时)	时间差距 Δt (秒)	$\varphi(\omega)=\frac{360^\circ}{T}\Delta t$ (度)
1	0.001	4.4	460	26
2	0.002	3.6	395	45
3	0.004	2.2	277	63
4	0.008	1.2	166	76

幅频特性 $A(\omega)$ 如图 1-10 所示。在 $\omega=0$ 时, 它的值 $A(\omega_0)=\frac{\sigma_{y_{ss}}}{\lambda_0}=\frac{1}{\rho}$ 是从测得的反应曲线上求得的:

$$A(\omega_0)=\frac{\sigma_{y_{ss}}}{\lambda_0}=\frac{50}{10}=5 \frac{\text{厘米}}{\text{吨/时}}。$$

在图 1-10, α 上可以看出, 函数 $A(\omega)$ 是频率的单调递减函数, 随着 ω 的增大而趋向于零。

由图 1-10, ϵ 所示的相频特性 $\varphi(\omega)$ 看出, 随着 ω 的增大, 被调量 σ 的振荡滞后于扰动量 λ 振荡的相位移 φ 不断地增加。

图 1-10, ϵ 是所研究对象的幅相特性 $W(i\omega)$ 。

在某些情况下, 在测定幅相特性曲线时, 无法得到输入量和输出量精确的正弦振荡。特别由于调节机构的非线性特性, 可能引起波形的畸变。但是这种波形的畸变, 不会破坏

● 在测定阀门特性时, 已建立了通过阀门的水流量与阀杆位移之间的线性关系。