自动装置元件及其动态特性

[苏] А·И·塔纳塔尔著　张守田译

国防工业出版社

自动装置元件及其动态特性

〔苏〕A. И. 塔纳塔尔 著
张守田 译

国防工業出版社

内容简介

本书重点介绍了自动装置元件的动态特性。书中叙述了与动态特性有关的一些基本概念，并分别对各种元件（包括测量、变换、校正、受感和传感元件、放大器及执行机构等）给出了原理图（电气的和结构的）、输入量和输出量、微分方程、传递函数以及各种动态参数的计算公式。

本书可供从事自动装置研究和设计的工程技术人员参考，对有关工业院校相应专业的师生亦有裨益。

ЭЛЕМЕНТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ И ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

А. И. Танатар

Издательство «Техніка» Киев—1975

自动装置元件及其动态特性

张守田 译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

上海商务印刷厂排版　　国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32　印张 7 13/16　171 千字

1980 年 2 月第一版　1980 年 2 月第一次印刷　印数: 00,001—16,000 册

统一书号: 15034·1863　　定价: 0.82 元

译者的话

在自动调整系统的设计过程中，除了首先对调整对象的静态、动态特性进行分析并提出需要达到的性能指标之外，余下的全部工作就几乎都在于选择并确定构成自动调整系统的元件。因为一旦整个系统每一个环节的元件都已确定，那么设计工作也就差不多全部完成了。

为了达到满意的结果，选定元件的工作总是要经过多次反复才能完成的，而每选择一个元件，首先要考虑的就是它的动态特性(传递函数、放大系数、时间常数以及衰减系数等)。

由于自动化技术的迅速发展，自动装置元件的种类和数量日益繁多，要想记住它们的传递函数及所有动态参数，实际上是很困难的。而与此有关的数据资料大都散落于各种书籍、论文、研究报告和技术总结中，查找起来也很困难。因此，从事自动装置设计和各种工艺过程自动化研究工作的人员，都要在确定自动装置元件动态特性的工作上化费大量的时间。为了多快好省地进行设计工作，就希望有一个类似手册性的东西能随时查找。本书在某种程度上是可以起到这种手册的作用的。在阐述了与自动装置元件动态特性有关的一些基本概念(包括元件动态方程的列写方法、动态参数的计算以及用实验方法根据元件的过渡特性和频率特性确定元件的动态参数)之后，书中收集汇编了500多种不同类型的自动装置元件，分别给出了元件的原理图(电气的和结构的)、输入量和输出量、传递函数、放大系数、时间常数以及衰减系数等。书中

元件所涉及的范围是相当广泛的。绝大多数元件的动态参数都以表格的形式汇集在一起，这样既简单明了，查找方便，又便于读者在选择元件时对不同元件的动态参数进行比较。

尽管本书包罗了各种类型的自动装置元件，但由于书中主要介绍的是元件的动态特性，而对元件的结构和制造工艺很少涉及，并且对某些元件、参量的介绍使人感到过于简单，这可能是本书的不足之处。

在翻译过程中，对某些技术性错误作了更正。但由于译者水平所限，书中可能仍有不少错误及不妥之处，热忱希望读者批评指正。

为便于读者查阅，特增添《国际单位简介》作为本书附录。

目　　录

第一章　自动调整系统元件动态特性的定义

在研究自动调整系统时，不论是在稳态下还是在过渡状态下，都必须得出输入量(x_{BX})和输出量($x_{BЫX}$)之间的数学关系。关系式

$$x_{BЫX}=f(x_{BX}) \tag{1}$$

在稳态下称为静态方程。通常，静态方程是一个代数方程。

在过渡过程时间内，输入量和输出量之间的关系是由微分方程或积分微分方程来描述的，这一类方程称为动态方程。

§1　自动调整系统元件的静态特性曲线

在稳态下，以图表表示自动调整系统元件输入量(x_{BX})和输出量($x_{BЫX}$)之间的关系时，这种图表就叫做这个元件的静态特性曲线。把对元件施加的作用理解为输入量，而把元件输出端上的量值理解为输出量。

在自动调整系统中所应用的元件，都是具有所谓的"检波性质"的。这意思就是说：系统中每一个后面的元件都不对它前面的元件产生反作用(信号只能单方向地由一个元件向另一个元件传递)。电子管可以做为"检波元件"的一个例子，它的输入量是加在其栅极上的电压，而输出量则是其阳极电流。再比如测速发电机，其输入量是旋转轴的角速度，而输出量则是电枢上的电压；对于热电偶来说，输入量是热端和冷端的温

度差，而输出量则是热电动势的大小。绝大多数的元件都只具有一个输入量和一个输出量。

如果函数 $f(x_{\text{вх}})$ 及其导数在所有的点上都是连续的，则这样的特性曲线称为"解析的"，在图表上，它可以用一条光滑的曲线来表示。

方程

$$x_{\text{вых}} = a_0 + K x_{\text{вх}} \tag{2}$$

称为线性静态方程(其中 a_0 和 K 都是常数)。通常，这一方程不是通过输入量和输出量的绝对值而是用其离开初始值 $x_{\text{вх}_0}$ 和 $x_{\text{вых}_0}$ 的某些偏差值来表达的，在这种情况下，方程(2)可以写成

$$\Delta x_{\text{вых}} = K \Delta x_{\text{вх}} \tag{3}$$

式中

$$\Delta x_{\text{вых}} = x_{\text{вых}} - x_{\text{вых}_0}$$

$$\Delta x_{\text{вх}} = x_{\text{вх}} - x_{\text{вх}_0}$$

方程(3)中的比例系数 K 是输出值的增量与输入值的增量之比，称之为静态特性曲线的斜率或变换系数、传输常数，也叫放大系数。

§2 元件方程的线性化

在自动调整系统里所应用的元件中，静态特性曲线大多数都不是线性的。而对线性系统进行理论分析比对非线性系统的分析简单得多。因此，通常都要把元件的非线性特性曲线进行线性化。在这种情况下，一般认为在调整过程中系统所处的状态与平衡状态的数值仅具有很小的偏差[42]。

在进行线性化时，把静态特性曲线上与自动调整系统稳态工作相对应的那一点附近的一段曲线，用通过该点的切线

段来代替。

为了使各单独元件特性曲线的线性化不给计算带来严重的错误，线性化是否可行是必须加以证实的。只有在下述条件下，实行线性化才是可行的，这些条件是函数 $x_{\text{вых}}=f(x_{\text{вх}})$ 及其导数应该是连续的，同时，静态特性曲线还应该是单值的。

形如 $y=f(x)$ 的非线性函数关系，其线性化可以用下述方法来实现，首先把函数分解成台劳级数:

$$f(x)=f(a)+\frac{f'(a)}{1!}(x-a)+\frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2+\frac{f'''(a)}{3!}(x-a)^3\cdots$$

然后，略去除第一和第二两项以外的其余所有各项。同样地，自动调整系统元件的静态特性曲线方程，在分解成台劳级数时也可以写成下述的形式:

$$\begin{aligned}x_{\text{вых}}&=f(x_{\text{вх}})=f(x_{\text{вх}_0})+\frac{f'(x_{\text{вх}_0})}{1!}(x_{\text{вх}}-x_{\text{вх}_0})\\&=f(x_{\text{вх}_0})+f'(x_{\text{вх}_0})\Delta x_{\text{вх}}\\&=x_{\text{вых}_0}+f'(x_{\text{вх}_0})\Delta x_{\text{вх}}\end{aligned}$$

由此得

$$\Delta x_{\text{вых}}=x_{\text{вых}}-x_{\text{вых}_0}=f'(x_{\text{вх}_0})\Delta x_{\text{вх}} \tag{4}$$

如果元件的输出量是两个输入量的函数，则必须利用多变函数的台劳公式[98]:

$$\begin{aligned}F(x,\ y)&=F(x_0+\Delta x,\ y_0+\Delta y)\\&=F(x_0,y_0)+\frac{\partial F}{\partial x}\Delta x+\frac{\partial F}{\partial y}\Delta y+\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}\Delta x^2\\&\quad+\frac{\partial^2 F}{\partial y^2}\Delta y^2+2\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial y}\Delta x\Delta y+\cdots\end{aligned}$$

同时，只取其一阶微量的各项，则得

$$F(x,\ y)\approx F(x_0,\ y_0)+\frac{\partial F}{\partial x}\Delta x+\frac{\partial F}{\partial y}\Delta y$$

或

$$\Delta F(x,\ y)=F(x,\ y)-F(x_0,\ y_0)=\frac{\partial F}{\partial x}\Delta x+\frac{\partial F}{\partial y}\Delta y \tag{5}$$

§3 自动调整系统各元件动态方程的列写方法

在列写自动调整系统各元件的动态方程时，要按下述方法进行。

首先要搞清楚与元件工作原理有关的物理定律，比如物质不灭定律、能量守恒定律、动量守恒定律、牛顿第二定律、电路学各定律等。与定律相对应的数学表达式就是被研究元件的动态微分方程式。

其次是写出在稳定状态下的元件静态方程式，该稳定状态是由已确定的输入和输出参数的初始值($x_{\text{вх}_0}$ 和 $x_{\text{вых}_0}$)来描述的。

由动态方程减去静态方程，就可以得到具有增量形式的元件动态方程式。

在方程(4)或(5)的基础上，求出每一个量的全增量。

最后，移动全部项，使输出量的增量在左边，而输入量的增量在右边，这样，就得到了以绝对单位来表达的线性化了的微分方程。

经常还要用到以相对单位的形式来表达的元件微分方程，在这种微分方程中，与每一阶导数在一起的都是一个具有时间因次的常数，而时间因次的乘幂是与该导数的阶次相同的。

为了得到这样的方程式，必须用某些常数去除微分方程

的所有各项，这些常数的因次应与这个方程的各项因次相同。做为这样的常数，经常要用到的是这些量的最大值、额定值或最小值。用选好的常数同时去乘并除微分方程的每一项，同时引用一些表示相对单位和系数的符号，以相对单位的形式来表达的动态方程式就可以得出来了。

举例 以绝对单位和相对单位的形式，编写出做为自动调整系统元件之一的电动机的动态方程。其输入量是调整机构（变阻器）的位移 x，而输出量是电动机轴的角速度 ω。

写出初始方程：

$$J\frac{d\omega}{dt}=M_{д}-M_{c} \tag{6}$$

式中 J——换算到电动机轴上的运动部分的惯性矩（公斤·米²）；

$M_{д}$——电动机的旋转力矩（牛顿·米）；

M_{c}——电动机轴上的阻力矩（牛顿·米）；

t——时间（秒）。

$M_{д}$ 的数值决定于角速度 ω 和调整机构的位置 (x)，也就是说 $M_{д}=F_1(\omega, x)$。阻力矩 M_c 在一般情况下也决定于 ω 的大小，即 $M_c=F_2(\omega)$。我们在方程(4)和(5)的基础上，对上述关系式进行线性化，同时求出全增量

$$\Delta M_c=\left(\frac{dM_c}{d\omega}\right)_0\Delta\omega=\left(\frac{\partial F_2}{\partial\omega}\right)_0\Delta\omega$$

$$\Delta M_{д}=\left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_0\Delta x+\left(\frac{\partial F}{\partial\omega}\right)_0\Delta\omega$$

这时

$$\begin{aligned}J\frac{d\omega}{dt}&=\left(\frac{\partial F_1}{\partial\omega}\right)_0\Delta\omega+\left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_0\Delta x-\left(\frac{\partial F_2}{\partial\omega}\right)_0\Delta\omega\\&=\left(\frac{\partial F_1}{\partial\omega}-\frac{\partial F_2}{\partial\omega}\right)_0\Delta\omega+\left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_0\Delta x\end{aligned}$$

把方程式中包含有角速度增量的各项移到方程式的左边，改写方程式成如下形状：

$$J\frac{d\omega}{dt}+\left(\frac{\partial F_2}{\partial\omega}-\frac{\partial F_1}{\partial\omega}\right)_0\Delta\omega=\left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_0\Delta x \tag{7}$$

这样，我们就得出了以绝对单位形式来表达的电动机动态方程式。

为了以相对值的形式来编写动态方程，我们用电动机旋转力矩的额定值 $M_{\text{ном}}$● 去除方程(7)中有旋转力矩因次的每一项。在这个方程的左边部分包含有角速度 ω 的增量值，而在其右边部分包含有调整机构位移的增量 Δx。因此，左边部分乘并除以电动机角速度的额定值 $\omega_{\text{ном}}$，而右边部分乘并除以调整机构全部位移的数值 $x_{\text{п}}$:

$$\frac{J\omega_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}}\frac{1}{\omega_{\text{ном}}}\frac{d\omega}{dt}+\left(\frac{\partial F_2}{\partial\omega}-\frac{\partial F_1}{\partial\omega}\right)_0\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{ном}}}\frac{\omega_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}}$$

$$=\left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_0\frac{\Delta x}{x_{\text{п}}}x_{\text{п}} \tag{8}$$

令

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_{\text{ном}}}=\varphi \qquad \frac{\Delta x}{x_{\text{п}}}=\mu \qquad \frac{J\omega_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}}=T_1$$

$$\left(\frac{\partial F_2}{\partial\omega}-\frac{\partial F_1}{\partial\omega}\right)_0\frac{\omega_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}}=K_1 \qquad \left(\frac{\partial F_1}{\partial x}\right)_0 x_{\text{п}}=K_2$$

于是方程式(8)就可以改写成:

$$T_1\frac{d\varphi}{dt}+K_1\varphi=K_2\mu \tag{9}$$

结果，我们得出了与输入量(μ)和输出量(φ)有关系的以相对单位的形式表达的微分方程。有时，象(9)这样的方程式还要进一步的改写，以使输出参数 φ 的系数等于 1，为此，要用系数 K_1 去除方程的左右两部分。令

$$\frac{T_1}{K_1}=T \qquad \frac{K_2}{K_1}=K$$

则得

$$T\frac{d\varphi}{dt}+\varphi=K\mu \tag{10}$$

在这里，T 的数值是元件的时间常数，而 K 是元件的放大系数。这两个数值被称为元件的动态参数。

● 原文为 $M_{\text{д.ном}}$。—译者

§4 典型环节

在分析自动调整系统的动态特性时，通常都要引用"典型环节"这一概念，所谓"典型环节"就是动态元件的最简单的组成部分。

具有由零阶、一阶或二阶方程所描述的一个自由度的系统元件，称为动态环节，动态环节可以划分成下述六种典型环节：

比例环节（也叫放大环节或非惯性环节）；

非周期环节（也叫惯性环节）；

振荡环节；

积分环节；

微分环节；

滞后环节。

比例环节

动态方程与静态方程没有区别的环节称为比例环节，在这些环节中输出量的增量直接与输入量的增量成正比，即

$$x_{\text{BЫX}} = Kx_{\text{BX}}。$$

比例环节的动态参数就是一个放大系数。这种环节的过渡过程曲线（表示在输入端加单位跃阶作用时，输出量如何变化的过渡过程曲线）示于图 1a。杠杆、减速器、电子管以及输入量是轴的角速度 ω，而输出量是电枢电动势（$x_{\text{BЫX}} = U_{\text{BЫX}}$）的直流测速发电机，等等，都可以做为比例环节的例子。比例环节的放大系数（输出量的增量和输入量的增量之比）是一个有量纲的数值。只有在元件的输入量和输出量具有相同的物理性质时，放大系数才是无因次的。例如，对于测速发电机来说，放大系数

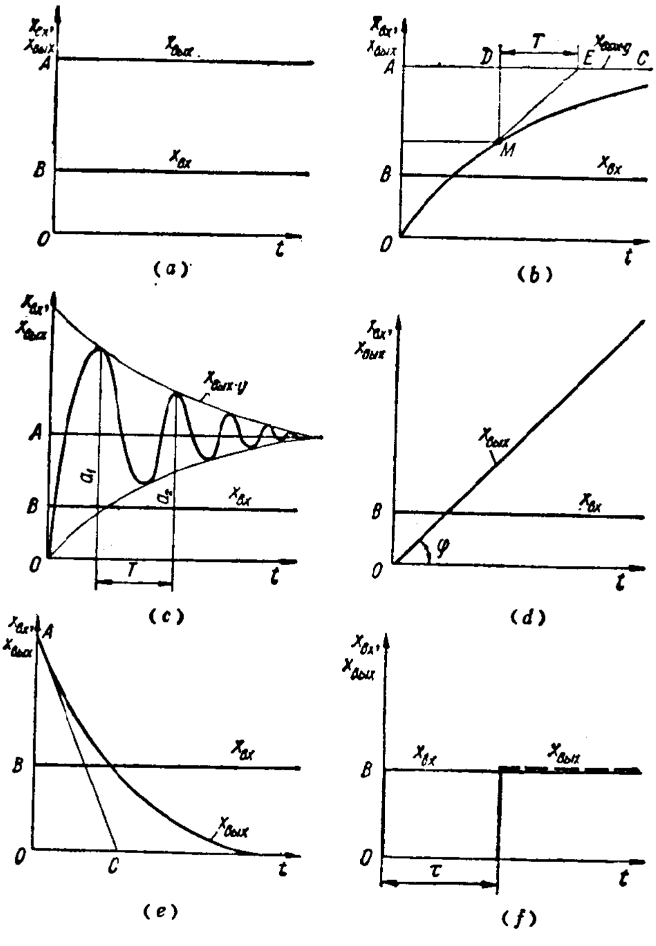

图1　典型动态环节的过渡过程曲线

a—比例环节；*b*—非周期环节；*c*—振荡环节；
d—积分环节；*e*—微分环节；　*f*—滞后环节。

$$K=\frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}}}=\frac{U_{\text{вых}}}{\omega}$$

的量纲是 $\frac{\text{伏}}{\text{弧度/秒}}$。

对于减速器，它的输出量和输入量都是旋转角，因而放大系数

$$K=\frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}}}=\frac{\varphi_{\text{вых}}}{\varphi_{\text{вх}}}$$

则是一个无因次的数值。

比例环节的传递函数是输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比，即等于它的放大系数：

$$W(p)=K \tag{11}$$

非周期环节

输入量和输出量之间的关系用微分方程

$$T\frac{dx_{\text{вых}}}{dt}+x_{\text{вых}}=Kx_{\text{вх}} \tag{12}$$

来表达的动态元件称为非周期环节。

非周期环节的传递函数

$$W(p)=\frac{K}{Tp+1} \tag{13}$$

这种环节的动态参数是时间常数 T 和放大系数 K。在稳态下，$\frac{dx_{\text{вых}}}{dt}=0$。因此，非周期环节的放大系数可以由在稳态下的输出参数与输入参数之比来确定。

常数 T 在这种情况下是一个时间间隔，在这个时间间隔内输出量由零变到稳态值，在速度增长的条件下，它始终保持不变。时间常数是表征元件惯性的大小的。非周期环节的过渡过程特性曲线示于图 1$б$. 对于具有热交换过程的自动调整元件来说，时间常数可以由下述方程式求出[66]：

$$T=\frac{mC}{\beta S}$$

式中　m——元件的质量(公斤);

C——热容量(焦耳/K);

β——散热系数(瓦特/米^2·K);

S——实现散热过程所通过的表面积(米^2)。

对于装满液体的水箱来说，时间常数可以由下式来确定[66]:

$$T=\frac{S_1H\rho}{m}$$

式中　S_1——水箱的截面积(米^2);

H——给定的液平面高度(米);

m——液体的最大流量(公斤/秒);

ρ——液体的密度(公斤/米^3)。

对于电机的激磁绕组来说(其输入量是所加电压,而输出量是通过它本身的电流),时间常数由下式确定[38]:

$$T=\frac{L}{R}$$

式中　L——绕组的电感(亨);

R——绕组的有效电阻(欧)。

振荡环节

输入量和输出量之间的关系用下述微分方程描述的动态元件称为振荡环节:

$$T_1^2\frac{d^2x_{\text{вых}}}{dt^2}+T_2\frac{dx_{\text{вых}}}{dt}+x_{\text{вых}}=Kx_{\text{вх}} \tag{14}$$

或

$$\frac{d^2x_{\text{вых}}}{dt^2}+2\xi\omega_0\frac{dx_{\text{вых}}}{dt}+\omega_0^2x_{\text{вых}}=K\omega_0^2x_{\text{вх}} \tag{15}$$

式中，$T_2=2\xi T_1$，在有阻尼的条件下，$\xi<1$。