

目 录

第一章 自动控制基本知识

§ 1—0 引 言	1—1
§ 1—1 自动控制的基本原理	1—3
§ 1—2 自动控制系统应用举例	1—12
一、L、Z型XY记录仪	1—12
二、惯性导航系统	1—14
三、火炮控制系统	1—16
四、数字程序控制系统	1—21

第二章 自动控制系统的基本运动规律

§ 2—0 为什么要研究自动控制系统的运动	2—1
§ 2—1 线性反馈控制系统的微分方程	2—4
§ 2—2 微分方程的拉氏介法	2—19
一、拉氏变换	2—20
二、一、二阶系统的介	2—35
三、传递函数	2—43
§ 2—3 线性反馈系统的稳定条件	2—54
一、稳定性的概念	2—54
二、线性系统的代数稳定判据	2—60
三、系统参数对稳定性的影响	2—66
§ 2—4 自动控制系统的稳态误差	2—69
§ 2—5 自动控制系统的基本性能	2—77
一、一阶系统的动态特性	2—77
二、二阶系统的动态特性	2—79

三、系统的参数对动态特性的影响.....	2 - 92
四、小惯性的影响.....	2 - 94
附录 2—1 拉氏变换表.....	2 - 97
附录 2—2 计算表格式(劳斯判据)的代数判据.....	2 - 98
附录 2—3 6次以下行列式判据.....	2 - 100
(霍尔维茨判据)	

第三章 用频率特性法研究自动控制系统

§ 3—1 频率特性法的产生.....	3 - 1
§ 3—2 频率特性.....	3 - 2
§ 3—3 频率特性和过渡过程对应关系.....	3 - 6
§ 3—4 频率特性求取方法.....	3 - 21
§ 3—5 稳定条件和稳定储备.....	3 - 23
§ 3—6 由开环频率特性确定稳态误差.....	3 - 36
§ 3—7 根据开环频率特性估计系统动态性能.....	3 - 41
§ 3—8 应用频率特性对系统进行校正.....	3 - 46
§ 3—9 应用频率特性法分析 LZ-3.....	
函数记录仪控制系统.....	3 - 53

第四章 自动控制系统的设计

§ 4—0 设计的一般步骤.....	4 - 1
§ 4—1 方案选择.....	4 - 3
§ 4—2 元部件选择.....	4 - 6
一、执行电机.....	4 - 6
二、减速器.....	4 - 7
三、放大元件.....	4 - 13

四、滤波电路	4—23
五、测量元件	4—25
§ 4—3 系统的稳态计算	4—26
一、静态误差	4—27
二、速度误差	4—28
§ 4—4 同频率法确定串联校正装置	4—28
一、如何确定校正装置	4—29
二、品质指标的提法及相互转化	4—32
三、予期开环率特性的确定	4—37
§ 4—5 用频率法确定并联校正装置	4—57
第五章 自动控制系统中的非线性问题	
§ 5—1 为什么要研究非线性问题	5—1
§ 5—2 几种常见的非线性因素对随动 系统运动特性的影响	5—7
§ 5—3 包含非线性部件的反馈控制系统	5—18
第六章 自动控制系统的实验和调整	
§ 6—1 系统部件动特性测试	6—1
§ 6—2 系统的干扰及其消除	6—24
§ 6—3 系统调试中常遇到的一些问题	6—36
§ 6—4 控制系统性能的测定	6—43

第三章 用频率特性法研究自动控制系统

本章提要

频率特性法是研究自动控制系统的一种工程方法，它适用于线性系统。本章叙述了频率特性法的基本原理，以及利用频率特性分析系统稳定性、稳态误差和动态性能的方法，并讨论了根据频率特性改进系统性能的校正方法。

§ 3-1 频率特性法的产生

上一章我们学习了系统微分方程列写及应用拉氏变换求分的方法，这种方法的优点是可以得到输出量变化的全过程，而且比较直观。缺点是系统愈复杂，其微分方程阶数也愈高，求介方程的计算量也愈大，所以这种方法只局限于三阶或四阶以下的系统。另外，若因输出量的变化规律不满足要求，而需要改变系统某些参数或加进某些环节来改进系统动态性能时，那就需要重新进行计算，问题更为复杂。

由于存在这些缺点，微分方程求介方法不适于工程实际应用。因工程实际上不希望进行大量繁重计算，而且常要求能较迅速地分析出系统中各参数对动态性能的影响，并要能大致判断出加进某些环节后动态性能改进的情况。另外，实际上也并不需要把输出量变化的全过程都准确地计算出来（除特殊要求外），往往只要了解的几个主要特征，为超调量、过渡过程时间、稳态误差等就可以了。

生产实际的需要促使一些工程研究方法相继产生，目前国内外广泛应用的有两种，一是频率特性法，一是根轨迹法，我们只介绍频率特性法。

频率特性法就是根据系统的频率特性来分析和改进系统运动状态的方法。什么是频率特性？频率特性和运动状态究竟有什么关系？频率特性如何得到？它具有那些性质？如何根据频率特性确定改进系统动态性能的方向和方法？这是频率特性法包含的主要内容。

总之，生产实际的需要以及频率特性和系统运动状态的内在联系是频率特性法产生的基础。

在应用这一方法时，要注意二点：

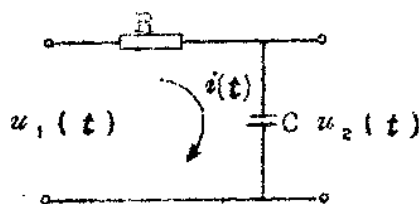
一 频率特性法在工程上虽然比较实用，但由于一些资产阶级学者脱离生产实际，所以有些地方和实际不太一致，使应用时受到一定局限。因此在应用这一方法时，要坚持“真理的标准只能是社会的实践”。把理论和实践紧密结合起来。

二 目前，由于电子数字计算机和模拟计算机的日益普及，应用计算机来研究系统动态特性已成了重要方向。所以如能把频率特性法和利用计算机计算的方法结合起来，那就能使结果更符合实际。

§ 3—2 频率特性

什么叫做频率特性？我们先看一简单的RC串联电路，在不同频率的正弦波电压 $u_1(t)$ 作用下，

输出电压 $u_2(t)$ 的稳态分量是怎么变化的？这在交流电路中已学过，我们再来复习一下。



电路见图3—1

$$u_1(t) = AS \sin \omega t$$

用复数计算， $\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{j\omega C}$

图3—1

$$\text{式中 } \dot{I} = \frac{\dot{U}_1}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

$$\text{即 } \dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{1 + j\omega RC} \quad (3-1)$$

在这一简单电路中，输出电压究竟相对输入电压变化多少很容易从(3-1)式得到，也即

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (3-2)$$

$\frac{1}{1 + j\omega RC}$ 是在正弦电压作用下，输出电压和输入电压的复数值之比，因为它是随频率而变的，所以称它为这一电路的频率特性，一般以 $W(j\omega)$ 表示。

虽然这是一个简单电路，是一个特例。但矛盾的普遍性却寓于矛盾的特殊性之中”，从这一电路的频率特性可以看出几个一般规律。

一、电路参数 (R, C) 给定后，频率特性 $\frac{1}{1 + j\omega RC}$ 完全确定，也即它随频率变化的规律完全确定。所以，频率特性是电路的内在性质，和外界因素无关。

二、频率特性所以随频率而变，是因为电路中存在电容、电感这类储能元件，若为纯电阻，那就和频率无关了，即对任何频率都有相同的反应。实际电路中，往往存在电容或电感（相类似的一些力学系统中都有大小不同的惯性），所以输入不同频率的正弦电压，输出电压的幅值、相位变化都不同。

三 一般输入信号中常常不只是一个频率的正弦函数，如晶体管收音机信号就是由多种频率混合而成（指经检波后的音频信号），要收音机不失真地放大这一信号，放大器频率特性就要保证在这一频段内幅值、相位基本不变。也即对放大器的频率特性有一定要求。反过来，当输入信号频率范围已定，从放大器频率特性，大致可以估计出输出信号失真的程度。

四 从这一电路的频率特性 $\frac{1}{1+j\omega RC}$ 可以看出，它的幅值随频率升高而衰减。实际自动控制系统虽然形式不同，但一般都是这样的“低通”滤波器。

认识以上这些规律是为了进一步认识频率特性的物理意义，为先后更好掌握它打下基础。

从频率特性的定义中，我们可以了解为什么它具有较广泛的实用意义。因为它是以正弦信号作为输入，由于是线性系统，所以输出也是正弦信号。而正弦信号作为测试信号，具有二个重要特点：
一）一个正弦信号只需要用三个特征值——幅值、相位、频率，就可以描述清楚。

二）当正弦分量加于一个线性系统，自由分量消失后，在系统中任何一点信号均是同频率的正弦信号，它们不同于输入信号的只是幅值、相位。这是正弦信号所特有的，别的形式信号作用于系统就没有这种性质。

根据这二特点，频率特性就可以用很简便的方法测试得到。如图 3—2 所示，即为测一晶体管放大器频率特性时的原理图。

我们分别在不同频率时，测得输入、输出幅值、相值，可分别作出其幅频和相频特性，见图 3-3、3-4。

一般放大器的幅频相频特性有图 3-3 和图 3-4 两种形式。一种是低频段不变，到一定频率值开始下降。一种是中间有一频率段 $|K|$ 反而升，然后又继续下降。图中下降 $0.707|K|$ 时的 f_n ，称为频带。

图 3-3 (b) 和图 3-4

(b) 是相频特性，这个相位是指输出比输入相移大小。从图 3-3 和图 3-4 幅频和相频特性对照，可以看出，在幅值不变时，相位为 0，幅值变化时，相位才相应变化。所以对大部分系统（它们的传递函数零极点都在复数平面的左半面，称最小相位系统）一般只需作出幅频特性即可，因为相频特性和幅频特性有严格联系，不是相互独立的。

大多数自动控制系统的幅相频率特性和放大器频率特性形状很

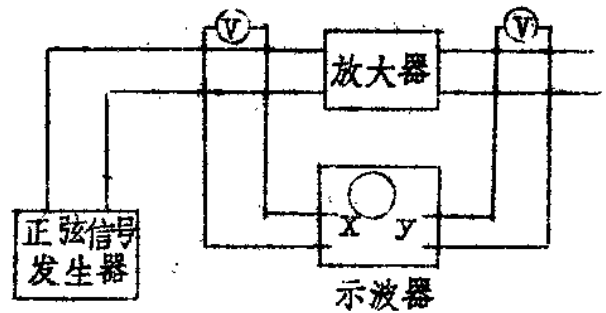


图 3-2

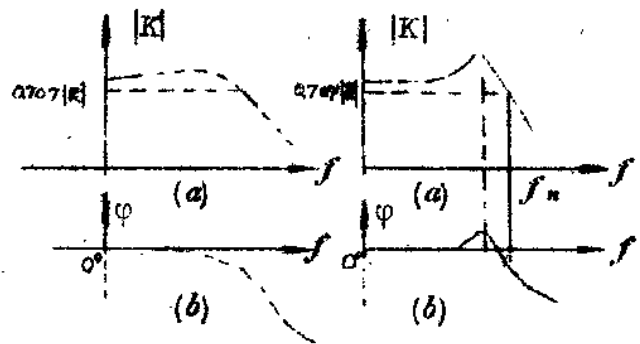


图 3-3

图 3-4

相似，所不同的只是 f_n 数值不同。

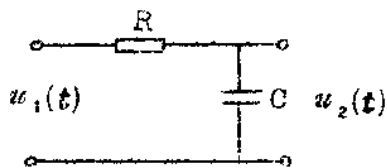
小结：频率特性是系统在正弦输入作用下，输出和输入复数值之比。它表明了系统对不同频率信号的反应规律，是系统的内在性质。

§ 3-3 频率特性和过渡过程对应关系

我们引出频率特性，研究它的特点、性质是为了研究系统过渡过程变化情况，最终目的是为了改进系统动态性能，满足工作要求。

那么频率特性和过渡过程有否一一对应关系？是否能用频率特性的几个特征值反映出过渡过程的主要特点呢？如果这些关系都是肯定存在，频率特性获得又比较方便，我们今后就可转化到频率域上来讨论系统动态性能，不必一定要去画出过渡过程曲线了。

仍以上节所举 R-C 电路为例，见图 3-5，我们来看看它们二者的对应关系：



先列出微分方程，若外加输入作用是单位阶跃函数 $1(t)$

图 3-5

$$u_1(t) = C \frac{du_2(t)}{dt} + R u_2(t)$$

$$C R \frac{du_2}{dt} + u_2 = 1(t) \quad \text{初始条件为 0, 则}$$

$$\text{拉氏变换} \quad (CRS + 1) u_2(S) = \frac{1}{S} \quad \text{令 } T = CR$$

$$u_2(S) = \frac{1}{S(TS + 1)}$$

反变换·求出 $u_2(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$, 见图 3-8

又由 § 3-2 已知这个电路的频率特性为

$$W(j\omega) = \frac{1}{Tj\omega + 1} \quad \text{幅频} \quad A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (T\omega)^2}}$$

$$\text{幅频} \quad \varphi(\omega) = -\lg^{-1} T\omega$$

为作图方便(1)一般常把幅频取其对数, 因为当二环节串联时, 频率特性是相乘的, 若取对数, 相乘运算就转化成相加运算, 实用上就方便得多。如 $A_1(\omega)A_2(\omega)$ 取对数如下:

$$20 \lg A_1(\omega)A_2(\omega) = 20 \lg A_1(\omega) + 20 \lg A_2(\omega)$$

(2) 另外, 频率 ω 也取对数表示, 同样, 也是为了标度方便。因频率变化常取其 10 倍。这样, 二相邻间隔就相同, 如 ω ; 10ω ; 100ω , 分别取其对数, 则为

$$\lg \omega ; \lg 10\omega = \lg 10 + \lg \omega = 1 + \lg \omega ;$$

$$\lg 100\omega = \lg 100 + \lg \omega = 2 + \lg \omega$$

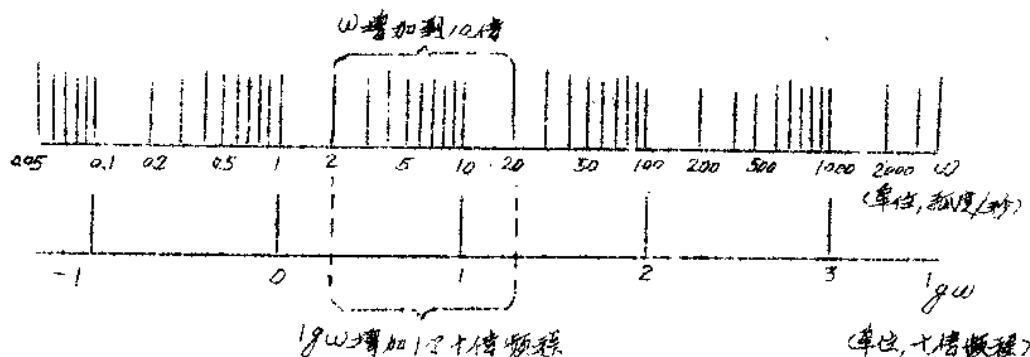


图 3-6

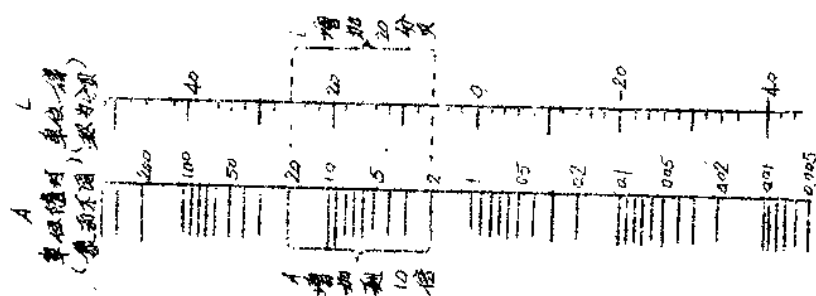


图 3-7

这样， $20 \lg A(\omega) = -20 \lg \sqrt{1 + (T\omega)^2}$

当 $T\omega \ll 1$ 时， $-20 \lg \sqrt{1 + (T\omega)^2} \approx -20 \lg 1 = 0$

当 $T\omega \gg 1$ 时， $-20 \lg \sqrt{1 + (T\omega)^2} \approx -20 \lg T\omega$

即 $\omega \ll \frac{1}{T}$ 时， $L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 0$ 这是一条与 ω 轴重合的直线

$\omega \gg \frac{1}{T}$ 时， $L(\omega) = 20 \lg A(\omega) \approx -20 \lg T\omega$

这是一条什么线呢？

我们任取 ω_1 和 $10\omega_1$ 二点来看，

$$\begin{aligned}L(10\omega_1) - L(\omega_1) &= -20 \lg 10T\omega_1 + 20 \lg T\omega_1 = -20 \lg 10 \\ &= -20 \text{分贝}\end{aligned}$$

即任意相距 10 倍频二点幅值之差都是 -20 分贝，所以 $-20 \lg T\omega$ 是一斜率为每十倍频程 -20 分贝的直线。

根据以上分析，可以得出 $W(j\omega) = \frac{1}{Tj\omega + 1}$ 的对数幅频特性是由两段直线组成，它们的联结点是在 $\omega_i = \frac{1}{T}$ ，称联接频率。在 ω_i 以前是与横轴重合的直线， ω_i 以后是一斜率 -20 分贝/十倍频的一段直线。所以 ω_i 是这一频率特性很重要的一点。

当然，以上只是渐近线，因为在 $\omega_i = \frac{1}{T}$ 这点实际并不符合以上 $\omega \gg \frac{1}{T}$ 或 $\omega \ll \frac{1}{T}$ 的条件，所以近似计算有误差，实际 ω_i 这点的 $L(\omega_i) = -3$ 分贝，不过，在工程计算上可以忽略。若

$$W(j\omega) = \frac{K}{Tj\omega + 1},$$

因为 $L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg K - 20 \lg \sqrt{1 + (T\omega)^2}$ 与前比较，多了 $20 \lg K$ 一项，故只需把特性向上移 $20 \lg K$ 即可。

相频特性 $\varphi(\omega) = -\lg^{-1} T\omega$ ，当 ω 由 $0 \rightarrow \infty$ 时，这是一条由 0° 变到 -90° 曲线。

其中比较重要的是三点： $\omega \rightarrow 0$ ， $\varphi(\omega) = 0^\circ$ ，

$$\omega \rightarrow \infty, \varphi(\omega) = -90^\circ,$$

$$\omega_i = \frac{1}{T}, \quad \varphi(\omega) = -45^\circ$$

图 3—8 是这一电路在单位阶跃作用下的过渡过程，图 3—9(a) 是这一电路的频率特性，图 3—9(b) 是这种环节相频特性的算图。

从这一 RC 电路的频率特性和过渡过程比较中，可以看出二者确有对应关系，过渡过程的时间常数 T 和频率特性的联接频率 ω_i 是倒数关系。即由 $\omega_i = \frac{1}{T}$ ($\omega_i = \frac{1}{0.25} = 4$ 弧度/秒) 完全可以知道阶跃输入下过渡过程变化的特征值 T ($T = \frac{1}{\omega_i} = \frac{1}{4} = 0.25$ 秒)。一般取 3~4 T 为过渡过程结束，所以 T 的大小和过渡过程时间是一致的。

既然二者有一一对应关系，以后就可以间接由频率特性知道系统变化的特征。

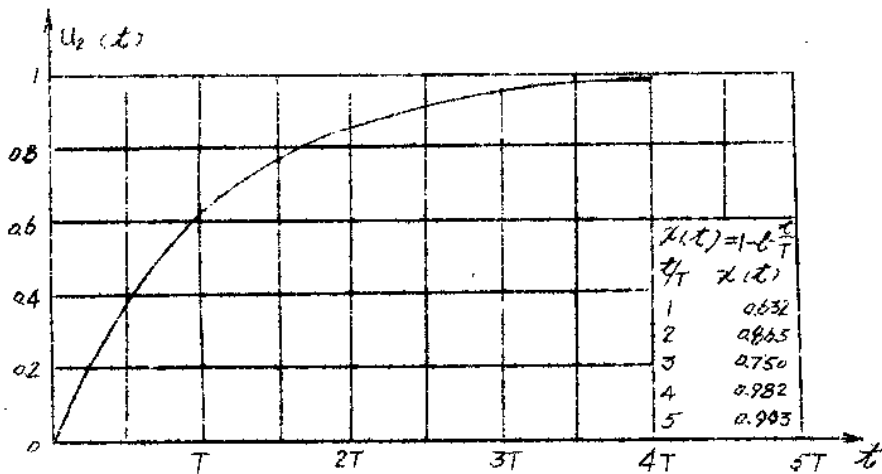


图 3—8

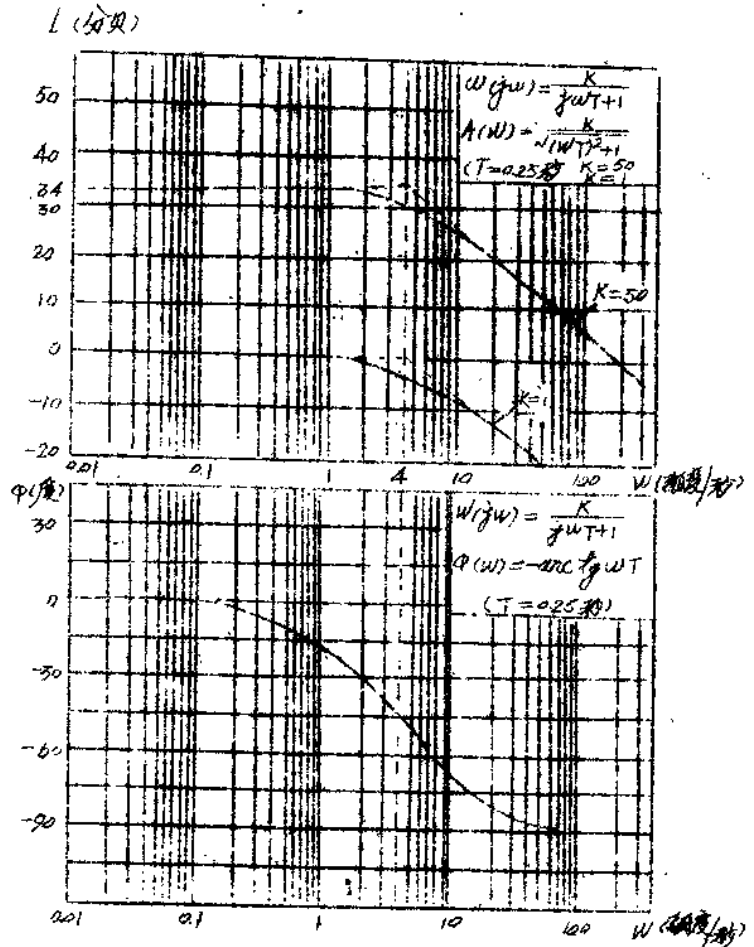


图 3—9 (a)

根据这点，我们如
果能把自动控制系统中
常遇到的基本环节的频
率特性和过渡过程对应
关系找到，并且熟悉这
些关系，那么就可以用

图 3—9 (b)

频率特性分析一些复杂系统了。

以上这种RC电路虽是简单电路，但有它代表性，是自动控制系统中的基本环节之一，一般称它为惯性环节。

下面再介绍二种基本环节：

一、振荡环节，常见的有RLC振荡电路、直流电动机等。

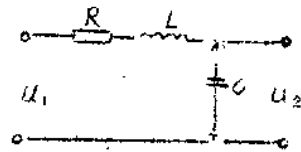


图 3—10

其微分方程分别如下：

$$\text{RLC 电路: } LC \frac{d^2 u_2}{dt^2} + RC \frac{du_2}{dt} + u_2 = u_1$$

$$\text{电动机: } T_a T_m \frac{d^2 \Omega}{dt^2} + T_m \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = \frac{1}{K_d} M_f \quad (3-4)$$

一般写成标准形式如下：

$$T_o^2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + 2\xi T_o \frac{dx_2}{dt} + x_2 = x_1 \quad (3-5)$$

$$\text{式中 } T_o^2 = LC, \quad \xi = \frac{R}{2\sqrt{L/C}}$$

对这种振荡环节，若输入作用 x_1 是单位阶跃函数，它的输出 x_2 的变化从第二章中知道应有三种情况（初始条件为 0）：

$$1. \xi > 1$$

$$x_2(t) = \left(1 + \frac{1}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left(\frac{1}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}} e^{-(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \frac{t}{T_o}} \right) \right)$$

$$- \frac{1}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}} e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}) \frac{t}{T_0}}]$$

2. $\xi < 1$

$$x_2(t) = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi \frac{t}{T_0}} \sin\left(\sqrt{1 - \xi^2} \frac{t}{T_0} + \sin^{-1} \sqrt{1 - \xi^2}\right) \right)$$

3. $\xi = 1$

$$x_2(t) = \left(1 - \left(\frac{t}{T_0} + 1 \right) e^{-\frac{t}{T_0}} \right)$$

这三种情况的 $x_2(t)$ 图形见图 3-11。

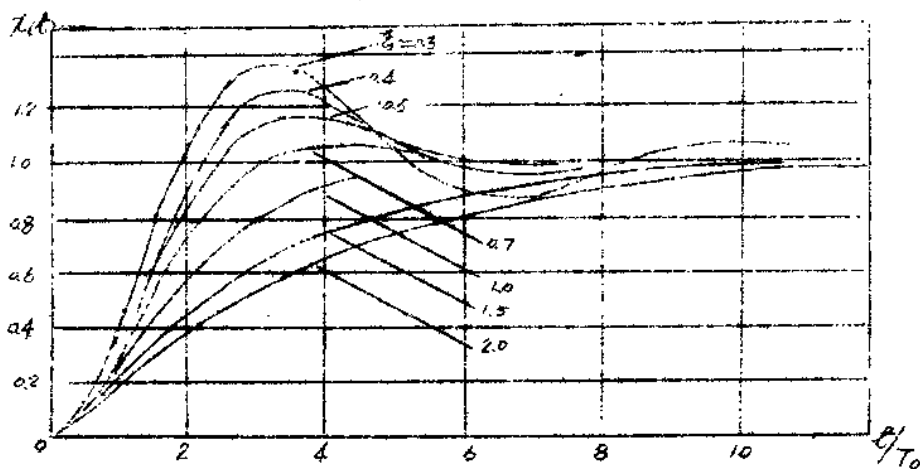


图 3-11

这种振荡环节动态性能的二个主要参数是时间常数 T_0 和阻尼系数 ξ ， T_0 大小影响过渡过程时间， ξ 大小和过渡过程时间、振荡情况及超调量有关（见第二章），一般选取 $\xi = 0.7$ 左右，过渡过程时间 $T_{5\%} = (3.5 \sim 7) T_0$ ， σ 和 ξ 关系见图 2-34

振荡环节频率特性

$$W(j\omega) = \frac{1}{T_0^2(j\omega)^2 + 2\xi T_0(j\omega) + 1}$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_0^2)^2 + (2\xi \omega T_0)^2}}$$

$$\therefore L(\omega) = 20 \lg 1 - 20 \lg \sqrt{(1 - \omega^2 T_0^2)^2 + (2\xi T_0 \omega)^2}$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{tg}^{-1} \frac{2\xi \omega T_0}{1 - \omega^2 T_0^2}$$