



热工过程控制系统 分析、设计和调试



张法文 等 著

中国电力出版社

Tk 323

1.13

432726

热工过程控制系统 分析、设计和调试

张法文 等 著



中国电力出版社

内 容 提 要

本书阐述了被控对象动态特性和响应曲线的数据处理方法,以 ISE, ITSE 为控制品质指标的连续控制系统、数字控制系统的整定计算及设计方法,概述了分散控制系统及高级控制算法在电厂中的应用,并提供了用 BASIC 语言编写的常用子程序和应用程序及面向方框图的仿真程序。

本书主要供火力发电厂及有关科学研究单位从事热工自动控制工作的工程技术人员阅读,也可供高等工业院校自动控制专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工过程控制系统分析、设计和调试/张法文等著.-北京:中国电力出版社,1997

ISBN 7-80125-283-7

I. 热… II. 张… III. 热力工程-过程控制-控制系统
IV. TK323

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 25212 号

D-218/35-25

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市水利局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 7 月第一版 1997 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23 印张 517 千字

印数 0001—2620 册 定价 32.60 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

随着电力工业的发展, 机组容量不断增加, 对自动化的要求越来越高。自动控制仪表的发展, 特别是计算机技术的发展, 使自动控制在火力发电厂中应用的深度和广度与日俱增, 在生产中发挥的作用越来越大。本书主要是根据我们长期研究的成果和总结控制系统设计、现场调试、试验研究的经验而写成的, 同时吸取了国内外控制在电厂中的应用成果。

本书内容分三部分。第一部分(第一、二、三章)阐述了连续控制系统设计与调试的内容, 提供了多种响应曲线拟合传递函数的方法; 阐述了单变量与多变量控制系统的设计方法; 推导了控制品质指标 ISE、ITSE 的计算公式, 列举了它们在整定计算与系统设计中的应用。这部分由张法文撰写。第二部分(第四章)阐述了计算机控制的基础理论; 推导了数字控制系统的控制品质指标 ISE 和 ITSE 的计算公式, 阐述了它们在 DDC 整定计算和系统设计中的应用; 概述了分散控制系统, 列举了高级控制算法的应用实例。本章一、三、四节由谷俊杰撰写, 第二节由张法文撰写。第三部分(第五章)提供了用 BASIC 语言编写的常用子程序和应用程序, 及面向方框图的仿真程序。本章第一、二节由张法文撰写, 第三节由谷俊杰撰写。全书由张法文统稿。

本书提供的程序尚属初级阶段的, 我们在进一步开发。如果读者需要书中程序盘片, 请和张法文联系。

本书被列为电力工业部和中国电力出版社设立的电力科技专著出版资金资助项目而得以出版, 作者深表感谢。

本书由华北电力大学孙德立教授主审。孙教授认真审阅了书稿, 提出了许多颇有价值的宝贵意见, 对此我们表示衷心感谢。周黎辉协助作了数字控制系统根轨迹法整定计算一例工作, 也表示感谢。

由于作者水平有限, 对新技术的认识和实践尚不够, 因此书中缺点、疏误在所难免, 诚望读者提出批评指正。

电力部西安热工研究院 张法文

1996 年 6 月

本书主要符号表

$E(s)$ —— 被控变量偏差的拉氏变换式	T_i —— 控制器的积分时间
$e(t)$ —— 被控变量的偏差	T_d —— 控制器的微分时间
$G(s)$ —— 控制器的传递函数	$W(s)$ —— 被控对象的传递函数
K_c —— 控制器的放大系数	$W_d(s)$ —— 扰动通道的传递函数
K_d —— 控制器的微分增益	$W_H(s)$ —— 前馈装置的传递函数
K_P —— 控制器的比例部分	$W_{ij}(s)$ —— i 变量对 j 变量作用的传递函数
m —— 衰减指数, 零点数	δ —— 比例带, 复数根的实数部分
n —— 阶次, 极点数	$\delta(t)$ —— 脉冲函数
P —— 功率, 负荷	ϵ —— 飞升速度
p_i —— 炉膛负压	ζ —— 阻尼系数
p_τ —— 锅炉出口汽压 (机前压力)	η —— 稳定裕度, 锅炉热效率
p_D —— 汽包压力	θ —— 温度
Q —— 热量	μ_T —— 汽轮机调节阀门开度
$q_{m,B}$ —— 燃料量	ρ —— 自平衡系数
$q_{m,D}$ —— 蒸汽流量	τ —— 迟延时间
$q_{m,W}$ —— 给水流量	τ_{pr} —— 实际迟延时间
$q_{V,V}$ —— 送风量	τ_{cal} —— 计算迟延时间
T_s —— 广义时间常数	ψ —— 衰减率

目 录

前 言

本书主要符号表

第一章 动态特性试验和数据处理	1
第一节 动态特性试验	1
一、动态特性简述 二、动态特性试验前的准备工作 三、试验工作	
第二节 由简单响应曲线直接求取传递函数	3
一、有自平衡能力对象响应曲线的拟合 二、无自平衡能力对象响应曲线的拟合 三、稳态为零对象响应曲线的拟合	
第三节 由响应曲线间接求取传递函数参数	23
一、形状复杂响应曲线的传递函数参数的求取 二、由频率特性求取响应曲线的传递函数参数 三、两个参数乘积的响应曲线传递函数计算	
第四节 对象响应曲线及其区域响应曲线的互相求取	28
一、阶梯法求取对象响应曲线 二、作图法求取对象或区域响应曲线	
第五节 复杂传递函数的低阶近似	31
一、多阶惯性环节传递函数之积的低阶近似 二、多阶惯性环节传递函数之和的低阶近似 三、传递函数之差（及之商）的低阶近似 四、迟延环节传递函数 $e^{-\tau}$ 的低阶近似表达式	
第六节 任意形状扰动下对象传递函数的求取	37
第二章 热工控制系统的设计	42
第一节 概述	42
第二节 单变量控制系统的设计	43
一、单回路控制系统的基本结构 二、单回路控制系统的设计考虑	
第三节 提高单变量控制系统控制品质的方法	47
一、绝对不变性原理及复合控制系统设计 二、采用被控变量非线性偏差的控制系统 三、修正了对象非线性特性的控制系统 四、多执行机构的可变放大系数的控制系统 五、采用辅助大偏差控制器的系统 六、采用辅助控制手段的控制系统 七、对象分段法组成控制系统 八、采用中间信号的双回路控制系统 九、串级控制系统 十、采用间接被控变量的控制系统	
第四节 单变量控制系统的抗积分饱和	63
一、单回路控制系统的抗积分饱和 二、串级控制系统的抗积分饱和	
第五节 提高系统可靠性和生产过程安全性的措施	67
一、采用几个变送器测量同一个参数的测量系统 二、防止执行器故障引起控制系统失灵的保护措施 三、给定值与被控变量偏差大的保护措施 四、对控制系统输出的限制措施 五、超驰保护措施 六、改变被控变量（变结构）的保护性控制系统 七、闭锁升、闭锁降（BLOCK INC, BLOCK DEC）负荷指令功能 八、追升、追降（Run UP, Run DOWN）功能 九、事故降负荷（RUN bACK）保护性系统 十、主动控制变量被限制时的限制保护措施 十一、从动控制变量被限制时的限制保护措施 十二、全解耦系统中任一控制回路切换为手动时的保护措施 十三、单向解耦从动	

第六节 多变量控制系统的设计	80
----------------------	----

- 一、多变量对象动态特性的表示方法 二、多变量控制系统的特点 三、全解耦控制系统的设计与计算
- 四、单向解耦控制系统的设计与计算

第三章 控制系统品质指标与整定计算	94
-------------------------	----

第一节 微分方程式特征方程的根与响应曲线	94
----------------------------	----

- 一、概述 二、二阶特征方程式的根与响应曲线

第二节 根轨迹法与零点、极点	97
----------------------	----

- 一、负反馈控制系统根轨迹作图法 二、正反馈控制系统根轨迹作图法 三、闭环控制系统极点的计算

第三节 广义频率特性与零点、极点	104
------------------------	-----

第四节 控制系统的零点、极点位置与控制系统的过渡过程	104
----------------------------------	-----

- 一、单极点控制系统过渡过程 $y(t)$ 的计算 二、具有重极点的控制系统过渡过程 $y(t)$ 的计算

第五节 PID 控制规律	111
--------------------	-----

第六节 单回路控制系统的整定计算	114
------------------------	-----

- 一、概述 二、控制系统最佳整定参数品质指标 三、控制系统品质指标的比较

第七节 近似整定计算图表	130
--------------------	-----

- 一、有自平衡能力对象的近似整定参数图 二、无自平衡能力对象的整定参数图

第八节 复合控制系统的整定计算	133
-----------------------	-----

- 一、按品质指标 ISE 或 ITSE 计算前馈装置参数 二、控制系统和前馈通道零点、极点的最佳配置
- 三、复合控制系统前馈装置参数的近似计算

第九节 多回路控制系统的整定计算	142
------------------------	-----

- 一、串级控制系统的整定计算 二、采用导前微分信号的双回路控制系统 三、采用辅助控制手段的双回路控制系统

第十节 多变量控制系统的整定计算和调试	147
---------------------------	-----

- 一、双变量控制系统的整定计算 二、单向解耦控制系统的整定计算和调试 三、全解耦自动控制系统的整定计算与调试

第四章 计算机过程控制	154
-------------------	-----

第一节 直接数字控制理论基础	154
----------------------	-----

- 一、信号采集、数字滤波及数据处理 二、DDC 的 PID 算式 三、 z 变换及其性质 四、脉冲传递函数与控制系统的稳定性 五、数字控制系统的 z 变换分析

第二节 数字控制系统参数整定计算与设计	189
---------------------------	-----

- 一、被控变量偏差 z 变换的典型表达式 二、控制品质指标 三、数字 PID 控制器的 z 变换 四、 s 域与 z 域系统特性图比较 五、数字控制系统的整定计算与设计

第三节 分散控制系统	208
------------------	-----

- 一、分散控制系统的分析 二、分散控制系统的工程设计

第四节 分散控制系统的高级控制应用	219
-------------------------	-----

- 一、状态反馈系统的工程设计 二、模糊控制及其应用

第五章 热工过程控制系统的设计与调试常用程序	236
------------------------------	-----

第一节 控制系统辅助计算常用子程序	236
-------------------------	-----

- 一、二次插值法寻优 二、爬山法寻优 三、黄金分割法寻优 四、爬山法与黄金分割法联合寻优
- 五、牛顿法计算多项式实根程序 六、计算多项式实根和复根的程序 七、由根(极点)计

算多项式的程序	八、传递函数相乘后求和程序	九、多项式形式传递函数相加程序	十、多项式形式传递函数相乘程序	十一、频率特性的计算程序	十二、偏差平方积分准则 ISE 的计算程序	十三、时间乘偏差平方积分准则 ITSE 的计算程序	十四、响应曲线的计算程序
第二节	控制系统的基本程序						282
一、前馈装置参数的整定计算程序	二、等容对象控制系统整定计算程序	三、任意扰动下单回路控制系统的整定计算程序					
第三节	面向方框图的通用仿真程序设计						341
一、典型模块	二、程序设计说明	三、应用举例					
主要参考文献							357

第一章 动态特性试验和数据处理

第一节 动态特性试验

一、动态特性简述

热工过程控制系统的品质,是由被控对象和控制系统各环节的特性及系统的结构决定的。不同的被控对象在某一扰动下,其参数具有不同的变化过程,此过程特性称之为被控对象的动态特性。对被控对象输出变量与输入变量之间关系的数学描述,称为对象的数学模型。

被控对象的数学模型,对控制系统的设计和分析有着极为重要的意义。随着自动控制系统的复杂化,它已越来越受到人们的重视。一个自动控制系统设计的成功与否,与设计者对被控对象数学模型的了解程度有很大关系。对于简单的被控对象,若知道它的数学模型,对控制器参数则可以整定得更好些。对于复杂的被控对象,更要求知道其数学模型,这样才能设计出合理的控制系统,才能顺利地投入控制系统,并取得好的控制品质。

求取被控对象数学模型的试验方法很多。最常用的是阶跃扰动法,其次是脉冲扰动法和正弦波扰动法(频率法),以及近年来发展起来的相关辨识法。用这些方法求取的数据可以互相转换,这是由于被控对象的数学模型是反映系统本身固有性质的,与其输入信号的性质无关。

扰动下被控变量随时间变化而变化的曲线,称为响应曲线或称为飞升曲线,或者通称为动态特性。响应曲线直观,便于分析物理过程,可用于控制系统的近似整定计算,易通过数学处理转换成其他形式,或计算出传递函数。本章着重介绍如何计算传递函数。

当被控对象受到安全限制、不能作阶跃扰动试验时,常改作矩形脉冲扰动试验。矩形脉冲扰动的响应曲线不直观,不便于数学加工,所以需把矩形脉冲扰动下的响应曲线转换成阶跃扰动下的响应曲线。

各种频率的正弦波扰动下的对象响应称为频率特性。频率法的测试时间很长,但便于分析被控对象的频率特性和计算控制系统。为了使被控对象动态特性易于理解和计算,频率特性可转换成阶跃响应曲线,或拟合出传递函数。

矩形脉冲法和正弦波频率法在很多著作中都有叙述,本书不予阐述。

在分析或计算控制系统时,目前最常用的是描述被控对象数学模型的传递函数。下面着重介绍从阶跃响应曲线求取传递函数的方法。

二、动态特性试验前的准备工作

(一) 试验目的

在作动态特性试验之前,首先要明确试验目的。明确了试验目的,才能确定主要的测量参数、扰动变量、试验条件、判断试验准确度的参考参数(可能的扰动量或间接估计的

扰动量)。

不同的试验目的,其准备的内容、试验条件、主要的测量参数和参考参数都是不同的。例如保持锅炉出口汽温、汽压为常数,求取再热器调温挡板扰动下再热汽温的动态特性时,参考参数有锅炉出口汽温、汽压等参数。事前应将锅炉出口汽温、汽压控制系统投入自动,并具有良好的控制品质。如果求取的是不保持锅炉出口参数的、在再热器调温挡板扰动下再热器出口汽温的动态特性,则除测量再热汽温外,还需测量锅炉出口蒸汽参数,如减温喷水量、汽轮机调速汽门开度等参数。

在一次试验中往往要解决几个问题,即有多个试验目的,这时应综合各试验目的进行准备工作。对于不同的试验目的,应临时改变试验条件,同时改变需记录的参数类别。

归纳起来试验目的一般有:

(1) 全面了解对象的动态特性:一台新机组,特别是新型机组投运之后,对它的性能不了解或了解不多时,运行人员和热控人员都需要全面了解机组的动态特性,以便选择合理的运行方式和控制方案。通常在对任何被控变量都不保持的工况下作动态特性试验。

(2) 确定被控变量:一般来讲,被控变量按机组运行要求确定。但是,有的被控变量,如球磨机的负载信号,对它有多种选择的可能,在组成和选择该信号时,希望尽量能满足下列要求:对控制变量,如给煤量,要求反应较灵敏,才能有好的控制品质;具有较为稳定的动态特性,如当煤质变化或钢球被磨损时,该变量仍能很好代表球磨机的负载信号,且静态特性、动态特性变化较小;负载信号与球磨机的其他信号,如球磨机入口负压、出口风粉混合温度,最好不要形成多变量对象的关系,这样对运行、调试都较为方便;尽量能代表球磨机的运行工况。

(3) 求取复合扰动时被控变量的动态特性:在研究单元机组协调控制系统、求取汽压和功率动态特性时,应建立燃料、送引风等控制变量按比例协调扰动的条件。为了取得几个扰动下较准确的动态特性,针对具体情况,专门求取复合扰动下的动态特性。

(4) 求取复合信号的动态特性:在热工自动控制系统中,常采用复合信号,如热量信号、烟气热流量信号等。在试验复合信号动态特性时,除正确组成复合信号外,还需注意改进复合信号的动态特性。

(5) 寻找合适的导前信号:为了提高燃煤锅炉的控制质量,选择合适的导前信号非常关键。该信号反应燃料扰动应尽量地快,并且最好只对燃料一种扰动有反应。在不同负荷下,放大系数变化不宜过大,动态特性重现性要好。

(6) 确定整定参数:在计算控制器整定参数时,需求取现场通常运行工况下、控制变量扰动下的被控变量的动态特性。

在确定前馈装置的算法(传递函数)和整定参数时,也需要作现场通常运行工况下的该扰动通道的动态特性。

(二) 扰动量大小的选择

明确试验目的后,需决定扰动量的大小。一般来说,扰动量选大些为好,这样,其他非期望扰动的影响相对减小,但这常常受到设备安全运行的限制,扰动量不能取得过大。限制扰动量的常常是受热面出口汽温或汽轮机高压缸部分温度变化的幅度和变化速度。试验

前应作扰动量的估计,并与有关技术人员和运行人员商量、确定。

(三) 测试仪表的准备工作

试验工作顺利与否,与测试仪表的完好程度有很大关系。测试仪表应完好,如走纸速度及变速装置准确;记录笔下墨水均匀;记录误差在仪表规定的范围内;具有足够的灵敏度,但不振荡;标记笔灵活好用;记录笔全量程移动时间在0.5s以内。与记录仪表相连接的变送器,其测量量程应选择合理,测量误差在允许范围内。

三、试验工作

(1) 试验之前,和运行人员讨论试验大纲,弄清试验目的、方法、步骤,以及安全措施。

(2) 试验人员分工明确,如联系工作、试验工况记录、试验仪表管理。及时分析试验结果,以便决定试验内容和次数。

(3) 将各操作变量稳定一段时间(大于各通道被测参数的反应时间),如果在这段时间里被测参数是稳定的,则是真正的稳定工况。试验数据准确与否,与试验工况是否真正稳定有很大关系。

(4) 将机组参数稳定在适当的数值,以便扰动后参数的变化不致影响机组的安全运行。

扰动以阶跃形式一次加入,扰动的方向应使机组参数朝安全的方向变化。待试验工况稳定后,再作反方向扰动,使各参数恢复至初始参数值附近。试验最好作上下方向扰动各二三次。

(5) 试验数据要及时整理。某一工况试验完毕后,及时记录试验工况,记录仪表和变送器的量程,走纸速度和试验时的特殊情况。用原物理参数坐标画出响应曲线,算出绝对数值,并及时拟合成传递函数。如发现不足之处,应及时补作试验。

第二节 由简单响应曲线直接求取传递函数

所谓简单阶跃响应曲线是指在阶跃扰动下,响应曲线从原稳态值开始缓慢变化的曲线(实际微分环节的响应曲线典型而简单易计算,不在讨论之列),且曲线始终在时间坐标轴之上变化,如图1-1所示。

按响应曲线稳态情况不同,简单阶跃响应曲线可分三类:一类为有自平衡能力对象的响应曲线,如图1-1中的1、1'曲线;另一类为无自平衡能力对象的响应曲线,如曲线2;第三类为稳态值为零的响应曲线,如曲线3。

有的响应曲线有明显的迟延现象,宜把其中的迟延环节曲线分解出来。为

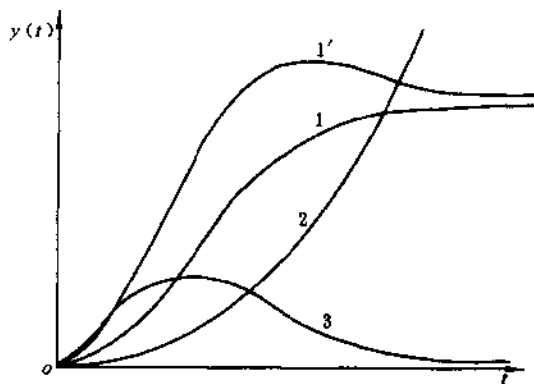


图 1-1 简单阶跃响应曲线

了使曲线上的点与拟合曲线上的点吻合得较好，可分解出迟延环节曲线。

对于连续控制系统，用根轨迹法作迟延环节图很麻烦，宜用伯德法将迟延环节传递函数分解成分式形式（见表 1-1），或者尽量不分解出系统中的迟延环节。

对于数字控制系统，迟延环节数学模型作 z 变换后，成为简单的重零点，用根轨迹法作图很方便，故宜保留迟延环节，或者为了简化计算，将高阶惯性环节用低阶惯性环节串以迟延环节代替，这样可以简化计算。

一、有自平衡能力对象响应曲线的拟合

热工被控对象的绝大多数是属于有自平衡能力的，并且属于多阶惯性环节。在拟合响应曲线传递函数时，一般先认为它是等容多阶对象的传递函数 $\frac{K}{(Ts+1)^n}$ ，在求取参数时往往发现，计算出的阶次 n 常常不是整数。如果与整数相差很小，可用相近的整数代替；如果与整数相差较大，可用 $\frac{K}{(Ts+1)^n (T_1s+1)}$ 传递函数逼近，或将对象串以迟延环节。如果阶次较低，则宜用 $\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$ 或 $\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)}$ 传递函数拟合，会得到较好的效果。

放大系数 K 很易计算，下面一般均取 $K=1$ 。

当曲线用 $\frac{K}{(Ts+1)^n}$ 传递函数拟合后，最好用表 1-1 中数据画点校核其准确性。如果响应曲线中部有一段在拟合曲线之上，或者曲线中部上升较快，宜采用 $1-s\sum \frac{c_i t^i}{(s+\alpha)^{i+1}}$ 或 $\frac{T_0s+1}{(Ts+1)^n}$ 传递函数拟合。如果响应曲线中部出现明显或不明显的峰值，宜用 $\frac{T_0s+1}{(Ts+1)^n}$ 或者 $\frac{K(T_3s+1)}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$ 传递函数拟合。

1. $\frac{K}{(Ts+1)^n}$ 、 $\frac{Ke^{-\tau}}{(Ts+1)^n}$ 传递函数参数的求取

对于传递函数为 $\frac{K}{(Ts+1)^n}$ 的对象，控制变量（或称为输入量） u 作阶跃扰动时，输出量 $y(t)$ 的响应曲线即为该传递函数所表示的微分方程式的解：

$$y(t) = uK \left\{ 1 - \left[1 + \frac{t}{T} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{T} \right)^2 + \cdots + \frac{1}{(n-1)!} \left(\frac{t}{T} \right)^{n-1} \right] e^{-\frac{t}{T}} \right\} \quad (1-1)$$

对于不同的 n ，在不同的 $\frac{t}{T}$ 时的 $y(t)$ 值的计算结果列入表 1-1 中。

从响应曲线最终稳态值求出放大系数 K ：

$$K = \frac{y(\infty)}{u} \quad (1-2)$$

式中 $y(\infty)$ —— 响应曲线最终稳态值。

从响应曲线求取传递函数中参数 n 、 T 时，先要求出代表响应曲线特点的参数值。

$y(t)$ 的一阶导数为

表 1-1

等容对象响应曲线数据

$\frac{y(t)}{uK}$ n	$\frac{t}{T}$	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0.393	0.632	0.865	0.950	0.982	0.993				
2		0.090	0.264	0.594	0.801	0.908	0.960	0.983	0.993		
3		0.014	0.083	0.323	0.577	0.762	0.875	0.938	0.970	0.986	
4			0.019	0.143	0.353	0.566	0.735	0.849	0.918	0.958	0.979
5				0.053	0.185	0.371	0.560	0.715	0.827	0.900	0.945
6				0.017	0.084	0.215	0.384	0.554	0.699	0.809	0.884
7					0.034	0.111	0.238	0.394	0.550	0.687	0.793
8					0.012	0.051	0.133	0.256	0.401	0.547	0.676
9						0.021	0.068	0.153	0.271	0.407	0.544
10							0.032	0.084	0.170	0.283	0.413
$\frac{y(t)}{uK}$ n	$\frac{t}{T}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1											
2											
3											
4		0.990									
5		0.971	0.985	0.999							
6		0.933	0.962	0.979	0.989						
7		0.870	0.921	0.956	0.974	0.986	0.993				
8		0.780	0.857	0.910	0.946	0.968	0.980	0.990			
9		0.667	0.768	0.845	0.901	0.938	0.963	0.978	0.987		
10		0.542	0.660	0.758	0.834	0.891	0.930	0.957	0.974	0.985	0.991

$$y'(t) = \frac{uK}{T} e^{-\frac{t}{T}} \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^{n-1}}{(n-1)!}$$

$y(t)$ 的二阶导数为

$$y''(t) = \frac{uK}{T^2} e^{-\frac{t}{T}} \left[\left(\frac{t}{T} \right)^{n-2} - \frac{(n-1)}{T} \left(\frac{t}{T} \right)^{n-1} \right]$$

令 $y''(t)=0$, 可求出响应曲线的拐点时间 t_0 :

$$t_0 = T(n-1) \quad (1-3)$$

响应曲线在拐点时的值为

$$y(t_0) = uK \left\{ 1 - \left[1 + (n-1) + \frac{(n-1)^2}{2!} + \frac{(n-1)^3}{3!} + \dots + \frac{(n-1)^{(n-1)}}{(n-1)!} \right] e^{-(n-1)} \right\} \quad (1-4)$$

响应曲线在拐点的一阶导数 y'_0 为

$$y'_0 = \frac{uK}{T} \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-(n-1)}$$

通过响应曲线拐点作切线, 可得其特征参数, 如图 1-2 所示。

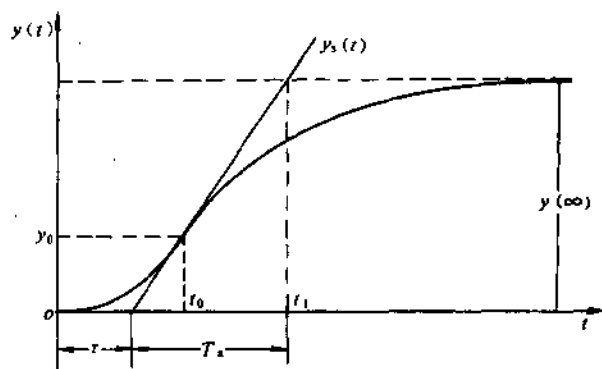


图 1-2 响应曲线及其特征数值示意

t_0 —响应曲线的拐点时间; t_1 —切线达到稳态值的时间;

T_s —对象的广义时间常数; τ —迟延时间; y_0 —响应曲线上拐点对应的输出数值

切线方程式为

$$y_s(t) = y_0 + y'_0(t - t_0)$$

所以

$$y_s(t) = uK \left\{ 1 - \left[1 + (n-1) + \frac{(n-1)^2}{2!} + \dots + \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} + \frac{(n-1)^n}{(n-1)!} \right] e^{-(n-1)} \right\} + \frac{uK}{T} \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-(n-1)} t$$

令 $y_s(t)=0$, 求出切线与时间坐标相交点的时间, 称为迟延时间 τ :

$$\tau = T \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-1}} \left\{ \left[1 + (n-1) + \frac{(n-1)^2}{2!} + \dots + \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} \right] \right\}$$

$$+ \frac{(n-1)^n}{(n-1)!} \Big] - e^{n-1} \Big\} \quad (1-5)$$

$y_s(t) = y_\infty$ 时, 求出切线达到稳态值 y_∞ 线的时间 t_1 :

$$t_1 = T \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-1}} \left[1 + (n-1) + \frac{(n-1)^2}{2!} + \dots + \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} + \frac{(n-1)^n}{(n-1)!} \right] \quad (1-6)$$

广义时间常数 T_s 为

$$T_s = t_1 - \tau = T \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-1}} e^{-(n-1)} \quad (1-7)$$

我们知道, 具有自平衡能力的对象还可以用飞升速度 ϵ 、自平衡系数 ρ 和迟延时间 τ 表示。 ϵ 、 ρ 、 τ 与前述参数之间的关系为

$$\epsilon = \frac{K}{T_s} = \frac{K}{T} \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-(n-1)}$$

$$\rho = \frac{1}{K}$$

迟延时间的定义与前述相同。

$$\epsilon \rho \tau = \frac{\tau}{T_s} = \left[1 + (n-1) + \frac{(n-1)^2}{2!} + \dots + \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} + \frac{(n-1)^n}{(n-1)!} \right] e^{-(n-1)} - 1 \quad (1-8)$$

利用响应曲线上的特征数值, 如 y_0 、 T_s 、 τ 等, 根据式(1-2)至式(1-8), 可计算出传递函数中的参数。为了计算方便, 对于不同阶次 n , 把有关特征参数计算结果列入表 1-2。

表 1-2 特征参数值

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
特征参数值									
$y_0/(uK)$	0.264	0.323	0.353	0.371	0.384	0.394	0.401	0.408	0.413
τ/T_s	0.104	0.218	0.319	0.410	0.493	0.570	0.642	0.709	0.773
T/T_s	0.368	0.271	0.224	0.195	0.176	0.161	0.149	0.140	0.132
T/τ	3.55	1.24	0.702	0.476	0.356	0.282	0.232	0.197	0.170
T/t_0	1.00	0.500	0.333	0.250	0.200	0.167	0.143	0.125	0.111
T/t_1	0.333	0.222	0.170	0.139	0.118	0.1023	0.0908	0.0817	0.0743

在响应曲线上作切线, 求出 y_0 和 $\frac{\tau}{T_s}$ 值, 按 y_0 、 $\frac{\tau}{T_s}$ 从表 1-2 查出等容对象的阶数 n 。如果 n 的查表值与计算值基本相同, 便可认为此对象是等容的(如果需要进一步核实, 根据表 1-

1,再核对 t_0 前后若干点的 y 值)。然后由 T_s (或 τ, t_0, t_1)值计算出对象的时间常数 T 。

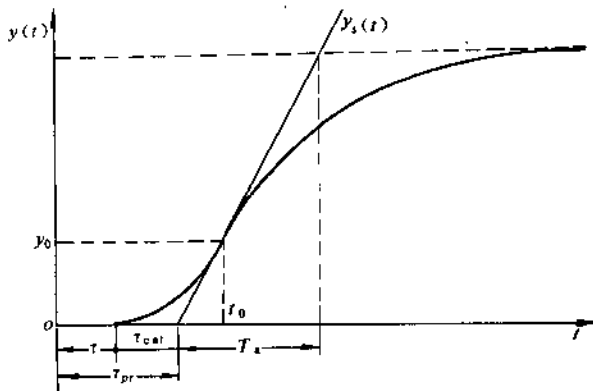


图 1-3 具有纯延迟时间的响应曲线及其特征数值示意

如果由 y_0 查出的 n 值比由 $\frac{\tau_{pr}}{T_s}$ (实际延迟时间与广义时间常数之比)查出的 n 值小得多时,说明该对象可能有纯延迟环节存在。对象的纯延迟时间为

$$\tau = \tau_{pr} - \tau_{cal}$$

式中 τ ——纯延迟时间;

τ_{pr} ——实际延迟时间;

τ_{cal} ——计算延迟时间。

图 1-3 给出了具有纯延迟时间的响应曲线及其特征数值示意。

放大系数 K 很易用下式求出:

$$K = \frac{y(\infty)}{u}$$

最终得到响应曲线的传递函数 $W(s)$:

$$W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{(Ts + 1)^n}$$

2. $\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \frac{Ke^{-\tau s}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$ 传递函数参数的求取

由于 K 值很容易计算出,且 K 值不影响 T_1, T_2 值,故设 $K=1$ 。先讨论 $W(s) = \frac{1}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$ 传递函数参数的求取。它的单位阶跃响应为

$$y(t) = 1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}}$$

其响应曲线和图 1-2 所示曲线相类似。

$y(t)$ 的一阶和二阶导数分别为

$$y'(t) = -\frac{1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}}$$

$$y''(t) = \frac{1}{T_1(T_2 - T_1)} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{1}{T_2(T_2 - T_1)} e^{-\frac{t}{T_2}}$$

为了确定响应曲线的拐点时间 t_0 ,令 $y''(t)=0$,得到

$$t_0 = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2 A}{A - 1} \ln A \quad (1-9)$$

式中: $A = \frac{T_1}{T_2}$, 因此

$$\frac{t_0}{T_2} = \frac{A}{A-1} \ln A \quad (1-10)$$

响应曲线在拐点时间 t_0 的斜率为

$$y'(t_0) = \frac{1}{T_2 - T_1} \left[\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{T_1}{T_2 - T_1}} - \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - T_1}} \right]$$

或
$$y'(t_0) = \frac{1}{T_2(1-A)} [A^{\frac{1}{1-A}} - A^{\frac{1}{1-A}}] \quad (1-11)$$

由于 $y'(t_0) = \frac{1}{T_s}$, 因此从上式可计算出广义时间常数的相对值 T_s/T_2 :

$$\frac{T_s}{T_2} = \frac{1-A}{A^{\frac{1}{1-A}} - A^{\frac{1}{1-A}}} \quad (1-12)$$

响应曲线在拐点的值 $y(t_0)$ 为

$$y(t_0) = 1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{T_2}{T_2 - T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{T_1}{T_2 - T_1}}$$

或
$$y(t_0) = 1 + \frac{A}{1-A} (A)^{\frac{1}{1-A}} - \frac{1}{1-A} (A)^{\frac{A}{1-A}} \quad (1-13)$$

此响应曲线的切线方程 $y_s(t)$ 为

$$y_s(t) = y(t_0) + y'(t_0)(t - t_0)$$

将式(1-9)、式(1-11)、式(1-13)代入上式, 得到以下切线方程式:

$$y_s(t) = 1 + \frac{A}{1-A} (A)^{\frac{1}{1-A}} - \frac{1}{1-A} (A)^{\frac{1}{1-A}} + \frac{1}{T_2(1-A)} (A^{\frac{A}{1-A}} - A^{\frac{1}{1-A}}) (t - t_0)$$

当切线方程式 $y_s(t) = 0$ 时, 即切线与时间坐标相交, 可得到迟延时间 τ :

$$\tau = t_0 - y(t_0)/y'(t_0)$$

将式(1-9)、式(1-11)和式(1-13)代入上式, 经运算, 得到迟延时间的相对值 τ/T_2 :

$$\frac{\tau}{T_2} = \frac{A}{A-1} \ln A - [1 - A + A(A)^{\frac{1}{1-A}} - (A)^{\frac{A}{1-A}}] / (A^{\frac{A}{1-A}} - A^{\frac{1}{1-A}}) \quad (1-14)$$

由式(1-12)和式(1-14)可推导出迟延时间与广义时间常数的比值 τ/T_s :

$$\frac{\tau}{T_s} = \frac{-A}{(1-A)^2} \ln A (A^{\frac{A}{1-A}} - A^{\frac{1}{1-A}}) - \left[1 + \frac{A}{1-A} (A)^{\frac{1}{1-A}} - \frac{1}{1-A} (A)^{\frac{A}{1-A}} \right] \quad (1-15)$$