

前 言

本书是根据1982年12月“热工仪表与自动控制教材编审小组会议”通过的《热工自动控制系统》教学大纲编写的。它是电厂热工测量及自动化专业的一门专业课教材，也可供从事过程自动控制工作的技术人员参考。

本书内容为电厂中以常规控制仪表构成的主要热工自动控制系统。编写过程中着重分析和应用，力求做到理论联系实际，反映七十年代以来热工自动控制方面的新系统、新技术。关于计算机控制方面的内容，因教学计划设有专门的课程，故不包括在本书范围内。

本书由东北电力学院热工测量及自动化教研室张玉铎、王满稼编写，其中第一、二、六、七、八章、结束语和附录由张玉铎编写，概论及第三、四、五章由王满稼编写，全书由张玉铎统稿。

本书由西安交通大学翁思义副教授主审。主审人认真审阅了原稿，提出了许多宝贵意见，对此我们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在许多不妥和谬误之处，恳切希望使用本书的师生和读者批评指正。

编 者

1984年9月

目 录

前 言

概 论	1
第一节 引言	1
第二节 火力发电厂热工自动控制系统的发展	1
第三节 热工自动控制的主要内容	2
第一章 热工被控对象动态特性的试验研究方法	4
第一节 引言	4
第二节 时域试验建模方法	6
第三节 由阶跃响应曲线求被控对象传递函数的方法	9
第四节 频域试验建模方法	25
思考题与习题	29
第二章 单回路反馈控制系统	31
第一节 引言	31
第二节 被调量的选择	32
第三节 调节变量的选择和被控对象动态特性对控制质量的影响	33
第四节 调节器控制规律对控制质量的影响	39
第五节 测量元件和变送器特性对控制质量的影响	42
第六节 调节机构特性对控制质量的影响	44
第七节 单回路反馈控制系统的工程整定方法	46
第八节 调节器参数工程整定方法的理论分析	54
第九节 自动控制系统现场投运的一般步骤	63
思考题与习题	64
第三章 过热汽温和再热汽温自动控制系统	65
第一节 引言	65
第二节 过热器的动态特性	65
第三节 串级汽温控制系统	71
第四节 采用导前微分信号的双回路汽温控制系统	79
第五节 采用相位补偿的汽温控制系统	89
第六节 过热汽温分段控制系统	91
第七节 采用电子计算机控制的汽温控制系统	93
第八节 再热汽温控制系统	95
第九节 组装仪表构成的汽温控制系统	101
思考题与习题	102
第四章 汽包锅炉给水自动控制系统	103
第一节 引言	103

第二节 给水被控对象的动态特性	103
第三节 常用单级三冲量和串级三冲量给水控制系统	111
第四节 带冲击负荷锅炉的给水控制系统	125
第五节 变速泵的给水控制系统	130
思考题与习题	135
第五章 汽包锅炉燃烧过程自动控制系统	136
第一节 引言	136
第二节 燃烧过程被控对象的动态特性	137
第三节 并列运行锅炉燃烧控制系统的基本方案	147
第四节 具有中间储粉仓的煤粉炉燃烧控制系统	151
第五节 采用直吹制粉系统的锅炉的燃烧控制系统	158
第六节 燃油锅炉和煤油混烧锅炉的燃烧控制系统	165
第七节 燃烧控制系统的参数整定	169
第八节 设计和投入燃烧控制系统时应注意的几个问题	181
思考题与习题	183
第六章 强制循环锅炉自动控制系统	184
第一节 引言	184
第二节 直流锅炉的动态特性	185
第三节 直流锅炉的控制系统	190
第四节 低循环倍率锅炉的动态特性	201
第五节 低循环倍率锅炉给水控制系统	205
思考题与习题	207
第七章 单元机组负荷自动控制系统	209
第一节 引言	209
第二节 单元机组负荷控制的基本方案	211
第三节 协调控制系统的基本方案	215
第四节 单元机组负荷控制系统	220
第五节 单元机组的滑压控制系统	236
思考题与习题	242
第八章 单元机组全程自动控制系统	243
第一节 引言	243
第二节 过热汽温全程控制系统	244
第三节 给水全程控制系统	244
第四节 主蒸汽压力全程控制系统	256
第五节 直流锅炉全程控制系统	261
第六节 汽机升速和升负荷控制系统	264
思考题与习题	270
结束语	271
附录 调节阀特性	273
参考文献	278

概 论

第一节 引言

在科学技术高度发达的二十世纪，在工程和科学发展中，自动控制技术的发展起着极为重要的作用。所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下，通过控制设备使被控对象或生产过程自动地按照预定的规律运行。在热力发电厂的生产过程中，也毫无例外地采用了自动控制技术。随着电能需求量的日益增加，单机容量的不断扩大，自动化技术在热力发电厂中应用的深度和广度与日俱增，形成一门独立的学科——《热力发电厂热工自动控制系统》。该学科正日新月异地发展着。

热工自动控制系统是一门介于许多学科之间的学科，它渗透了各种专业知识，如自动控制理论、自动控制设备、计算机技术、热力发电厂运行知识以及一些其他方面的知识。现代电子技术和近代控制理论的发展，为这门学科提供了优良的设备和先进的理论。多输入、多输出、变参数、非线性、高精度、高效能的控制系统方面的内容将逐渐在这门学科中涌现出来。

第二节 热力发电厂热工自动控制系统的发展

任何一门学科的发展都不能脱离社会生产的需要，热工自动控制系统也是随着社会生产力和科学技术的发展而逐渐发展起来的。早期的热工自动控制系统是非常简单的，因为当时热力发电机组的单机容量都很小，对控制系统的要求也不高，只要求对给水、汽温、汽压和汽机的转速作简单的控制，这些控制系统大多分散在锅炉和汽机车间就地安装，整个电厂的机、炉、电也是分散控制的。

随着现代科学技术的发展，发电机组已由过去的中温、中压、中小容量发展到现今的大容量、高参数的单元机组。对于这种大型的发电设备，要求有更高的可靠性和自动化水平，否则它的事故会给电网造成巨大的损失。因此，在大型机组中，热工自动控制系统显得尤为重要，它不仅提高了劳动生产率和电能质量，降低发电成本，改善劳动条件，而且为大型机组的安全、经济、满发提供了可靠的保证。

实现大型机组的热工自动化，必须把机、炉、电看成一个整体，从整体的观念来设计自动控制系统和中央控制室的结构。

就现代大型电厂而言，在中央控制室里，操作台上装有各种操作按钮和开关，在操作台后的立盘上装有机、炉、电的各种检测仪表和纪录仪表、报警装置，值班人员坐在操作台前就可对汽机、锅炉、发电机的运行状态进行全面监视和操作。汽机、锅炉、发电机的运行是由装在机房里的自动控制设备进行控制的，值班人员只是对整个运行情况作监督、

检查，在发现异常情况时进行人工处理。现代大型热力发电厂是具有高度自动化的、进行文明生产的工厂，这也就是热工自动控制系统在电厂中起着非常重要作用的根本原因。

第三节 热工自动控制的主要内容

发电厂热工过程自动控制主要包括以下几个内容：

(1) 自动检测：自动地检查和测量反映生产过程进行情况的各种物理量、化学量以及生产设备的工作状态参数，以监视生产过程的进行情况和趋势，称为自动检测。它所使用的检测设备有常规的模拟量仪表、巡回检测数字式显示仪表，还有图象显示、自动记录和报警装置。

(2) 顺序控制：根据预先拟定的程序和条件，自动地对设备进行一系列操作，称为顺序控制。顺序控制也称自动操作，又称程序控制，在发电厂中主要用于主机或辅机的自动启动和停止。如汽机的自动启停程序控制和磨煤机自动启停程序控制等。

(3) 自动保护：在发生事故时，自动采取保护措施，以防止事故进一步扩大或保护生产设备使之不受严重破坏，称为自动保护，如汽机的超速保护、发电设备的过电压、过电流保护以及锅炉的超压保护等。

(4) 自动控制：自动地维持生产过程在规定的工况下进行，又称为自动调节。

生产过程中必须保证产品满足一定的数量和质量要求，同时也要保证生产的安全和经济，这就要求生产过程在预期的工况下进行。但是，生产过程总是会经常地受到各种因素的干扰和破坏，使运行工况偏离正常情况，必须通过自动控制随时消除各种干扰，保证正常运行。更为严重的是有时自动控制系统本身也要发生故障，这就要求在设计自动控制系统时，考虑各种可能发生的故障，并加以自动保护。因此，现代的自动控制系统往往包含有自动保护、自动检测、自动报警、顺序控制等内容。有时，它们有机地组合成一个不可分割的整体，以确保控制系统的安全可靠。

热力发电设备的自动控制任务是相当复杂而艰巨的，除了对主机（锅炉——汽轮发电机组）进行自动控制以外，还有许多辅助设备也要进行自动控制，如除氧器、凝汽器、减温减压器、加热器、磨煤机、化学水处理设备等。由于采用的工艺设备不同，如直流锅炉和汽包锅炉，它们的控制方法也相应有所区别。另外，由于采用不同的控制仪表，如DDZ-II型、组装表TF和MZ-III、微处理机等，可组成不同的控制系统，使系统的结构更加复杂化。

由于电能无法存储，而大型机组的停电事故，将对电网安全造成严重威胁，一般大型机组投入运行以后，要求有较长时间的安全运转周期，以确保安全经济供电。因此对热工自动控制设备与系统提出了如下的一些要求。首先，要求工作可靠，即在长时间连续工作情况下，系统设备不能出现故障。第二，要求系统中具有专用的监控装置，该装置对系统的工艺设备、电（气）源等工作情况进行监视，故障时可将系统自动地切换到安全状态，并发出声光报警信号；具有系统安全联锁、防止误操作的装置；控制系统能进行软手操和紧急手操，在任何情况下都有操作手段；能进行双向平衡无扰切换，防止操作失灵。第

三，要求控制系统的设备具有抗干扰能力。电厂中的发电设备具有很强的电、磁场干扰作用，控制系统的工作环境污染严重。因此，控制设备必须采取浮空、光电隔离、防爆防尘等技术措施。第四，要求控制系统的使用与维修方便，构成系统的整套仪表线路标准化和通用化，原理易于掌握，状态显示明确，易于监视；模件化结构和组件的功能，使备品备件数量减少，备件更换迅速，无需重新整定参数，提高仪表的利用率；应有专用的检验装置，简化校验工作，容易判断故障部位；在仪表面板上应设有测试插孔，控制台的构造应便于检修和接线，使信号的测试和参数的整定大为方便。只有具备了上述要求的控制系统，才能较好地满足热工自动控制的要求，保证热力发电厂发电设备的安全经济运行。

由于篇幅所限，本书主要研究锅炉、汽机的热工控制系统。如汽温控制系统、给水控制系统、燃烧控制系统、直流炉控制系统、协调控制系统、全程控制系统等。至于热力发电厂中辅助设备的控制系统，由于它的结构比较简单，本书就不再讨论了。

近代科学技术正飞跃发展，尤其是电子计算机技术的发展，促使世界工业进行第四次产业革命。可以预料，今后在热工自动控制系统中微处理机或计算机的控制系统将会逐渐增多和成熟起来。相信不久的将来，我国的热工自动化水平将会达到一个新的更高的高度。

第一章 热工被控对象动态特性的试验研究方法

第一节 引言

任何一个自动控制系统，都是由被控对象（工艺设备）和自动控制设备（变送器、调节器、执行器、……）两大部分组成。只有掌握了它们各部分的动态特性（动力学），并把它们合理地构成控制系统，才能实现人们预期的控制目的。控制系统设计、使用的好坏，在很大程度上取决于对被控对象动态特性了解的程度。事实证明，对于复杂被控对象的控制之所以不成功，往往是由于对被控对象的动态特性了解不准确造成的。被控对象的动态特性是指被控对象的输入（扰动）发生变化时，其输出随时间变化的规律。研究被控对象的动态特性实际上就是建立被控对象的动态数学模型，即用数学方程（代数方程、微分方程或差分方程）来描述被控对象各变量间的关系。

研究被控对象动态特性的目的具体说来有以下几个方面：

（1）设计合理的自动控制系统。从控制理论中设计控制系统的原则知道，只有准确地掌握了被控对象的动态特性，才能确定最优的控制规律，设计出合理的控制系统。遗憾的是，在目前热工自动控制中，由于人们还不能充分掌握热工被控对象的动态特性，往往只能对控制系统进行定性分析，这也是不能很好利用控制理论来设计、分析控制系统的原因之一。

（2）对工艺设备（被控对象）的设计提出合理的要求和建议。目前，被控的工艺设备的设计制造主要以静态特性为依据。如果通过对被控对象动态特性的研究，得出被控对象的结构和参数对动态特性的影响，则可对工艺设备提出具体的设计要求或合理的改进意见，使工艺设备具有良好的动态特性，为设计满意的控制系统创造先决条件。

（3）确定控制系统的最佳整定参数。只有掌握了被控对象的动态特性，才有可能应用控制理论计算确定控制系统的最佳整定参数。另外，根据已掌握的动态特性，可以对控制系统进行仿真，研究系统性能，或者制成模拟培训装置，训练运行人员。

被控对象的动态特性通过两个途径获得，即理论建模或试验建模，或者把二者结合起来。理论建模是根据基本的物理、化学定律和工艺参数，在一定的假设条件下，导出被控对象的数学模型。这种方法一般只用来描述新研制的被控对象动态特性。试验建模是从试验数据中分析、计算出数学模型，即先根据经验或数据分析确定模型的结构，然后由试验数据确定其未知参数。试验建模的过程又称为系统辨识（识别）。热工被控对象都是相当复杂的设备和系统，它们的数学模型相当复杂，采用理论建模方法获得其数学模型相当困难，或者说需要用很复杂的数学模型来描述其动态特性。在工程上，主要借助于试验建模方法来获得可靠的被控对象数学模型。用理论建模方法得到的数学模型，也要用试验方法进行验证。事实证明，对于一些复杂的生产过程，用一个近似的数学模型来描述其动态特

性，完全能够设计出满意的控制系统。

试验建模的步骤以及它们之间的关系如图 1-1 所示。首先根据建模目的以及人们对工艺流程已有的认识，确定模型的结构，并进行试验设计；然后按照试验设计的要求取得必要的输入、输出数据，最后进行参数的估计、模型的核验等工作。下面对图 1-1 中有关部分作进一步说明。

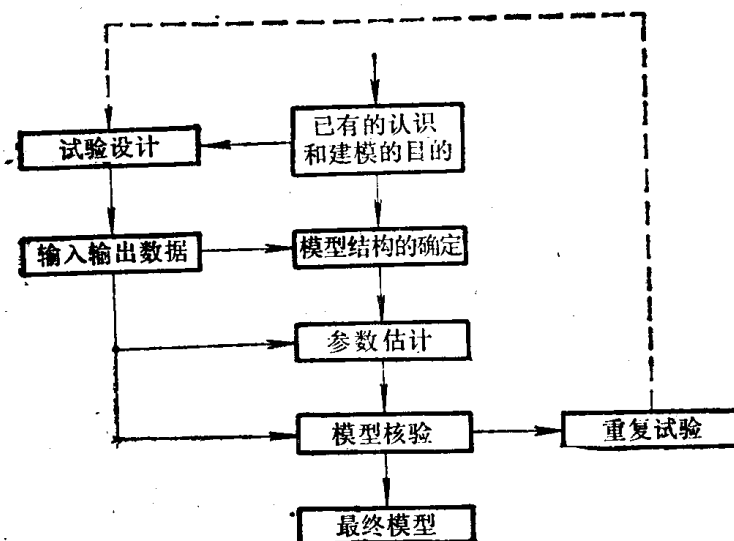


图 1-1 试验建模步骤方框图

(1) 试验设计：根据被控对象的特点及具备的试验条件，确定采用何种试验建模方法（时域、频域还是统计的方法），同时考虑好实现试验的各个细节，如输入信号的类型、幅值、频率等的选择，采样速度、试验期限以及试验中应采取的各种相应的措施等。

(2) 模型结构的确定：根据建模目的和对工艺流程已有的认识，初步确定模型的结构，即模型的类型和阶次是时域的还是频域的，是集中参数的还是分布参数的……。模型结构确定得是否正确，可由试验数据加以核验。

(3) 参数估计：根据模型结构及试验取得的输入、输出数据，确定模型中的未知参数。确定模型中未知参数是本章讨论的主要内容。

(4) 模型核验：核验的目的是确定已建立的数学模型是否真实地反映被控对象的动态特性。通常采用的核验方法是比较模型的计算值与实测值之间的偏差是否满足一定的指标函数。如不满足，可重新进行模型结构的选择和试验设计。

按照被控对象输入信号形式的不同，试验建模方法有三种：时域法（飞升曲线法）、频域法、统计法。

统计法是向被控对象输入白噪声型扰动，将输入、输出信号的数据进行数学运算和处理后获得数学模型。此法的优点是输入信号幅值小，在某些情况下可不加白噪声型信号，仅利用正常运行时的输入、输出信号，即可求得对象的数学模型。用统计法建模需要对大量数据进行复杂的数学运算，但随着电子计算机的发展和各种标准辨识程序的出现，统计法建模已愈来愈为人们所重视。统计法建模内容不在本书包括的范围内，有兴趣的读者可参阅有关书籍。本章主要内容是介绍时域和频域试验建模方法。

第二节 时域试验建模方法

时域试验建模方法的原理是人为地加入一个特定的扰动，测定被控对象的响应曲线，然后根据响应曲线求得对象的传递函数。图 1-2 为被控对象响应曲线测定系统的方框图，其中记录仪表用专用的快速记录仪，或者用多笔的 $x-y$ 记录仪（用其他类型的快速记录仪也可）。记录仪除记录被控对象的输入、输出信号之外，同时还记录影响被控对象输入、输出信号的有关参数，以供分析试验结果时参考。

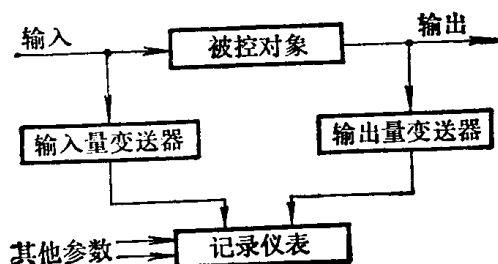


图 1-2 被控对象响应曲线测定系统方框图

也可用电子计算机测定响应曲线。计算机具有快速处理数据的能力。当测得全部数据之后，按事先编排好的程序能立即算出被控对象的传递函数。

测定响应曲线时用的标准（典型）输入信号如图 1-3 所示，图中 (a) 所示为阶跃信号，其对应的随时间变化的输出信号曲线称为阶跃响应曲线（或称飞升曲线）。

阶跃响应曲线能比较直观地反映被控对象的动态特性，特性参数数据直接取自记录曲线，无须中间转换；试验方法也很简单。阶跃信号是最常用的输入信号。除此之外，也可以采用图 1-3(b) 所示的矩形方波信号，其对应的响应曲线称为方波响应曲线。一般情况下不采用矩形方波信号。

一、测定阶跃响应曲线的方法

根据阶跃响应曲线可以清楚地判别对象的性质，试验原理也很简单。但是，在生产实际中使用时会碰到一系列困难。首先，工艺设备（被控对象）正常运行时总会存在着各种各样的随机干扰，使试验结果产生畸变，在分析试验结果时难于分辨试验输入信号和随机干扰对输出的影响；其次，工艺设备运行时往往不允许工艺参数作大幅度的变动，这给阶跃响应试验带来一定的限制；再其次，不可能得到真正的阶跃输入信号，因为调节机构只能以有限的速度动作；最后，工艺设备的缺陷和非线性会影响试验结果的准确性。上述问题的存在，严重时甚至使阶跃响应特性试验无法进行。总之，在测定阶跃响应曲线时，随机噪声是一个必须认真考虑的问题，只有在足够高的信噪比条件下，测试结果才是有效的。

鉴于以上情况，为保证试验结果准确，在测定阶跃特性曲线时，应注意以下一些问题：

(1) 根据设备运行条件选择合适的输入信号幅值。为了区别试验输入信号与随机干扰信号，应保证有足够大的输入信号幅值。但要注意输入信号幅值过大可能引起输出信号超过允许的变化范围。一般输入信号的幅值取被控对象额定负荷的 10%~15%。

(2) 在试验开始前，应将工艺设备调整到适当的初始工况。如作负荷上升扰动的响应曲线，则应将被控对象输出调整到允许变动范围的下限值；反之，则应将被控对象输出调

整到允许变动范围的上限值。这就保证在试验过程中输出信号在允许范围内变化,能获得一条完整的试验曲线。

在调整到预定的初始工况后,要使工艺设备稳定运行一段时间,然后再开始进行试验。

(3) 由于受执行器动作速度的限制,输入信号不可能是理想的阶跃信号,如图1-4所示。图中 $\mu(t)$ 曲线为调节阀开度随时间变化的曲线,处理数据时可认为阶跃信号是在 $\frac{t_1}{2}$ 时加入的。

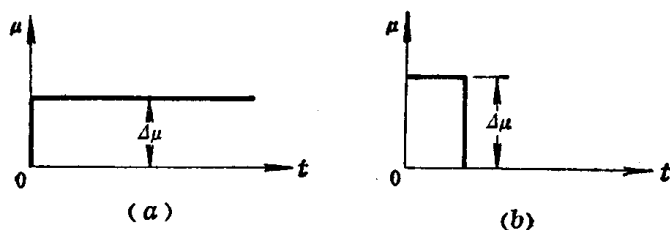


图 1-3 典型输入信号的形式
(a)阶跃信号; (b)矩形方波信号

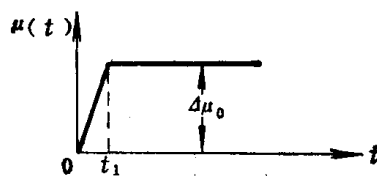


图 1-4 调节阀开度随时间变化的曲线

(4) 在整个试验过程中,应尽量避免一切不必要的操作,并要采取措施防止各类干扰的发生。

(5) 要特别仔细记录阶跃响应曲线初始阶段的数据,因为这部分数据的准确性对确定动态特性参数的影响很大。对于有自平衡能力的对象,当输出信号接近达到新的稳态值时,输出信号变化很慢,一定要耐心等待足够长的时间,一直到输出信号达到新的稳态值。另外,对于有自平衡能力的对象,当输入信号幅值过大而使输出信号的稳态值超过对象允许的变化范围时,应该立即改做方波响应试验,不可错误地认为被控对象是无自平衡能力对象。

(6) 为了获得一条准确的阶跃响应曲线,在相同的试验条件下应重复试验几次,试验结果中至少要有两条基本相同的曲线。

(7) 应测定输入信号上升和下降两个方向变化的阶跃响应曲线,若二者无明显差别时,取其动态参数的平均值作为对象的动态参数;否则,应对两种情况分别进行分析。

(8) 除记录被控对象输入、输出信号外,还应记录可能影响输入、输出信号的其他主要参数,供分析试验结果时参考。

(9) 热工被控对象一般均存在非线性特性,其动态特性随负荷不同而有所区别。因此,应测出不同负荷时的动态特性,以便在设计、分析、整定控制系统时,考虑到最差的动态特性情况。

(10) 试验测定的被控对象动态特性与实际的动态特性是有区别的,前者包括了测试仪表本身的动态特性,在试验结果中除去测试仪表动态特性的影响是很困难的,所以,应选用滞后和惯性较小的测试仪表,使其对测试结果的影响减小到可以忽略的程度。

二、测定方波响应曲线的方法

在采用阶跃响应曲线方法确定对象动态特性时,往往会使被控对象的输出信号超出允

许值,对于无自平衡能力对象就是如此。即使是对于有自平衡能力的对象,若输入的阶跃信号幅值较大,也可能使输出信号超过允许值。如果降低输入信号幅值,又会增大干扰对试验结果的影响。为解决上述矛盾,可采用矩形方波形式的输入信号,其响应曲线如图

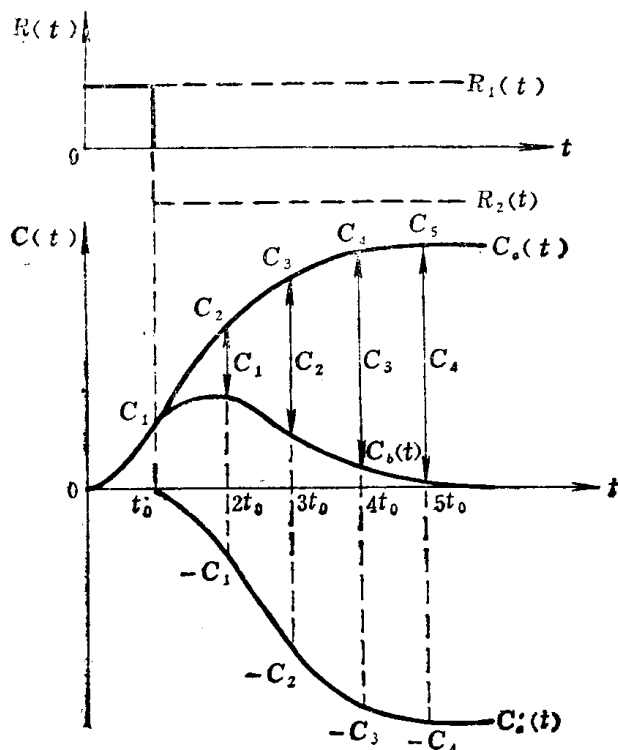


图 1-5 被控对象的方波响应曲线

1-5所示,图中曲线 $C_b(t)$ 为有自平衡能力对象的方波响应曲线。在测定方波响应曲线过程中,除应遵循前述进行阶跃响应曲线测试时各项注意事项外,尚须注意以下两点:

(1) 适当选择方波的幅值和宽度。输入信号幅值可比阶跃信号大一些,一般可达额定负荷的20%~30%。应根据被控对象的滞后和惯性选择方波宽度。方波宽度过窄,将使输出变化幅值过小,降低了测试精度;方波宽度过宽,可能使输出信号超过允许值。对滞后和惯性较大的对象进行测试时,当输出信号未达到允许的最大值之前的某一时刻,就应使方波输入信号恢复到初始值。但是,被控对象的滞后和惯性正是试验中要求测定的

的参数,在试验之前是未知数,为此,在正式测试之前,先用不同宽度的矩形方波进行几次试探性的试验,以选择合适的方波宽度,然后再进行正式测试。

(2) 必须保证输入信号真正恢复到原来的初始值。由被控对象动态特性分析可知:对有自平衡能力的对象,方波响应曲线最后应恢复到初始值;对无自平衡能力的对象,方波响应曲线在稳态时应是一条有残余偏差的水平线。在进行试验时,如果不能保证方波输入信号恢复到初始值,或者由于测试仪器的误差,使对象的方波响应曲线稳态时具有残余偏差,这就有可能将有自平衡能力的对象误认为是无自平衡能力的对象。这个问题在进行方波响应曲线测试时要特别注意。

方波响应曲线与阶跃响应曲线有密切关系,一旦获得了对象的方波响应曲线,就能很容易地由它求得阶跃响应曲线。设被控对象的动态特性是线性的,根据迭加原理可以认为方波响应曲线是由两个方向相反、起始时间相差方波宽度的两个阶跃响应曲线迭加的结果。在图1-5中, $C_b(t)$ 为方波响应曲线, $C_a(t)$ 、 $C'_a(t)$ 为两个方向相反的阶跃响应曲线。输入信号 $R(t)$ 可分解为

$$R(t) = R_1(t) - R_2(t) \quad (1-1)$$

因为

$$R_2(t) = -R_1(t - t_0) \quad (1-2)$$

所以

$$R(t) = R_1(t) + R_1(t - t_0) \quad (1-3)$$

式中 $R(t)$ ——方波输入信号;

$R_1(t)$ ——正向阶跃输入信号;

$R_2(t)$ ——反向阶跃输入信号;

t_0 ——方波宽度。

相应的方波响应曲线与阶跃响应曲线关系是

$$C_b(t) = C_a(t) + C'_a(t) \quad (1-4)$$

式中 $C_b(t)$ ——方波响应曲线;

$C_a(t)$ ——正向阶跃输入 $R_1(t)$ 的响应曲线;

$C'_a(t)$ ——反向阶跃输入 $R_2(t)$ 的响应曲线。

正、反方向阶跃输入信号的方向相反,在时间上相差一个方波宽度 t_0 ,即它们有下述关系:

$$C'_a(t) = -C_a(t - t_0) \quad (1-5)$$

于是阶跃响应曲线 $C_a(t)$ 可表示为

$$C_a(t) = C_b(t) - C_a(t - t_0) \quad (1-6)$$

从 t_0 时刻开始,根据式(1-5)由 $C_a(t)$ 曲线上的 C_1 点得到 $C_b(t)$ 曲线上的 $-C_1$ 点,根据式(1-6)得到 $C_a(t)$ 曲线的 C_2 点,如此类推可得到 C_3 、 C_4 、…点,如图1-5所示。

第三节 由阶跃响应曲线求被控对象传递函数的方法

阶跃(或方波)响应曲线形象地表示了被控对象的动态特性。但是,这种表达形式不便于控制系统的分析和综合,往往需要由响应曲线求得传递函数。在工程上,为了减少计算工作量,常用近似的方法来确定被控对象的传递函数,其基本方法是:先根据阶跃响应曲线的几何形状,选定被控对象传递函数的形式,然后通过作图或计算,确定传递函数中的未知参数。由阶跃响应曲线求传递函数的方法很多,现分别叙述如下。

一、确定有自平衡能力的一阶对象传递函数的方法

1. 无滞后的有自平衡能力的一阶对象

这种被控对象的阶跃响应曲线如图1-6所示。在阶跃输入信号作用下,其响应曲线初始阶段斜率不是零,而是最大值,然后斜率逐渐减小,当响应曲线上升到稳态值 $C(\infty)$ 时,斜率下降到零。这种被控对象为一阶惯性环节,其传递函数为

$$W(s) = \frac{K}{1 + Ts} \quad (1-7)$$

式中 K ——被控对象放大系数;

T ——被控对象时间常数。

这时需要确定的参数为 K 和 T 。用作图法求 K 、 T 的步骤如下:

(1) 画一条相应于 $C(\infty)$ 的水平线;

(2) 按下式计算被控对象的放大系数:

$$K = \frac{C(\infty)}{R_0} \quad (1-8)$$

式中 R_0 ——阶跃输入信号的幅值。

(3) 作阶跃响应曲线起始点的切线，切线与 $C(\infty)$ 线相交，这段切线在时间轴上的投影即为时间常数 T ，如图1-6中所示。

由于切线不容易画准确，也可利用一阶惯性环节的阶跃响应曲线方程直接计算时间常数 T ，即在阶跃响应曲线上找出对应 $0.5C(\infty)$ 时的时间 $t_{0.5}$ ，或者对应 $0.63C(\infty)$ 时的时间 $t_{0.63}$ ，然后利用下述公式计算时间常数 T ：

$$T = 1.44t_{0.5} \quad (1-9)$$

或

$$T = t_{0.63} \quad (1-10)$$

2. 具有纯滞后有自平衡能力的一阶对象

若试验测得的阶跃响应曲线为 S 形状的非周期曲线（如图1-7所示），则曲线可用具有纯滞后的一阶惯性环节的传递函数近似表示：

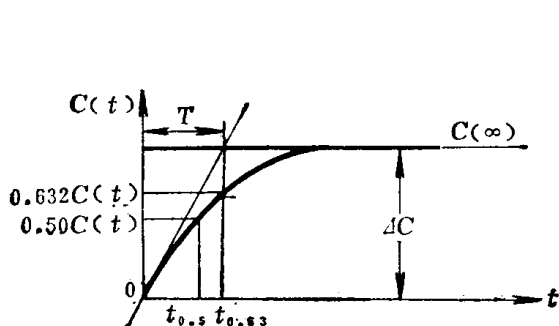


图 1-6 无滞后有自平衡能力的一阶对象阶跃响应曲线

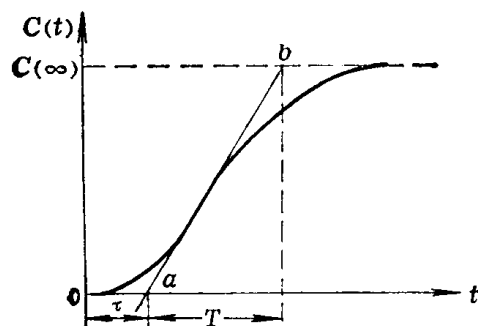


图 1-7 具有纯滞后有自平衡能力的对象阶跃响应曲线

$$W(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-\tau s} \quad (1-11)$$

式中， τ 为纯滞后时间，放大系数 K 仍用式 (1-8) 计算。

参数 τ 、 T 的计算方法有两种：切线法和两点法，现分别介绍如下。

(1) 切线法：通过阶跃响应曲线的拐点作切线，切线与时间轴交于 a 点（见图1-7），与以稳态值 $C(\infty)$ 画的水平线交于 b 点，则 $0a$ 即为被控对象的纯滞后时间 τ ，切线段 ab 在时间轴上的投影即为时间常数 T 。这个方法的主要缺点是切线不容易作准确。

(2) 两点法：参数 T 及 τ 可利用阶跃响应曲线中两个点的 $C(t)$ 值计算得出。这时，先把试验所得的阶跃响应曲线转换为标么形式，即

$$C^*(t) = \frac{C(t)}{C(\infty)} \quad (1-12)$$

$C^*(t)$ 为标么形式的阶跃响应曲线。对于具有纯滞后的一阶惯性环节，标么形式的阶跃响应曲线为

$$C^*(t) = \begin{cases} 0 & t < \tau \\ 1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} & t \geq \tau \end{cases} \quad (1-13)$$

为了确定参数 T 和 τ ，可任选两个不同的时间 t_1 、 t_2 ，且令 $t_2 > t_1 > \tau$ ，然后解下述方

程组

$$\left. \begin{aligned} C^*(t_1) &= 1 - e^{-\frac{t_1 - \tau}{T}} \\ C^*(t_2) &= 1 - e^{-\frac{t_2 - \tau}{T}} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

对上式取对数，并解出参数 T 及 τ 值如下：

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{t_2 - t_1}{\ln[1 - C^*(t_1)] - \ln[1 - C^*(t_2)]} \\ \tau &= \frac{t_2 \ln[1 - C^*(t_1)] - t_1 \ln[1 - C^*(t_2)]}{\ln[1 - C^*(t_1)] - \ln[1 - C^*(t_2)]} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

为了计算方便，一般取 $C^*(t_1) = 0.39$ 、 $C^*(t_2) = 0.63$ ，则由上式可得计算参数 T 和 τ 的公式如下：

$$\left. \begin{aligned} T &= 2(t_2 - t_1) \\ \tau &= 2t_1 - t_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

为了校验计算结果的准确性，可利用另外两点的 $C^*(t)$ 值进行校验。一般可取

$$t_3 = 0.8T + \tau, \quad t_4 = 2T + \tau$$

两个公式，代进已求得的参数 T 和 τ 求 t_3 、 t_4 ，再按式(1-13)计算 $C^*(t_3)$ 及 $C^*(t_4)$ 值。若参数 T 和 τ 确为所求被控对象之参数，则计算值应与试验所测得的阶跃响应曲线的标么值0.55(对应 t_3)及0.87(对应 t_4)相吻合。

二、求被控对象传递函数的切线法

在热工自动控制中，广泛采用一个 n 阶等容惯性环节来近似表征有自平衡能力的被控对象，其传递函数为

$$W(s) = \frac{K}{(1 + Ts)^n} \quad (1-17)$$

这个传递函数中有三个待定的参数：放大系数 K 、时间常数 T 和阶数 n 。当 $n > 1$ 时，等容惯性环节的阶跃响应曲线与二阶惯性环节的阶跃响应曲线类似，响应曲线呈S形状，起始阶段具有明显的滞后，在曲线中间某点出现拐点，最后逐渐上升到稳态值。传递函数的放大系数 K 仍可用式(1-8)计算。

为了确定 T 和 n ，通过阶跃响应曲线拐点作切线，根据阶跃曲线图上几个交点的数值，求出 T 和 n 。下面先讨论二阶对象，然后再讨论高阶对象的参数 T 和 n 的计算方法。

1. 有自平衡能力的二阶对象传递函数的求法

在讨论二阶对象时，一般均将二阶对象的传递函数表示为

$$W(s) = \frac{K}{(1 + T_a s)(1 + T_b s)} \quad (1-18)$$

由于 K 值不影响求 T_a 、 T_b 值，为了推导方便，可先令 $K = 1$ (即可认为是把阶跃响应曲线变为标么形式)，则二阶对象的单位阶跃响应曲线方程为

$$C(t) = 1 + \frac{T_a}{T_b - T_a} e^{-\frac{t}{T_a}} - \frac{T_b}{T_b - T_a} e^{-\frac{t}{T_b}} \quad (1-19)$$

二阶对象的阶跃响应曲线如图1-8所示。为了确定拐点A对应的时间 t_a 之值,利用拐点处二阶导数为零条件,即令 $\frac{d^2C(t_a)}{dt^2}=0$,得

$$t_a = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \ln \frac{T_a}{T_b} \quad (1-20)$$

图1-8中线段AB的长度可利用式(1-19)及式(1-20)求得

$$\begin{aligned} AB &= 1 - AO' = 1 - C(t_a) \\ &= \frac{T_b}{T_b - T_a} \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_a}{T_b - T_a}} - \frac{T_a}{T_b - T_a} \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_b}{T_b - T_a}} \end{aligned} \quad (1-21)$$

拐点A处的斜率 $\tan \alpha$ 为

$$\tan \alpha = C'(t_a) = \frac{1}{T_b - T_a} \left[\left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_a}{T_b - T_a}} - \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_b}{T_b - T_a}} \right] \quad (1-22)$$

由图1-8可知:

$$BC = \frac{AB}{\tan \alpha}, \quad A'E = t_a \tan \alpha$$

将式(1-21)及式(1-22)代入上式,得

$$\begin{aligned} BC &= \frac{\frac{T_b}{T_b - T_a} \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_a}{T_b - T_a}} - \frac{T_a}{T_b - T_a} \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_b}{T_b - T_a}}}{\frac{1}{T_b - T_a} \left[\left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_a}{T_b - T_a}} - \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_b}{T_b - T_a}} \right]} \\ &= T_a + T_b \end{aligned} \quad (1-23)$$

$$\begin{aligned} A'E &= \frac{T_a T_b \ln \left(\frac{T_a}{T_b} \right)}{T_a - T_b} \cdot \frac{1}{T_b - T_a} \left[\left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_a}{T_b - T_a}} - \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\frac{T_b}{T_b - T_a}} \right] \\ &= \frac{\frac{T_a}{T_b} \ln \left(\frac{T_a}{T_b} \right)}{\left(1 - \frac{T_a}{T_b} \right)^2} \left[\left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\left(\frac{1}{1 - \frac{T_a}{T_b}} \right)} - \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{\left(\frac{\frac{T_a}{T_b}}{1 - \frac{T_a}{T_b}} \right)} \right] \end{aligned} \quad (1-24)$$

上式表明 AE' 为 $\frac{T_a}{T_b}$ 的函数,根据上式计算得出表1-1或图1-9。至此,可以得出确定 T_a 、 T_b 的方法如下(参阅图1-8):

- (1) 过拐点A作切线,取BC及 $A'E$ 值;
- (2) 根据 $A'E$ 值查表1-1或图1-9得 T_a/T_b 值(k);
- (3) 解下列联立方程:

$$\left. \begin{aligned} BC &= T_a + T_b \\ \frac{T_a}{T_b} &= k \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

即可求得 T_a 、 T_b 值。

当然,二阶对象的传递函数也可用式(1-17)形式表示,但其近似程度比式(1-18)

稍差一些。如需用式(1-17)形式表示时,求对象动态特性参数的方法将在下面具体讨论。

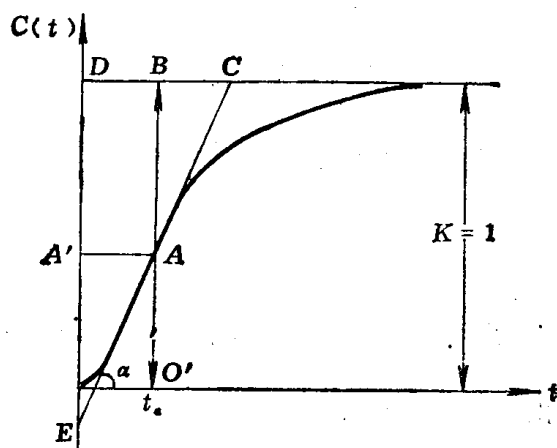


图 1-8 二阶有自平衡能力对象的阶跃响应曲线

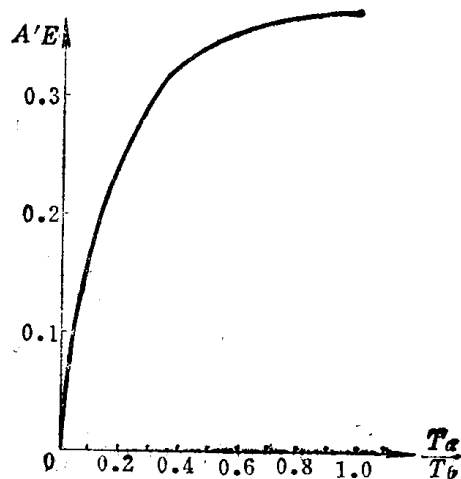


图 1-9 线段 $A'E$ 与 $\frac{T_a}{T_b}$ 关系曲线

表 1-1

线段 $A'E$ 与 $\frac{T_a}{T_b}$ 的关系

次 序	T_a/T_b	$A'E$	次 序	T_a/T_b	$A'E$	次 序	T_a/T_b	$A'E$
1	0	0	8	0.35	0.3236	15	0.70	0.3620
2	0.05	0.1347	9	0.40	0.3319	16	0.75	0.3641
3	0.10	0.1809	10	0.45	0.3410	17	0.80	0.3656
4	0.15	0.2393	11	0.50	0.3466	18	0.85	0.3665
5	0.20	0.2693	12	0.55	0.3523	19	0.90	0.3671
6	0.25	0.2913	13	0.60	0.3563	20	1.00	0.3679
7	0.30	0.3082	14	0.65	0.3589			

2. 有自平衡能力的高阶对象传递函数的求法

式(1-17)所代表的高阶对象的单位阶跃响应曲线方程为

$$\begin{aligned}
 C(t) &= KL^{-1} \left[\frac{1}{(1+Ts)^n} \cdot \frac{1}{s} \right] \\
 &= KL^{-1} \left\{ \frac{1}{s} - T \left[\frac{1}{1+Ts} + \frac{1}{(1+Ts)^2} + \dots + \frac{1}{(1+Ts)^n} \right] \right\} \\
 &= K \left\{ 1 - e^{-\frac{t}{T}} \left[1 + \frac{t}{T} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{T} \right)^2 + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \left(\frac{t}{T} \right)^{n-1} \right] \right\} \quad (1-26)
 \end{aligned}$$

被控对象的阶跃响应曲线如图1-10所示,过拐点A作切线,切线与时间轴及 $C(\infty)$ 水平线相交于B、C两点,可得特征时间 T_c 及 τ 值($\frac{\tau}{T_c} = \varepsilon\rho\tau$)。由图1-10可得如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} T_c &= \frac{K}{\operatorname{tg} \alpha} \\ \tau &= t_A - \frac{C(t_A)}{\operatorname{tg} \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (1-27)$$

式中 α ——切线与时间轴的夹角;

$C(t_A)$ ——拐点A处的 $C(t)$ 值。

为了确定 t_A 及 α 值,先求出响应曲线的一阶、二阶导数,即

$$\begin{aligned} \frac{dC(t)}{dt} &= \frac{K}{T} e^{-\frac{t}{T}} \left[1 + \frac{t}{T} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{T} \right)^2 + \cdots + \frac{1}{(n-1)!} \left(\frac{t}{T} \right)^{n-1} \right] \\ &\quad - \frac{1}{T} K e^{-\frac{t}{T}} \left[1 + \frac{t}{T} + \frac{1}{2!} \left(\frac{t}{T} \right)^2 + \cdots + \frac{1}{(n-2)!} \left(\frac{t}{T} \right)^{n-2} \right] \\ &= K e^{-\frac{t}{T}} \frac{1}{(n-1)!} \cdot \frac{t^{n-1}}{T^n} \end{aligned} \quad (1-28)$$

$$\frac{d^2C(t)}{dt^2} = K e^{-\frac{t}{T}} \frac{1}{(n-2)!} \cdot \frac{t^{n-2}}{T^n} \left(1 - \frac{1}{n-1} \cdot \frac{t}{T} \right) \quad (1-29)$$

拐点A对应的时间 t_A 可由 $\frac{d^2C(t)}{dt^2} = 0$ 得出的下式求得

$$\frac{t_A}{T} = n - 1 \quad (1-30)$$

将上式求得之 t_A 值代入式(1-26),得 $C(t_A)$ 值:

$$C(t_A) = K \left\{ 1 - e^{-(n-1)} \left[1 + (n-1) + \frac{1}{2!} (n-1)^2 + \cdots + \frac{1}{(n-1)!} (n-1)^{n-1} \right] \right\} \quad (1-31)$$

将式(1-30)代入式(1-28),得拐点处的斜率 α 值:

$$\text{tg} \alpha = \left. \frac{dC(t)}{dt} \right|_{t=t_A} = \frac{K}{T(n-1)!} (n-1)^{n-1} e^{-(n-1)} \quad (1-32)$$

将式(1-30)、(1-31)、(1-32)代入式(1-27),得

$$\begin{aligned} \frac{T_c}{T} &= \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-1}} e^{n-1} \\ \frac{\tau}{T} &= (n-1) - \frac{C(t_A)}{K} \cdot \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-1}} e^{n-1} \\ &= (n-1) - \left\{ 1 - e^{n-1} \left[1 + (n-1) + \frac{1}{2!} (n-1)^2 + \cdots \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{(n-1)!} (n-1)^{n-1} \right] \right\} \frac{(n-1)!}{(n-1)^{n-1}} e^{n-1} \end{aligned} \quad (1-34)$$

由上面两式可知 τ/T_c 为阶数 n 的函数,即

$$\frac{\tau}{T_c} = \frac{\tau/T}{T_c/T} = f(n) \quad (1-35)$$

可见,从阶跃响应曲线(图1-10)求得 τ 及 T_c 后,即可确定阶数 n 。而由式(1-33)、(1-34)代进阶数 n 可求时间常数 T 。

为了计算阶数 n 及时间常数 T 方便,把式(1-33)、(1-34)、(1-35)的计算结果制成表1-2及图1-11。当试验求得阶跃响应曲线后,可以得到 τ 和 T_c 值,然后再根据 τ/T_c 值,从图1-11中查出相应的比值 T_c/T 以及 n 值。或者,根据 τ/T_c 值,从表1-2中查得 n 、 τ/T 及 T_c/T 值,也可确定 n 、 T 值。若求得之 n 不是整数时,取相近之整数值即可。或者令