



高等教育试用教材

核反应堆控制

傅龙舟 主编
周法清 主审



原子能出版社

内 容 简 介

本书在叙述自动控制基本原理的基础上,介绍了核反应堆动态特性、参数整定方法和系统仿真;着重介绍了压水堆核电站控制与保护系统,并简要地介绍了其它类型动力堆控制系统。

本书是高等院校反应堆工程专业的教材,也可供有关专业的科技人员参考。

* * * *

本书由周法清教授主审,经核反应堆工程教材委员会于1990年4月28日审稿会审定,同意作为高等教育试用教材。

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆控制/傅龙舟主编. - 北京:原子能出版社,1995.11
高等教育试用教材
ISBN 7-5022-1430-5

I.核… II.傅… III.反应堆-控制-高等学校-教材 IV.
TL36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17721 号

©

原子能出版社出版 发行

责任编辑:孔昭育

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:850×1168mm 1/32 印张 10.625 字数 286 千字

1995 年 11 月北京第 1 版 1995 年 11 月北京第 1 次印刷

印数:1—1200

定价:8.50 元

前 言

本书是根据1984年10月在北京召开的反应堆工程专业教材会议审定的《反应堆控制》编写大纲编写的。

本书着重介绍自动控制原理、分析方法和测试方法以及压水堆核电站控制与保护系统的设计原理。在编写中,力求使自动控制理论与反应堆系统密切结合,由浅入深,讲清基本概念和分析计算方法。

全书共分六章。第一章介绍了自动控制的基本知识;第二章讨论了反应堆的动态特性;第三章着重介绍了传递函数的概念和频域分析方法;第四章通过对反应堆线性系统稳定性的讨论,介绍了几种稳定性分析方法;第五章着重介绍了压水堆控制与保护系统,简单地介绍了其它类型动力堆的控制系统;第六章介绍了反应堆动态特性测定方法、系统仿真与参数整定方法。

本书由傅龙舟教授主编。参加编写的有:西安交通大学傅龙舟教授(第一至四章)、高华魂教授(第六章)、桑维良教授(第五章、第一章第六节、第三章第十一节)。

本书由上海交通大学周法清教授主审。孔昭育高级工程师、罗征培研究员、陆曙东高级工程师、孟繁淑高级工程师、俞忠原教授、杨士本教授参加了审稿工作,对本书提出了许多宝贵的修改意见,对提高书稿质量帮助很大。最后又请清华大学工程物理系王儒评教授对全书稿进行了认真评审。她对本书给予了充分地肯定和很高的评价。在此,我们表示衷心地感谢。

由于我们的水平有限,书中的缺点、错误,恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 自动控制的一般概念	(1)
§ 1-1 引言	(1)
§ 1-2 常用术语简介	(2)
§ 1-3 自动控制系统中的基本元件	(3)
§ 1-4 开环控制系统与闭环控制系统	(5)
§ 1-5 自动控制系统的分类	(7)
§ 1-6 调节系统性能指标	(9)
参考文献	(11)
第二章 核反应堆的动态过程	(12)
§ 2-1 引言	(12)
§ 2-2 点堆的动态方程	(13)
§ 2-3 缓发中子对反应堆时间特性的影响	(15)
§ 2-4 反应性方程	(19)
§ 2-5 阶跃输入扰动下点堆动态方程的解	(24)
§ 2-5-1 单组缓发中子近似	(27)
§ 2-5-2 常源近似	(29)
§ 2-5-3 瞬跳近似	(30)
§ 2-6 斜坡输入扰动下点堆动态方程的解	(32)
§ 2-6-1 瞬跳近似情况	(32)
§ 2-6-2 常源近似情况	(32)
参考文献	(34)
第三章 核反应堆传递函数与频率特性	(35)
§ 3-1 引言	(35)
§ 3-2 物理系统的数学模型	(36)
§ 3-3 传递函数	(42)

§ 3-4	典型环节及其传递函数	(44)
§ 3-5	系统的方块图及其简化	(52)
§ 3-6	反应堆的传递函数	(59)
§ 3-7	自动控制器的基本控制作用	(68)
§ 3-8	频率特性	(78)
§ 3-9	典型环节的频率特性	(81)
§ 3-10	核反应堆的频率特性	(89)
§ 3-11	对数频率特性	(91)
	参考文献	(101)
第四章	核反应堆稳定性分析	(102)
§ 4-1	具有反馈的线性系统	(102)
§ 4-2	动态系统的稳定性	(104)
§ 4-3	劳斯稳定性准则	(108)
§ 4-4	根轨迹法	(117)
§ 4-5	乃魁斯特稳定性准则	(134)
§ 4-6	反应堆稳定性分析	(142)
§ 4-6-1	简单两路并联反馈:有效寿命模型	(142)
§ 4-6-2	简单两路并联反馈:瞬跳模型	(145)
§ 4-6-3	两路并联反馈:缓发中子模型	(147)
§ 4-6-4	具有两个串联温度系数反馈回路反应堆的稳定性	(154)
§ 4-6-5	具有氙毒反馈反应堆的稳定性	(160)
第五章	核反应堆控制和保护系统	(171)
§ 5-1	概述	(171)
§ 5-1-1	反应堆控制系统的一般描述	(171)
§ 5-1-2	反应性控制方法	(175)
§ 5-2	稳态运行方案与控制方式	(177)
§ 5-2-1	稳态运行方案	(177)
§ 5-2-2	控制方式	(180)

§ 5-3	压水堆功率控制系统	(184)
§ 5-3-1	功率调节系统	(185)
§ 5-3-2	功率分布控制	(192)
§ 5-4	压水堆过程变量控制系统	(201)
§ 5-4-1	蒸汽发生器水位控制系统	(201)
§ 5-4-2	稳定器压力和水位控制系统	(203)
§ 5-4-3	蒸汽旁通控制系统	(207)
§ 5-5	控制系统联锁	(210)
§ 5-6	压水堆保护系统	(211)
§ 5-6-1	保护系统设计的一般原则	(212)
§ 5-6-2	安全极限和保护参数紧急停堆整定值	(213)
§ 5-6-3	安全监测	(216)
§ 5-6-4	安全逻辑	(222)
§ 5-6-5	安全联锁	(226)
§ 5-6-6	紧急停堆保护系统方块图	(227)
§ 5-6-7	专设安全设施触发系统	(230)
§ 5-7	其它类型动力堆控制系统	(233)
§ 5-7-1	沸水动力堆(BWR)控制系统	(233)
§ 5-7-2	气冷动力堆(GCR)控制系统	(236)
§ 5-7-3	重水动力堆(HWR)控制系统	(238)
§ 5-7-4	钠冷快中子增殖堆(LMFBR)控制系统	(241)
	参考文献	(243)
第六章	核反应堆动态特性测试、参数整定和系统模拟	(244)
§ 6-1	引言	(244)
§ 6-2	反应堆动态特性测试	(245)
§ 6-2-1	测定动态特性的时域法	(245)
§ 6-2-2	测定动态特性的频域法	(256)
§ 6-2-3	测定动态特性的统计相关法	(262)
§ 6-2-4	反应堆动态特性试验	(282)

§ 6-3 单回路反馈控制系统的整定	(293)
§ 6-3-1 响应曲线法	(297)
§ 6-3-2 临界比例度法	(302)
§ 6-3-3 衰减曲线法	(304)
§ 6-4 反应堆模拟	(306)
§ 6-4-1 模拟计算机的线性运算部件	(306)
§ 6-4-2 系统模拟	(309)
§ 6-4-3 反应堆模拟	(317)
参考文献	(331)

第一章 自动控制的一般概念

§ 1-1 引 言

在近代工程和科学的发展过程中,自动控制技术起着十分重要的作用。所谓自动控制就是在没有人直接干预的情况下,通过控制器使被控制对象或过程自动地按照预定的规律运行。在工业生产过程中,经常要求某些物理量(如温度、压力、流量、功率、频率、物料成份比例等)保持不变,或者要求按照给定的规律变化。如果单纯依靠人工控制,许多情况下难于或根本不可能满足要求,因而自动控制成为生产过程中的重要组成部分。导弹能准确地命中目标,通讯卫星能按预定轨道与地球同步运行,宇宙飞船能精确地接近火星并采集数据发回地面等,都是自动控制技术迅速发展的结果。自动控制能使机器设备和管理部门高速度高效率运行,提高产品的质量和生产率,降低生产成本,并使人们从繁重的体力劳动和恶劣工作条件下解放出来。掌握必要的自动控制知识,对于各行各业的科学技术人员,都具有重要意义。

自动控制理论是研究自动控制技术的基础理论,其通用性很强,适用于机械、电气、无线电、化工、能源、宇航等各个领域。目前一般地将自动控制理论分为古典控制理论和现代控制理论两大部分。古典控制理论主要以传递函数为基础,适用于单输入和单输出的线性定常系统。现代控制理论主要以状态空间法为基础,适用于多输入多输出和非线性、时变系统。现代控制理论频域法和时域法兼用,而古典控制理论主要是频域的方法。上述理论在核反应堆和核电站的研究、设计和运行中都得到了广泛的应用。

§ 1-2 常用术语简介

为了便于说明有关自动控制的基本思想、基本理论观点,其中涉及到的一些基本概念有待进一步阐明,首先介绍几个常用的术语。

(1) **控制对象**:被控制的设备或生产过程称为控制对象或被控过程。

(2) **被控制量**:表征生产过程是否符合规定工况的物理量(如温度、电压、转速等)称为被控制量或被调量。

(3) **给定值**:希望被控制量应该具有的数值称为给定值或目标值。给定值可以为常量也可以是随时间任意变化的。

(4) **控制量**:由控制作用加以改变,使被控制量跟踪给定值的物理量称为控制量。

(5) **扰动**:控制过程中,使被控制量偏离其给定值的因素称为扰动。

(6) **控制器**:能按预期要求产生控制信号以改变控制量的设备或装置称为控制器。

(7) **控制系统**:控制对象和控制器一起总称为控制系统。

图 1-1 是水位自动控制的示意图。控制的目的是维持水箱内水位为恒定值 H_0 。当水箱的流入水量 Q_1 与流出水量 Q_2 相等时,水位保持不变,控制器不产生动作。水位的给定值 H_0 由控制器刻度盘上

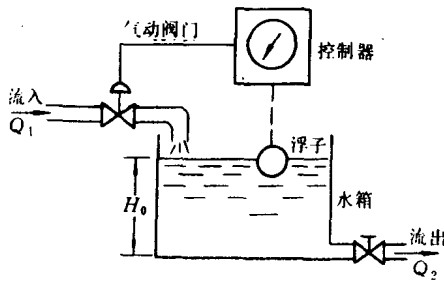


图 1-1 水位自动控制示意图

的指针标定。当流入量 Q_1 减少(例如流入端水压下降)或流出量 Q_2 增大时,平衡被破坏,水箱水位下降,实际水位 H 小于给定值 H_0 ,这个偏差由浮子检测出来。自动控制器在偏差信号作用下,使控制阀门开大,入口流量增加,水位将恢复给定值。反之,当流入量 Q_1 增大(例如流入端水压升高),或流出量减小时,水箱水位上升,实际水位 H 大于给定值 H_0 ,这个偏差则使控制阀门关小,入口流量减小,从而达到水箱水位保持为给定值的目的。

在图 1-1 所示的系统中,水箱和供水管道设备为控制对象,水箱水位为被控制量,希望保持不变的水位目标值为给定值,利用控制阀门开度而改变的流入水量为控制量。引起水箱水位变化的各种原因(除控制阀动作以外),如供水系统的压力增加或减少,水箱出口阀门开度自行变化等,都是扰动。

综上所述,控制的目的是利用控制器产生控制作用改变控制量,以消除扰动的影响,使被控制量回复到给定值。这种消除扰动因素影响,从而保持被控制量按预期要求而变化的过程称为控制过程。不需要人直接干预,而使被控制量自动地按预定规律变化的过程称为自动控制。

§ 1-3 自动控制系统中的基本元件

虽然各种自动控制系统有很大的差别,被控制的物理量也是各式各样的,但自动控制系统的共同任务就是要用机械或电气控制来代替人工控制。为了搞清这种代替为什么可能,可以进一步考察图 1-1 所示的水位控制系统。当进行人工控制时,为了保持水箱水位为某一恒定值,则工作人员必须随时测定水位,并将它与水位给定值进行比较。如果实际水位低于给定值,则将进水阀门开大,水位逐渐上升;当实际水位高于给定值时,则关小进水阀门,使水位逐渐接近于给定值。从这个例子可以看出,为要用自动控制代替人工控制,则自动控制系统中必须采用以下几种基本元件以代替工作人员在人工

控制中的作用：

- (1)测量元件--用来测量被控制量；
- (2)比较元件--用来比较被控制量与给定值，求得误差信号；
- (3)执行元件--按照误差信号的性质产生控制作用，改变控制量；
- (4)定值元件--用来设定被控制量的给定值；
- (5)放大元件--由于比较元件给出的误差信号通常过于微弱，不能直接带动执行元件，总是需要用放大元件加以放大。对于电信号来说，放大元件或是电压放大器或是功率放大器。

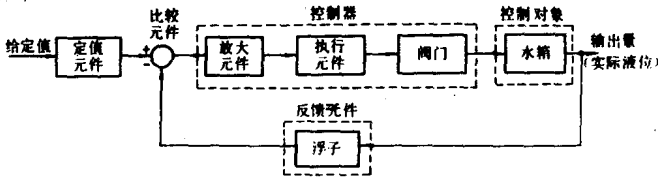


图 1-2 水位控制系统方块图

(6)反馈--系统的输出量若全部或部分送回到输入端，与输入量共同影响系统的输出，称为反馈。

图 1-2 是对应于图 1-1 的水位控制系统方块图。图中各方框的输入、输出引线都标有箭头，代表各种元件的作用具有一定的方向性。比较元件是一个误差检测器，它检测出被控制量对给定值(或整定值)的偏差，并按一定规律产生控制信号送给执行元件，以改变控制量影响控制对象的运行状态。测量元件的输出与定值元件的输出一起进入到比较元件，它们必须是易于检测的同类信号。测量元件一般是用电的手段测量非电量的元件，将非电量转换为电量，因为电

量具有易于变换、传送、加工等优点。

§ 1-4 开环控制系统与闭环控制系统

开环控制系统 若系统的输出量对系统的控制作用不发生影响,则称为开环控制系统。在开环系统中,既不需要对输出量进行测量,也不需要将输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较。用图 1-3 可以表示这样的系统。在开环系统中,当外部和内部条件能保持不变时,则相对于恒定的输入信号,其输出也保持为恒定。适当地改变输入信号,可以使输出达到任何期望值。但当系统的外部条件或内部参数发生改变,可能引起输出偏离期望值,而无法控制。

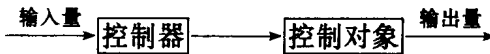


图 1-3 开环控制系统的方块图

在反应堆和核电站中,广泛应用开环控制方法。如,通过控制器对电动或气动阀门的直接控制等。又如,反应堆启动或停堆手动控制棒操纵系统。当手动提升控制棒时,手动提升信号,经电压放大、功率放大后,驱动直流电机转动,经减速器带动钢绳使控制棒向上移动。

闭环控制系统 凡系统输出量对系统的控制作用能产生直接影响,则称为闭环控制系统。闭环控制系统也就是反馈控制系统。图 1-4 是闭环控制系统的方块图。输入信号与反馈信号之差,称为误差信号。误差检测器中的负号表示负反馈。误差信号加到控制器上,以减小系统的误差,使输出量(被控制量)趋于期望的给定值。实际上,闭环控制就是应用反馈作用来减小系统的误差。这种利用负反馈得到的误差而产生的控制作用,又用去消除系统误差的原理,成为反馈控制原理。

反馈控制系统的主要优点在于不论何种原因引起被控制量偏离其给定值而发生偏差时,就一定有相应的控制作用产生,使偏差得以消除。反馈控制系统具有抑制内部和外部各种干扰对系统输出的影响的能力。

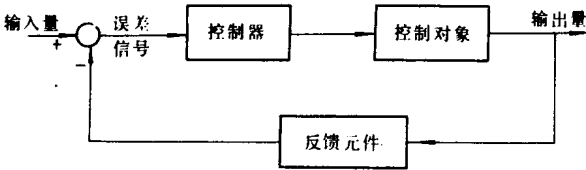


图 1-4 闭环控制系统的方块图

开环与闭环控制系统的比较 在闭环控制系统中,由于采用了负反馈,因而被控制量对外干扰和系统内部参数变化都不很敏感。因此有可能采用不太精密和成本低廉的元件,构成较为精确的控制系统。而对开环控制系统来说,由于在被控制量对控制量没有影响,所以对干扰产生的误差,系统本身不具备修正能力。这种系统的控制精度完全靠采用高精度元件和采取有效的抗干扰措施来保证。但开环控制系统容易建造,它不必对被控制量进行测量和反馈,因而结构简单。还应指出,有的开环控制系统,其控制质量也可以很高。例如,依照开环控制原理设计的程序控制机床如采用数字计算机控制步进电动机和应用数字脉冲控制元件,动作相当准确,可以达到闭环控制系统所具有的较高的控制精度。一般说来,当系统控制量的变化规律能预先确知,并且对系统中可能出现的干扰,可以做到有效的抑制时,采用开环控制系统是有其优越性的,特别是被控制量很难准确测量时更是如此。此外,系统输出功率的大小,确定了系统的成本、重量和尺寸。为了减少系统所需要的功率,在可能情况下,应当采用开环控制。将开环和闭环控制适当地结合在一起,通常比较经济,并且能够满足整个系统性能要求。

§ 1-5 自动控制系统的分类

自动控制系统的种类很多,下面只介绍几种常用的分类方法。

1. 恒值控制系统,程序控制系统和随动系统 按给定值的变化特点分类,可以分为恒值控制系统,程序控制系统和随动系统。

(1)**恒值控制系统**:当给定值为常数时,使被控制量保持恒定或基本上保持恒定的系统称为恒值控制系统。如研究性反应堆功率控制,稳压器的压力控制等都属于恒值调节系统。

(2)**程序控制系统**:程序控制系统的给定值按照预定的时间函数发生变化。例如,在汽轮机自动启动过程中,希望转速随时间成一定的给定关系变化,或反应堆在自动启动过程中使功率随时间成一定的函数关系变化等,要求采用程序控制系统。

(3)**随动系统**:在随动系统中,给定值也是随时间变化的,即给定值是时间的函数,但这种函数关系事先不能确定,这是它和程序控制系统的主要区别。例如,雷达高射炮的角度控制系统必须保证使炮身时刻跟踪敌机的飞行,而敌机的方位是不能预先知道的。

2. 连续控制系统和采样控制系统 按照控制动作与时间的关系分类,可以把控制系统分为连续控制系统和采样控制系统。

(1)**连续控制系统**:连续控制系统的各个组成部分的输入输出信号都是时间 t 的连续函数。图 1-2 所示的系统是连续控制系统的例子。这种系统可用微分方程描述。

(2)**采样控制系统**:当系统中只要有一个地方的信号是脉冲序列或数码时,这种系统即称为采样控制系统或数字控制系统。采样控制系统中,有一个或一个以上的变量是在时间上离散的,也称为离散控制系统,这种系统可用差分方程描述。

3. 线性控制系统和非线性控制系统 按照描写控制系统的微分方程式的类型分类,可以分为线性控制系统和非线性控制系统。

(1)**线性控制系统**:凡是可以用线性微分方程式来描述(或近似

描述)的系统称为线性控制系统。严格地说,实际上很少存在线性系统,因为所有的物理系统在某种程度上都是非线性的。线性控制系统纯粹是分析者为了简化分析和设计而人为建造的理想模型。当控制系统的信号幅值在一定范围,在此范围内系统的元件能保持线性特征(即能应用叠加原理),则此系统基本上是线性的。但当信号的幅值超过了线性范围,根据非线性含义,则该系统就不能再作为线性系统对待。例如,控制系统中所采用的放大器在输入信号增大时经常呈现饱和效应,电动机的磁场通常具有饱和特性。控制系统中其它常见的非线性特性有齿轮间隙和死区、弹簧的非线性特性,运动部件之间的摩擦力和摩擦转矩等。下面的常系数微分方程式是最常见的线性微分方程式

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = 0 \quad (1-1)$$

式中, y 为因变数, t 为自变数, a_0, a_1, \dots, a_n 为常系数($a_0 \neq 0$)。

由常系数线性微分方程式所描述的系统称为线性定常控制系统。实际上,许多物理系统的方程式的系数并不都是常数,有些是自变量 t 的函数。虽然这种系统仍然是一个线性系统,但其分析和设计远比线性定常系统复杂得多。由变系数微分方程式所描述的这类系统,称为变系数控制系统。

(2)非线性控制系统:凡用非线性微分方程所描述的系统,称为非线性控制系统。线性微分方程式中不应该包含 y 和 dy/dt 的高次幂以及 y 和 dy/dt 的乘积,凡不满足上述条件的微分方程式就是非线性微分方程式。下面举出几个非线性微分方程式的例子:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + ay^2 = 0$$

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + y = 0$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + y \frac{dy}{dt} = 0 \quad (1-2)$$

有许多分析和图解技术可用于设计和分析线性系统,但对于非线性系统的数学处理一般比较困难,也没有通用的方法解决各类非线性问题。本书主要研究定常线性控制系统。

4. 单输入单输出控制系统和多输入多输出控制系统 按照系统的输入和输出信号的数量分类,则有单输入单输出控制系统和多输入多输出控制系统。单输入单输出系统重点研究一个主要输入和一个主要输出。系统中主要反馈(从系统输出至系统输入间的反馈)只有一个。有时为了改善系统质量,也可以再加局部反馈,因而单输入单输出控制系统,可以是单回路的,或者是多回路的。图 1-5 是多回路的单输入单输出系统方块图。

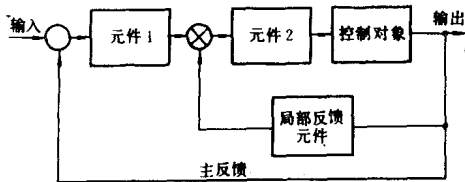


图 1-5 多回路的单输入单输出系统

多输入多输出系统中,有多个输入量和多个输出量,而且相互之间耦合。由于这种系统变量多,也称为多变量系统。图 1-6 是多输入多输出系统方块图。实际上,反应堆或核电站都是复杂的多变量系统。

§ 1-6 调节系统性能指标

控制系统的控制质量通常可以用单位阶跃输入下系统瞬态响应的典型性能指标来评价。这些性能指标包括最大超调量、峰值时间、延迟时间、上升时间、调节时间和振荡次数等。

图 1-7 所示是线性控制系统的典型单位阶跃响应,与这一响应

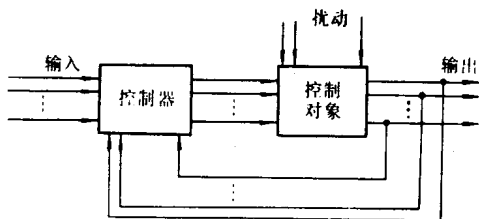


图 1-6 多输入多输出系统方块图

相对应的性能指标定义如下：

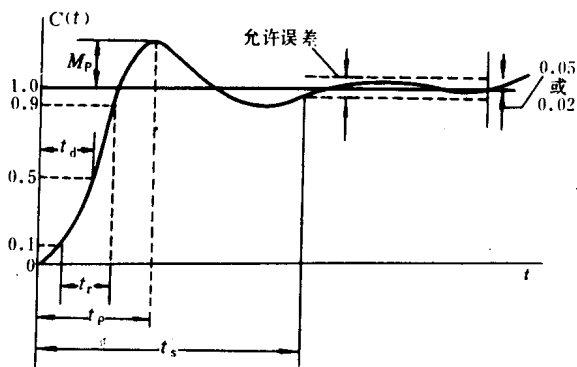


图 1-7 典型的单位阶跃响应曲线

(1) 最大超调量 M_p ,

$$M_p = \frac{C(t_p) - C(\infty)}{C(\infty)} \times 100\% \quad (1-3)$$

最大超调量反映了系统的阻尼特性。

(2) 峰值时间 t_p ,

产生最大超调量 M_p 的时间, 就是峰值时间 t_p 。

(3) 延迟时间 t_d

阶跃响应达到稳态值的 50% 所需的时间, 就是延迟时间 t_d 。