

# 液体火箭发动机控制 与动态特性理论

陈启智 编著



国防科技大学出版社

# 动态特性理论



\*30740883\*

国防科技大学出版社

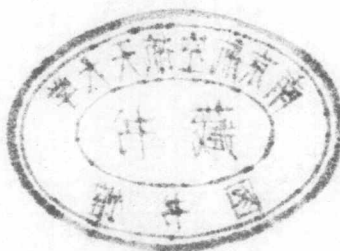
740883

3-44  
1-4001  
[湘]新登字009号

## 内 容 简 介

本书提供了线性控制理论基础,用以分析和解决液体火箭发动机控制与动态特性方面的问题。结合液体火箭发动机的特点和控制需要,本书介绍了连续动态系统控制和离散动态系统控制的古典理论及状态空间理论。全书共分十五章,一至十四章均附有相应的习题。

本书可供有关专业的本科生、研究生作为教材,也可供教师和工程技术人员参考。



## 液体火箭发动机控制与动态特性理论

陈启智 编著

责任编辑 老 亮 张刚华

责任校对 邹向曙

\*

国防科技大学出版社出版发行

(长沙市砚瓦池正街47号)

邮编: 410073 电话: 4436564

新华书店总店科技发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

\*

开本: 787×1092 1/16 印张: 23.5 字数: 543千

1993年12月第1版第1次印刷 印数: 1000册

ISBN 7-81024-261-X

V·6 定价: 18.80元

## 序

单工况液体火箭发动机工作时，其工作状态会受到各种外部干扰的作用，比如环境温度的散布，推进剂组元比重及化学成份的散布，飞行过程中环境压力的变化等等。在这些干扰因素的作用下，燃烧室压力、组元比、比冲、推力等将发生变化，发动机的工作状态将偏离规定值，甚至发生故障或损坏。在多工况液体火箭发动机即变推力液体火箭发动机的情况下，根据任务要求，需要发动机的推力在按照指令或一定程序变化时，有良好的动态特性。因此，为了保持发动机的工作参数和性能为规定值，为了获得良好的动态特性，必须应用控制理论和技术来分析和控制发动机的工作状态。

在设计 and 研制发动机时，要选择系统和元件的方案及参数。为了使所选方案及参数满足稳定性和动态特性方面的要求，必须应用控制理论来进行分析，使参数优化，保证发动机工作稳定和动态特性良好。

对于发动机的定型产品，由于某些内部干扰因素的影响，比如制造公差引起的结构元件尺寸的工艺散布，管路流阻系数的散布，泵及涡轮效率的散布，泵入口压力的散布等，发动机的工作状态将偏离规定值。要估计这些干扰因素所引起的发动机性能的变化并控制这些偏离，也要应用到控制理论和技术。

事实上，随着工农业生产、航天技术和其他科学技术的不断发展，控制理论和控制技术的应用日益广泛，在工程技术和科学研究的发展过程中，甚至在人们的日常生活中，自动控制起着越来越重要的作用。因此现代的工程技术人员和科学工作者都必须具备一定的控制理论和控制技术方面的知识。

控制理论包括古典理论和现代控制理论两方面的内容。古典控制理论即自动调节原理，是20世纪30年代前后形成的，它从古典时域手解微分方程，发展到以传递函数为基础的频域法。对单输入单输出线性时不变系统的分析，古典控制理论是很适用的。现代控制理论是在20世纪60年代发展起来的，它是以状态空间模型为基础，随着现代数学和数字计算机的发展而发展起来的时域法，特别适用于多输入多输出系统，它既可用于分析线性系统，又可用于分析非线性系统。从70年代中期以来，古典控制理论同现代控制理论逐渐结合，正在形成所谓第三代控制理论，其主要内容是关于如何使系统在不确定情况和干扰下继续保持稳定并实现最优控制。

本书结合液体火箭发动机的特点和控制需要，结合80年代后期以来液体火箭发动机控制的若干新进展，对1988年编写的《液体火箭发动机控制与动态特性理论》作了一些充实，着重介绍连续动态系统控制和离散动态系统控制的古典理论和状态空间理论，并从二者的对比与结合上来进行讨论。全书包括古典理论和状态空间理论两大部份，共十五章。第一部份古典理论共九章。第一章介绍线性连续动态系统的时域解，实际上就是

常微分方程的基本时域解法，其中的基本概念和求解方法对后面的分析都很有用。第二章简要介绍拉普拉斯变换，它是控制理论中常用的一种重要方法。第三章结合液体火箭发动机的特点，列出了线性连续系统基本环节的数学模型。系统的数学模型就是由这些基本环节的数学模型组合而成的，它是系统性能分析的原始基础。第四章讨论传递函数和频率特性，这是古典分析的基础和核心部份。第五章线性连续系统的动态特性分析，着重讨论系统的稳定性、控制准确度和瞬变过程的品质。第六章线性离散系统的时域解，主要介绍差分方程的建立与解法。第七章简要介绍 $z$ 变换，在离散系统的分析中， $z$ 变换是一个重要的方法。第八章线性离散系统的动态特性分析，主要介绍这类系统的稳定性和响应特性的分析方法。第九章把液体火箭发动机作为线性系统，用古典控制理论的方法来分析其稳定性、瞬变过程和动态特性，并介绍液体火箭发动机控制系统的特点。第二部份状态空间理论共六章。第十章介绍连续系统和离散系统的状态空间模型及其导出方法和几种标准形式。第十一章连续系统的状态空间分析，主要讨论状态方程的解法、李雅普诺夫稳定性概念和分析方法及系统的响应。第十二章离散系统的状态空间分析，着重介绍系数矩阵 $A_T B_T$ 的求法，在此基础上即可分析离散系统的稳定性和响应特性。第十三章简要介绍现代控制理论中的两个重要概念即能控性和能观测性，导出用以判别系统的能控性和能观测性的能控性矩阵和能观测性矩阵。第十四章介绍变推力液体火箭发动机动态特性的状态空间分析。第十五章简要介绍液体火箭发动机控制的一些新方向。

本书是按非控制专业的要求来编写的，主要内容是线性控制理论的基础部份，并且侧重于从工程实际提出问题，将数学分析、物理概念与工程应用结合起来讨论，而不是单纯从抽象定义出发，对所讨论的问题也不作过多的详细的数学推导或证明。书中的第一部份和第二部份既有相互联系，又是各自独立的，在使用时可根据需要选用。本书为分析有关控制问题和技术系统的动态特性提供必要的理论基础，可供有关专业的本科生、研究生、教师和工程技术人员用作教材或参考书。

# 目 录

## 序

## 绪论

## 第一部分 古典理论

### 1 线性连续动态系统的时域解

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 1.1 线性常微分方程           | (9)  |
| 1.2 一阶线性常微分方程的古典解法    | (10) |
| 1.3 高阶常系数线性常微分方程的古典解法 | (12) |
| 1.4 简短的结论             | (18) |
| 习题                    | (18) |

### 2 拉普拉斯变换

|                   |      |
|-------------------|------|
| 2.1 引言            | (19) |
| 2.2 拉普拉斯变换的定义     | (19) |
| 2.3 一些典型函数的拉普拉斯变换 | (20) |
| 2.4 拉普拉斯变换的基本特性   | (25) |
| 2.5 拉普拉斯反变换       | (33) |
| 2.6 利用拉普拉斯变换解微分方程 | (33) |
| 2.7 简短的结论         | (45) |
| 习题                | (47) |

### 3 线性连续系统基本环节的数学模型

|               |      |
|---------------|------|
| 3.1 引言        | (48) |
| 3.2 非线性方程的线性化 | (48) |
| 3.3 放大环节      | (50) |
| 3.4 延迟环节      | (52) |
| 3.5 一阶环节      | (53) |
| 3.6 二阶环节      | (58) |
| 3.7 积分环节      | (60) |
| 3.8 微分环节      | (61) |
| 3.9 简短的结论     | (63) |
| 习题            | (64) |

### 4 传递函数和频率特性

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 4.1 传递函数的概念及表示方法      | (65) |
| 4.2 典型的试验输入信号         | (66) |
| 4.3 基本环节的传递函数及单位阶跃响应  | (68) |
| 4.4 方块图的变换规则和系统的传递函数  | (76) |
| 4.5 频率特性的概念及表示方法      | (82) |
| 4.6 基本环节的频率特性         | (85) |
| 4.7 系统的频率特性           | (92) |
| 4.8 对数频率特性的基本概念与Bode图 | (94) |

|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| 4.9 基本环节的对数频率特性 .....             | (96)  |
| 4.10 系统通频带的概念 .....               | (104) |
| 4.11 简短的结论 .....                  | (108) |
| 习题 .....                          | (108) |
| <b>5 线性连续系统的动态特性分析</b> .....      |       |
| 5.1 稳定性的基本概念 .....                | (110) |
| 5.2 系统稳定的充要条件 .....               | (112) |
| 5.3 系统稳定性判据 .....                 | (115) |
| 5.4 系统的临界参数和稳定裕度 .....            | (135) |
| 5.5 系统的稳态误差 .....                 | (137) |
| 5.6 稳态误差系数 .....                  | (139) |
| 5.7 灵敏度的基本概念 .....                | (144) |
| 5.8 过渡过程的品质指标 .....               | (145) |
| 5.9 二阶系统的过渡过程品质分析 .....           | (147) |
| 5.10 研究过渡过程品质的频率法 .....           | (152) |
| 5.11 高阶系统的动态特性 .....              | (164) |
| 5.12 简短的结论 .....                  | (167) |
| 习题 .....                          | (168) |
| <b>6 线性离散系统的时域解</b> .....         |       |
| 6.1 离散信号与离散系统 .....               | (171) |
| 6.2 差分方程 .....                    | (173) |
| 6.3 线性常系数差分方程的解析解 .....           | (179) |
| 6.4 简短的结论 .....                   | (186) |
| 习题 .....                          | (186) |
| <b>7 Z 变换</b> .....               |       |
| 7.1 Z 变换的定义 .....                 | (188) |
| 7.2 Z 变换与拉普拉斯变换的关系 .....          | (189) |
| 7.3 Z 变换的性质 .....                 | (190) |
| 7.4 Z 变换表 .....                   | (195) |
| 7.5 逆 Z 变换 .....                  | (196) |
| 7.6 应用 Z 变换方法解常系数线性差分方程 .....     | (199) |
| 7.7 简短的结论 .....                   | (201) |
| 习题 .....                          | (201) |
| <b>8 线性离散系统的动态特性分析</b> .....      |       |
| 8.1 传递函数 .....                    | (203) |
| 8.2 零点、极点和系统稳定性 .....             | (204) |
| 8.3 线性离散系统的响应 .....               | (207) |
| 8.4 稳态响应 .....                    | (208) |
| 8.5 频率响应函数 .....                  | (211) |
| 8.6 二阶离散系统 .....                  | (212) |
| 8.7 简短的结论 .....                   | (214) |
| 习题 .....                          | (214) |
| <b>9 液体火箭发动机动态特性分析与控制系统</b> ..... |       |
| 9.1 单工况双组元液体火箭发动机的工作稳定性分析 .....   | (216) |

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| 9.2 液体火箭发动机的瞬变过程分析 .....                   | (224) |
| 9.3 变推力液体火箭发动机的工作稳定性分析 .....               | (228) |
| 9.4 可变截面喷注器的动态特性分析 .....                   | (230) |
| 9.5 装有电磁阀控制的可变截面喷注器的变推力液体火箭发动机动态特性分析 ..... | (235) |
| 9.6 可调气穴文氏管和电控液压伺服系统的传递函数 .....            | (242) |
| 9.7 装有可调气穴文氏管的液体火箭发动机的频率特性 .....           | (248) |
| 9.8 液体火箭发动机的气动液压系统和控制系统 .....              | (250) |
| 9.9 简短的结论 .....                            | (252) |
| 习题 .....                                   | (253) |

## 第二部分 状态空间理论

### 10 状态空间模型

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 10.1 线性时不变连续系统状态空间模型 .....            | (257) |
| 10.2 相变量形式的连续系统状态空间模型(能控标准型) .....    | (259) |
| 10.3 通过模拟图导出的连续系统状态空间模型(能观测标准型) ..... | (262) |
| 10.4 $A$ 为对角矩阵的连续系统状态空间模型(解耦型) .....  | (263) |
| 10.5 物理变量表示的连续系统状态空间模型 .....          | (264) |
| 10.6 多输入多输出(MIMO)连续系统状态空间模型 .....     | (265) |
| 10.7 信号流程图(信流图) .....                 | (268) |
| 10.8 线性时不变离散系统状态空间模型 .....            | (271) |
| 10.9 简短的结论 .....                      | (274) |
| 习题 .....                              | (274) |

### 11 连续系统的状态空间分析

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 11.1 状态矢量的线性变换 .....                   | (277) |
| 11.2 状态空间模型的解析解 .....                  | (279) |
| 11.3 预解矩阵和矩阵指数函数 .....                 | (282) |
| 11.4 线性时不变连续系统的李雅普诺夫稳定性分析 .....        | (291) |
| 11.5 线性时不变系统对单位脉冲输入和单位阶跃输入的状态空间解 ..... | (300) |
| 11.6 系统响应的快速性 .....                    | (303) |
| 11.7 用梅森增益公式求解状态方程 .....               | (304) |
| 11.8 简短的结论 .....                       | (305) |
| 习题 .....                               | (306) |

### 12 离散系统的状态空间分析

|                                                                   |       |
|-------------------------------------------------------------------|-------|
| 12.1 离散时间仿真 .....                                                 | (308) |
| 12.2 $A_T$ 和 $B_T$ 的计算 .....                                      | (311) |
| 12.3 稳定性分析 .....                                                  | (314) |
| 12.4 单输入单输出(SISO)系统离散时间状态空间模型与差分方程的关系 .....                       | (315) |
| 12.5 由离散系统状态空间模型 $\{A_T, B_T, C_T, D_T\}$ 计算传递函数矩阵 $H_T(z)$ ..... | (315) |
| 12.6 由离散系统状态空间模型 $\{A_T, B_T, C_T, D_T\}$ 计算离散脉冲响应 .....          | (316) |
| 12.7 零输入响应和零状态响应 .....                                            | (317) |
| 12.8 简短的结论 .....                                                  | (318) |
| 习题 .....                                                          | (318) |

### 13 能控性和能观测性

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 13.1 基本概念 .....                | (320) |
| 13.2 线性时不变连续系统能控性条件的一般形式 ..... | (324) |



## 绪 论

自动控制理论和技术同其他科学技术一样,是从实践中产生和发展起来的。自动控制理论和实践的不断发展,提供了获得动态系统最佳性能的方法,提高了产品质量,降低了生产成本,扩大了劳动生产率,同时还能够使人们从繁重的体力劳动和重复的手工操作中解放出来。

自动控制是指将技术设备或生产过程中的某些物理量(例如压力、温度、流量、转速、电压等)自动地保持为规定值,或者使这些物理量按照指令或一定的程序变化。要满足这样的需要,就必须对技术设备或生产过程进行及时的检测和控制,以补偿或消除干扰的影响,或及时地按要求改变规定值,使技术设备或生产过程达到所需的工作状态。

在控制过程中,受控制的物理量称为受控量或受控参数。用来执行这种控制动作的设备称为控制器(或调节器)。受控制器控制的设备或过程称为受控对象。受控对象和控制器组合而成的系统称为自动控制系统。现代任何复杂的技术系统都是自动控制系统。

技术设备或生产过程的工作状态和受控量随时间变化的特性称为动态特性。由一个元件(或一个工序)对另一个元件(或另一个工序)作用而引起的某一物理量随时间的变化称为信号。干扰的作用、指令的改变或负载的改变,都可以看成是作用在受控对象上的某种信号,该信号经过技术设备内部元件(内部过程)的传递,而使受控量发生相应的变化。也可以说输入信号经过一个技术设备(或生产过程)将引起输出信号的相应变化。因此可以把自动控制系统看成是一种信号传递系统。很明显,必须把系统作为一个整体来研究,才能弄清楚传递信号的过程和特性,而要做到这一点,就必须首先研究组成系统的各元件传递信号的过程和特性。由此可见,信号在系统中的传递过程和传递特性与是各元件的方案、结构参数和工作参数密切相关的。

### 一、自动控制系统的基本组成

自动控制系统中的元件称为环节。为了表示各环节之间相互作用时即传递信号时各环节的功能,一般用方块图来表示系统中各元件的功能和信号传递的方向,如图 0.1 所示。以后会讨论到,通过方块图的变换还可求得输出信号与输入信号之间的关系。图 0.1 中各方块表示各环节(环节的功能),各信号都标以相应的物理量,表示各该物理量随时间的变化。符号 $\otimes$ 表示信号相比较或信号的代数和,称为综合点。从信号传递的观点来看,指令经过输入元件转换成控制信号(一般是电信号),控制信号 $u(t)$ 和干扰作用 $f(t)$ 就是对系统的外加输入信号,输出端的信号即为输出信号。由图可见,对各元件来说,信号的传递都是单向的。“ $\downarrow \rightarrow$ ”是分支点,表示信号在此同时分为二路以同

样的信号传递。

控制器（调节器）和受控对象又分别由若干环节（元件）组成。

控制器（调节器）一般都包括图0.2所示的几个环节（元件），即测量元件、放大元件、校正元件和执行元件。测量元件的作用是对受控量进行测量，并与控制信号相比较。放大元件的作用是将信号的功率放大，以便有足够的功率去推动执行元件。校正元件的作用在于改善系统的动态特性。执行元件的作用是操纵受控对象中的控制机构，以控制受控量。

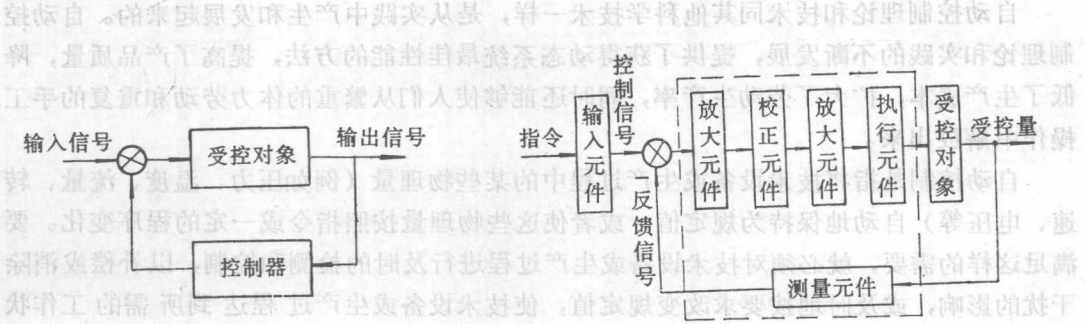


图 0.1 自动控制系统的方块图

图 0.2 控制器（调节器）的组成元件

挤压式双组元液体火箭发动机可以作为受控对象的一个例子，它由燃烧室、氧化剂管路、燃烧剂管路等环节组成，如图0.3所示。

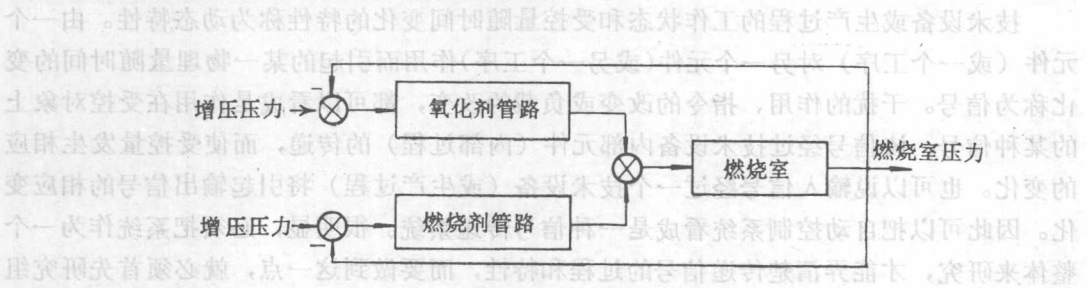


图 0.3 挤压式双组元液体火箭发动机的方块图

如果前一个环节的输出信号就是后一个环节的输入信号，则这样组成的环节称为串联环节，例如图0.2中的放大元件、校正元件和执行元件就是串联环节。

如果一个信号同时输入到几个环节，这些环节的输出信号又综合在一起再输出，则这样组成的环节称为并联环节，例如图0.3中反馈回路的氧化剂管路和燃烧剂管路就是并联环节。

如果一个系统的各环节在传递信号时都是正向的，即系统的输出对系统的输入没有影响，这样的系统称为开环系统（图0.4）。在开环系统中，干扰作用 $f(t)$ 既作用于受控对象，也同样作用于控制器，控制器就按干扰的作用来进行控制，以补偿受控量的变化。这样系统的控制准确度低，因此应用有限。

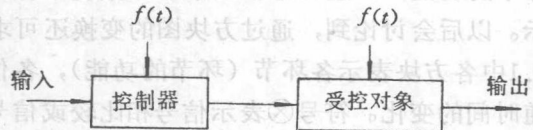


图 0.4 开环系统

如果一个系统(或元件)的输出信号又反向馈送(简称反馈)到系统(或元件)输入端,构成一个闭合的回路,这样的系统称为闭环系统。例如图0.1、图0.2所示的系统和图0.3中的反馈回路就是闭环系统。反馈对系统的动态特性影响很大,它是近代控制技术中一个很重要的概念。

控制系统的任务是使受控量 $y(t)$ 与控制信号 $u(t)$ 之间始终保持一个预先给定的函数关系。由于系统受干扰的作用,以及系统元件本身性能的限制,受控量不能完全跟上控制信号的变化,因而二者之间产生偏离。控制信号 $u(t)$ 和受控量 $y(t)$ 之差称为系统的偏离信号 $e(t)$ ,即

$$e(t) = u(t) - y(t)$$

自动控制系统一般就是利用偏离信号 $e(t)$ 来进行控制的。很明显,如果要起到自动控制的作用,这个反馈信号的符号应该是负的,这样的自动控制系统称为负反馈闭环系统。在这种系统中,不论偏离是什么原因造成的,只要系统中存在偏离信号,系统就不断地自动进行控制,直到偏离信号消除或减小到允许值的范围之内为止,控制过程才结束。因此闭环系统控制的准确度要比开环系统高得多。负反馈闭环系统应用非常广泛。

## 二、自动控制系统的分类

自动控制系统种类繁多,按照不同的特点和控制规律,可将自动控制系统作如下五种类别。

按控制信号的变化规律有:恒值控制系统;程序控制系统;随动系统;自适应系统。

按系统元件传递信号的特性,即按各元件的输出信号与输入信号之间的关系,有:普通线性系统(线性化系统);非线性系统;特殊线性系统(如时滞系统)。

按元件的输入信号或输出信号是连续的或断续的,有:连续系统;离散系统(采样系统)。

按系统的输入信号和输出信号的数量,有:单输入单输出(SISO)系统;多输入多输出(MIMO)系统。

按描述系统的微分方程的系数是常数或变数,有:时不变(常系数)系统;时变(变系数)系统。

本书主要讨论时不变线性系统。

一般,自动控制理论主要是针对闭环系统来讨论的。自动控制理论就是关于自动控制系统的稳定性、动态特性、最优控制等方面分析和综合的理论。

古典控制理论,即自动调节原理,是本世纪30年代形成的一门学科。当时的控制比较简单,手解微分方程就可以对系统进行分析,因此是时域的方法。随着控制系统日益复杂,特别是第二次世界大战前后,新武器的设计要求,手解微分方程分析高阶系统遇到了困难,促进了自动调节原理的大发展,先后出现了奈魁斯特(H. Nyquist)、伯德(H. W. Bode)的频率法和艾文思(W. R. Evans)的根轨法,这两种方法不用手解微分方程就能分析高阶系统的稳定性和动态特性,为系统分析与设计提供了工程上很实用的方法,使系统分析由初期的时域转到了频域。直到现在,频域法仍是控制工程中广泛使

用的方法。古典控制理论本质上是一种频率法,要靠各个频率分量描述信号,因而根据叠加原理,这种理论和方法只适用于单输入单输出的线性时不变系统的分析和设计。

控制理论的发展来源于受控对象的要求。近20多年来,科学技术的飞速进步,特别是航天技术、自动化技术、信息技术和各类高速飞行器的发展,要求控制高速度、高精态的受控对象;控制系统更加复杂,要求控制理论解决多输入多输出、非线性和时变系统的分析、设计问题;对受控对象性能的要求不断提高,很多情况下,要求系统的某些性能为最优,并对环境的变化有一定的适应能力等。这些新的要求,用古典理论和方法是满足不了的。

科学技术的巨大进步,不仅需要迅速发展控制理论,而且也给现代控制理论的发展准备了两个重要条件,这就是现代数学(如泛函分析,现代代数等)和数字计算机。现代数学为现代控制理论提供了多种多样的分析工具,而数字计算机的发展对控制理论的发展更具有决定性的作用。在这种情况下,1960年前后开始形成现代控制理论。现代控制理论本质上是时域法,信号的描述和传递都是在时域内进行的,这使系统分析和设计又回到了时域。现代控制理论是建立在状态概念的基础上的,它用状态空间方程作为基本工具,可以分析多输入多输出、非线性和时变系统。

古典控制理论的许多方法(例如频率法)的物理意义很直观,便于使用,但它的一些用于分析、设计的方法往往要依赖于经验,而不能从理论上给出某种性能最优的系统。现代控制理论是在古典控制理论的基础上发展起来的,它不仅提供了分析和设计结构复杂、性能优化的系统的新方法,而且提出了一些新概念,能够更深刻地揭示系统的一些本质特性,但某些物理概念不很直观。现代控制理论内容很广泛,它仍在不断发展。总之,古典控制理论和现代控制理论二者是相辅相成的。事实上,从70年代中期以来,这两种理论逐渐结合,正在形成所谓第三代控制理论,继承第一代和第二代控制理论的成果,又吸取其他有关科学领域的成就。一方面从人工智能和思维科学吸取营养,把归纳和推理等思维方法引入控制系统的分析和设计中来;另一方面在系统论、协同论、耗散结构等交叉学科和基础学科的基础上发展控制理论。因此,我们应当采取将古典控制理论同现代控制理论相联系、相结合、相对比的方法来学习、研究和应用,并跟踪控制理论和控制技术的发展。

### 三、对自动控制系统的要求

对于一个系统进行自动控制的目的,是要使系统的运动状态符合所期望的要求。对于不同的系统和不同的工作条件,要求是不完全相同的,但一般说来,有以下几点基本要求:

#### 1. 系统必须是稳定的

自动控制系统的稳定性按照古典理论是指:系统受到某种作用偏离原来的平衡状态,被控量就会偏离原来的值而开始变化,当该某种作用去掉后,经过一定的时间,如果系统最终能回复到原来的平衡状态,被控量能恢复到原来的值,则称该系统是稳定的,否则就是不稳定的。我们要求系统必须是稳定的,而且要有一定的稳定裕度。稳定工作是系统正常工作的首要要求。

## 2. 系统必须有符合规定的稳态准确度

具有储能元件的稳定系统, 当受到控制信号或干扰作用时, 系统并不立即从一个平衡状态突然转变到另一个平衡状态, 而要经过一个过渡过程(或瞬变过程)。过渡过程结束后, 在控制信号或干扰作用下系统被控量的实际值与期望值(理论值)之间将存在一定的差异, 称为稳态误差(图0.5中的 $e$ ), 其大小反映了系统的稳态准确度。一个系统的稳态误差, 要求不超过规定的某一数值(图0.5中的 $\Delta$ )。

## 3. 系统的过渡过程品质必须满足一定的要求

根据任务的需要, 对系统被控量在过渡过程中随时间变化的规律也是有要求的, 这些要求一般用若干品质指标来表示。被控量偏离稳态值的最大量值即过调量、过渡过程的持续时间即调整时间、上升时间即响应时间、延迟时间、振荡次数等作为过渡过程性能的主要品质指标。图0.5所示为在单位阶跃函数的控制信号作用下系统的阶跃响应曲线, 图上表明了这些品质指标。对给定的系统来说, 按任务的要求, 对这些品质指标都要规定一定的限度, 系统在过渡过程中的动态特性必须满足这些要求。

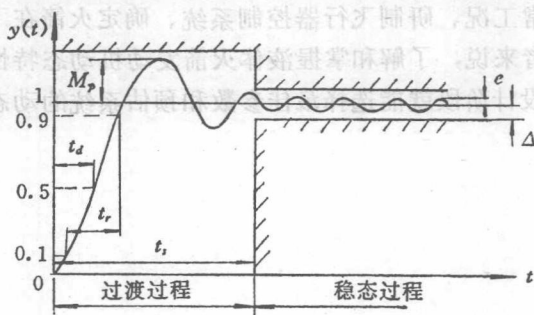


图 0.5 单位阶跃响应曲线

$M_p$ ——超调量     $t_r$ ——响应时间  
 $t_s$ ——调整时间     $t_d$ ——延迟时间

自动控制系统是一个动态系统。

对这样的系统, 为了提高性能, 在设计阶段和运转阶段都需要对其动态特性进行分析。

对动态系统进行分析, 一般有以下几个主要阶段:

1. 建立系统的数学模型。

2. 对数学模型求解。对比较简单的系统, 可求得解析形式, 对较复杂的系统, 常常需要用数字计算机求出数值解, 即所谓计算机仿真。

3. 对所求得的解进行分析, 研究所建立的数学模型的合理性, 探讨各参数对系统性能的影响。

4. 根据分析所得的结果, 适当地改变系统, 以提高其性能。一般有两个途径: 一个途径是对系统进行修改, 即对系统的方案、参数、结构、数学模型等进行修改; 另一个途径是对系统实施控制。

液体火箭发动机, 尤其是变推力液体火箭发动机, 是一个复杂的动态系统。为了给这种发动机获得良好的动态特性提供理论依据, 要应用控制理论对发动机的稳定性、稳态准确度和过渡过程品质等进行分析。

液体火箭发动机同其他实际系统一样, 是非线性系统, 但在某种程度和某些假设条件下, 可按线性系统来处理。线性系统理论比较成熟, 用它来分析一个系统, 可以按照标准方式求得有用的结果。

从物理观点考虑, 线性系统必须满足两个重要性质的要求, 即叠加性(分解性)和均匀性。这可表示如下:

设  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  是系统的两个输入量,  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  是系统相应的两个输出量 (响应),  $k$  为标量, 如果, 利用线性方程描述系统, 则系统称为线性系统。若系统满足叠加原理, 即若输入  $f_1(t) \rightarrow y_1(t)$  和  $f_2(t) \rightarrow y_2(t)$  是系统的两个输入-输出对, 则输入  $k[f_1(t) + f_2(t)] \rightarrow k[y_1(t) + y_2(t)]$  也是系统的输入-输出对, 则系统是线性的, 否则就是非线性的。

从数学观点来考虑, 线性系统就是由线性方程描述的系统。这种线性方程可以是线性代数方程、线性微分方程或线性差分方程。研究和掌握液体火箭发动机动态特性的理论, 对于分析发动机系统的稳定性和非正常工况、研制飞行器控制系统、确定火箭在飞行中的稳定性等都是非常必需的。对设计者来说, 了解和掌握液体火箭发动机动态特性的计算和分析方法, 可帮助他即使在草图设计阶段就能选择最佳参数和预估系统的动态特性。

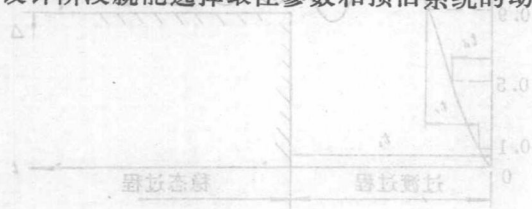


图 3.0 液体火箭发动机的动态特性  
曲线方程—— $y = 1 - e^{-x}$  量纲数—— $y$   
时间—— $x$  时间轴—— $x$

从工程观点来看, 液体火箭发动机的动态特性, 是指发动机在飞行过程中, 其工作状态随时间变化的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 可以分为静态特性和动态特性。静态特性是指发动机在稳态工作时的特性, 而动态特性是指发动机在瞬态工作时的特性。

发动机的静态特性, 是指发动机在稳态工作时的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 是指发动机在瞬态工作时的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 可以分为静态特性和动态特性。静态特性是指发动机在稳态工作时的特性, 而动态特性是指发动机在瞬态工作时的特性。

发动机的静态特性, 是指发动机在稳态工作时的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 是指发动机在瞬态工作时的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 可以分为静态特性和动态特性。静态特性是指发动机在稳态工作时的特性, 而动态特性是指发动机在瞬态工作时的特性。

发动机的静态特性, 是指发动机在稳态工作时的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 是指发动机在瞬态工作时的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 可以分为静态特性和动态特性。静态特性是指发动机在稳态工作时的特性, 而动态特性是指发动机在瞬态工作时的特性。

发动机的静态特性, 是指发动机在稳态工作时的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 是指发动机在瞬态工作时的特性。这种特性, 通常用发动机的推力、燃烧室压力、燃气温度等参数来描述。发动机的动态特性, 可以分为静态特性和动态特性。静态特性是指发动机在稳态工作时的特性, 而动态特性是指发动机在瞬态工作时的特性。

第 一 部 分

古 典 理 论

卷一 略

古今典故