

智能建筑设施管理专业系列丛书

# 楼宇自动化原理

黄治钟 编著



● 中国建筑工业出版社

JIANZHUZIDONGGHUAYUANLI

智能建筑设施管理专业系列丛书

# 楼宇自动化原理

黄治钟 编著

中国建筑工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

楼宇自动化原理/黄治钟编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2003

(智能建筑设施管理专业系列丛书)

ISBN 7-112-05796-5

I. 楼… II. 黄… III. 智能建筑—自动化系统  
IV. TU855

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 053163 号

智能建筑设施管理专业系列丛书

**楼宇自动化原理**

黄治钟 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市兴顺印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12 字数: 294 千字

2003 年 10 月第一版 2003 年 10 月第一次印刷

印数: 1—3,000 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-112-05796-5

TU·5092 (11435)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书较系统地介绍了楼宇自动化系统所涉及的基本原理、系统特性、传感器件、执行机构以及楼宇自动化系统中采用的抗干扰技术和通讯协议等内容，最后还介绍了自动化技术在楼宇设备系统中的应用。

本书共分九章，分为四个部分：第一、第二章主要介绍了自动控制的基本原理；第三、第四章主要介绍了楼宇自动化系统中所应用的各种传感器和执行机构；第五、第六章主要介绍计算机控制系统；第七、第八、第九章主要介绍与楼宇自动化系统相关的抗干扰技术、通讯协议以及自动控制在楼宇设备系统中的应用等内容。

本书可作为普通高等院校相关专业的教材，以及智能建筑方面的培训教材，也可供从事智能化楼宇设施管理领域的工程技术人员和管理人员参考。

# 前 言

自动控制理论已经有一百多年的历史。自第二次世界大战结束以来，自动控制理论和自动控制技术在工农业生产中得到了广泛的应用，极大地提高了劳动生产率和产品质量。但是直到上世纪70年代，自动控制技术才开始在楼宇设备系统中得到应用。今天，为了使建筑物能够为人们提供一个合理、高效、舒适、安全、方便、节能的室内环境，楼宇自动化系统已经是一个不可或缺的因素。

楼宇自动化控制属于连续过程控制的范畴，一般采用线性连续系统的原理和方法来进行分析，采取的主要技术措施也大多源于工业控制。但是与一般工业生产过程的自动控制相比，它还具有诸如多工况、多干扰、非线性、大滞后、参数离散以及受控对象的数学模型不易准确求取等特点；从整个系统来看，系统中各个子系统在运行中的相互影响也不容忽视。在运用自动控制系统的一般原理对楼宇自动化系统进行设计、计算和整定时，必须充分考虑这些特点对系统控制品质的影响。

本书共分九章，从内容上看，可以分为四个部分：第一、第二章为第一部分，主要介绍了自动控制的基本原理，包括传递函数、系统稳定性、系统的稳态特性和动态特性、控制器的基本算法及其参数整定等内容；第三、第四章为第二部分，主要介绍了楼宇自动化系统中所应用的各种传感器和执行机构，包括它们的工作原理、特性、选用原则和使用要求；第五、第六章为第三部分，主要介绍计算机控制系统，包括计算机控制系统的组成、信号采样与复现、脉冲传递函数、采样系统的稳定性、数字控制器的实现及其参数整定、计算机控制系统的输入/输出接口等内容；最后的第七、第八、第九章为第四部分，主要介绍与楼宇自动化系统相关的抗干扰技术、通讯协议，以及自动控制技术在楼宇设备系统中的应用等内容。

本书是在编者近年来讲授《楼宇自动化原理》课程的讲义和授课笔记的基础上进行整理、扩充和提高而成。书中的主要内容形成于2000~2001年，曾以讲义的形式印行，在同济大学设备工程与管理专业、建筑环境与设备专业和智能化楼宇设施与管理专业的教学中实际使用，收到了预期的效果。

本书的编写始终是在龙惟定教授的指导和帮助之下进行的，同济大学楼宇设备工程与管理系的各位老师都提出了不少有益的建议，其中潘毅群老师还利用去美国访问的机会为编者提供有关资料，在此一并表示深切的感谢。

由于编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2003年3月于同济大学

# 目 录

绪论	1
<b>第一章 自动控制原理</b>	<b>4</b>
第一节 概述	4
第二节 传递函数、频率特性和结构图	6
第三节 稳定性分析	13
第四节 稳态特性分析	18
第五节 动态特性分析	21
<b>第二章 控制系统设计</b>	<b>28</b>
第一节 控制系统的性能指标	28
第二节 被控对象的动态特性	30
第三节 确定被控对象传递函数的几种方法	31
第四节 理想控制器	37
第五节 基本 PID 控制器及其调节过程	38
第六节 控制系统的工程整定方法	48
第七节 复杂控制系统	52
<b>第三章 传感器原理</b>	<b>62</b>
第一节 概述	62
第二节 传感器的主要性能参数	62
第三节 温度传感器	63
第四节 压力传感器	72
第五节 流量传感器	75
第六节 湿度传感器	79
<b>第四章 执行机构</b>	<b>82</b>
第一节 执行器	82
第二节 常见调节阀的结构类型	84
第三节 调节阀的流量系数	86
第四节 阻塞流现象	89
第五节 调节阀的结构特性	90
第六节 调节阀的流量特性	91
第七节 调节阀流量特性和口径的选择	96
第八节 控制风阀	97

<b>第五章 计算机控制系统</b> .....	99
第一节 计算机控制系统的一般组成 .....	99
第二节 计算机控制系统的一般类型 .....	101
第三节 信号的采样与复现 .....	102
第四节 脉冲传递函数 .....	104
第五节 采样系统的稳定性分析 .....	109
第六节 PID 控制算法 .....	111
第七节 数字控制器参数的工程整定 .....	117
<b>第六章 接口技术</b> .....	123
第一节 模拟量输出通道 .....	123
第二节 模拟量输入通道 .....	125
第三节 数字量输入/输出通道 .....	129
第四节 字长选择 .....	130
<b>第七章 抗干扰技术</b> .....	132
第一节 干扰的来源和传播途径 .....	132
第二节 干扰的作用方式 .....	134
第三节 干扰的抑制 .....	135
第四节 接地 .....	140
第五节 数字滤波 .....	141
<b>第八章 现场总线、BACNet 和 LonWorks</b> .....	144
第一节 现场总线 .....	144
第二节 BACNet .....	146
第三节 LonWorks .....	150
第四节 BACNet 和 LonWorks 的适用场合 .....	156
<b>第九章 自动控制技术在楼宇设备系统中的应用</b> .....	158
第一节 概述 .....	158
第二节 空调水系统 .....	158
第三节 空调箱 .....	162
第四节 变风量末端 .....	170
第五节 变风量系统 .....	173
第六节 风机盘管 .....	176
<b>附录</b> .....	178
附录一 拉普拉斯变换 .....	178
附录二 差分方程与 Z 变换 .....	182
<b>参考文献</b> .....	186

# 结 论

随着计算机技术、控制技术、通信技术及信息技术的飞速发展，人们对工作、生活环境的舒适性、经济性和安全性的要求日渐增长，智能建筑由此应运而生。智能建筑系统通常包括三个组成部分——楼宇自动化系统（BAS）、办公自动化系统（OAS）和通信自动化系统（CAS），即 3A 大厦；有时也将消防报警系统（FAS）和停车库管理系统（PAS）作为智能建筑的组成部分，即 5A 大厦。在建筑物中采用这些自动化系统的目的，是为了使建筑物能够为人们提供一个合理、高效、舒适、安全、方便、节能的室内环境，有利于人们的工作和生活。其中，楼宇自动化系统是智能建筑系统中一个重要的、基本的组成部分，而智能建筑系统是建立在楼宇自动化系统的基础之上的。

楼宇自动化系统（Building Automation System）针对楼宇内各种机电设备进行集中管理和监控。这其中主要包括空调及新风系统、送排风系统、冷冻站系统、热交换站系统、变配电系统、照明系统、给排水系统、垂直输送系统等。通过对各个子系统进行监测、控制、信息记录，实现分散节能控制和集中科学管理，为用户提供良好的工作和生活环境，同时为管理者提供方便的管理手段，从而减少建筑物的能耗并降低管理成本。

楼宇自动化系统的组成如图 0.1 所示。

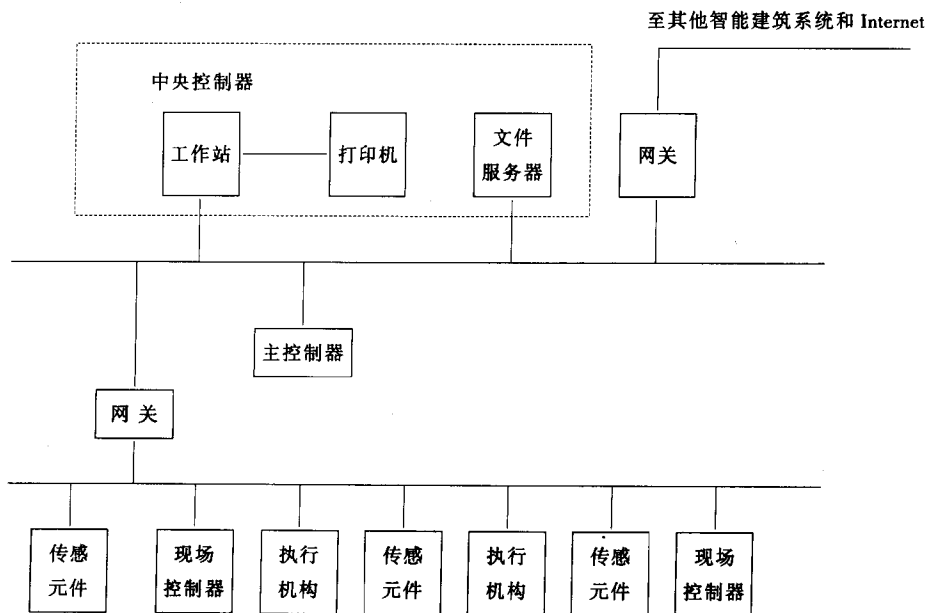


图 0.1 楼宇自动化系统

从上图可知，楼宇自动化系统是由中央管理站、各种 DDC 控制器及各类传感器、执行机构组成的、能够完成多种控制及管理功能的网络系统。它是随着计算机在室内环境控



制和管理中的应用而发展起来的一种智能化控制管理网络。目前，系统中的各个组成部分已从过去的非标准化的设计、生产，发展成标准化、专业化、系列化的产品，各种设备间的相互通信也有了专门的通讯协议，从而使系统的设计、安装、调试、扩展以及互通互联更加方便和灵活，系统的运行更加可靠，同时系统的初投资也大大降低。

现代典型的楼宇自动化系统一般由以下几部分组成：

1. 中央控制器：中央控制器对整个系统进行监测、协调和管理，并不承担具体的控制任务。中央控制器包括工作站、文件服务器及打印机等，工作站和文件服务器通过网络接口连接在一级网络上。

2. 主控制器：主控制器是整个系统中各离散化的区域控制器（DDC）的协调者，其作用是实现全面的信息共享，完成区域控制器与中央控制室的工作站之间的信息传递、数据存储、区域或远端报警等功能，并负责对整个系统的性能进行全局优化。同时，主控制器还担负着与其他智能建筑系统（如 FAS 等）进行协同动作的任务。主控制器含有 CPU、存储器、I/O 接口，通过网络接口连接在一级网络上。

3. 现场控制器（即直接数字控制器 DDC）：现场控制器是具体控制机电设备的装置，与安装在设备上的传感器件和执行机构相连，每个现场控制器都包含有 CPU、存储器、I/O 接口，分设在各控制现场，通过网络接口连接在二级网络上。

4. 传感器件：装设在各监控点的传感器，包括各种敏感元件、信号变送器、信号接点和限位开关，接收并传送信号。

5. 执行机构：接收控制信号并调节被监控设备。

由于现代楼宇自动化系统中的各个部件或者本身就是计算机（如中央控制器、主控制器和 DDC），或者是基于计算机的（如智能传感器等），因此，系统的正确运行，还需要有各种软件系统的支持。这其中包括操作系统、实时控制、状态监测、系统优化与协调、运行管理、网络通讯以及数据库等。

楼宇自动化系统担负着对整个楼宇各种设备的日常运行进行管理、控制、协调，以及在发生异常情况时及时作出反应的任务，它的基本功能有：

1. 系统中各种数据的采集；
2. 各种设备的启/停控制与轮换运转控制；
3. 设备运行状况的图像显示；
4. 各种参数的实时控制和监视；
5. 参数与设备的非正常状态报警；
6. 动力设备的节能控制及最优控制；
7. 能量和能源管理及报表打印；
8. 事故报警报告及设备维修事故报告打印；
9. 根据实际运行时间安排设备定期维护和检修计划。

从自动控制技术的角度来看，楼宇自动化系统属于连续过程控制的范畴，它的基本功能，就是尽量保持各种参数的实际值等于或接近设定值。如果由于各种扰动因素的影响，使得参数的实际值偏离了设定值，控制系统就应当采取正确的策略，使得参数能够尽快地恢复为设定值，并尽量减少这一过程中参数的波动。

楼宇自动化系统的另一个基本功能，就是协调和优化各种楼宇设备的运行状态，在满

足室内环境参数和使用功能的前提下，尽可能地减少能源消耗。目前，世界平均建筑能耗占总能耗的 37%。在我国，建筑能耗占能源总消费量的比例，已从 1978 年的 10%，上升到 2001 年的 27.6%（新华网，2002-6-3），并有进一步上升的趋势。因此，通过采用楼宇自动化系统以节省能源消费，具有重大的现实意义。

尽管楼宇自动化系统属于连续过程控制的范畴，目前采取的主要技术措施也大多源于工业控制，但是与一般工业生产过程的自动控制相比，它还具有诸如多工况、多干扰、非线性、大滞后、参数离散，以及受控对象的数学模型不易准确求取等特点。在运用自动控制系统的一般原理对楼宇自动化系统进行设计、计算和整定时，必须充分考虑这些特点对系统控制品质的影响。

楼宇自动化系统的成功构建与运行，除了需要根据自动控制系统的原理，对系统的控制方案进行合理选择，对系统中各控制器、传感器、执行机构等部件的参数进行正确计算与选取，以及对通信网络进行正确配置以外，更重要的是对各受控设备的工作特性和工作状态有充分的了解，从控制的角度去理解它们的静态和动态特性，以及对整个楼宇自动化系统乃至整个智能建筑系统的整体性把握。

# 第一章 自动控制原理

## 第一节 概 述

按照控制系统是否具有反馈环节，控制系统可分为开环控制和闭环控制两种。没有反馈环节的，称为开环控制系统，反之称为闭环控制系统。

### 一、开环控制系统

如果系统的输出量不被引回来对系统的控制部分产生影响，这样的系统称为开环控制系统。

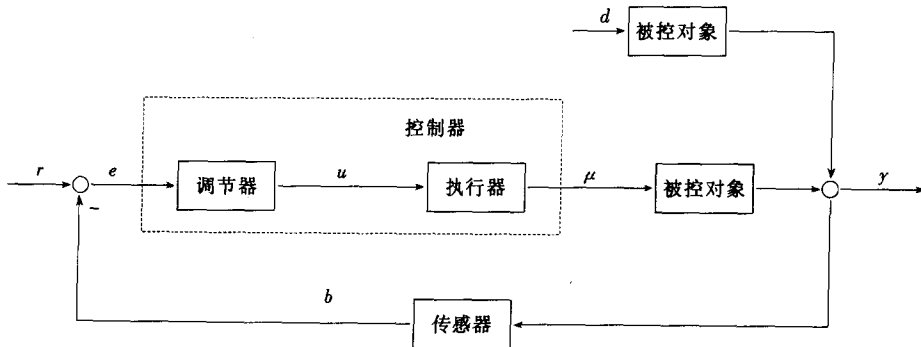
由于没有反馈环节，开环控制系统一般来说结构比较简单，系统稳定性好，成本低。对于那些输入量和输出量之间的关系固定不变，而且内部参数或外部负载等扰动因素不大，或者这些扰动因素能够预先确定并能进行补偿，则应尽量采用开环控制系统。

开环控制系统的缺点是当控制过程受到各种扰动因素的影响时，将会直接影响输出量，而系统不能自动进行补偿。当无法预计的扰动影响使得输出量的变化超过允许限度时，开环控制系统就无法满足使用要求，这时就应当采用闭环控制系统。

### 二、闭环控制系统

如果系统的输出量被引回来作用于系统的控制部分，形成闭合回路，这样的系统称为闭环控制系统，也称为反馈控制系统。

在反馈控制系统中，有关被控对象的有关信息被获取以后，通过一些中间环节，最后又作用于被控对象本身，使之发生变化。这样，信息的传递途径是一个闭合的环路。在这个闭合的环路中，除了被控对象以外，还有实现控制的设备，称为控制器，以及获取被控对象有关信息的设备，称为传感器。以下是反馈控制系统的方框图，其中的控制器由调节器和执行器构成。



图中：

$r$ —设定值； $e$ —偏差； $u$ —调节器输出； $\mu$ —执行器输出； $y$ —受控变量； $b$ —受控变量测量值； $d$ —干扰

图 1.1 反馈控制系统

既然反馈控制的目的是要消除（或减小）受控变量与设定值之间的偏差，那么控制作用的方向必然要与偏差的方向相反。为了强调说明反馈的这种性质，我们将这样的反馈称为负反馈。反馈控制系统中的反馈都是负反馈。

### 三、自动控制系统的分类

（一）按输入量变化的规律分类，可分为

#### 1. 恒值控制系统

恒值控制系统的特点是：系统的输入量（设定值）是恒量，并且要求系统的输出量（受控变量）相应地保持不变。这类系统所需要解决的主要问题，是克服各种能够使受控变量偏离设定值的扰动的影响。控制的任务是尽快地使受控变量恢复到设定值。如果不得已而残留一些误差，则误差应当尽可能小。

在恒值控制系统中，如果需要将受控变量调整到另一个数值上去，只要简单地改变设定值就可以做到。在这样改变设定值的时候，控制作用需要克服的就不是扰动，而是被控对象的惯性了。但是这种改变设定值的情形并不是一个恒值控制系统经常会遇到的工作状态，所以，在偶然进行这种调节的时候，只要能够保持稳定，系统的工作质量如何，通常不是考虑的主要因素。

恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统，如恒温控制系统，自动调速系统等。

#### 2. 随动控制系统

随动控制系统的特点是：输入量是变化的（可能是有规律的变化，也可能是随机变化），并且要求系统的输出量能够跟随输入量的变化而作出相应的变化。

随动控制系统的任务是保持受控变量等于某一个变化着的、不可预知的量。这类系统要解决的主要问题，是克服被控对象的惯性。控制的任务是要使受控变量紧随着设定值的变化而变化。尽管在跟随的过程中，误差是不可避免的，但是应当使误差尽可能地小，并且希望能够事先估计误差的大小与方向。

随动控制系统当然也会受到各种扰动的影响，但与跟随设定值的变化相比较，扰动的影响是次要的，不需要专门加以考虑。

随动控制系统在工业和国防上有着广泛的应用，如仿形加工机床、机器人控制系统和雷达导引系统等。

在楼宇自动化系统中，大量应用的是恒值控制系统，但是也有应用随动控制系统的场合。

（二）按系统传输信号对时间的关系分类，可分为

#### 1. 连续控制系统

连续控制系统的特点是控制作用的信号是连续量或模拟量。通常，连续控制系统的控制器由模拟电子器件构成。

#### 2. 离散控制系统

离散控制系统又称为采样控制系统。它的特点是作用于系统的控制信号是断续量、数字量或采样数据量。通常，采用数字计算机构成控制器的系统都是离散系统。

（三）按系统的输出量和输入量之间所谓关系分类，可分为

#### 1. 线性控制系统

线性控制系统的特点是系统的输出量与输入量之间的关系是线性的。它的各个环节或

系统的运动规律都可以用线性微分方程来描述，可以应用叠加原理和拉普拉斯变换。

## 2. 非线性控制系统

非线性控制系统的特点是其中的一些环节具有非线性性质，它们的运动规律往往要用非线性微分方程来描述，而且叠加原理对于非线性控制系统是不适用的。

根据楼宇自动化系统的实际情况，以下只讨论连续控制的线性系统。离散控制的线性系统在第五章中讨论。

## 第二节 传递函数、频率特性和结构图

### 一、传递函数

一个控制系统的运动规律，除了用微分方程进行描述以外，还可以用传递函数来进行描述。传递函数比微分方程简单明了，运算方便，是自动控制中最常用的数学模型，而它的形象描述就是结构图。

#### (一) 传递函数的概念

##### 1. 传递函数的定义

传递函数是在用拉普拉斯变换求解微分方程的过程中引申出来的概念。微分方程可以准确描述控制系统的运动规律，但是它的主要缺点是计算麻烦，而且由它表示的输出与输入之间的关系复杂且不明显。经过拉普拉斯变换以后，微分方程变为一个代数方程，可以通过一般代数方法进行求解，从而可以用简洁明了的比值关系描述系统输出与输入之间的关系。这一系统输出与输入之间的比值关系就是系统的传递函数，它是我们研究控制系统时所使用的主要数学模型（有关拉普拉斯变换的进一步内容可参见附录）。

传递函数的定义为：在初始条件为零时，输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比。即

$$\text{传递函数 } G(s) = \frac{\text{输出量的拉普拉斯变换}}{\text{输入量的拉普拉斯变换}} = \frac{Y(s)}{R(s)}$$

这里所指的初始条件为零，一般是指输入量在  $t=0$  时刻以后才作用于系统，系统的输入量和输出量及其各阶导数在  $t=0$  时也均为零。实际的控制系统多为这种情况。在考虑一个系统时，通常总是假定该系统原来处于稳定平衡状态，若不加输入量，系统的状态不会发生任何变化。系统的各个变量都可以将输入量作用以前的稳态值作为起算点（即零点），所以一般都能满足零初始条件。

##### 2. 传递函数的一般表达式

如果系统的输入量为  $r(t)$ ，输出量为  $y(t)$ ，并可以由下列微分方程描述：

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n}{dt^n} y(t) + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y(t) + \cdots + a_1 \frac{d}{dt} y(t) + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m}{dt^m} r(t) + b_{m-1} \frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_1 \frac{d}{dt} r(t) + b_0 r(t) \end{aligned}$$

在零初始条件下，对微分方程的两边进行拉普拉斯变换，得

$$\begin{aligned} a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \cdots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) \\ = b_m s^m R(s) + b_{m-1} s^{m-1} R(s) + \cdots + b_1 s R(s) + b_0 R(s) \end{aligned}$$

即

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0) R(s)$$

根据传递函数的定义, 有

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}$$

由上述可见, 在零初始条件下, 只要将微分方程中的微分算符  $\frac{d^{(k)}}{dt^{(k)}}$  换成相应的  $s^k$ , 就可以得到系统的传递函数。上式是传递函数的一般表达式。

### 3. 传递函数的性质

(1) 传递函数是由微分方程变换得到的, 它和微分方程之间存在一一对应的关系。对于一个确定的系统, 它的微分方程是惟一的, 传递函数也是惟一的。

(2) 传递函数是复变量  $s$  的有理分式,  $s$  是复数, 而分式中的各项系数  $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0$  以及  $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$  都是实数, 它们是由组成系统的各元件的参数及其相互之间的联结关系所决定的。从以上传递函数的表达式可知, 传递函数完全取决于其系数, 所以传递函数只与系统本身的内部结构和参数有关, 而与输入量、扰动量等外部因素无关, 它代表了系统的固有特性。

(3) 传递函数是一种运算函数。由  $G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)}$  可得  $Y(s) = G(s) R(s)$ , 此式表明, 若已知一个系统的传递函数  $G(s)$ , 则对任何一个输入量  $r(t)$ , 只要以  $R(s)$  乘以  $G(s)$ , 即可得到输出量的拉普拉斯变换  $Y(s)$ , 再经过反变换, 就可以求得输出量  $y(t)$ 。由此可见,  $G(s)$  起着从输入到输出的传递作用, 所以称之为传递函数。

(4) 传递函数的分母是它所对应的系统的微分方程的特征方程多项式, 即  $a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0 = 0$  是特征方程。而特征方程的根反映了系统动态过程的性质, 所以可以通过传递函数来研究系统的动态特性。特征方程的阶次  $n$  即为系统的阶次。

## 二、典型信号及其拉普拉斯变换

在自动控制系统中的各种信号具有不同的形式, 可以是周期信号, 也可以是非周期信号; 可以是连续信号, 也可以是脉冲信号。为了研究自动控制系统在各种信号作用下的运动规律, 我们通常用一些特殊的信号来代表实际系统中的某一类信号, 并以将这些特殊信号作为输入量时, 系统输出量 (也称为响应) 的变化规律作为评价系统性能的指标。这些特殊信号也称为典型信号, 一般有单位脉冲信号、单位阶跃信号和单位斜坡信号等。

### 1. 单位脉冲信号

单位脉冲信号是一个持续时间无限短、脉冲幅度无限大、信号对时间的积分为 1 的矩形脉冲信号。即

$$\delta(t) \begin{cases} 0, t < 0, t > \epsilon \\ \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\epsilon} & 0 \leq t \leq \epsilon \end{cases}, \int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

它的拉普拉斯变换为:  $R(s) = L[\delta(t)] = 1$ 。

单位脉冲信号通常用来模拟外界干扰 (扰动) 信号, 而系统的单位脉冲响应通常反映了系统在干扰信号的作用下, 受控变量从偏离稳定值到最终恢复至稳定值 (或其附近) 的运动过程。

### 2. 单位阶跃信号

单位阶跃信号是一个当  $t=0$  时，信号突然从 0 变化到 1、并且始终保持为 1 的脉冲信号，即

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

它的拉普拉斯变换为： $R(s) = L[u(t)] = \frac{1}{s}$ 。

单位阶跃信号通常用来模拟设定值的突然改变，而系统的单位阶跃响应反映了系统在设定值突变以后，受控变量从一个稳定值变化到另一个稳定值的变化过程。系统的单位阶跃响应是评价系统动态过程的一个最常用的指标，因而单位阶跃脉冲也是最常用的典型信号之一。

### 3. 单位斜坡信号

单位斜坡信号是一个在  $t > 0$  时随时间增长而线性增长的连续信号，即

$$r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t, & t \geq 0 \end{cases}$$

它的拉普拉斯变换为： $R(s) = L[r(t)] = \frac{1}{s^2}$ 。

单位斜坡信号通常用来模拟设定值的连续变化，而系统的单位斜坡响应反映了系统在设定值作连续变化时，受控变量跟随设定值的变化而变化的能力，这是评价随动控制系统时最基本的指标之一。

## 三、典型环节的传递函数

任何一个复杂的系统，总可以看成由一些典型环节组合而成。掌握这些典型环节的特点，可以更加方便地分析较复杂系统内部各单位间的联系。典型环节有比例环节、惯性环节、振荡环节、积分环节、微分环节和延迟环节等。

### 1. 比例环节

微分方程： $y(t) = kr(t)$

传递函数： $G(s) = k$

比例环节能立即成比例地响应输入量的变化，是自动控制系统中最常见的基本环节。

### 2. 惯性环节

微分方程： $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = r(t)$

传递函数： $G(s) = \frac{1}{Ts + 1}$

当惯性环节的输入量发生突变时，输出量不能发生突变，而只能按指数规律逐渐变化。这就反映了该环节具有惯性。惯性环节是自动控制系统中常见的一种基本环节。

### 3. 振荡环节

微分方程： $T^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2T\zeta \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = r(t)$

传递函数： $G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$

式中的  $\omega_n = \frac{1}{T}$ ， $\zeta$  称为阻尼比（阻尼系数）。

当  $\zeta = 0$  时,  $y(t)$  为等幅自由振荡, 其振荡频率为  $\omega_n$ ,  $\omega_n$  又称为自由振荡频率。

当  $0 < \zeta < 1$  时,  $y(t)$  为阻尼振荡, 其振荡频率为  $\omega_d$ ,  $\omega_d$  又称为阻尼振荡频率,  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ 。

当  $\zeta \geq 1$  时,  $y(t)$  为单调上升曲线, 并不振荡, 此时的振荡环节可以分解为两个相串联的惯性环节。

而当  $\zeta < 0$  时,  $y(t)$  发散。

在自动控制系统中, 如果包含着两种不同形式的储能元件, 这两种元件的能量又能相互交换, 在能量的贮存和交换的过程中, 就可能出现振荡而构成振荡环节。

#### 4. 积分环节

$$\text{微分方程: } y(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t r(t) dt \quad (T_I \text{ 为积分时间常数})$$

$$\text{传递函数: } G(s) = \frac{1}{T_I s}$$

积分环节的特点是它的输出量为输入量对时间的积累。因此, 凡是输出量对于输入量有贮存和积累特点的元件一般都含有积分环节。积分环节也是自动控制系统中常见的一种基本环节。

#### 5. 微分环节

$$\text{微分方程: } y(t) = T_D \frac{dr(t)}{dt} \quad (T_D \text{ 为微分时间常数})$$

$$\text{传递函数: } G(s) = T_D s$$

微分环节的输出量与输入量之间的关系正好与积分环节相反。因此, 积分环节的逆过程就是微分环节。

#### 6. 延迟环节

$$\text{微分方程: } y(t) = r(t - \tau_0) \quad (\tau_0 \text{ 为延迟时间})$$

$$\text{传递函数: } G(s) = e^{-\tau_0 s}$$

延迟环节的特点是当它的输入量发生变化以后, 输出量并不立即发生变化, 而是要经过时间  $\tau_0$  以后, 输出量才发生变化。在许多实际过程中, 都包含有延迟环节, 或者其特性可以等效为包含有延迟环节。

### 四、典型环节的频率特性

我们已经知道, 在分析控制系统的运动规律时, 可以将系统中的各个变量看成一些信号, 而这些信号又可以看做是由许多不同频率的正弦信号合成而成的。各个变量的运动就是系统对各个不同频率的信号的响应的总和。对于系统中的某一个环节而言, 当输入信号为幅度相同、频率不同的正弦信号时, 输出信号的幅度与相位各不相同, 而且输出信号的幅度与相位和输入信号的幅度与相位之间的关系, 是输入信号频率的函数。这种关系, 就是该环节的频率特性。

数学上的研究表明, 一个环节频率特性函数, 就相当于在该环节的传递函数中, 以复频率  $j\omega$  取代复变量  $s$ 。以下我们就利用这一点来求取各典型环节的频率特性。由于频率特性包括幅度与相位两个方面, 因此将输出信号与输入信号的幅度之比和频率之间的关系称为幅频特性, 以  $|G(j\omega)|$  表示, 而将输出信号相对于输入信号的相位移动与频率之间的关系称为相频特性, 以  $\arg G(j\omega)$  表示。



### 1. 比例环节

传递函数:  $G(s) = k$

频率特性函数:  $G(j\omega) = k$

$$\text{频率特性: } \begin{cases} |G(j\omega)| = k \\ \arg G(j\omega) = 0 \end{cases}$$

### 2. 惯性环节

传递函数:  $G(s) = \frac{1}{Ts + 1}$

频率特性函数:  $G(j\omega) = \frac{1}{j\omega T + 1}$

$$\text{频率特性: } \begin{cases} |G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}} \\ \arg G(j\omega) = -\tan^{-1} \omega T \end{cases}$$

### 3. 振荡环节

传递函数:  $G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}$

频率特性函数:  $G(j\omega) = \frac{1}{(j\omega T)^2 + 2\zeta(j\omega T) + 1}$

其中  $T > 0$  为时间常数,  $0 \leq \zeta < 1$  为阻尼系数。

$$\text{频率特性: } \begin{cases} |G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + 4\zeta^2 \omega^2 T^2}} \\ \arg G(j\omega) = -\tan^{-1} \frac{2\zeta\omega T}{1 - \omega^2 T^2} \end{cases}$$

### 4. 积分环节

传递函数:  $G(s) = \frac{1}{T_I s}$

频率特性函数:  $G(j\omega) = \frac{1}{j\omega T_I}$

$$\text{频率特性: } \begin{cases} |G(j\omega)| = \frac{1}{\omega T_I} \\ \arg G(j\omega) = -\frac{\pi}{2} \end{cases}$$

### 5. 微分环节

传递函数:  $G(s) = T_D s$

频率特性函数:  $G(j\omega) = j\omega T_D$

$$\text{频率特性: } \begin{cases} |G(j\omega)| = \omega T_D \\ \arg G(j\omega) = \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

### 6. 延迟环节

传递函数:  $G(s) = e^{-\tau_0 s}$

频率特性函数:  $G(j\omega) = e^{-j\omega\tau_0}$

$$\text{频率特性: } \begin{cases} |G(j\omega)| = 1 \\ \arg G(j\omega) = -\omega\tau_0 \end{cases}$$