

COMMUNICATION & CONTROL



通信与控制系列教程

AUTOMATIC CONTROL THEORY
EXPERIMENT TECHNOLOGY

自动控制原理实验技术

■ 彭秀艳 孙宏放 编著

哈尔滨工程大学出版社

内容简介



通信与控制系列教程

自动控制原理实验技术

AUTOMATIC CONTROL THEORY EXPERIMENT TECHNOLOGY

彭秀艳 孙宏放 编著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书立足于让学生掌握控制系统分析、设计的方法。为此每章首先从工程实践角度介绍基本原理,然后介绍相应的实验。全书共分9章,较全面地介绍了控制系统的经典理论、数字控制、线性系统理论实验技术。特别是第9章,为了让学生学会实际控制系统分析、设计方法,介绍了多种典型的控制系统综合设计实验。

全书内容包括:第1章阐述自动控制系统的一般概念,重点介绍开环、闭环控制系统;第2章讨论控制系统数学模型的建立、变换及其简化,重点介绍实验建模方法;第3章介绍控制系统时域分析方法,重点介绍系统运动特性与系统结构参数关系;第4章介绍系统根轨迹分析设计方法;第5章介绍系统频率特性分析和设计方法;第6章介绍非线性系统分析;第7章介绍数字控制系统分析、设计方法;第8章介绍控制系统综合设计方法;第9章介绍综合设计性实验。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理实验技术/彭秀艳,孙宏放编著.
哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2006
ISBN 7-81073-852-6

I.自… II.①彭…②孙… III.自动控制理论
-实验 IV.TP13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 064230 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 15.75
字 数 322 千字
版 次 2006 年 12 月第 1 版
印 次 2006 年 12 月第 1 次印刷
印 数 1—3 000 册
定 价 21.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

自动控制理论是研究控制问题共同规律的技术科学,是对实际问题的高度抽象,要将其应用于工程实践,必须解决一系列实际应用问题。要解决理论教学这一局限性,需要通过实验来证实。通过实验揭示理论的局限性,启发学生正确理解实际问题复杂性和抽象理论的指导意义。

理论教学之后为了使能够综合运用所学知识去分析、解决实际控制问题,培养学生实际操作能力和创新能力,让学生更全面、直观地理解掌握自动控制理论,只有通过实验教学来实现。

实践性教学已成为自动控制理论教学必不可少的环节。许多高校把自动控制理论实验课程从自动控制理论课程分离出来成为一门独立课程,与理论教学并驾齐驱。自动控制理论的教学模式变成:理论教学+实践教学。这种模式分工明确,易于实施,学习高效,是从应试教育转向素质教育的重大举措,是提高教学质量的新尝试。

经过多年教学实践,我们感到学生迫切需要一本系统、全面地介绍自动控制理论实验技术教材,原有的实验指导书已满足不了综合设计性实验需要。学生应较系统、全面地了解和认识自动控制理论实验技术,提高实际操作能力,为此编写了这本教材。

本书紧密结合自动控制理论教学内容,按照理论教学规律、次序,从简单到复杂,从基础到高级介绍了自动控制理论实验技术和方法。为了体现学以致用目的,激发学生分析问题,解决问题的热情,培养学生学习兴趣,在书中采取“问题式”实验教学方法,重点强调条件缺失实验、过程实验,改变了过去重视结果实验及条件完备的实验模式。书中提供了多种实验方法和手段,介绍了最先进的实验仪器和方法。计算机仿真实验与物理系统模拟实验相结合,极大地扩充了实验门类和范围,使学生在仿真研究基础上,进行实际系统分析设计,使其能力得到充分发挥。

编 者
2005 年 12 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 控制系统的两种基本形式	1
1.2 对控制系统的要求	2
1.3 自动控制理论研究的问题	3
1.4 实验	3
直流电动机调速系统的演示实验	3
2 线性系统的数学模型	6
2.1 系统的经典数学模型	6
2.2 线性系统典型环节的数学模型	7
2.3 系统的状态空间模型	12
2.4 根据时域响应确定数学模型	16
2.5 实验	20
实验 2.1 典型环节模拟与阶跃响应	20
实验 2.2 小功率直流电动机—测速发电机组的实验建模	23
3 控制系统的时域分析	26
3.1 一阶、二阶系统时域分析	27
3.2 高阶系统的时域分析	33
3.3 控制系统的稳定性分析	35
3.4 线性系统稳态响应	37
3.5 实验	44
实验 3.1 基于 MATLAB 的控制系统阶跃响应	44
实验 3.2 基于 MATLAB 的控制系统脉冲响应	47
实验 3.3 基于 MATLAB 的控制系统时域分析	49
实验 3.4 二阶系统模拟及动态性能分析	52
实验 3.5 控制系统稳定性分析	54
实验 3.6 控制系统临界开环增益与参量的关系	56
实验 3.7 开环和闭环控制系统中小参量的处理	57
实验 3.8 控制系统的稳态响应	60
4 线性系统的根轨迹法	63
4.1 根轨迹法基本概念与根轨迹方程	63
4.2 根轨迹绘制的基本法则	64
4.3 实验	65
基于 MATLAB 的控制系统根轨迹绘制	65
5 线性系统的频域分析法	71

5.1	频率特性及其几何表示	71
5.2	开环系统的典型环节分解和开环频率特性曲线的绘制	73
5.3	奈奎斯特稳定判据	76
5.4	频域指标与时域指标的关系	78
5.5	由频率特性确定传递函数	79
5.6	实验	80
实验 5.1	基于 MATLAB 的控制系统的伯德图绘制及分析	80
实验 5.2	基于 MATLAB 的控制系统 Nyquist 图绘制及分析	84
实验 5.3	模拟比例微分环节频率特性的测试	86
实验 5.4	模拟比例环节、惯性环节和积分环节频率特性的测试	88
实验 5.5	模拟振荡环节频率特性的测试	89
实验 5.6	控制系统频率特性测量	89
6	非线性系统的分析	92
6.1	非线性系统的特征	92
6.2	基于 MATLAB 的继电型非线性控制系统分析	93
6.3	非线性特性的描述函数和分析	97
6.4	实验	99
实验 6.1	基于 MATLAB 的相平面作图	99
实验 6.2	基于 MATLAB 的继电型非线性控制系统分析	102
实验 6.3	典型非线性环节模拟实验	103
实验 6.4	非线性系统分析(利用相平面法)	106
实验 6.5	非线性系统分析(利用描述函数法)	108
实验 6.6	非线性系统的模拟实验	109
7	数字控制系统	112
7.1	数字控制系统的组成及特点	112
7.2	信号的采样和保持	114
7.3	数字控制系统的数学模型	117
7.4	数字控制系统的稳定性	118
7.5	数字控制系统的稳态性能和暂态性能分析	120
7.6	数字控制器模拟化设计方法	123
7.7	数字控制器的离散化设计方法	131
7.8	实验	135
实验 7.1	基于 MATLAB 的采样控制系统分析实验	135
实验 7.2	采样控制系统的模拟实验	136
实验 7.3	SKJ-II 型数字随动系统设计实验	137
8	控制系统设计	149
8.1	校正的作用	149
8.2	校正的基本方式	150

8.3 超前校正	151
8.4 滞后校正	154
8.5 滞后-超前校正	155
8.6 PID 控制器	157
8.7 反馈校正	159
8.8 状态变量反馈	162
8.9 实验	168
实验 8.1 基于 MATLAB 的系统校正设计:频率法超前校正	168
实验 8.2 基于 MATLAB 的系统校正设计:频率法滞后校正	169
实验 8.3 基于 MATLAB 的系统校正设计:根轨迹法超前校正	170
实验 8.4 基于 MATLAB 的系统校正设计:根轨迹法滞后校正	171
实验 8.5 基于 MATLAB 的系统校正设计:速度反馈校正	172
实验 8.6 基于 MATLAB 的系统校正设计:频率法反馈校正	173
实验 8.7 控制系统数学模型简化与近似	174
实验 8.8 系统内环传递函数简化与近似	175
实验 8.9 传递函数零、极点对消的模拟实验	176
实验 8.10 控制系统串联校正的模拟实验	178
实验 8.11 控制系统反馈校正的模拟实验	181
实验 8.12 连续系统串联校正(一)	183
实验 8.13 连续系统串联校正(二)	185
实验 8.14 旋转倒立摆综合设计实验	188
9 综合设计实验	195
实验 9.1 基于 MATLAB 的控制系统设计实验	195
实验 9.2 直线型倒立摆实验	198
实验 9.3 IPM100 智能驱动器球杆系统实验	210
实验 9.4 SSC-I 小功率位置随动系统实验	221
参考文献	240

1 绪 论

为完成某种任务,由相互制约的各个部分按一定规律组成的、具有一定功能的整体,称为系统。

控制系统一般由控制器(控制装置)和被控对象组成。

控制中的一个主要概念是反馈(Feedback)。它是指通过将测量装置、观测系统的输出信息,部分或全部送回系统输入端,和参考输入进行比较,比较后得出误差,并根据误差控制输出以实现减少误差的目标。

控制工程是基于反馈理论和线性系统分析的技术科学,涉及到网络技术、通信技术、计算机技术。控制工程不局限于某种工程应用,可以应用于航空、化工、机械、环境、人文社会、电气工程等领域,成为现代社会中必不可少的技术科学。

1.1 控制系统的两种基本形式

控制理论的中心问题是研究系统。控制系统是把控制设备和控制对象看作一个整体。被控制的装置,称为控制对象;所用的控制设备,称为控制器。控制理论则是研究控制系统分析和设计的原理和方法。

控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统两大类,两者的区别在于闭环控制系统采用了反馈。因此,闭环控制系统又可称为反馈控制系统,它构成了现代控制系统的主体。

1.1.1 开环控制系统

一种控制系统,如果其控制对象的输入是预先给定的,不受输出

信号的影响,则这种系统称为开环控制系统。开环控制系统的原理方框图如图1-1所示。

一个开环控制系统,当外部条件保持不变时,对于恒定的输入,其输出亦保持恒定。因此,只要适当地改变其输入,就可以将其输出控制到所要求的值。但是如果外部条件(包括环境温度、扰动等)变化,或内部参数变化时,系统的输出就将偏离所要求的值,而达不到预期的控制目的。因此,只有当系统参数相当稳定,或环境条件变化不大、控制精度要求不高等情况下,开环控制系统才可以令人满意地工作。

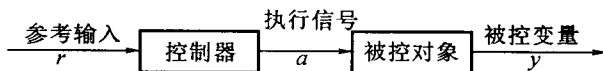


图 1-1 开环控制系统

1.1.2 闭环控制系统

由于环境变化及外部扰动,可能使控制系统不能实现预期的精确控制。为了提高系统的精度,通常引入反馈,构成闭环控制系统。

闭环控制系统的原理方框图如图1-2所示。

闭环控制系统,是将系统的被控变量反馈到输入端,并与参考输入相比较,产生一个误差信号加到控制器上使输出改变,从而减小系统误差,达到实现精确控制的目的。

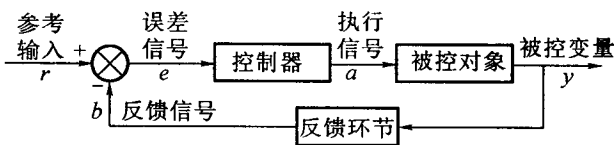


图 1-2 闭环控制系统

一个闭环控制系统,可以由如图 1-3 所示的基本环节组成。

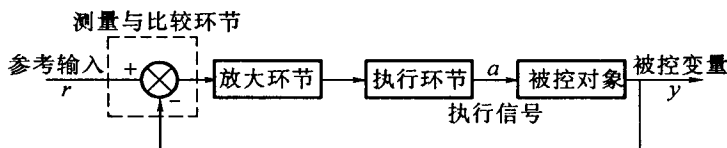


图 1-3 闭环控制系统的基本组成

1.1.3 开环控制与闭环控制的比较

因为在闭环控制系统中采用了负反馈,所以它本身具有将误差减至最小的趋向。因而,系统输出对于外部扰动和内部参数变化都不敏感,可以采用不太精密、成本较低的元件来构成精确的控制系统的主通道。与此相反,开环控制系统一般需采用高精度的元件及有效的抗干扰措施,才能保证一定的控制精度。

注意,在某些情况下,闭环控制系统的这种对误差的校正作用,将会导致系统的不稳定,这样系统稳定性问题也就成了控制理论中的重要课题。当然,只要精心设计,仍可以消除系统的不稳定因素,充分发挥反馈控制的全部优点。因而,闭环控制是控制系统的主体,也是控制理论研究的重点。

不过,由于开环控制系统不需要不断测量及比较输出量,而且一般说来,它的结构较为简单,消耗的功率也较小。因此,当系统输入量及干扰的变化规律能够预知时,或在输出量很难测量以及在精度要求不高的场合,仍常采用开环控制系统。

1.2 对控制系统的要求

虽然不同的控制系统有着不同的作用,但对它们有着一些共同的要求。而评价一个控制系统的好坏,有着各种质量指标,如动态指标,稳态指标,经济指标,强度指标,可靠性指标,以及综合表示其动态、稳态的特性,供最优控制(Optimal Control)设计时加以优化的性能指标等。下面主要介绍由系统的稳态和动态性能所决定的那些质量指标,主要有稳定性、精度、瞬态响应、灵敏度。这些指标重要性的优先程度随系统的性质及应用而各有不同。当然,一个系统如果要能正常工作,它首先必须是稳定的。

(1) 稳定性

系统的稳定性是指一个处于平衡工作状态的系统,当受到激励时,就可能偏离原平衡状态,当激励消失后,经过一段暂态过程,系统能恢复到原平衡状态,则此系统称为稳定的。

(2) 精度

系统的控制精度用系统的稳态误差来表征。系统的稳态误差可定义为控制系统响应的稳态值与期望值之差。

(3) 瞬态响应

一般要求系统瞬态响应的持续时间要短,振荡不要太强。最常用的指标是系统的过渡过程时间和超调量。这是反映系统快速性的性能指标。

(4)灵敏度

系统中元件参数的改变对系统响应的影响,可用灵敏度表示。由于环境条件的变化,元件的不精确及老化等,都将引起系统参数的改变,从而引起输出的改变。因此对于一个控制系统,要求灵敏度愈低愈好。

1.3 自动控制理论研究的问题

自动控制系统需要分析的问题主要包括:系统的稳定性、稳态响应和暂态响应与系统的结构(控制规律)、参量之间的关系。

自动控制理论不但要提供分析上述问题的理论和方法,而且还要提供构建一个符合要求的自动控制系统的思路和方法,即系统设计。当给定了被控对象的数学模型和系统性能要求时,可以利用简捷的方法解决以下问题:

- ①决定出一种合适的控制规律及相应的参量;
- ②不需求助于方程的解,而能从系统的数学模型近似地估计系统的性能;
- ③若结果不能满足要求,应能明确改善系统性能的途径。

对于单变量集中参数线性定常确定性系统,能够大体解决上述问题的理论与简捷方法是比较成熟的,这就是习惯上常说的经典控制理论。

1.4 实 验

直流电动机调速系统的演示实验

本实验是一个实际物理系统实验,不要求学生自己动手实验,而由任课教师向学生操作演示,使学生对自动控制理论课程包含的主要内容有一个概括性的了解。

1.实验目的

- ①了解闭环系统的构成和反馈作用,比较开环控制和闭环控制系统的性能。
- ②对闭环控制系统需要研究的稳定性、稳态响应、暂态响应以及其与控制规律、参量间的关系建立初步的感性认识。

2.主要实验设备及仪器

实验原理线路如图 1-4 所示。按以上原理图,实验主要设备包括:

- ①小功率永磁直流电动机及与其同轴连接永磁测速发电机各一台;
- ②线性运算放大器及由大功率晶体管组成的功率放大器;
- ③直流稳压电源。

主要仪器有慢扫描双线示波器。为提高教学效果,最好选用长余辉慢扫描示波器。

图 1-4 是本实验比较简单的原理图,只要能构成直流调速系统,使用的设备也可以更换。例如,直流电动机和直流测速发电机可以不是永磁的,功率放大器也可以是脉宽调制式放大器等。总之,只要达到演示实验目的就可以了。

3. 实验内容

(1) 开环调速系统实验

将图 1-4 反馈系统中的开关断开,并将运算放大器和功率放大器接成比例器(如图 1-4 中实线所示),其电压增益可设定在 1 左右。

闭合输入电压 u_r 分别为 5 V 和 8 V 时,测量并记录电动机的转速(或测速发电机的输出电压)。可以看出,输出量受输入量高低值的控制,也有高低不同的数值。这时输出量是对应于电动机处于空载(可视为无外扰)时的转速。

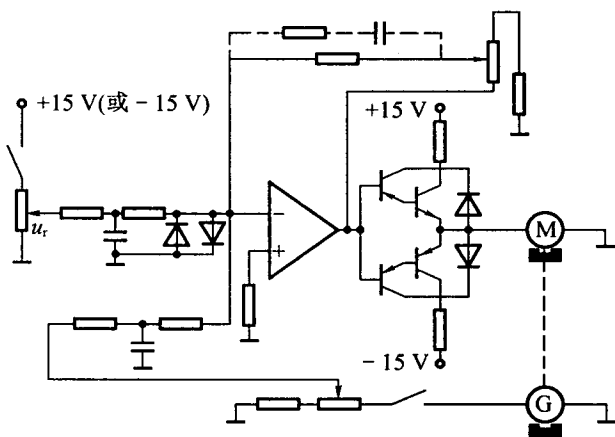


图 1-4 实验原理线路图

在电动机轴上施加摩擦阻力,使其电枢电流达到其额定值的 1/2 左右,再分别测量并记录在 $u_r = 5\text{ V}$ 和 $u_r = 8\text{ V}$ 时电动机的转速。此时,转速明显低于空载时的转速。将摩擦阻力负载视为外扰,由此说明,开环控制系统不能抑制外扰对输出量的影响。

(2) 按比例控制规律组成的闭环调速系统实验

将速度反馈电路中的开关闭合(需先检测反馈电压的极性,一定要接成负反馈),运算放大器和功率放大器仍接成比例器,但需提高其电压增益。首先将其增益提高到接近系统临界稳定增益值(但需留有一定的系统稳定裕度),测量并记录当 $u_r = 5\text{ V}$ 和 $u_r = 8\text{ V}$ 时,电动机空载和带有 1/2 左右负载时的转速。与开环控制系统比较,闭环控制系统对外扰影响输出量有明显抑制作用。

然后,减小比例器的电压增益,使其仅为上述值 1/2 左右。再测量并记录当 $u_r = 5\text{ V}$ 和 $u_r = 8\text{ V}$ 时,电动机空载和带有 1/2 左右负载时的转速。说明闭环控制系统抑制外扰对输出量影响的作用强弱与系统开环增益大小有关。

(3) 按比例积分控制规律组成的闭环调速系统实验

将运算放大器和功率放大器接成比例积分器(接成如图 1-4 中虚线所示,将原反馈电阻断路)。先将反馈电容短路,调整比例系数,使系统的阶跃响应快速但无超调。然后去掉电容短路线,将电容值自大减小,直到系统的阶跃响应呈现有 5% ~ 10% 的超调时为止。测量并记录当 $u_r = 5\text{ V}$ 和 $u_r = 8\text{ V}$ 时,电动机空载和带有 1/2 负载时的转速。与实验(1)、(2)结果比较,说明不同控制规律,控制效果不同。

(4) 系统的稳定实验

将闭环系统的开环增益增大到使其呈现不稳定的现象,这时,什么控制效果都无从谈起。说明稳定性是判断一个闭环系统能否实际应用的必要条件。

对于开环控制系统,无论怎样改变系统增益,此调速系统都不会呈现不稳定现象。

(5) 系统的阶跃响应实验

将输入电压和测速发电机输出电压引入到长余辉慢扫描双线示波器,观察开环系统及不同控制规律的闭环系统的阶跃输入与阶跃响应曲线图。还可以调整系统参量观察并记录

其对系统暂态响应的影响。

4. 实验报告

要求学生在演示实验中作记录,并将所观察到的演示实验过程结合教材第1章的学习内容,写成实验报告。

5. 思考题

- ①说明电压增益与系统稳态误差关系。
- ②说明引入积分作用后,系统稳态误差有什么变化?
- ③说明开环控制、闭环控制抗干扰能力区别。

2 线性系统的数学模型

为了分析或设计自动控制系统,首先需要建立其数学模型——描述系统运动规律的数学表达式,分析它的静态及动态性能。系统的分析通常是通过系统的数学模型来进行的,系统的数学模型确定了系统各变量之间的定量关系。表征一个系统的模型有很多种,如时域模型有微分方程(差分方程)、冲击响应函数模型、状态空间模型等;频域模型有传递函数模型、频率响应函数模型等。不同的近似程度又产生了不同的简化模型。我们可以用复杂的高阶微分方程来较准确地表示一个系统,但一般均采用近似的、简化的数学模型。对简化模型,一方面要求它能足够精确地描述该系统的动态性能,另一方面又要求它尽量简洁,以便于分析和计算。

2.1 系统的经典数学模型

2.1.1 系统的微分方程式

设 $c(t)$ 为系统输出量, $r(t)$ 为系统输入量,则线性定常系统微分方程:

$$\begin{aligned} c^n(t) + a_1 c^{n-1}(t) + \cdots + a_{n-1} c'(t) + a_n c(t) = b_0 r^m(t) + \\ b_1 r^{m-1}(t) + \cdots + b_{m-1} r'(t) + b_m r(t) \end{aligned} \quad (2-1)$$

建立描述系统运动过程的微分方程式的一般步骤:

- ①确定系统的输入量与输出量;
- ②将系统按信息传递过程分成若干环节,并确定这些环节的输入量与输出量;
- ③对系统及各环节确定出既合乎实际且不影响运动过程本质特征,又能使数学关系简化的条件;
- ④根据机理或者实验结果列写各环节的代数方程或微分方程;
- ⑤消去中间变量,建立描述系统的输入与输出关系的微分方程。

非线性系统的线性化微分方程的建立,是将变量的非线性函数在工作状态(或称工作点)附近领域内展开成泰勒级数。写出这些变量在上述领域内展开成的微增量表达式,然后略去高于一次的微增量项,即可得到近似的线性函数。将非线性方程中所有非线性函数都用对应的近似线性函数替代,即得到线性化方程。系统线性化方程是微增量线性微分方程。

采用线性化方程需要注意以下几点:

- ①首先必须确定非线性函数描述的环节的工作点;
- ②若非线性函数在工作域内不连续,则不存在导数或导数不确定,此时不能用此种线性化方法;
- ③当系统输入量的变化范围较大时,此种小范围线性化方法建立的线性化方程可能达不到使用精度要求,严重时,可能反映不了非线性系统运动过程的本质特征。

2.1.2 系统的传递函数

对于线性定常系统,将其微分方程式进行积分变换后则可求得系统的传递函数——在

零初始条件下,系统(或环节)的输出量的像函数与输入量的像函数之比。

传递函数 $G(s)$ 的一般表达式为

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n} \quad (2-2)$$

式中 $C(s)$ ——输出量的像函数;

$R(s)$ ——输入量的像函数。

$G(s)$ 是复变函数,它的分母和分子都是变量的多项式(或者分解为因式),用传递函数代替微分方程描述系统的主要优点在于不需进行大量的微分和积分运算,即可简捷间接地分析和设计系统。

传递函数的极点是 $G(s)$ 分母为零时,即方程

$$s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_{n-1} s + a_n = 0$$

的根,亦即系统微分方程式的特征方程之根。

传递函数的零点是 $G(s)$ 分子为零时,即方程

$$b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_{m-1} s + b_m = 0$$

的根。

显然,传递函数的极点和零点由方程中的系数 $a_1, a_2, \cdots, a_n$ 和 $b_0, b_1, \cdots, b_m$ 决定,亦即由系统的结构及参量决定,与系统外界输入无关。传递函数 $G(s)$ 的极、零点在 s 平面上的分布位置与系统的性能是对应的。

2.2 线性系统典型环节的数学模型

一个物理系统由多个元、部件组成。若抛开这些元、部件的具体结构和物理特点,只研究其运动规律和在一定条件下数学模型的共性,就可以将其划分成为数不多的几种典型环节。线性系统可以看成是由各种典型环节按一定的信息传递规律组成的。当各典型环节的数学模型已知时,系统的数学模型就不难求得。

典型环节的概念对系统建模、分析和研究很有用,但应特别强调指出,这些典型环节的数学模型都是对各种物理系统元、部件的机理和特性高度理想化以后的结果。它形式简单,能够适合于控制理论的应用。

2.2.1 典型环节的传递函数

控制系统可视为由若干一、二阶环节组成。这些基本环节,根据其微分方程形式的不同,有不同的动态特性,常称为各种典型环节。

现将式(2-2)改写为

$$G(s) = \frac{K \prod_{i=1}^l (\tau_i s + 1) \cdot \prod_{i=l+1}^{\frac{1}{2}(m-l)+l+1} (\tau_i^2 s^2 + 2\xi_i \tau_i s + 1)}{s^v \prod_{j=1}^h (T_j s + 1) \cdot \prod_{j=h+1}^{\frac{1}{2}(m-v-h)+h+1} (T_j^2 s^2 + 2\xi_j T_j s + 1)} \quad (2-3)$$

式(2-3)表示了由一系列典型环节串联组成的系统。下面简要介绍各类典型环节的传

递函数。

(1)比例环节

比例环节又称放大环节,是一种输出量与输入量成正比,既无失真也无时延的环节,其传递函数为

$$G(s) = K \quad (2-4)$$

(2)微分环节

微分环节的输出量与输入量的一阶导数成正比,其传递函数为

$$G(s) = s \quad (2-5)$$

(3)积分环节

积分环节的输出量是输入量对时间的积分,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{s} \quad (2-6)$$

(4)一阶微分环节

该环节的输出等于输入与其一阶导数的加权和,其传递函数为

$$G(s) = \tau s + 1 \quad (2-7)$$

(5)惯性环节

该环节的输出与其变化率的加权和等于输入,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (2-8)$$

(6)振荡环节

这是二阶环节,它的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-9)$$

式中 $\omega_n = 1/T$ ——无阻尼自然振荡角频率;

$\xi(0 < \xi < 1)$ ——阻尼比。

(7)二阶微分环节

$$G(s) = \tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1 \quad (0 < \xi < 1) \quad (2-10)$$

二阶微分环节具有一对共轭复零点。

(8)延迟环节

延迟环节是输入信号加入后,其输出端要隔一段时间才能复现输入信号的环节。它的时间特性表示为

$$y(t) = u(t - \tau)$$

其拉氏变换为

$$Y(s) = e^{-\tau s} U(s)$$

由此式得延迟环节的传递函数为

$$G(s) = e^{-\tau s} \quad (2-11)$$

因为延迟环节是系统产生振荡的原因,所以系统中如有延迟环节,对系统的稳定是不利的。

线性系统中常见的典型单元或系统如表 2-1 所示。

表 2-1 线性系统中常见的典型单元或系统

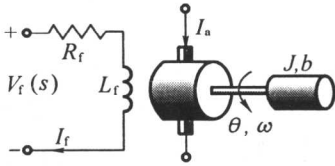
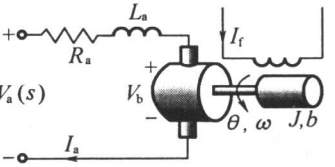
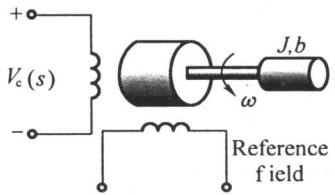
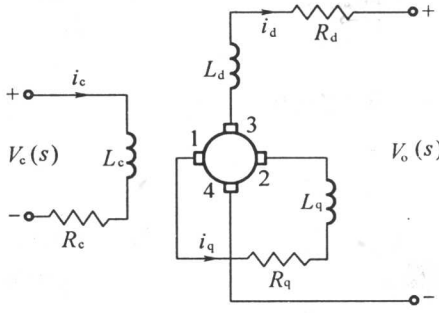
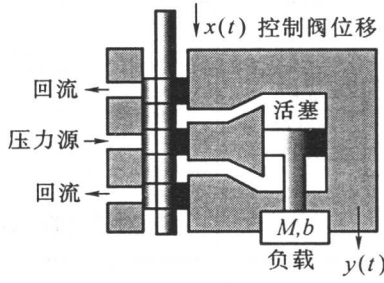
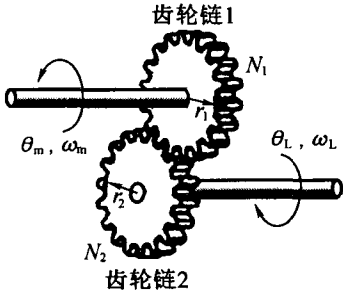
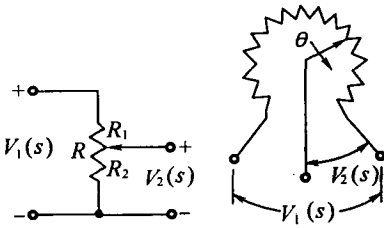
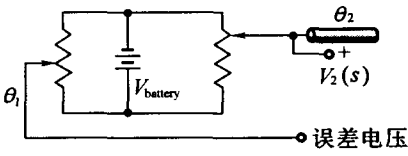
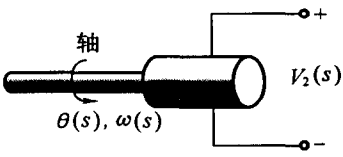
磁场控制直流电机		$\frac{\theta(s)}{V_f(s)} = \frac{C_m}{s(Js + b)(L_f s + R_f)}$
电枢控制直流电机		$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{C_m}{s[(R_a + L_a s)(Js + b) + K_b C_m]}$
两相控制磁场交流电机		$\frac{\theta(s)}{V_c(s)} = \frac{C_m}{s(\tau s + 1)}$ $\tau = \frac{J}{b - m}$ m——线性化力矩曲线的斜率(一般为负)
电机、电压功率放大器		$\frac{V_o(s)}{V_c(s)} = \frac{K}{(s\tau_c + 1)(s\tau_q + 1)}$ $\tau_c = \frac{L_c}{R_c}, \tau_q = \frac{L_q}{R_q}$ 空载时, $i_d \approx 0, \tau_c = \tau_q$ $0.05 \text{ s} < \tau_c < 0.5 \text{ s}$ $V_{12} = V_q, V_{34} = V_d$
液压控制系统		$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{s(Ms + B)}$ $K = \frac{Ak_x}{k_p}, B = b + \frac{A^2}{k_p}$ $k_x = \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right _{x_0}, k_p = \left. \frac{\partial g}{\partial P} \right _{P_0}$ $g = g(x, P)$ A——活塞面积

表 2-1(续)

转动传动器		$\text{传动比} = n = \frac{N_1}{N_2}$ $N_2 \theta_L = N_1 \theta_m, \theta_L = n \theta_m$ $\omega_L = n \omega_m$
恒压源电压控制		$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{R_2}{R} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $\frac{R_2}{R} = \frac{\theta}{\theta_{\max}}$
电桥探测电位误差		$V_2(s) = k_s(\theta_1(s) - \theta_2(s))$ $V_2(s) = k_s \theta_{\text{error}}(s)$ $k_s = \frac{V_{\text{battery}}}{\theta_{\max}}$
转速传感器		$V_2(s) = K_t \omega(s) = K_t s \theta(s)$ $K_t = \text{constant}$
直流放大器		$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{k_a}{s\tau + 1}$ $\tau = R_0 C_0, \tau \ll 1 \text{ s}$ $R_0 \text{——输出电阻}$ $C_0 \text{——输出电容}$ 对控制器、放大器 τ 可忽略

例 2-1 列出电枢控制式直流电动机的传递函数, 并指出它是由哪些典型环节构成的。

解 直流电动机原理如图 2-1 所示。其中 R_a 是电枢电阻, L_a 是电枢电感, $i_a(t)$ 是电枢电流, $u_a(t)$ 是电枢控制电压, i_f 是固定的激磁电流, $e_b(t)$ 是电枢反电势, $\theta_m(t)$ 是电机转角, b 是电机轴上的黏性摩擦系数, M_m 是电磁力矩, M_l 是负载力矩, J 是转动惯量。