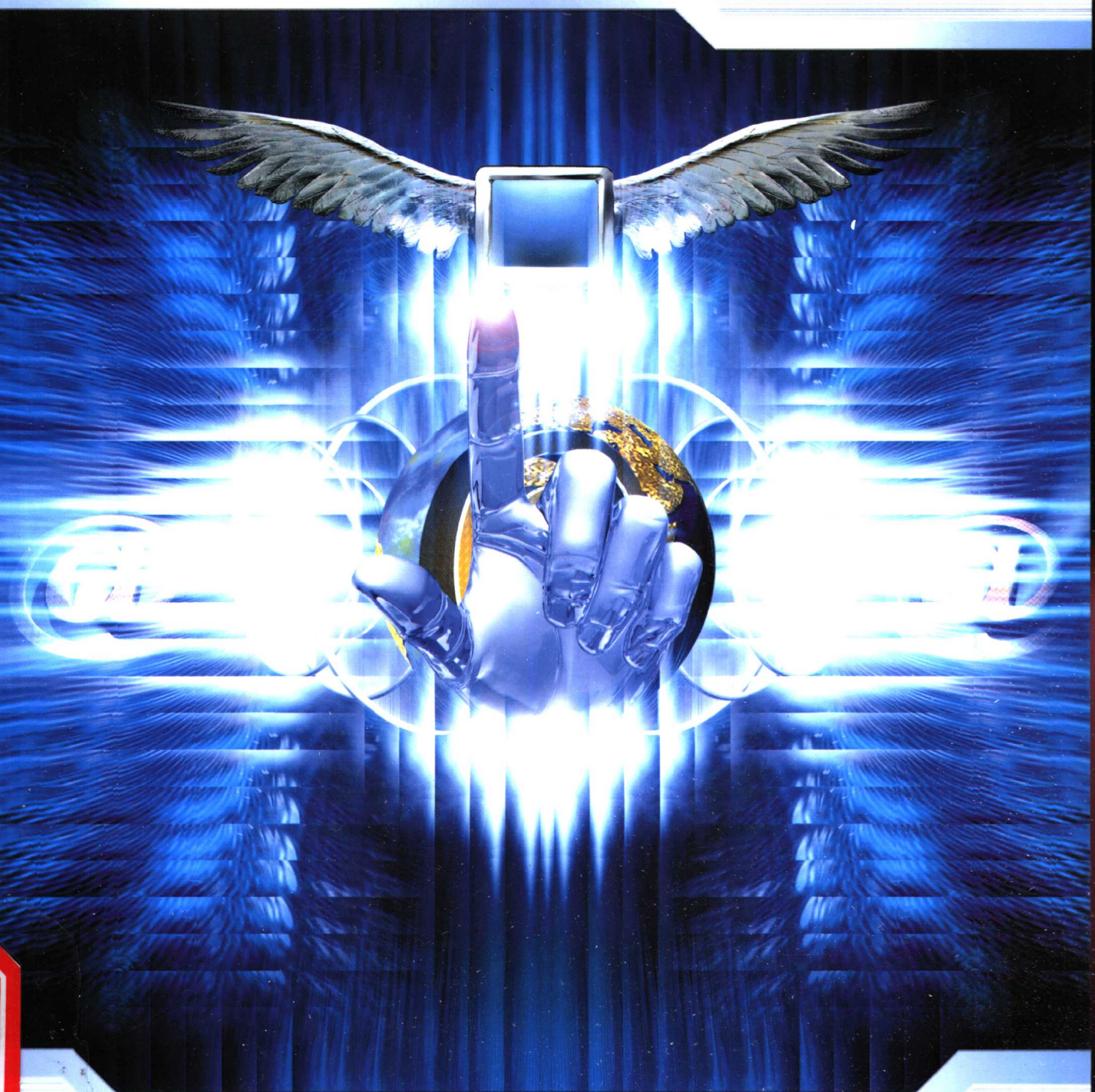


# 机电伺服控制技术

李恩光 编著



东华大学出版社

本书出版由上海发展汽车工业教育基金会资助

# 机电伺服控制技术

李恩光 编著

东华大学出版社

(原中国纺织大学出版社)

## 内容提要

本书共分为六章,包括伺服控制技术概论、步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机、新型电气伺服驱动单元和电-液、电-气伺服系统等内容。

本书以机械专业本科学生应掌握的知识为基础,在形式上尽力符合机械类专业学生的思维模式,内容上尽量做到基本概念清晰、叙述简练、重点突出。因此,本书比较适合作为机械工程及自动化专业本科和相近专业的 28~36 学时选修课教材,也可以供相关专业技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机电伺服控制技术/李恩光编著. —上海:东华大学出版社, 2003. 9

ISBN 7-81038-613-1

I. 机… II. 李… III. 伺服电动机—伺服控制  
IV. TM383.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 085544 号

责任编辑 邵 静

封面设计 魏依东

## 机电伺服控制技术

李恩光 编著

东华大学出版社 出版

上海市延安西路 1882 号

邮政编码: 200051 电话: (021) 62193056

新华书店上海发行所发行 苏州望电印刷有限公司印刷

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 7.75 字数: 180 千字

印数: 0 001—3 000

ISBN 7-81038-613-1/TH·05

定价: 14.00 元

# 前 言

对机器部件的运动伺服控制与驱动是机电一体化设备或系统中十分重要的技术环节。在大部分机械类专业的课程体系中，学生对这一技术环节的掌握是通过控制工程、电力拖动技术、液压气动技术及伺服驱动等一系列相关课程的学习来完成的。由于各课程教材都只能依据自身学科的特点进行编写，较少考虑与其他学科的联系与沟通，因而，在内容上虽然详细而全面，但学生可能需要花费相对较多的时间才能入门。

实际上，对于培养能够构建、集成机电一体化设备或系统、并能对现代机械设备及系统进行较熟练的使用和维护的专业技术人才而言，对机电伺服控制技术基本概念的掌握才是最重要的。

本书以机械专业本科学生应掌握的知识为基础，对这一技术环节所涉及到的控制工程基本知识、伺服驱动所常用的各类电动机、电气控制下的气动液压技术之基本概念进行了阐述，并用相对较多的篇幅对比较新型的伺服驱动技术作了扼要介绍。

本书在形式上力图符合机械类专业学生的思维模式，内容上尽量做到概念清晰、重点突出。希望此书能够为需要的读者提供一条便捷之路。

由于作者的阅历有限，编著中难免存在不少疏漏之处，恳请读者予以批评指正。

李恩光  
2003 年 8 月

# 目 录

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 第一章 伺服控制技术概论 .....       | (1)   |
| 第一节 伺服系统与反馈 .....        | (2)   |
| 第二节 伺服控制法则 .....         | (5)   |
| 第三节 运动伺服控制 .....         | (12)  |
| 第二章 步进电动机 .....          | (17)  |
| 第一节 步进电动机的工作原理与特点 .....  | (17)  |
| 第二节 步进电动机驱动的动力学问题 .....  | (24)  |
| 第三节 步进电动机驱动电路 .....      | (26)  |
| 第四节 步进电动机的细分驱动技术 .....   | (30)  |
| 第三章 直流伺服控制 .....         | (34)  |
| 第一节 直流电动机 .....          | (34)  |
| 第二节 直流伺服电动机 .....        | (37)  |
| 第三节 可控硅调压和脉宽调压 .....     | (43)  |
| 第四节 直流伺服电动机调速系统 .....    | (48)  |
| 第四章 交流伺服控制 .....         | (52)  |
| 第一节 交流电动机及其调速系统 .....    | (52)  |
| 第二节 异步交流伺服电动机的工作原理 ..... | (56)  |
| 第三节 变频技术 .....           | (59)  |
| 第四节 交流变频异步电动机 .....      | (67)  |
| 第五节 变频交流伺服系统产品 .....     | (69)  |
| 第五章 新型电气伺服驱动单元 .....     | (73)  |
| 第一节 超声波马达 .....          | (73)  |
| 第二节 直线位移单元 .....         | (79)  |
| 第三节 三维电动机 .....          | (89)  |
| 第六章 电-液、电-气伺服系统 .....    | (95)  |
| 第一节 液压与气动系统 .....        | (95)  |
| 第二节 电液伺服系统 .....         | (103) |
| 第三节 电-气伺服系统 .....        | (108) |

# 第一章 伺服控制技术概论

机电系统大量地存在于普通工业设备、国防军事装备和几乎所有生产制造装备之中。在化工生产过程中常用的蒸馏工艺，就其本身而言并不直接与机电系统的概念相关，但没有机电系统是无法完成这个工艺过程的。例如：对蒸馏过程中各种阀门的控制就只能由机电系统来实现。力学系统中各种作用力、位移、速度、转角等参数的控制与调节；电力系统中电流、电压及其他各种电参数的控制与调节；化学热力学系统中克分子数、浓度、温度、压力、流量等工作参数的控制与调节等都是直接应用机电系统的典型实例。从本质上看，这些系统的数学模型是相似的，所以对机电系统的分析具有一般性、代表性和实用性。

一般来说，大部分机电系统是机械与电气动力相结合的系统。系统从电网取得能源，系统的控制部分按系统功能需求控制输入电气动力执行部件的各种电参数，使电气动力执行部件得到有效的控制。机电系统中的机械部分将电气执行部件与被控对象联系起来，实现各式各样的机械运动或机械操作动作。在推动力大、结构要求紧凑、工作环境特殊以及某些特殊需求的场合，机电系统将电能转换成液压或气压动力，然后再通过液压或气动执行部件完成机电系统功能者，现在也为数不少。

运动控制是近十多年来国际上流行的一个新的技术术语，它通常是指在复杂条件下，将预定的控制方案、规划指令转变成期望的机械运动的一种技术。运动控制系统使被控制机械部件分别实现精确的位置、速度、加速度、力或转矩的控制，或者实现这些被控机械量的综合控制。运动控制技术是机电系统的本质所在。

运动控制的应用领域极其广泛。在军事宇航方面有：雷达天线、火炮瞄准、惯性导航、卫星姿态、光电池板的太阳跟踪控制等，在工业上有：加工中心、专用加工设备、数控机床、工业机器人、塑料机械、印刷机械、纺织机械、工业缝纫机、绣花机、绕线机、轧机轧辊控制、磁带机、磁盘驱动器、绘图仪、打印机、传真机、光盘机、复印机、音像设备、洗衣机、空调等。

要求系统精确地跟踪控制指令、实现理想的运动控制的过程，在机电控制技术中一般称之为“伺服控制技术”。

“伺服”一词来源于英语单词 Servo 的音译，几乎所有机械运动都可用伺服的概念来进行解释。例如：人手的拣物动作，其输入是人脑通过神经的思维信息，输出则是肌肉的收缩及骨骼的运动，检测与控制则靠眼睛与神经系统的密切配合。又如：用机床的丝杠-螺母机构推动工作台在导轨的引导下前进时，人手的力矩使丝杠旋转作为输入，而输出是丝杠的转角，肉眼对安装在丝杠上刻度盘的刻度读数进行检测，控制也依靠人的视觉和神经系统。

随着现代科学技术的飞速发展，运动控制已经发展成一门综合性、多学科的交叉技术，微电子与计算机技术已渗透到运动控制系统的各个环节，成为控制技术的核心。根据预定控制方案和面对复杂环境实现各类运动，并使之达到规定的技术性能指标，将计算机的决策、指令变为所期望的机械运动，几乎是所有现代机电伺服系统必不可少的任务。

在此类问题中，既要机电系统进行准确的动力学建模，又要恰当地应用经典或现代控制理论来指导我们的分析计算。在这一领域，机械系统的知识必须与电气及液压气动传动控制技术、经典或现代控制理论密切地结合起来。

## 第一节 伺服系统与反馈

### 一、伺服控制系统

在机电系统中，伺服控制过程一般是以能量较弱的电信号实现对执行部件的运动或输出力的有效控制。所以，伺服系统应当具备明显的“功率放大”作用。如：大型客机的起落架收放系统和操纵翼面的驱动系统一般都用电液伺服系统来实现。在喷气式战斗机、汽车上是采用“液压增力器”的方式来减轻驾驶员的操纵力，这种系统并不去除原有的机械联系，因此，当电液伺服系统失效时，依然能够实现手动操纵，保证了操纵的可靠性。

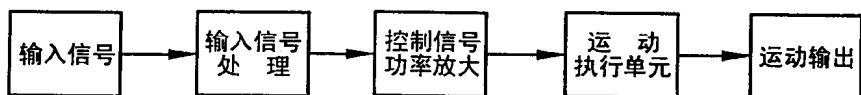


图 1-1 开环运动伺服控制系统的组成

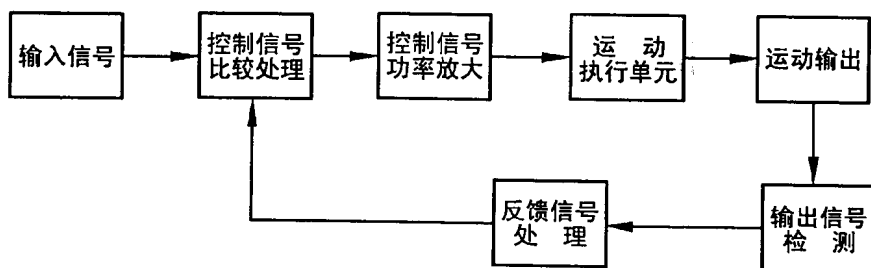


图 1-2 闭环运动伺服控制系统的组成

伺服控制系统有开环和闭环两类。开环系统直接将输入信号经过功率放大送到

执行装置中，其执行的准确性靠执行装置自身性能来保证，其系统组成见图 1-1。闭环运动伺服控制系统的组成如图 1-2 所示。在这种具有反馈环节的伺服系统组成中，系统的执行误差是依靠反馈来补正的，传统控制理论认为反馈能够提高系统的工作性能，因此作了很深入的研究。但从本质上看，在进行伺服控制时，从控制信息的输入到运动准确地执行必须经过一个信息传输和处理的过程，而伺服物理系统的输入信息是原始控制信息与系统执行结果的反馈信息之综合。因此，系统的执行结果必然永远落后于系统的输入。由此可见，具有反馈环节的伺服控制过程实际上是十分复杂的，不能简单地认为有反馈环节的闭环系统性能一定比开环系统好。

随着各种伺服驱动系统市场化、商品化进程的日渐成熟，将运动检测装置直接连接在伺服电动机转轴上的方式显得更加方便，也有利于商品化系统的自我完善。因此，把反馈检测环节安排在伺服电动机转轴上、而不是在运动伺服系统真实末端的“半闭环”伺服系统在工程应用上往往更为普遍。在半闭环系统中，伺服系统只保证从输入信号到伺服电动机转轴端的控制，运动的真实输出质量将与伺服电动机之后的机械传动结构性能密切相关，所以在运动伺服控制中，机械结构的设计水平仍然显得十分重要。

自从电子计算机出现以后，电气自动化领域发生了巨大的变化。尤其是近几十年来，计算机的软、硬件技术的发展速度正所谓是突飞猛进，据有关资料介绍，当代计算机的发展态势是：每经过十八个月，其运算速度就要增加一倍，体积和重量将缩小一倍，而价格却会降低一半！充分应用电子计算机的“数字化”技术现在已经对伺服控制系统的发展产生极大的影响。

一般情况下，对伺服系统性能的主要要求是：稳定性、工作精度和快速响应性三方面。稳定性是指系统在规定输入或外界干扰的作用下，在短时间调节之后能够恢复到原有的或者新的平衡状态的能力。精度是系统的输出对于输入信号要求所符合的程度。快速响应是反映系统输出对于输入信号跟随的速度。这三方面的要求既相互联系、又相互制约，在设计、调试系统时要综合考虑。

## 二、伺服系统的反馈

反馈环节在闭环运动伺服控制系统中起着十分重要的作用。当系统具有反馈环节时，系统的输入由同时观察到的系统的各种输出确定，输入输出都是时间的函数。应用反馈后，可以得到伺服系统各种输出和它们所对应的各个目标值的实时误差，再由这种测量到的误差来减少实际执行误差。这样便形成了输入—系统—输出—测量—比较误差—输入的一个环路，因而也构成了一个包含原系统在内的一个新的闭环系统。这种构成的关键问题是新闭环系统的稳定性和动态特性。

按照经典控制理论，以传递函数方式表达含反馈环节的闭环系统框图如图 1-3。依据习惯表示方法， $R(s)$  是系统的输入， $E(s)$  是系统的输出，系统自身的开环传递函数为  $G(s)$ ，反馈环节的增益为  $H(s)$ 。

此时，系统的输入、输出关系是：

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s) \quad (1-1)$$

与开环情况相比较，增加反馈环节之后，系统对自身参数变动的敏感性及对外界干扰的敏感性都将得到较好的抑制。因此，系统的工作性能将更加稳定。

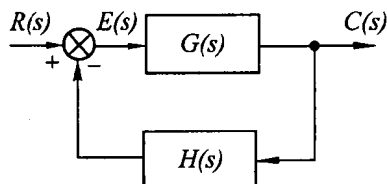


图 1-3 闭环系统框图

许多情况下，对于实际工程装置的系统化建模及分析不会完全正确，或者由于许多客观条件的限制，建模只能基于许多简化的假设，从而使之变得不确切。另外，也可能因为各种外界的干扰，使输出的检测包含了不少噪声污染，这种种影响都会使伺服控制性能变坏。有效的反馈可以减少这些不确定性的影响、补偿各种因素所引起的误差。

反馈环节由运动参数测量单元（传感器）和反馈信号处理电路（反馈接口电路）组成。

测速发电机、旋转变压器、精密变阻式角位移传感器等是典型的常用模拟量运动参数传感器，而旋转编码器、感应同步器、圆光栅、圆磁栅等是数字式运动参数测量传感器。关于传感器方面的基本知识可从相关测试技术课程中获取，在此应当注意的是：各类传感器都有其特定的适用条件，在选用传感器时要特别注意。

反馈的概念很广泛，它包括当前系统中的多回路、非线性和自适应反馈，以及将来的智能反馈。广义地说，反馈可以看作描述和理解许多复杂物理系统中所发生的循环交互作用的方式。因而，全面理解反馈的含义已经超出了控制理论的范畴。

### 三、控制的实时性与控制的准确性

因为绝大部分机电系统都是有惯性负载的二阶系统，所以其大部分输出都不可能“立即”反映输入控制信号的要求。从另一方面来看：由控制信号输入到系统内部开始，至执行元件输出要求的运动必然有一个信息传输过程，这种传输当然需要时间，这就引出伺服控制中的实时性问题。

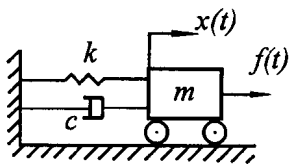


图 1-4  $m-k-c$  模型

以图 1-4 所示的十分简单、应用于弹簧测力计的弹簧—质量—阻尼模型为例，该模型的输入是施加在质量块  $m$  上的力  $f(t)$ （被测量力），希望得到的输出是质量块的位移  $x(t)$ （测

量力读数), 其动力学方程为:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1-2)$$

应用经典控制理论将上述关系转换到复频域中得到:

$$ms^2X(s) + csX(s) + kX(s) = F(s)$$

因此, 在复频域中输入  $F(s)$  与输出  $X(s)$  之间的关系是:

$$X(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} F(s)$$

当外力  $f(t)$  为突然施加的阶跃信号时, 位移  $x(t)$  的变化情况如图 1-5。由图可见: 无论模型的参数如何变化, 输出位移都不可能立即达到弹簧测力计所应当测到的读数, 而是随着时间的推移逐步“逼近”最终读数。另外, 可以明显看出: 虽然减小阻尼系数能够使位移变动快, 但却至少不能在第一次达到目标读数时稳定下来, 而尽管加大阻尼系数可以使位移的变化趋向稳定, 然而达到目标读数的速度又变慢了。总之, “快”和“稳”、或者说

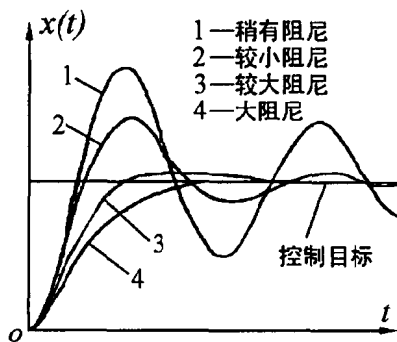


图 1-5 二阶系统对阶跃输入响应

“实时性”与“准确性”两者对于不变参数的系统而言永远是有矛盾的。

## 第二节 伺服控制法则

### 一、控制系统的建模

为伺服控制系统建立合理的数学模型是实施有效控制最重要的工作。当系统的各种力学与运动关系不完全清楚的时候, 为系统建立数学模型是特别困难的。在某些情况下, 虽然可以写出该系统精确的动力学数学方程, 但它可能极为复杂, 以致无法在该方程的基础上设计出可行的控制规律。另一方面, 对于某些不完全清楚的模型, 虽然系统比较复杂, 但仍然可以在充分简化的模型上用反馈控制的方式加以适当处理。因而, 实际控制工程中的模型问题和数学物理方法中的模型问题是完全不同的。在控制理论中, 问题的关键是寻找一个可用的、在数学上经过提炼的模型, 它可以在正确的物理概念基础上用系统辨识的方法求得。

应当认识到: 在控制系统的设计中如果无法找到简单的数学模型, 控制理论就不能得到成功的应用。在这种情况下, 各种控制工程方法是否还能有实际应用的价值? 由此, 引起了对系统建模问题的不同看法。

一种看法认为：在控制中数学模型的不完善无关紧要，因为反馈可以减少包括模型误差在内的各种影响，而真正需要的是一个强有力的反馈设计方案，用它构成一个能适应多种误差影响的控制系统，因而可以忽视模型而把重点放在反馈控制器的实现上。这种看法使设计具有尽可能广的通用模型控制器的先进理论产生了。甚至有人认为在进行控制系统设计时，不用关心用偏微分方程构成的精致数学模型，而应该致力于寻求能够有效实施稳定、有效控制方法的控制理论。

另一种看法则十分重视用物理规则推导得出的精确数学模型，认为控制设计是容易的，至少在建立数学模型后可以通过计算来求出。这种强调数学建模的看法对于擅长进行理论分析研究的人群来说，是能接受并有吸引力的。精确的模型假设可以用来支持许多基于这种模型所作的抽象数学控制规律的研究。这种看法完全忽视了模型的不确定性问题及其对设计实际控制系统的影响。认为设计控制系统必须首先要建立十分精确的数学模型，这是对实际控制系统研究的完全误解。

事实上，走一个极端而不考虑到另一方面是不恰当的。必须认识到控制技术应用的新成就完全靠新模型和这些模型对新理论发展的贡献，同时也依靠反馈设计技术的不断创新。在控制理论上许多重要的突破性成果恰恰是结合建模方法和控制方法两方面的长处而得到的。在某些特殊应用场合，可能其中某一种方法更实际，例如在过程控制中常常用基于线性模型的控制器设计方法，而在先进的空间技术应用中，则模型精确性更重要。

## 二、PID 控制

在上一节中已经提及：实际控制系统的实时性与准确性是一对永远存在的矛盾，简单地依靠改变系统各类参数的方法，无法根本解决这一问题，必须在原系统外采取一些措施，对控制系统进行必要的“校正”使整个系统的外部特性得到改善。PID 控制就是其中一种非常实用的方法。

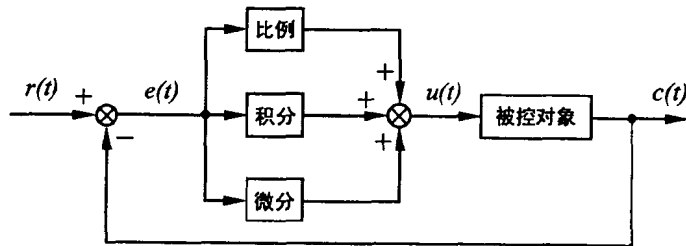


图 1-6 模拟 PID 控制系统框图

所谓 PID 控制，就是在原控制系统的某处添加比例（P）、积分（I）和微分（D）环节。常规 PID 控制系统的原理框图如图 1-6，这是一个带“串联校正”的闭环系

统。此时，系统的输入  $r(t)$  经过与输出  $c(t)$  的直接反馈比较后，形成误差信号  $e(t) = r(t) - c(t)$ 。误差信号  $e(t)$  可经过比例环节  $K_p e(t)$ 、积分环节  $K_I \int e(t) dt$  和微分环节  $K_D \frac{de(t)}{dt}$  的处理，并在这些环节的出口处综合，成为原系统的输入：

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1-3)$$

其中， $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  分别称为比例、积分、微分常数。根据控制的需要，这三种环节可以选择应用，也可以全部应用。

图 1-7、图 1-8 分别表示简单二阶系统中微分环节和积分环节对单位阶跃响应的影响。由图可以明显看出：微分环节能使系统在工作时获得一定的“镇定”作用，而积分环节却让系统更加“敏感”。两者的恰当配合应该能够使系统性能得到较大的改善。

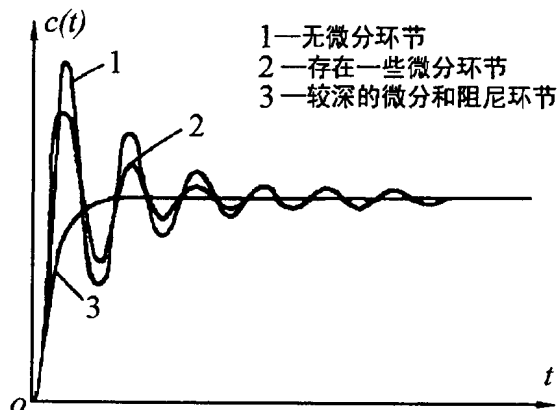


图 1-7 微分环节对单位阶跃响应的影响

由于 PID 控制运算具有比较简单、稳定性能好、可靠性高等优点，因此仍有其强大的生命力。PID 控制器广泛应用于冶金、机械、化工等工业过程控制之中。

在 PID 控制中，一个关键的问题是 PID 控制参数的确定。传统的方法是在获取对象数学模型的基础上，根据某一整定原则来确定 PID 参数。然而，在实际工业过程控制中，许多被控过程机理较复杂，具有高度非线性、时变不确定性和纯滞后等特点。在噪声、负载扰动等因素的影响下，过程参数、甚至模型结构，均会发生变化。这就要求在 PID 控制中，不仅 PID 参数的确定不依赖于对象数学模型，并且希望 PID 参数能根据实际工作状况进行在线调整，以满足最优实时控制的要求。自适应 PID 控制将是解决这一问题的有效途径。

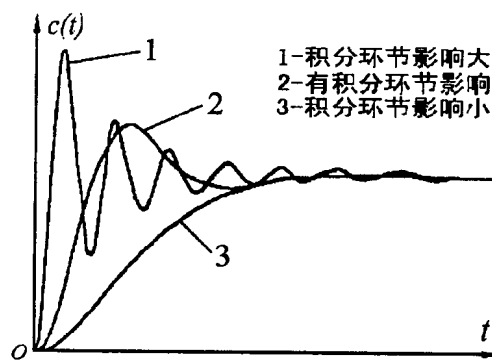


图 1-8 积分环节对单位阶跃的作用

十分明显，单纯依靠硬件电路组合而成的 PID 网络很难实现控制过程中的 PID 参数变化，只有将 PID 控制“数字化”，即：以计算机软件的方式实施 PID 控制的运算和自适应的变化，智能型 PID 控制才能够实现。

数字 PID 控制中, 与以上模拟 PID 运算式 (1-3) 相对应的算式为:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (1-4)$$

式中:  $k$ ——采样序号,  $k = 0, 1, 2 \dots$ ;

$u(k)$ ——第  $k$  次采样时刻的计算机输出值;

$e(k)$ ——第  $k$  次采样时刻输入的偏差值;

$e(k-1)$ ——第  $(k-1)$  次采样时刻输入的偏差值;

$K_p$ 、 $K_i$  和  $K_D$  的含义与式 (1-3) 中相同。

这种位置式 PID 控制算法为全量输出方式, 每次输出都与过去的状态有关, 计算时要对  $e(k)$  进行累加, 计算机的运算工作量大。而且, 输出  $u(k)$  所对应的是执行机构的实际位置, 如出现故障而产生  $u(k)$  的大幅度变化将引起实际工作不允许的、甚至可能会造成重大事故的执行机构位置之大幅度变化。

为避免以上问题, 可以用增量式 PID 控制算法: 根据差分方程的递推原理,

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \quad (1-5)$$

$$(1-4) \text{ 减 } (1-5) \text{ 得: } \Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (1-6)$$

$$\text{式中: } \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (1-7)$$

采用增量式算法后, 计算机输出的控制增量  $\Delta u(k)$  对应的是本次执行机构位置的增

量。而执行机构实际位置的控制量是控制量增量的积累  $u(k) = \sum_{j=0}^k \Delta u(j)$ , 需要通过

某些外加措施来解决。如: 用本身就有积累作用的执行元件——步进电动机来解决, 或利用算式  $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$  以执行软件的方式来完成。

图 1-9 和图 1-10 分别表示实际位置式和增量式 PID 控制系统的示意图。

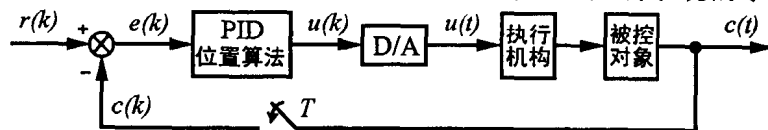


图 1-9 位置式 PID 控制系统

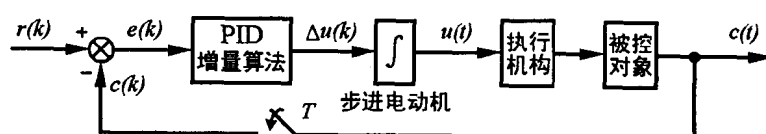
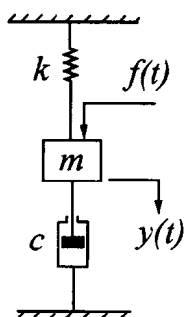


图 1-10 增量式 PID 控制系统

### 三、多输入、多输出系统

现代工程系统正朝着更加复杂的方向发展，复杂的任务和更高精度的要求不断引起系统的复杂性。随着对控制系统性能提出越来越严格的要求，系统的复杂程度越来越大，而且希望能够用大型计算机系统对其进行方便的处理。1960年前后，一种建立在状态概念之上的现代控制理论开始发展。它在适用于多输入输出情况，系统可以是线性或非线性、也可以是定常的或时变的等方面的特性与经典控制理论形成了鲜明的对照。实际上，状态概念存在于古典动力学及其他一些领域中已有很长一段时间。简要地讲，建立在状态概念上的现代控制理论，又从经典控制理论复频域方法回归到系统建模之源的时域方法。



以图 1-11 所示的简单机械系统为例加以说明。假设系统是线性的，外力  $f(t)$  是系统的输入，质量块  $m$  的位移  $y(t)$  是系统的输出。 $y(t)$  从无外力作用时的平衡位置开始计算。系统模型的方程为：

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \quad (1-8)$$

这是一个二阶系统。我们定义状态变量  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  为：

$$x_1(t) = y(t)$$

$$x_2(t) = \dot{y}(t)$$

图 1-11 简单机械系统 因此

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (1-9)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-ky - c\dot{y}) + \frac{1}{m}f = -\frac{k}{m}x_1 - \frac{c}{m}x_2 + \frac{1}{m}f \quad (1-10)$$

输出方程为：

$$y = x_1 \quad (1-11)$$

将式 (1-9) 与式 (1-10) 联立后用向量矩阵方式表示为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} f \quad (1-12)$$

输出方程为：

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

该系统的方块图如图 1-12。

定义矩阵  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix}$  为该机械系统的状态矩阵， $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}$  为输入矩阵，

$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$  为输出矩阵， $D = 0$  为直接传输矩阵。如此处理后，式 (1-12) 和 (1-13)

就可以写成以下标准形式：
$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bf \\ y &= Cx + Df\end{aligned}\quad (1-14)$$

这就是表示多输入、输出情况的标准状态方程。

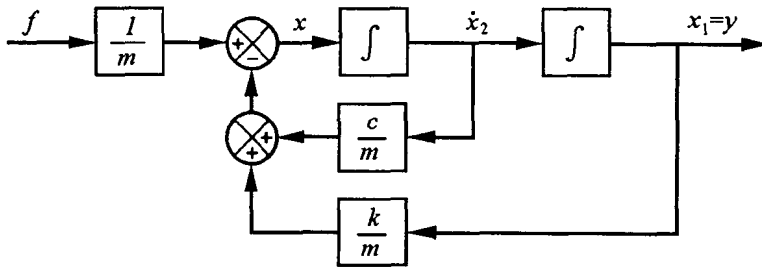


图 1-12 图 1-11 中所示的机械系统方块图

经过如此归纳之后，输入  $f$ 、输出  $y$  就可以是多个因素组成的向量  $f$ （在一般通式中常以  $u$  表示）和  $y$ ，其中各个输出分量  $y_i(t)$  一般都能表述成在  $x$  状态空间中与输入  $u$  之准确或近似的线性关系，也就是如同式 (1-14) 形式的状态方程。

#### 四、动态不确定性及其控制

为实现机电系统的准确控制，无论用经典的还是现代的控制理论，建立正确的系统数学模型似乎是必须进行的首要工作。但是，在实际工程问题中要想得到精确数学模型往往是一件十分困难的事情。因此，我们在进行数学建模时需要做合理的近似处理，忽略一些不确定性因素。然而，这些不确定性因素的存在可能就是机电系统工作品质恶化及系统不稳定的主要原因。

在所设计控制对象的数学模型具有不确定性因素时，预先设计一个不依赖于不确定性的控制器，使实际控制系统在存在不确定性因素的情况下也能比较理想地达到预期的工作品质，这就是鲁棒控制（Robust Control）。

以下用比较简单的实例说明鲁棒控制的概念。在图 1-13 所示的单臂机械手模型中，机械臂 A 的质量为  $m$ ，长度为  $2l$ ，驱动电动机 D 的驱动力矩为  $T$ 。该模型的理想化力学模型如图 1-14。在此模型中，假设机械臂为一均质连杆，其质心在杆的中点。又假设机械臂的转动只存在粘性摩擦，粘性摩擦因数为  $d$ 。由此，此模型的运动方程是：

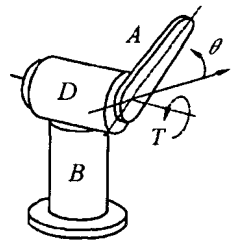
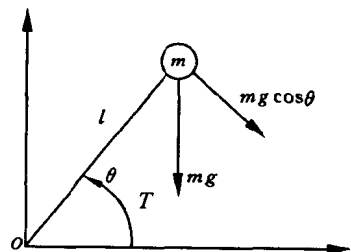


图 1-13 单臂机械手



$$J\ddot{\theta} + d\dot{\theta} + mgl \cos\theta = T \quad (1-15)$$

其中,  $mg$  为机械臂的作用重力,  $J = \frac{4}{3}ml^2$  是机械臂绕它的转轴旋转的转动惯量。

对此机械臂转动所期望的运动轨迹参数是:  $\theta_d(t)$ ,  $\dot{\theta}_d(t)$ , 和  $\ddot{\theta}_d(t)$ , 而按方程 (1-15) 所产生的实际运动与期望参数之跟踪误差为:

$$\begin{aligned} e &= \theta - \theta_d \\ \dot{e} &= \dot{\theta} - \dot{\theta}_d \\ \ddot{e} &= \ddot{\theta} - \ddot{\theta}_d \end{aligned}$$

为实现无误差跟踪, 设计一个辅助控制信号量  $u$ , 要求电动机输入力矩

$$T = u + J\ddot{\theta}_d + d\dot{\theta}_d + mgl \cos\theta \quad (1-16)$$

比较方程 (1-15)、(1-16), 显然:

$$J\ddot{e} + d\dot{e} = u \quad (1-17)$$

我们希望跟踪误差  $e(t)$  收敛于零, 而且其动态特性应满足特征方程:

$$\ddot{e} + a\dot{e} + be = 0 \quad (1-18)$$

其中,  $a > 0$ 、 $b > 0$  为给定常数。因此, 只要使辅助控制信号

$$u = (d - aJ)\dot{e} - bJe \quad (1-19)$$

即可达到目的。此时, 满足跟踪性能要求的控制方程 (控制器) 为:

$$T = (d - aJ)\dot{e} - bJe + J\ddot{\theta}_d + d\dot{\theta}_d + mgl \cos\theta \quad (1-20)$$

如果实际机械臂的转动确实存在弹性摩擦, 而且模型中所确认的粘性摩擦系统也不正确, 这就是数学模型具有了不确定性。

假设此时出现的弹性摩擦因数为  $\delta_0$ , 粘性摩擦系数的真值为  $\tilde{d}$ 。原方程 (1-15)

$$\text{就变成:} \quad J\ddot{\theta} + \tilde{d}\dot{\theta} + \delta_0\theta + mgl \cos\theta = T \quad (1-21)$$

其中出现的参数误差为:  $\delta_1 = \tilde{d} - d$

$$\text{特征方程 (1-18) 变成:} \quad \ddot{e} + \left(a + \frac{\delta_1}{J}\right)\dot{e} + \left(b + \frac{\delta_0}{J}\right)e = \varpi(\theta_d, \dot{\theta}_d) \quad (1-22)$$

其中,  $\varpi(\theta_d, \dot{\theta}_d) = -(\delta_1\dot{\theta}_d + \delta_0\theta_d)/J$ 。此情况显然不能保证跟踪误差趋于零。

正因为  $\delta_0$ 、 $\delta_1$  具有不确定性，我们最多只能界定他们可能的变动范围：

$$|\delta_0| \leq k_1, \quad |\delta_1| \leq k_2, \quad |\varpi(\dot{\theta}_d, \theta_d)| \leq \rho(\dot{\theta}_d, \theta_d) \quad (1-23)$$

其中， $k_1$ 、 $k_2$  为给定常数， $\rho$  为给定的界函数。为简便起见，可以令  $k_1 = k_2 = 1$ 。引入新的辅助控制输入信号  $v$ ，将原控制方程 (1-20) 修改成：

$$T = (d - aJ)\dot{e} - bJe + J\ddot{\theta}_d + d\dot{\theta}_d + mgl \cos\theta + Jv \quad (1-24)$$

此时，存在不确定性的特征方程 (1-22) 演变成：

$$\ddot{e} + a\dot{e} + be = v + \Delta f(\dot{\theta}_d, \theta_d, \dot{e}, e) \quad (1-25)$$

其中

$$\Delta f = \varpi(\dot{\theta}_d, \theta_d) - \frac{\delta_1}{J}\dot{e} - \frac{\delta_0}{J}e$$

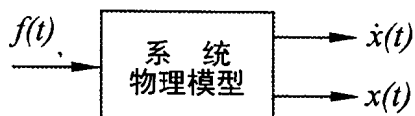
可以通过选择适当  $v$  来抵消不确定性的影响，实现鲁棒控制的目的。

鲁棒控制的基本特征是用一个结构和参数都固定不变的控制器来保证即使不确定性对系统的性能品质影响最恶劣时也能满足设计要求，尽管鲁棒控制并不一定能达到最佳控制的目的，但它对于不确定性的处理能力正是实际控制现场所迫切需要的。

### 第三节 运动伺服控制

#### 一、运动伺服控制的物理概念

从本质上看，要使机电系统中任何一个机械部件产生运动，必须对它施加作用力，用以承受工作负载、克服运动过程中的摩擦阻力和克服惯性负载、产生运动加速度。因此，所有运动伺服控制过程实质上都可以看成是对施加在机械部件上的驱动力的控制，控制的输出当然是相应的运动参数——位移、速度和加速度。所以，机电系统运动伺服控制模型可简化成图 1-15 所示的模型。



由图可见，系统模型是否能够准确执行所要求的伺服运动完全取决于对输入力  $f(t)$  的控制，当模型的运动速度、位移不符合控制要求时，外力  $f(t)$  应当相应地产生作用——速度过慢、位置

图 1-15 机电系统运动伺服控制模型 没到进行推动，速度过快、位置偏离进行纠正。无