

机 械 工 程 学 科
研究生教学用书

控制理论及其应用

第二版

Control Theory and Applications

Second Edition

卢泽生 主编

高等教育出版社

机械工 程 学 科
研 究 生 教 学 用 书

控制理论及其应用

KONGZHI LILUN JIQI YINGYONG

第二版

Control Theory and Applications

Second Edition

卢泽生 主编
卢泽生 吴振顺 孙雅洲 编著
王积伟 审阅



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是在第一版的基础上修订而成的,介绍的内容是理论与实践密切结合的跨学科的综合技术,主要是应用经典控制理论和现代控制理论分析和解决工程技术问题。主要内容包括机械系统模型的建立及机电相似系统的等效转换、系统的典型信号和典型环节、控制系统的稳定性及其分析、根轨迹法、控制系统稳态误差的分析与计算、自动控制系统的校正设计、机械系统的建模与分析、机床进给系统速度和位置控制及稳定性分析、控制系统的状态空间描述、控制系统状态方程的解、李雅普诺夫稳定性分析、控制系统的状态空间综合法、神经网络控制及其应用、模糊控制及其应用等。

本书可作为普通高等学校机械工程学科研究生教学用书,还可供相关专业工程技术人员自学与参考。



图书在版编目(CIP)数据

控制理论及其应用/卢泽生主编. --2版.--北京:高等教育出版社,2016.5

ISBN 978-7-04-045266-2

I. ①控… II. ①卢… III. ①控制论-研究生-教材 IV. ①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 085962 号

策划编辑 宋 晓	责任编辑 宋 晓	封面设计 李卫青	版式设计 马 云
插图绘制 杜晓丹	责任校对 刁丽丽	责任印制 田 甜	

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京市昌平百善印刷厂		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	21.5	版 次	2009 年 12 月第 1 版
字 数	510 千字		2016 年 5 月第 2 版
购书热线	010-58581118	印 次	2016 年 5 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	33.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 45266-00

第二版前言

随着现代科学技术的迅速发展,特别是随着机械自动化程度、劳动生产率、仪器设备精度等的不断提高,自动控制技术在机械制造中的地位显得越来越重要。而电子技术、自动控制技术以及计算机技术的快速发展又为控制理论在机械制造中的广泛应用提供了条件。对于大多数工程技术人员和科学工作者来说,自动控制已成为必不可少的基础知识,很好地掌握并应用自动控制理论尤为重要。

但是,作为一般的机械工程技术人员和学生来说,总觉得学习和掌握控制理论和技术很困难,究其原因主要是在以往的教学,过多地强调理论的系统性和数学的严谨性,而忽视了控制理论和技术的目的性和适用性。本书以理论密切联系实际为宗旨,尽量做到将控制理论应用到工程实践中,这样更有利于进一步学习、消化理解和掌握控制理论和相关技术。

本书是在第一版的基础上修订而成的,由卢泽生主编,具体分工如下:第1—4、6—8、14、15章由卢泽生编著;第5、9章由孙雅洲编著;第10—13章由吴振顺编著。白基成对第7、8章、杨庆俊对第10—13章进行了补充修改,在再版之际表示感谢。

东南大学王积伟教授认真审阅了本书,并提出许多宝贵意见与建议,在此表示衷心的感谢。

虽在多年的教学中力争不断地充实和完善,但由于作者水平所限,书中内容仍不免有欠妥之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

编著者

2016年1月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 基本概念	1
1.2 机械控制系统的组成及其研究内容	2
1.2.1 控制系统性能分析	3
1.2.2 控制系统的设计	3
1.3 自动控制系统的分类	5
第2章 机械系统模型的建立及机电相似系统的等效转换	7
2.1 机械系统模型的建立	7
2.2 机电相似系统的等效转换	10
第3章 系统的典型信号和典型环节	15
3.1 系统的典型信号及其时间响应分析	15
3.1.1 系统的典型信号	15
3.1.2 系统时间响应数学模型的建立与时间响应分析	16
3.2 系统的频率响应和典型环节	18
3.2.1 频率响应	19
3.2.2 机械系统的典型环节及其特性的描述	21
3.2.3 电系统的典型环节及其特性的描述	26
3.3 有关频率的基本概念	27
3.4 自动控制系统的静态和动态的概念	28
第4章 控制系统的稳定性及其分析	30
4.1 系统的稳定性	30
4.2 系统的稳定性判据	31
4.2.1 解方程稳定判据(求解闭环传递函数特征方程法)	31
4.2.2 劳斯稳定判据	31
4.2.3 奈奎斯特稳定判据(简称奈氏判据)	33
4.2.4 对数幅相频率特性稳定判据	33
4.3 系统的稳定裕量	34
4.3.1 奈氏稳定判据的稳定裕量	34
4.3.2 对数幅相频率特性稳定判据的稳定裕量	35
4.4 液压仿形刀架控制系统的综合分析与计算	38
第5章 根轨迹法	50
5.1 控制系统的根轨迹	50

5.1.1	根轨迹的基本概念	50
5.1.2	控制系统根轨迹的分析	51
5.2	根轨迹所遵循的幅值和幅角条件	53
5.3	绘制根轨迹的基本规则及步骤	55
第 6 章	控制系统稳态误差的分析与计算	65
6.1	控制系统稳态误差的分析	65
6.2	稳态误差中的静态误差和动态误差计算	66
6.2.1	静态误差	66
6.2.2	动态误差	72
6.3	液压仿形刀架控制系统稳态误差的计算	74
6.3.1	跟随误差 e_{ssI} 的计算	75
6.3.2	负载误差 e_{ssF} 的计算	75
第 7 章	自动控制系统的校正设计	77
7.1	校正问题的提出	77
7.2	各设计参数对系统性能的影响	77
7.3	系统校正	79
7.3.1	系统校正方式	79
7.3.2	常用校正装置	79
7.3.3	超前校正	81
7.3.4	滞后校正	89
7.3.5	滞后-超前校正	94
7.3.6	PID 校正	99
第 8 章	机械系统的建模与分析	118
8.1	机床工作台的位置控制系统分析	118
8.2	机床工作台的速度控制系统分析	123
8.3	活塞销孔镗削加工的表面质量分析与控制	128
第 9 章	机床进给系统的速度和位置控制及稳定性分析	141
9.1	机床进给运动伺服控制系统的组成	141
9.1.1	机床进给系统的开环控制	141
9.1.2	机床进给系统的闭环控制	141
9.2	直流伺服电机数学模型的建立	142
9.3	速度控制系统的建立及稳定性的对比分析	144
9.3.1	直流伺服电机的转速控制系统的建立	144
9.3.2	速度控制系统传递函数的建立及稳定性的对比分析	145
9.3.3	速度反馈控制系统根轨迹的绘制	146
9.4	位置控制系统传递函数的建立及稳定性对比分析	146
9.4.1	无速度反馈的位置控制系统传递函数的建立与稳定性分析	146

9.4.2 有速度反馈的位置控制系统传递函数的建立与稳定性分析	149
第 10 章 控制系统的状态空间描述	153
10.1 状态空间描述的基本概念	153
10.2 机电液气系统的状态空间描述	155
10.2.1 机械系统状态空间描述	155
10.2.2 电气系统状态空间描述	156
10.2.3 液压系统状态空间描述	157
10.2.4 气动系统状态空间描述	158
10.3 线性定常连续系统的状态方程及输出方程	160
10.3.1 由系统微分方程列写状态方程及输出方程	160
10.3.2 由系统状态变量图写线性定常系统状态方程及输出方程	168
10.3.3 由系统框图直接列写状态方程及输出方程	172
10.4 非线性连续系统的状态方程及输出方程	176
10.4.1 典型非线性系统的状态方程及输出方程	176
10.4.2 本征非线性控制系统的状态方程及输出方程	179
10.5 线性时变连续系统的状态方程及输出方程	180
10.6 线性离散系统的状态方程及输出方程	181
10.6.1 作用函数不含未来值时线性离散系统的状态方程及输出方程	181
10.6.2 作用函数含未来值时线性离散系统的状态方程及输出方程	183
10.7 利用 MATLAB 数学模型转换列写系统状态方程	185
10.8 实际控制系统状态方程的列写举例	188
10.8.1 泵控液压马达位置伺服系统状态方程及输出方程	188
10.8.2 带有阻尼柱塞导控型两级高压减压阀的状态方程及输出方程	190
第 11 章 控制系统状态方程的解	192
11.1 线性定常系统状态方程的解	192
11.1.1 齐次状态方程的解	192
11.1.2 矩阵指数与状态转移矩阵	196
11.1.3 非齐次状态方程的解	197
11.1.4 线性时变系统状态方程的解	202
11.2 离散系统状态方程的解	207
11.2.1 线性定常离散系统状态方程的解	207
11.2.2 线性时变离散系统状态方程的解	213
11.2.3 连续系统状态方程的离散化	214
11.3 基于 MATLAB 与 SIMULINK 上的控制系统时域特性分析	218
11.3.1 基于 MATLAB 上的控制系统时域特性分析	218
11.3.2 基于 SIMULINK 上的控制系统时域特性分析	229
11.3.3 非线性控制系统的时域特性分析	234

11.3.4 离散控制系统的时域特性分析	240
第 12 章 李雅普诺夫稳定性分析	247
12.1 平衡状态和欧几里得范数及状态方程解的轨迹	247
12.2 李雅普诺夫稳定性定义	248
12.3 系统稳定性的李雅普诺夫判别法	249
12.3.1 李雅普诺夫第一法	249
12.3.2 正定函数和二次型函数及李雅普诺夫第二法	250
12.3.3 李雅普诺夫稳定定理	251
12.4 线性系统的李雅普诺夫稳定性分析	254
12.4.1 线性定常系统的稳定性分析	254
12.4.2 线性时变系统的稳定性分析	257
12.4.3 线性定常离散系统的稳定性分析	257
12.4.4 线性时变离散系统的稳定性分析	258
12.4.5 应用李雅普诺夫第二法求解系统参数优化问题	258
第 13 章 控制系统的状态空间综合法	261
13.1 线性系统的能控性与能观测性	261
13.1.1 线性定常离散系统的能控性	261
13.1.2 线性定常连续系统的能控性	265
13.1.3 线性定常连续系统的输出能控性	266
13.1.4 线性定常离散系统状态能观测性	267
13.1.5 对偶原理	270
13.1.6 系统完全能控条件与完全能观条件的另一种形式	270
13.1.7 机电液气控制系统状态不完全能控和完全能观的原因	272
13.1.8 系统状态完全能控和完全能观测标准形	274
13.2 线性系统的状态反馈与状态观测器	277
13.2.1 概述	277
13.2.2 具有状态反馈和输出反馈系统的能控性与能观测性	278
13.2.3 极点配置问题	279
13.2.4 状态观测器	283
13.2.5 利用 MATLAB 实现控制系统的极点配置	286
第 14 章 神经网络控制及其应用	292
14.1 神经网络控制产生的背景	292
14.2 生物学的启示	292
14.3 人工神经元	293
14.4 神经网络模型的组成	294
14.5 神经网络的学习	296
14.5.1 神经网络的学习方式	296

14.5.2 神经网络的计算	297
14.6 基于 BP 神经网络的线切割加工质量及效率控制	306
14.6.1 线切割加工 BP 神经网络的设计	306
14.6.2 线切割加工质量及效率控制 BP 神经网络的训练	308
第 15 章 模糊控制及其应用	313
15.1 模糊控制及产生的背景	313
15.2 模糊控制系统	313
15.2.1 模糊变量的描述	314
15.2.2 模糊逻辑控制器的设计	314
15.3 磨削加工表面粗糙度的模糊控制	322
附录	328
参考文献	331

第1章 绪 论

本章主要讲述控制理论的基本概念、机械控制系统的组成、控制系统的性能指标以及自动控制系统的分类。通过本章的学习读者可重点掌握本门课程所研究的基本内容及所要解决的基本问题。

控制理论指的是自动控制理论。当今一切领域都离不开自动控制,没有自动控制就没有现代科学技术和现代社会文明。自动控制技术可使生产过程具有高度的准确性,能有效地提高产品的性能和质量,可节约能源、降低材料消耗,能极大地提高劳动生产率、改善劳动条件和减轻劳动强度等。

本书的重点在于应用,即应用自动控制理论来分析、研究和解决机械制造中的有关控制问题和精度保证问题,如位移、位置、速度、力、精度、质量等控制。

追溯起来,控制理论最早是从机械制造领域中的飞行器发展起来的,后来随着科学技术的不断发展,这一理论日趋成熟,并自成体系,与机械制造领域有所脱离。随着机械制造工业的发展,机电一体化产品的不断出现,学科之间不断的交叉与渗透,将这一理论更加成功地应用于机械制造领域将大有前途。

1.1 基本概念

自动控制是指在没有人直接参与的情况下,通过控制系统使被控对象自动地按照预定规律运行的控制过程。

系统是指由相互联系、相互依赖、相互制约和相互作用的若干部分组成的具有某种特定功能的有机整体。

控制系统是指由相互联系、相互依赖、相互制约和相互作用的若干部分组成的具有某种控制功能的有机整体。

自动控制系统是指由相互联系、相互依赖、相互制约和相互作用的若干部分组成的具有自动控制功能的有机整体。

被控对象是指工作状态需要加以控制的装置、设备和过程。

被控量是指描述被控对象按预定运行规律工作的量,也是系统的输出量。

控制量是指作为被控量的控制指令而加给控制系统的输入量,也称给定量。

扰动量是指引起被控量偏离预定运行规律的量,也称干扰量。

机械是指由零部件组成,可实现运动、能量和信息传递或转换的具有某种功能的仪器、装置或设备。

制造是指把原材料变成产品的过程。

机械制造是指把原材料通过加工、检测、装配制成仪器、装置或设备等产品的过程。

所以说,用控制理论去分析研究和实现机械系统的设计、制造、检测、装配或控制,并保证其精度和质量的问题都属于本门课程所研究的内容。

从控制理论上而不是控制方法上说,控制理论主要分为两大类:经典控制理论(或称古典控制理论)和现代控制理论。

经典控制理论以传递函数为理论基础,主要解决单输入、单输出的线性控制系统的分析与设计问题。其分析方法主要是频域法,一般基于经典控制理论的控制方法难以获得最佳控制。

现代控制理论以状态方程或模糊数学、神经网络等为理论基础,主要解决多输入、多输出的非线性时变控制系统的分析与设计问题。其分析方法主要是时域法,一般基于现代控制理论的控制方法易于实现最佳控制。

时变控制系统是指其方程的系数是时间的函数。如宇宙飞船的控制系统就是一个时变控制系统,因为飞船的燃料消耗和引力的变化是时间的函数。再如,对一个高速弹性系统,可建立时变振动系统的二阶线性变系数微分方程为

$$m(t)\ddot{x} + f(t)\dot{x} + k(t)x = F(t)$$

式中: m 、 f 和 k 分别为随时间变化的质量、粘滞阻尼系数和刚度系数(或称弹性系数), x 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ 和 $F(t)$ 分别为位移、速度、加速度和力向量。因此,该系统也是一个时变控制系统。

用经典控制论所能解决的问题都能用现代控制论来解决,但经典控制的独到之处是输入输出关系明确,对系统分析、设计简单直观,所以经典控制仍然具有广阔的应用前景。

1.2 机械控制系统的组成及其研究内容

自动控制系统是由控制器、执行机构、被控对象和反馈元件(传感器)组成的。

控制器是通过所产生的控制信号来操纵执行机构,使被控对象按技术要求完成某种任务的器件,主要包括计算机、控制元件、放大元件、转换元件、比较元件和运算元件等。

执行机构是根据控制信号对被控对象进行操作的装置,如液压马达、电动机等。

被控对象前面已经讲过,但也可说成是受控制器操纵的、具有某种功能的、最终可完成某种任务的对象,如机床、人造卫星、火箭、飞机和化工装置等。

反馈元件是可产生与被控制量(输出量)有一定函数关系的反馈信号的器件,如各种可满足特定性能要求的传感器。

如果被控对象是由某种机械所组成的反馈系统,则其机械控制系统的基本组成如图 1.1 所示。

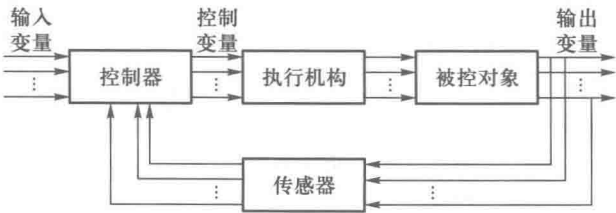


图 1.1 机械控制系统框图

控制理论主要解决的问题包括两个方面,一是控制系统性能分析,二是控制系统的设计。

1.2.1 控制系统性能分析

控制系统性能分析包括以下几个方面:

- (1) 判断系统能否正常工作——系统稳定性分析。
- (2) 判断系统是否有稳定裕量,即能否可靠地工作——系统可靠性分析。
- (3) 判断系统精度的高低、误差的大小——系统准确性分析。
- (4) 判断系统响应的快慢——系统快速性分析。

1.2.2 控制系统的设计

单纯从控制角度讲,设计的基本问题是合理选择控制规律和设计控制器,以保证输出量能满足设计指标。对系统分析和设计的依据是控制系统的性能指标。它是根据控制系统应完成的任务和技术要求而确定的,要综合考虑系统的稳态性能、动态性能和抗干扰性能等指标。

1. 系统的稳态性能

判定系统的稳态性能,一是看系统是否稳定,即系统稳定性,二是看系统稳定后其稳态精度如何,即系统的准确性。系统稳定是指:当输出量偏离给定的输入量的初始值随着时间的推移,能逐渐趋于零时,则系统稳定,反之则不稳定。如果一个系统不稳定,被控制量将不停地波动(振荡)或者发散,不能保持正常的工作状态。所以,系统稳定是任何控制系统的必要条件。

系统的准确性是指在过渡过程结束后,输出量与给定量之间的偏差,又称为稳态误差或稳态精度。

2. 系统的动态性能

根据所采用的分析与设计方法不同,动态性能通常用时域指标和频域指标这两种形式来衡量。

(1) 时域指标

时域指标是相对于控制系统在单位阶跃输入作用下的输出响应而规定的,其响应曲线如图 1.2 所示。

具体的时域指标有:

$$1) \text{ 超调量 } \sigma_p: \sigma_p = \frac{x_{\max} - x(\infty)}{x(\infty)} \times 100\%$$

2) 调整时间(过渡过程时间) t_s :阶跃响应曲线达到输出量稳态值的 $\pm(2\% \sim 5\%)$ (称为允许误差带)所需的时间。它反映了系统的快速性能,这个指标是在稳定的前提下提出来的,因为没有稳定性也就谈不上快速性。所谓快速性就是当系统的输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快慢程度,即系统恢复原值或跟随给定的输入值的速度,亦即过渡过程时间 t_s 的大小,显然 t_s 越小越好。

3) 上升时间 t_r :阶跃响应从稳态值的 10% 上升到 90% 所经历的时间。

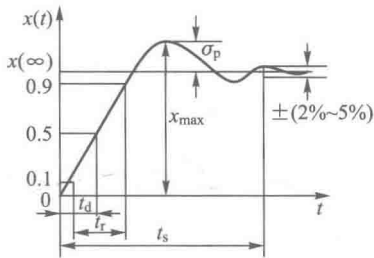


图 1.2 单位阶跃输入作用下的输出响应

4) 延迟时间 t_d : 阶跃响应从起始值到稳态值的 50% 所经历的时间。

5) 振荡次数 N : 在 $0 < t < t_s$ 的时间内, $x(t)$ 穿越 $x(\infty)$ 即 $1(t)$ 的次数的一半为控制系统过渡过程的振荡次数 N 。 N 的数值越小, 控制系统的阻尼性能越好。

(2) 频域指标

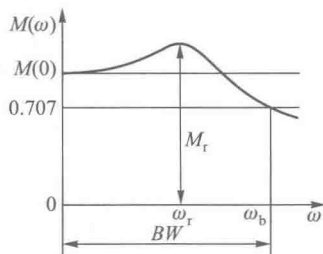
频域指标的设定是从闭环频率特性和开环频率特性两个角度给出的。

1) 闭环频率特性的频域指标共有三项, 如图 1.3 所示。

① 谐振峰值 M_r : 幅值 $M(\omega)$ 的最大值为谐振峰值, M_r 的大小说明闭环控制系统的相对稳定性, M_r 值大则超调量就大。

② 谐振频率 ω_r : 谐振峰值 M_r 所对应的频率。 ω_r 的大小表征了瞬态响应的速度。 ω_r 的值越大, 时间响应越快。

③ 频带宽度 BW : 当幅值 $M(\omega)$ 降至其零频率幅值 $M(0)$ 的 0.707 倍或从零频增益下降至 -3 dB 时的频率范围, 此处的频率为截止频率 ω_b , 频带越宽, 其截止频率越高, 则系统响应越快。它反映了系统的滤波特性。



M_r —谐振峰值; ω_r —谐振频率;
 ω_b —截止频率; BW —频带宽度

图 1.3 闭环系统幅频特性曲线

2) 开环频率特性的频域指标: 在分析和设计控制系统时, 不仅要使系统稳定, 而且还要求系统具有一定的稳定裕度。所以将增益裕量和相位裕量作为开环频率特性的频域指标。

① 增益裕量 K_g : 系统开环频率特性 $G(j\omega)H(j\omega)$ 的相角为 -180° 时, 幅频特性 $|G(j\omega)H(j\omega)|$ 的倒数。

$$K_g = \frac{1}{|G(j\omega)H(j\omega)|}$$

或

$$20\lg K_g = -20\lg |G(j\omega)H(j\omega)|$$

② 相位裕量 γ : 系统剪切频率 (幅值交界频率) ω_c 处, 相频特性 $\varphi(\omega_c)$ 与 -180° 相差的角度。

$$\gamma = 180^\circ + \varphi(\omega_c)$$

③ 剪切率: 开环对数幅频特性曲线在剪切频率 (或称幅值交界频率) ω_c 附近的斜率。它反映高频时频率特性衰减的快慢。高频衰减越快, 对于信号和噪声的区分能力越强。剪切率越大, 对高频噪声抑制越强。然而, 陡峭的剪切特性常伴随着谐振幅值 M_r 的增大, 会造成系统的稳定裕量降低。

3. 抗干扰性能

控制系统在工作过程中, 总会受到外界的干扰。一个好的控制系统, 应对外界干扰具有足够的抵抗能力, 同时又要对有用信号做出迅速反应。这两项要求是有矛盾的。在工程设计中常用闭环系统的带宽 BW 作为抗扰性的度量。带宽越窄, 则系统的抗高频干扰性越强。

根据系统输入量和输出量的性质和大小, 控制器产生一定的控制信号, 即控制量, 去控制被控对象。控制信号的变化规律称为控制规律。从控制角度讲, 控制系统的基本问题是设计所需要的控制器和选择最为合理的控制规律, 以保证输出量满足设计指标要求。

1.3 自动控制系统的分类

任何事物的分类都是一个复杂的问题,难以准确地给予统一的定义,不同的结构、不同的应用背景和不同的角度等都有不同的分类方法。下面从不同的角度对自动控制系统进行分类。

1. 按系统组成的物理性质分类

可分为电气控制系统、机械控制系统、流体控制系统、电气—流体控制系统等。

2. 按系统的数学模型(微分方程)的性质分类

(1) 线性系统

线性系统指自动控制系统的工作状态和性能可用线性微分方程或线性差分方程来描述的系统。它又可分为:

1) 线性定常系统:描述线性系统的微分方程或差分方程的系数是不随时间而变化的常数。

2) 线性时变系统:描述线性系统的微分方程或差分方程的系数是时间的函数。

(2) 非线性系统

自动控制系统的工作状态和性能可用非线性微分方程描述的系统。它可以分为非线性定常系统和非线性时变系统。

(3) 线性系统与非线性系统的特点

1) 线性系统的稳定性只与其自身的结构和参数有关,而与初始条件和外加输入信号无关。对于线性定常系统,其稳定性仅取决于特征方程的根在 $[s]$ 平面的分布。

非线性系统的稳定性除了与系统的结构和参数有关外,还与初始条件和输入信号有关。对于一个非线性系统,在不同的初始条件下,运动的最终状态可能完全不一样。也有可能某种初始条件下是稳定的,而在另一种条件下是不稳定的。或者在某种输入信号下是稳定的,而在另一种输入信号下是不稳定的。所以,对于非线性系统只能判断在某种条件下系统是否稳定。

2) 对于线性系统,系统的运动状态或收敛于平衡状态或发散。只有处于临界稳定时才会出现等幅振荡。但在实际情况下,这种状态是不能持久的。

在非线性系统中,也会出现具有一定振幅和频率的振荡。这种振荡的频率和振幅具有一定的固定性,称为自激振荡或称自振荡。改变系统的结构和参数可以改变系统的自激振荡的频率和振幅。

3) 在线性系统中,当输入信号为正弦信号时,其输出的稳定分量是同频率的正弦信号。输入信号和稳态输出之间,仅在振幅和相位上有所不同,因此可以用频率响应来描述系统的固有特性。

对于非线性系统,如果输入信号为某一频率的正弦信号,其稳定输出一般不是同频率的正弦信号,而是含有高次谐波分量的非正弦周期函数。因此,不能直接应用频率特性、传递函数等线性系统常用的概念来分析和综合非线性系统。

4) 对于线性系统,可以用线性微分方程来描述,可以用叠加原理求解。

对于非线性系统,要用非线性方程来描述,不能用叠加原理求解,而通常采用数值解法、

描述函数法、相平面法、李雅普诺夫直接法、波波夫法等进行分析。

3. 按给定量的变化规律分类

(1) 恒值控制系统

起控制作用的输入量是恒定值的控制系统称为恒值控制系统。

(2) 程序控制系统

控制作用是按预先给定的规律(程序)变化的控制系统称为程序控制系统。

(3) 随动控制系统

控制作用是时间的未知函数,即输入量事先未知,而输出量能迅速复现输入量变化的控制系统称为随动控制系统。

4. 按输入及输出信号连续性分类

(1) 连续系统

系统中各元件的输入和输出信号是时间 t 的连续函数的控制系统称为连续系统。

(2) 离散系统

系统输入、输出值是在离散时间 $t_1, t_2, \dots$ 上配值的脉冲序列函数的控制系统称为离散系统。

5. 按被控制量参数的性质分类

可分为速度控制、位置控制、力和力矩控制、混合变量控制等系统。

6. 按系统有无反馈信号分类

(1) 开环系统

系统的输出信号对控制信号无直接影响的控制系统称为开环系统。

(2) 闭环系统

系统的输出信号对控制信号有直接影响的控制系统称为闭环系统。

开环系统具有构造简单、维护容易、成本较低、不存在不稳定问题、输出量不用测量(与闭环系统相比)等优点。其缺点是当扰动和给定值变化时会造成误差,为保证必要的输出量,还需对标定值随时进行修正。

闭环系统控制精度较高、抗干扰性强,但结构较复杂、成本较高,其误差取决于反馈回路的测试精度,设计时需校核其系统的稳定性。

第2章 机械系统模型的建立及机电相似系统的等效转换

本章主要讲述模型的分类、机械系统物理模型和数学模型的建立、机械系统物理模型参数的转换原则以及机电相似系统的等效转换。通过本章的学习,读者可综合运用以前所学的有关知识实现机电相似系统的等效转换,为系统的定性分析提供依据。

2.1 机械系统模型的建立

机械系统模型的建立包括物理模型和数学模型的建立。

1. 模型的分类

模型一般可分为五种形式:实体模型、图式模型、模拟(仿真)模型、物理模型和数学模型。

(1) 实体模型

实体模型一般是现实系统放大或缩小的表现形式。它能表明系统的主要特征和各组成部分之间的关系,如原子模型、导弹模型、舰艇模型、地球仪等。

(2) 模拟(仿真)模型

模拟模型一般是指通过计算机仿真或是用一种物理模型来代替另外一种物理模型的表现形式。如用电系统物理模型来代替机械系统物理模型也可称为模拟。总之,是模拟现实系统的性能和行为。

(3) 图式模型

图式模型是用图表、图形、曲线、符号等对现实系统加以抽象、概括与描述的表现形式。如设计图、网络图、流程图、电路图等。

(4) 物理模型

物理模型是用物理参数对现实系统加以抽象、概括与描述的表现形式。

(5) 数学模型

数学模型是用数学方程对现实系统加以抽象、概括与描述的表现形式。

2. 机械系统物理模型的建立

物理模型应根据图式模型来建立。需要将该系统的结构装配图简化为结构原理图,然后再概括抽象为用物理参数表示的物理模型。

机械系统物理模型的描述,一般用质量(m)或惯量(J)、弹性系数(k)和与速度有关的粘滞阻尼系数(f)等物理量来表示。

根据机床工作台进给系统结构原理(图 2.1a)建立其物理模型(图 2.1b)。图 2.1b 中 m 为后文所述的运动部件转化后的质量; F 为工作台所受的力; x 为工作台的位移; f 为粘滞阻

尼系数; k 为弹性系数。

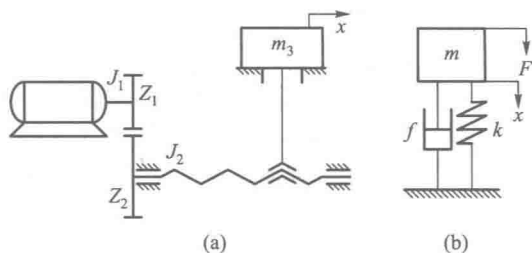


图 2.1 机床工作台进给系统的结构原理图及其物理模型

3. 机械系统数学模型的建立

数学模型建立的依据是物理模型。根据各参数的相互关系,通过有关的定律、定理和规律等建立数学表达式,该表达式可正确地反映系统的本质。在数学模型的建立中要力求简化和准确。

(1) 简化性

作为一个系统,特别是复杂的系统可能要由十多个甚至数十个方程才能较完善地描述一个系统。这样要对这个系统进行研究分析是非常困难的,甚至是不可能的。因此,要对此系统的数学描述进行简化,即忽略那些次要因素,使得研究分析可以进行,否则数学模型很精准、严密,但不可解也没有实际意义。

(2) 准确性

对系统的描述一定要准确,被忽略或简化的因素一定是次要的,并且还要正确地应用相关的物理概念和公式。

4. 有关物理参数的转化和计算

(1) 质量和惯量的转化

研究一个机械系统,主要是控制被控对象的输出量,被控对象的运动形式一般是零部件的移动或者转动。图 2.1 中 m_3 为工作台的质量,但是其他运动部件的质量或转动惯量对系统也有不同程度的影响,那么就on应该将这些质量或转动惯量通过转化归算到被研究的部件上,这就是质量和惯量的转化。

转化原则:转化前后系统的瞬时动能保持不变。

转化前的动能

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k m_i v_{si}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^n J_{si} \omega_i^2 \quad (2.1)$$

式中 v_{si} ——元件 i 的重心 s 的速度;

J_{si} ——元件 i 对重心轴 s 的转动惯量;

ω_i ——元件 i 的瞬时角速度;

m_i ——元件 i 的质量;

i ——运动部件(包括移动和转动)的序号, $i = 1, 2, \dots, k, k+1, k+2, \dots, n$ 。

转化后被研究对象的瞬时动能:

$$\text{移动元件} \quad E = \frac{1}{2} m_H v_i^2 \quad (2.2)$$