

# 机械控制工程

上册

阳含和 编著

机械工业出版社

# 机械控制工程

上册

阳含和 编著



机械工业出版社

本书系统地讲述了控制论在机械工程中的应用,定名为机械控制工程,是作者多年来从事研究和教学工作的总结。上册以古典控制论为主,阐述了机械控制工程的基本观点与思想方法。并介绍了有关的数学、力学及电学基础知识,详细讨论了机械工程系统传递函数与脉冲响应函数、频域分析与系统辨识方法、稳定性及自激振荡概念、时延现象以及典型非线性系统的分析方法。最后讲述了离散系统分析理论基础以及随机过程基本理论与线性滤波、预测及优化的理论基础。

本书可供机械类各科大、研究生、教师以及工程技术人员。也适用于从事控制方面工作的其他人员。

## 机械控制工程

上册

阳含和 编著

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张23 · 字数 562 千字

1986年10月北京第一版·1986年10月北京第一次印刷

印数 0,001—4,850 · 定价 5.70 元

统一书号: 15033 · 6397

## 前 言

现在才出版这样一本书，无论是从内容的新颖性或者是它的深度和广度来看都远远不能令人满意。因为目前机械工程科学领域中广大的教学与科技人员不仅对古典的控制理论而且对近代控制工程理论也是十分熟悉的，大多数高等院校已经把机械控制工程列入有关专业的教学计划中。尽管如此，为了把本书作者和他的同事们以及学生在发展这一门学科所进行的一些研究工作进行一个初步总结。并且较为系统的阐述作者的一些观点，出版这本书也许对目前在这一领域中工作的广大科技及教学工作者以及研究生、大学生的学习有一定参考价值。

这本书的最早的原始雏形是1975年作者为西安交通大学机械系机制专业教师开的一个讲座的讲义“机械工艺装备动态特性分析”。这里必须指出，这本书的原始素材主要还是我在五十年代末六十年代初指导几位研究生在应用控制工程基本理论探索金属切削过程及其装备的动态特性方面进行的一些试验研究工作，现在来看这些工作显然是非常肤浅而微不足道的，然而以当时自己的水平来衡量却的确是一项十分艰巨的工作。在这里，作者应当感谢当时的研究生熊有伦同志（现为华中工学院副教授）以及杨鹏同志（现为兵器工业部自动化所工程师）等等。我在七十年代初在液压传动等方面继续进行过一些探索，又为本书累积了一些素材。

1978年~1979年为了培养研究生以及青年教师为西安交通大学机械系开了一个“机械控制工程”的讲座。参加听课的除新建立的“液压及机械控制”专业以外，还有机制专业研究生与青年教师以及部分其他专业和校外进修的教师及技术人员，共计讲了约80学时。为了使讲座更生动，作者按提纲进行讲授，而找部分同志记笔记，以及按章分工负责整理笔记，编成教材，这就是本书上册的第一稿，当时分上、下册在校内出版为内部试用教材。

第一稿的主要内容首先于1979年冬在北京香山成立“全国机械控制工程教学研究会”的筹备大会期间作过短期讲座交流。以及还应华中工学院的热情邀请作过短期讲学交流，这里还应感谢上述两次交流中参加听讲的同志们提供了不少宝贵意见。

上述第一稿的教材上、下二册在交大内部试用，先后经过四、五届硕士研究生作为参考书试用。并选择其中部分内容分别在本专业及机制专业本科大学生作为教材试用过三届。在试用过程中，曾经修订再版过一次为第二稿。

应当说明，在已经初步整理成的上述二个初稿部分只是以古典控制理论为主，而有关机械控制工程的现代理论部分只有些素材，还没有进行整理过，因此，决定把已经写成初稿的部分作为上册出版，而其它尚得整理的素材即现代机械控制工程部分留得以后下册出版。

这本书原来试图把控制工程基本理论与机械工程科学技术有机地结合在一起，但限于自己的业务范畴与水平，只进行过有关机械制造中金属切削加工与液压控制方面的一些探索工作，还有少量的有关金属压力加工与机械力学问题，因此，本书无论是在深度上还是广度上都是远远不能令人满意的，这也是作者希望今后有机会再进行修订时想要改进的一点。

在具体进行编写本书的初稿时，主要集中注意力于控制工程在机械工程中的应用方面、

而对控制工程理论本身则只根据应用需要作一般性简单介绍。尽量避开涉及某些复杂而严密的理论论述与数学推导，特别是对某些目前尚未广泛在机械工程中应用的控制理论则暂不介绍。

如果有的读者批评本书在阐述控制理论时比较粗浅而不够全面的话，那正是作者所预先估计到并且理应承担的责难。

如前所述，本书是从1978年以来几年中所编写的几个初稿，并且在这几年的教学以及试用经验基础上最后修订而成。上册共计十二章，主要是介绍古典控制理论在机械工程中的具体应用，但也考虑到逐步向现代控制理论的应用过渡，后者将主要在下册中介绍。

第一章绪论试图反复说明机械控制工程这门边缘学科的建立与发展的必要性以及它的基本含义与主要内容，特别希望通过这一章来沟通机械工程与控制工程学科之间由于专用术语及习惯方法之不同而产生的隔阂。向机械工程科学技术领域中的工作者简单介绍控制工程的基本观点与思想方法。

第二章~第九章主要介绍古典线性理论在机械工程中的应用，其中第二、三章主要向初学者扼要介绍一点有关数学、力学以及电学基础。由于篇幅有限，在具体应用中，必要时可以参考有关的书籍。第四章通过在机械系统中建立“输入”、“输出”的概念以导出机械系统的传递函数及脉冲响应函数的概念，本章与第六章频域分析是线性机械系统分析的主要方法。第五章有关机械系统的时域分析只作极简略地介绍，因为考虑到更适宜在以后下册中结合现代控制理论的应用作进一步详细地介绍。同样，尽管系统识别的方法对机械工程科学具有十分重大意义，但在本章中也只将频域的方法作扼要介绍，而时域及其它方法将在下册有关参数估计及系统识别的方法中介绍。第七章介绍稳定性的概念，这对研究机械系统的动态特性及振动、特别是自激振动提供了有力的途径。本章还针对机械系统存在内部耦合的现象提出了“内在反馈”的概念，从而说明可以应用控制理论的反馈理论研究机械系统的动态特性，尽管某些系统并没有外加的人为的反馈元件。

在机械工程系统及过程中，时延现象是一个较为普遍而复杂的问题，例如金属切削过程中的再生式振动、流体传送的时延效应等等在古典的机械工程理论中都是十分棘手的课题，但是引用控制工程的分析方法就开辟了更为有力的途径，这就是本书第八章的主要内容。本章还把一般具有分布参数的机械系统转换成时延系统进行处理，从而回避了复杂的用偏微分方程描述的分析方法。

第九章主要是向机械工程科技人员扼要介绍有关控制系统的古典设计方法——即综合与校正的试凑法。本章主要介绍了工程实际常用的较为简便的利用伯德图的试凑法。考虑到古典设计方法具有很大的局限性，并且机械控制工程并无特殊的要求，因此本章只作极简单地介绍，以后有关优化理论中再予以补充。

以上九章的部分内容，过去的六年中曾在机制专业的大学生课程中试用过，对液压及机控专业大学生，则除上述九章外还增加下面第十章、第十一章，并以第十二章作为选修部分。

第十章主要介绍应用描述函数法分析非线性机械系统，相平面法只作一般介绍。

第十一章扼要介绍采样理论以及离散系统分析理论基础，为机械工程系统及过程中抽取信息、处理数据、应用时间序列或脉冲序列和数字计算机等新技术提供了途径。

第十二章扼要介绍了随机过程基本理论以及线性滤波及预测优化理论基础，为应用统计

动力学分析研究机械工程系统以及优化理论与预测理论的应用提供了途径。

第十一、十二章试图为以后下册介绍现代控制工程在机械工程中的应用打下基础，特别是对在机械工程领域应用电子计算机等新技术提供了理论基础，因而是本书中比较重要的两章。

参加本书上册修订编写工作的同志，第一稿、第二稿以及最后一稿的工作略有变化，主要有：何钺（第十章、二稿）；杨公仆（第五、六、十二章初稿；第二章、第七章二稿）；陈康宁（第八、九章初稿；第四章及八、九章三稿）；王馨（第四、七、十一章初稿；第二、五、六、十一、十二章二稿）；万德安（第二、三、十章初稿）等五位同志。上述同志在本书修订过程中都提出过不少有益的建议，并且先后向机制及液压机控专业大学生讲过这门课。此外，还有博士研究生孔祥利同志协助整理第一章及第十一章部分。

还应当感谢1978年以后历届研究生在本书上册作为参考书时提出的宝贵意见。感谢1980年以后历届机制专业及液压机控专业大学生协助本书上册的试用教学工作。

作者非常感谢审稿人贝季瑶、陆元章二位教授，他们对本书上册提出了不少宝贵意见。

还应当感谢朱骥北同志以及西安交通大学液压及机械控制工程教研室的全体同志，他们在本书的编写、修订及出版过程中给予了不少鼓励和帮助。

应当承认，如上所述，这本书经历了较为漫长而曲折的过程，尽管进行了反复的修改、整理，然而一方面由于作者本人水平有限，另一方面还因为国内同行在控制工程科学方面发展很快，以至当本书现在出版时显得十分肤浅；远远不能符合许多关心本书的同志的期望，这是作者感到十分遗憾的事，只好留待以后有机会再进行修改补救了。欢迎同志们随时对本书缺点与错误提出批评，指正。

西安交通大学  
阳含和  
1985年2月

## 符 号 表

$s$	拉普拉斯算子	$t_p$	峰值时间
$t$	时间	$R(s)$	} 系统输入
$j$	虚数 ( $j = \sqrt{-1}$ )	$X(s)$	
$e$	自然对数的底	$C(s)$	} 系统输出
$L[ \ ]$	Laplace 变换	$Y(s)$	
$L^{-1}[ \ ]$	Laplace 反变换	$E(s)$	$s$ 域误差函数
$k$	弹簧常数	$G(s)$	传递函数
$m$	质量	$H(s)$	反馈传递函数
$J$	转动惯量	$N(s)$	干扰信号
$B$	粘性阻尼系数	$M_p$	最大过调量
$K$	系统增益	$M_r$	谐振峰值
$\omega$	频率 (rad/s)	$\omega_r$	谐振频率
$\omega_n$	系统无阻尼自然频率	$\theta$	相位角
$\omega_b$	系统截止频率	$\phi_m$	相位储备
$\omega_c$	穿越频率	$A_m$	幅值储备
$\zeta$	阻尼比	$\rho$	液体质量密度
$T$	时间常数	$\mu$	液体粘度
$\delta(t)$	单位脉冲函数	$v$	速度
$g(t)$	单位脉冲响应函数	$Q$	液体流量
$y_o(t)$	补函数	$q$	电荷
$y_i(t)$	特解函数	$i, I$	电流
$e(t)$	时域误差函数	$e, E$	电势
$e_{ss}$	稳态误差	$R$	电阻
$t_s$	调整时间	$C$	电容
$t_r$	上升时间	$L$	电感

# 目 录

前言	
第一章 绪论	1
§ 1-1 “机械控制工程”的基本含义	1
§ 1-2 机械工程系统与过程中的信息传递、 反馈以及反馈控制的概念	2
§ 1-3 机械控制工程的典型应用实例与基 本内容	5
参考文献	12
第二章 拉普拉斯变换的数学方法	14
§ 2-1 复数及复变函数	14
§ 2-2 拉氏变换及拉氏反变换的定义	15
§ 2-3 典型时间函数的拉氏变换及特性	16
§ 2-4 拉氏反变换的数学方法	25
§ 2-5 拉氏变换的应用	29
习题及参考文献	32
第三章 机械工程系统及过程数学模型 的建立	34
§ 3-1 利用机械动力学基础知识建立数学 模型	35
§ 3-2 流体动力学基础	39
§ 3-3 电网络分析基础	42
习题及参考文献	43
第四章 机械工程系统及过程的传递 函数	46
§ 4-1 传递函数与脉冲响应函数(或称权 函数)	46
§ 4-2 机械动力系统的构成及方块图	50
§ 4-3 机械系统的传递函数	56
§ 4-4 液压系统的传递函数	59
§ 4-5 机械加工过程的传递函数	61
§ 4-6 机械调速系统的传递函数	64
§ 4-7 液压流体管路传递函数——分布参 数系统	66
§ 4-8 信号流程图及梅逊公式	70
习题及参考文献	76
第五章 机械工程系统的瞬态响应与误 差分析	80
§ 5-1 时间响应	80
§ 5-2 系统误差分析	89
习题及参考文献	97
第六章 机械工程系统的频率特性	99
§ 6-1 频率特性	99
§ 6-2 系统识别	115
习题及参考文献	126
第七章 线性机械工程系统的稳定性、 自激振动及其控制	128
§ 7-1 判别线性机械系统稳定性的基本 准则	128
§ 7-2 罗斯—赫尔维茨稳定性判据	131
§ 7-3 奈魁斯特稳定性判据	136
§ 7-4 根轨迹法	152
§ 7-5 机械工程系统及过程的动态稳定性、 自激振动和内在反馈	162
习题及参考文献	173
第八章 线性时延机械工程系统的 动特性分析	176
§ 8-1 时延环节和有时延的 线性控制系统	176
§ 8-2 有时延的线性控制系统的稳定性 分析	177
§ 8-3 具有时延环节的液压伺服系统	179
§ 8-4 具有时延的气体自动调节器	182
§ 8-5 铣(镗、车)削过程的自激振动	184
§ 8-6 切入磨削过程之自激振动 及其控制	189
§ 8-7 液压阀与管道自激振动	192
习题及参考文献	197
第九章 机械工程控制系统的综合及 校正	199
§ 9-1 概述	199
§ 9-2 控制系统的性能指标及校正方式	199
§ 9-3 控制系统的增益校正	200



§ 9-4 控制系统的串联校正.....201	§ 11-3 信号复原 .....251
一、滞后校正 .....201	§ 11-4 $z$ 变换 .....253
二、超前校正 .....206	§ 11-5 反 $z$ 变换 .....257
三、滞后—超前校正环节 .....208	§ 11-6 $z$ 变换的基本定理 .....259
§ 9-5 控制系统的并联校正.....210	§ 11-7 广义 $z$ 变换 .....260
习题及参考文献 .....216	§ 11-8 卷积和与系统脉冲传递函数 .....262
<b>第十章 非线性机械工程系统的分析</b> ...217	§ 11-9 离散系统分析理论基础 .....264
§ 10-1 非线性系统的基本特征 .....217	§ 11-10 离散系统理论在机械工程中的 应用.....269
§ 10-2 描述函数法 .....220	习题及参考文献 .....297
§ 10-3 用描述函数法分析非线性系统的稳 定性 .....225	<b>第十二章 随机过程理论在机械工程 中的应用</b> .....300
§ 10-4 机械运动中的爬行与自激振动 .....229	§ 12-1 随机过程 .....300
§ 10-5 相平面分析法 .....232	§ 12-2 相关函数及其性质 .....304
§ 10-6 用相平面法分析机床工作台的 爬行现象 .....242	§ 12-3 频谱分析 .....314
习题及参考文献 .....244	§ 12-4 系统分析与最优线性滤波器 .....337
<b>第十一章 离散系统分析理论基础及其 在机械工程中的应用</b> .....247	§ 12-5 最佳预测理论在机械加工中的 应用 .....343
§ 11-1 概述 .....247	§ 12-6 机械工程系统及过程的识别 .....350
§ 11-2 采样基本理论 .....248	习题及参考文献 .....358

# 第一章 绪 论

## § 1-1 “机械控制工程”的基本含义

“机械控制工程”是一门技术科学，它是研究“控制论”在“机械工程”中的应用的科学，更确切的名称应当是“机械工程控制论”。这是一门跨“控制论”与“机械工程”技术理论之间的边缘学科。它是从1948年维纳发表“控制论——或关于在动物和机器中控制和通讯的科学”的论文〔1〕建立“控制论”这门科学以来，随着工业生产和科学技术的不断发展而形成的。

钱学森同志在他的《工程控制论》（修订版）〔3〕序言中认为“……二十世纪上半叶的三大伟绩是相对论、量子论和控制论，也许可以称它们为三项科学革命，是人类认识客观世界的三大飞跃”。控制论是第二次世界大战中在电子技术、火力控制技术、航空自动驾驶等科学技术，以及大战以后在生产自动化、高速电子计算机的实践基础上总结有关学科的成果形成的。它是既与技术科学又与基础科学紧密相关的边缘学科。三十多年的实践已经证明，它不仅具有重大的理论意义，而且对生产力的发展、生产率的提高、尖端技术的研究与尖端武器的研制，以及对社会管理的某些方面都发生了重大的影响〔3〕〔4〕〔5〕。

“控制论”首先是技术科学与生物科学相互渗透的产物，这可从维纳的“控制论”著作副标题“——或关于在动物和机器中控制和通讯的科学”得以说明。建立控制论这门科学的萌芽思想首先是维纳（数学家）与神经生理学家罗森勃吕特共同研究的成果。其后，有工程师别格罗以及其他数学家、神经解剖学家、神经生理学家参加研究讨论使之最后定型。由于控制论的一个重要中心思想“反馈控制”的概念早在1868年麦克斯威尔发表关于调速器的文章中就提出来了，维纳等为纪念这篇论文，选择“cybernetics”这个词（译作“控制论”）来命名这个利用反馈进行控制以期达到一定“目的”的（动物和机器中都共同具有的）整个理论研究领域。因为拉丁字“governor”（“调节器”）一词是希腊字“κυβερνητική”讹误引伸而来的，后者的拉丁字即为“cybernetics”（“控制论”），而实际上这个词的原意是“掌舵人”的意思，“船舶的操舵机的确是反馈机构的一种最早而且最发达的形式”〔1〕。

维纳通过研究发现，在机器系统与生命系统甚至社会及经济系统都具有一个共同特点，即通过信息的传递、加工处理和反馈来进行控制。这就是控制论的中心思想。因此，控制论在它建立后很短时期内便迅速渗透到许多科学技术领域（除生物科学外，还有许多工程科学技术及其它科学技术，如经济管理和 社会管理等），大大推动了近代科学技术的发展，并从而派生出许多新型的边缘学科。例如，生物控制论——运用控制论研究生命系统的控制与信息处理；经济控制论——研究经济计划、财政信贷等经济活动及其控制；社会控制论——运用控制论研究社会管理与社会服务等。最后，还有工程控制论——控制论与工程技术的结合。此外，还有仿生学、系统工程等等。

从控制论的形成与发展来看，它是原始于技术即从解决生产实践问题开始的，反过来又大大促进了生产技术，从而派生出“工程控制论”这一新型的技术科学。应当指出，1954年

钱学森同志发表他的专著《工程控制论》(英文版)<sup>[2]</sup>, 首先奠定了“工程控制论”的基础。

这里强调指出, 工程控制论是一门技术科学, 不是工程技术<sup>[2]</sup>, 它与“自动控制”“伺服机”等既有密切的联系又是有所区别的。前者是指导实现“自动控制”技术、“伺服机构”设计的基本理论及其发展方向的; 而后者则是运用“工程控制论”中的基本理论解决某些工程实际问题的具体技术措施, 它研究的主要是工程设计中的具体细节。应当特别指出, 工程控制论并不局限于研究自动控制及伺服机技术的基本理论, 虽然后者往往是实现前者的某些最重要的或必需的具体措施或手段, 但是它的内容、范围及所涉及的问题远比“自动控制”“伺服机”等工程技术要深刻和广泛得多。我们将看到, 即使某些非自动的, 即由人来控制的工程系统也只有服从工程控制论所指出的规律或思想方法进行控制(或操作)才能更有效、更合理地正常运转。当然, 反过来说, 工程控制论又必须受到工程实践的检验, 才能证明它们是正确的, 是有生命力的。

现代工业生产趋向于实现最佳控制, 亦即要求利用最少的能源与原材料消耗、最低成本、取得最大的经济成效、最高的生产率、最好的产品质量<sup>[5][9]</sup>。因此, 在能源、国防、运输、机械、化工、轻工等各个工业生产领域都对工程控制论提出了范围极其广大、内容极其深刻而复杂的理论性问题, 促使工程控制论不断向更深入的方向发展。正如《工程控制论》这部专著再版前言中指出: “无论学习工程控制论的读者或是研究工作者, 都至少应该熟悉一个具体领域中的工程实际问题, 这样才能对这一学科中的基本命题、方法和结论有深刻的理解”<sup>[3]</sup>, 并且也只有通过自己所熟悉的工程实践的检验, 才能证明这些命题、方法和结论是否正确, 是否有生命力。因而完全有必要也有可能建立以研究机械工程技术问题为主要对象的“机械工程控制论”或简称为“机械控制工程”这样一门技术科学。因为在工业生产以及交通运输等各个领域, 机械系统(包括流体系统)及机械生产过程是最为广泛采用的。例如, 控制(自动或非自动地)一个机械系统或刚体(例如电液振动台、机床、坦克、炮塔等等), 控制(自动或非自动地)一个机械生产过程(如切削加工、锻压加工、铸造、热处理过程等等)都是以机械工程技术为对象的控制论问题, 也就是“机械控制工程”所要研究的问题。

另一方面, 对于某些古典的机械工程问题, 例如机械振动、机械的动态特性及机构精度等等, 应用控制论的观点和思想方法有可能揭示出更深刻的本质, 并指出改进或控制它的性能的更有效途径和方法。不仅如此, 应用控制论所提供的新的更有力的理论和方法, 例如传递函数、频率特性、状态空间、最优控制理论和方法, 以及信息统计处理、预测及过滤理论、系统识别理论和方法等等, 可以帮助解决或纠正机械工程科学中过去不曾解决的或不完善的理论与实践问题。把机械工程过去停留在经验性阶段的认识提高到理论性阶段。把过去某些不能反映客观规律的纯几何观点以及静力学的、静止的、孤立的形而上学观点逐步提高到更符合客观规律的动力学观点以及系统地分析问题的辩证唯物观点。

## § 1-2 机械工程系统与过程中的信息传递、 反馈以及反馈控制的概念

控制论的一个极其重要的概念就是信息的传递、反馈以及利用反馈进行控制的概念。无论是机械工程系统(包括流体系统)和过程还是生物系统及社会经济系统都存在信息的传递

与反馈，并可利用反馈进行控制使系统按一定“目的”进行运动。在科学史上，控制论和信息论第一次把所有能表达一定含义的信号、密码、情报和消息概括为信息概念，把它列为和能量、质量同等重要的科学概念，并从量上揭示了不同系统关于信息加工与控制过程的共同规律〔9〕〔4〕。

“机械工程”是所有技术科学中发展最早、最古老的一门科学，然而引用“信息”这个概念还是比较迟的。如果不把五十年代初建立“工程控制论”时期所涉及的航天、火箭等机械系统〔2〕算在内的话，正式引用这个概念进行分析和研究问题的时间不会早于五十年代末或六十年代初，而这在其他技术科学领域中，例如电子科学、计算机科学中早已是古典的概念了。正如维纳1961年为他的《控制论》写再版前言时所说：“统计信息和控制理论的概念，对当时（指1948年第一版《控制论》发表的时候——本书作者注）传统的思想来说，不但是新奇的，也许甚至是对传统思想本身的一种冲击”。我们回顾五十年代末六十年代初的情况，在机械工程科学中也的确存在类似的状况。机械工程科学领域早期所涉及的问题主要是纯几何的、静力学的或者是达到平衡状态的稳定运动。然而，随着工业生产以及科学技术的不断发展，机械工程科学面临着许多高精度、高速度、高压、高温的复杂问题，这就必然要涉及系统或过程的动态特性（或动力学特性），瞬态过程以及具有随机过程性质的统计动力学特性等等，这就显示出机械工程科学与控制论所研究的问题的相似性。事实上，机械系统中的应力、变形、温升、几何尺寸与形状精度、表面粗糙度以及流量、压力等与电子系统用以表达其状态的电压、电流、频率等一样，也是表达机械系统或过程某一状态的信号、密码、情报或消息的信息，只不过它们是信息的不同载运介质罢了。我们观察图1-1，a)是某一液压系统的流体压力变化记录，b)是机械加工一批零件时按顺序排列的工件尺寸点图。a)与电子系统的电压信息、b)与电脉冲序列或时间序列有什么不同呢？它们同样都是包含了系统或过程的某些特性的信息，它们同样在系统或过程中以某种关系(动态的)进行传递及转换。同样，可以采用控制论和信息论处理信息的概念与方法进行处理并揭示出机械系统及过程的本质。例如，输入、输出及传递函数的概念、脉冲序列及时间序列的概念、频率特性的概念等等，以及系统识别、状态估计和预测、故障诊断的方法等等。此外，在分析研究机械系统或过程的精度（例如机构运动精度、加工精度、测量精度等）或误差时也有必要引入噪声过滤的概念以及频谱密度、白色噪声这样一些在控制论及电子工程领域早已被熟知的有关信息处理的概念和手段〔5〕〔9〕〔10〕。以上所举种种不仅对机械工程的传统观念是一个有力冲击，同时也展示了机械控制工程广阔的发展前景。

所谓信息的反馈，就是把一个系统的输出讯号（或作用）不断直接地或经过中间变换传递后全部或部分地返回再输入到系统中去。如果反馈回去的讯号（或作用）与原系统的输入讯号（或作用）的方向相反（或相位相差 $180^\circ$ ）则称为“负反馈”；如果方向或相位相同，则

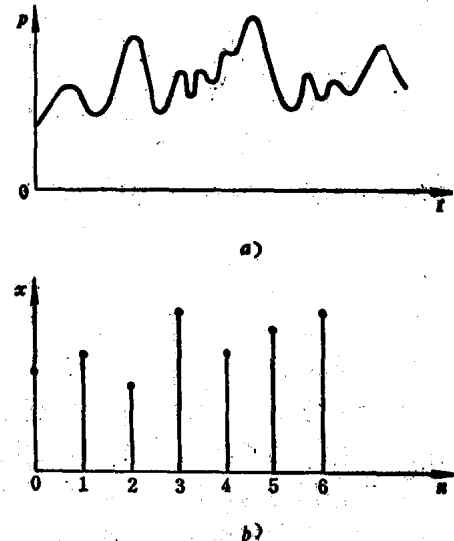


图 1-1

称之为“正反馈”。

人类最简单的活动，走路或取物都利用了反馈控制的原理以保持正常的动作。人抬起腿每走一步路，腿的位置和速度的信息不断通过人眼及腿部皮肤和神经反馈到大脑，从而保持正常的步法。人伸手取物时，手的位置与速度信息不断反馈到人脑以保证准确而适当地抓住待取之物。人若失去上述这类反馈控制作用或者反馈不正常，就会手足颤动显示病态。其它动物也是一样，并且在一切生物系统、社会及经济系统也都存在或利用着上述反馈控制的作用以维持正常的机能。

人们早就知道利用反馈控制原理设计和制造机器、仪表或其它工程系统。我国早在北宋时代（1086~1089年）就发明了具有反馈控制原理的自动调节系统——水运仪象台<sup>[3]</sup>。通常我们把具有反馈的系统称之为闭路系统。例如，我们日常使用的最古老而最简单的贮槽液面自动调节器（图1-2）就是一个简单的闭路系统。浮子测出液面实际高度  $h$  与要求高度  $H_0$  之差并推动杠杆控制进水阀门放水，一直到实际液面高  $h$  与要求液面高  $H_0$  相等时，关闭进水阀。信息作用传递关系可由图 1-3 来表示。在这里反馈信息为实际液面高  $h$ ，它与期望液面高  $H_0$  相比较形成一个闭路系统。

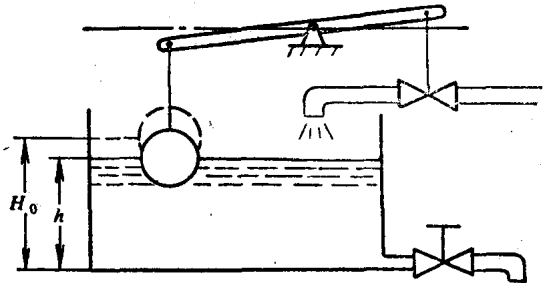


图 1-2

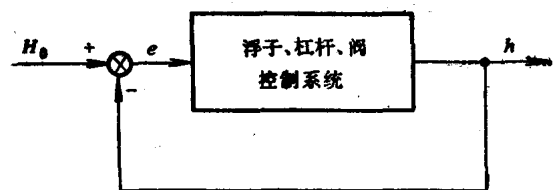


图 1-3

应当特别指出，人们往往把反馈闭路系统局限于自动控制系统，或者仅从表面现象来断定某些系统为开路（即无反馈）或闭路，这就大大限制了控制论的应用范围。我们知道，人们往往利用反馈控制原理在机械系统或过程中加上一个“人为的”反馈，从而构成一个自动控制系统。上述液面自动调节系统以及其它所谓“自动控制系统”都是人为地外加反馈。但是，在许多机械系统或过程中往往存在内在的相互偶合作用构成非人为的“内在反馈”，从而形成一个闭路系统。例如机械系统中作用力与反作用力相互偶合而形成内在反馈。又如在机械系统或过程（如切削过程）中有自激振动产生时，则必定存在内在反馈使能量在内部循环，促使振动持续进行。这样的例子举不胜举。对于很多机械系统或过程往往从表面上看是开路系统，但经过分析可以发现它们实质上都是闭路系统。但是，必须注意从动力学的而不是静力学的观点，从系统的而不是孤立的观点进行分析，才能揭示系统或过程的本质。

为了说明内在反馈的情形，观察图 1-4 的具有二个自由度的机械系统。从表面上看显然是一个开路系统，但是，当我们把它的动态微分方程列出后可知它存在内在反馈。当给予质量  $m_2$  一小位移  $x_2$  后，使质量  $m_1$  产生一定的位移  $x_1$ ，其动力方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 = k_2 x_2 \quad (1-1)$$

而质量  $m_2$  受到  $x_1$  的反作用后，动力方程为

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 = k_2 x_1 \quad (1-2)$$

信息量  $x_1$  与  $x_2$  的传递关系 (1-1) 及 (1-2) 可以表示为图 1-5 所示的闭路系统。

从这个简单的实例可以看到, 机械工程系统及过程中广泛存在着内在的或外加的反馈。有关实例我们将在下一节及本书其它有关章节中介绍。

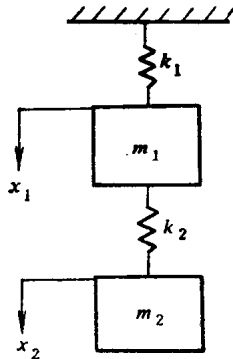


图 1-4

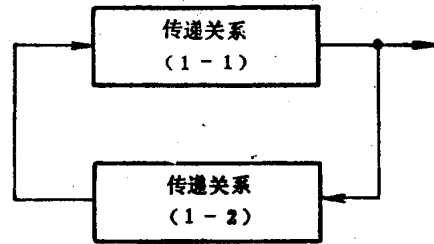


图 1-5

由于存在着反馈 (正反馈或负反馈), 闭路系统的精确度与灵敏度都比开路系统要高得多。但另一方面也孕育着不稳定的因素, 系统在一定条件下将发生持续的或扩散的振动或颤振。机械控制工程科学的一个主要内容就是运用控制论有关系统稳定性的理论研究机械工程系统与过程的运动稳定性问题。

### § 1-3 机械控制工程的典型应用实例与基本内容

在机械工程科学技术领域及生产实际中, 应用控制理论分析、研究并解决有关理论与实践的问题——即机械控制工程的实例是非常多的。

如同其它技术科学一样, 机械工程科学的主要任务之一是要掌握和了解机械工程系统或过程的内部矛盾也就是系统或状态的动态特性; 要研究其内部信息传递和变换规律以及受到外加作用时的反应。从而决定控制它们的手段和策略, 以便使之达到人们所预计的最佳状态或最理想的状态。这也正是“机械控制工程”或“机械工程控制论”的主要内容。

机械控制工程在现代科学技术及工业生产中的具体应用大致有以下几个方面。

#### 一、应用反馈控制的机械系统实例

在工农业生产及科学实验中, 应用反馈控制原理控制一个机械系统或过程, 使其按一定规律运行的实例是非常多的。控制对象可以是一个机械刚体 (例如机床工作台、振动台、炮身或火箭体等等) 也可以是一个机械过程 (例如切削过程、锻压过程、冶炼过程等等)。

例如图 1-6 为电液振动台原理图。油缸 3 根据控制系统 2 传递来的控制信息, 产生频率及振幅按一定规律的振动, 使工作台 4 作随动运动。而工作台的实际运动信息 (位置、速度和加速度等) 由测量头 1 测出, 并反馈到控制系统 2 中与输入系统的振动讯号相比较, 以保证振动工作台按所希望的要求进行运动 [16]。

图 1-7 是一台反馈控制的液压压下钢板轧机原理图。由于钢板轧制速度及精度愈来愈高, 现代化轧钢机已经由电液伺服系统代替了旧式的机械式压下机构。图中工作辊辊缝信息  $h$ , 或

钢板出口厚度信息  $h$  (或者  $h_0$  与  $h$  两者同时) 由检测元件 3 测出反馈到电液伺服系统 2 中, 并发出控制讯号驱动油缸 1, 以调节轧制辊缝  $h_0$ , 从而使钢板出口厚度  $h$  保持在要求公差范围内。

为了使上述轧钢板伺服系统能发挥其高灵敏度、高精度的优良特性, 必须应用机械控制工程有关理论对系统进行分析 and 综合[17]。

图 1-8 是一个薄膜反馈式径向静压轴承。当主轴受到负荷  $W$  后产生偏移  $e$ , 因而使下油腔压力  $p_2$  增加  $\Delta p$ , 上油腔压力  $p_1$  减少  $\Delta p$  的压力。这样, 与之相通的薄膜反馈机构的下油腔压力增加  $\Delta p$ , 上油腔压力减少  $\Delta p$ , 从而使薄膜向上变形弯曲。因此薄膜下半部高压油输入轴承的流量增加, 而上半部减少, 使轴承主轴下部油腔产生反作用力

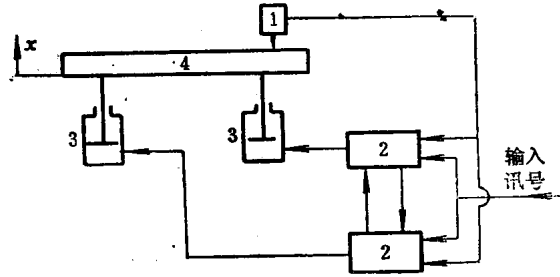


图 1-6

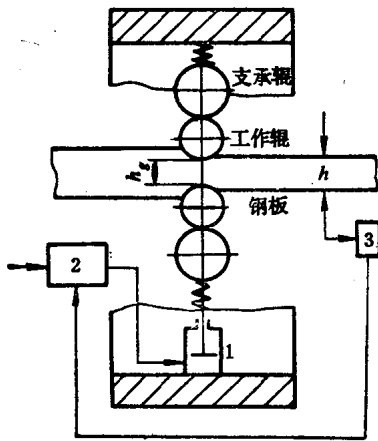


图 1-7

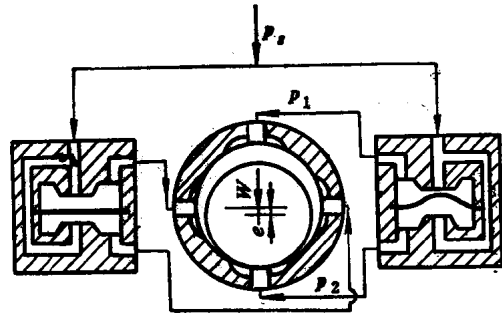


图 1-8

$R$  ( $R = 2\Delta p A_c$ ) 与负荷  $W$  相平衡以减少偏移量  $e$ , 或完全消除偏移量  $e$  (即达到无穷大刚性)。上述有关静压轴承内部信息传递关系可以由图 1-9 表示为一个闭路系统。利用控制论有关动态特性分析理论, 即可对轴承的设计与分析提供更有利的途径[12]。

**二、机械系统或过程的内在反馈实例**

对于机械工程技术领域所面临的有关机械系统的动态特性问题, 完全可以应用“控制论”有关传递函数、相平面分析或描述函数以及稳定性理论等等有力手段进行处理, 比之古典力学分析方法更为深入而方便, 这已经为广大机械工程科学技术工作者所接受。例如有关机械系统的动刚度分析或机械阻抗的分析及有关机械振动的分析等等。

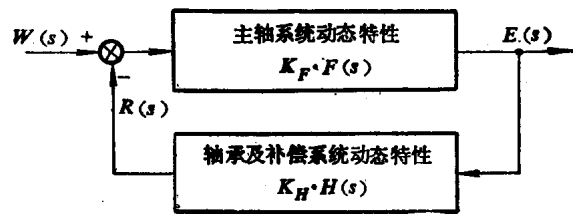


图 1-9

应当指出, 在分析过程中, 必须注意系统内部存在的信息反馈回路。这一点, 在上述静

压轴承的实例中已经可以看出来，某些表面上似乎并无反馈回路的系统，实质上存在着“内在的”反馈作用。

机械系统或过程中自激振动的产生往往是由于内在反馈所致。例如，一般机械刚体（如机床工作台或其他运动部件）在润滑不充分的导轨上运动时，（图1-10），在一定条件下会产生爬行或自激振动。这是因为刚体所受到的摩擦力  $f(\dot{x}_2)$  为如图

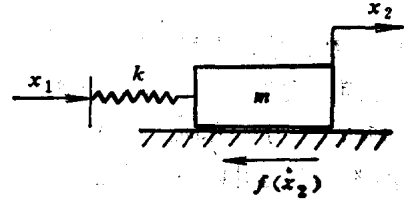


图 1-10

1-11 所示的非线性函数，刚体运动微分方程为：

$$m\ddot{x}_2 + f(\dot{x}_2) + k(x_2 - x_1) = 0 \quad (1-3)$$

可以用图 1-12 所示非线性闭路系统描述刚体运动。由本书第十章非线性系统理论分析可知，当刚体速度在负阻尼区内，将产生爬行或自激振动。

机械系统及过程中的内在反馈的存在及其影响的实例，还可以用金属切削过程的自激振动来说明（图1-13）。当刀具以名义进给量  $s$  进行切削时，由切削过程特性产生切削力  $p_y$ ，而使机床—工件系统发生变形退让  $y$ ，减少了刀具的实际进给，因此刀具实际进给（即工件实际切除量） $a = s - y$ 。上述信息传递关系可用图 1-14 闭路系统来表示。这样，对于切削过程的动态特性及切削自激振动完全可以应用控制论有关稳定性理论进行分析，并从而提出控制切削过程、抑制切削振动的途径。

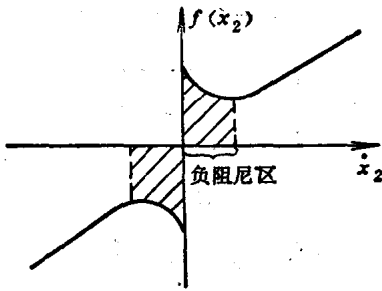


图 1-11

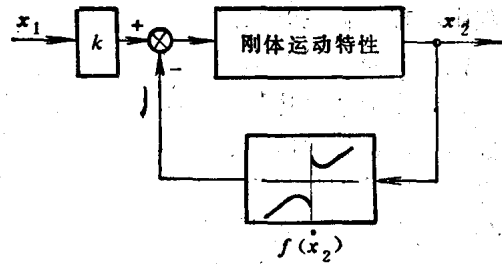


图 1-12

有关机械系统内在反馈的另一实例是液压系统中滑阀与管道系统自激振动问题<sup>[15]</sup>。如图 1-15 所示，当滑阀有一开口量  $x$  时，滑阀阀芯上受到的作用力除对中弹簧力  $f_s = -2kx$  外，还存在稳态液动力  $f_v$ ，其中

$$f_v = -k_v x \quad (1-4)$$

$$k_v = c p_s \quad (1-5)$$

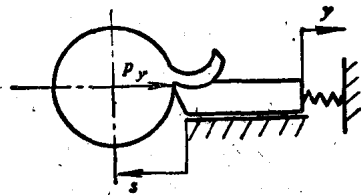


图 1-13

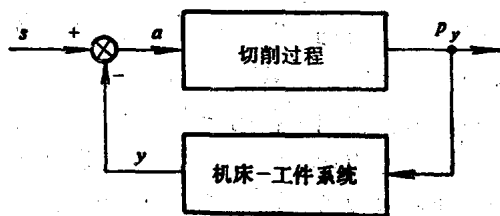


图 1-14



式中  $c$  为比例系数。式 (1-4) 中负号表示  $f_v$  与  $x$  方向相反, 且与滑阀开口量  $x$  及供油压力  $p_s$  成比例。这样, 滑阀阀芯动力方程可写成

$$m\ddot{x} + B\dot{x} = f_s + f_v \quad (1-6)$$

或

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + 2kx = f_s \quad (1-7)$$

式中  $B$  为粘性阻尼系数。这样, 当油压  $p_s$  发生波动时, 由式 (1-4) 及 (1-5) 可知液动力  $f_v$  随之发生波动, 从而使阀开口  $x$  产生波动, 见式 (1-7)。另一方面, 在阀开口量发生波动后, 油压  $p_s$  亦随之发生升降波动, 这是由油压管道动态特性所决定的。上述有关滑阀信息传递关系可由图 1-16 所示闭路系统表示。显然, 由于内在反馈作用, 在一定条件下将产生自激振动。设法切断内在反馈或采取其它措施, 即可抑制或控制这种振动<sup>[15]</sup>。

可以肯定, 任何产生自激振动的机械系统或过程, 必然存在有内在反馈。机械控制工程为分析研究并解决这一复杂动态问题提供了有效的方法, 更详细的分析将在本书有关章节中介绍。

### 三、信息的处理、预测及滤波理论的应用实例

如本节中的一、二所述, 在机械系统及过程的运动过程中, 普遍存在有信息的传递、变换以及反馈的事实。机械工程科学技术问题, 归根结底就是从机械系统或过程中抽取表达某一定状态的信息 (位置、速度、加速度, 流体的压力、流量, 或振动的频率、振幅等等) 进行处理, 以揭示系统或过程的内部规律,

并寻找控制它们的方法或决策。因此, 在这个意义上, 任何机械工程问题都可归结为控制工程有关信息处理及控制的问题。

不难理解, 在机械系统或过程中除存在表达其实际状态的有用信息外, 还不可避免混杂有外界干扰, 或称之为“噪声”。应当指出, 所谓“噪声”是从电讯工程中或物理的声学中借用的控制工程术语, 它是相对于待分析的有用信息而言的。例如在分析金属切削加工过程中, 机床所产生的尺寸误差信息, 不可避免地附加有被加工工件原有毛坯尺寸误差信息。后者相对于前者而言就是“噪声”, 因为它污染了我们所要分析的有用信息——机床加工误差 (或称机床加工精度)。反之, 如果我们要研究的是毛坯尺寸误差对加工精度的影响, 那么机床误差就是“噪声”了。

此外, 在抽取 (或测量) 机械系统或过程的信息时, 还不可避免会在抽取或测量中混杂有测量噪声——即测量误差。

因此, 机械控制工程的一个重要内容, 就是要根据机械系统或过程的信息的统计特性, 把有用信息与噪声 (利用统计方法进行处理) 分离出来, 或者称之为“滤波”<sup>[2][9][5][10]</sup>。

如果我们不仅希望抽取反应现在状态的信息, 并且要求抽取系统或过程未来某一时刻的状态的信息, 则称之为“预测”<sup>[5][10]</sup>。

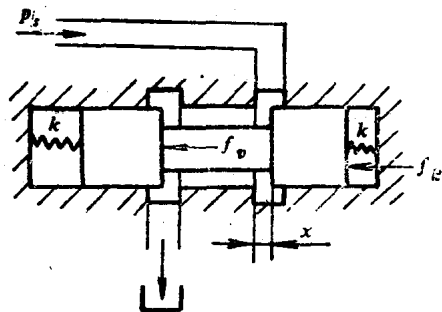


图 1-15

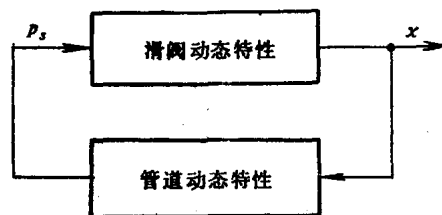


图 1-16