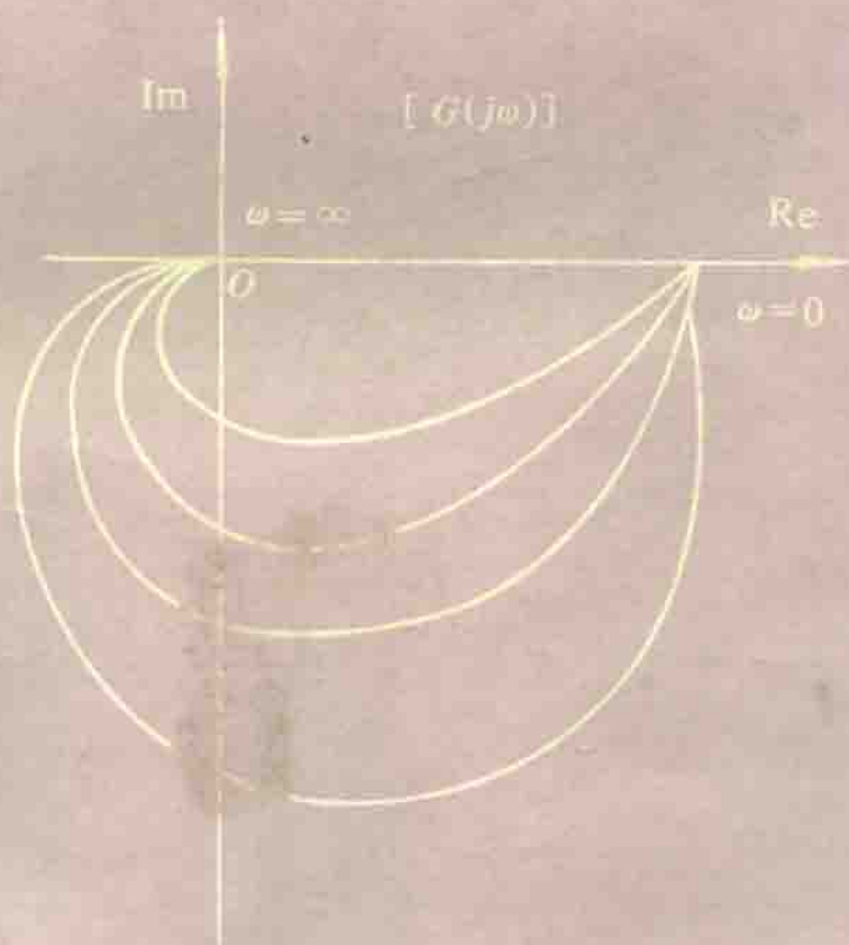


机械工程控制基础

杨叔子 杨克冲 主编



华中工学院出版社

机械程控制基础

杨叔子 杨克冲 主编

杨叔子 杨克冲 编
刘经燕 王治藩

华中工学院出版社

内 容 简 介

本书是为适应机械制造工艺及设备专业的本科大学生、函授大学生、夜大学生及工程技术人员学习机械控制的基础理论的需要而编写的，着重讨论了经典控制理论中的频域法，对系统辨识问题也作了较系统的阐述。本书内容包括机械控制的基本概念、传递函数、时间响应分析、频率特性分析、系统稳定性判据、系统性能与校正、系统辨识等。

本书力求在讲清机械控制的基本概念的前提下，更多地结合机械工程实际，以帮助有关读者逐步学会应用控制理论来解决问题。

本书可供机械工程类专业，特别是机械制造工程类专业的大学学生作为教材，也可供有关教师与科技人员参考。

杨叔子 杨克冲 主编

责任编辑 黎秋萍

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

湖北新华书店发行 各地新华书店经售

江汉印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：14.75 字数：359,000

1984年3月第一版 1984年3月第一次印刷

印数：1—15,000

统一书号：15255—026 定价：1.75元

前 言

本书是为高等院校的机械工程类专业，特别是机械制造工程专业类的“机械工程控制基础”（或称“控制工程基础”）这门课编写的教材。

由于现代科学技术的迅速发展，将控制理论应用于机械工程的重要性日益明显，这就导致了“机械工程控制论”这门学科的产生与发展。实际上，这门学科既是一门广义的系统动力学，又是一种合乎唯物辩证法的方法论，它对启迪与发展人们的思维与智力有很大的作用。作为一门课程，它是机械工程类专业的重要理论基础之一。

本书作为一门技术基础课的教材，力求在阐明机械工程控制论的基本概念、基本知识与基本方法的基础上，紧密结合机械工程实际，特别是结合机械制造工程实际，以便沟通与加强数理基础与专业知识之间的联系。

本书着重阐述了经典控制理论，特别是其中的频域法，即在系统的传递函数的基础上，着重阐述了系统的频率特性及应用。同时，考虑到系统数学模型的重要性与实际系统的复杂性，特地编写了“系统辨识”一章。在这章中，除了详细介绍了经典控制理论中的系统辨识方法以外，还以相当篇幅介绍了现代控制理论的系统辨识中的差分模型与数理统计学的时间序列中的ARMA模型。本书吸取了我院有关同志与编者在教学与科研中的成果。本书不包括数学基础部分（例如“积分变换”），因为这些数学基础已见诸我国统编的工程数学教材。本书的教学时数为40~60学时。

本书是在我院1982年为机械制造工艺与设备专业编写的《机械工程控制基础》讲义的基础上改写的。我们对原讲义的体系、内容与论述方法作了不少变动与修改。原讲义是由杨叔子、胡庆超、杨克冲、刘经燕同志集体讨论，分工执笔写成的，胡庆超同志承担了大部分的编写工作。本书是由杨叔子、杨克冲、刘经燕、王治藩同志集体讨论，分工执笔写成的（第一章由杨叔子同志执笔，第二、七章由王治藩同志执笔，第三、四章由刘经燕同志执笔，第五、六章由杨克冲同志执笔），最后由杨叔子、杨克冲两同志定稿。实际上，本书是我院有关同志的集体劳动成果，胡庆超、师汉民、熊有伦等同志在开设与改进本门课程中，在本书的成书过程中，都付出了辛勤的劳动。编者对这些同志表示衷心的感谢。

值得提出的是，1983年7月举行的有16所高等院校参加的中南地区高校机械工程控制研究会对本书的编写起了很大的鼓励与促进作用。编者对这次会议的与会者，特别是对武汉工学院的宋尔涛同志、容一鸣同志，深表感谢。还应提出，在开设本门课程中，我们得到了西安交通大学阳含和、王馨等同志多方面的帮助，得到我院自动控制系费奇、邓聚龙等同志的许多帮助。在原讲义的编写中，我们主要参考了哈尔滨工业大学李友善同志的《自动控制原理》（上册）一书与西安交通大学阳含和同志、清华大学张伯鹏同志为他们本校有关专业编写的《控制工程基础》的讲义初稿。在此一并深表感谢。

限于编者的水平，加上本课程是新开设的课程，许多问题还有待探讨，因此，本书中的谬误与不妥之处在所难免。编者切望读者不吝指教，提出批评建议，我们由衷地欢迎与感激。

编者

1984年2月于华中工学院

主要符号说明

m 质量	ω_0 相位交接频率
c 粘性阻尼系数	ω_c 增益交接频率或剪切频率
k 弹簧刚度	ω_b 截止频率
R 电阻	ω_r 谐振频率
C 电容	ξ 阻尼比
L 电感	M_r 相对谐振峰值
K 增益或放大系数	M_p 超调量
$f(t)$ 外力	K_g 增益裕度
$L[\]$ Laplace变换	γ 相位裕度
$F[\]$ Fourier变换	u 一般表示电压
$x_i(t)$ 输入(激励)	i 一般表示电流
$X_i(s)$ $L\{x_i(t)\}$	$e(t)$ 偏差
$x_o(t)$ 输出(响应)	$e(s)$ $L\{e(t)\}$
$X_o(s)$ $L\{x_o(t)\}$	$e(t)$ 误差
$X_i(j\omega)$ $F\{x_i(t)\}$	$E(s)$ $L\{e(t)\}$
$X_o(j\omega)$ $F\{x_o(t)\}$	φ, θ 一般表示相位
$\delta(t)$ 单位脉冲函数	j 不作下标时表示 $\sqrt{-1}$
$u(t)$ 单位阶跃函数	
$r(t)$ 单位斜坡函数	
$w(t)$ 单位脉冲响应函数	
$G(s)$ 传递函数或前向通道传递函数	
$G(j\omega)$ 频率特性	
$H(s)$ 反馈回路传递函数	
$H(j\omega)$ 反馈回路频率特性	
$B(s)$ 闭环系统反馈信号	
$G_K(s)$ 系统的开环传递函数	
$G_B(s)$ 系统的闭环传递函数	
$G_K(j\omega)$ 系统的开环频率特性	
$G_B(j\omega)$ 系统的闭环频率特性	
$n(t)$ 干扰信号	
$N(s)$ $L\{n(t)\}$	
n 单独使用时一般表示转速	
ω 角速度	
T 时间常数或时间	
τ 延迟时间或时间	
ω_n 无阻尼固有频率	
ω_d 有阻尼固有频率	
ω_T 转角频率	

目 录

前言

主要符号说明

第一章 绪论

- §1.1 机械工程控制论的研究对象与任务····· (1)
- §1.2 反馈····· (3)
- §1.3 系统的几种分类····· (6)
- §1.4 机械制造的发展与控制理论的应用····· (9)
- §1.5 控制理论发展的简单回顾····· (11)
- §1.6 本课程的特点与学习方法····· 12)

第二章 传递函数

- §2.1 系统的微分方程及其列写····· (14)
- §2.2 传递函数····· (20)
- §2.3 典型环节的传递函数····· (26)
- §2.4 系统的方框图及其简化····· (38)
- §2.5 物理系统传递函数推导的典型实例····· (42)
- §2.6 相似原理····· (47)

第三章 时间响应分析

- §3.1 时间响应及其组成····· (54)
- §3.2 典型输入信号····· (56)
- §3.3 一阶系统····· (57)
- §3.4 二阶系统····· (60)
- §3.5 高阶系统的响应分析····· (71)
- §3.6 δ 函数在时间响应中的作用····· (74)

第四章 频率特性分析

- §4.1 频率特性概述····· (80)
- §4.2 典型环节的频率特性的极坐标图 (Nyquist图)····· (86)
- §4.3 Nyquist图的一般形状····· (93)
- §4.4 典型环节频率特性的对数坐标图 (Bode图)····· (95)
- §4.5 对数幅-相图 (Nichols图)····· (109)
- §4.6 闭环频率特性曲线的绘制····· (111)
- §4.7 频率特性的特征量····· (118)
- §4.8 最小相位系统和非最小相位系统····· (119)
- §4.9 频率特性和时间响应····· (120)

第五章 系统的稳定性

- §5.1 系统稳定性的初步概念····· (125)
- §5.2 Routh (劳斯) 稳定判据····· (130)
- §5.3 Nyquist (乃奎斯特) 稳定判据····· (137)
- §5.4 系统的相对稳定性····· (155)

第六章 系统的性能分析与校正

§6.1	系统的性能指标	(163)
§6.2	时域的性能指标	(164)
§6.3	频域的性能指标	(174)
§6.4	综合性能指标(误差准则)	(176)
§6.5	系统的校正	(178)
§6.6	相位超前校正	(179)
§6.7	相位滞后校正	(185)
§6.8	相位滞后-超前校正	(190)
§6.9	反馈校正	(193)
§6.10	顺馈校正(或称顺馈补偿)	(197)

第七章 系统辨识

§7.1	单位脉冲响应的估计	(202)
§7.2	Bode图与Nyquist图的估计	(205)
§7.3	频率特性的离散Fourier变换求法	(211)
§7.4	系统辨识的差分方程法	(217)
§7.5	机械系统辨识实例	(225)

主要参考文献

后记

第一章 绪 论

机械制造业是一个重要的工业部门。马克思曾指出：“大工业必须掌握它特有的生产资料，即机器的本身，必须用机器生产机器。这样，大工业才建立起与自己相适应的技术基础，才得以自立。”因此，发展机械制造业是发展国民经济的一项关键性的战略措施。为了更快地发展机械制造业，就必须研究机械制造技术的现状与动向。

当前，机械制造技术发展的一个明显而主要的动向是越来越广泛而深刻地引入了控制理论。尽管从历史的发展上看，这还是初步的，从技术的总体上看，这还是局部的，但从发展的现状与前途上看，这却是最活跃、最富有生命力的。

为什么控制理论刚一进入机械制造领域，就表现得如此富有生命力，并获得了引人注目的进展呢？从根本上来讲，其原因是由于当代生产与科学技术的发展同这个领域内人们的传统思想方法与由此所采用的分析与解决问题的方式之间发生了尖锐的矛盾，而控制理论以它本身固有的辩证方法顺应了广大机械制造工作者渴望冲破形而上学的思想方法，推动这一领域的生产与学科向前发展的愿望。

控制理论不仅是一门极为重要的学科，而且也是科学方法论之一。控制理论在工程技术领域中体现为工程控制论，在机械工程（当然包括机械制造）领域中体现为机械工程控制论。机械工程控制论是一门新兴学科，大量的问题，从概念到方法，从定义到公式，从理论的应用到经验的总结，都急需进一步探讨。本书主要是涉及经典控制理论的主要内容及其应用。

§ 1.1 机械工程控制论的研究对象与任务

工程控制论实质上是研究工程技术中广义系统的动力学问题。具体地说，它研究的是，工程技术中的广义系统在一定的外界条件（即输入或激励，包括外加控制与外加干扰）作用下，从系统的一定的初始状态出发，所经历的由其内部的固有特性（即由系统的结构与参数所决定的特性）所决定的整个动态历程；这一系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

现考察一个十分熟悉的例子。图1.1.1与图1.1.2分别表示同一个质量-阻尼-弹簧这一单自由度系统在不同输入时的情况。图中， m ， c ， k 分别表示质量，粘性阻尼系数，弹簧刚度。对图1.1.1所示的系统而言，质量受外力 $f(t)$ 的作用，质量位移为 $y(t)$ ，系统的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} m \ddot{y}(t) + c \dot{y}(t) + ky(t) &= f(t), \\ y(0) &= y_0, \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1.1)$$

对图1.1.2所示的系统而言，支座受位移 $x(t)$ 的作用，质量位移为 $y(t)$ ，系统的动力学方程为

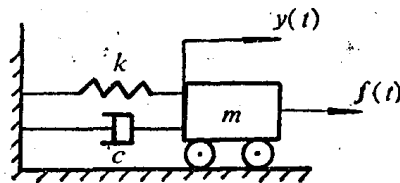


图 1.1.1

$$\left. \begin{aligned} m \ddot{y}(t) + c \dot{y}(t) + ky(t) &= c \dot{x}(t) + kx(t), \\ y(0) = y_0, \dot{y}(0) &= \dot{y}_0. \end{aligned} \right\} (1.1.2)$$

$mp^2 + cp + k$ 为方程(1.1.1)与方程(1.1.2)左端的算子($p = \frac{d}{dt}$),它由系统本身的结构与参数所决定,反映了与外界无关的系统本身的固有特性。

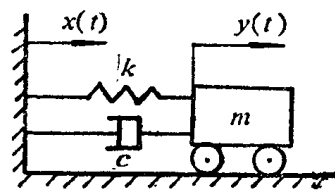


图 1.1.2

1与 $cp + k$ 分别为方程(1.1.1)与方程(1.1.2)右端的算子,反映了系统与外界的关系。

$y(0)$ 与 $\dot{y}(0)$ 分别为质量的初位移与初速度,这就是在输入作用于系统之前系统的初始状态。显然,系统在任何瞬间的情况完全可以由质量的位移 $y(t)$ 与速度 $\dot{y}(t)$ 这两个变动着的状态(即状态变量)来刻画,因为这两个状态变量描绘了系统的动态历程。

在上例中, $f(t)$ 与 $x(t)$ 称为系统的输入(或激励), $y(t)$ 称为系统的输出(或系统对输入的响应)。显然, $y(t)$ 是由系统的初始状态、系统的固有特性、系统与输入之间的关系以及输入所决定的。

对上例,需要研究的问题可归纳为以下三类:

第一类,当系统(即 m, c, k)与输入 $f(t), x(t)$ 已知时,求输出 $y(t)$ 。这个问题属理论力学的动力学研究范畴;

第二类,当系统(即 m, c, k)与输出 $y(t)$ 已知时,求输入 $f(t), x(t)$;

第三类,当系统的输入 $f(t), x(t)$ 与输出 $y(t)$ 已知时,求系统的 m, c, k 。

研究这三类问题就是研究系统的动态历程,研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

对于一般线性系统,其动力学方程可用高阶线性微分方程表示如下:

$$\left. \begin{aligned} a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 \dot{y} + a_0 y &= b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + b_1 \dot{x} + b_0 x; \\ y(0) = y_0, \dot{y}(0) = \dot{y}_0, \dots, y^{(n-1)}(0) &= y_0^{(n-1)}, \end{aligned} \right\} (1.1.3)$$

式中, $a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$ 为方程(1.1.3)左端的算子,它反映了系统本身的固有特性;

$b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0$ 为方程右端的算子,它反映了系统与外界之间的关系;
 $y(0), \dot{y}(0), \dots, y^{(n-1)}(0)$ 为系统在受外界作用前的初始状态, $y(t), \dot{y}(t), \dots, y^{(n-1)}(t)$ 为刻画系统动态历程的状态变量, $y(t)$ 取为系统的输出;

$x(t)$ 为系统的输入。

在此应指出:系统的初始状态也可视为一种特殊的输入,即“初始输入”或“初始激励”。其实,输入的结果是改变系统的状态,并使系统的状态不断改变,这是力学中所讲的强迫运动;而当系统的初始状态不为零时,即使无输入,系统的状态也会不断改变,这是力学中所讲的自由运动。从使系统的状态不断发生改变这点来看,将系统的初始状态视为“初始输入”,是十分合理的。

由上面的简单介绍可知,工程控制论所要研究的问题在机械制造领域中是极为广泛的。例如,在现代测试技术中,应充分注意到,某一仪器应调整到什么状态方能保证在给定的外界条件下,获得精确的测量结果。在这里,调整到一定状态的仪器本身是系统,外界条件是输

入，测量结果是输出。显然，这里所研究的问题是系统及其输入、输出三者之间的动态关系。又例如，在机床数控技术中，所要解决的问题是，数控机床接受指令后，机床的有关运动应符合要求，这仍然是前述三者之间的动态关系问题。

正如前述，所研究的系统是广义系统。这个系统可大可小，可繁可简，甚至可“实”可“虚”，完全由研究的需要而定。譬如说，当研究某一机器制造厂应如何调整产品生产以适应市场变化的需要时，那么，此厂就是一个广义系统，市场情况是输入，产品生产情况是输出；当研究此厂的某台机床在切削加工过程中的动力学问题时，切削加工过程本身是一广义系统；当研究此台机床所加工的工件的某些质量指标时，这一工件本身可作为一广义系统；而当研究此台机床的操作者在加工过程中的作用时，操作者本身或操作者的思维等则可作为一广义系统。

由以上分析可知，就系统及其输入、输出三者之间的动态关系而言（如图1.1.3所示），机械工程控制论的内容大致可归纳为如下五个方面：

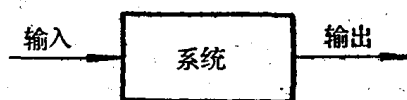


图 1.1.3

(1) 当系统已定、输入已知时，求出系统的输出（响应），并通过输出来研究系统本身的有关问题，此即系统分析问题；

(2) 当系统已定时，确定输入，且所确定的输入应使得输出尽可能符合给定的最佳要求，此即最优控制问题；

(3) 当输入已知时，确定系统，且所确定的系统应使得输出尽可能符合给定的最佳要求，此即最优设计问题；

(4) 当输出已知时，确定系统，以识别输入或输入中的有关信息，此即滤波与预测问题；

(5) 当输入与输出均已知时，求出系统的结构与参数，即建立系统的数学模型，此即系统识别或系统辨识问题。

从本质上看，问题(1)至(3)都是已知系统与输入求输出，问题(4)是已知系统与输出求输入，问题(5)是已知输入与输出求系统。

本书主要是以经典控制理论来研究问题(1)。同时，本书也以适当篇幅来研究问题(5)。因为系统的数学模型是研究系统的极为重要的基础与前提，而对工程技术中的大量系统，主要只能用试验方法（包括观测方法）获得系统的输入与输出，然后建立数学模型来进行研究。“系统辨识”就是解决这一问题的。

§1.2 反 馈

本节将阐明机械工程控制论中一个最基本、最重要的概念——反馈。系统之所以有动态历程，系统及其输入、输出之间之所以有动态关系，就是由于系统本身有着信息的反馈。

系统就是元素按一定规律（当然包括统计规律）的集合。系统，一是要有元素，二是元素之间要有按一定规律的联系。联系就是信息的交换。系统之所以表现出处于运动状态之中，就是因为元素之间有着联系，有着信息交换；就是因为刻划系统情况的状态变量之间有着联系，有着信息交换。正是这些信息的交换，才使状态变量发生变化，形成系统的动态历

程，形成系统及其输入、输出三者之间的动态关系。这正是“外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用”这一唯物辩证观点的体现。系统本身信息的反馈就是系统处于运动状态的内因。

以图1.1.1所示的单自由度系统为例，现将方程(1.1.1)改写为如下三种形式：

$$ky(t) = f(t) - m\ddot{y}(t) - c\dot{y}(t); \quad (1.2.1)$$

$$c\dot{y}(t) = f(t) - m\ddot{y}(t) - ky(t); \quad (1.2.2)$$

$$m\ddot{y}(t) = f(t) - c\dot{y}(t) - ky(t); \quad (1.2.3)$$

并按上三式作出能表示出系统本身信息交换的方框图〔见图1.2.1(a)、(b)、(c)〕。

图1.2.1(a)表示了式(1.2.1)。\$f(t)\$作用在弹簧\$k\$上，弹簧产生位移\$y(t)\$；而\$y(t)\$又使质量\$m\$与阻尼\$c\$运动，产生惯性力\$-m\ddot{y}(t)\$与阻尼力\$-c\dot{y}(t)\$；反馈作用到弹簧\$k\$上，使弹簧位移产生相应的变化。这里，质量\$m\$对位移\$y(t)\$起着二阶微分反馈的作用；阻尼\$c\$则起着一阶微分反馈的作用。这种信息交换反复循环，使系统处于运动状态。图1.2.1(b)与图1.2.1(c)分别表示了式(1.2.2)与式(1.2.3)。对它们也可作类似的分析。显然，微分方程中输出函数及其导函数项之间的关系就是系统状态变量间的反馈关系。

若将方程(1.1.1)改写为状态方程，即一阶微分方程组，则可进一步阐明反馈的物理本质。

若令\$y_1 = y, y_2 = \dot{y}_1 = \dot{y}\$，则方程(1.1.1)可化为

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= -\frac{k}{m}y_1 - \frac{c}{m}y_2 + \frac{f}{m}. \end{aligned} \right\} \quad (1.2.4)$$

将上式改写为矩阵形式：

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix} f. \quad (1.2.5)$$

如令

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}, \quad \dot{Y} = \begin{pmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{pmatrix}, \quad (1.2.6)$$

则式(1.2.5)化为

$$\dot{Y} = AY + Bf.$$

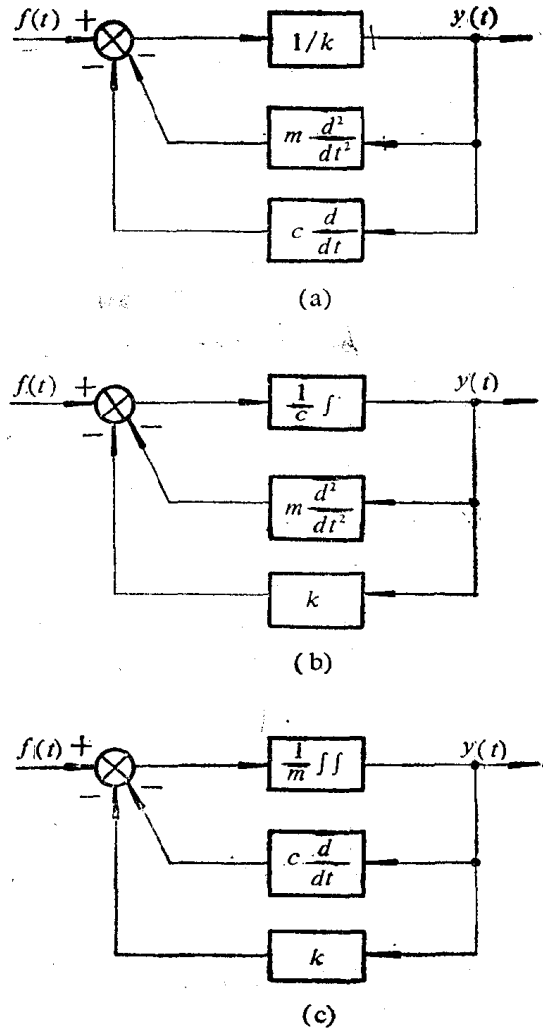


图 1.2.1

式(1.2.6)就是现代控制理论中的状态方程。 y_1 、 y_2 (即位移、速度)这两个状态变量用来刻画系统的动态情况。

现将状态方程表示为方框图1.2.2。从图中可清楚看出：对于输出 y_1 而言， y_2 就是输入；对于输出 y_2 而言， y_1 通过 k/m 这一环节而作为输入之一。这就是 y_1 与 y_2 间信息的交互作用。另外， y_2 通过 c/m 这一环节而作为其自身的输入之一，这就是 y_2 本身信息的交互作用。这些都是反馈。在这一单自由度系统中，这种信息交换过程是以能量为载体，并伴随着能量过程的。 y_1 与 y_2 的交互作用就是弹簧所具有的位能 $\frac{1}{2}ky_1^2$ 与质量所具有的动能 $\frac{1}{2}my_2^2$ 之间的相互转换； y_2 本身的交互作用就是阻尼消耗能量的过程。如图所示，质量受力 f 这一输入的作用，产生加速度 f/m 这一输出，经过瞬间的积分，产生速度 y_2 ，改变质量所具有的动能。这时， y_2 一方面将经过瞬间的积分，引起位移 y_1 ，改变弹簧所具有的位能；一方面由于阻尼的作用直接引起能量的消耗。这两方面又都有反馈作用，因为它们改变质量的加速度，改变质量的动能。如果没有外力的作用，没有能量的输入， y_1 、 y_2 将不断减少，形成减幅振荡这种动态历程。

状态方程的系数矩阵 A 表达了系统的结构与参数，表达了系统的固有特性。矩阵 A 的主对角元素反映了状态变量本身的交互作用情况。非主对角元素反映了状态变量之间的交互作用情况。

在工程技术领域中，越来越多地采用自动控制系统。在这种系统中，往往有着“反馈控

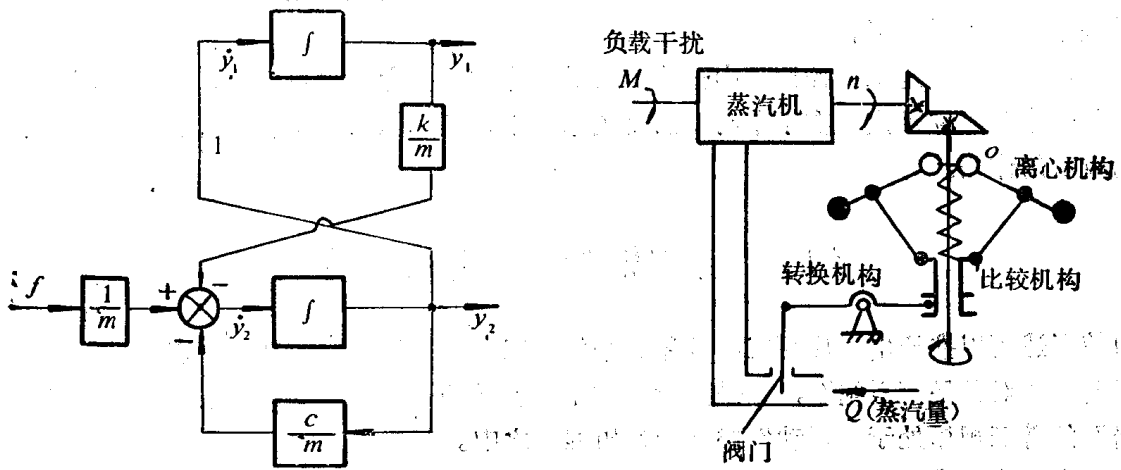
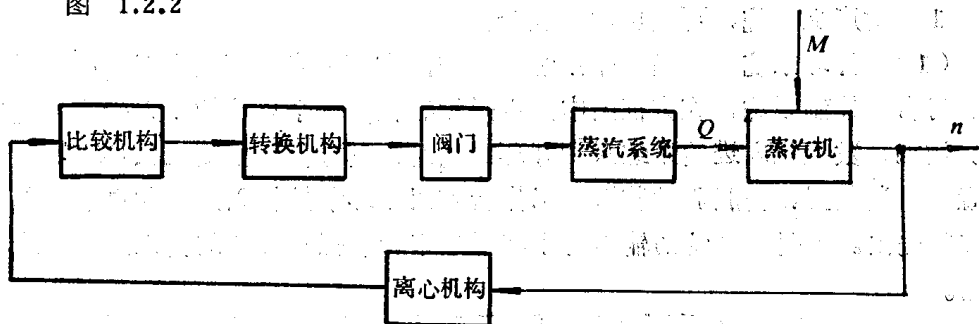


图 1.2.2



(b)

图 1.2.3

制”。这里的“反馈控制”与上例所讲的“反馈”不尽相同。现以蒸汽机离心调速器调速问题（这是机械动力学的典型问题之一）为例来加以说明。如图1.2.3所示，由离心机构、比较机构、转换机构等组成的离心调速器，调节进入蒸汽机的蒸汽量 Q ，使得蒸汽机在工作负荷（输出轴扭矩 M ）不同时，输出（输出轴转速 n ）保持不变。例如，当外界负荷变化使 M 减小时，由于蒸汽带入的功率未变，输出轴转速 n 上升，而 n 一上升，离心机构就以 o 点为支点进一步张开，使比较机构的滑套上升，通过转换机构的杠杆，调节阀的阀门下降，减小 Q ，使 n 下降并逐渐趋向原值。反之，当外界负荷变化使 M 加大时， n 下降，此时，离心调速器可使 n 回升并逐渐趋向原值。显然，蒸汽机输出轴的转速 n 通过离心调速器调节蒸汽量 Q ，进而调节 n 本身。这就是转速 n 本身的交互作用或反馈。因此，从蒸汽机与离心调速器所组成的系统来看，这种反馈同上例中的反馈在本质上都是信息交换，没有区别。但从具体形式上看，则有两点不同：

（1）对于蒸汽机而言，离心调速器是附加的反馈控制装置，其目的在于抵抗由于负荷变化这一干扰引起的输出轴转速的变化。因此，有时这种反馈称为外反馈，而上例中的反馈称为内反馈。这个“外”是对蒸汽机这一被控对象而言的，若对蒸汽机与离心调速器所组成的系统而言，仍然是“内”。

（2）对于本例而言，蒸汽带来的能量主要用来带动负荷，而通过离心调速器进行反馈控制的能量是很少的，这与图1.2.1所示的反馈回路的情况不同。一般讲来，在自动控制系统中，流经反馈回路的能量同用来驱动工作机构或工作对象的能量相比是很少的；但在一般物理系统中，就不尽然了。

综上所述，反馈是工程控制论中一个具有关键作用的概念，也可以说，是研究广义系统动力学的一个基本立足点。在下节与以后有关章节中，还可以看到反馈在自动控制系统中具有极为重要的作用。

§1.3 系统的几种分类

由前所述可以推论出，应用工程控制论来解决工程技术问题时的基本观点有二，一是要承认所研究的对象是“系统”，二是要承认这个系统按照“外因是变化的条件，内因是变化的根据”的辩证规律处于“运动”或“动态历程”之中。

为研究、分析或综合问题方便起见，可对有关系统从不同角度加以分类。

1. 对广义系统，可按反馈情况分为：

（1）开环系统——当一个系统以所需的方框图表示而没有反馈回路时，称之为开环系统。对自动控制系统，在方框图中，更是没有任何一个环节的输入受到系统输出的反馈作用。例如，数控机床进给系统采用开环系统时，其方框图如图1.3.1所示。在此系统中，输入装置、控制装置、伺服驱动装置和工作台这四个环节的输入的变化自然会影响工作台位置即系统的输出。但是，系统的输出并不能反过来影响任一环节的输入，因为这里没有任何反馈回路。



图 1.3.1

(2) 闭环系统——当一个系统以所需的方框图表示而存在反馈回路时，称之为闭环系统。对自动控制系统，在方框图中，任何一个环节的输入都可以受到系统输出的反馈作用。如果控制装置的输入受到输出的反馈作用时，该系统就称为全闭环系统，或简称为闭环系统。例如，数控机床进给系统采用闭环系统时，其方框图如图1.3.2所示。系统的输出通过由检测装置构成的反馈回路后，也成为控制装置的输入之一。显然，系统的输出同控制装置的输入有交互作用，因而影响到驱动装置与工作台的输入。

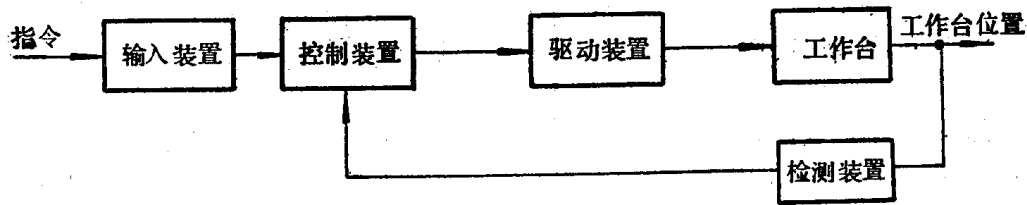


图 1.3.2

其实，在图1.2.3所示的由蒸汽机与离心调速器组成的系统中，离心机构就是检测装置，对输出转速 n 进行检测；比较机构与转换机构就是控制装置，对作为能量源的蒸汽进行流量控制。

正因为闭环系统的输出可作为反馈信息来改变有关环节的输入，进而改变输出的本身，以获得高精度的输出，所以，大量的自动控制系统都采用闭环系统。

2. 对自动控制系统还可按输出变化规律分为：

(1) 自动调节系统——在外界干扰作用下，系统的输出仍能基本保持为常量的系统。例如，蒸汽机与离心调速器系统就是自动调节系统，它基本上能保持输出转速不变。又如如图1.3.3所示的恒温调节系统也是自动调节系统，室温为其输出。当恒温室受到某种干扰致使室温偏离给定值时，热敏感元件将发生作用，接通电路，开动调温装置，直至室温回到给定值时为止。显然，这类系统是闭环系统，其输入即为与输出给定值相应的某物理量；在蒸汽机与离心调速器系统中是比较机构的套筒的调整位置，在恒温调节系统中是热敏感元件的调整状态。

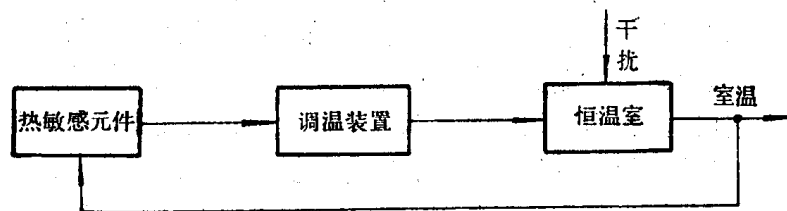


图 1.3.3

(2) 随动系统——在外界条件作用下，系统的输出能相应于输入在广阔范围内按任意规律变化的系统。例如，炮瞄雷达系统就是随动系统。飞机的位置是输入，高射炮的指向是输出，高射炮的指向随飞机位置的变动而变动。又如，电液伺服马达、液压仿形刀架等都是这类系统。如图1.3.4所示的单边随动阀控制的液压仿形刀架，当工件靠模形状使杠杆的触头向左运动时，杠杆机构就带动随动阀向右运动，随动阀与阀体(也是刀架)之间的阀口增大，右油腔压力下降，阀体向左运动；当工件靠模形状使杠杆的触头在弹簧作用下向右运动时，随动阀向左运动，阀体向右运动；在这两种情况下，阀体的运动带动杠杆机构，将使阀口大小趋向复原，此即阀体跟随工件靠模形状而运动。显然，工件靠模形状是输入，刀架仿形运

动是输出，阀体本身（即油缸体、刀架本身）构成反馈回路，系统是闭环的。

(3) 程序控制系统——
 在外界条件作用下，系统的输出按预定程序变化的系统。例如，图1.3.1与图1.3.2所示的数控机床进给系统就是程序控制系统。显然，程序控制系统可以是开环系统，也可以是闭环系统。

由上可知，一个闭环的自动控制系统主要有这样的四个部分：被控对象（如机床工作台、蒸汽机、恒温室、仿形刀架本身）、检测装置（如工作台位置检测装置、离心机构、热

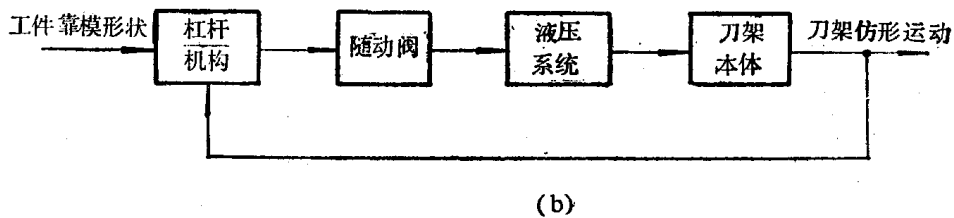
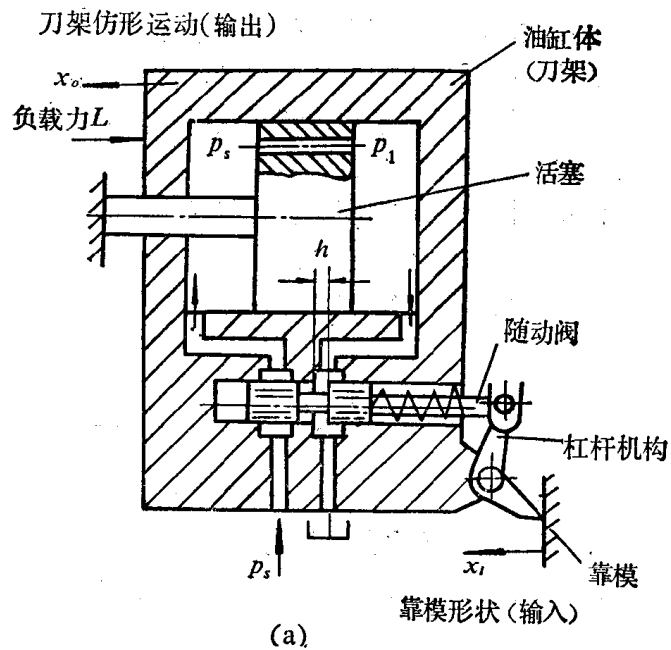


图 1.3.4

敏感元件、杠杆机构）、控制装置（如数控装置、套筒比较机构、热敏感元件、杠杆与随动阀机构）、执行装置（如工作台驱动装置、蒸汽系统、调温装置、液压系统）。当然，有时有的装置可一兼两用。闭环自动控制系统的特点是，利用输入信息与反馈至输入处的信息之间的偏差对系统的输出进行控制。说具体一点就是，检测装置将检测到的系统的输出加以处理，然后通过反馈回路，作为反馈信息送入控制装置或比较装置，同输入信息（工作台运动指令、蒸汽机规定转速、恒温室规定温度、工件靠模形状）进行比较，其偏差就是控制装置或比较装置的输出，此输出用作执行装置的输入，它通过控制执行装置的输出来控制被控对象，使其按一定的规律运动。显然，这里的反馈作用就是力图减小反馈信息与输入信息之间的偏差，以期尽可能获得所希望的输出。因为只要偏差存在，系统的输出就要受到偏差的校正。偏差越大，校正作用越强；偏差越小，校正作用越弱，直至偏差趋向最小。这就是闭环自动控制系统中的反馈控制的作用。

其实，在自然界，在人类社会，在日常生活中，也存在大量的自动控制系统。人就是一个极其复杂而又极其完备的自动控制系统：以体温作为输出，人就是一个自动调节系统；以人追捕某一对象的行动为输出，人就是一个随动系统；以人按计划办事的行动为输出，人就是一个程序控制系统。人的触觉、视觉、听觉、嗅觉和味觉等感觉器官都是检测装置，人的大脑是中枢控制装置，人的有关器官是执行装置，人的神经系统传递信息，起着联系各装置

的回路作用。以人作为一个自动控制系统，执行装置的有关器官一般也是被控对象。

但是，不论是什么系统，从本质上讲，都是元素按一定规律的集合，都可以用广义系统动力学的方法加以研究。

§ 1.4 机械制造的发展与控制理论的应用

人类文明是从制造第一把石刀开始的。与此同时，也就开始了“制造工艺过程”，开始了对制造工艺过程的“控制”。这时，对劳动着的原始人而言，手是执行装置，用以操作生产工具——石刀，感觉器官是检测装置，感受着制造过程中的各种信息，人脑是中枢控制装置，对所获得的信息进行分析、比较，作出判断、决策，如图1.4.1所示。由此可见，即使在极为原始的制造工艺过程中，也已经有了执行、检测、控制诸环节，它们构成一个闭环的自动控制系统。在制造工艺不断发展的过程中，一个明显的特点是，人逐步从对制造过程诸环节的直接参与中“解脱”出来，也就是，首先从加工（执行）中，其次从检测中，最后是从直接的控制中解脱出来。伴随这一解脱过程的是制造过程赖以进行的基础由本能与经验逐步转移到理性与科学上来。就是说，制造过程发展的历史也是人们对制造过程规律性的认识逐步深化的历史。这一认识发展的主要线索是，从对制造过程片面的局部的认识发展到系统的认识，从对制造过程的每一环节只作为一个孤立的环节来认识到作为一个大系统中的子系统来认识，从对制造过程与每一个环节静态的定性的认识到动态的定量的认识。下面以切削加工的制造过程为例来回顾其发展史。

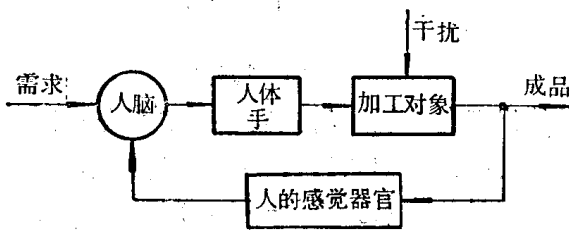


图 1.4.1

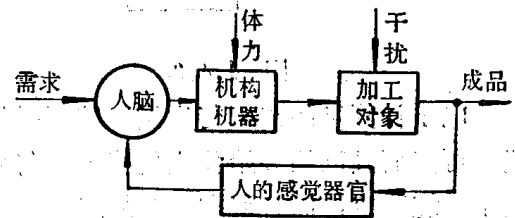


图 1.4.2

材料的发展、冶铜炼铁的发明、金属工具的出现，使得工具与加工对象之间的相互作用强度剧增，人手直接作为执行装置已难于使金属工具充分发挥作用，难于承受如此强度的作用。因而产生了机构、机器。这样，人脑所作的判断与决策才得以很好地实现。如图1.4.2所示，机构、机器作为一个环节加入了加工过程的这一闭环系统。工具的金属化，加上机构、机器的运用，使得工具与加工对象之间的相互作用强度更为剧增，因而加工过程的动态性能更多地表现了出来。

蒸汽机的发明、电力的应用、能源的革命，直接解放了人的体力，加快了机器的工作速度与强度，达到了以人的体力作为动力源时不可比拟的程度。工具的发展、机床的发展、加工方法的发展，进一步暴露出加工过程中一系列有待于研究的问题。而生产的发展水平也为研究这些问题提供了可能的技术手段。例如，切削过程中的切削力、切削热、刀具磨损等以及机床零件部件的变形、振动、磨损等等现象和问题都要求得到解释和解决。从1769年与1775年英国先后制造出在直径上加工误差为10mm与1mm的汽缸镗床以及从1789年英国

Rumford对加工炮身的切削过程中的切削力与切削热进行探讨以来，人们对金属切削过程及其装备进行了大量的试验研究与理论分析，积累了丰富的资料，建立了金属切削加工这门学科。可是，在本世纪五十年代以前，这些试验与分析基本上是属于静态的、孤立因素的、定性的和非随机性的。因此，不能完善地解释、解决切削过程中许多现象与问题。

刀具材料与机床结构的进一步发展，产品质量的进一步提高，使切削过程的动态特性问题更为突出了。电气技术、电子技术和自动检测装置的采用，都部分地取代了人的控制作用。如图1.4.3所示，检测装置成为了加工过程这一闭环系统中的一个环节。同时，液压、电气随动技术与其他先进技术也相继应用于切削加工领域。这时，一系列的系动力学问题突出地摆在面前：切削过程是否稳定？检测结果是否可靠？机床特性与切削过程特性之间有什么关系？机床热变形规律如何？刀具在高温高速下的真实工作状况如何？砂轮究竟是怎样进行磨削的？……以切削过程的自激振动为例，从本世纪四十年代至今，对此已进行了大量的试验研究与理论分析，提出了自激振动的多种机理，建立了不少数学模型，研究了各种消振措施。但是，目前还远未建立起合乎实际的切削过程的动态数学模型，自激振动问题也没得到根本解决。

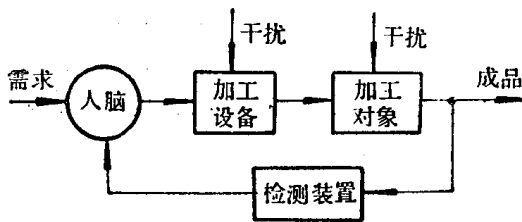


图 1.4.3

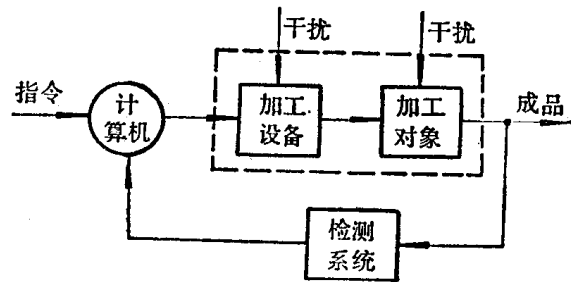


图 1.4.4

电子计算机的出现与发展，特别是微处理机的出现与发展，给人们提供了强大的技术手段，可能而且已经开始使人间接地参与对加工过程的控制，如图1.4.4所示。这时不仅要求整个系统稳定，而且要求整个加工过程实现所预期的最优指标。这样一来，就涉及到每个环节与整个系统的动态性能问题。于是，将控制理论与计算机技术相结合来研究每个环节与整个系统就必不可少。对一台设备如此，对一条生产线如此，对整个生产过程更应如此。控制理论、计算机技术同机械制造技术相结合，还赋予有关设备以不同程度的“人工智能”；数控机床不仅可以按程序加工，而且还可根据加工情况自行调整结构与参数，进行适应控制；生产线不仅可以完全自动，而且还可以根据供销情况自行调整产品，进行“柔性生产”。

应指出，上面所讲的只是加工过程。其实，正如 § 1.1中所分析的那样，对产品生产而言，广义系统动力学还应该包括整个生产的组织与管理，因为整个生产组织与生产管理同生产过程一起，组成了一个不可分割的制造系统，这是一个道道地地的动态系统，现代制造工艺的概念正是建立在研究这样一个系统的动态观点之基础上的。这点正是用控制理论来研究机械制造领域中的问题的极为重要的一个方面，乃至是具有决定性意义的一个方面，但这已远远超出本书的范围。

目前，控制理论在机械制造领域中应用最为活跃的有下面的几个主要方面。

(1) 在机械制造过程自动化方面，现代生产向机械制造过程的自动化提出了越来越