

机械控制工程基础

冯淑华 林国重 唐承统 编著



● 北京理工大学出版社 ●

机械控制工程基础

冯淑华 林国重 唐承统 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书是为机械工程类专业的本科大学生、函授大学生、夜大学生学习“控制工程基础”课程而编写的教材。内容包括机械控制工程的基本概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析法、控制系统的频率响应法、线性控制系统的特性设计方法、非线性控制系统的分析方法以及机械系统辨识等。为便于教与学，书中各章后面都附有与教材内容紧密配合的习题。

本书在讲清控制工程基本概念的前提下，力求结合机械工程实际，以帮助读者逐步学会应用控制理论来解决机械工程中的实际问题。因此，本书不仅可作为机械类专业学生的教材，而且还可作为机械工程技术人员的参考书。

206/5

机械控制工程基础

冯淑华 林国重 唐承统 编著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京理工大学出版社印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 32 开本 13 印张 336 千字

1991 年 3 月第一版 1991 年 3 月第一次印刷

ISBN 7-81013-392-6/TP·27

印数：1-5500 册

定价：4.25 元

前 言

随着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,从而导致了“机械控制工程”这门学科的发展。近年来,机械工程领域的许多新技术,如加工过程中的动态仿真与优化;设备的数字控制、自适应控制、柔性制造系统、无人化工厂及设计、制造、管理一体化的集成生产;工业机器人、智能机械等的研究与应用;产品的自动测量和检验;部件及产品的自动装配;计算机辅助设计、辅助制造、辅助实验及辅助管理等等,都是控制理论与计算机技术、机械工程技术等相互结合、相互渗透的产物。这些新技术的出现与发展,预示了机械工业今后的发展趋势,也使人们进一步认识到学习与掌握控制理论、计算机技术对应用与开发机械工程中的新技术的重要性。

本书作为一门技术基础课教材,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。

本书是在冯淑华同志所编的《机械控制工程》一书基础上编写的。全书共分七章,其中第一章机械控制工程的一般概念、第四章频率响应法、第六章非线性控制系统及附录由冯淑华编写;第三章时域分析法、第五章线性反馈控制系统的特性设计由林国重编写;第二章数学模型、第七章机械系统辨识由唐承统编写。全书由冯淑华统稿。

本书承北京理工大学徐和生教授仔细审阅,提出了很多宝贵意见,编者特此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中可能存在误漏欠妥之处,竭诚欢迎读者批评指正。

编者

1989. 6. 23

目 录

第一章 机械控制工程的一般概念	(1)
§ 1-1 引言.....	(1)
§ 1-2 反馈控制原理与反馈控制系统的组成.....	(3)
§ 1-3 自动控制系统的分类.....	(10)
§ 1-4 对反馈控制系统的基本要求.....	(13)
习题.....	(18)
第二章 数学模型	(21)
§ 2-1 微分方程.....	(21)
§ 2-2 小偏差线性化.....	(29)
§ 2-3 传递函数.....	(32)
§ 2-4 结构图.....	(42)
§ 2-5 信号流程图.....	(57)
§ 2-6 状态变量表达式与传递矩阵.....	(62)
习题.....	(76)
第三章 时域分析法	(81)
§ 3-1 控制系统的稳定性分析.....	(81)
§ 3-2 控制系统的过渡过程.....	(98)
§ 3-3 系统对任意输入信号的时间响应.....	(125)
§ 3-4 稳态误差.....	(128)
习题.....	(155)
第四章 频率响应法	(162)
§ 4-1 频率特性的基本概念.....	(162)
§ 4-2 典型环节的频率特性.....	(170)
§ 4-3 开环系统的频率特性.....	(186)
§ 4-4 最小和非最小相位系统.....	(196)

§4-5 奈魁斯特稳定判据.....	(200)
§4-6 切削过程稳定性分析.....	(209)
§4-7 系统的相对稳定性.....	(214)
§4-8 闭环频率特性曲线的绘制.....	(221)
§4-9 频率响应与时间响应的关系.....	(230)
§4-10 利用频率特性求稳态误差.....	(244)
习题.....	(246)

第五章 线性反馈控制系统的特性设计..... (256)

§5-1 概述.....	(256)
§5-2 相位超前校正.....	(259)
§5-3 相位滞后校正.....	(267)
§5-4 串联滞后—超前校正.....	(275)
§5-5 反馈校正.....	(284)
§5-6 顺馈校正.....	(294)
习题.....	(298)

第六章 非线性控制系统..... (301)

§6-1 机械系统中常见的非线性.....	(301)
§6-2 非线性系统的特点和分析.....	(304)
§6-3 相平面分析法.....	(307)
§6-4 描述函数分析法.....	(328)
习题.....	(343)

第七章 机械系统辨识..... (347)

§7-1 系统辨识的基本概念.....	(347)
§7-2 模型参数的最小二乘估计.....	(350)
§7-3 系统辨识的频率特性法.....	(358)
§7-4 系统脉冲响应函数的辨识.....	(361)
§7-5 系统辨识的差分方程法.....	(365)
习题.....	(377)

附录 I 积分变换.....	(378)
----------------	-------

附录 II 复数与复变函数.....	(405)
--------------------	-------

参考资料.....	(409)
-----------	-------

第一章 机械控制工程的一般概念

§ 1-1 引 言

控制理论起源于对蒸汽机转速控制的研究。为调节蒸汽机的转速，瓦特于 1788 年发明了离心调速器。该调速器的工作原理如图 1-1 所示。如果由于负载增加，蒸汽机转速下降，则离心振子 1 下降，滑套 2 将通过杠杆 3 使蒸汽阀门开大，使蒸汽供给量增加，从而使蒸汽机转速上升。反之若负载减小，蒸汽机转速

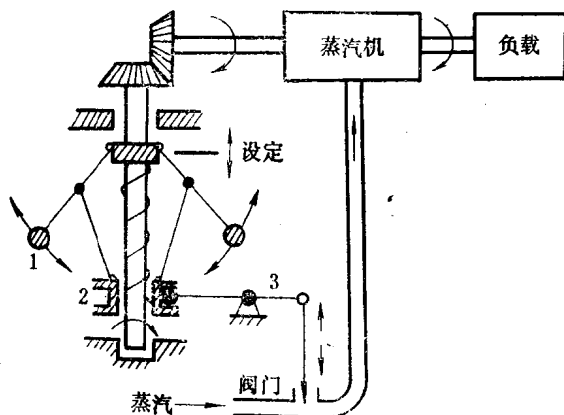


图 1-1

上升，则离心调速器可使转速下降。这样，离心调速器可自动地抵制负载的变化，使转速保持在某一给定范围之内。可以说，这是最早的自动反馈控制系统。在该系统中，若使速度恢复较快，就要加强反馈效果（如，即使速度有微小变化也使供汽量的变化较大），但这样一来，就会出现速度反复变化频繁的振荡现象。

在反馈控制系统中，振荡是经常出现的现象。为此，科学家们做了大量的研究。劳斯在 1877 年，霍尔维茨在 1895 年独立地提出判断系统稳定性的代数判据，开始用数学方法对反馈控制系统进行稳定性分析，使自动控制技术前进了一大步。进入二十世纪后，随着自动控制技术的发展，对控制理论的研究也不断取得新成果。1932 年奈魁斯特在研究负反馈放大器时，提出了基于频率特性的奈魁斯特判据，该判据奠定了频率法控制理论的基础。波德继承了奈魁斯特的研究方法，并把它发展到系统设计中。这些理论，在第二次世界大战期间被用于开发高射火炮位置控制、雷达天线跟踪、飞机自动驾驶仪及导弹制导等系统。与此相应，控制理论进一步发展。1948 年，维纳所著《控制论》的出版，标志着这门学科的正式诞生。

第二次世界大战后，控制理论在民用工业中得到进一步应用。例如，在化工、炼油、冶金等部门，实现了对过程的控制，解决了压力、温度、流量与化学成分的控制问题。到 50 年代中期，以反馈控制为中心的理论体系基本形成。一般把这一时期以前形成的理论称为经典控制论。

经典控制论是在复数域中以传递函数概念为基础的理论体系。主要研究单输入—单输出定常系统的分析与设计。

50 年代末，由于导弹制导、航天、航海、航空技术的发展需要和电子计算机技术的成熟，控制理论发展到一个新的阶段，出现了现代控制论。

现代控制论是在时间域中以状态变量概念为基础的理论体系。主要研究具有高性能、高精度的多输入—多输出系统的分析与设计，系统可以是线性的或非线性的、定常的或时变的、连续的或离散的、确定型的或随机型的。目前，现代控制理论正向大系统理论和人工智能理论等方面深入发展。

由上述可知，控制理论系由经典控制论和现代控制论两部分组成。

现代化工业生产的主要方向是探求最大的效率、最低成本、

最高产品质量、最低能耗及最大可靠性等最佳状态。对于机械系统和过程（如生产过程、切削过程、锻压、焊接及热处理过程等）也要求最佳控制。因此，控制理论在机械系统以及机械工业生产中，得到了广泛的应用，从而形成了一门新型科学“机械工程控制论”或称“机械控制工程”（Mechanical Engineering Cybernetics 或 Mechanical Control Engineering）。就系统及其输入、输出三者的动态关系而言，机械工程控制论的内容大致可分为以下几个方面：

（1）当系统已定，输入已知时，求系统的输出响应，并通过输出研究系统的各种性能，这是系统分析问题；

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

（3）当输入已知时，确定系统，且所确定的系统应使输出尽可能满足最佳指标，这是最优设计问题；

（4）当输入与输出均已知时，求系统的结构和参数，即建立系统的数学模型，这是系统辨识问题；

（5）当输出已知时，确定系统，以识别输入或输入中的有关信息，这是滤波与预测问题。

由于学时所限，本书主要介绍经典控制理论。对上述内容，书中没有涉及的部分，请读者参看其他有关书籍。

§ 1-2 反馈控制原理与反馈控制系统的组成

一、反馈控制原理

反馈控制原理是控制论的基本原理，反馈是控制论中一个非常重要的概念。下面以司机驾驶汽车过程中控制车速为例，说明反馈与反馈控制概念。

在开车过程中，司机用眼睛观察转速表上的实际车速并由大脑将实际车速与希望车速进行比较，大脑根据比较后的偏差对脚发出指令，控制油门踏板，从而使实际车速与希望车速一致。在

这里，人与车构成了一个系统。在该系统中，眼睛将实际车速这一信息送入大脑并与大脑中储存的希望车速信息进行比较，这一过程就是信息反馈过程。

在控制理论中，将希望的车速称为该系统的输入量，将实际车速称为该系统的输出量。上述控制过程可用图 1-2 所示方块

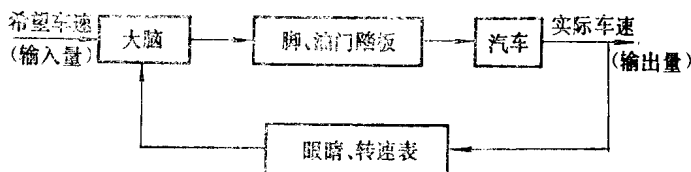


图 1-2

图表示。通常，把输出量返回到输入端并与输入量比较的过程称为反馈。反馈包括正反馈和负反馈。若反馈信号是与输入信号相减而使偏差值愈来愈小，则称负反馈；反之，则称正反馈。显然图 1-2 所示系统中的反馈为负反馈。该系统的控制过程是利用输出量与输入量之间的偏差进行控制并最后消除这一偏差的过程。

在图 1-2 所示系统中，人直接参与了反馈控制过程，因此这是一个人工反馈控制系统。在自动控制系统中，反馈是用自动控制元件完成的。现以工作台位置控制系统和工作台速度控制系统为例，说明自动控制系统的控制过程。

图 1-3 所示为工作台位置控制系统。该系统由指令电位器、反馈电位器、放大器、伺服电机、齿轮减速器、滚珠丝杠及工作台组成，其功用是控制工作台位置按指令电位器给出的规律变化。工作原理如下。

通过指令电位器的滑动触点给出工作台的位置指令 x_r ，并转换为控制电压 u_r 。被控制工作台的位移 x_o 由反馈电位器检测，并转换为反馈电压 u_o 。两电位器接成桥式电路。当工作台位置 x_o 与给定位置 x_r 有偏差时，桥式电路的输出电压为 $\Delta u = u_r - u_o$ 。

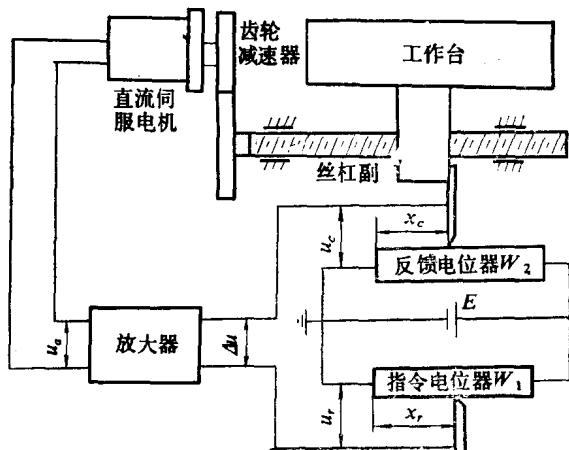


图 1-3

设开始时指令电位器和反馈电位器滑动触点都处于左端，即 $x_r = x_c = 0$ ，则 $\Delta u = u_r - u_c = 0$ ，此时，放大器无输出，直流伺服电机不转，工作台静止不动，系统处于平衡状态。

当给出位置指令 x_r 时，在工作台改变位置之前的瞬间， $x_c = 0$ ， $u_c = 0$ ，则电桥输出为 $\Delta u = u_r - u_c = u_r - 0 = u_r$ ，该偏差电压经放大器放大后控制直流伺服电机转动，直流伺服电机通过齿轮减速器和滚珠丝杠驱动工作台右移。随着工作台的移动，工作台实际位置与给定位置之间的偏差逐渐减小，即偏差电压 Δu 逐渐减小。当反馈电位器滑动触点的位置与给定位置一致，即输出完全复现输入时，电桥平衡，偏差电压 $\Delta u = 0$ ，伺服电机停转，工作台停止在由指令电位器给定的位置上，系统进入新的平衡状态。当给出反向指令时，偏差电压极性相反，伺服电机反转，工作台左移，当工作台移至给定位置时，系统再次进入平衡状态。如果指令电位器滑动触点的位置不断改变，则工作台位置也跟着不断变化。该系统的控制过程可用图 1-4 所示方块图表示。

由系统上述工作过程可知，为了使输出量复现输入量，系统

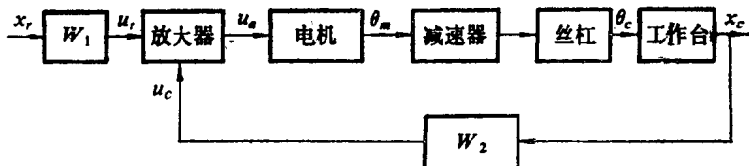


图 1-4

通过反馈电位器不断地对输出量进行检测并返回到输入端与输入量进行比较得出偏差信号，再利用所得偏差信号控制系统运动，以便随时消除偏差。从而实现了工作台位置按指令电位器给定规律变化的目的。

图 1-5 所示为工作台速度控制系统。该系统由指令电位器、

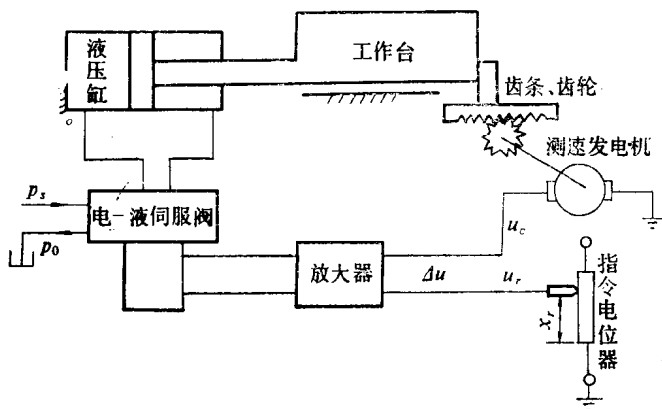


图 1-5

放大器、电-液伺服阀、液压缸、工作台、齿条齿轮副、测速发电机组成，其功能是控制工作台速度为某一恒值。

图 1-5 所示系统中，电-液伺服阀输出油液流量的大小和液流方向分别由电液伺服阀的输入电流大小和方向决定。改变电-液伺服阀输入电流的大小和方向，便可改变工作台运动速度和方向。工作台运动速度由测速装置（该装置由齿条、齿轮和测速发电

机组成,测速发电机的输出电压与输入转速成正比)检测并转换为电压 u_c , u_c 与给定电压 V_r 比较,其偏差电压为 $\Delta u = u_r - u_c$ 。

当工作台运动速度为给定速度 v_0 时,测速发电机输出电压为 u_{c0} ,此时偏差电压为 $\Delta u_0 = u_r - u_{c0}$,放大器输出电流为 i_0 ,电-液伺服阀输出流量为 Q_0 ,该流量是保持工作台运动速度 V_0 所必需的。此时系统的工作状态为平衡工作状态。在系统工作过程中,如果由于负载、油温或其他因素变化引起速度波动,则 $u_c \neq u_{c0}$ 。若工作台运动速度 V 大于给定速度 V_0 ,则 $u_c > u_{c0}$,因而 $\Delta u = u_r - u_c < \Delta u_0$,于是放大器输出电流 i 减小,从而使电-液伺服阀输出油液流量减小,工作台运动速度 V 下降,当工作台运动速度 v 等于给定速度 V_0 时,系统恢复平衡工作状态;反之,如果某因素使工作台速度下降小于给定速度 v_0 时,则 $u_c < u_{c0}$,因而 $\Delta u = u_r - u_c > \Delta u_0$,于是放大器输出电流加大,工作台运动速度上升,直至达到 V_0 ,系统恢复平衡状态。该系统的方块图如图 1-6 所示。

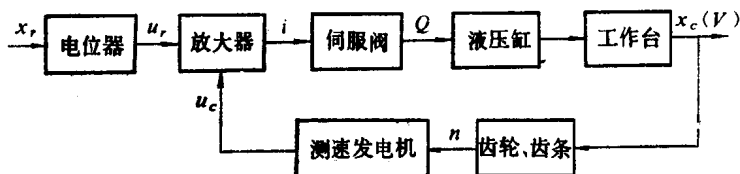


图 1-6

由以上各例可知,虽然构成各反馈控制系统的元件不同,系统的功用也各不相同,但反馈控制系统的工作原理都是相同的,即都是按负反馈控制原理进行工作的。负反馈控制是一个利用偏差进行控制并最后消除偏差的控制过程。

二、反馈控制系统的组成

相同的工作原理决定了反馈控制系统具有类似的构成,决定了在不同的反馈控制系统中存在着功能相同的元件。图 1-7 为按

照元件在控制系统中的功能画成的反馈控制系统的一般形式方块图。由图可知，反馈控制系统由下面一些基本元件（或装置）组成。

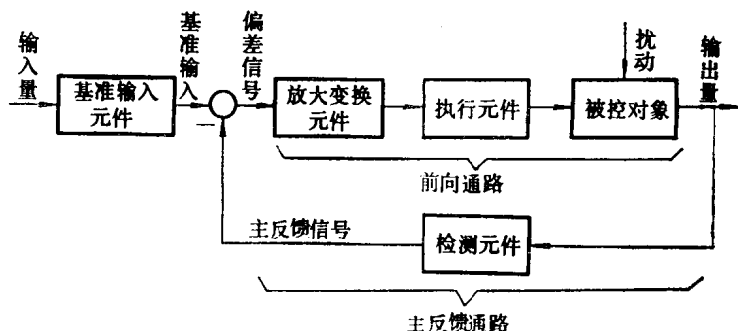


图 1-7

(1) 基准输入元件：产生基准输入信号，如图 1-3 和图 1-5 中的指令电位器。

(2) 检测元件：对系统输出量进行测量，产生主反馈信号，也称为反馈元件，如图 1-3 中的反馈电位器。

(3) 比较元件：用以比较基准输入信号和主反馈信号，给出偏差（误差）信号，起信号综合作用。这个作用往往是由基准输入元件和检测元件组成的误差检测器或由综合电路来实现。图 1-3 中的电桥就是一个比较元件。

(4) 放大变换元件：对微弱的偏差信号进行放大和变换，输出足够功率要求的物理量，如图 1-3 和图 1-5 中的放大器和图 1-5 中的电-液伺服阀。

(5) 执行元件：根据放大后的偏差信号，对被控对象执行控制任务，使输出量与希望值趋于一致。如图 1-3 中的直流伺服电机和图 1-5 中的液压缸。

(6) 被控对象：控制系统需要进行控制的对象，可以是一个装置，也可以是一个过程或系统。如图 1-3 和图 1-5 中的工作台。

在图 1-7 中, 信号传递方向是单向不可逆的, 这是由元件的物理特性所决定的。图中的“—”号表示输入信号与反馈信号相减, 即负反馈 (若图中标出的为“+”号, 则表示正反馈)。

信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传递路径称为前向通路; 系统输出量经由测量装置 (反馈元件) 到达输入端所经过的路径称为主反馈通路; 前向通路与主反馈通路一起构成主回路。此外有些系统还有局部反馈回路。如图 1-8 (a) 所示数控机床工作台位置控制系统中就有局部反馈回路, 该局部反馈回路是为提高系统性能而设置的。图 1-8 (b) 是该系统方块图。只有一个反馈回路的系统, 称为单回路系统, 有两个以上反馈回路的系统, 称为多回路系统。

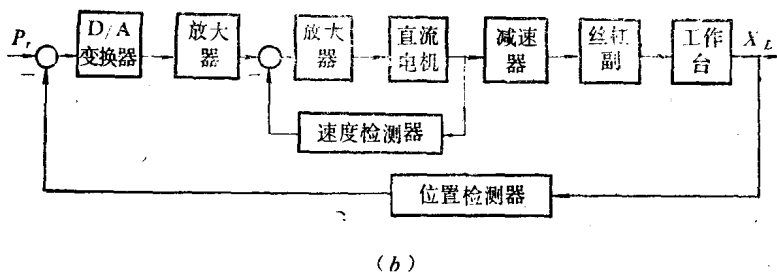
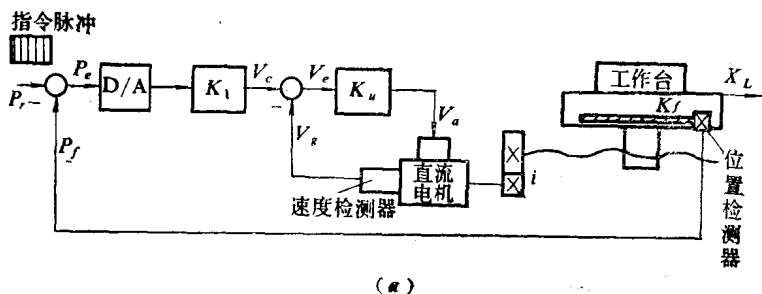


图 1-8

三、常用的名词术语

(1) 输入量(目标值): 作为目标从反馈系统之外给予的物理量。

(2) 基准输入: 基准输入时, 元件的输出与输入量有一定函数关系。

(3) 输出量(被控制量): 对其变化规律要加以控制的物理量, 它与输入量保持一定的函数关系。

(4) 主反馈信号: 主反馈元件的输出信号, 该信号与被控制量具有一定的函数关系, 它与基准输入具有相同的量纲。

(5) 偏差信号: 基准输入信号与主反馈信号之差, 它是产生控制动作的基础。

(6) 扰动(干扰): 对系统输出产生不利影响的因素。干扰可能来自系统之外, 也可能来自系统内部。

(7) 误差信号: 系统输出量的实际值与希望值之差。

§ 1-3 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法很多, 从不同的角度可以对系统进行不同的分类。每种分类方法都突出了系统的某些特征, 在一定的场合使用比较方便。下面介绍几种分类方法。

一、按照反馈情况分类

(1) 开环控制系统 若系统的输入量与输出量之间只有顺向作用, 而没有反向联系, 则该系统为开环控制系统。图 1-9 (a) 所示数控线切割机的进给系统是开环控制系统的实例。该系统的方块图如图 1-9 (b) 所示。由图可知, 该系统信号传递是单方向的, 对于每一个输入量 x_r , 系统都有一个输出量 x_c 与之对应, 但系统中对输出量没有检测和反馈。

一般来说, 开环控制系统具有结构简单、工作稳定等优点,

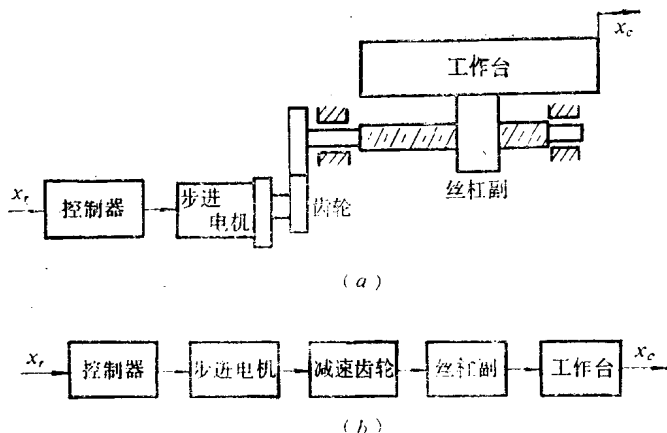


图 1-9

但由于开环控制不能修正被控制量的偏离，因此在有扰动的情况下，控制精度下降。

(2) 闭环控制系统 输入量与输出量之间不仅有顺向作用，而且有反向作用的控制系统称为闭环控制系统。闭环控制系统也称反馈控制系统。在第二节中所讨论的工作台位置控制系统和工作台速度控制系统等都是闭环控制系统的实例。

由于闭环系统一般都是利用负反馈原理工作，能自动修正被控制量出现的偏离，因此，能够修正扰动引起的误差，其控制精度较高。但正是由于存在反馈，闭环控制系统中的参数如果选择不当时，系统会出现不稳定的情况。

这里应当特别指出，在机械控制工程中，闭环系统不只局限于上述的有外加反馈的自动控制系统，许多机械系统或过程中由于内在的相互耦合作用所构成的非人为“内在反馈”也应视为闭环系统。如切削过程中产生自激振动时，必定存在内在反馈使能量在内部循环，促使振动持续进行。对该过程如果不从闭环系统的观点进行分析，就不能揭示其本质。