

线性连续系统自动控制理论 的问题与解答

编译 汪声远 贺智修
校 刘闻升 何九九

北京航空航天大学出版社

线性连续系统自动控制理论 的问题与解答

賀智修 汪声远 編譯
何九九 刘聞升 校

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书第1至6章是苏联高教出版社1986年出版的《线性连续系统自动控制理论问题与解答》一书的译文,第7章:“自动控制系统中的根轨迹法”是编者补充编写的。

前六章原书参照苏联理工大学自动控制理论课程大纲,用提问和解答的形式,通过对78个精选问题的解答,并以雷达天线动力随动拖动系统设计计算为中心的45个练习作示范,全面深入地介绍了线性定常连续自动控制系统的工作原理和分析方法,其中包括用控制理论设计计算实际工程问题的方法,使控制理论的的教学与工程实践更好地结合起来。书中把各类控制系统归结为几类典型的随动系统来研究,并配有一系列适合工程设计的公式、表格、曲线。所以本书既可作为大专院校有关专业的教学参考书,又可供有关的工程技术人员参考。

线性连续系统自动控制理论的问题与解答

XIANXINGLIANXUXITONG ZIDONGKONGZHILUN

de WENTI yu JIEDA

賀智修 汪声远 編譯

何九九 刘開升 校

責任編輯 陶金福

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京航空航天大学印刷厂印装

850×1168 1/32 印张:10.125 字数:277千字

1989年7月第一版 1989年7月第一次印刷 印数:2500册

ISBN 7-81012-099-9/TP·018 定价:2.35元

序 言

线性连续自动控制系统理论是经典自动控制理论和调节理论的基础。对其掌握的程度，决定了对离散、非线性、最优、自适应和专门系统理论的研究水平。要掌握好线性连续自动控制系统理论，应更多地通过对实际问题的练习来巩固知识，培养技巧与本领。

目前各种自动控制理论教学参考书中，实际上没有提供有目的地解决实际课题和进行课堂讨论的参考资料。由于从理论原理上进行严格的数学和逻辑论证的必要性，使得在一定篇幅的教学参考资料中，不能深入讨论各种物理现象及其结果，不能阐明设计、计算等技术，而这些内容正是进行实际训练的重要内容。

根据高等院校自动控制理论课程大纲，本参考资料按照线性连续系统应掌握的知识，作了一定程度的简化，力图进行更有方向的训练。参考资料首先适用于学习自动控制和调节理论的高等院校的大学生。无论在解决实际课题或是在完成课程设计、毕业设计、家庭作业和校核计算时，都能利用该参考资料。因为参考资料中包含有适于研究线性连续系统的大量辅助表格、图解、样板、曲线，便于教师、研究生和从事有关专业的工程师使用。

可惜，由于篇幅限制及选材特点，在介绍经典方法的同时，不能对描述系统的状态空间法及利用算法和专门程序在电子计算机上进行设计计算的有关方法进行阐述。这些方法对详细地研究实际问题特别方便，考虑到读者可能对这些问题感兴趣，在本参考资料中提供了相应的文献索引。

作者诚恳地感谢对完善本书提供了非常有益意见和建议的评阅人，他们是：技术科学博士依·阿·库克列夫（Е.А.Куклев）、

白俄罗斯综合技术学院控制论与计算技术教研室教授、技术科学博士阿·恩·奥斯塔宁 (А.Н.Останин) 及其同事们。同时衷心感谢弗·姆·阿尔捷米耶夫 (В.М.Артемиев)、弗·阿·哈雷 (В.А.Ганэ)、弗·伊·伊凡诺夫斯基 (В.И.Ивановский)、阿·勒·库兹涅佐夫 (А.Л.Кузнецов)、弗·伊·列乌特斯基 (В.И.Реутский)、叶·斯·尼基京 (Е.С.Некитин) 和弗·特·钦达雷夫 (В.Т.Чиндарев) 在工作中的帮助。

所有批评和意见請寄通讯处：22048, Минск, Проспект Машерова, 11, издательство «Вышэйшая школа»。

作 者

目 录

序 言

1. 自动控制系统的结构原理, 定常元件和定常系统的方程..... (1)
2. 定常系统与元件的传递函数和结构图..... (39)
3. 定常元件和系统的频率特性及时间特性..... (78)
4. 随动系统的构成原理, 传递函数和动态方程.....(131)
5. 定常自动控制系统的稳定性.....(158)
6. 定常自动控制系统的品质.....(184)
7. 自动控制系统中的根轨迹法.....(267)

1. 自动控制系统的结构原理，定常元件和定常系统的方程

问题1.1. 控制过程由哪些工序组成？控制问题的实质是什么？在说明控制过程时采用哪些概念和符号？

控制过程是工作工序和控制工序的总称。工作工序的作用是使控制过程直接地被执行（使发电机发出电压，驱动电动机的轴旋转，使动物体内的血液循环等），而控制工序的作用是保证正确和优质地完成工作工序。

当必须改变某一过程，使其特性指标满足一定的要求时，就产生了控制问题。例如，为了使汽车按给定的方向运动，就必须不停地修正方向盘；为了保证化学品的生产，就必须监视混合成分的数量；为了使加工的零件具有给定的形状，就必须改变刀具的位置等。

无论何时，为了正确和优质地完成工作工序，过程的某些坐标，即被控制（输出）的坐标必须按一定的规律变化或保持在一定的界限内，在各种扰动（内部和外部的干扰作用、负载变化等）作用下，过程的正常运行可能遭到破坏，这时控制作用是必须的。

我们来研究最简单的例子。发电机 Γ 输出端上的电压 $u_{\text{вых}}$ （图1.1 a）取决于激磁电流 i 和负载电阻 $R_{\text{вых}}$ 。若激磁绕组 OB 上的激磁电压 u 恒定，则发电机是不可控对象。于是发电机输出端上的电压取决于激磁电压 u 、电阻 $R_{\text{вых}}$ 和结构参数。当负载变化时， $u_{\text{вых}}$ 也发生变化。

为了使 U_{BX} 不随负载的变化而改变（或在允许范围内变化），应改变激磁电流来调节发电机。如果 U_{BX} 增高，则应减小激磁电流；而当 U_{BX} 降低时，则应增大激磁电流。借助于接入发电机激磁回路的变阻器 R （图1.1б），可以完成上述调节作用。在这种情况下，发电机成为被控对象，变阻器滑动触头起调节（控制）机构作用，电压 U_{BX} 是被控坐标。

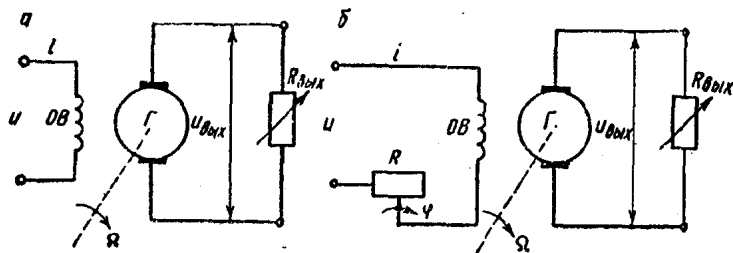


图 1.1

血液循环控制系统可作为生物界控制过程的例子[19]。血液循环控制系统的模型示于图1.2上。此系统由两个控制回路组成。其中第一回路控制动脉血压，用分布在颈动脉和主动脉弓上的敏感元件——生物感受器测量动脉血压，血压值变动的信息传到中枢神经系统，中枢神经系统控制心肌收缩频率和击发容积值（心脏一次收缩挤出的血液量，即心搏出量）。第二控制回路保持机体组织内化学介质不变，细胞间液体的化学成分改变会引起血管阻力的变化，它影响心脏击发容积值。

上述例子说明控制的实质是构成某种条件，以保证给定过程的进行。也可以说，控制是过程的某种组合，由于这种组合使控制目标达到所要求的良好效果（在负载变化时保持发电机电压恒定，保持动脉血压的规定值等）。

为了描述控制过程须采用一些符号和概念，如图1.3上所表示的作用、坐标和控制对象（或被控对象） OY 。控制对象可理解为设备或彼此相互有作用的设备总体，为了达到指定的功能而

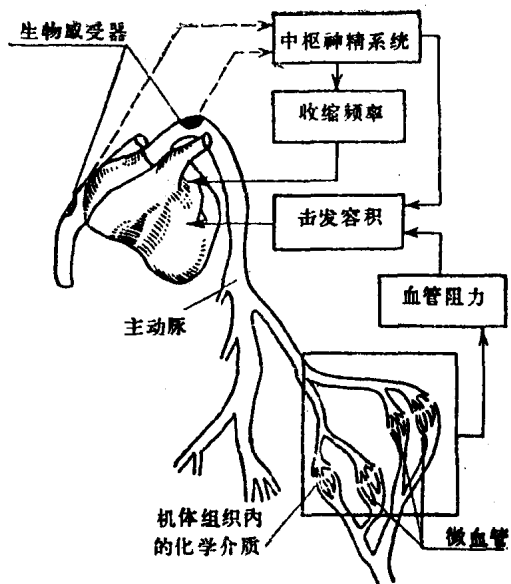


图 1.2

给出专门组织好的作用时，这些设备是必不可缺的^①。发电机、心脏、冰箱中的致冷机、飞机的舵面、机床的刀具、工作夹具等可作为控制对象 OY 的例子。

控制对象 OY 的状态由被控过程的坐标 $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 表征。可以是发电机电压、动脉血压、心脏的击发容积、致冷机中压缩机的压力、飞机舵面的转角、切削刀具的位置、工作夹具的位置等。

正常所期望的控制过程，在运行中输出坐标的变化由称之为功能算法所产生指令的总和决定^[4,16]。功能算法代表了控制目的，也就是使输出坐标的变化保持期望值 $y_{\text{ж}}$ （保持发电机的恒定电压，保持动脉血压规定值，保持致冷室的温度，按给定规律

① 该术语可参考第一届国际自动化学术会议论文集俄文本第3卷642页论文，自动学基本概念的术语——译者。

移动机床刀具，按需要方向改变工作夹具的位置等）。

控制作用 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 通过控制装置实现对控制对象的直接控制。发电机控制系统中变阻器滑动触头的机械位移（见图 1.16）；使心肌收缩减缓或加快的神经传导（见图 1.2）；接通或断开冰箱继电器的电压；飞机操纵舵面的拉杆的移动等，都可作为控制作用的例子。

控制作用由控制算法形成。控制算法的目的是实现功能算法，使加在被控对象上的合成指令具有规定的性质。

各种扰动作用 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_f\}$ 干扰控制过程的正常进行。这种作用的来源极其多样（参数对标称值的偏移、特定变化规律的干扰等）。输出坐标 y 对期望值 y_{κ} 的偏移，在控制过程中可因未考虑到控制对象参数的变化而引起（图 1.3 上的字母 Π ）。

考虑到以上的符号和概念，可以说对于构成一个控制过程，必须这样来形成控制作用：使控制作用抵消扰动作用 v 和不期望的控制对象参数变化 Π 的影响，以保证控制对象输出坐标 y 按其期望值 y_{κ} 变化，即实现功能算法。

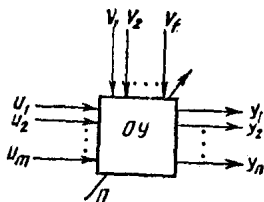


图 1.3

问题 1.2. 如何实现自动控制？构成自动系统的原理是什么？

为了实现控制，必须将控制作用 $u(t)$ 加到被控对象 OY 上（见图 1.3）。在自动控制情况下，由自动控制装置 (YV) 完成这一任务。相互作用的控制装置 YV 和控制对象 OY 组成了系统，称为自动控制系统 (CAY) 或简称自动系统。其方框图如图 1.4 所示。

自动控制系统 CAY 的功能算法由称为给定值的作用确定，

并用 $x(t)$ 表示。根据采用的控制原理，一个检测信号或含有控制对象输出坐标 $y(t)$ 的反馈信号 $y_{0.c}(t)$ ，可以加在控制装置 YY 上。图 1.4 所示为具有一个被控坐标 $y(t)$ 、一个给定值 $x(t)$ 的单变量自动控制系统方框图。

原则上知道了控制对象 OY 的特性之后，可以建立自动控制系统 CAY 的数学模型，并在未知外作用（未知扰动）时求出控制算法，以实现给定的功能算法。扰动作用通常是按随机规律变化的，且数学模型只能近似地描述实际系统的特性，因而在选定的控制算法之下，系统的实际响应（即被控坐标的实际变化 $y(t)$ ）将与功能算法所确定的期望值 $y_{ж}(t)$ 不同。

为了使系统响应接近期望值，在控制算法中不仅必须引入系统性能和功能算法的信息，而且也必须引入系统实际运行的信息。当前采用的一般控制原理（又称基本控制原理）有三种，即开环控制原理、补偿控制原理和反馈控制原理。上述诸种控制方式的实质在于使功能算法、控制算法与系统的实际运行相适应，或是考虑到产生对期望值偏差的原因来确定控制算法与功能算法。

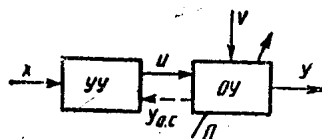


图 1.4

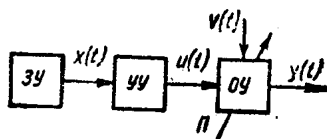


图 1.5

问题1.3. 开环控制原理和补偿控制原理的实质、优点和缺点是什么？

开环控制原理的实质是控制算法只根据给定的功能算法制定，在工作过程中系统的特性或参数发生变化时，不能对过程进行修正。在图 1.5 上示出了按开环控制原理所绘制的系统方框

图。考虑到控制对象 OY 的特性, 控制作用 $u(t)$ 由给定作用 $x(t)$ 经函数变换形成, 即控制算法可用 $u = \varphi(x)$ 形式描述。代表控制目的的给定作用可由给定装置 ($3Y$) 给出, 或是在设计控制装置时给定。其方框图总为开路形式, 由此确定了原理的名称。按开环原理进行控制, 只能依靠正确地选择自动控制装置的结构来保证输出坐标近似地等于期望值。

在没有扰动作用和控制对象特性在工作过程中不变化的理想情况下, 开环控制能足够准确地保证实现功能算法。这种有特定限制的情形, 在实际的自动系统中是不多见的。在大多数情况下, 扰动作用的特性和控制对象的参数是变化的, 因此, 开环系统工作时将存在不允许的误差 (即实际坐标值对期望值具有不允许的较大的偏差)。这是开环控制原理的主要缺点。其优点是结构简单、功耗小、动作快 (因为系统直接对给定作用的变化作出反应)。

按开环控制工作的系统在各种程序控制的设备中得到广泛应用, 如自动售票机、磁滞录音机、自动机床、按给定外形轮廓移动的工具。将一个物理量转变为另一个物理量的线性变换器, 实现微分、积分运算的某些计算装置都是开环控制类元件。图 1.16 所示的发电机电压控制就是开环控制的例子。

在某些情况下, 干扰作用是可以测量的。在这种情况下, 如果将补偿干扰的信号引入到控制作用中, 则在一定程度上能减少干扰对输出量^①的影响。图 1.6 说明了上述作用过程, 称之为补偿原理, 其实现方法是用专门的装置 YV_2 (可视为控制装置的一部分) 对扰动作用 $v(t)$ 进行测量、放大, 必要时可进行变换, 并作为控制作用 $u_2(t)$ 加到控制对象 OY 上。控制算法 $u = \varphi(x, v)$ 现在包含有干扰作用的信息。补充信号 $u_2(t)$ 的大小和符号应能全部或部分地补偿干扰作用的影响。

① 以后将输出坐标简称为输出量, 更适合于目前通用的术语——译者。

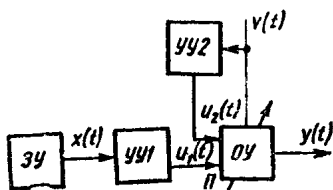


图 1.6

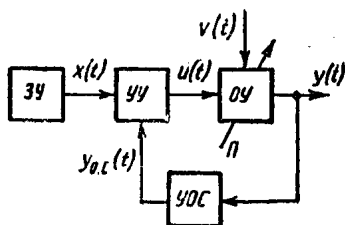


图 1.7

问题 1.4. 反馈原理的实质和优点是什么？如何利用复合控制原理构成自动控制系统？

反馈即是將有关控制对象工作状态的信息由系统输出端传送到自动控制装置的输入端。按反馈控制原理构造的系统方框图示于图 1.7。反馈装置 (YOC) (包括在控制装置 YY 或控制对象 OY 内) 形成反馈信号 $y_{o.c}(t)$ 。反馈信号 $y_{o.c}(t)$ 含有与控制对象的实际状态有关的信息，或者就是输出量 $y(t)$ 的实际值。在控制装置 YY 中，反馈信号与给定作用 $x(t)$ 比较。控制作用 $u(t)$ 是根据输出量 $y(t)$ 对其期望值 $y_{\kappa}(t)$ 的偏差而得出的。与开环控制不同，这里考虑了从实际控制结果中所取出的信息，而不仅是预先希望实现的功能算法，也就是控制算法可以用 $u = \varphi(x, y)$ 的形式描述。在反馈控制系统中，控制装置 YY 力图消除各种因素引起的 $y(t)$ 对 $y_{\kappa}(t)$ 的偏差，包括任何干扰作用和对象参数变化 (即参数扰动) 所引起的偏差。

反馈原理称为闭环控制原理 (按封闭回路进行控制的原理)。在许多闭环自动控制系统中，由输出量与给定作用相比较产生控制作用，即 $u = \varphi(x - y)$ 。这种形成控制作用的方法称为按偏差 (误差、失调) 控制，按这种方式实现控制的系统有时称为自动调节系统 (CAP)。

反馈控制原理的主要优点在于考虑了实际运行的结果而构成

控制作用，正因此使反馈控制获得了非常广泛的应用，绝大多数控制系统正是按反馈控制原理工作的。

图 1.8 所示的可控发电机，可视为按闭环工作的自动控制系统的简单例子。在此系统中调节机构是电位器 R 的滑动臂。电动

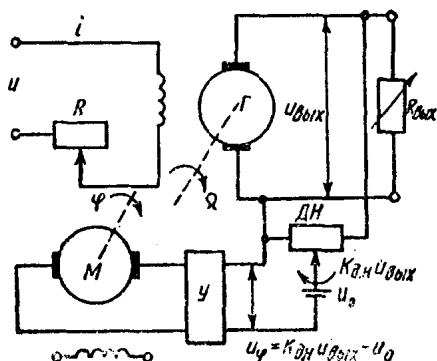


图 1.8

机 M 可移动滑动臂，电压 u_φ 经放大器放大后控制电动机 M ，电压 u_φ 系发电机发出电压的一部分（取自分压器 DH ）与标准电压 u_0 之差

$$u_\varphi(t) = K_{\text{д.н}} u_{\text{вых}}(t) - u_0$$

式中 $K_{\text{д.н}}$ ——分压器 DH 的变换系数。如果 $K_{\text{д.н}} u_{\text{вых}}(t) = u_0$ ，则 $u_\varphi(t) = 0$ 。此时电位器 R 的滑动臂处于给定的位置，相应地有给定电流 i ，因而对应有给定（或额定）电压值 $u_{\text{вых}} = U_{\text{вых.ном}}$ ，任何 $u_{\text{вых}}$ 对 $U_{\text{вых.ном}}$ 的偏差，将导致电压 $u_\varphi \neq 0$ ，相应地使电动机 M 的转子旋转，移动电位器 R 的滑动臂，系统处于运动状态，直到满足静止条件 $u_\varphi = 0$ 为止。这里 $u_\varphi = 0$ 即为保持发电机电压不变的控制算法。

在许多情况下，为提高控制精度而采用补偿控制方法，也就是同时使用开环和闭环控制。按这样的原理构成的系统，除具有负反馈所形成的闭环回路外，还具有补偿扰动作用的通路。这种

自动控制系统方框图示于图 1.9a。其控制算法是 $u = \varphi(x - y, v)$ ，它可以全部或部分地补偿干扰作用所产生的偏差，为了全部或部分地补偿给定作用产生的误差，可采用控制算法 $u = \varphi(x - y, x)$ ，这时给定作用既构成闭环控制，又构成开环控制（见图 1.9б），控制装置 YY2 输出控制作用 $u_2(t)$ ，使输出量按所需要的方向变化，补偿输出量与给定作用之间的差值。控制装置 YY1 用来构成闭环控制，用以修正开环控制、干扰作用和对象参数漂移等所引起的失调。

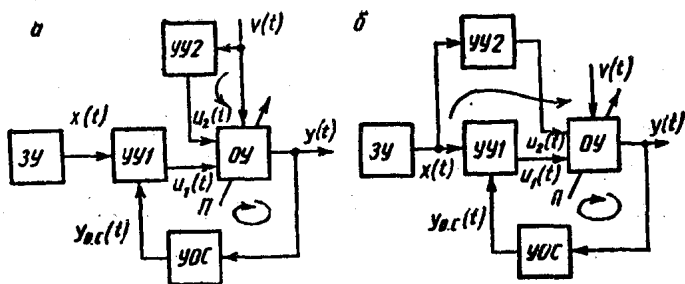


图 1.9

问题 1.5. 自动控制的任务是什么？自动系统如何按指定的用途分类？

自动控制的主要任务是保持输出量不变，或者输出量按预先给定的程序变化，或者按某一种任意的规律变化。

按照给定精度保持输出量不变的系统称为镇定系统或恒值调节系统。发电机电压稳定系统（图 1.1б 和 1.8）、血液循环节律控制（图 1.2）、电动机转速调节、火箭及宇宙飞行器的镇定系统等均属于此。这些系统的功能算法可用 $y_{ж}(t) = y_{ж} = \text{常数}$ ，或 $x(t) = x = \text{常数}$ 的形式给出。

输出量按预先编制的、由给定作用所决定的程序变化的系统称为程序系统或程序控制系统。这些系统的功能算法可用 $y_{\text{ж}}(t) = F[x(t)]$ 形式给出。式中函数 F 和作用 $x(t)$ 是预先确定的。

有两种形式的程序控制在实际系统中得到应用^[16]：按时间给定的程序控制和按空间坐标规定的程序控制。在第一种情况下，给定装置 $3Y$ (图1.5~1.7) 直接给出函数 $x(t)$ 。诸如装有发条的玩具、电唱机、磁滞录音机等均属此类系统，其内部的电动机或钟表机构匀速运动着，并以任意方式转换为给定运动 $x(t)$ 。在空间程序系统中，执行机构（金属加工机床的加工工具，工作夹具等）的运动按空间给定的轨迹进行，其轨迹的运动规律与时间无关。空间程序控制方法之一是沿着每个空间坐标轴的运动，均用独立的拖动机构来实现。沿着其中一个轴的运动规律可任意给定（通常是匀速的），而沿着其余轴的运动规律须与第一个运动相协调，以推动执行机构按给定的轨迹运动。

仿形机床的控制系统可作为上述控制方法的例子 (图 1.10)。仿形探头 Π_n 借助电动机 M_x 沿着轴 x 匀速移动。第二个运动 (沿着 y 轴) 借助电动机 M_y 由凸轮轮廓 (样板 III) 给定。机床刀具 C_T (铣刀 Φ_p) 借助控制装置 Y_Y 在加工工件 H 上重复探头的运动。

第二种空间程序控制方法是以时间为参变量对给定的轨迹写出参数方程，利用解算装置解出各个坐标轴的独立的传动运动规律。

输出量按任意的预先未知的规律变化的系统称为伺服控制系统。这种系统的功

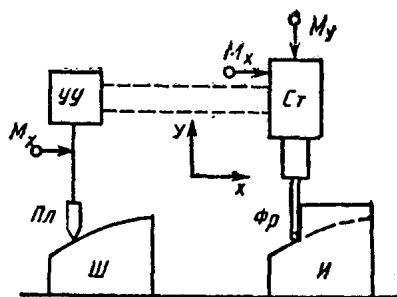


图 1.10

能算法可用 $y_{\text{ж}}(t) = F[x(t)]$ 形式描述，式中函数 F 是给定的，而给定作用 $x(t)$ 的变化规律是未知的。当要求输出量复现事先

未知给定作用，跟随给定作用而变化时，这样的系统称为随动系统。随动系统的功能算法为 $y_{\text{ж}}(t) = x(t)$ ，即系统的输出量必须以给定的精度复现给定作用。在更一般的情况下，伺服控制系统不仅完成跟随给定作用的功能，而且可按一定的规律变换给定作用。这种系统称为变换系统，其功能算法可有下列几种型式： $y_{\text{ж}}(t) = mx(t)$ ——比例系统； $y_{\text{ж}}(t) = \int_0^t x(\tau) d\tau$ ——积分系统； $y_{\text{ж}}(t) = \dot{x}(t)$ ——微分系统； $y_{\text{ж}}(t) = x(t) + k\dot{x}(t)$ ——使用外推法的系统^①等。虽然在文献中两个术语（随动系统、变换系统）常视为同一的，但具有 $y_{\text{ж}}(t) = x(t)$ 算法的随动系统可视为变换系统的特定情形。飞行器的距离、速度、方向自动跟踪无线电定位系统，天线位置随动系统，射电望远镜、机器人、机械手的拖动，随动解算装置等都是伺服控制系统（变换系统、随动系统）。

说明：在文献[13, 15]中将按用途（按功能算法）对自动系统进行的分类称为自动控制系统按给定作用的变化特性进行分类。根据这种观点，当 $x(t) = \text{const}$ 时称为镇定系统；当 $x(t)$ 为事先给定的某一函数时，则称为程序控制系统；如果 $x(t)$ 为事先未知的函数时，该系统称为伺服控制系统。

练习 1.1. 说明随动拖动的作用原理。

随动拖动是按方位角、高低角自动跟踪系统中的一个组成部分，火箭、宇宙飞行器中的运动控制转向装置，机器人和机械手，机械计算机等设备中均有随动拖动装置。为了控制大型对象（射电望远镜、天线和雷达室、火箭发射装置等）需要采用动力随动拖动（ССП）。仪表随动拖动（ПСП）则用来实现对小功

^① 比例-微分系统——译者。