

液压随动系统

史維祥 陶 钟 編著

上海科学技术出版社



史維祥 陶 钟 編著

液 压 随 动 系 統

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书主要討論各种液压随动系統的工作原理、动静特性,以及設計与計算方法。所討論的系統有圆柱滑閥式、噴管式及噴嘴-擋板式等三种,其中以圆柱滑閥式为主,并深入分析了該滑閥元件的工作特性及設計与制造方法。书中詳述单級随动系統的基本理論及試驗研究結果,同时亦討論双級系統的工作原理及特性。

本书可供机床、航空及船舶等有关方面的設計与使用人員、研究人員等参考,亦可作为大专院校有关专业师生参考。

液 压 随 动 系 統

史維祥 陶 钟 編著

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

上海市印刷五厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/27 印张 18 插页 1 排版字数 431,000

1965年3月第1版 1965年3月第1次印刷

印数 1-8,500

統一書号 15119·1796 ~~定价(科七) 3.00元~~
定价(科六) 2.70元

序 言

液压随动系統(或傳动)有时亦称为液压放大器、液压伺服机构、液压伺服傳动等,其涵义均相同。液压随动系統是一种專門的液压傳动系統。在这种傳动系統中,一方面其执行机构(代表輸出)能自动地以一定的精度重复着系統輸入信号变化的規律,另一方面又起着信号的功率或力的放大作用。液压随动系統的輸入及輸出信号在大多数情况下是一种运动。这种运动(包括速度、位置、方向、作用力等运动要素)可以是平面的,亦可以是空間的。在某些情况下,液压随动系統的輸入或輸出信号单纯地表現为一种力,这时它只起着力的放大作用。液压随动系統也是自动調节系統中的一种,所以关于其性能的研究可借助自动調节理論来进行。

液压随动系統与电气随动系統相比,其最突出的优点是体积小、重量輕及慣性小。对移动式液压随动系統而言,在相同的輸出功率下,油缸活塞的运动慣性远远小于电动机的轉动慣性,即使对旋轉式液压馬达而言,其轉动慣量仅为相应直流电动机的轉动慣量的百分之一左右^[1]。實踐中証明:一般情况下,电动机的轉动慣量占被其傳动的整个系統慣量的50%左右;而对液压馬达而言,它只占5%左右。因此,液压随动傳动不仅直接由于其所占的体积及重量小而带来很大的好处(特別在高空工作的条件下),而且由于其运动部分的慣性小,使整个系統的快速作用性、动态特性及工作精度都大为提高。應該指出,以上这些工作质量正是随动系統工作质量的主要指标。此外,液压随动系統尚具有一般液压傳动的优点,如工作可靠、元件的工作寿命长、运动平稳等。由于以上一系列的优点,液压随动系統在很多領域中获得了广泛的应用。

由于电的系統有其固有的优点,如傳輸信号快,容易实现自动化及远距离控制,易于进行各种反饋(如速度、加速度反饋等)来改善系統工

作品质等，因此在很多情况下采用电气液压联合的综合系统。在这种系统中，电气部分常作为系统接受及传输信号、放大信号，进行各种反馈及远距离控制之用；而液压部分则作为进一步的信号放大，传动分配及系统的执行机构之用。这种综合系统就兼具电气及液压系统两者的优点，适用于工作要求较高的各种自动控制系统。

液压随动系统在第一次世界大战前已有应用，当时主要使用于海军舰船中作为操纵船舵的设备。在第二次世界大战后，它逐步应用到各种军事及非军事领域中，并且对其工作特性的研究亦日益予以重视。在军用方面，如炮的操纵系统、雷达跟随系统、坦克操纵系统等；又如飞机的操纵系统、火箭导弹的自动控制系统等都已广泛应用。在民用方面，已应用于金属切削仿形机床、起重机、掘土机、汽车及农业机械、冶金机械、筑路机械、纺织机械、造纸机械及计算机等设备中。因其使用范围十分广泛，近几年来发展较快，具体应用不胜枚举，这里不作详述。

在金属切削机床中，液压随动系统用来使机床自动化或半自动化。目前已设计及使用的有各种半自动液压仿形车床、液压仿形铣床等。近十年来，液压随动系统与电气结合亦已用于机床的程序控制系统中。由于应用了这种系统，使提高机床的生产率、加工精度及降低工人劳动强度等方面均得到了很大的进展。目前液压仿形机床的液压随动系统工作精度可以达到几十个微米（相当于机械加工中的二级精度），生产率可以提高数倍，工人技术熟练程度的要求亦可降低。因此采用液压仿形设备是使万能机床半自动化的主要方向之一。

在飞机及海洋舰船航向与平稳性等自动控制系统中，采用液压随动系统除了有很大的功率放大系数（数千倍）及减轻劳动强度等优点外，又因其工作灵敏度高，故对外来的信号反应迅速。例如即使在某一功率为5马力的旋转式液压随动系统中，从以2500转/分转速的一个旋转方向换到另一个旋转方向，总的制动起动时间只需0.02秒钟。因为有这样高的快速作用性，故在现代的火箭、导弹等自动控制武器中亦广泛采用了液压随动系统。

由上述情况可知，液压随动系统的研究工作与试制工作已不容忽视，它对国防工业及民用工业的发展有着相当重要的意义。作者编写

本书的目的在于：較系統地并由淺入深地闡述液压随动系統的工作原理、基本特性及有关系統的設計与制造等問題；并企图說明近十年来国内外在这方面研究的情况，以供我国有关人員进一步的研究作为参考。本书主要討論最簡單的（亦是最基本的）液压随动系統，亦即单級、单方向（单坐标）、单回路液压随动系統。因为其他复杂的液压随动系統大多由最簡單的系統串联或并联而成，在了解这些最基本的系統特性之后，其他各种复杂系統的研究亦已打下了基础。同时，为了适应当前科学技术的需要，对兩級液压随动系統（兩級液压放大器）亦給予一定的篇幅。在討論各种基本的液压随动系統时，本书着重說明应用最广泛的圓柱滑閥（即滑閥）式液压随动系統。噴管系統及噴嘴-擋板系統亦設專章討論。全书分为九章：第一、二章主要說明随动系統各常用術語的概念、定义、分类以及各种液压随动系統的工作原理；第三、第四、第五及第六章詳細討論最簡單的圓柱滑閥液压随动系統的基本特性——靜态及动态特性。由于随动滑閥在整个系統工作中所处的重要地位，故在第三章中对其工作特性及制造作了比較詳細的分析。鉴于部分讀者对自动調节原理可能不太熟悉，因此在有关章节中对研究本系統有关的某些自动調节理論亦作了扼要的介紹。第七章介紹噴管式及噴嘴-擋板式液压随动系統。第八章介紹各种类型兩級液压随动系統的工作原理、靜动态特性。第九章說明容积調节式液压随动系統的工作特性。

在試驗研究方面，由于其他領域中的研究資料公开发表很少，因此本书在討論时，大部分采用金属切削机床液压随动系統上所研究的結果。

由于作者水平有限，錯誤在所难免，謹希讀者不吝指正。

作 者 一九六四年十二月

本书内的通用符号

γ, ρ ——液压随动系统工作油液的单位体积重量及密度[公斤/厘米³]及[公斤·秒²/厘米⁴]。

q, Q ——流过液压随动系统内小孔或缝隙的流量[厘米³/秒]或[升/分]。

μ ——流量系数,不同流量公式具有不同值。

p_0 ——油泵对系统的供油压力,其值常设为常数[公斤/厘米²]。

Δp ——油压降[公斤/厘米²]。

p_1, p_2 ——油缸或油马达两油腔内的油压[公斤/厘米²]。

a, a_g ——分别为滑阀的缝隙面积及定值的节流小孔面积[厘米²]。

δ ——控制元件如滑阀、喷嘴等对中性零位(无输入输出的位置)的相对偏移($i=1$),亦即系统的工作误差。当未指出滑阀有预开口时, δ 均代表滑阀的某一开口总缝隙宽度(这时 $\delta_0=0$) [厘米或毫米]。

δ_R ——滑阀由于外来负载而造成的系统工作误差(滑阀开口)[厘米]。

δ_v ——滑阀由于执行机构需有运动速度而造成的系统工作误差(滑阀开口)[厘米]。

δ_0 ——滑阀或喷嘴的挡板在处于中性零位时的正预开口量[厘米]。

l ——滑阀处于中性零位时的负预开口(遮盖)量[厘米]。

y ——滑阀体的运动坐标,亦即对滑阀的输入信号[厘米]。

b, d_s ——滑阀体的有效圆周长度及直径。通常 $b=\pi d_s$ [厘米或毫米]。以后在符号右下方作注脚“ s ”即代表滑阀。

Δ_g ——滑阀副的径向间隙[厘米或毫米]。

f_s ——滑阀体的端面面积[厘米²]。

i ——輸給滑閥的信号輸入机构傳动比。

m_s ——滑閥体的运动质量[公斤·秒²/厘米]。

M, G ——执行机构(如油缸)及与其刚性相連的被調节对象运动部分的质量及重量[公斤·秒²/厘米及公斤]。

F ——油缸活塞(或称作动筒)有效面积[厘米²]。

H ——活塞在油缸内的最大行程[厘米]。

V ——油缸腔有效体积,其最大值为 $V = FH$ [厘米³]。

x ——执行机构运动坐标,它常代表系統的輸出[厘米]。

v ——执行机构运动速度, v_0 为其常速[厘米/秒]。

R ——作用在执行机构运动方向上的外加载荷[公斤]。

P ——有效力[公斤]。

T, T_0 ——执行机构等内运动副間的摩擦力及干摩擦力[公斤]。

k ——油缸腔及与其相連的有关油管内油的总体积彈性系数。

对油缸而言,差动油缸的 $k \approx \frac{FH}{1.4 \times 10^4}$, 非差动油缸的

$$k \approx \frac{FH}{2.8 \times 10^4} \text{ [厘米}^5\text{/公斤]}。$$

k_s ——滑閥定位彈簧剛度[公斤/厘米]。

E ——单級随动滑閥及其执行机构的刚性系数,其值为

$$E = \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)_{v=0} \text{ [公斤/厘米]}。$$

C_0 ——单級随动滑閥及其执行机构的速度放大系数,其值为

$$C_0 = \left(\frac{\partial v}{\partial \delta} \right)_{P=0} \text{ [秒}^{-1}\text{]}。$$

$L, \bar{A}, N$ ——微分方程式常系数。

D ——微分算子, D 即 $\frac{d}{dt}$ 的代表。

$A(\omega)$ ——幅頻函数。

$\varphi(\omega)$ ——相頻函数。

ω, f ——振动頻率[秒⁻¹及周/秒]。

A_0 ——振动振幅[厘米]。

C_s, C_M ——分别为滑閥及执行机构等的粘摩擦系数。

$C_1, C_2 \dots$ ——常数。

目 录

序 言

本书内的通用符号

第一章 液压随动系统的工作原理、基本要求及其分类.....1

1-1 液压随动系统的工作原理.....1

1-2 对液压随动系统工作的基本要求.....5

1-3 随动系统的分类.....8

第二章 各种典型的液压随动系统.....16

2-1 移动式圆柱滑阀液压随动系统16

2-2 旋转式圆柱滑阀液压随动系统——力矩放大器21

2-3 喷管(射流管)式液压随动系统24

2-4 喷嘴-挡板式液压随动系统.....25

2-5 可调节油泵液压随动系统26

2-6 两级液压随动系统——两级放大器27

2-7 电气-液压及气动-液压联合的随动系统29

2-8 单回路双向液压随动系统32

2-9 双回路双向液压随动系统33

第三章 随动滑阀在工作中的一些基本特性。随动滑阀的设计与制造.....36

3-1 矿物油流过随动滑阀开口缝隙的流量公式36

3-2 油流经随动滑阀的液流阻力系数与流量系数41

3-3 油流过滑阀开口缝隙或小孔的堵塞现象46

3-4 圆柱式滑阀在工作中被卡住的问题54

3-5 作用在圆柱式随动滑阀上轴向液动力的分析64

3-6 圆柱式随动滑阀的技术要求及其制造76

第四章 液压随动系统的工作精度	87
4-1 系统工作不灵敏区、滞后性、误差及灵敏性的基本概念	87
4-2 液压随动系统工作精度的理论分析	96
4-3 系统各参数对系统工作精度的影响	111
4-4 提高液压随动系统工作精度的一般原则与方法	125
4-5 液压随动系统的工作效率	133
第五章 液压随动系统的稳定性	139
5-1 概述	139
5-2 研究液压随动系统稳定性的基本线性理论基础	142
5-3 圆柱式滑阀在工作中的稳定性	155
5-4 B. Л. 科罗鲍奇金等的液压随动系统稳定判据	176
5-5 J. 澤廖的液压随动系统稳定判据	196
5-6 机械刚度对液压随动系统稳定性的影响	203
5-7 解非线性微分方程求液压随动系统稳定判据的某些探讨	209
5-8 各参数对系统稳定性的影响	220
5-9 液压随动系统的自振特性	234
5-10 提高液压随动设备稳定性的途径	242
第六章 液压随动系统调节过程的品质	248
6-1 系统调节过程的品质指标	248
6-2 系统调节过程品质的直接判定法	252
6-3 根据频率特性绘出过渡过程曲线的近似法	255
6-4 液压随动系统过渡过程的一些特性	264
6-5 根据系统的正弦振荡特性指标等来判定液压随动系统调节过程的品质	270
6-6 液压随动系统在正弦信号输入下的特性	276
6-7 在设计液压随动设备时各种系统及系统各参数的选取原则	294
6-8 液压随动系统设计举例	304
第七章 喷管(射流管)液压随动系统及喷嘴-挡板液压随动系统	316
7-1 概述	316
7-2 喷管(射流管)式液压控制元件静态特性及该元件的设计与计算	318

7-3 噴管液压随动系統的靜态及动态特性	328
7-4 噴嘴-擋板液压控制元件的靜态特性。噴嘴-擋板液压元件的設 計	334
7-5 噴嘴-擋板液压随动系統靜态及动态特性的理論分析	353
第八章 兩級液压随动系統(兩級液压功率放大器)	361
8-1 兩級液压随动系統的分类,工作要求及其工作原理	361
8-2 液压放大器的結構,主要参数及其特性	371
8-3 无反饋滑閥式兩級液压放大器	383
8-4 具有反饋的滑閥式兩級液压放大器	400
8-5 噴嘴-擋板及滑閥式兩級液压放大器	407
8-6 噴管及滑閥式兩級液压放大器	414
8-7 工作油液中的脏物对液压随动系統工作的影响及消除該影响的 途徑	422
8-8 电气机械轉換器	429
第九章 容积調节式液压随动系統	443
9-1 容积調节傳动的靜态特性	444
9-2 容积調节傳动的动态特性	449
9-3 帶有液压放大器的容积調节系統	457
9-4 容积調节的閉环系統	460
9-5 自动調节变量泵液压系統	466
参考文献	471

第一章

液压随动系统的工作原理、基本要求及其分类

1-1 液压随动系统的工作原理

随动系统是自动调节系统中的一种。在自动调节系统中，凡是使各种被调节对象中的被调量自动保持恒值的，不受任何形式的扰动影响的设备，或者使被调量按一定规律而变化的设备，即称为自动调节装置。

自动调节装置与被调节对象的组合，即称为自动调节系统。完善的调节系统的工作过程是：在系统中被调量与参据值（即要求的量）进行比较，测得两者之间的差别（或称偏差），并按这差别的大小与符号（在很多场合下亦按这差别的时间导数和积分）自动的作用，使被调量与参据值间的差别自动减小到许可的微小值。

自动调节系统可分为三类：

(1) 被调量具有恒定（或很少变动的）参据值的系统，这种系统通常称为自动调节系统。

(2) 被调量的参据值按某一预定程序随时间变动的系统，这种系统常专门给以一名词——“程序调节系统”。

(3) 被调量的参据数值可按任意要求的规律在广泛范围内变动的系统。

前两类系统就是通常所说的“自动调节系统”，而第三类系统目前已专称为随动系统。所以，随动系统是这样的一种自动传动装置，它的

输出量随输入量的变化而变化，同时自动装置随输出量与输入量间的差异而作用。本书研究的对象——“液压随动系统”即属于这类系统。

图 1-1 所示为一般常称为的“自动调节系统”与随动系统的结构图。

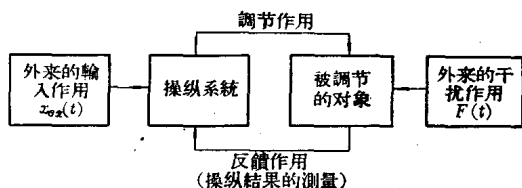


图 1-1 自动调节系统的结构图

若图 1-1 代表随动系统，则外来的输入作用 $x_{ex}(t)$ 是随时间而变化的任意量，这时被调量尽可能准确地重复随时间而变的输入量 $x_{ex}(t)$ ，这种输入量在实际工作中可能是一机械量，可能是一电量或其他一任意物理量。在随动系统中所有外来的干扰作用 $F(t)$ 尽可能理想地被消除。

若图 1-1 代表一般通称的“自动调节系统”，则操纵系统是一个调节器，而外来的输入作用则是预先要求的一个恒值，或按一定程序随时间而变的数值。这时自动调节系统的任务，即在于在实际工作过程中不管作用在被调节对象或操纵系统上的外来的干扰有多大，应尽可能准确地保持被调量为—恒值或按一定程序随时间而变。

由上述情况可知，通常所称的“自动调节系统”与“随动系统”间在工作原理方面差别不大，但其所完成的任务则不同。

图 1-2 为用液压传动来调节内燃机转速的自动调节系统。1 是被调节的对象（内燃机），它的被调量是转速。假设外来的干扰是内燃机负载突然增加，这样内燃机 1 的转速 ω 即降低。与内燃机轴一起旋转的离心摆锤 2 由于转速降低而亦下移，通过杠杆又将滑阀 3 的阀心向下移。这时液压油缸的活塞 4 向上移动，就将装置于燃料管道内的活门 5 向上促使活门打得更开，使内燃机得到更多的燃料，因而转速加快，并一直加快到与由离心摆弹簧事先调节好的恒定的参据值相同为止。

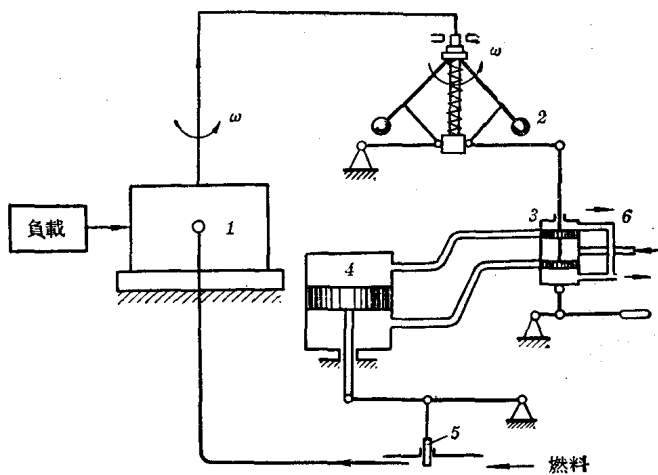


图 1-2 内燃机转速的自动调节系统

现在取金属切削加工的仿形机床工作系统作为说明随动系统的例子。

图 1-3 所示为金属切削机床仿形装置工作原理图。工作台 1 由电动机 4 带动作横向送进。模板 3 (发送设备) 通过仿形触梢就给作为敏感元件的仿形器 10 偏离原有位置的一个偏差, 仿形器将这个作为信号的偏差转换成电量而送给放大器 6。通过放大器放大在大小及符号方面相应于这偏差的电量 (电压) 就传送给执行电动机 7, 电动机转动而使刀架 8 移动, 亦即对工件 2 作垂直向切削送进。这个送进的方向通

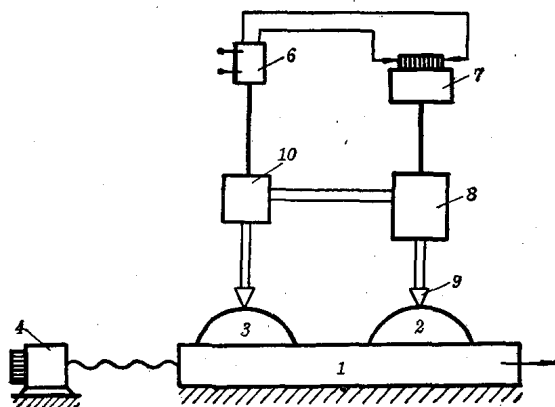


图 1-3 金属切削机床仿形装置工作原理图

过与仿形器刚性的联接,恰使仿形器原先得到的位置偏差对消。由于工作台不断的送进,使仿形触梢沿着模板相对地移动,因而不断给以仿形器相应于模板的形状的偏差(信号),通过放大器及电动机就使刀架跟随触梢移动的轨迹而移动;与此同时,移动的本身通过反馈亦不断对消仿形器获得的位置偏差。

在这系统中,输出量(在本例中即是刀架8或刀具9的移动) $x_{out}(t)$ 总是复制着输入量 $x_{in}(t)$ (在本例中相当于10中位置的偏差)。但应指出,所谓“复制”并不是在一切时间输出量与输入量相等,在实际工作过程中总存在着或大或小的差别,这种差别即为系统的工作误差(也称“复制”误差)。此外,在随动系统中输入量与输出量间有时在大小方面并不相等而是成比例的变化,即

$$x_{out}(t) = Cx_{in}(t)$$

式中 C ——比例系数。

有时它们亦可能是两个不同的物理量,如 x_{in} 可能是一位移,而 x_{out} 可能是一电量。从上述例子亦可看出,在一个完善的随动系统中,输出量与输入量间有一反馈连接,由于有这反馈,即能使输入量与输出量进行比较,并产生抵消这偏差的作用,即

$$\Delta x = x_{in} - x_{out}$$

抵消是在通常所称的“偏差受感器”中进行,在本例中作偏差受感器的即为仿形器10,进行比较所得的差别(即偏差)就作用于中间构件,再经过中间构件而使执行构件工作。在上述例子中的中间构件为放大器,而执行构件即电动机7,执行构件就使被调节对象(在上例中即刀架)获得所需要的被调量。概言之,在随动系统中被调量总是以一固定关系追随着发送构件所输入的信号而变化,同时它的变化总是要

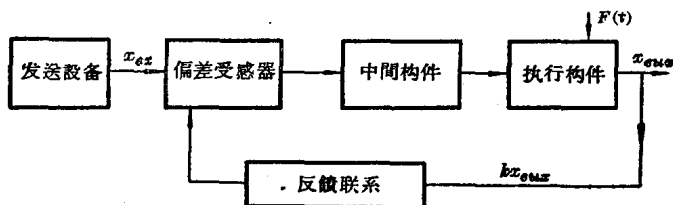


图 1-4 液压随动系统结构图

使其两者之间的差别趋近于零。

现将上述例子的结构图示于图 1-4, $F(t)$ 代表外来的干涉。

此处应指出,并不是所有随动系统都具有以上所有的工作构件,可能没有中间构件,亦可能没有反馈联系。

1-2 对液压随动系统工作的基本要求

随动系统的工作指标表现在静态特性与动态特性两个方面。静态特性方面的指标主要的是在外来干扰已停止一足够长的时间后系统工作的静态误差值,即

$$\Delta x = x_{\text{静}} - x_{\text{ax}}$$

动态特性方面的指标通常是指系统工作的稳定性及系统从受到外来干扰作用起到达到稳定状态的整个过渡过程质量。以上两方面的要求具体地可分为:

- (1) 系统工作时的稳定性;
- (2) 过渡过程的质量;
- (3) 稳定状态下的工作精度;
- (4) 动态状态下的工作精度。

任何一种随动系统在一定工作条件下可能产生持续的振动。系统内的振动通常有两种:一种是强迫振动,一种是自振。强迫振动是由外来的振动源影响下引起的,当这些振动源消失后,系统内的振动亦随之消失。系统内的自振则是另外一回事,是在系统外面供给的能量与受干扰后振动中所消耗的能量相等时产生的。而且这外来能源在大多数情况下即是用来维持系统工作的能源;亦即是说,不能将能源排除掉,所以要使自振消失,只有改变系统本身的参数及工作条件等。在大多数情况下,例如在金属切削加工、飞机的航向改变等随动系统内的振动(特别是自振),是完全不允许或者是很不希望有的。因此保证系统在工作过程中的稳定性是首要的要求。液压随动系统的稳定性问题及消除自振的途径,将在后面专门讨论。

过渡过程的质量与外来作用的干扰形式及大小有密切关系,因此在判定或比较某些系统的过渡过程质量时,首先应规定一统一的所谓

“标准干扰”。作为研究系统过渡过程的标准干扰有阶跃式（或称阶梯式）干扰、正弦式干扰、等速干扰、等加速干扰等几种形式，如图 1-5 所示。这些形式亦是随动系统在实际工作中遇到最多的干扰形式。

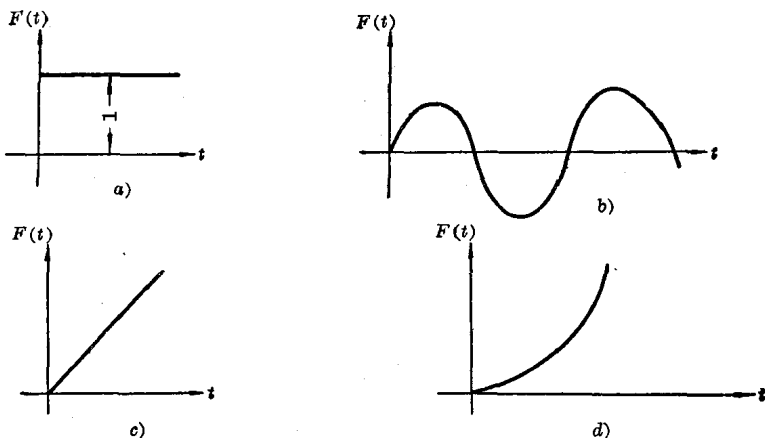


图 1-5 标准干扰的各种形式

a—阶跃式干扰；b—正弦式干扰；c—等速干扰；d—等加速干扰

系统的过渡过程指标包括下列几个方面：

(1) 最大的超调量 $\Delta x_{\max}$ 或最大超调量与稳态下要求达到的被调量的比值 $\sigma\%$ ，即

$$\sigma\% = \frac{x_{\max} - x(\infty)}{x(\infty)} 100\%$$

式中 $x(\infty)$ ——稳态时的被调量之值， $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x(\infty)$ 。图 1-6 上示出 x 各值的大小。

(2) 过渡过程时间。它是从开始干扰作用起到偏差小于一个事先规定的量 Δ 的一段时间。在图 1-6 上以 T 示之。

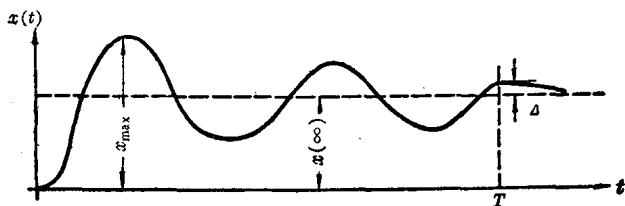


图 1-6 过渡过程曲线