高等学校教学参考书

自动控制原理
学习辅导与习题解答

程　鹏、邱红专、王艳东编著

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内容提要

本书是根据高等工业院校自动控制原理课程大纲，配合程鹏主编《自动控制原理》教材的教学要求编写的，同时也兼顾了大多数高等工业院校硕士研究生入学考试的要求。

书中系统地归纳了自动控制原理的基本内容和分析、研究方法，包括系统数学模型的建立，分析系统的时域法、根轨迹法和频率域方法；线性系统的校正设计；采样系统理论；非线性系统理论，包括相平面法和描述函数法；状态空间方法基础。全书以程鹏主编《自动控制原理》教材的习题解答为主，此外还对自动控制原理的基本要求进行重点讲解。书中有多套模拟题，供学生自我检测时使用。

本书可作为在校本、专科生及成人教育、继续教育学生学习自动控制原理的辅导教材，也可作为报考硕士研究生的考生的复习参考书。

图书在版编目（CIP）数据

自动控制原理学习辅导与习题解答／程鹏，邱红专，王艳东编著．—北京：高等教育出版社，2004.12
ISBN 7-04-015963-5

Ⅰ.自… Ⅱ.①程…②邱…③王… Ⅲ.自动控制理论-高等学校-教学参考资料 Ⅳ.TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 115523 号

策划编辑 金春英 责任编辑 郑欢 版式设计 王艳红
责任校对 朱惠芳 责任印制

出版发行 高等教育出版社 购书热线 010-64054588
社 址 北京市西城区德外大街 4 号 免费咨询 800-810-0598
邮政编码 100011 网 址 http://www.hep.edu.cn
总 机 010-58581000 http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×960 1/16 版 次 年 月第 1 版
印 张 12 印 次 年 月第 次印刷
字 数 390 000 定 价 26.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究
物料号 15963-00

前　言

目前,自动控制技术已广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防建设。指导自动控制系统分析和设计的控制理论也有了很大的发展,它的概念、方法和体系已经渗透到许多学科领域,已经成为工科院校的一门重要的技术基础课程。

本书分为两篇。第一篇分为九讲,概述了自动控制原理各部分的基本概念、基本理论和基本方法。每讲包含两节,其中第一节"内容提要"简述了本讲的主要知识点,对这部分内容如果需要详细的了解必须和教材相对应的章节配合使用;第二节"基本要求",概括了学生应当掌握的教学要求;"重点讲解",则是本节的核心内容,汇集了编者在长期教学过程的一些心得和体会,有些内容可以作为习题课、辅导课的素材。第二篇是程鹏主编《自动控制原理》教材全部习题的解答,有的习题还提供了多种解法。附录为六份自我检测练习题,它们均是曾经使用过的完整的试卷。前三份试卷中的每份试卷给定练习时间为三小时;为了便于学生分阶段自我检测,后三份试卷分为上、下两卷,每份试卷的给定时间为两小时。

本书可供电子信息科学类、仪器仪表类、电气信息类、自动控制类专业的学生使用,也可供其他非控制类专业或成人教育、继续教育学生学习自动控制原理课程时参考,并可作为报考硕士研究生的考生的复习参考书。

本书由程鹏、邱红专、王艳东合编,具体分工为:程鹏(第一篇和附录),邱红专(第二篇第一至四章),王艳东(第二篇第五至九章)。由于本书的内容多是在北京航空航天大学自动控制原理课程教学中长期积累而成的,除了前述同仁外,还要感谢教研室的苏媛老师和其他老师,他们的教学经验与教学积累对本书内容的形成起了重要的作用。

本书在编写过程中参考了许多院校专家们编写的教材和习题集,在此表示感谢。

北京航空航天大学
程　鹏
2004 年 9 月

目　　录

第一篇　内容提要、基本要求和重点讲解

第一讲　拉普拉斯变换及其应用 …… 3
1.1　内容提要 …… 3
1.2　基本要求和重点讲解 …… 6
第二讲　自动控制系统的数学模型 …… 11
2.1　内容提要 …… 11
2.2　基本要求和重点讲解 …… 16
第三讲　时域分析法 …… 23
3.1　内容提要 …… 23
3.2　基本要求和重点讲解 …… 31
第四讲　根轨迹法 …… 40
4.1　内容提要 …… 40
4.2　基本要求和重点讲解 …… 44
第五讲　频率域方法 …… 57
5.1　内容提要 …… 57
5.2　基本要求和重点讲解 …… 63
第六讲　控制系统的校正 …… 78
6.1　内容提要 …… 78
6.2　基本要求和重点讲解 …… 83
第七讲　非线性系统理论 …… 93
7.1　内容提要 …… 93
7.2　基本要求和重点讲解 …… 101
第八讲　采样系统理论 …… 111
8.1　内容提要 …… 111
8.2　基本要求和重点讲解 …… 118
第九讲　状态空间方法 …… 128
9.1　内容提要 …… 128
9.2　基本要求和重点讲解 …… 135

第二篇 《自动控制原理》习题解答

第一章 自动控制的一般概念 …… 151
第二章 自动控制系统的数学模型 …… 155
第三章 时域分析法 …… 172
第四章 根轨迹法 …… 188
第五章 频率域方法 …… 208
第六章 控制系统的校正 …… 237
第七章 非线性系统理论 …… 255
第八章 采样系统理论 …… 278
第九章 状态空间方法 …… 290
附录 …… 312
自我检测练习试卷一 …… 312
自我检测练习试卷二 …… 314
自我检测练习试卷三 …… 317
自我检测练习试卷四(上卷,下卷) …… 319
自我检测练习试卷五(上卷,下卷) …… 323
自我检测练习试卷六(上卷,下卷) …… 326
参考文献 …… 330

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第 二 篇
《自动控制原理》习题解答

第一章
自动控制的一般概念

1－1　水箱液面高度控制系统的3种原理方案如图2－1－1所示。在运行中，希望液面高度 *H* 维持不变。

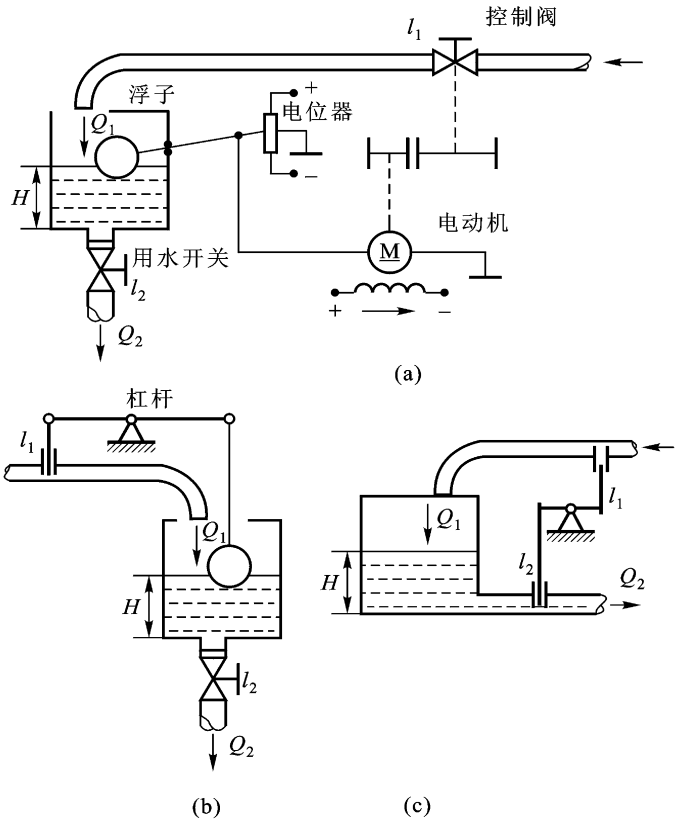


图2－1－1　水箱水位高度控制系统

⑴ 试说明各系统的工作原理。

⑵ 画出各系统的方框图，并指出被控对象、被控量、给定值、干扰量是什

么？

(3) 试说明各系统属于哪种控制方式。

解　图2-1-1(a)所示系统为按偏差调节的反馈控制系统。设电位计的输出电压为零时所对应的液面高度为 H_0，当液面的实际高度 $H \neq H_0$ 时，电位计的输出电压不为零，电动机转动带动控制阀门调整输入流量 Q_1，若 $H > H_0$，应减小输入流量 Q_1，若 $H < H_0$，则增大输入流量 Q_1，直至 $H = H_0$。水箱为被控对象，液面高度为被控量，H_0 为给定值，用水流量 Q_2 是干扰量。系统的方框图如图2-1-2所示。

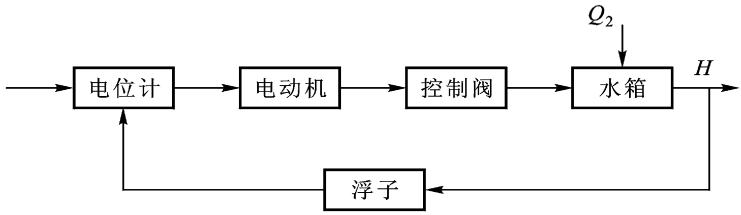


图2-1-2　图1-1-1(a)所示系统的方框图

对于图2-1-1(b)所示的系统，当水箱的输入流量 Q_1 等于输出流量 Q_2 时，液面的高度维持不变，设此时的高度为 H_0。当输出流量 Q_2 改变时，液面的实际高度 H 发生变化，即 $H \neq H_0$，浮子随液面的高度变化上下移动，并带动杠杆调节阀门 l_1，改变输入流量 Q_1，直到 $Q_1 = Q_2$，使得液面在新的高度上维持不变。此系统中水箱是被控对象，液面高度是被控量，希望高度 H_0 是给定值，输出流量 Q_2 为干扰量。此系统属于按偏差调节的负反馈控制系统。系统的方框图如图2-1-3所示。

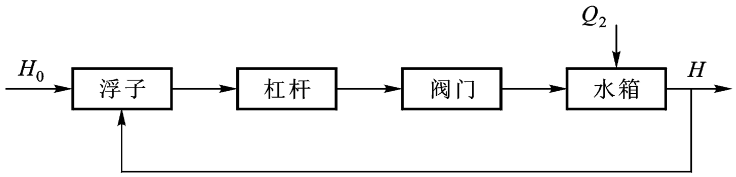


图2-1-3　图2-1-1(b)所示系统的方框图

图2-1-1(c)所示系统的被控量是水箱内液面的高度 H，水箱是被控对象，希望的高度值 H_0 为给定值，输出阀门 l_2 的变化是干扰量。当输出阀门 l_2 改变时，通过杠杆同时调节输入阀门 l_1，改变输入流量，使得液面的高度维持不变。此系统属于按干扰补偿的开环控制系统。系统的方框图如图2-1-4所示。

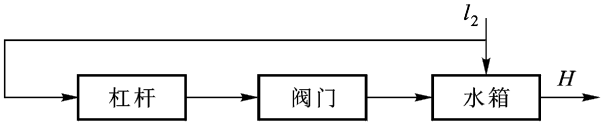


图 2－1－4　图 2－1－1 的所示系统的方框图

1－2　仓库大门自动控制系统的原理如图 2－1－5 所示。试说明自动控制大门开启和关闭的工作原理，并画出系统的方框图。

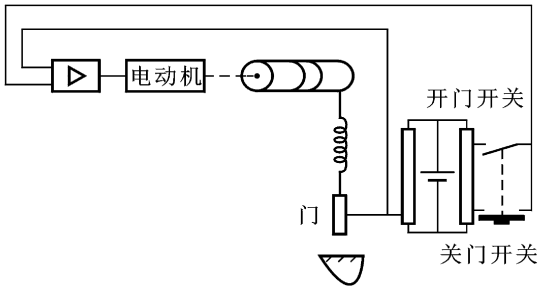


图 2－1－5　大门开、关控制系统

解　当大门处于关闭状态时合上开门开关，电位计电路产生偏差电压，经放大器放大后，驱动电动机带动绞盘转动，使大门向上提升，与此同时与大门连接在一起的电位计滑臂上移，直到桥式电路达到平衡，电动机停止转动。反之亦同。系统的方框图如图 2－1－6 所示。

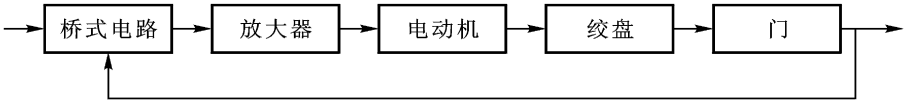


图 2－1－6　大门开、关控制系统的方框图

1－3　位置随动系统的原理如图 2－1－7 所示。试说明系统的工作原理，并画出系统的方框图。

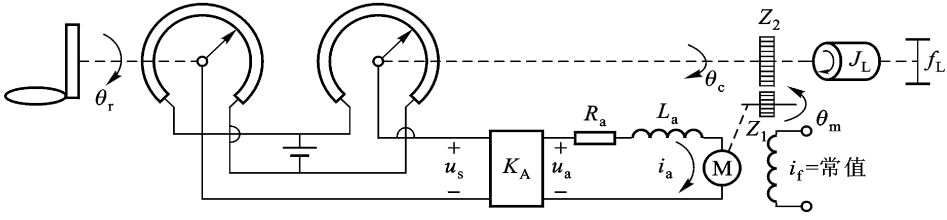


图 2－1－7　位置随动系统

解　由一对电位计组成误差角检测器，当输入手柄的转角 θ_r 与输出轴的转角 θ_c 不同时，检测器输出一个与误差角 $\Delta\theta=\theta_r-\theta_c$ 成正比的电压，经放大器放大后驱动电动机 M 转动，经齿轮机构带动负载转动，使 $\Delta\theta$ 减小，直到 $\Delta\theta=0$ 时，电机停止。系统的方框图如图 2－1－8 所示。

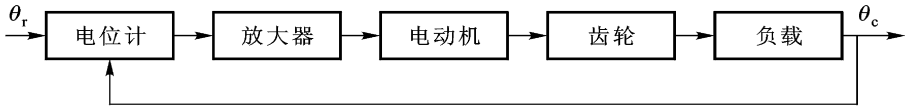


图 2－1－8　位置随动系统的方框图

第二章
自动控制系统的数学模型

2－1　试求下列函数的拉氏变换式，设 $t<0$ 时，$f(t)=0$。

(1) $f(t)=(t+1)(t+5)$

(2) $f(t)=5(1-\cos 5t)$

(3) $f(t)=e^{-0.5t}\cos 10t$

(4) $f(t)=\sin\left(5t+\frac{\pi}{3}\right)$

(5) $f(t)=1-e^{-\frac{1}{T}t}$

解　(1) 原函数 $f(t)$ 可以表示为

$$f(t)=t^2+6t+5$$

可得 $f(t)$ 的拉氏变换式为

$$F(s)=\frac{2}{s^3}+\frac{6}{s^2}+\frac{5}{s}$$

(2) 原函数 $f(t)$ 的拉氏变换为

$$F(s)=5\left(\frac{1}{s}-\frac{s}{s^2+25}\right)=\frac{125}{s(s^2+25)}$$

(3) 根据复位移定理，原函数 $f(t)$ 的拉氏变换为

$$F(s)=\frac{s+0.5}{(s+0.5)^2+100}$$

(4) 原函数 $f(t)$ 可表示为

$$f(t)=\sin 5t\cdot\cos\frac{\pi}{3}+\cos 5t\cdot\sin\frac{\pi}{3}=0.5\sin 5t+0.866\cos 5t$$

则 $f(t)$ 的拉氏变换为

$$F(s)=\frac{2.5}{s^2+25}+\frac{0.866s}{s^2+25}=\frac{0.866s+2.5}{s^2+25}$$

(5) 原函数 $f(t)$ 的拉氏变换为

$$F(s)=\frac{1}{s}-\frac{1}{s+1/T}=\frac{1}{s(Ts+1)}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2－2　求如图2－2－1所示的 $f(t)$ 的拉氏变换式。

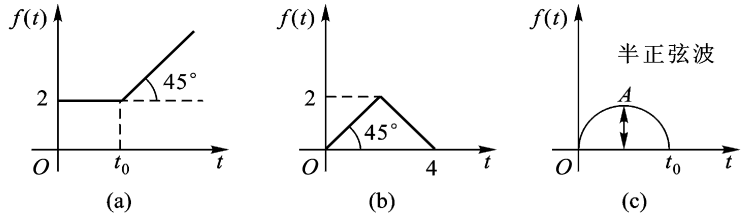


图2－2－1　$f(t)$ 图示曲线

解　(a) 根据所给图可以确定

$$f(t)=2\cdot 1(t)+(t-t_0)\cdot 1(t-t_0)$$

其拉氏变换式为

$$F(s)=\frac{2}{s}+\frac{1}{s^2}e^{-st_0}$$

(b) 根据所给图可以确定

$$f(t)=t\cdot 1(t)-2(t-2)\cdot 1(t-2)+(t-4)\cdot 1(t-4)$$

其拉氏变换式为

$$F(s)=\frac{1}{s^2}(1-2e^{-2s}+e^{-4s})$$

(c) 根据所给图可以确定

$$f(t)=A\sin\frac{\pi}{t_0}t\cdot 1(t)+A\sin\frac{\pi}{t_0}(t-t_0)\cdot 1(t-t_0)$$

其拉氏变换式为

$$F(s)=A\frac{\frac{\pi}{t_0}}{s^2+\left(\frac{\pi}{t_0}\right)^2}(1+e^{-st_0})$$

2－3　求下列函数的原函数 $f(t)$。

(1) $F(s)=\dfrac{s-2}{s^2+4}$

(2) $F(s)=\dfrac{1}{s(s+5)}$

(3) $F(s)=\dfrac{s+7}{(s+1)(s^2+3s+2)}$

(4) $F(s)=\dfrac{1}{s(s^2+s+1)}$

(5) $F(s)=\dfrac{10s}{s^2+4s+8}$

解　(1) $F(s)$ 的拉氏反变换为

$$f(t)=\cos 2t-\sin 2t \qquad (t>0)$$

(2) 原 $F(s)$ 可以分解为

$$F(s)=\frac{1}{5}\left(\frac{1}{s}-\frac{1}{s+5}\right)$$

由此得

$$f(t)=\frac{1}{5}(1-e^{-5t}) \qquad (t>0)$$

(3) 原 $F(s)$ 可以分解为

$$F(s)=\frac{s+7}{(s+1)^2(s+2)}=\frac{6}{(s+1)^2}-\frac{5}{s+1}+\frac{5}{s+2}$$

则 $F(s)$ 的拉氏反变换为

$$f(t)=6te^{-t}-5e^{-t}+5e^{-2t} \qquad (t>0)$$

(4) 原 $F(s)$ 可以分解为

$$F(s)=\frac{1}{s}-\frac{s+1}{s^2+s+1}=\frac{1}{s}-\frac{s+\frac{1}{2}}{\left(s+\frac{1}{2}\right)^2+\frac{3}{4}}-\frac{3}{3}\times\frac{\frac{3}{2}}{\left(s+\frac{1}{2}\right)^2+\frac{3}{4}}$$

则 $F(s)$ 的拉氏反变换为

$$f(t)=1-e^{-0.5t}\cdot\cos\frac{3}{2}t-\frac{3}{3}\cdot\sin\frac{3}{2}t \qquad (t>0)$$

(5) 原 $F(s)$ 可以分解为

$$F(s)=10\left[\frac{s+2}{(s+2)^2+4}-\frac{2}{(s+2)^2+4}\right]$$

则 $F(s)$ 的拉氏反变换为

$$f(t)=10e^{-2t}\cos 2t-\sin 2t \qquad (t>0)$$

2－4　用拉氏变换方法求解下列微分方程。

(1) $\ddot{x}(t)+x(t)+x(t)=\delta(t)$，$x(0)=x(0)=0$

(2) $\ddot{x}(t)+2x(t)+x(t)=1(t)$，$x(0)=x(0)=0$

(3) $\ddot{x}(t)+3.5x(t)+1.5x(t)=0$，$x(0)=x_0$，$x(0)=0$

解　(1) 方程两边取拉氏变换，得

$$X(s)=\frac{1}{s^2+s+1}=\frac{1}{\left(s+\frac{1}{2}\right)^2+\frac{3}{4}}=\frac{2}{3}\times\frac{\frac{3}{2}}{\left(s+\frac{1}{2}\right)^2+\frac{3}{4}}$$

对上式取拉氏反变换，得

$$x(t)=1.15e^{-0.5t}\sin 0.866t \qquad (t>0)$$

(2) 方程两边取拉氏变换，得

$$X(s)=\frac{1}{s(s^2+2s+1)}=\frac{1}{s}-\frac{1}{s+1}-\frac{1}{(s+1)^2}$$

对上式取拉氏反变换，得

$$x(t)=1-e^{-t}-te^{-t} \qquad (t>0)$$

(3) 方程两边取拉氏变换，得

$$s^2X(s)-sx(0)-\dot{x}(0)+3.5sX(s)-3.5x(0)+1.5X(s)=0$$

$$X(s)=\frac{1}{s^2+3.5s+1.5}x_0=\frac{1}{(s+3)(s+0.5)}x_0=\frac{0.4x_0}{s+0.5}-\frac{0.4x_0}{s+3}$$

对上式取拉氏反变换，得

$$x(t)=0.4x_0\ e^{-0.5t}-e^{-3t} \qquad (t>0)$$

2－5　建立下列各机械系统的动态方程。图2－2－2中 $x(t)$ 为输入位移量，$y(t)$ 为输出位移量。

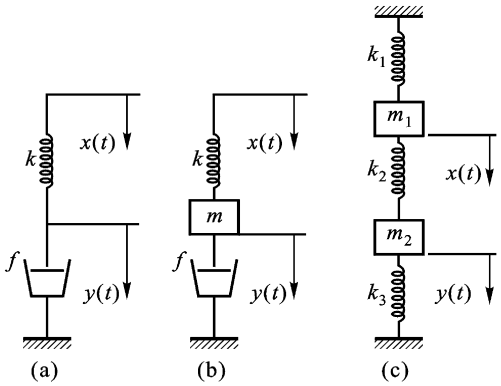


图2－2－2　机械系统

解　(a) 动态方程为

$$f\frac{dy}{dt}=k(x-y)$$

整理得

$$f\frac{dy}{dt}+ky=kx$$

(b) 动态方程为

$$m\frac{d^2y}{dt^2}=k(x-y)-f\frac{dy}{dt}$$

整理得

$$m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}+f\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}+ky=kx$$

(6) 动态方程为

$$m_1\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-k_1x-k_2(x-y)\quad 和\quad m_2\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}=-k_3y+k_2(x-y)$$

由上述两个方程,得

$$m_2\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}+k_3y=-m_1\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}-k_1x$$

2-6　已知圆柱滑阀节流方程为

$$Q=\mu\pi de\sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1-P_2)}$$

流经节流口的流量 Q 随油口开度 e 和油口前后压差 (P_1-P_2) 变化而变化,试建立其在小扰动条件下的线性方程。工作示意图如图 2-2-3 所示。

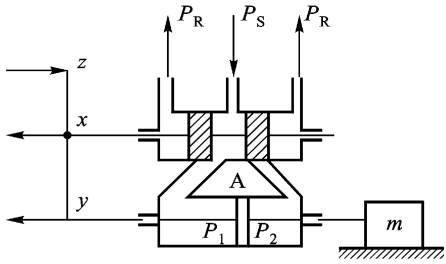


图 2-2-3　滑阀装置示意图

解　(1) 液压伺服电动机的运动方程

设 $Q=Q(e,P_c)$,其中 $P_c=P_1-P_2$,设工作点为 (e_0,P_{c0}),则在工作点附近有以下关系

$$\Delta Q=K_e\Delta e-K_p\Delta P_c$$

其中 $\Delta e=e-e_0$,$\Delta P_c=P_c-P_{c0}$,$K_e=\left.\frac{5Q}{5e}\right|_0$,$K_p=-\left.\frac{5Q}{5P_c}\right|_0$,由于油液流量 ΔQ *与时间微元* $\mathrm{d}t$ *的乘积等于动力油缸活塞的位移微元* $\mathrm{d}y$ *与活塞面积* A *及油液*密度 ρ 的乘积,即

$$A\rho\mathrm{d}y=\Delta Q\mathrm{d}t$$

于是有如下关系式

$$\Delta P_c=\frac{1}{K_p}\left(K_e\Delta e-A\rho\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right.$$

活塞在压差 ΔP_c 作用下产生的作用力等于 ΔP_c 与活塞面积 A 的乘积，即

$$F=\Delta P_c A=\frac{A}{K_p} K_e\Delta e- A\rho\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$$

它与负载的惯性力和摩擦阻力相平衡，即

$$F= m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}+ f\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$$

带载液压伺服电动机系统的运动方程为

$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}+ f\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\frac{A}{K_p} K_e\Delta e- A\rho\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$$

经整理得

$$T\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}= K\Delta e$$

其中

$$T=\frac{m}{f+\dfrac{A^2\rho}{K_p}},\ K=\frac{\dfrac{AK_e}{K_p}}{f+\dfrac{A^2\rho}{K_p}}$$

分别为时间常数和放大倍数。传递函数 $Y(s)/\Delta E(s)$ 为

$$\frac{Y(s)}{\Delta E(s)}=\frac{K}{s(Ts+1)}$$

(2) 杠杆的运动方程

根据如图 2-2-4 所示的几何关系，有

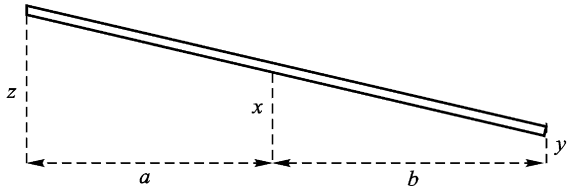


图 2-2-4 几何关系图

$$\frac{z- y}{a+ b}=\frac{x- y}{b}\quad 和\frac{z- x}{a}=\frac{z- y}{a+ b}$$

由

$$\frac{x- y}{b}=\frac{z- x}{a}$$

可得

$$x=\frac{b}{a+ b}z+\frac{a}{a+ b}y$$

由于本题中位移 z 与 y 的正方向相反，所以上述关系式应改为

$$x=\frac{b}{a+b}z-\frac{a}{a+b}y$$

且 $\Delta e=x$。

(3) 系统动态结构图

根据上述分析可以得到带载液压伺服电动机系统的动态结构图如图 2-2-5 所示。

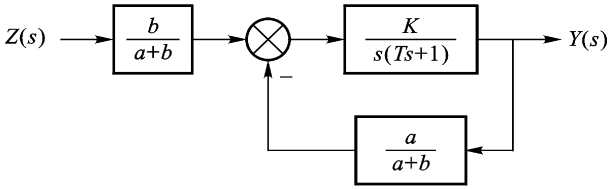


图 2-2-5　带载液压伺服电动机系统的动态结构图

2-7　一齿轮系 Z_1、Z_2、Z_3 和 Z_4 分别为齿轮的齿数，J_1、J_2、J_3 表示各传动轴上的转动惯量，θ_1、θ_2 和 θ_3 为各轴的转角，M_m 是由电动机输出的转矩，如图 2-2-6 所示。试列写折算到电动机轴上的齿轮系运动方程。

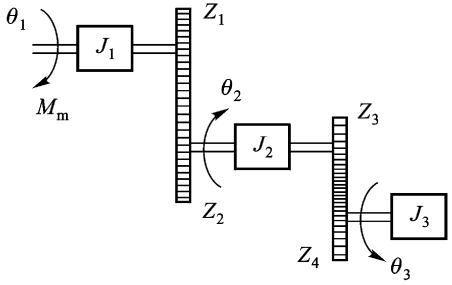


图 2-2-6　齿轮系

解　将各个轴的转动惯量折算到电动机轴上，得到等效转动惯量为

$$J=J_1+J_2\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2+J_3\left(\frac{Z_1}{Z_2}\frac{Z_3}{Z_4}\right)^2$$

折算到电动机轴上的齿轮系的运动方程为

$$J\frac{\mathrm{d}^2\theta_1}{\mathrm{d}t^2}=M_m$$

2-8　列写图 2-2-7 中各无源网络的微分方程，并求出传递函数 $U_c(s)/U_r(s)$。

解　(a) 设复阻抗

需要全本请访问 www.ertongbook.com