

〔美〕 John J. D'Azzo 著
Constantine H. Houpis

黄 炼 译

线性控制系统 的 分析与设计

科学技术文献出版社重庆分社

线性控制系统的分析与设计

〔美〕 John J. D'Azzo 著
Constantine H. Houpis

黄 炼 译

科学技术文献出版社重庆分社

线性控制系统的分析与设计

〔美〕 John J. D'Azzo
Constantine H. Houpis 著
黄 炼 译

科学技术文献出版社重庆分社 出 版
发 行

重庆市市中区胜利路132号

全 国 各 地 新 华 书 店 经 销
中共重庆市委机关印刷厂 印 刷

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 30.5 字数: 77万
1990年2月第1版 1990年2月第1次印刷
科技新书目: 210—337 印数: 1—3 000

ISBN7-5023-0363-4/TP·29 定价: 9.60元

译者的话

《线性控制系统的分析与设计》(Linear Control System Analysis and Design, 第二版)一书,是重庆大学自动化系自动控制理论教研室主任曹长修教授,在美国进修期间请美国加州大学A. M. Schneider和H. W. Sorenson二位教授推荐的。该书是近十年来在美国自动控制科学领域中具有代表性的优秀教材之一。

本书的特点是:从发展的观点,把经典控制理论和现代控制理论有机地结合起来,自始至终都强调了微处理机在自动控制系统分析、设计和校正中的应用,并在附录中介绍了一个TOTAL程序包的概况。

在内容安排上,作者做到了由浅入深、层次分明、重点突出、知识新颖,利用了大量工程实例、例题和图表来阐述物理概念,以便加深读者对内容的理解。各章末尾都有承上启下的小结、参考文献。书末有习题,并对重要习题给出了答案。

本书总共19章,1-11章作者详细地介绍了如何利用状态空间和状态变量分析、设计和校正常见系统。11章以后介绍现代控制理论的基础,重点介绍闭环零极点配置、参数灵敏度、李雅普洛夫第二方法、利用二次型性能指标进行最优设计和本征结构的配置原理及方法等内容。

因此,本书可作为工业自动化、自动控制理论、工业自动化仪表和光电精密仪器等专业本科生的教科书或主要参考

书，也可作为有关专业硕士生的教材。本书对于广大从事光电机械、能源、冶金、电子技术、自动化技术的科研人员和工程技术人员也是必不可少的工具书。

本书1-10章由曹长修教授亲自校核，11-15章由唐小我同志校核，16-19章和习题、附录由刘晓侗同志校核，张帮礼、李良筑、许宏达三位同志对初稿提出了不少宝贵意见。译者在此对各位老师的辛勤劳动及热情的支持表示衷心地感谢。

本书还得到了本校自动化系、科研处、研究生部和图书馆的大力支持，谨此致谢。

为了使该书尽早与读者见面，我双手残废的妻子克服种种困难为我抄写了大量书稿，该书的出版有她的一份功劳。

由于本人水平有限，缺点和错误在所难免，诚恳地希望广大读者批评指正。

重 庆 大 学
黄 炼

一九八六年十二月二十八日

前 言

本书打算对把经典控制理论与现代控制理论有机结合起来的问题进行清楚易懂和目的明确的阐述。作者已尽力对书中的解释、插图、计算公式、表格及符号作了仔细推敲,以使 学生认识到对于更高级的控制内容严格性是必不可少的。同时作者还强调了清晰地理解那些构成现代控制理论的严格理论基础的概念的重要性。书中对于经典控制理论部分作了详尽论述,它们在控制系统的设计和分析中具有一定价值。各种不同方法的介绍有助于学生理解什么是A·T·富勒(Fuller)所称的“神秘的控制系统”。为了保证论述的连贯性,全书的编排上避开了严格的论证,使理解力较强的学生能牢固地掌握有关多变量控制系统所要求的理论。我们的观点是使已经达到了这一程度的学生能满怀信心地作好充分准备迎接更高级的控制理论所提出的挑战。书中还通过一个综合的计算机程序包来强调广泛使用计算机的重要性和必要性。

第二章阐述如何建立适当的微分方程来描述物理系统、网络及装置的性能。该章还介绍一些基本的矩阵代数、方框图和传递函数,并讨论了现代控制理论的基本概念——状态空间。使用的方法是,对于选定的物理系统同时导出系统的状态,向量微分方程及输出方程(单输入单输出)。系统的传递函数与状态方程之间的关系留在第四章讨论。同时给出对于一个物理系统使用拉格朗日方程的数学描述的推导方法。

第三章的前半部分讨论解微分方程的经典方法及所得到的响应特性的性质,所采用的方法几乎与早期教科书中的一样。然而,一旦引入状态方程,就仔细讨论它的解。阐明状态转移矩阵的重要性,推导状态转移方程,紧接着将解释本征值的概念,并把这一理论与凯莱-哈密顿(Cayley-Hamilton)和西勒维斯特(Sylvester)定理结合起来用于计算状态转移矩阵。

第四章一开始就综合介绍拉普拉斯(Laplace)变换方法及零极点图。在讨论用拉普拉斯变换解状态方程之前,先介绍一下矩阵代数的某些深入的知识。最后将对转移矩阵的计算方法作详细说明。

第五章一开始就用通常的方框图来描述系统,随后利用信号流图直观地给出系统的仿真图和确定状态转移方程。通过由系统的传递函数推导出并联的状态图,其优点是可以得出具有解耦形式的状态方程。随后论述将系统矩阵化为对角形的方法。本章的特点是清楚地叙述如何把一个具有复数特征值的A矩阵变换成一个相应的分块对角形及伴随形矩阵。

第六章将采用和早期教科书*一样的方法来研究系统特征,包括系统类型和系统跟踪多项输入的能力之间的关系。

第七至十一章与早期的教科书有同样的章节,内容基本上相同,但篇幅被压缩了。第七章详细讨论根轨迹法。第八、第九章讨论频率响应法,其中使用了对数坐标和极坐标。这两章包括以下内容:奈奎斯特(Nyquist)稳定性判据,S平面(频域)和时域之间的关系,以

* J·J·德埃佐和C·H·霍佩斯,反馈控制系统的分析与综合。1966

及达到期望输出响应峰值的增益设置。第十章和第十一章举例说明,采用串联校正及反馈校正系统性能可能得到的改善,还包括设计校正装置的根轨迹法和频率法。

第十二章详尽讨论通过极点配置及全状态反馈获得期望系统特性的方法。同时用简单、直观和正确的方法介绍现代控制理论中非常重要的概念——可控性和可观性。虽然只是扼要地介绍,但它为本书其余各章的要求提供了足够的内容,为学习第十五章到十八章的内容提供了必要的基础。

第十三章介绍对于系统参数变化的伯德(Bode)灵敏度概念,以及利用系统输出得到状态反馈中所使用的状态估计值的方法。它可以利用简单的网络或者观测器实现。

第十四章补充介绍一些矩阵代数知识,重点是二次型矩阵。这些知识用于简要讨论从李雅普诺夫(Liapnov)观点考虑系统稳定性的重要内容,本章还介绍了状态空间轨迹及与此相联系的相平面方法。这种方法的特点是,可以把它推广到非线性系统。书中也给出了用线性化处理这些系统的方法。书中提出用李雅普诺夫函数来确定系统的稳定和不稳定性。如第十五章所示,它将被用于建立系统的性能指标。

第十五章一开始就详细地介绍对于单输入单输出系统参数最优方法的性能指标的应用,接着讨论最优控制问题的性质。对于无限时间线性二次型问题的解进行详细的讨论,但是其结果是用李雅普诺夫函数法,而不是用庞特里亚金(Pantryagin)等提出的变分法导出的。这一方法具有启发性,十分有利于初学者。从伯德图和根轨迹的观点对该问题的讨论,强调了在这个课题的基本内容以及现代及经典控制理论的相互关系。

十六章介绍最优线性系统设计的一些方法。强调和估价了这些方法与经典方法之间的联系。此论述虽然仅限于单输入系统,但所得到的这些关系使学生有可能深入了解线性二次型最优控制问题的性质有启发作用。

第十七和十八两章详细讨论多输入多输出系统全特征结构的配置的原理及方法。它将特征值配置推广到同时配置相应的特征向量,并且提供一种方法来使系统的输出响应满足期望的性能指标。

第十九章简单介绍数字控制系统。数字计算机和微处理机的进展使得它们作为控制系统的一个部件具有相当的吸引力,数字补偿的效果已清楚地得到证实。

作者尽力给学习控制工程的学生提供条理清晰、论述清楚和内容切合实际的现代控制理论的描述。本书适合于作为本科生和研究生的入门和过渡性教材。

本书的安排便于从事实际工作的工程师自学。在篇幅允许的情况下,尽力安排了许多各个领域反馈控制系统的例子(电的、航空的、机械的,等),又保持了一本扎扎实实的基本反馈控制教材的特点,从而适合于工程界任何部门学习使用。为了使本书对所有的工程师都具有深远的意义和参考价值,对于各种物理控制系统,作者通过数学模型和方框图抽出它们的共同本质。书中的大部分内容均经受了教学实践的检验,完全适合于作为教材和自学用书。

作者感谢用过本书的所有学生,及审阅了本书并提出了宝贵修改意见的同行们。感谢空军技术学院电气工程系主任R·E·方唐纳(Fontana)博士所给予的鼓励,感谢威斯康星大学电气工程系教授T·J·希金斯(Higgins)博士详细地审阅了本书的原稿。加利福尼亚州立大学长滩分校电气工程系教授R·T·斯蒂芬尼(Stefani)博士的批评和建议是特别有价值的,为重新编排和扩充内容以使其条理清晰奠定了基础。

我们特别感谢英格兰拉夫巴勒工业大学高级讲师、在空军技术大学正式访问的教授D·

麦克林 (McLean) 博士。他不但仔细地审阅了全书，而且也使用本书的一部分内容作为教材。他的理解力和洞察力对于本书在阐述上的清楚性和严格性起了很大作用。作者与他的合作是一种启发式的和心情愉快的尝试。全特征结构配置的重要概念是基于与英格兰索尔福德大学B·波特 (Porter) 教授共同的研究工作，而且在最后两章广泛地参考了他的著作。

J·J·德埃佐

C·H·霍佩斯

目 录

前 言	(1)
第一章 绪论	(1)
1-1 引言	(1)
1-2 控制系统引论	(1)
1-3 定义	(3)
1-4 历史背景	(4)
1-5 数学背景	(7)
1-6 工程控制问题的一般性质	(8)
1-7 本教材概况	(8)
第二章 系统方程的建立	(11)
2-1 引言	(11)
2-2 电路和元件	(12)
2-3 基础线性代数	(15)
2-4 状态概念	(17)
2-5 传递函数和方框图	(21)
2-6 直线运动机械系统	(22)
2-7 模拟电路	(26)
2-8 旋转运动机械系统	(27)
2-9 热力学系统	(30)
2-10 液压线性执行机构	(32)
2-11 正位移旋转液压传动	(35)
2-12 液位系统	(37)
2-13 旋转功率放大器	(38)
2-14 直流伺服马达	(39)
2-15 交流伺服马达	(41)
2-16 拉格朗日方程式	(42)
2-17 小结	(44)
第三章 微分方程的解	(46)
3-1 引言	(46)
3-2 控制系统的输入	(46)
3-3 稳态响应: 正弦输入	(47)
3-4 稳态响应: 多项式输入	(48)
3-5 瞬态响应: 经典法	(49)

3-6	时间常数的定义	(51)
3-7	例: 二阶机械系统	(52)
3-8	例: 二阶电系统	(53)
3-9	二阶系统的瞬态响应	(54)
3-10	时间常数的详细说明	(56)
3-11	状态变量方程	(56)
3-12	特征值	(57)
3-13	状态转移矩阵的计算	(58)
3-14	状态方程式的完全解	(60)
3-15	状态方程的计算机求解	(61)
3-16	小结	(62)

第四章 拉氏变换 (64)

4-1	引言	(64)
4-2	拉氏变换的定义	(64)
4-3	简单函数拉氏变换的推导	(65)
4-4	拉氏变换理论	(66)
4-5	拉氏变换在微分方程中的应用	(67)
4-6	反变换	(68)
4-7	赫维赛德部分分式展开定理	(69)
4-8	求部分分式的捷径	(74)
4-9	部分分式系数的图形解释	(75)
4-10	由零极点图确定频率响应	(77)
4-11	极点位置与稳定性	(79)
4-12	脉冲函数的拉氏变换	(79)
4-13	具有脉冲激励的二阶系统	(80)
4-14	矩阵运算及矩阵特性的补充知识	(81)
4-15	状态方程的解	(85)
4-16	传递函数矩阵的计算	(86)
4-17	小结	(87)

第五章 系统的描述 (89)

5-1	引言	(89)
5-2	方框图	(89)
5-3	总传递函数的确定	(91)
5-4	标准的方框图术语	(93)
5-5	位置控制系统	(94)
5-6	仿真图	(97)
5-7	信号流图	(99)
5-8	状态转移信号流图	(102)
5-9	由传递函数求并联状态图	(105)
5-10	矩阵的对角化	(106)
5-11	具有复数特征值的矩阵变换	(111)
5-12	将矩阵变换成友型	(113)

5-13 小结	(115)
第六章 控制系统的特性	(117)
6-1 引言	(117)
6-2 劳斯稳定判据	(117)
6-3 数学的和物理的形式	(121)
6-4 反馈控制系统的类型	(122)
6-5 系统类型的分析	(123)
6-6 实例: “Ⅰ”型系统	(127)
6-7 稳态误差系数	(128)
6-8 稳态误差系数的应用	(131)
6-9 小结	(132)
第七章 根轨迹	(134)
7-1 引言	(134)
7-2 特征方程根轨迹的绘制	(134)
7-3 根轨迹的定量分析	(136)
7-4 作图步骤	(138)
7-5 开环传递函数	(138)
7-6 控制比 $C(s)/R(s)$ 的极点	(139)
7-7 幅值条件和相角条件的应用	(140)
7-8 根轨迹图的几何性质(作图规则)	(143)
7-9 例	(149)
7-10 频率响应	(151)
7-11 性能指标	(152)
7-12 传递滞后	(155)
7-13 综合	(156)
7-14 负反馈系统根轨迹作图规则的总结	(157)
7-15 小结	(158)
第八章 频率响应	(159)
8-1 引言	(159)
8-2 正弦函数和时间响应的相互关系	(159)
8-3 频率响应曲线	(160)
8-4 波德图(对数频率特性)	(161)
8-5 一般频率传递函数关系	(162)
8-6 波德图的绘制	(162)
8-7 绘制波德图的实例	(166)
8-8 系统类型和增益与对数幅频特性的关系	(168)
8-9 确定传递函数的实验方法	(169)
8-10 极坐标图	(170)
8-11 小结: 极坐标图	(173)
8-12 逆极坐标图	(174)
8-13 奈魁斯特稳定判据	(176)

8-14	使用极坐标图的奈氏判据应用例子	(180)
8-15	用于具有时间滞后系统的奈氏稳定判据	(182)
8-16	逆极坐标图的奈氏稳定判据的应用	(183)
8-17	逆极坐标图的奈氏判据的实例	(184)
8-18	相角裕量, 增益裕量的定义及其与稳定性的关系	(184)
8-19	对数幅相特性的稳定特性	(186)
8-20	根据尼柯尔斯图 (对数幅-相角) 确定系统的稳定性	(186)
8-21	小结	(188)

第九章 基于频率响应的闭环特性 (190)

9-1	引言	(190)
9-2	直接极坐标图	(190)
9-3	简单二阶系统的 M_m 和 ω_m 的确定	(191)
9-4	正弦响应和时间响应的相互关系	(193)
9-5	在复数平面 $C(j\omega)/R(j\omega)$ 的 $M(\omega)$ 和 $\alpha(\omega)$ 圆(直接图)	(193)
9-6	逆坐标图中的圆	(198)
9-7	单位反馈系统对期望 M_m 值的增益整定: 一般极坐标图	(200)
9-8	对于单位反馈系统为了获得期望的 M_m 的增益整定: 逆极坐标图	(201)
9-9	对数幅-相图上的等 M 和等 α 曲线(尼氏图)	(203)
9-10	利用对数幅-相图进行增益调节	(204)
9-11	零极点图与频域和时域响应的相互关系	(205)
9-12	小结	(207)

第十章 根轨迹补偿(校正) (209)

10-1	引言	(209)
10-2	瞬态响应: 主导复数极点	(210)
10-3	附加的有效极点	(213)
10-4	根轨迹补偿	(215)
10-5	理想的积分串联补偿	(215)
10-6	利用无源元件组成的串联滞后补偿	(216)
10-7	理想的微分串联补偿	(219)
10-8	无源元件的超前补偿	(220)
10-9	一般超前补偿装置的设计	(223)
10-10	滞后-超前串联补偿	(223)
10-11	各种串联补偿的比较	(225)
10-12	反馈补偿引论	(226)
10-13	反馈补偿设计步骤	(227)
10-14	简单的速度反馈补偿	(228)
10-15	速度反馈	(229)
10-16	输出二阶微分反馈	(232)
10-17	反馈补偿的结果	(233)
10-18	速度反馈: 主导复数极点的性能指标	(233)
10-19	小结	(234)

第十一章	串联补偿和反馈补偿：频率响应图	(236)
11-1	引言	(236)
11-2	串联补偿装置的选择	(237)
11-3	串联滞后补偿装置	(239)
11-4	例：串联滞后补偿	(240)
11-5	超前补偿装置	(242)
11-6	例：串联超前补偿	(244)
11-7	滞后-超前补偿	(245)
11-8	例：串联滞后-超前补偿	(247)
11-9	利用对数图的反馈补偿	(248)
11-10	例：反馈补偿（对数图）	(250)
11-11	小结	(252)
第十二章	闭环零极点的配置（状态变量反馈）	(254)
12-1	引言	(254)
12-2	建立期望控制比	(254)
12-3	吉赖米恩-杜爱克斯尔设计过程	(256)
12-4	状态变量反馈	(257)
12-5	状态反馈的一般特性（利用相变量）	(260)
12-6	状态变量反馈的稳态误差分析	(261)
12-7	稳态误差系数的利用	(263)
12-8	无差系统的定义	(266)
12-9	可控性与可观测性	(267)
12-10	状态变量反馈：全极点系统	(271)
12-11	系统的复数极点	(273)
12-12	状态变量反馈：零极点系统	(273)
12-13	小结	(278)
第十三章	参数灵敏度及不可达状态	(280)
13-1	引言	(280)
13-2	灵敏度	(280)
13-3	灵敏度分析	(282)
13-4	参数灵敏度的例子	(286)
13-5	不可达状态	(286)
13-6	观测性	(288)
13-7	含有观测器的控制系统	(290)
13-8	小结	(292)
第十四章	李亚普洛夫第二方法	(293)
14-1	引言	(293)
14-2	状态空间轨迹	(293)
14-3	线性化(雅可比(Jacobian)矩阵)	(299)
14-4	二次型	(302)

14-5	稳定性	(306)
14-6	李亚普洛夫第二方法	(308)
14-7	李氏方法在线性系统中的应用	(311)
14-8	瞬态调整时间的估算	(314)
14-9	小结	(315)

第十五章 现代控制论导论 (317)

15-1	引言	(317)
15-2	设定时间准则的推广	(318)
15-3	控制面积准则	(319)
15-4	附加性能指标	(319)
15-5	零稳态阶跃误差系统	(321)
15-6	现代控制的性能指标	(323)
15-7	代数黎卡提 (Riccati) 方程	(326)
15-8	例题	(329)
15-9	最优状态变量反馈系统的波德图分析	(331)
15-10	最优状态变量反馈系统的根方轨迹分析	(334)
15-11	高前向增益 (HFG) 条件的确定	(336)
15-12	小结	(338)

第十六章 利用二次型性能指标的最优设计 (341)

16-1	引言	(341)
16-2	基本系统	(341)
16-3	二次型性能指标	(341)
16-4	稳定状态误差要求	(343)
16-5	精确的相互关系 (经典与现代)	(347)
16-6	全极点系统与高阶系统的相互关系	(350)
16-7	高阶系统的相互关系 (零极点系统)	(354)
16-8	相互关系结果的分析	(357)
16-9	一般设计步骤	(358)
16-10	控制加权的作用	(358)
16-11	另一种设计方法	(359)
16-12	16-11节的推广	(363)
16-13	具有变参数的系统	(364)
16-14	小结	(367)

第十七章 线性多变量控制系统的结构特性 (369)

17-1	引言	(369)
17-2	利用控制范式设计单输入单输出系统的状态反馈	(369)
17-3	标准化的控制规范型 (GCCF)	(371)
17-4	利用状态反馈的极点配置: MIMO系统	(375)
17-5	本征结构在时间响应上的影响	(377)
17-6	整个本征结构的配置	(379)

17-7	观测器本征结构的确定	(379)
17-8	小结	(380)
第十八章 利用整个本征结构的配置对线性多变量调节器、观测器和跟踪器的综合 (382)		
18-1	引言	(382)
18-2	调节器的整个本征结构配置的实例	(382)
18-3	不可控系统	(387)
18-4	跟踪系统	(388)
18-5	跟踪系统设计的实例	(389)
18-6	观测器综合的一个实例	(393)
18-7	小结	(394)
第十九章 数字控制系统 (397)		
19-1	引言	(397)
19-2	采样	(397)
19-3	z 变换定理	(400)
19-4	z 域中的综合	(400)
19-5	z 的逆变换	(403)
19-6	零阶保持器	(403)
19-7	数字计算机的补偿	(404)
19-8	小结	(405)
附录A 拉普拉斯变换对表 (406)		
附录B TOTAL: 可互换的数字和连续控制系统的分析和综合的计算机辅助设计程序 (409)		
附录C 指数输入函数 (414)		
习 题 (416)		
部分习题答案 (458)		

第一章 绪 论

1-1 引言

现在，自动控制系统技术已经渗透到所有的高级社会生活。自动控制系统在促进社会的进步与发展中起到了媒介作用。自动烤箱、恒温器、洗衣机和烘干机、计算机、微处理机、空间运载工具，以及提高加工品的产量和质量的控制系统——完全影响到我们的生活方式。控制系统是任何工业社会的组成部分，而且对于生产出能满足日益增多的世界人口所需求的商品也是必不可少的。技术的发展已经使得月球旅行和到外层空间探险成为可能。空间运载工具和航天飞机的成功运行就是由于大胆地使用了大量控制系统所特有的功能。

1-2 控制系统引论

假设图1-1a所示的烤箱调到了所烘烤面包的期望黑度。“黑度”或计时器的旋钮的设定值表示输入量，所烤出面包的黑度是输出量。如果由于面包的各种不同状况或一些其它类似的原因使得黑度不能令人满意，这种状况决不会以任何方式自动地改变加热时间的长短，于是，这种情况可称之为输出量对输入量没有影响。除了定时器单元之外，烤箱加热器部分是整个系统的动态部分。

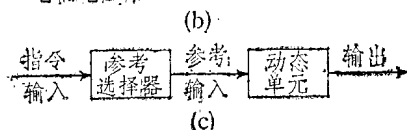
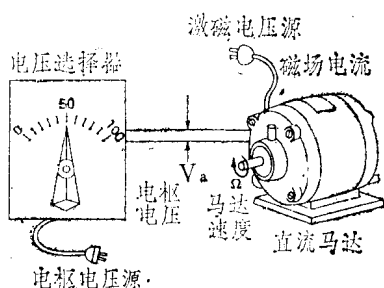
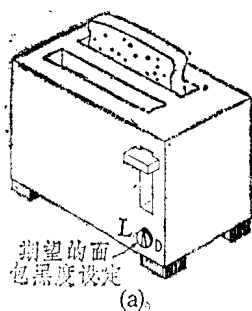


图1-1 开环控制系统

- (a) 自动烤箱 (b) 电动机
(c) 功能方框图

另一个例子是图1-1b的直流并联电动机。对于给定的磁场电流值，为了获得期望的电机转速，必须在电枢两端加一定的电压值。在这种情况下，电动机就是系统的动态部分。如电枢两端的电压是输入量，而轴的转速就是输出量。电机轴上机械负载的变化会引起电机转速偏离期望值，但此偏离决不能改变电枢两端上施加的电压来保持期望的速度。在这个例子中也可以说输出量对输入量没有影响。

输出量不影响输入量的系统称为开环控制系统。上述两个例子可以用方框图表示，如图1-1c所示。烤面包的期望黑度或者电动机的期望转速均为指令输入：烤箱上定时器的时间值或电枢两端外加电压值的选择用一个参考选择方框表示，该方框的输出作为系统的参考输入。该输入加到动态单元，动态单元完成期望的控制功能，它的输出就是期望输出。

人们通过观察实际的输出值，并把它与输入指令值进行比较，可以参与上述系统的控制

作用。当输出偏离期望值，人就可以改变参考选择器的位置以达到期望值。人的作用是将输出进行反馈，并把它与输入量进行比较。

那么，为了使系统输出值等于期望值，就必须使系统输入产生各种所需的变化。因此，反馈作用就是控制动态单元的输入。输出影响到输入的系统称为闭环控制系统。

为了改善闭环控制系统的性能，使得输出量尽可能接近期望的输出量，可以用机械的、

电的或其它形式的比较单元代替人所起的作用。图 1-2 示出一个闭环控制系统的功能方框图。参考输入和反馈信号两者之间的比较产生激励信号，它就是输入和输出两者之差。该激励信号使输出保持在期望值上。

这个系统现在才能称之为闭环控制系统。闭环这个术语的含义就是将输出和输入进行比较，形成激励信号，使输出保持在期望值上。因此，控制系统输出就是为了使其保持在期望值上。

闭环控制系统的例子示于图 1-3 到图 1-5。在图 1-3 中，选择及调整期望的室温（输入命令），并调节恒温器的期望温度设定值（参考选择器）。恒温器

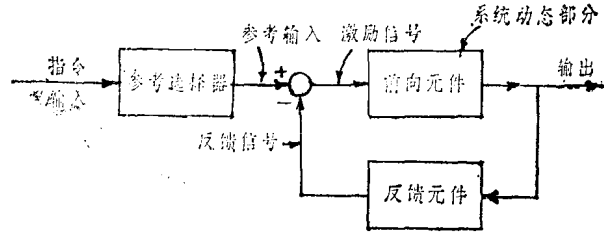


图 1-2 闭环控制系统的功能方框图

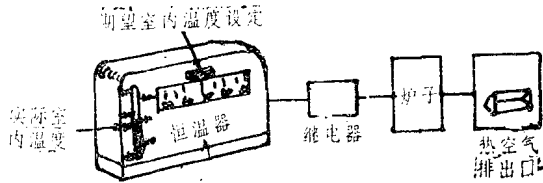


图 1-3 家用空调控制系统

中的双金属线圈受实际室温（输出）与参考选择器设定温度的影响。若室温比期望温度低，则线圈簧片改变其形状，使水银开关闭合继电器，继电器又打开炉子给房间加热。当室温达到期望温度时，线圈簧片形状再次变化，打开水银开关，使继电器复位，从而将炉子关掉。在这个例子里，由于输出（室温）直接被反馈到比较器，因此双金属线圈就起到了比较器的作用。开关、继电器和炉子就是这个闭环控制系统中的动态元件。

对于所有的高层建筑物，最重要的闭环控制系统是图 1-4 所示的自动电梯。电梯中的人按动所要到达楼层的电钮，就产生了一个作用信号，它显示出所要到的楼层并驱动正向部件（控制装置和电梯）。当电梯接近所希望的楼层时，该作用信号就逐渐减少，然后通过适当的开关顺序，电梯就停在此楼层，此时作用信号减到零。芝加哥西尔斯大楼快速电梯的闭环控制系统，就是为了让乘客尽可能舒适地在 1 分钟内上下 103 层楼而设计的。

俄亥俄州赖特-帕特森（Wright-Patterson）空军基地航空材料实验室，已经研制出了一台机器人，这种机器人由综合计算机辅助制造程序控制，它是为航空制造公司的生产线服务的。该机器人称为 6CM Arm，它是第一台“真”的机器人，看起来就象一支巨大的假肢，能

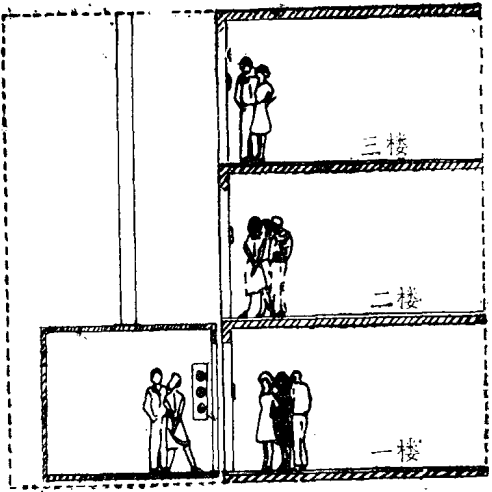


图 1-4 自动电梯