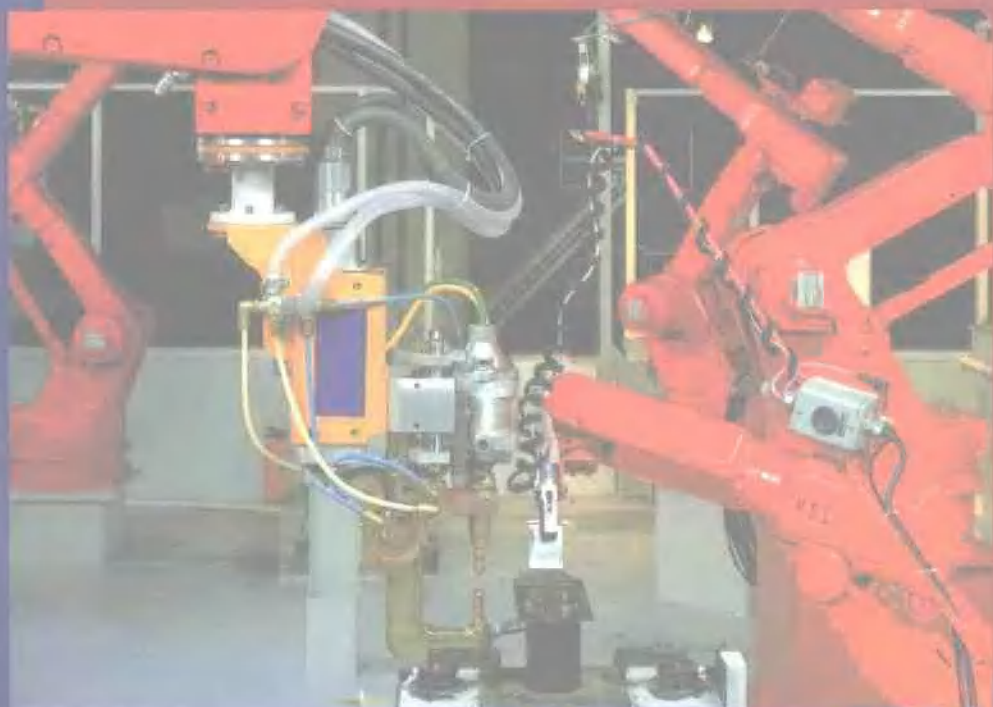




# 机电一体化基础

(日)金子敏夫 著

戈平厚 刘松杨 杨清海 译

刘庆和 赵克定 审



哈尔滨工业大学出版社

# 机电一体化基础

(日)金子敏夫 著

戈平厚 刘松杨 杨清海 译

刘庆和 赵克定 审

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

## 内 容 简 介

本书从理论与实际两方面论述了具有反馈回路的机械装置的自动控制问题。并论述了如何从设计角度达到机电一体化装置的高速、高精度、高稳定性,并具有合理的价格。本书尽量避免难解的数学公式,对基本原理的论述既简洁又不失严密性,使读者易于理解。本书是机械学科学生学习控制工程课程的教学参考书,也是从事机电一体化工程技术人员一本有价值的参考书。

为了便于读者理解,每章后附有习题,并有习题解答。

2/27/35

## 机电一体化基础

Jidian Yitihua Jichu

(日)金子敏夫著 戈平厚 刘松杨 杨清海译  
刘庆和 赵克定 审

\*

哈尔滨工业大学出版社出版发行  
(哈尔滨市南岗区教化街21号 邮编150001 电话0451-6414749)  
哈尔滨工业大学印刷厂印刷  
哈工大出版社电脑排版中心排版

\*

开本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 198 千字

2000年5月第1版 2000年5月第1次印刷

印数 1~2 000 册

ISBN 7-5603-1494-5/TH·78 定价 13.00 元

## 前 言

以前,对机械装置的操作,基本上都是靠人手来进行的。近年来,随着机械技术、电子技术的进步,要求加工作业的快速化,产品质量的均一化;这样,自动化技术得到了发展,并很快地应用到了各个方面。

在自动化技术中,那些采用继电器等器件实现的自动化机械,是很难完成高速、高精度的位置控制或速度控制的。如果采用反馈控制技术,则使上述控制成为可能。

在本书中,对机械装置的自动控制采用反馈回路。为了求得高速、高精度,而且稳定性好、价格便宜,应该如何进行设计这一问题呢?作者从理论上及实际上将作论述。

在本书中,尽量避开难解的数学公式,多采用图形表示。对基本原理的论述既简洁又不失严密性,使人容易理解,因而很适合作为机械学科低学年学生学习控制工学课程的教学参考用书。同对,对从事机电一体化机器研究的工程技术人员来说也是较适合的参考书。

最后,对本书中文版的出版,哈尔滨工业大学机电学院刘庆和教授、赵克定教授给予审定,本书翻译戈平厚、刘松杨、杨清海三位先生付出了辛勤的劳动,在此表示衷心的感谢,同时也对提供帮助的哈尔滨工业大学出版社的先生们深表感谢。

1998年10月

金子敏夫

## 著者介绍

金子敏夫 (KANEKO TOSHIO)

东京工业大学毕业(1951年)。

取得技术士(机械部门)。

取得东京工业大学博士学位。

前东京工科大学教授。

受聘为哈尔滨工业大学顾问教授(1990年7月)。

主要著作：

机械控制工学(日刊工业新闻社出版)。

油压机器及应用回路(日刊工业新闻社出版)。

基于 JIS 标准的油压回路图的读图法·制图法(才一ム社出版)。

数值控制——基础及伺服技术(才一ム社出版)。

为机械技术者的图解伺服技术入门(日刊工业新闻社出版)。

主要社会活动：

- 日本通产省工业技术院标准调查会(一般机械部门)临时委员(1981年~1987年)。
- ISO/TC184(工业自动化)/SC2(机器人)日本委员(1982年~1996年)。
- 实务技能检定协会数字技术检定中央试验委员(1992年~现在)。

# 目 录

|                                                      |      |
|------------------------------------------------------|------|
| 第一章 机电一体化与反馈控制 .....                                 | (1)  |
| 1.1 机电一体化与机械控制 .....                                 | (1)  |
| 1.2 反馈控制的组成 .....                                    | (3)  |
| 1.3 自动控制的发展史 .....                                   | (4)  |
| 1.4 自动控制及其分类 .....                                   | (12) |
| 习题 .....                                             | (13) |
| 第二章 控制系统的解析法 .....                                   | (14) |
| 2.1 概述 .....                                         | (14) |
| 2.2 拉氏变换与传递函数的定义 .....                               | (14) |
| 2.3 拉氏变换的使用条件 .....                                  | (16) |
| 习题 .....                                             | (19) |
| 第三章 基本环节的传递函数 .....                                  | (20) |
| 3.1 比例环节——输出与输入成比例的环节 .....                          | (20) |
| 3.2 积分环节——输出与输入的积分成比例的环节 .....                       | (21) |
| 3.3 微分环节——输出与输入的微分是成比例的环节 .....                      | (22) |
| 3.4 一阶延迟环节(惯性环节)——输出与输入的关系可以用一阶微分方程式<br>来表示的环节 ..... | (23) |
| 3.5 二阶延迟环节(振荡环节)——输出与输入的关系可以用二阶微分方程式<br>来表示的环节 ..... | (24) |
| 3.6 时间滞后环节——输出与输入有一定的时间滞后的环节 .....                   | (25) |
| 3.7 方块图的等价变换 .....                                   | (27) |
| 3.8 直流电动机的方块图及传递函数 .....                             | (31) |
| 习题 .....                                             | (32) |
| 第四章 动态响应 .....                                       | (35) |
| 4.1 响应的概念 .....                                      | (35) |
| 4.2 响应特性的评价——动态响应法 .....                             | (35) |
| 4.3 主要环节的动态响应 .....                                  | (38) |
| 4.4 一阶延迟环节的动态响应 .....                                | (40) |

|            |                         |             |
|------------|-------------------------|-------------|
| 4.5        | 二阶延迟环节的动态响应             | (42)        |
| 4.6        | 小结                      | (43)        |
|            | 习题                      | (43)        |
| <b>第五章</b> | <b>频率响应</b>             | <b>(48)</b> |
| 5.1        | 频率响应的概念                 | (48)        |
| 5.2        | 频率传递函数                  | (49)        |
| 5.3        | 频率响应的表示法                | (50)        |
| 5.4        | 主要环节的 Bode 图            | (53)        |
| 5.5        | 动态响应与频率响应的关系            | (56)        |
| 5.6        | 小结                      | (59)        |
|            | 习题                      | (60)        |
| <b>第六章</b> | <b>反馈控制系统的特性</b>        | <b>(61)</b> |
| 6.1        | 概述                      | (61)        |
| 6.2        | 稳态特性及其性能指标              | (61)        |
| 6.3        | 定位反馈控制的特征               | (66)        |
| 6.4        | 开环控制系统的跃阶响应             | (69)        |
| 6.5        | 闭环控制系统的频率响应             | (70)        |
| 6.6        | 开环系统和闭环系统的频率响应          | (71)        |
| 6.7        | 开环及闭环控制装置的频率响应          | (73)        |
| 6.8        | 小结                      | (76)        |
|            | 习题                      | (77)        |
| <b>第七章</b> | <b>反馈控制系统的稳定性及其评价方法</b> | <b>(78)</b> |
| 7.1        | 概述                      | (78)        |
| 7.2        | 临界稳定                    | (79)        |
| 7.3        | 稳定性评价                   | (80)        |
| 7.4        | 通过增益补偿来改善闭环系统的特性        | (82)        |
|            | 习题                      | (83)        |
| <b>第八章</b> | <b>从控制的角度看机械设计</b>      | <b>(84)</b> |
| 8.1        | 概述                      | (84)        |
| 8.2        | 伺服刚性                    | (85)        |
| 8.3        | 从刚性看驱动部分与机械部分的关系        | (86)        |

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 8.4 从转动惯量看驱动部分与机械部分的最佳关系 ..... | (88)         |
| 8.5 从固有振动频率看驱动部分与机械部分的关系 ..... | (89)         |
| 8.6 驱动马达的输出与机械部分动力的关系 .....    | (93)         |
| 8.7 空动对位置控制的影响 .....           | (96)         |
| 8.8 速度控制的方式 .....              | (98)         |
| 8.9 小结 .....                   | (98)         |
| 习题 .....                       | (99)         |
| <b>第九章 CNC</b> .....           | <b>(101)</b> |
| 9.1 NC 和 CNC .....             | (101)        |
| 9.2 NC 伺服系统 .....              | (103)        |
| 9.3 NC 伺服驱动装置 .....            | (105)        |
| 习题 .....                       | (108)        |
| <b>结束语</b> .....               | <b>(110)</b> |
| <b>答案</b> .....                | <b>(111)</b> |
| <b>附录</b> .....                | <b>(120)</b> |
| 附录 1 拉氏变换与拉氏逆变换 .....          | (120)        |
| 附录 2 拉氏变换公式表 .....             | (121)        |
| 附录 3 拉氏变换表 .....               | (121)        |
| <b>参考文献</b> .....              | <b>(126)</b> |



# 第一章 机电一体化与反馈控制

## 1.1 机电一体化与机械控制

机电一体化这一词,是由代表机械技术的机与代表电子技术的电结合而成的日式英语,从1972年开始就在日本国内使用。现在,英语 Mechatronics 在国际上也被广泛使用着。

机电一体化的意义在于,将机械技术与电子技术结合在一起,在功能上并非单纯地实现  $1+1=2$ ,而是  $1+1=10$ ,使其具有新的意义、新的功能(如图1.1所示)。

近年来,计算机的小型化、高性能化,以及使用计算机而实现的机电一体化技术的普及,正引起产业界乃至整个社会一场巨大的变革。

以机械技术的代表性产品—钟表为例,传统的机械表,在一年内要保证1秒以下的误差,可以说几乎是不可能有的。但是,如果在其心脏部分导入电子技术,就很容易地实现这一目标。

再以车床为例,用传统的手操作车床来加工精度为  $10\mu\text{m}$  以下的工件是极为困难的。但是,如果使用具有电子技术的 NC 车床(数控车床)来加工的话,即使加工精度为  $0.1\mu\text{m}$  的高精度工件也是可能的。

一般来说,产品的质量主要取决于制作它的机械即工作机械的精度。因此,采用了机电一体化技术的 NC 工作机械的精度的极大提高,正成为制造高质量产品的原动力。

另外,电子计算机上使用的磁盘装置(图1.2、图1.3)、打印机等具有高速、高精度的定位装置,以及能代替人类来进行微妙的手工业的机器人(图1.4)等都是采用了机电一体化技术而生产出的代表性产品。充分使用这一类产品,可以提高工厂的生产效率,而且正逐渐成为促进工厂自动化(FA: Factory Automation)的原动力。本书是从控制的观点出发来论述机电一体化的,因此,在此称之为机械控制。

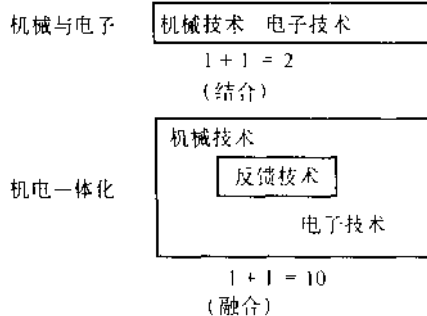


图 1.1 机电一体化的概念

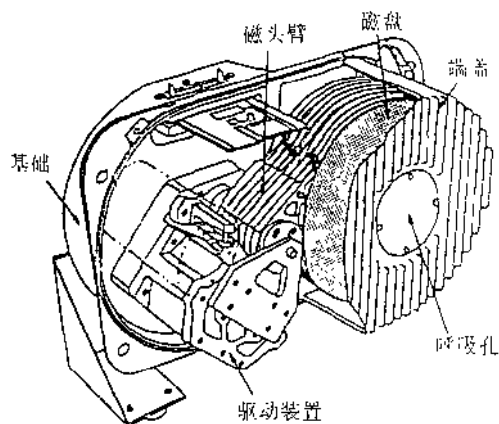


图 1.2 小型磁盘装置

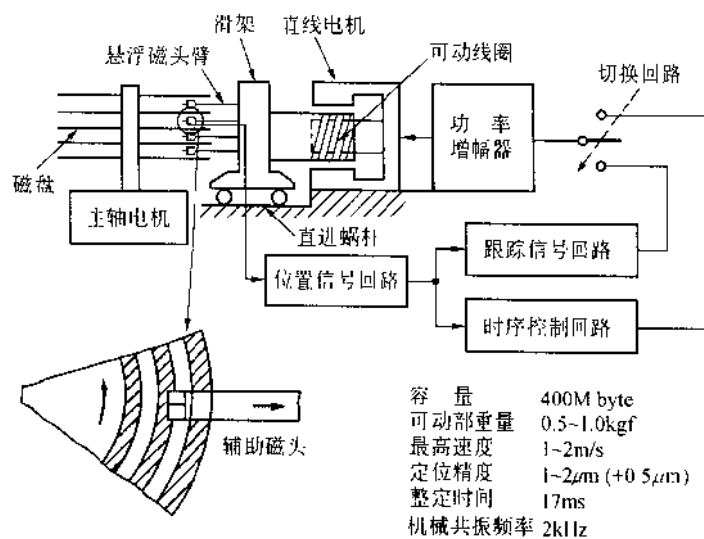


图 1.3 磁头定位系统的构成

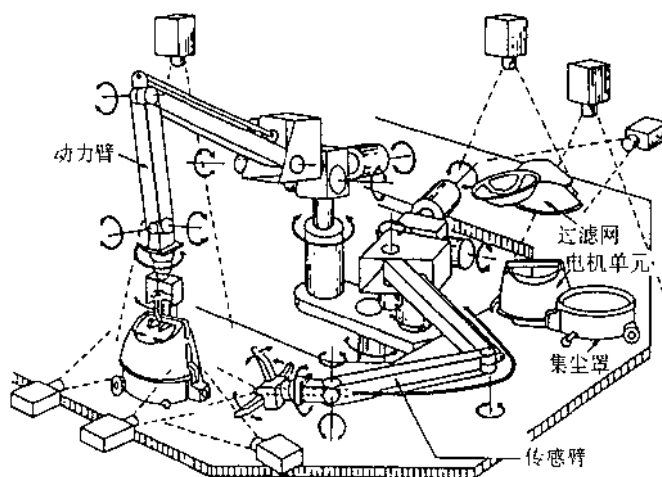


图 1.4 吸尘器自动组装线上的机器人

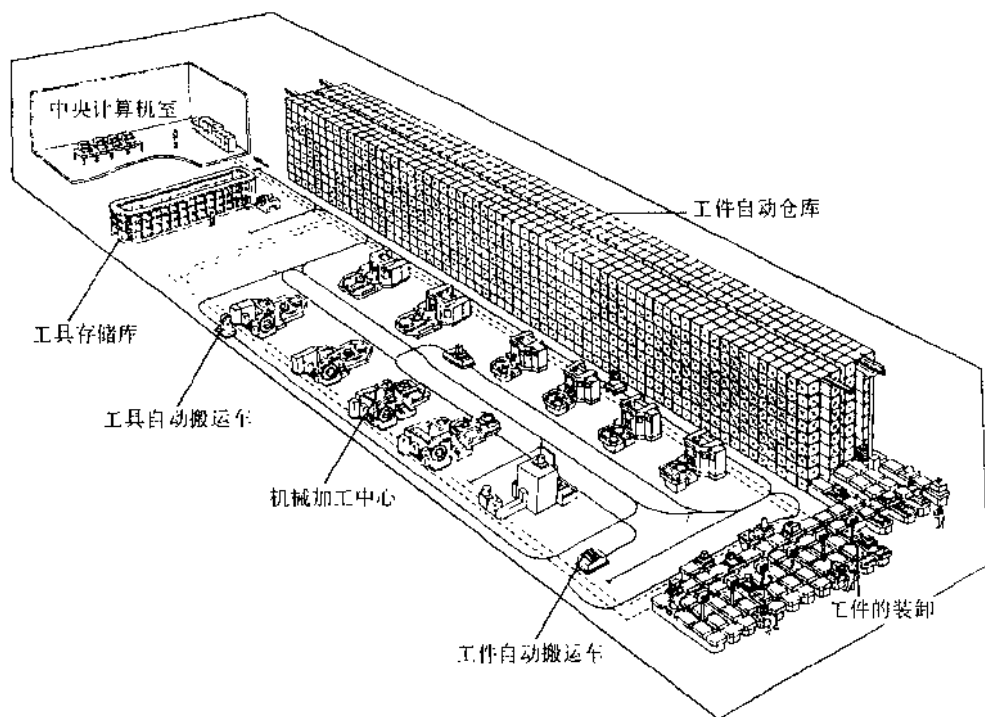


图 1.5 工厂 FA 概观

## 1.2 反馈控制的组成

机械控制的基础是反馈控制。

所谓反馈控制是指“通过反馈,将被控制量与目标值相比较,利用其偏差进行控制并最后减小(或消除)偏差的过程”。

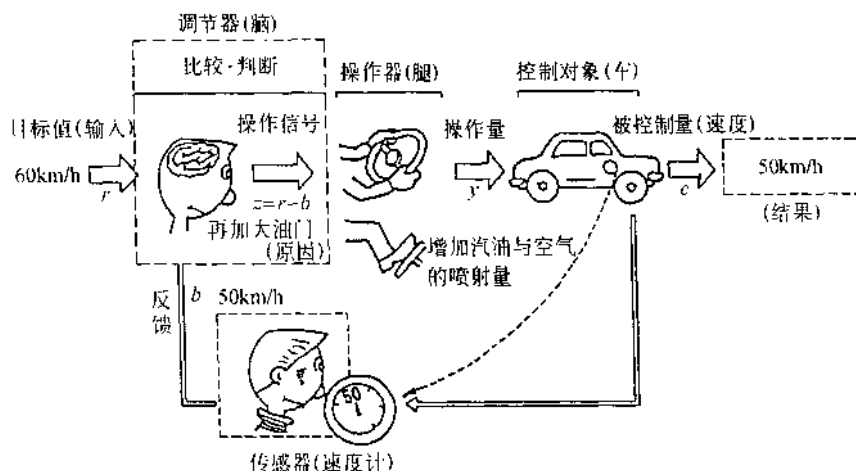


图 1.6 反馈控制的组成

图 1.6 示出了汽车司机控制车速的信号流程图。司机现在决定以“时速 60Km”(目标值)的速度行驶。他看了一下“车速表”(传感器),指针指在“时速 50Km”。这时他的大脑(调节器)作出了“加大油门,必须再将时速提高 10Km”的判断。于是,就将该指令(操作信号)传达给腿部(操作部),腿部根据这一指令,作出“用力踩油门”的动作(操作),于是汽车(被控对象)的速度(被控制量)被提高,反复进行以上动作,即可渐渐提高汽车的速度,最终达到“时速 60Km”的目标值。

像这样“将被控制量的信号拿回到目标的输入端与之进行比较”的这一过程,我们称之为反馈。如果被控量与目标值有差异时,能够消除这种差异的反馈我们称之为负反馈。

这种采用了负反馈的控制方式,具有将汽车的速度准确地控制在目标值上的优良特性。

### 1.3 自动控制的发展史

在大约 200 年前,为了维持蒸汽机速度的恒定而发明的调速机,被人们认为是自动控制的最初应用实例。

在本节中,我们追溯一下 100 多年来调速机控制技术所经过的发展历程,对反馈控制这一新概念是如何产生、如何普及的作一论述,同时对控制工学这一新领域的发展史作一介绍。

#### [1] 蒸汽机的离心调速机

18 世纪,蒸汽机发展迅速,广泛应用于制造业中,在拖动纺织机械、制粉机等机械进行旋转时,必须维持回转速度的恒定。18 世纪中叶,英国的制粉机是采用风车使石臼旋转作为动力的,维持其速度的恒定,就可以控制粉的粗细。在这个速度控制中,采用了带调节器的升降式煤水车(如图 1.7 所示)。

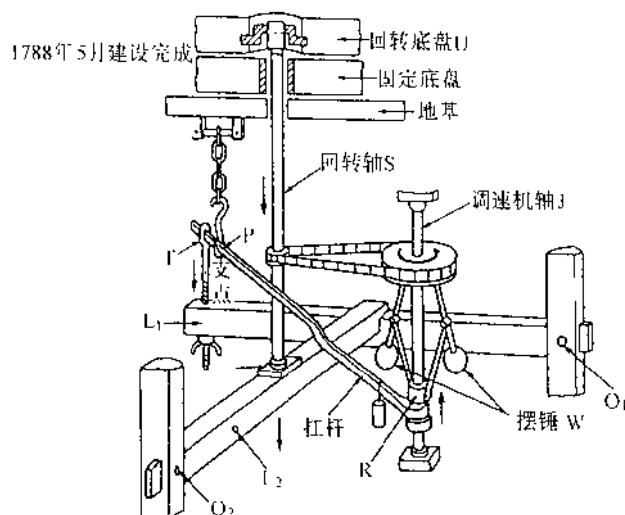


图 1.7 能控制石臼间隙恒定的制粉机

当时, Mathew Boulton 和友人 James Watt 所经营的 Boulton and Watt 公司,在 Thames 河沿岸的 Allbion 设立了制粉工场,用自制的两台蒸汽机拖动 20 台石臼旋转。为了调节旋转速度,设置了升降式煤水车(1788 年 5 月)。该装置是由 Thomas Read 于 1787 年所发明,广泛应用于拖动石臼的旋转速度的控制中<sup>①</sup>。



Watt 由此得到启发,认为如果将蒸汽机的旋转速度变成离心力,利用该力去调节蒸汽机蒸汽流量的控制,就能维持一定的速度旋转。于是,他就着手制作了离心机,并装在了蒸汽机上,如图 1.9 所示,利用摆锤①的离心力,调节蒸汽机的控制阀④的开口,从而维持了蒸汽机的旋转速度的恒定而不受负载变化的影响。在此基础上,Watt 又成功地完成了包含锅炉的压力、水位控制的综合控制系统的设计,并在 1788 年取得了英国的专利(图 1.10)。

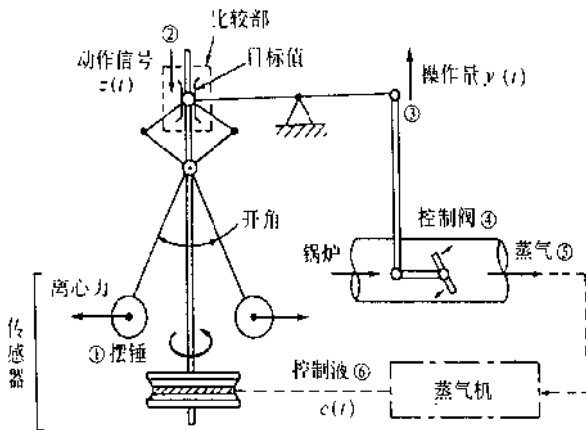


图 1.9 Watt 的离心调速机(1788 年专利)

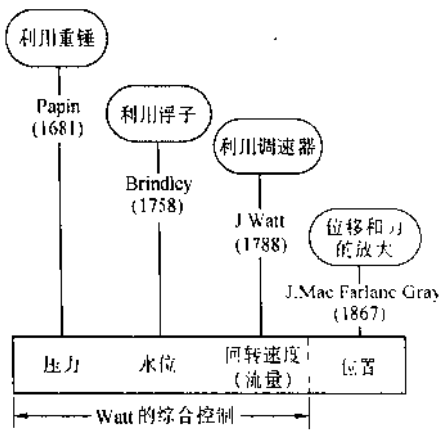


图 1.10 蒸汽机综合控制系统的开发经过

压力、水位、以及旋转速度的单独控制并非 Watt 所发明,但将这些物理量综合起来,完成锅炉的综合控制系统是 Watt 的功绩,受到了人们高度的赞扬和评价。

早期的蒸汽机的输出功率较小,只用摆锤的离心力即可对控制阀的开闭进行操作。随着蒸汽机输出功率的增大,控制阀也变大,因而操作它所需要的力及位移也有必要随之增大。为此,如图 1.11 所示那样,在离心机与控制阀之间加入一伺服机械,以作为辅助驱动设备。但该机构常常会出现原因不明的不稳定动作。

当时,大部分技术工作者仅仅着眼于调速机的改良,以排除该不稳定因素。着眼于蒸汽机与调速机组合起来的系统整体来考察其稳定性是在 19 世纪后半叶,由肯布里奇大学教授 James Clenk Maxwell 最先进行的。

<sup>①</sup> Thomas Read,“采用了离心调速机的制粉用升降式煤水车”(1787 年取得专利)

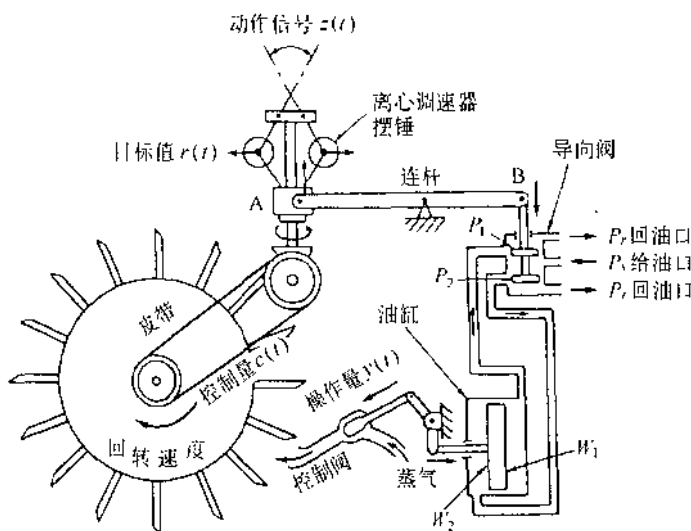


图 1.11 伺服机构的应用例

1868 年,Maxwell 发表了蒸汽机的“关于调速系统研究”的论文,证明了速度控制系统稳定性的必要条件,并提出对控制系统稳定性的充分条件也有必要进行论证。

学友 Edward John Routh(1837 ~ 1907)证明了这一充分条件,从而控制系统的不稳定性问题便得到了解决。然而,Maxwell 与 Routh 关于稳定性理论的研究,并没有对当时英国蒸汽机速度控制系统的改良作出贡献。究其原因,也许是肯布里奇学派的纯理论社会与制作蒸汽机的技术工程社会之间的情报交流较为疏远之缘故<sup>①</sup>。



图 1.12 J. C. Maxwell  
(1831 ~ 1879) 肯布  
里奇大学教授,创  
立了电气电磁学体  
系



图 1.13 A. B. Stodola (1859  
~ 1942)

与此毫不相干,1893 年,瑞士国立工科大学机械学教授 A. B. Stodola 在水轮机的调速装置实验中,也发生了不稳定的问题。对此,该大学的数学教授 A. Hurwitz 从理论上进行了解析。

① 木村悦二郎,自动制御は何が,コロナ社,53 ~ 60

上述 Hurwitz 的证明与 Routh 的证明从形式上看是不相同的,但所证明的内容却是一样的。这在以后研究者的论述中得到了证明,并且将这一理论称为 **Routh—Hurwitz 稳定性判据**。

以蒸汽机、透平机等速度控制的稳定性问题研究为起点的控制系统理论的正式使用,是由 Stein(1926 年)、G. Wunsch(1930 ~ 1941 年)、G. Neuman(1932 年)等人开始并逐渐完善起来。

随着这一研究的发展深入,制造生产自动控制锅炉的公司也逐渐出现,当时,主要有以下几家:

机械式:AEG Askania 公司(德)……控制燃料、空气量,进而控制蒸气的压力。

Smoot 公司(美)

电气式:Siemens 公司(德)

Bailey 公司(美)

Leeds Northrop 公司(美)

在日本,从 1930 年(昭和 5 年)开始,逐渐购入 AEG Askania、Siemens、Bailey、Hagan 等公司的自动燃烧装置,配置并应用于各地的发电站等部门。

在日本,最初出现控制方面的著作是日本 Askania 公司的寒川武技师撰写的《自动控制的理论与实践》(1948 年)。这本书的出版,标志着在日本反馈控制理论已经系统化了。

## [2] 伺服控制技术的发展经过

前面,针对以蒸汽机为主的过程控制技术的发展过程作了论述。与此不同,随着鱼雷兵器、大型船舶、飞行器的出现,拖动自动化的要求逐渐加强,因而诞生了伺服控制技术。下面对其诞生的过程作一论述。

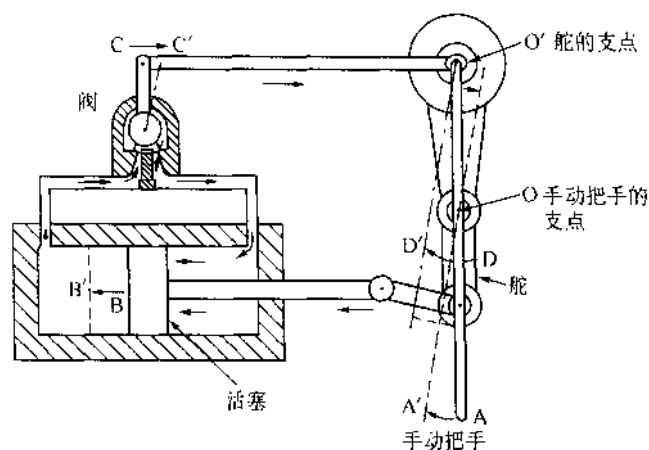


图 1.14 Farcot 的伺服机构(英国专利 1868 年)

18 世纪末,蒸汽机的发明引起了蒸汽船舶的出现,随后向大型化、高速化发展,到 1858 年,排水量约 2 万吨,功率为 8 300 马力的蒸汽巨船 Great Eastern(英)号诞生了。该船的舵位操作最初是由人直接进行手动的,因而操作起来极其困难。于是,就迫切需要开发带有增力器的操舵装置。1867 年 MacFarlane(英)开发了装有伺服机构的操作装置(图 1.14)。解决了巨船 Great Eastern 的舵位操作问题。

伺服机构技术是在鱼雷或船舶的导向装置研究过程中诞生的, Servo - mechanism 这一用语也是从那时出现的。

对于船的舵位取向,由于需要较大的力及位移,所以需要增幅。对此, Jean Joseph Leon Farcot(法)提出了伺服机构的方案,1868 年在英国申请专利时,将其驱动部分命名为“伺服马达”<sup>①</sup>,于是,伺服马达这一词就从此开始使用了。

伺服控制虽然是在解决船的舵位取向问题时发展起来的,但后来逐渐应用于各个领域内的位置、角度等量的控制中。

Minorsky(美)等人于 1922 ~ 1948 年间,对船舶的自动导航进行了深入研究,并发表了许多研究成果<sup>②</sup>。这些成果,即使是现在看来也是很优秀的。

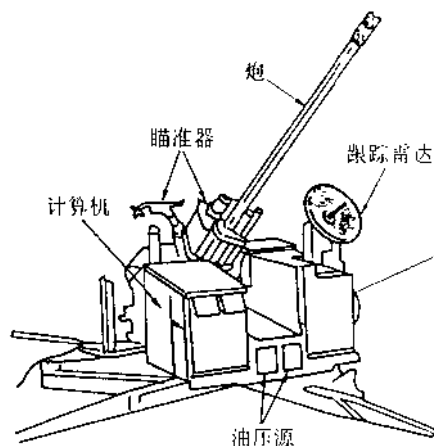


图 1.15 高射炮的射击指挥装置(T-38)

反馈控制这一词在工学领域内的正式出现,是美国 Bell 研究所的 Harry Nyquist 于 1932 年发表了关于“反馈放大器的稳定性研究”的论文之后开始的。

Hazen(美)对伺服机构的理论进行归纳、总结,在 1934 年,发表了伺服机构方面的单行本,在该书中首次对“伺服”这一词给予了定义<sup>③</sup>。

最充分利用 Nyquist 和 Hazen 研究成果的是美国的高射炮射击指挥装置(Gun Fire Control system,简称 FCS)(如图 1.15 所示)的研究组。

这些研究成果,作为反馈控制的解析手段,是以传递函数、频率响应法为基础的。并且从 1930 年代开始,主要在军事研究中得到了发展,并应用于各种兵器的开发上。

### [3] 反馈控制理论的产生与发展

#### (1) 正反馈(提高放大器的放大倍数)

① 在本书中使用马达、电动机等词条,“马达”一词在伺服马达、液压马达等中出现,有时又在直流马达、交流马达词条中出现,与直流电动机、交流电动机等词条并存。本书中,在同一装置中有电动机与液压马达时,则使用“直流马达”或“交流马达”,装置中只涉及电动机,则用“交流电动机”或“直流电动机”。——译者注

② N. Minorsky, Directional Stability of automatically steered Bodies, J. Am. Soc. Naval Eng. 34, 2, 280 (1922, 等多篇)

③ H. L. Hazen, Theory of Servomechanisms, J. Franklin Inst 发行 (1934)

Hazen originally defined a servomechanism: “A power amplifying device, in which the amplifier element driving the output is actuated by the difference between the input to servo and its output”



19 世纪揭开了电气通信的序幕。英美两国经过几度的失败和挑战,终于在 1866 年成功地铺设了横断大西洋的海底电缆(图 1.16)。

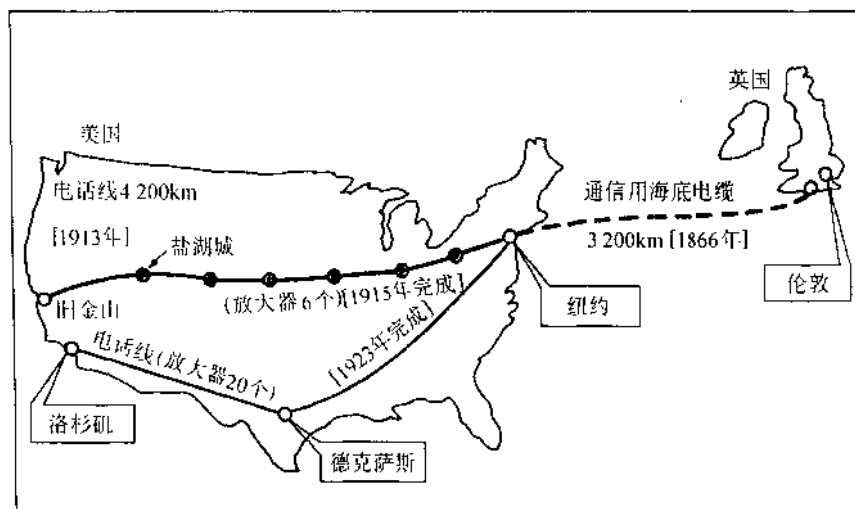


图 1.16 大西洋海底电缆和横断北美的电信电话线

但是,传递的电气信号在 3 200Km 电缆上的衰减是非常严重的,在终端,根本无法识别信号。为了解决这一问题,提出了利用反馈原理制作电子管放大器的方案。

将电子管放大器 A 和 B 如图 1.17 所示那样连接。A 的输出  $y$  作为 B 的输入, B 的输出  $B \cdot y$  反馈到输入端与输入量  $x$  相迭加。这样,放大器的放大率为  $\frac{y}{x} = \frac{A}{1 - AB}$ , 调整 B, 使  $1 - AB < 1$ , 于是, 输出信号  $y$  比原来增到  $\frac{1}{1 - AB}$  倍, 从而解决了电气信号的衰减问题。

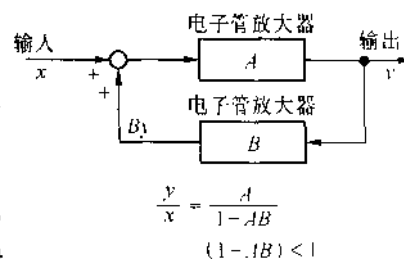


图 1.17 正反馈回路  
(提高放大器放大倍数)

像这样将反馈量  $B y$  加到输入  $x$  上的反馈,通常称之为正反馈。

## (2)负反馈(提高放大器的质量)

随着电气通信的出现,电话也被发明出来了(如图 1.16)。1913 年,在纽约市与盐湖城市之间铺设了长为 4 200Km 的电话线。但由于信号的衰减与噪声的影响。在末端根本听不到说话的内容。因此就迫切需要开发高质量的放大器,将其设置于传输线中,以解决衰减与噪声问题。

Bell 研究所的研究员 Harold. S. Black 设计了如图 1.18 所示的回路。将电子管放大器的输出  $y$  作为 B 的输入, B 的输出  $B y$  反馈到 A 的输入端与输入  $x$  相减,其差值做为 A 的输入,调节这一差值  $(x - B y)$  使其为 0,这样就可得到与  $x$  成比例的高质量的输出  $y$ 。