



控制系统实践（2）

——2019年春季学期

授课教师：马 杰（控制与仿真中心）
罗 晶（控制科学与工程系）
马克茂（控制与仿真中心）
陈松林（控制与仿真中心）



哈尔滨工业大学 航天学院



本节课内容目录

1

课程学习目标

2

控制系统的发展简史

3

课程主要内容

4

课程相关信息



本节课内容目录

1

课程学习目标

2

控制的发展简史

3

课程主要内容

4

课程相关信息



1 课程学习目标

- ❖ 控制系统的设计的具体内容和流程是什么
- ❖ 什么是控制系统的输入条件，如何进行分析
- ❖ 实际控制系统中存在哪些约束和限制，如何处理
- ❖ 控制设计的思想、原则和方法
- ❖ 对于各类典型的控制系统的分析和设计方法
- ❖ 在实践中学会课程知识的应用



本节课内容目录

1

课程学习目标

2

控制系统的发展简史

3

课程主要内容

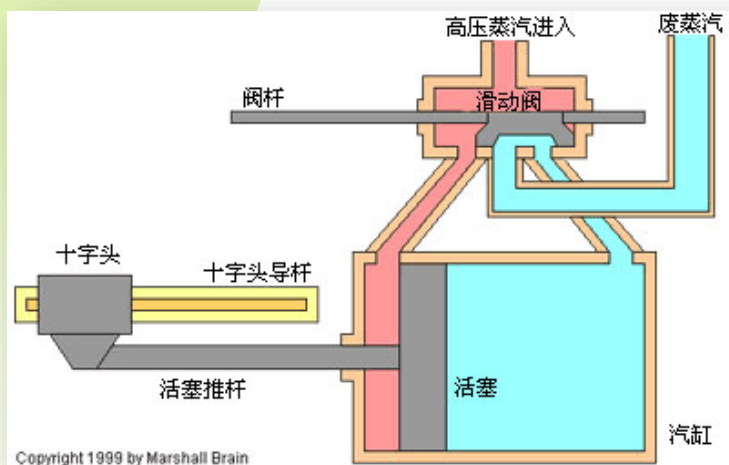
4

课程相关信息



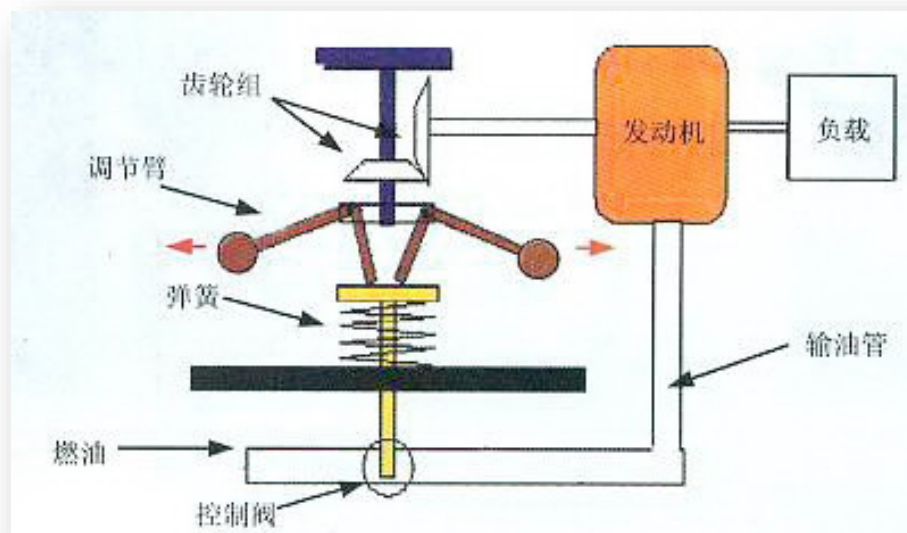
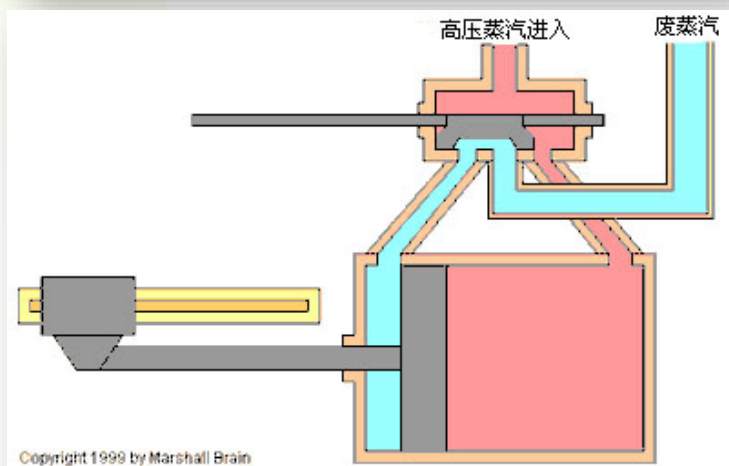
2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展（工业发展、执行器）



1783年瓦特 (James Watt, 1736-1819)

John Rennie(1761-1821) 瓦特调速器





2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展（工业发展、执行器）

James C. Maxwell(1831-1879) 认识到稳定性要求特征方式各根都具有负实部，并尝试用特征方程的系数来建立稳定性的条件。 在1868年发表的“论调节器”。

Edward John Routh) 1877年解决了这一命题，提出著名的Routh（阵列）判据。

$$\begin{array}{cccccc}
 w^n & a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & a_{n-6} & \dots \\
 w^{n-1} & a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & a_{n-7} & \dots \\
 w^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & \dots \\
 w^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & \dots \\
 w^{n-4} & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & \dots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 b_1 = \frac{-1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-2} \\ a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix} & b_2 = \frac{-1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-4} \\ a_{n-1} & a_{n-5} \end{vmatrix} & b_3 = \frac{-1}{a_{n-1}} \begin{vmatrix} a_n & a_{n-6} \\ a_{n-1} & a_{n-7} \end{vmatrix} \dots \\
 c_1 = \frac{-1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ b_1 & b_2 \end{vmatrix} & c_2 = \frac{-1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-5} \\ b_1 & b_3 \end{vmatrix} & c_3 = \frac{-1}{b_1} \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-7} \\ b_1 & b_4 \end{vmatrix} \dots \\
 d_1 = \frac{-1}{c_1} \begin{vmatrix} b_1 & b_2 \\ c_1 & c_2 \end{vmatrix} & d_2 = \frac{-1}{c_1} \begin{vmatrix} b_1 & b_3 \\ c_1 & c_3 \end{vmatrix} & d_3 = \frac{-1}{c_1} \begin{vmatrix} b_1 & b_4 \\ c_1 & c_4 \end{vmatrix} \dots
 \end{array}$$



2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展（工业发展、执行器）

这期间俄国学者**维斯托格拉斯基**的论文“论调整器的一般原理”1876年发表在法国科学院院报上。根据当时蒸汽机是无自平衡对象的实际特性，再加上离心机调速器后三阶微分方程，研究了负荷做阶跃变化下的齐次方程的通解。将三阶特征方程式整理成用两个参数来表示的形式

在苏联被视为自动调整理论的奠基人

$$\lambda^3 + \mu\lambda^2 + \delta\lambda + 1 = 0$$

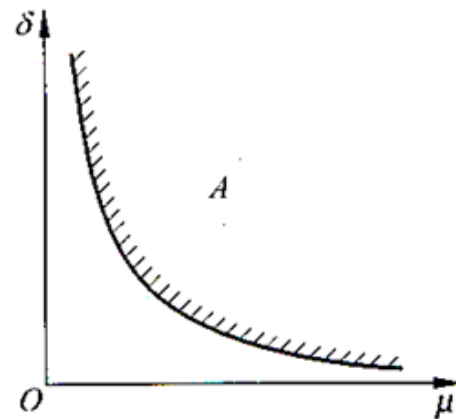


图 1-1 稳定分析用的参数平面



2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展（工业发展、执行器）

1895年瑞士数学家Adolf Hurwitz发表了一篇关于稳定性的论文，当时他并不知晓Maxwell和Routh的工作。Hurwitz判据是考察一系列行列式是否大于零。Hurwitz判据在工程中的应用较广。现在一般将具有负实部的实系数多项式称为Hurwitz多项式。

Hurwitz判据在1894年先成功应用于瑞士达沃斯（Davos）的Spa Turbine Plant 的汽轮机控制设计，据介绍这可能是第一次将稳定条件应用于一个实际的控制系统设计。

$$\Delta_1 = a_1 > 0$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} > 0$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{vmatrix} > 0$$

⋮

$$\Delta_n > 0$$



2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展

俄国伟大数学力学家 A.M.Lyapunov (1857.5.25—1918.11.3) 1892年发表了其具有深远历史意义的博士论文“运动稳定性的一般问题”(The General Problem of the Stability of Motion, 1892)



李雅普诺夫, A. M.

$$V(x) > 0 \quad \dot{V}(x) < 0$$



2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展（航空发展、传感器）

20世纪初美国Elmer Sperry (1860-1930) 完善了陀螺仪，制造了一个可测量俯仰角和滚动角的两自由度陀螺仪用于稳定飞行中的飞机。

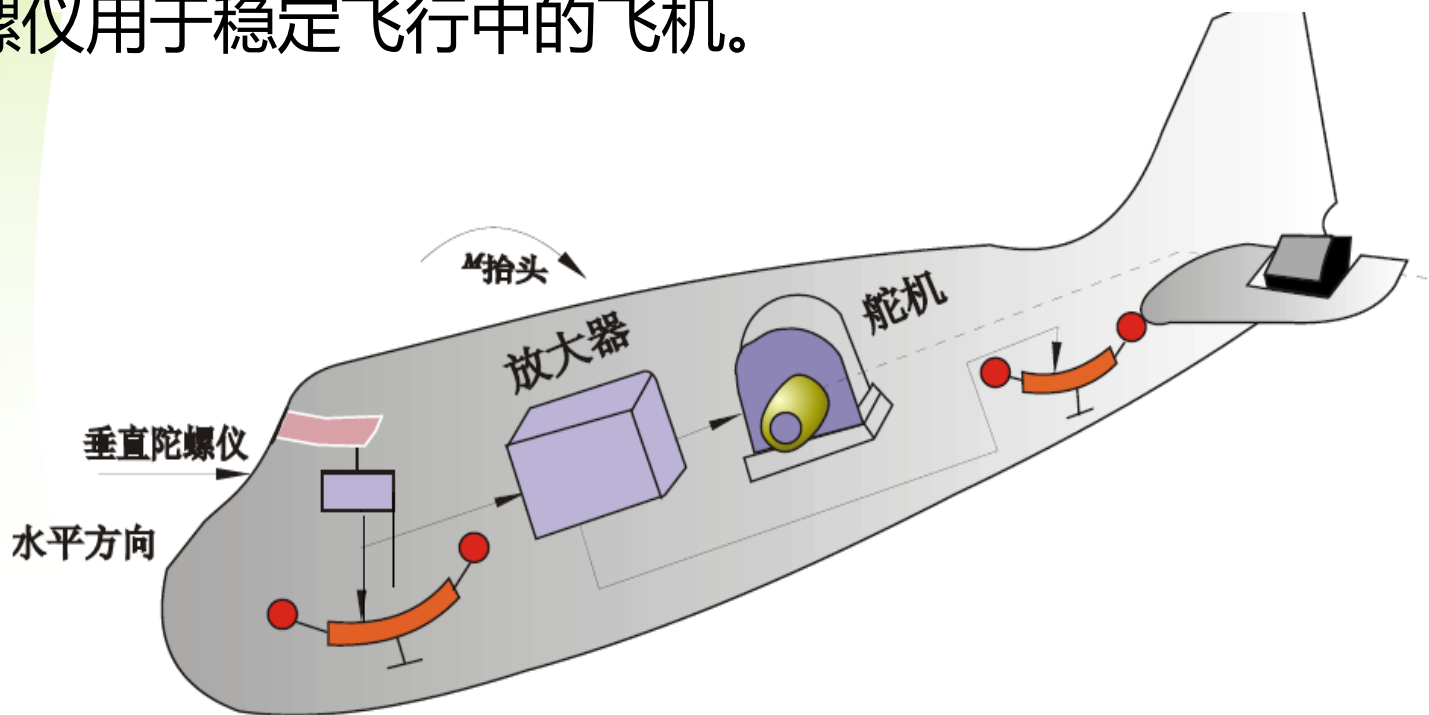




2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展（航空发展、传感器）

20世纪初美国Elmer Sperry (1860-1930) 完善了陀螺仪，制造了一个可测量俯仰角和滚动角的两自由度陀螺仪用于稳定飞行中的飞机。





2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展（航运业发展，执行器）

从19世纪下半叶开始航运业也迅速发展，用蒸汽作为动力，采用曲柄连杆机构将舵的运动反馈回来关闭阀门，并首次使用“**伺服机**”（Servo motor）这一名称来称呼它（1873年）。

液压伺服系统

Ward Leonard的电机-发电机组的位置控制系统

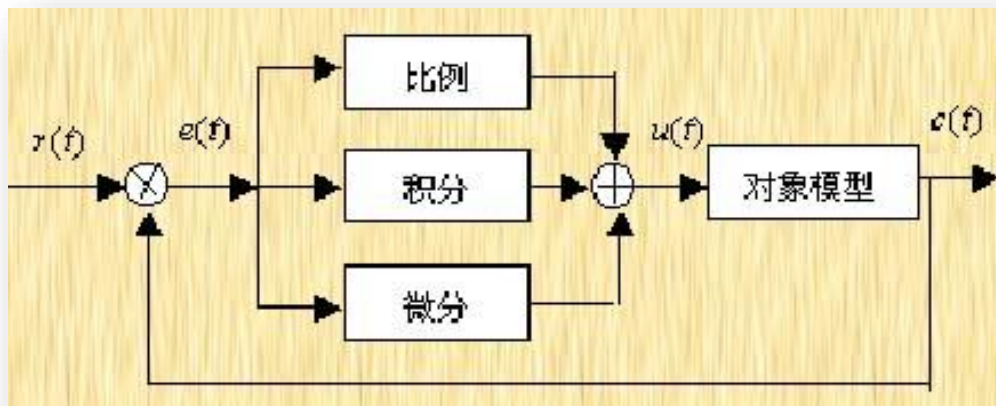


2 控制系统的发展简史

❖ 早期的发展（控制算法）

但总的来说，1930年以前的控制系统都似乎是一些工程师兼发明家的成果，缺少理论上的依据。系统是靠经验来调试的，对结果的评价也只是停留在定性上。

Nicolas Minorsky (1885-1970) 是俄国人，他在俄国海军从事自动舵的工作，他发明了一个能测偏航率的仪表。1922年发表了相应的论文，第一次提出了**PID控制律**。



实践中的规律一定要上升到理论，才能成为科学，反过来指导实践，推动社会进步



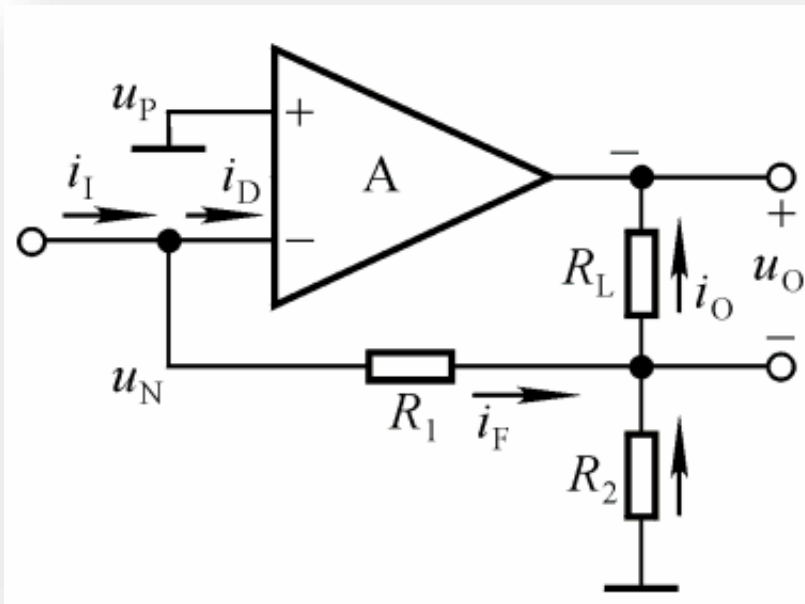
2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间（通信业发展）

Harold Black (1898-1983) 是贝尔实验室 (Bell Labs) 的一名年轻工程师, 1927年突然发灵感, 发明了**负反馈放大器**并提出了专利申请。9年后的1937年, 才被颁发。



1876年英国科学家**贝尔**发明了第一台电话机



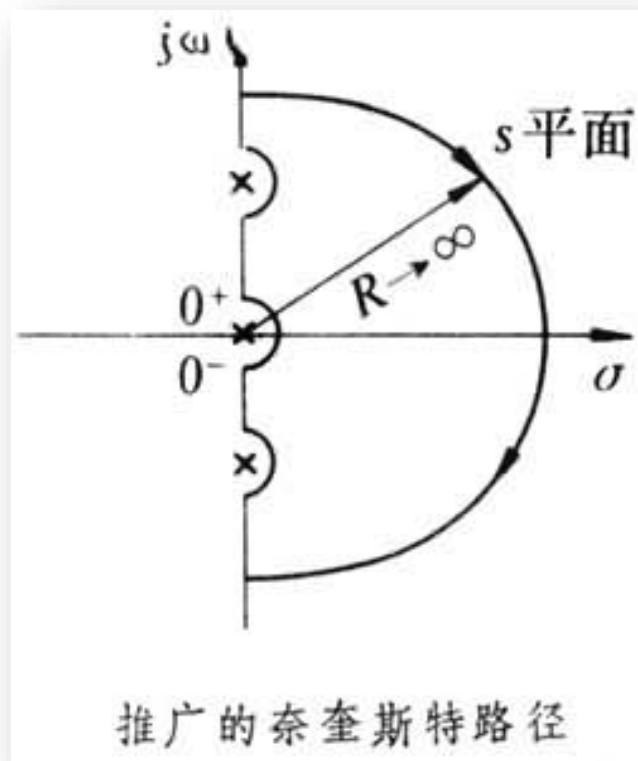
负反馈概念的首次提出



2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间（通信业发展）

Harry Nyquist(1889-1976)
耶鲁大学物理学博士，
AT&T公司的通信工程师
1932提出了“**Nyquist判据**”，
解决了反馈放大器的尖叫
问题。

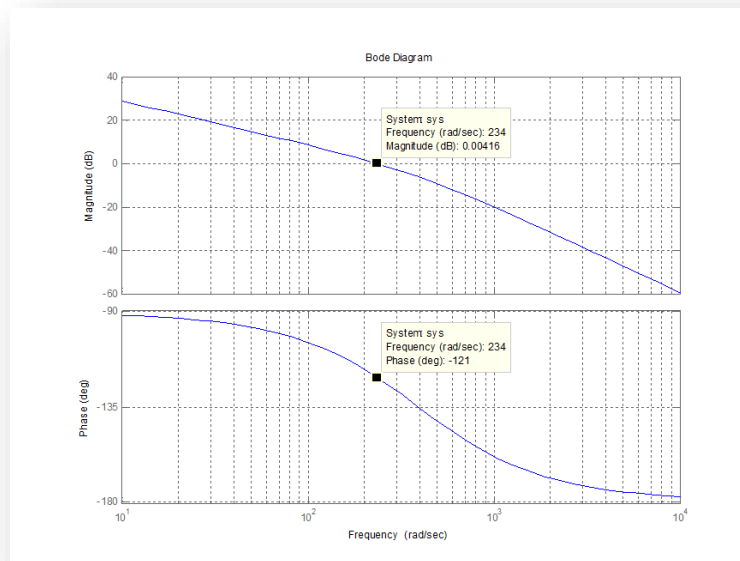




2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间（通信业发展）

Hendrik Bode (1905-1982) 哥伦比亚大学的物理学博士，领导了一组数学家专门对设计方法进行了研究。当时主要是为了扩展通信系统的带宽，提出著名**Bode定理**。Bode引入了**相位裕度**和**幅值裕度**的概念，给出了根据希望频率特性来设计负反馈放大器的方法。

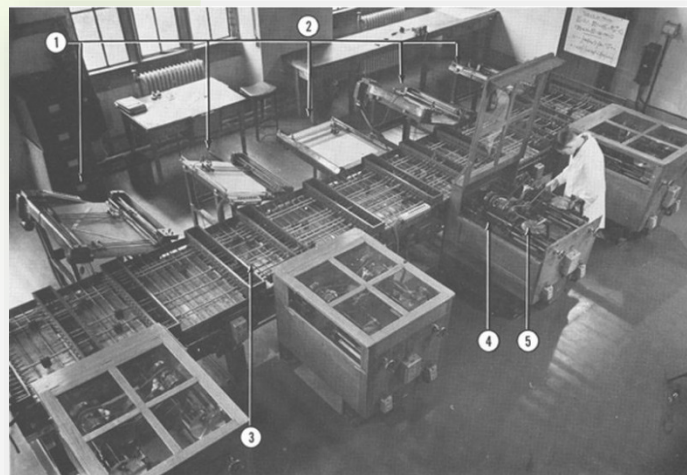
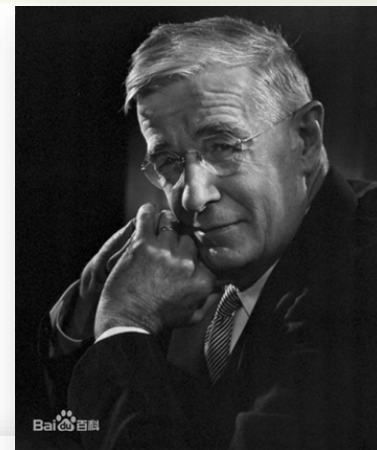




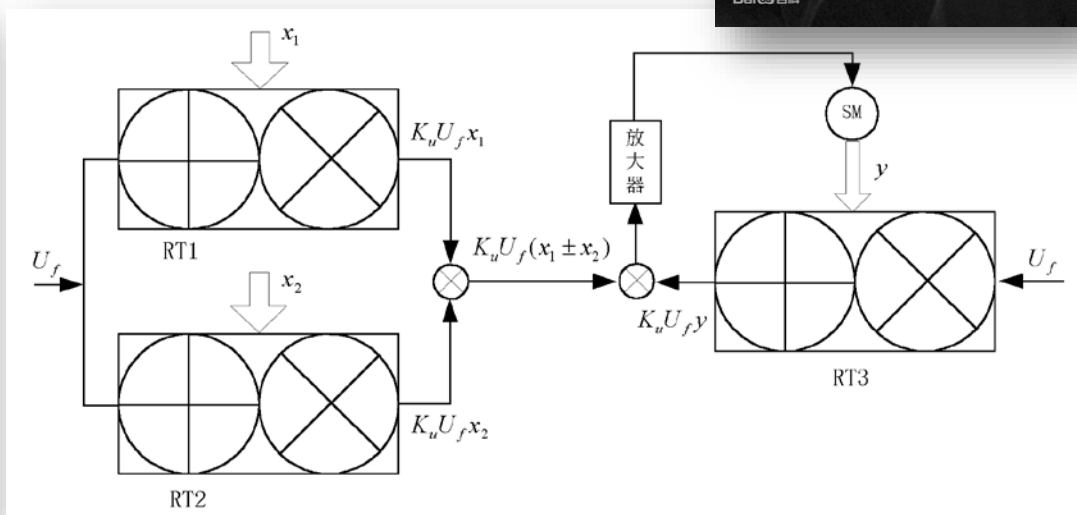
2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间（计算机发展）

Vannevar Bush（后来成为美国罗斯福总统科学顾问）当年在美国麻省理工学院（MIT）从事微分分析仪（**机电模拟计算机**）的研制工作。为了满足运算的**精度和速度**要求。Hazen（1901-1980）自1926进入Bush的课题组以后解决了不少这些高性能伺服系统的设计问题



1 Input table
2 Output table
3 Shafts and gears used for interconnection
4 Torque amplifier
5 Integrator disk



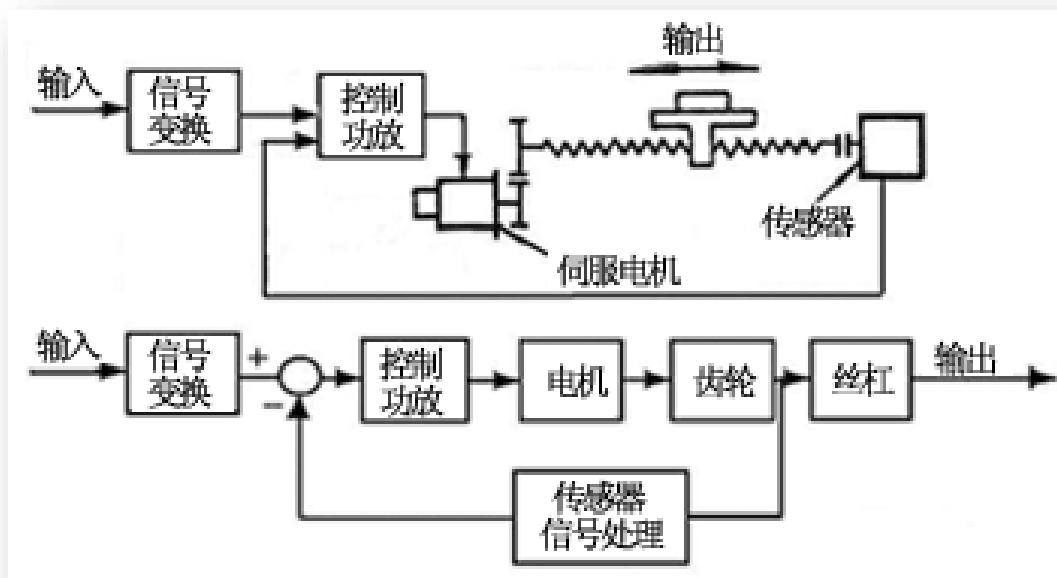


2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间（计算机发展）

在Bush的建议下他将伺服系统的理论整理出来，1932年下半年至1933年，Hazen用了一年多的时间写出了“**伺服机构理论**”等两篇论文，发表于1934年。在文章里Hazen还对伺服机构下了定义。

一个功率放大装置，
其放大部件是根据
系统的输入与输出
的差来驱动的





2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间（计算机发展）

Hazen在文章中分析了继电型伺服系统的问题，他的工作标志着伺服系统从继电型到连续系统的转变，开始了一种根据过渡过程的响应特性来设计系统的时代。可以说是30年代的MIT学派。一直到1943年他们才开始将过渡过程与频率响应联系起来，用M圆作为性能指标。

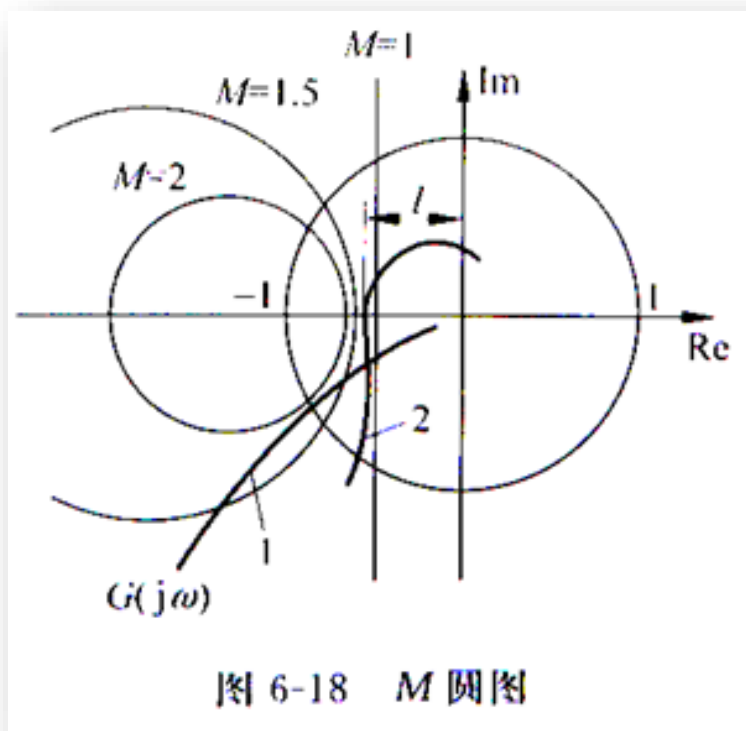


图 6-18 M 圆图

$$M_r \quad \omega_b$$



2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950期间（电子行业，控制器）

1940年几家大公司开始生产PID调节器，但是PID的推广还需要解决参数整定问题。Taylor公司派的Nichols（1914-1997）去MIT用V.Bush的微分分析仪来研究参数的整定，1942年Ziegler和Nichols在ASME Transactions上发表了有名的Ziegler-Nichols参数整定准则，并且沿用至今。

控制规律	K_C	T_I	T_D
P	$\frac{1}{K_p} \times \frac{T_p}{\tau}$		
PI	$0.9 \times \frac{1}{K_p} \times \frac{T_p}{\tau}$	$3.3 \times \tau$	
PID	$1.2 \times \frac{1}{K_p} \times \frac{T_p}{\tau}$	$2.0 \times \tau$	$0.5 \times \tau$



2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间（武器系统）

Nichols在MIT参加了当时最先进的火控雷达SCR-584的角度跟踪系统，在研制过程中Nichols提出了至今仍很实用的图解设计工具-Nichols图。

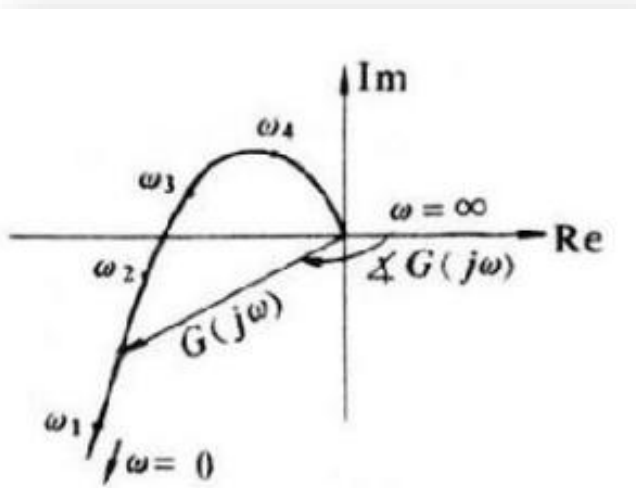


图 1 奈奎斯特图

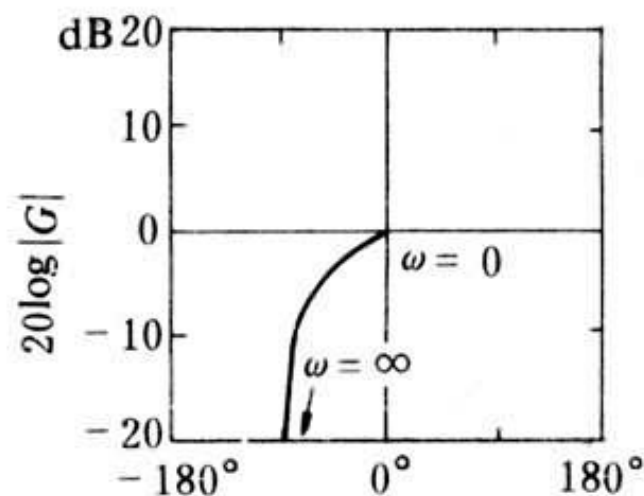


图 3 尼科尔斯图



2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间（武器系统）

1941年贝尔实验室赢得了美国陆军的研制火炮指挥仪的合同，这是一种基于伺服系统的解算装置。贝尔实验室是从**频率响应**起家的，而MIT的火控雷达或火炮伺服系统是从**时间响应**来设计的。这一时期两个机构各自的系统**从性能和带宽等指标协调到一起**。

美国电气工程师W. R. Evans发表了两篇论文，基本上建立起**根轨迹法**的完整理论为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具，被广泛应用于反馈控制系统的分析、设计中。

在经典控制理论中，根轨迹法占有十分重要的地位。它同**时域法，频域法**融合在一起就形成了大家所见到的**经典理论**。



2 控制系统的发展简史

❖ 1950年以前的发展总结

- 蒸汽机（执行器）的出现引出了调速器的问世，调速器的普及使其控制系统的稳定性问题受到关注，出现了Routh-Hurwitz等稳定性，Lyapunov稳定性理论；
- 姿态测量传感器的发明促使自动驾驶仪这一具有划时代意义的控制系统出现；
- PID控制器出现，航运业的发展促使了PID控制器的应用和成熟，使控制器和执行器传感器得以分离，便于调节；
- 机电模拟计算机（对快速性和精确性有特殊要求）的出现使伺服机构理论得到了发展，也解决了PID控制参数整定问题；
- 通信系统的发展，使得Nyquist和Bode图这两种图形工具得以问世，也引出了一些新的稳定性判据和概念；
- 各种武器系统的研制促进了时间响应法、频率响应法的发展和融合；
- 根轨迹方法的出现使得经典控制理论的形成。



2 控制系统的发展简史

❖ 1930-1950年期间

20世纪50年代，反馈控制系统的理论定型，多本有关经典控制的经典名著相继出版，包括

- H·Bode 《Network Analysis and Feedback Amplifier》 (1945)
- L·A·Maccoll 《Fundamental Theory of Servomechanisms》 (1945)
- Norbert Wiener, 1894-1964 《Cybernetics or Control and Communication in the animal and the machines》 (1948)
- 钱学森的《控制工程论》 (Engineering Cybernetics) (1954)



2 控制系统的发展简史

❖ 1950年后

“二次世界大战中，火炮、雷达、飞机以及通讯系统的控制研究直接推动了经典控制的发展。五十年代后兴起的现代控制起源于冷战时期的军备竞赛，如导弹（发射、操纵、制导及跟踪）、卫星、航天器和星球大战，以及计算机技术的出现” - 英国科学家（A·J·G·Macfarlane）



2 控制系统的发展简史

❖ 1950年后

- (1) 苏联L·S·Pontryagin发表最优过程数学理论，提出极大值原理 (Maximum Principle) (1956)
- (2) 美国R·Bellman在RAND Corporation数学部的支持下，发表著名的Dynamic Programming，建立最优控制的基础 (1957)
- (3) 国际自动控制联合会 (IFAC) 成立 (1957)，中国为发起国之一，第一届学术会议与莫斯科召开 (1960)
- (4) 美国MIT的Servomechanism Laboratory研制出第一台数控机床 (1952)
- (5) 继MIT CNC Project之后，NC技术迅速进入商品化时代。1958年，Kearney & Trecker开发了NC加工中心。同一年，日本富士通和牧野FRAICE公司开发成功NC铣床
- (6) 世界第一颗人造地球卫星 (Sputnik) 由苏联发射成功 (1957)



2 控制系统的发展简史

❖ 1950年后

(7) 美国G·Devol研制出第一台工业机器人样机（1954），两年后，被称为机器人之父的J·Engelberger创立了第一家机器人公司Unimation

(8) 1968年，日本Kawasaki公司提出机器人技术，体现了电子控制和驱动、传感器以及运动机构一体化的新思想。日本安川（Yaskawa）工程师称Mechatronics（机电一体化技术）（1972）

(9) 美籍匈牙利人R·E·Kalman等发表On the General Theory of Control Systems论文，引入状态空间法，提出能控性、最佳调节器和Kalman滤波等概念，奠定了现代控制理论的基础（1960）

(10) 苏联东方1号飞船载着加加林进入人造地球卫星轨道，人类宇航时代开始了（1961）



2 控制系统的发展简史

❖ 1950年后

- (11) 1963年，美国的L·Zadeh与C·Desoer发表Linear Systems - A State Space Approach。1956年，L·Zadeh提出模糊集合，模糊控制概念
- (12) 美国的E·I·Jury发表数字控制系统（Sampled - Data Control System），建立了数字控制及数字信号处理的基础（1958）
- (13) 苏联发射月球9号探测器，首次在月面软着落成功（1966）；三年后（1969），美国阿波罗11号把宇航员N·A·Armstrong送上月球。
- (14) 瑞典Karl J·Astrom提出最小二乘辨识，解决了线性定常系统参数估计问题和定阶方法（1967）；六年后，提出了自启调节器，建立自适应控制的基础。Astrom于1983年获得IEEE Medal of Honor



2 控制系统的发展简史

❖ 1950年后

- (15) 英国 H·H·Rosenbrock 发表 State Space and Multivariable Theory (1970) ; 加拿大 W·M·Wonham 发表 Linear Multivariable Control: A Geometric Approach (1974)
- (16) 美国的 M·E·Merchant 提出计算机集成制造的概念 (1969)
- (17) 美国 ARPA 计算机网络初步建成 (1971)
- (18) 日本 Fanuc 公司研制出由加工中心和工业机器人组成的柔性制造单元 (1976)
- (19) 美国 R·Brockett 提出用微分几何研究非线性控制系统 (1976) , 意大利 A·Isidori 出版 (Nonlinear Control Systems) (1985)



2 控制系统的发展简史

❖ 1950年后

- (20) 加拿大G·Zames提出 H^∞ 鲁棒控制设计方法 (1981)
- (21) 美国哥伦比亚号航天飞机首次发射成功 (1981)
- (22) 美国Y·Cho和X·R·Cao等提出离散事件系统理论 (1983)
- (23) 第一台火星探测器Sojourner在火星表面软着落 (1996)
- (24) 旅行者Voyager一号、二号开始走出太阳系，对茫茫太空进行探索
- (25) 神州五号宇宙飞船成功发射，中国首次载人航天圆满成功。标志着中国已经成为世界上独立自主地完整掌握载人航天技术的国家之一 (2003)
- (26) 嫦娥2号登陆月球成功，标志着我国成为第3个登陆月球的国家 (2013)
- (27) Xspace 火箭回收技术 (2015-2018)
- (28) 无人驾驶汽车、无人机等控制系统发展应用，嫦娥登陆月球背面



2 控制系统的发展简史

❖ 1950年后发展总结

- 源于性能的提升需求：最优控制
- 自身的理论完善和拓展：线代控制理论，非线性，现代频域法，广义线性系统
- 新的元部件：计算机、网络、（集散控制、数字控制、网络控制）
- 新系统和复杂系统：复杂系统理论，混杂系统理论，离散事件动态系统理论，混沌系统，随机系统
- 新的控制思想：（自适应、鲁棒、变结构控制、预测控制、神经网络）
- 数学理论的发展：模糊数学、李导数、微分几何



2 控制系统的发展简史

❖ 总结

- a) 社会发展的需要是科学发展的动力。**
- b) 科学的进步是集体努力的结果，在这一点上往往显示出科学家的群体效应。**
- c) 科学的发明与科学理论的建立有赖于科学家坚实的知识基础。杰出的科学家大多是多面发展的。**
- d) 没有理论，社会实践就不能成为系统的科学，实践也就难以深入和系统地发展。**



本节课内容目录

1

课程学习目标

2

控制系统的发展简史

3

课程主要内容

4

课程相关信息



3 课程主要内容

- ❖ 第一章 控制系统设计流程
- ❖ 第二章 控制系统的输入条件分析
- ❖ 第三章 控制系统的设计约束
- ❖ 第四章 控制系统设计准则
- ❖ 第五章 伺服系统控制设计
- ❖ 第六章 调节系统控制设计
- ❖ 第七章 特殊的控制设计方法
- ❖ 第九章 设计实例分析



3 课程主要内容

❖ 课程特点

- 综合性强
- 面向工程
- 实践性强



本节课内容目录

1

课程学习目标

2

控制系统的发展简史

3

课程主要内容

4

课程相关信息



4 课程相关信息

❖ 参考教材

❖ 《控制系统设计》

王广雄 何朕 著
清华大学出版社 2008年



❖ 《控制系统设计指南》

[美]George Ellis 著
刘君华 汤晓君 译
电子工业出版社 2012年





4 课程相关信息

❖ 其他信息

❖ 课程信息 (AS32107)

课堂教学：第1周-第12周 ——正心314 共48学时

实践教学：具体时间待定 ——实验室 共32学时

考试时间：待定

考试地点：待定

❖ 教师信息

陈松林 科学园E1栋控制与仿真中心303室

86403507

songlin@hit.edu.cn



4 课程相关信息

❖ 师生交流群



控制系统实践(2)陈老师

扫一扫二维码，入群聊。



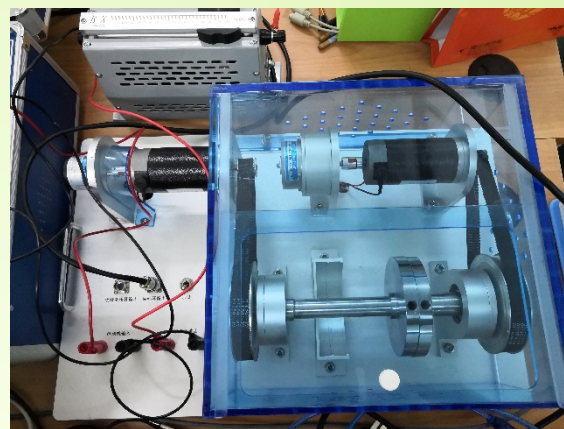
4 课程相关信息

❖ 考核方式

❖ 期末考试成绩	60%
❖ 平时成绩	10%
❖ 实验或大作业（二选一）	15或20%
❖ 课程设计	10%

实验A（简单） 主要利用配套软件和MATLAB，完成建模和控制设计。

实验B（复杂） 需要自行编写DSP程序实现控制算法。





4 课程相关信息

❖ 考核方式

❖ 期末考试成绩	60%
❖ 平时成绩	10%
❖ 实验或大作业（二选一）	15或20%
❖ 课程设计	10%

大作业题目《***控制系统设计与实现》

2人一组，考核方式：Word报告，PPT答辩，实物演示。

报告中应包含：功能和性能指标设计、系统的总体方案设计、元部件选型、软硬件设计、系统建模、控制器设计、仿真验证、系统调试、实验结果等内容



Thank You !



哈尔滨工业大学 航天学院