



哈爾濱工業大學(深圳)

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

Introduction to Advanced Control

先进控制概论

Lec 1: Introduction

梅 杰

机电工程与自动化学院

哈尔滨工业大学（深圳）

2022年10月31日

Lecturer

Name: 梅杰

Office: G308

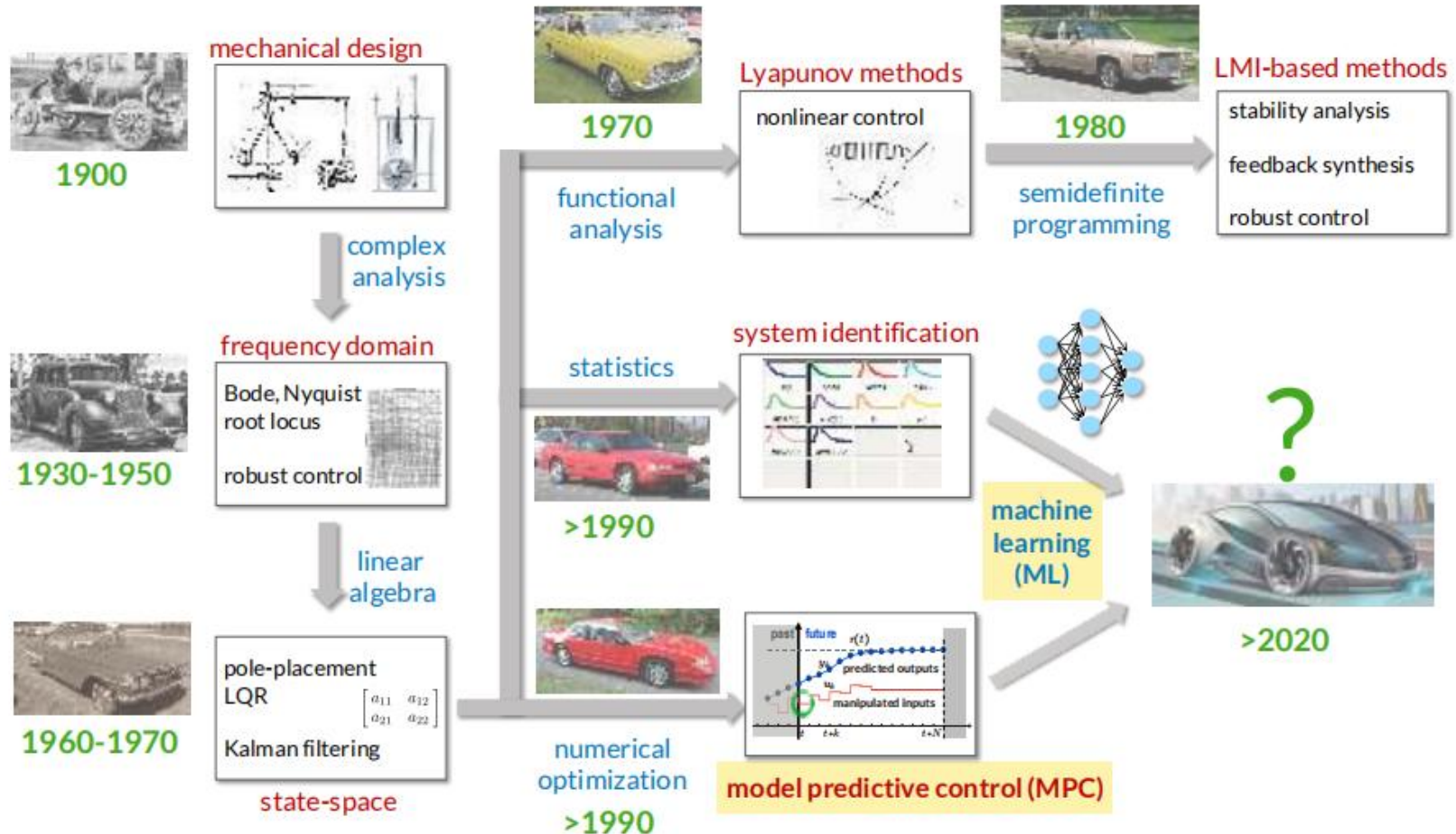
Tel: 18575593083

Email: jmei@hit.edu.cn



群名称: 2022-先进控制概论
群 号: 560645169

A Timeline of Control Engineering



世界上第一个自动控制系统是？

□ 古代亚历山大时期的克泰希比斯水钟（滴漏）

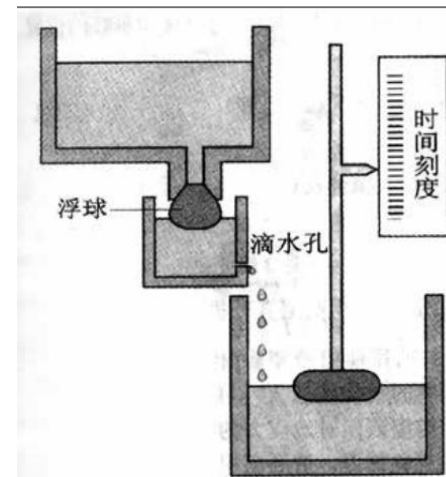
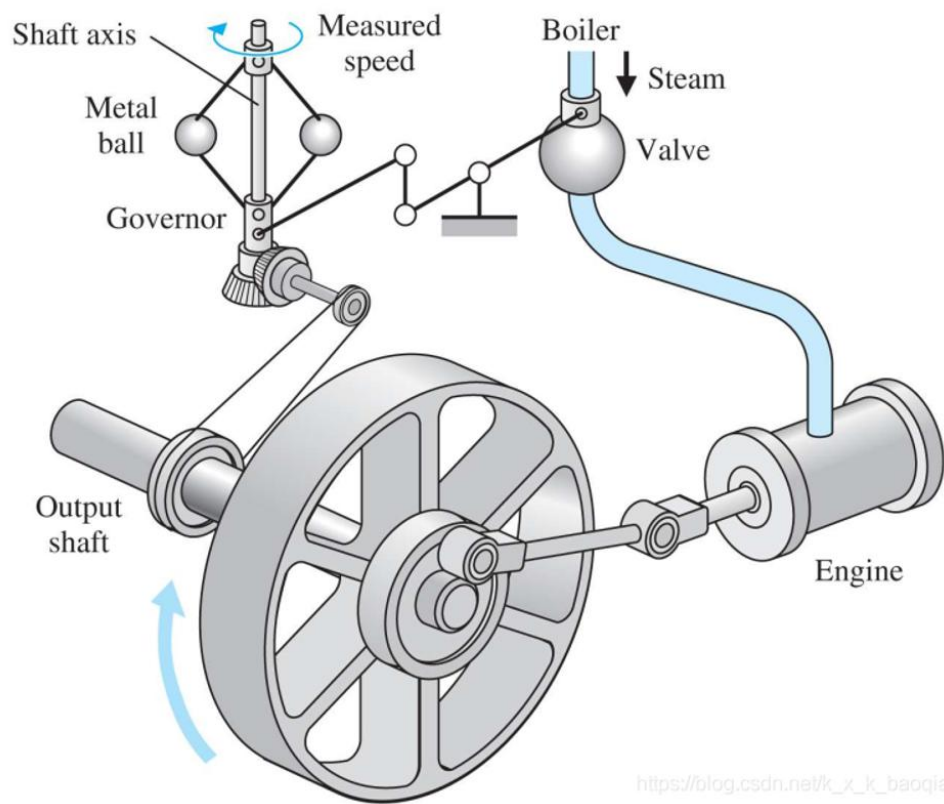


图 P1.11 水钟(引自 Newton, Gould 和 Kaiser 的《线性反馈控制的分析设计》，纽约 Wiley, 1957 年, 经允许后复制)

□ 中国的指南车、水运仪象台、都江堰水利工程



□ 1788年，英国人瓦特发明离心式调速器（飞球式调速器）



James Watt

History Development of Automatic Control

- 1854年，俄国人发明电磁调速器。
- 1868年，法国人发明蒸汽机动力船舵的反馈式调节器。

自动调节装置在大规模应用中“暴露”出需要研究的理论问题。1868年，仅英国本土运行的75000台瓦特调速器中，大部分出“**剧烈振荡**”而不能正常运行。

- 1868年，英国物理学家**麦克斯韦**发表论文《论调速器》，为瓦特调速器的不稳定振荡现象提供理论解释和解决途径。

一言不合
就推公式



系统的稳定性跟微分方程特征根的分布有关

History Development of Automatic Control

□ 1877年，劳斯（E. J. Routh）提出代数判据。

s^n	a_0	a_2	a_4	a_6	-----
s^{n-1}	a_1	a_3	a_5	a_7	
s^{n-2}	b_1	b_2	b_3	b_4	
s^{n-2}	c_1	c_2	c_3	c_4	
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
s^0	a_n				



Edward John Routh

The number of roots in the open right half-plane is equal to the number of sign changes in the first column of Routh array.



- 1876年，俄国的维斯聂格拉斯基（J·A·Vyschnegradsky）分析了带有调速器的蒸汽机，提出三阶系统的稳定性判据。
- 维斯聂格拉斯基的研究成果被斯托多拉（Stodola）用来设计水轮机调速器。他用到了更复杂的模型并求助他在苏黎士联邦理工学院（ETH）的同事赫尔维兹（Hurwitz）。

□ 1895年，赫尔维兹（Hurwitz）提出判据。

$$H = \begin{pmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & \dots & 0 & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & & & \vdots & & \vdots \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & & & 0 & & \vdots \\ \vdots & a_n & & \ddots & & a_0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & 0 & & & \ddots & a_1 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & & & a_2 & a_0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & a_4 & a_2 & a_0 \end{pmatrix}$$

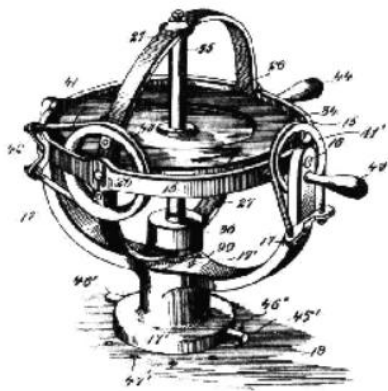


Adolf Hurwitz

社会一旦有技术上的需要，则这种需要比之10所大学更能把科学推向前进。

—— 恩格斯

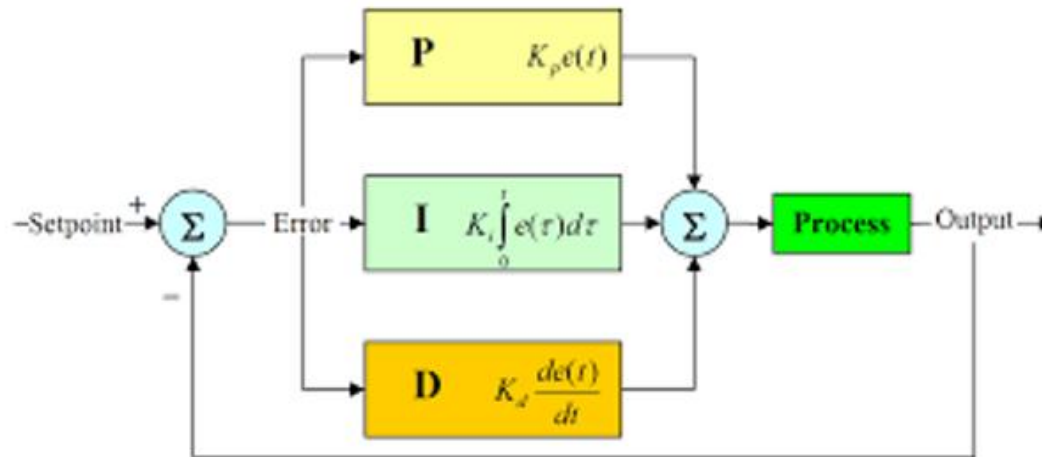
- 20世纪初，美国发明家Elmer Sperry敏锐地注意到人进行控制调整时不是简单地采用开关控制，而是综合运用了预测、当被控量接近目标值时撤出控制、以及当存在持续的偏差时进行小幅度的慢慢调节等方法，于1911年设计出的采用较为复杂控制律——PID控制结合自动增益调整——的船舶自动驾驶仪，被认为是最早发明的PID控制器。



Elmer Sperry

History Development of Automatic Control

- 1922年，Nicholas Minorsky（1885—1970，俄裔美国工程师，应用科学家）从理论上清晰地分析了船在常值扰动下船舶航向的自动驾驶问题，推导出了PID控制器形式。



- 1942年，齐格勒 (J. G. Ziegler) 和尼科尔斯 (N. B. Nichols) 提出调节PID控制器参数的方法。

It was reported that more than 95% of the control loops in process control are of PID type, and most loops are actually PI control.

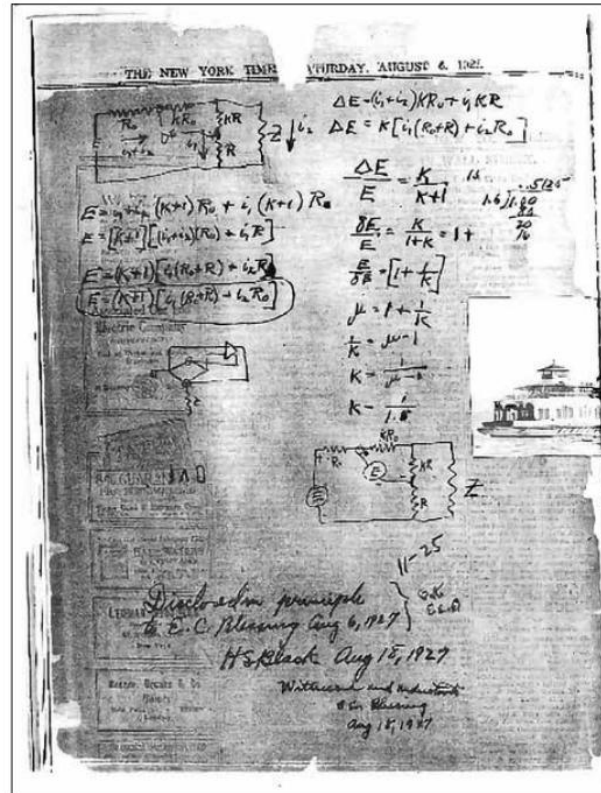
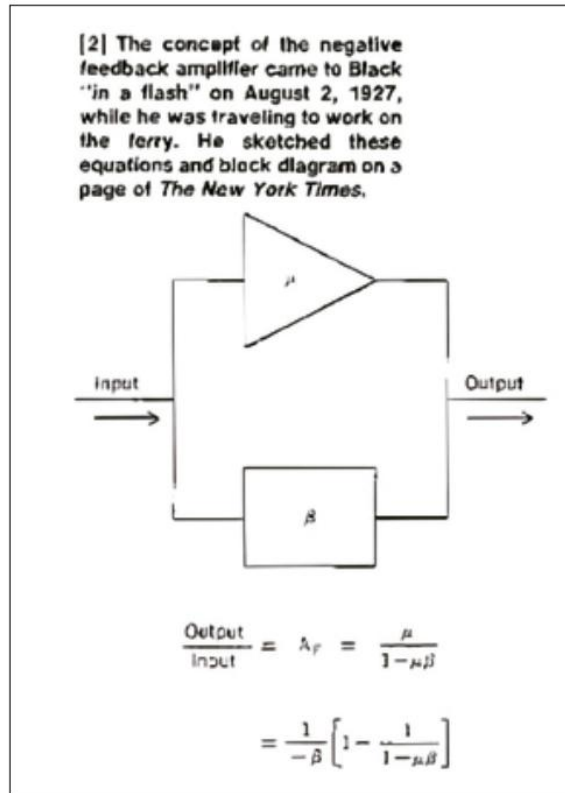
Zhao C, Guo L. PID controller design for second order nonlinear uncertain systems, Science China, Information Science, 2017, 60(2): 022201:1-022201:13.

Zhang J K, Guo L. Theory and Design of PID Controller for Nonlinear Uncertain Systems. IEEE Control Systems Letters, 2019, 3(3): 643-648.

Zhao C, Guo L. Control of Nonlinear Uncertain Systems by Extended PID, IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 66(8): 3840-3847.

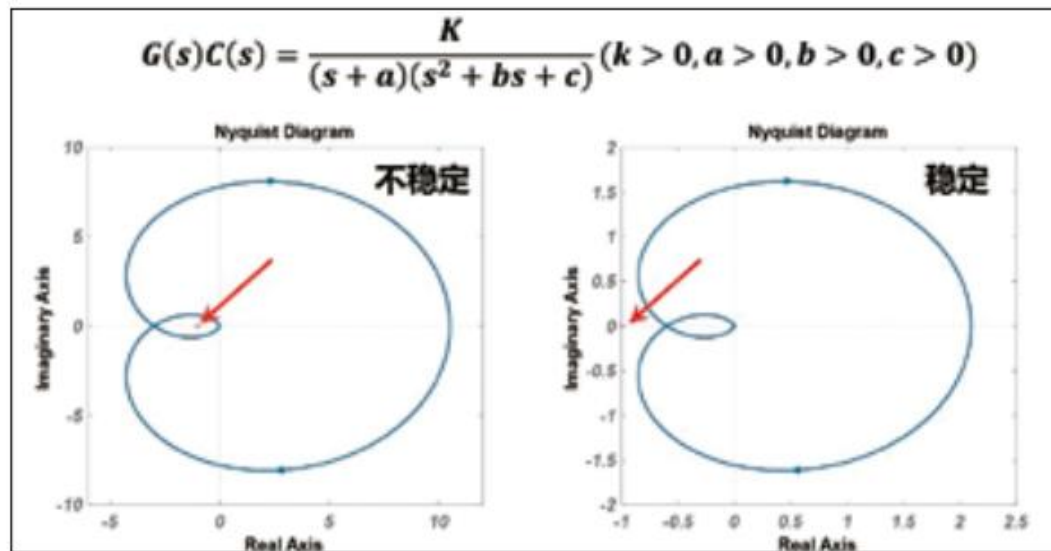
History Development of Automatic Control

□ 1927年，美国 **贝尔实验室** 的布莱克(H. S. Black) 提出负反馈放大器，使高性能的长途电话通讯成为现实。

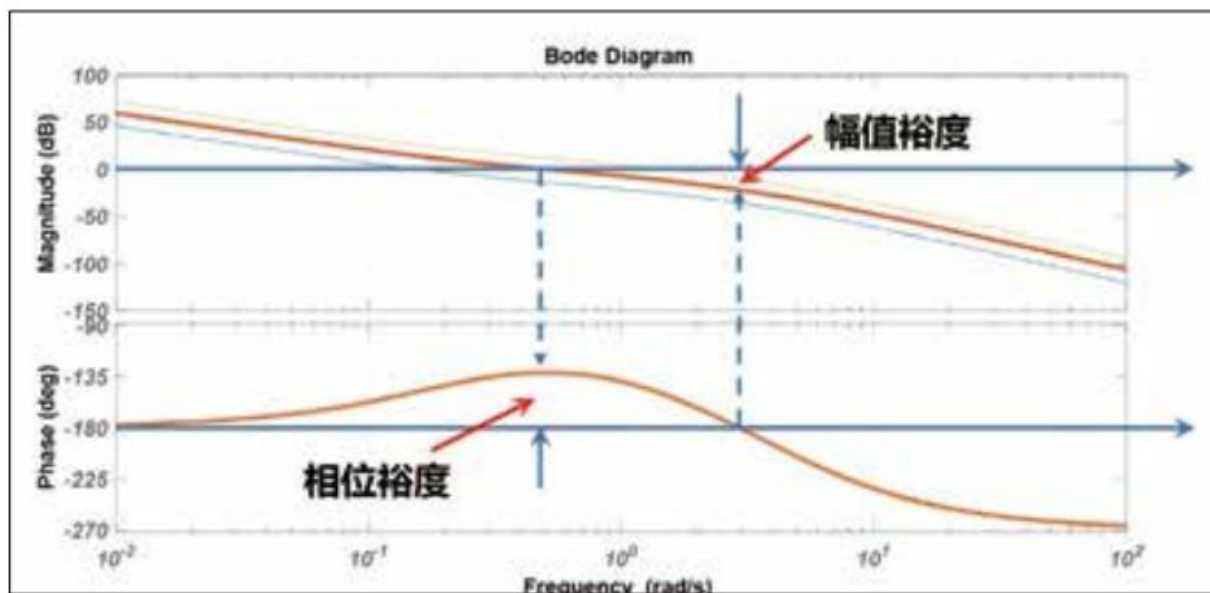


History Development of Automatic Control

- 1932年，同为 **贝尔实验室** 的奈奎斯特（H. Nyquist）提出反馈放大器稳定性的频率特性判据，同时使得基于传递函数和频率特性的分析综合方法得到极大发展，成为经典控制理论形成的一个里程碑标志。



- 1940年，同为 **贝尔实验室** 的伯德 (H. W. Bode) 引入了增益裕度和相位裕度以及最小相位的概念，发展了基于图方法 (Bode图) 设计反馈放大器的工具。



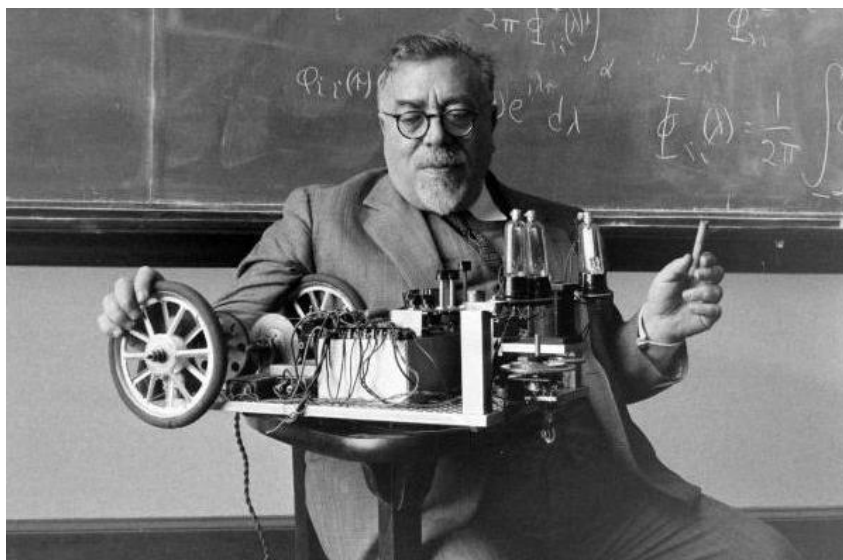


- 第二次世界大战期间，为解决战时紧迫问题，控制科学与技术得到极大进展，在高射炮、炸弹瞄准器、舰船、航空、机械等领域，相继设计制造了一大批高精度的自动控制系统，显示了控制的强大威力。
- 1950年代前后，基于战时发展起来的控制技术和其后的大量应用实践，导致以“针对单输入—单输出系统”和“基于频率域方法”为特征的经典控制理论的形成。1948年美国学者伊文思（W. R. Evans）进一步引入根轨迹法以分析和综合单输入—单输出控制系统。

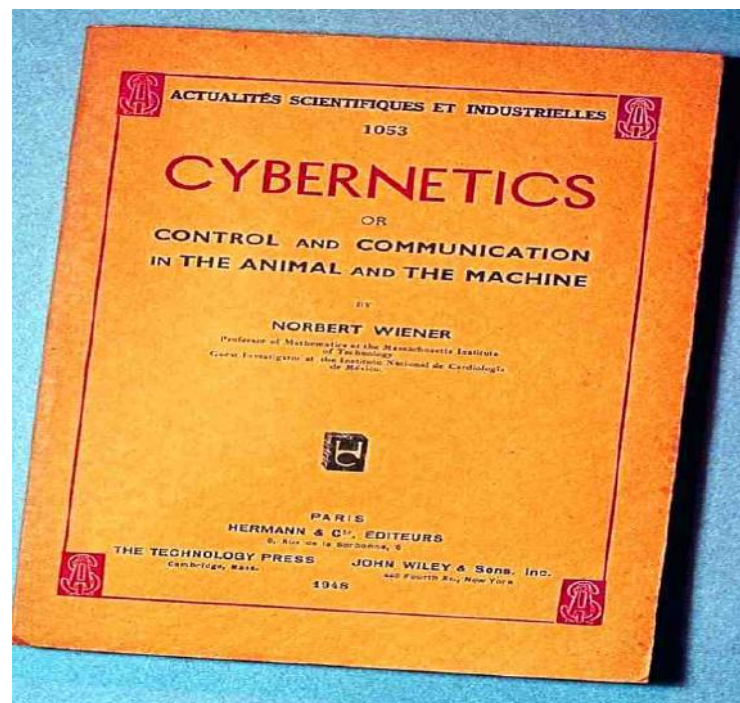
History Development of Automatic Control



□ 1948年，维纳（N. Wiener）出版《控制论》。

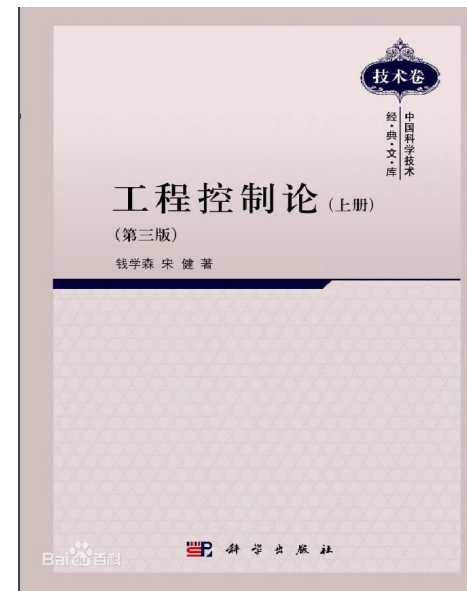


Norbert Wiener
(1894.11.26—1964.3.18)
Ph. D. from Harvard
Professor at MIT



《Cybernetics》, 1948

History Development of Automatic Control



钱学森

(1911.12.11 – 2009.10.31)

Ph. D. from Caltech

Professor at MIT

《工程控制论》, 1953

控制论是关于**工程技术**领域各个系统自动控制和自动调节的理论。**维纳**博士四十年代提出了控制论的基本思想后，不少工程师和数学博士曾寻找通往这座理论顶峰的道路，但均半途而废。工程师偏重于实践，解决具体问题，不善于上升到理论高度，数学家则擅长理论分析，却不善于从一般到个别去解决实际问题。**钱学森**则集中两个优势于一身，高超地将两只轮子装到一辆战车上，碾出了工程控制论研究的一条新途径。

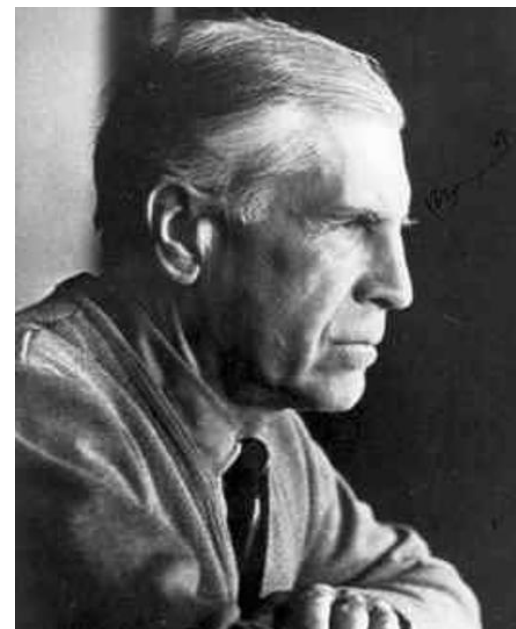
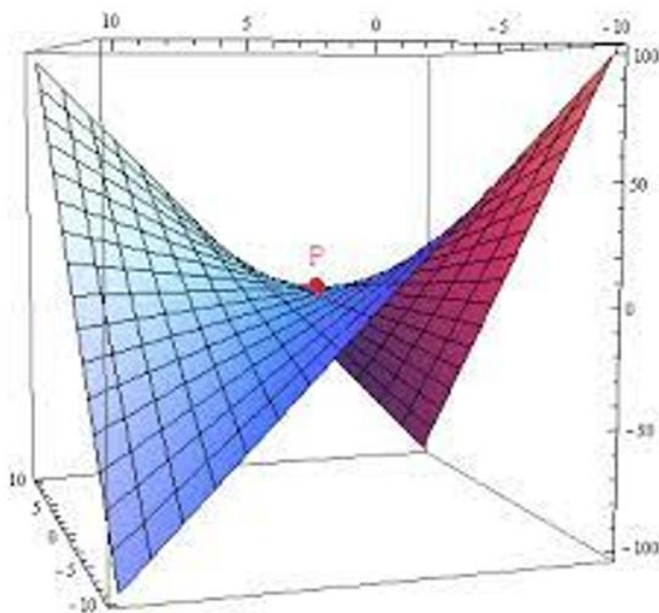
作为**技术科学的控制论**，对工程技术、生物和生命现象的研究和经济科学，以及对社会研究都有深刻的意义，比之相对论和量子论对社会的作用有过之而无不及。我们可以毫不含糊地说从科学理论的角度看，二十世纪上半叶的**三大伟绩**是相对论、量子论和控制论，也许可以称它们为**三项科学革命**，是人类认识客观世界的**三大飞越**。

—— 钱学森 (1980)



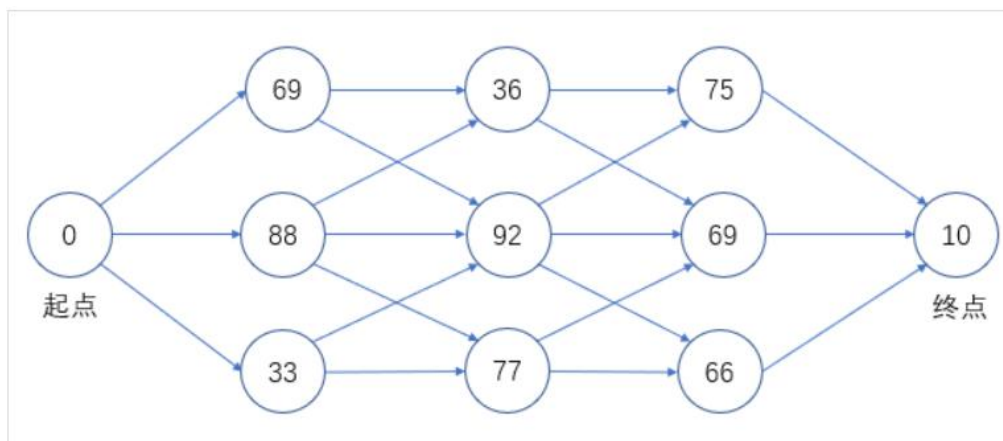
□ 1950年前后，蓬勃兴起的航天技术革命成为控制论发展的新的动力。1957年，苏联发射第一颗人造卫星。1966年，苏联发射探测器在月球软着陆。1969年，美国阿波罗载人宇宙飞船登陆月球。这些成就都与控制理论和技术的发展紧密相关。

□ 1956年，苏联数学家庞特里亚金（L. S. Pontryagin）创立“极大值原理”。



L. S. Pontryagin

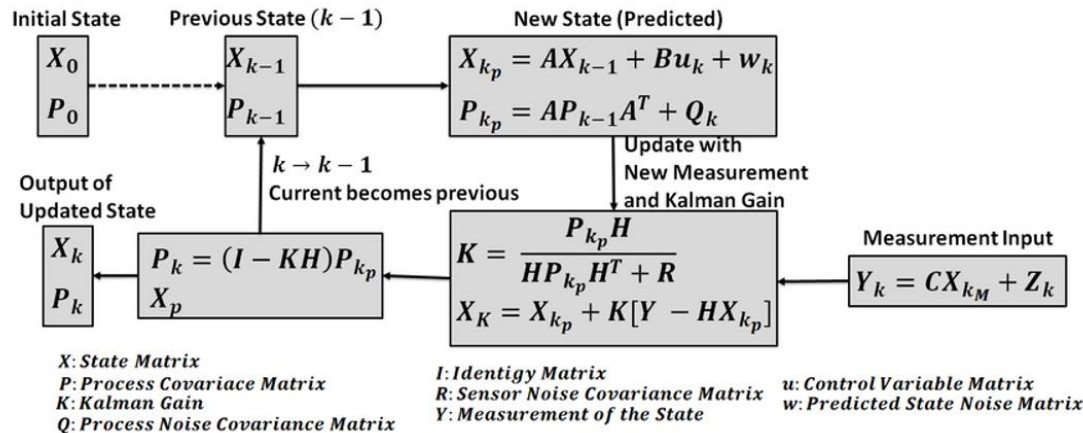
□ 1957年，美国数学家贝尔曼（R. E. Bellman）提出了最优性原理，创立“动态规划”，建立了最优控制的理论基础。



R. E. Bellman

History Development of Automatic Control

- 1960年，美国应用数学家卡尔曼（R. E. Kalman）引入状态空间分析控制系统，创立“卡尔曼滤波”，成功地解决了带有随机噪声的信号中信号的恢复问题。提出能控性、能观性等概念，奠定了现代控制理论的基础。

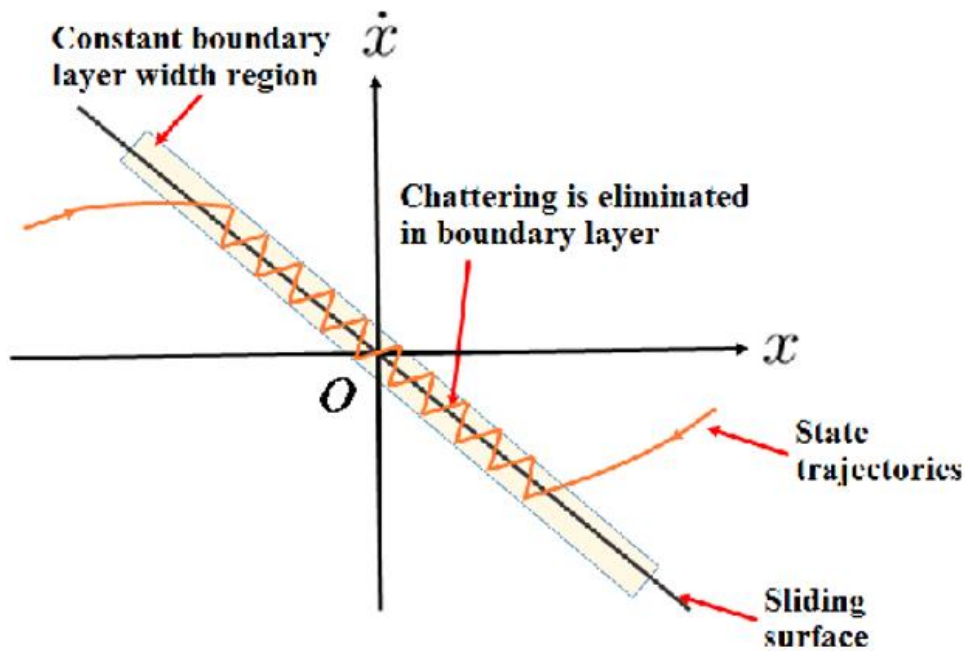


R. E. Kalman

Get the physics right.
After that, it is all mathematics.
---- Rudolf Kalman

History Development of Automatic Control

□ 1960年代，前苏联学者Utkin 和 Emelyanov 提出变结构控制的概念。

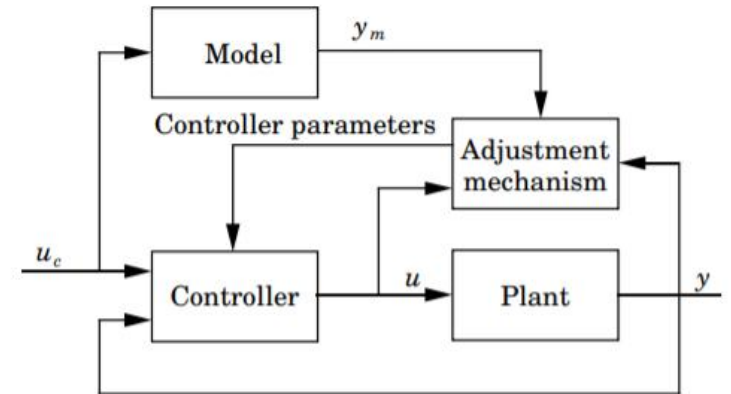
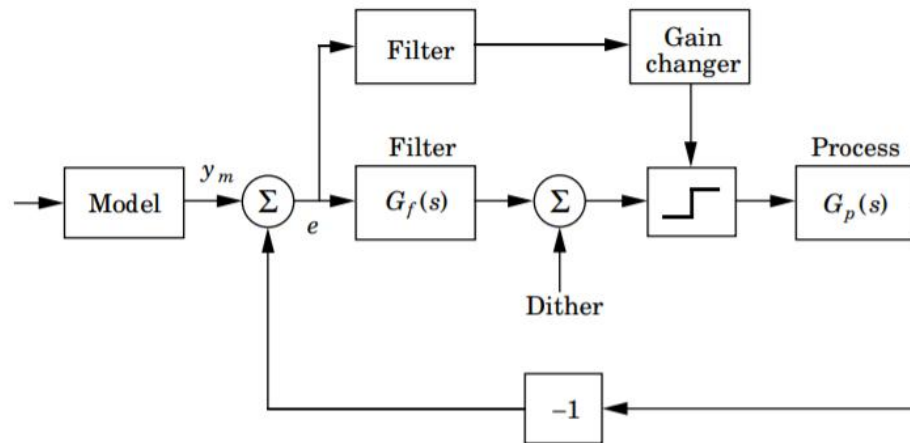


Vadim Utkin

History Development of Automatic Control

□ 1959年，Honeywell的O. Hugo Schuck提出自振荡(Self-Oscillating Adaptive System)；Whitaker及合作者提出一种模型参考自适应控制器，用于飞机自动驾驶仪，被称为MIT Rule。

The Self-Oscillating Adaptive System



Linear feedback from $e = y - y_m$ is not adequate for parameter adjustment!

The MIT rule

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta}$$

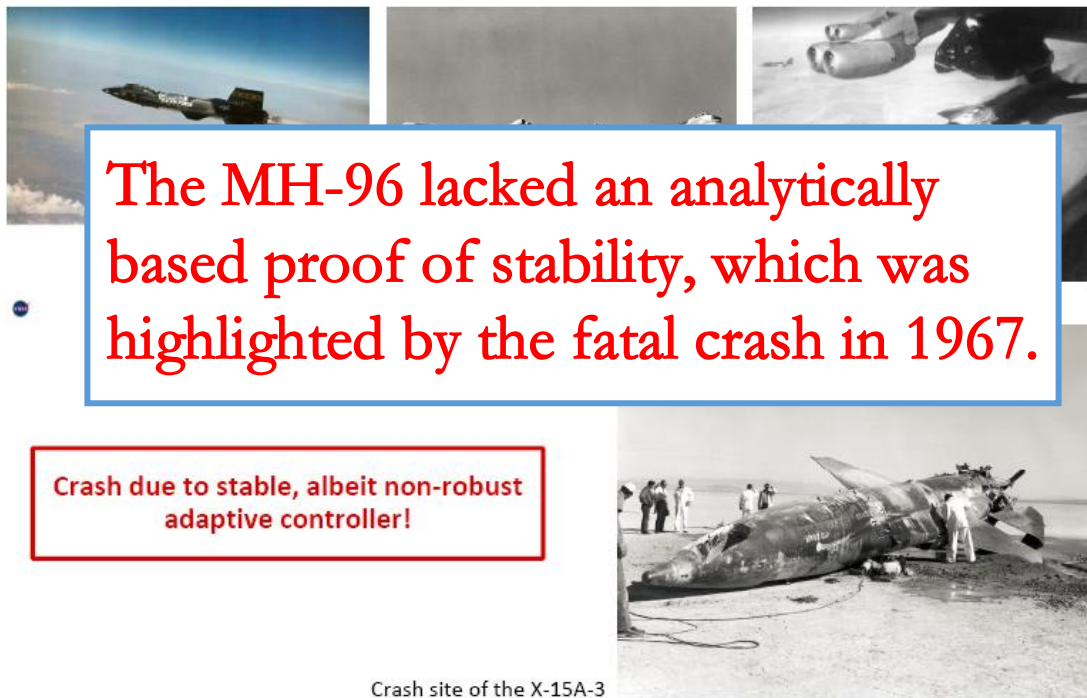
□ 1959年, Honeywell的O. Hugo Schuck提出自振荡(Self-Oscillating Adaptive System); Whitaker及合作者提出一种模型参考自适应控制器, 用于飞机自动驾驶仪, 被称为MIT Rule。

■ The crash of the X-15A-3 (November 15, 1967)

The brave era:
Develop an idea,
hack a system,
simulate and fly!

The MH-96 lacked an analytically based proof of stability, which was highlighted by the fatal crash in 1967.

Crash due to stable, albeit non-robust adaptive controller!



Crash site of the X-15A-3

□ 1970年代，A. M. Lyapunov的博士论文“论运动稳定性的一般问题” (1892年)被用于设计自适应控制器，从根本上就保证了控制器的稳定性。

Stability Definitions.

An equilibrium of the system (1) is any state $x = x_e$ which satisfies

$$f(x_e) = 0.$$

Any trajectory which takes the initial value x_e satisfies $x(t) = x_e$ for all future time. Consider an equilibrium x_e of the system (1). Without loss of generality, we assume that $x_e = 0$. (One may always make the change of coordinates $z = x - x_e$ to obtain a system with an equilibrium at the origin.)

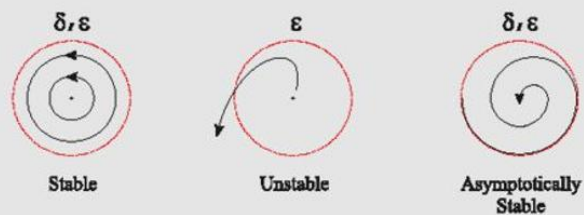


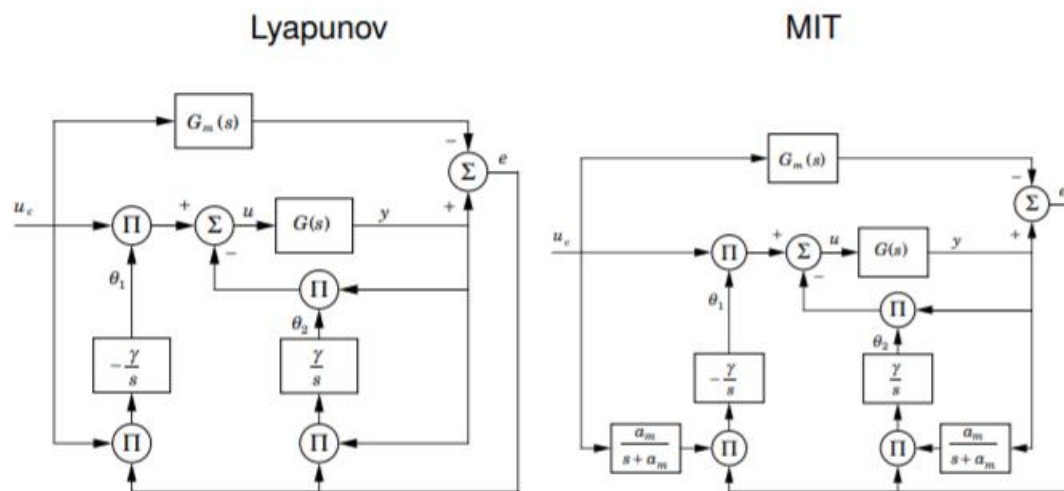
Figure 1: Stability, Instability, and Asymptotic Stability.



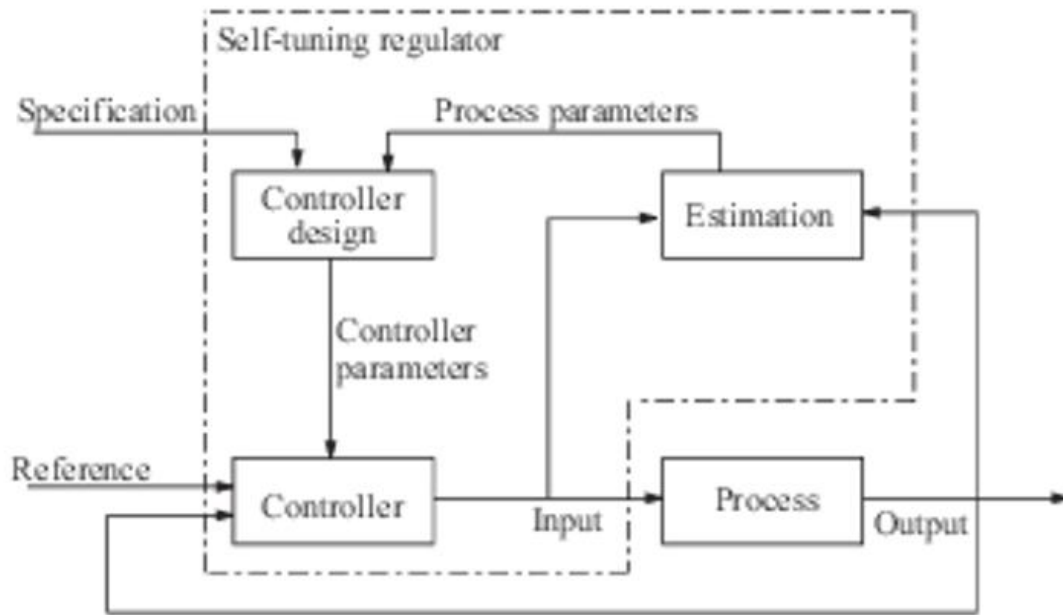
A. M. Lyapunov

□ 1970年代, A. M. Lyapunov的博士论文“论运动稳定性的一般问题”(1892年)被用于设计自适应控制器, 从根本上就保证了控制器的稳定性。

Comparison with MIT rule



□ 1973年，奥斯特隆姆（K. J. Astrom）提出自校正调节器。



Karl Johan Astrom

□ 1991年，郭雷、陈翰馥彻底解决了自校正调节器的全局稳定性与收敛性问题。

The Åström–Wittenmark Self-Tuning Regulator Revisited and ELS-Based Adaptive Trackers

Lei Guo, *Member, IEEE*, and Han-Fu Chen



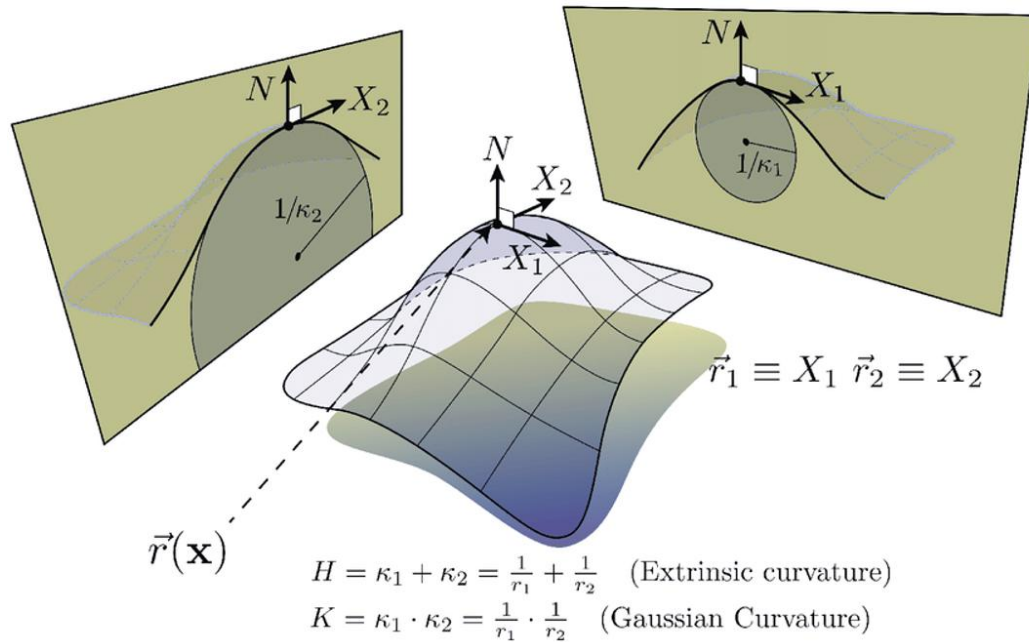
郭雷



陈翰馥

History Development of Automatic Control

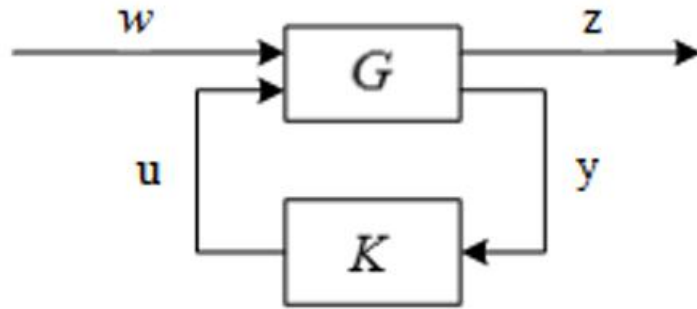
□ 1976年，哈佛大学布洛克特(R. W. Brockett) 提出用微分几何研究非线性控制系统。



R. W. Brockett

History Development of Automatic Control

□ 1981年，詹姆斯(George Zames)提出了 H-infinity 方法，开辟了H-infinity 鲁棒控制理论。



IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. 34, NO. 8, AUGUST 1989

831

State-Space Solutions to Standard \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ Control Problems

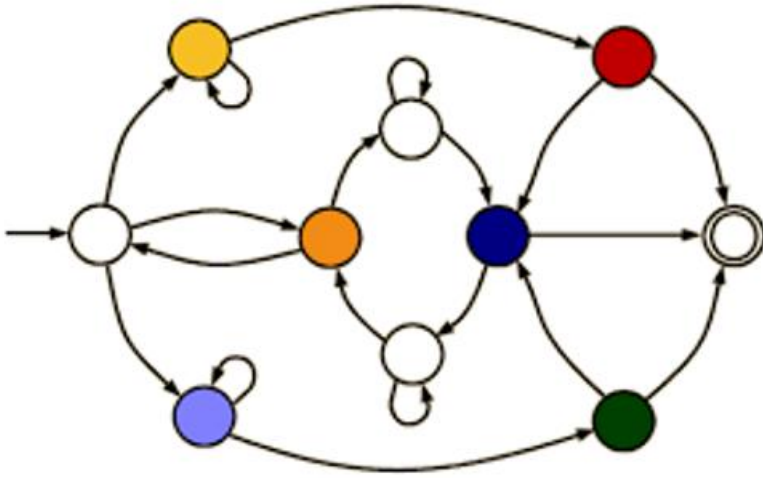
JOHN C. DOYLE, KEITH GLOVER, MEMBER, IEEE, PRAMOD P. KHARGONEKAR, MEMBER, IEEE, AND
BRUCE A. FRANCIS, FELLOW, IEEE



George Zames

History Development of Automatic Control

□ 1983年，何毓琦和曹希仁提出了离散事件系统理论。



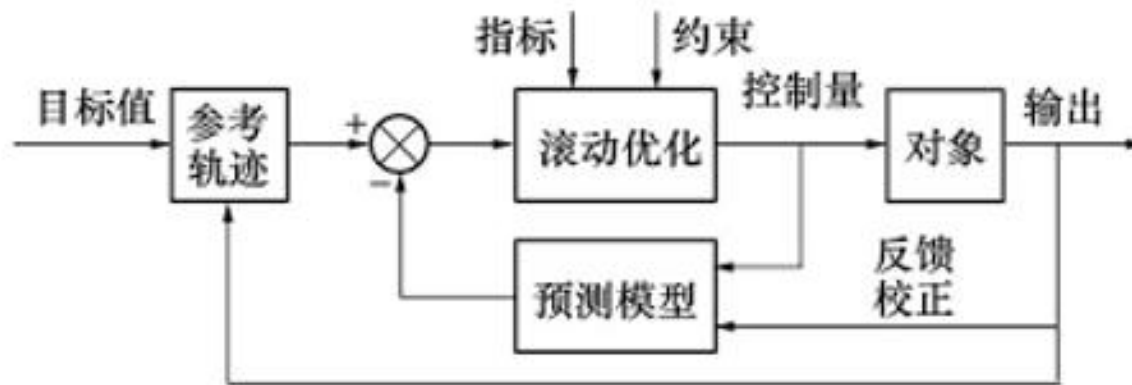
何毓琦



曹希仁

History Development of Automatic Control

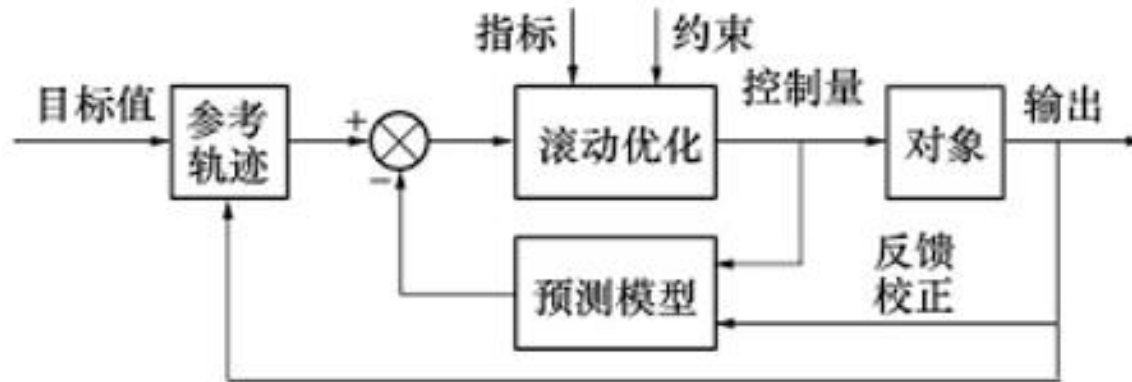
- 1978年, J. Richalet等提出模型预测启发控制算法;
- 1980年, C. R. Culter 等提出动态矩阵控制;
- 1982年, Meral 提出模型算法控制;
- 1987年, D. M. Clarke 等提出广义预测控制。



模型预测控制的基本结构

History Development of Automatic Control

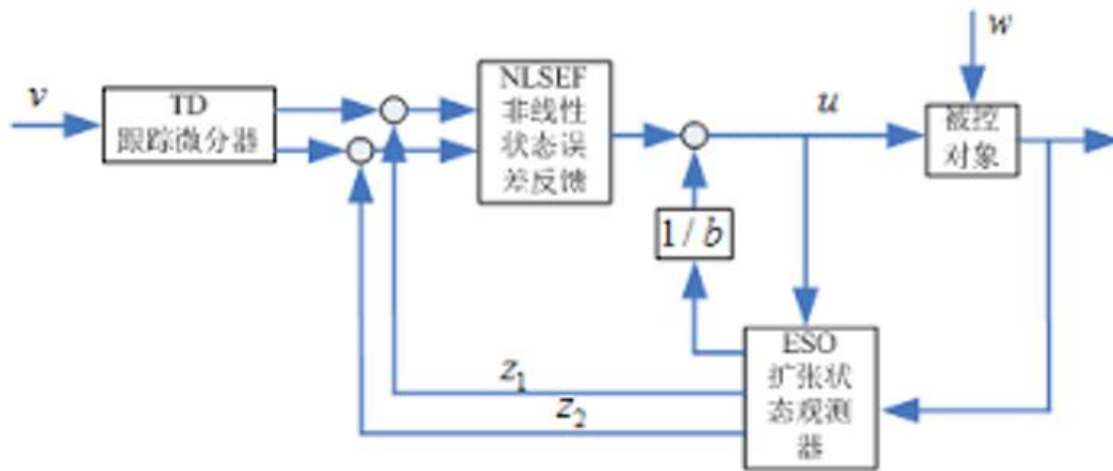
- 1978年, J. Richalet等提出模型预测启发控制算法;
- 1980年, C. R. Culter 等提出动态矩阵控制;
- 1982年, Meral 提出模型算法控制;
- 1987年, D. M. Clarke 等提出广义预测控制。



模型预测控制的基本结构

History Development of Automatic Control

□ 1998年，韩京清提出自抗扰控制（ADRC）。



跟踪微分器

扩张状态观测器

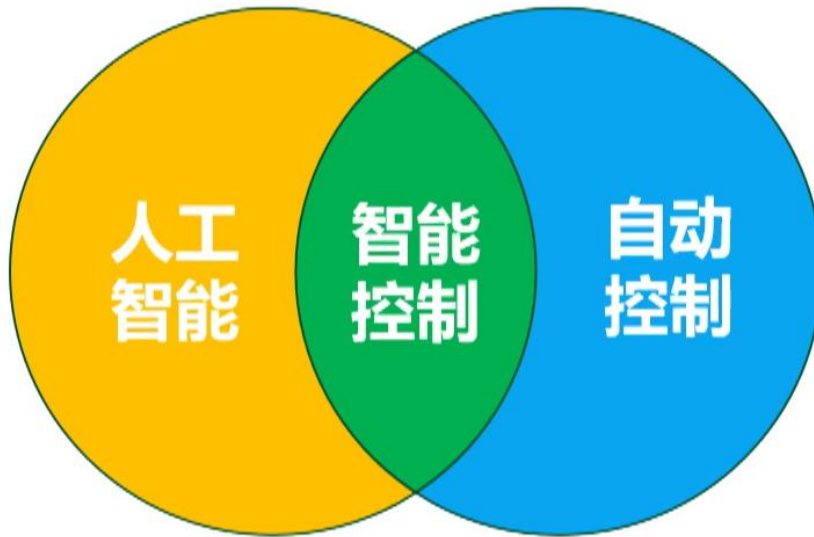
非线性误差反馈结构



韩京清

History Development of Automatic Control

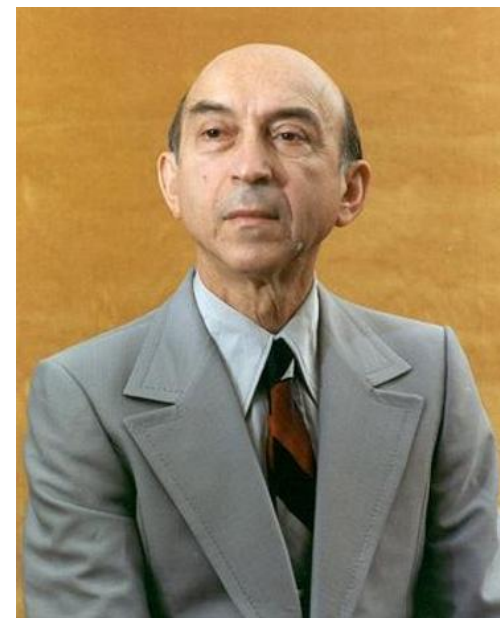
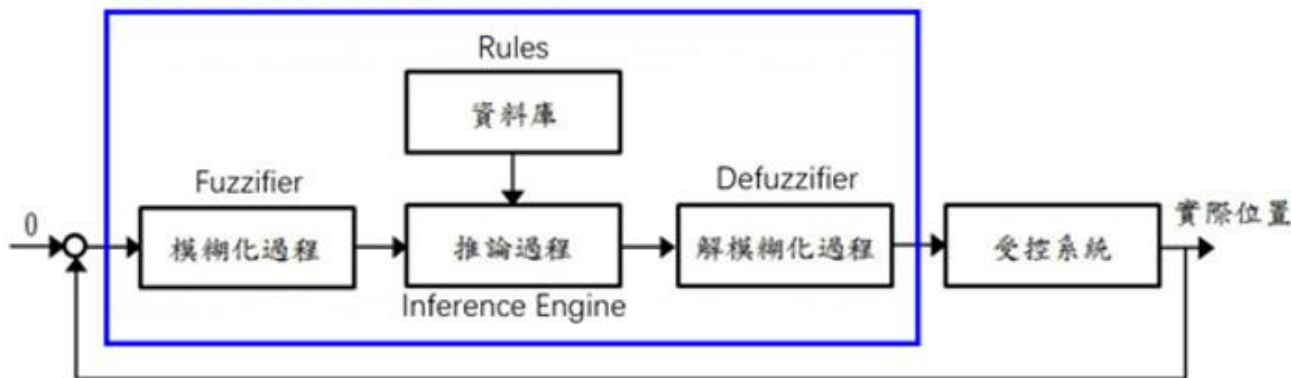
- 1965年，傅京孙（King-Sun Fu）提出智能控制的思想。
- 1971年，提出智能控制的二元论思想。



King-Sun Fu

□ 1965年，扎德（L. A. Zadeh）提出模糊集合的概念，奠定了模糊控制的基础。

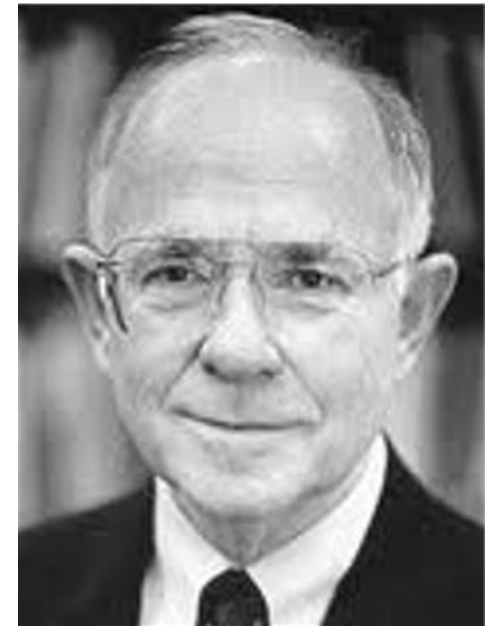
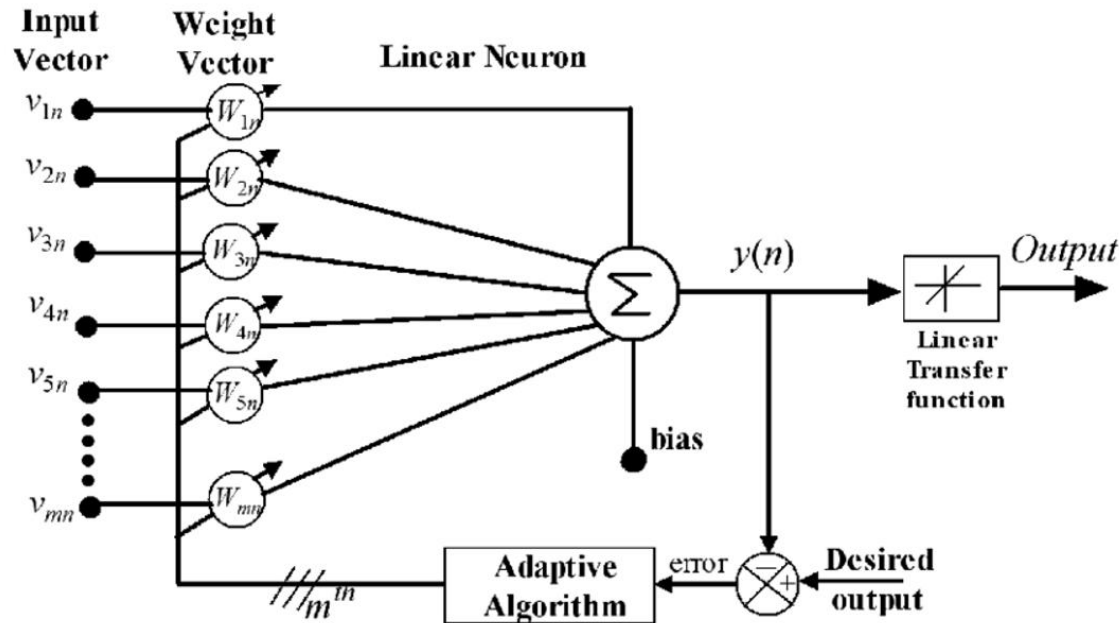
模糊控制器 (Fuzzy Controller)



L. A. Zadeh

History Development of Automatic Control

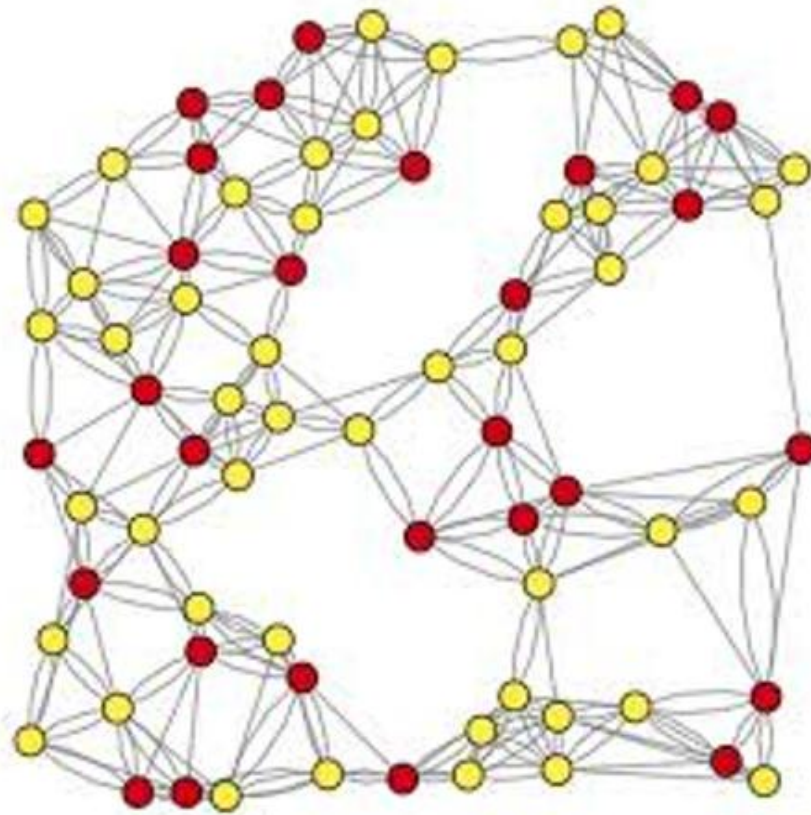
□ 1962年，威德罗（B. Widrow）发明了线性自适应元件Adaline，并将其应用于倒立摆的控制。



B. Widrow

History Development of Automatic Control

□ 近年来，大规模系统的需求促成了分布式控制的研究。



What is Advanced Control?

先进控制是对那些不同于常规单回路控制，并具有比常规PID控制更好的控制效果的控制策略的统称，通常用于处理复杂的多变量过程控制问题。

自适应控制

模型预测控制

非线性控制

变结构控制

分布式控制

智能控制



Thank you!