

国家精品课程/ 国家精品资源共享课程/ 国家级精品教材

国家级十一(二)五规划教材/ 教育部自动化专业教学指导委员会牵头规划系列教材

控制系统计算机辅助设计

第1章: 控制系统计算机辅助设计概述

主讲: 修贤超

控制系统计算机仿真概述

- 为什么要学习MATLAB
- 控制问题演示
- 本课程主要内容
- 计算机工具发展概述
- MATLAB语言发展概述



为什么要学习MATLAB语言?

- 控制系统的研究需要大量的数学运算
 - 线性代数、微分方程
- 科学运算问题求解——过于复杂，必须借助于计算机
- 科学运算问题的计算机求解演示
 - 通用程序的编写
 - 数据结构例子
 - 线性代数等数学问题的求解
 - 科学绘图与符号运算



例1-1 通用程序编写

- 矩阵乘法 $C = A B$ $c_{ij} = \sum_{k=1}^m a_{ik} b_{kj}$
- C语言程序（核心部分）

```
for (i=0; i<n; i++){ for (j=0; j<m; j++){  
    c[i][j]=0; for (k=0; k<p; k++)  
        c[i][j]+=a[i][k]*b[k][j];  
}}
```

- 程序漏洞及修补，修补某些漏洞可能引入新的漏洞
- 任何漏洞都可能导致错误的结果
- MATLAB实现： $C = A * B$



例1-2 数据结构实例

➤ 生成Fibonacci序列

$$a_1 = a_2 = 1, a_k = a_{k-1} + a_{k-2}, k = 3, 4, \dots$$

➤ 计算机程序设计 —— C语言实现

```
main()
{  int a1, a2, a3, i;
   a1=1; a2=1; printf("%d  %d  ",a1,a2);
   for (i=3; i<=100; i++)
   {  a3=a1+a2; printf("%d  ",a3); a1=a2; a2=a3;
   }}
```



例1-3 线性代数运算

➤ 小矩阵 $A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 0 \end{bmatrix}$

➤ MATLAB表示  >> `A=[1 2 3; 4 5 6; 7 8 0]`

➤ 矩阵分析  >> `B=inv(A)`  >> `B=inv(sym(A))`

➤ 精确分析（两种数据结构）

➤ 大些的矩阵：9x9的魔方矩阵  >> `A=magic(9)`

➤ 大型矩阵：500x500随机数矩阵  >> `A=rand(500)`



例1-4 科学绘图与运算运算

➤ 一般图形的绘制 $f(x) = x^2 e^{-x} \sin(x^2)$

```
>> x=0: 0.001:10;  
     y=x.^2.*exp(-x).*sin(x.^2); plot(x,y)
```

➤ 隐函数绘制 $f(x, y) = x^2 \sin(x + y^2) + y^2 e^{x+y} + 5 \cos(x^2 + y) = 0$

```
>> syms x y; xx=[-2*pi,2*pi];  
     fimplicit(x^2*sin(x+y^2)+y^2*exp(x+y)+5*cos(x^2+y),xx)
```

➤ 三维绘图 ``` >> surf(zet,t,yy) ```

```
>> zet=[0:0.1:1]; yy=[]; t=[0:0.5:10]';  
     for z=zet; G=tf(1,[1 2*z 1]); y=step(G,t); yy=[yy y]; end  
     ribbon(t,yy,0.2)
```



例1-5 还记得Laplace变换的问题吗?

➤ Laplace变换是控制系统传递函数的数学基础

➤ 已知时域函数 $f(t) = t^2 e^{-t} \sin t$

➤ 它的Laplace变换是什么?

➤ 利用计算机直接求解

```
>> syms t; f=t^2*exp(-t)*sin(t); F=laplace(f)
```

➤ 用这个信号去激励传递函数 $G(s) = \frac{2s + 1}{(s + 1)^2 (s + 2)}$

```
>> syms s; G=(2*s+1)/(s+1)^2/(s+2); y=ilaplace(G*F)
    fplot(y,[0,30]), ylim([-0.2 0.3])
```



控制系统计算机仿真概述

- 为什么要学习MATLAB
- 控制问题演示
- 本课程主要内容
- 计算机工具发展概述
- MATLAB语言发展概述



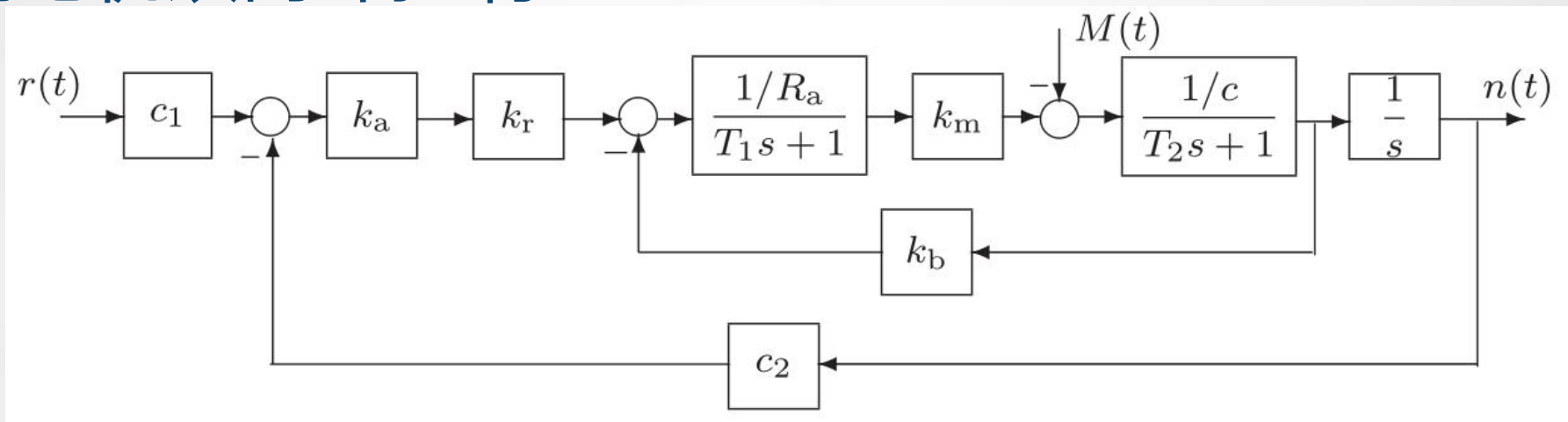
MATLAB语言研究控制问题演示

- 利用工具可以再认识控制问题
- 控制方面的例子
 - 复杂系统方框图的手工化简和计算机化简
 - 控制系统稳定性分析
 - 控制系统分析的再认识
 - 非线性系统仿真的例子
 - 控制器设计实例
- 相关的内容在课程中还要重新介绍



例1-6 复杂系统模型的化简

➤ 直流电机双闭环控制



➤ 如何处理复杂系统的化简

```
>> syms Ka Kr c1 c2 c Ra T1 T2 Km Kb s
Ga=feedbacksym(1/Ra/(T1*s+1)*Km*1/c/(T2*s+1),Kb);
G1=c1*feedbacksym(Ka*Kr*Ga/s,c2); G1=collect(G1,s)
```



例1-7 高阶系统的分析

➤ 开环模型

$$G(s) = \frac{10s^4 + 50s^3 + 100s^2 + 100s + 40}{s^7 + 21s^6 + 184s^5 + 870s^4 + 2384s^3 + 3664s^2 + 2496s}$$

➤ 如何分析闭环系统的稳定性

➤ Routh 判据？ 如何分析离散系统稳定性？

➤ 传递函数模型输入到MATLAB环境

```
>> num=[10,50,100,100,40];  
den=[1,21,184,870,2384,3664,2496,0];  
G=tf(num,den); Gc=feedback(G,1)
```



控制问题的再认识

➤ 稳定性应该如何分析？

➤ 直接分析方法（三种方法）

```
>> eig(Gc), isstable(Gc), pzmap(Gc)
```

➤ 传统Nyquist图的局限性——缺失频率信息

```
>> nyquist(G)
```

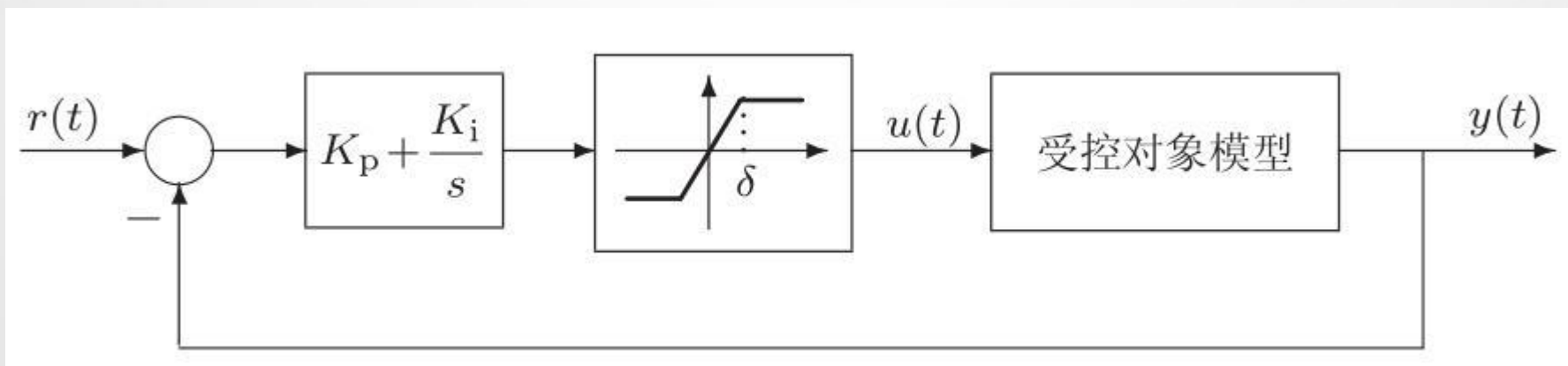
➤ 控制系统的根轨迹分析——如何获得临界增益？

```
>> rlocus(G)
```



例1-8 非线性系统仿真问题

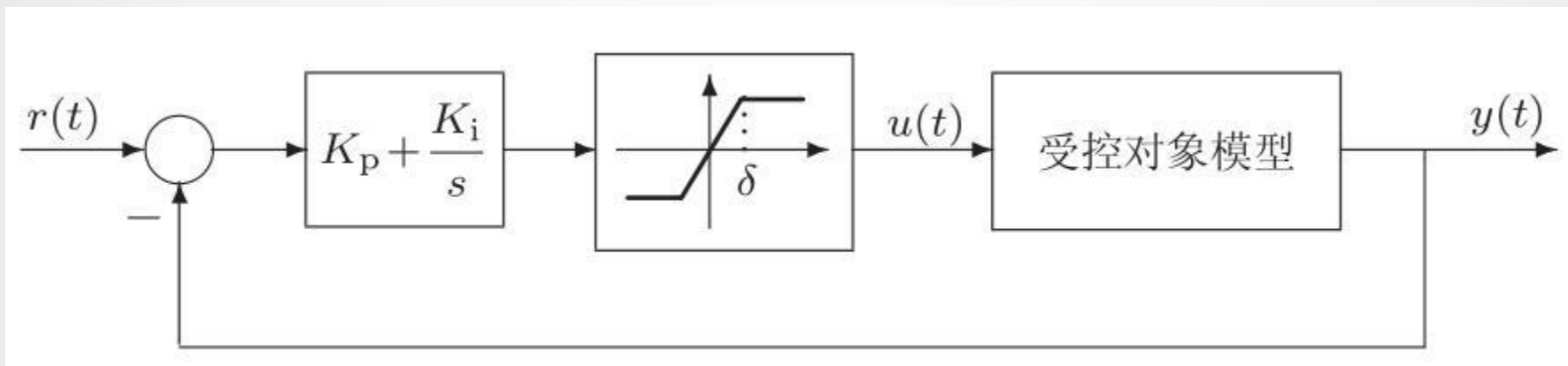
- 复杂非线性系统模型
- 常规线性系统方法不可能精确求解，非线性系统方法常用近似方法求解，如描述函数法，不精确、适应性差
- 时变受控对象 $y''(t) + e^{-0.2t}y'(t) + e^{-5t} \sin(2t + 1)y(t) = u(t)$





如何给控制系统设计最好的控制器?

➤ 闭环模型



➤ 问题：PI 控制器参数如何选择？

- 绝大部分控制器处理方法都不能处理非线性系统
- 如何处理时变受控对象模型？



控制系统计算机仿真概述

- 为什么要学习MATLAB
- 控制问题演示
- 本课程主要内容
- 计算机工具发展概述
- MATLAB语言发展概述



本课程教材

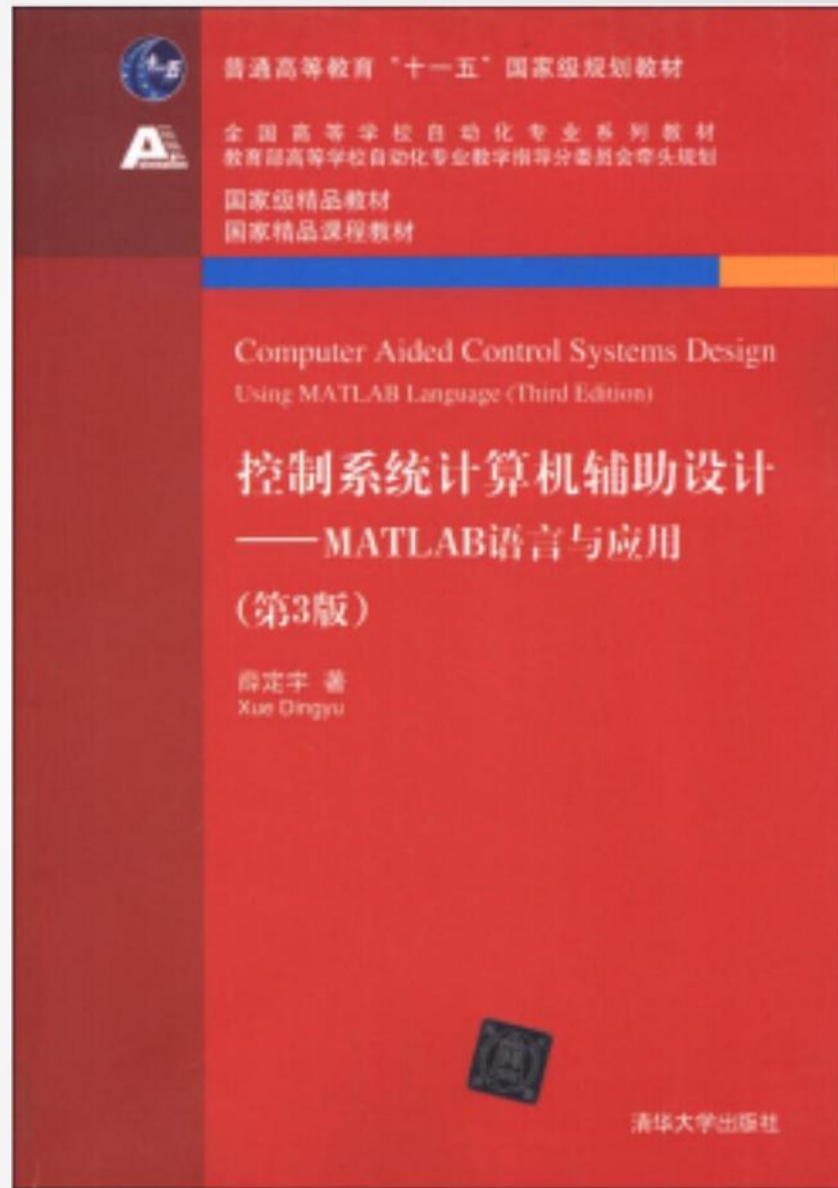
薛定宇著

控制系统计算机辅助设计——
MATLAB语言与应用（第四版）北
京：清华大学出版社，2019，
（2012第三版）

教育部自动化专业教指委牵头规划教材

国家级精品教材、国家精品课程教材、国家精
品资源共享课教材

国家十一五、十二五规划教材





本课程结构与概要

第一部分——基础知识

➤ 本书的前三章

- 概论、MATLAB 基础、科学运算问题求解

一、概论（本书第一章）

- 控制系统计算机辅助设计技术发展概论
- 控制系统计算机仿真语言发展
- MATLAB 类计算机语言发展概论



本课程结构与概要

二、MATLAB 语言入门 (Ch2)

- MATLAB 语言的程序设计基础
- MATLAB 下的科学绘图方法
- MATLAB 下的程序界面设计技术

三、相关科学运算问题的 MATLAB 求解 (Ch3)

- 线性代数问题的 MATLAB 求解
- 代数方程的 MATLAB 求解
- 常微分方程的 MATLAB 求解
- 最优化问题的 MATLAB 求解
- Laplace、 z 变换问题的 MATLAB 求解



本课程结构与概要

第二部分——控制系统的建模与分析

➤ 本书的4-6章

- 线性控制系统模型的 MATLAB 表示
- 线性系统的计算机辅助分析
- 非线性系统的建模与分析 —— Simulink

一、线性控制系统的数学模型 (Ch4)

- 线性系统模型的 MATLAB 表示
- 不同模型的相互转换、复杂模型的化简
- 高阶模型的降阶与近似
- 系统模型的辨识



本课程结构与概要

二、线性系统的计算机辅助分析 (Ch5)

- 系统性质的分析方法
- 线性系统的时域求解与数值仿真
- 线性系统的根轨迹绘制与分析
- 线性系统的频域分析
- 多变量系统的频域分析

三、非线性系统的建模、仿真分析 (Ch6)

- Simulink 基础：系统建模与仿真方法
- 控制系统的 Simulink 仿真举例
- Simulink 的高级技术（子系统、S-函数等）



本课程结构与概要

第三部分——控制系统 CAD (Ch7-11)

- 经典设计方法（包括最优控制器设计）
- PID 控制器的设计方法
- 鲁棒控制器的设计方法
- 自适应与智能控制器设计方法
- 分数阶控制器的设计方法

特色：数值最优化应用、图形用户界面

局限性：本科生课程不可能全部介绍基础理论，但可以学习设计方法

第四部分——半实物仿真与实时控制 (Ch12)

- 如何用 Simulink 画出的控制器直接控制实物？
- 建立起理论与实践之间的桥梁



控制系统计算机仿真概述

- 为什么要学习MATLAB
- 控制问题演示
- 本课程主要内容
- 计算机工具发展概述
- MATLAB语言发展概述



CACSD计算机工具发展的几个阶段

- 第一阶段：Algo、BASIC、Fortran、C等底层语言
- 第二阶段：197? -198? 软件包阶段
 - 利用底层语言开发专用
 - Melsa & Jones: McGraw-Hill, 1973
 - Karl Astrom: INTRAC (IDPAC、MODPAC、SYNPAC、POLPAC 等, 及仿真语言 SIMNON)
 - CLADP (Cambridge linear analysis and design programs)
 - NASA Armstrong: ORACLS (optimal regulator algorithms for the control of linear systems)



中国学者的贡献

- 孙增圻、袁曾任：控制系统的计算机辅助设计，清华大学出版社，1988，及早期讲义 BASIC语言程序
- 韩京清等：自然科学基金重大项目：CACSDC
- 吴重光、沈成林，计算机辅助设计控制系统，机械工业出版社1986



CACSD计算机工具走向

- 第三阶段：197?- 交互式计算机语言
 - 1978 Cleve Moler, MATLAB
 - Jack Little 等人研制的 CTRL-C
 - Boeing公司的 EASY 5 及 EASY5x
 - Integrated Systems 公司的 Matrix-X 及 Xmath
 - Systems Technology Incorporated 公司的 CC
 - Visual Simulation 公司的 VisSim、O-Matrix
 - 韩国汉城国立大学权旭铉教授的 CemTool
 - 免费软件 Octave、Scilab等
- 或多或少受MATLAB影响，语句相似



CACSD计算机工具走向

- 第三阶段另一个领域——计算机代数系统
 - Mathematica, Wolfram Research, Control Professional
 - Maple, 加拿大Waterloo大学, Maplesoft
 - MATLAB与Mathematica的接口——MathLink
 - MATLAB的符号运算工具箱
- 第四阶段：198?- (Smalltalk,1972)
 - 面向对象（object-oriented）的设计技术
 - MATLAB语言就是一种面向对象的语言



交互式语言另一种尝试：软件集成

- 1984年，美国Spang III 教授
 - SIMNON、CLADP、IDPAC
 - SSDP (state space design program)
 - 各个组成软件之间靠读写文件的方式来传递数据
- 1986年，英国UMIST的ECSTASY (environment for control system theory and synthesis)，1988 beta test会议
 - Howard H Rosenbrock、Neil Munro主持
 - MATLAB、ACSL、TSIM、Mathematica
 - LATEX、FrameMaker等排版软件 (语言)
 - PC不兼容。SUNS工作站上运行



集成软件的意义与局限性

- 有很好的历史意义，但未得到普及
- 原来每个软件自身的封闭性导致不易沟通
- 后来每个软件自身的发展扩展了功能
 - MATLAB的仿真环境Simulink
 - MATLAB的符号运算功能
 - MATLAB与Mathematica、Maple等的接口
 - MATLAB的LaTeX输出



仿真软件的发展概述

➤ 仿真语言阶段

➤ 国际仿真委员会(Simulation Councils Inc., Sci)

➤ 1967年仿真语言 CSMP(computer simulation modelling program)

➤ 中科院沈阳自动化研究所马纪虎研究员在 1988 年推出了该语言的推广版本——CSMP-C

➤ Mitchell and Gauthier Associates公司

➤ ACSL (advanced continuous simulation language)

➤ Karl Astrom 教授主持开发的 SIMNON

➤ 英国Salford大学的ESL仿真语言



仿真软件的发展概述

➤ 图形化建模与仿真阶段

➤ MATLAB 下的 Simulink

➤ Scilab 配套的 Scicos

➤ 其他领域的建模工具如 PSpice

➤ 多领域物理建模与仿真阶段

➤ MATLAB/Simulink

➤ 在一个框架下实现机、电、磁、控制等建

➤ SimScape 仿真语言

➤ Modelica



控制系统计算机仿真概述

- 为什么要学习MATLAB
- 控制问题演示
- 本课程主要内容
- 计算机工具发展概述
- MATLAB语言发展概述



MATLAB史前状况

- 线性代数问题的求解
 - 有线性代数软件包EISPACK与LINPACK可以调用
 - 从当时Fortran语言变量传输的角度看只能使用一维数组
 - 矩阵特征值计算的核心代码

```
CALL BALANC(NM,N,A,IS1,IS2,FV1)
CALL ELMHES(NM,N,IS1,IS2,A,IV1)
CALL ELTRAN(NM,N,IS1,IS2,A,IV1,Z)
CALL HQR2(NM,N,IS1,IS2,A,WR,WI,Z,IERR)
IF (IERR.EQ.0) GOTO 99999
CALL BALBAK(NM,N,IS1,IS2,FV1,N,Z)
```



MATLAB之父——Cleve Moler教授

- 1978年，时任美国New Mexico大学计算机系主任
- 构思并开发了MATLAB，1978
 - Matrix Laboratory，免费交流版本
 - 用一个语句求解线性代数问题 $\text{eig}(A)$ 、绘图功能
 - 用 Fortran 语言编写了集命令翻译、科学计算于一身的一套交互式软件系统





MATLAB版本的变迁

- Cleve Moler、Jack Little建立了The MathWorks Inc
- 1984年第一个商品版本，用C改写全部代码
 - PC-MATLAB for DOS、Pro-MATLAB
- 1990年，MATLAB 3.5i是第一个可以运行于Microsoft Windows的版本，两个窗口
 - 稍后推出的SimuLAB，1992年改名Simulink
- 1992年MATLAB 4.0：Windows编程
 - 1994，MATLAB 4.2，支持图形用户界面编程



MATLAB版本的变迁

- 1996年，MATLAB 5.0，新数据结构如类、对象、单元数组，支持面向对象的编程
 - 1999年MATLAB 5.3，全新最优化工具箱和 Simulink 3
- 2000年，MATLAB 6.0，在操作界面上有了很大改观，抛弃了 LINPACK、EISPACK，改用更具优势的 LAPACK 软件包和 FFTW 系统，速度变得更快，数值性能也更好
- 2004年，MATLAB 7.0 版：多领域物理建模仿真策略



MATLAB版本的变迁

- 2012年9月，MATLAB 2012b暨8.0版，全新的界面，强大的仿真功能、更多的工具箱
- 2016年3月，MATLAB 2016a暨9.0版
 - 2017年9月MATLAB 2017b提供了全新的深度学习等功能
- MathWorks 公司每年在3月和9月分别推出a版和b版



MATLAB在控制领域的应用

- Jack Little，控制工程师，率先洞察到MATLAB在控制中的巨大应用潜能，开发了第一个控制系统工具箱
 - 全盘改写了MATLAB Fortran源代码
- MATLAB在控制领域工具箱的优势
 - 丰富可靠的矩阵运算、科学运算、图形绘制、数据处理
 - 强大的建模仿真等功能
 - 工具箱开发良性循环，著名控制学者参与：Alan Laub、Michael Sofanov、Leonard Ljung、Jan Maciejowski等，增加了工具箱的信誉



控制相关的工具箱

- 相关的控制领域工具箱
 - 控制系统工具箱 (Control System Toolbox)
 - 系统辨识工具箱 (System Identification Toolbox)
 - 鲁棒控制工具箱 (Robust Control Toolbox)、
 - 多变量频域设计工具箱 (Multivariable Frequency Design Toolbox)
 - 神经网络工具箱 (Neural Network Toolbox)
- 我为本课程与相关研究开发的工具箱
 - 最优控制器设计工具箱
 - 分数阶微积分与分数阶控制工具箱
 - 本课程的配套MATLAB代码集



Q & A

感谢您的聆听和反馈