

加工过程的计算机控制

姚锡凡 常少莉 编著



含 1CD



加工过程的计算机控制

姚锡凡 常少莉 编著



机械工业出版社

本书介绍了加工过程的计算机控制, 包括常规控制、现代控制和智能控制等内容。在简述加工过程控制系统组成及相关知识的基础上, 根据加工过程模型具有非线性、不确定性和时变性等特点, 利用 MATLAB 语言及其 Simulink, 分析了加工过程的模型及其控制响应特性, 系统而全面地设计和实现加工过程的计算机控制, 包括 PID 控制、鲁棒与优化 PID 控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制和专家控制等。随书附送的光盘提供了相应的详细源程序及 CAI 课件, 以便教学与自学以及验证有关实例, 同时也给出一些加工过程自动控制的实验结果, 以便学以致用、理论联系实际。

本书适用于从事生产自动化、机械工程、机电一体化的研究人员和工程技术人员阅读, 可作为机械工程及自动化、机电工程、工业自动化等专业的硕士研究生和高年级本科生的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

加工过程的计算机控制/姚锡凡, 常少莉编著. —北京: 机械工业出版社, 2004.8

ISBN 7-111-14684-0

I. 加... II. ①姚...②常... III. 机械加工—计算机控制—研究生—教学参考资料 IV. TG-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 056249 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 冯春生 版式设计: 霍永明 责任校对: 贾卫东

封面设计: 陈 沛 责任印制: 李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·5.375 印张·205 千字

定价: 19.00 元 (含 1CD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

计算机技术的发展,已使机械加工发生了深刻的变化,数字机床就是其最典型的表现之一。但在传统的数控机床上,一般都在编程时预先选用较保守的切削参数,而这些参数不能随切削条件的变化而改变,机床的自适应控制正是为了适应不同切削条件的需要而发展起来。将自动控制技术应用于切削加工过程,使机床能根据加工状况实时地调整切削参数的能力,在确保系统稳定正常运行和一定加工质量的情况下,尽可能地发挥出机床的加工潜力,同时起到保护刀具和机床以及保证加工质量等的作用。本书较全面而系统地介绍了加工过程的自动控制,所涉及的控制算法包括常规控制、现代控制和智能控制等。本书根据加工(车、铣、磨、钻等)过程的特点、应用广泛性和自动控制发展趋势,在已有的众多控制算法和研究中,有所着重和取舍。在内容取舍上,侧重介绍那些具有重要应用价值和广阔发展前景的控制算法。在加工过程的常规控制算法中,着重介绍了PID控制。PID控制在工业生产中获得了最为广泛的应用,是其他控制算法的基础之一,并且与其他控制算法结合而形成诸如自适应PID、智能PID等。在加工过程的现代控制算法中,着重介绍自适应控制。自适应控制是现代控制算法的典型代表,在加工过程控制方面的应用研究较多,并取得了较多研究成果和一定的实际应用。鲁棒控制是现代控制的研究热点之一,为具有不确定模型的加工过程控制提供了一种新思路。加工过程的智能控制(包括模糊控制、神经网络控制、专家控制等),是近些年来加工过程控制研究的前沿热点和重点。智能控制是自动控制发展的新阶段,其特点之一是不依赖被控对象的数学模型。由于传统的自动控制依赖于过程模型,而加工过程由于加工参数的影响而具有非线性、时变性和不确定性,因此发展不依赖或少依赖于加工过程模型的智能控制是十分必要和具有重要的实用价值。

全书共分10章。第1章介绍加工过程控制系统组成及相关概念与最流行的控制仿真语言——MATLAB语言,以便读者对计算机控制系统及其仿真有一个总体认识;第2章介绍加工过程的模型及其特性,以便读者对加工过程的非线性、时变性、不确定性和非最小相位特性有所了解;第3章和第4章是有关控制系统的数学模型与转换、系统的时间与频率响应,这两章是控制系统的分析、设计与仿真的基础;第5、6、7、8、9、10章分别介绍加工过程的PID控制、鲁棒与优化PID控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制和专家控制,是本书的重点和主要内容。随书附送的光盘提供了例题的详细程序和CAI课件。第7章由

IV

常少莉编写,其余章节由姚锡凡编写,梁帆参与了本书的CAI制作。在本书编写过程中,作者参阅和引用了许多相关的著作和论文,在此对这些著作和论文的作者深表感谢。

本书在总结作者近些年教学与研究成果,特别是在国家自然科学基金(50175029, 59905008, 59585006)和教育部留学回国人员科研启动基金资助所获得的研究成果基础上,进一步系统化、实用化编写而成的。本书具有如下特点:

(1) 新颖与系统性 本书不仅介绍了加工过程的常规控制和现代控制,而且还介绍了近几年发展起来的加工过程智能控制。取材新颖,重点突出,包括PID控制、鲁棒与优化PID控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制、专家控制等内容。

(2) 结合工程实际应用 以加工过程为具体的研究对象,结合生产的实际情况,考虑了诸如非线性、时变性和不确定性等特点,具有非常强的工程性和实用性。

(3) 便于自学和直接应用 书中提供了大量经调试运行的源程序,以及经生产实践应用所得成果,便于自学和直接使用与借鉴。

本书适用于从事生产自动化、机械工程、机电一体化的研究和工程技术人员阅读,可作为机械工程及自动化、机电工程、工业自动化等专业的硕士研究生和高年级本科生的教材。

疏漏不妥之处,盼请读者不吝批评指正。

作者

2004年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 加工过程控制系统的组成	1
1.2 加工过程的自动控制	2
1.3 计算机控制	4
1.4 MATLAB 简介	6
第 2 章 加工过程的模型与分析	12
2.1 加工过程模型	12
2.2 加工过程模型的仿真分析	15
第 3 章 控制系统的数学模型与转换	21
3.1 控制系统数学模型	21
3.2 控制系统数学模型之间的转换	23
3.3 方框图模型的化简	27
第 4 章 系统的响应与根轨迹分析	29
4.1 系统的响应函数	29
4.2 线性时不变系统观察器	32
4.3 根轨迹设计工具	36
第 5 章 加工过程的 PID 控制	42
5.1 PID 控制	42
5.2 PID 控制系统设计	52
第 6 章 加工过程的鲁棒与优化 PID 控制	64
6.1 不确定性系统的鲁棒 PID 控制	64
6.2 非线性系统的优化 PID 控制	72
第 7 章 加工过程的自适应控制	76
7.1 概述	76
7.2 自适应控制的基本思想及控制模型	77
7.3 增益调整自适应控制	78
7.4 模型参考自适应控制	82
7.5 零极点配置自校正控制	85
7.6 MRAC 与 PID 控制的比较	92
7.7 自适应控制的应用实例	96
第 8 章 加工过程的模糊控制	99

8.1 模糊控制原理及查表法实现	99
8.2 模糊推理法及其实现	104
8.3 自适应模糊控制	112
8.4 基于模糊芯片的加工过程控制实验	116
8.5 FLC 和 SOFLC/AFLC 与 PID 对比实验	122
第 9 章 加工过程的神经网络控制	125
9.1 神经网络模型及其控制学习结构	125
9.2 基于神经网络的加工过程建模	128
9.3 加工过程的神经网络自适应控制原理与仿真	130
9.4 基于神经网络的控制实验示例	140
第 10 章 加工过程的专家控制	145
10.1 专家控制简述	145
10.2 基于知识的加工过程控制示例	148
参考文献	160

第 1 章 绪 论

本章主要讨论加工过程计算机控制的基本概念。首先介绍加工过程控制系统的组成和控制算法，然后简介加工过程的自动控制与计算机控制相关知识，最后介绍控制系统的计算机控制，以及在控制领域的分析与设计研究中最有影响和最为有效的编程语言——MATLAB 语言。

1.1 加工过程控制系统的组成

一个闭环控制系统由被控制对象、控制器和检测装置等环节组成，图 1-1 是一个加工过程的负反馈控制系统。

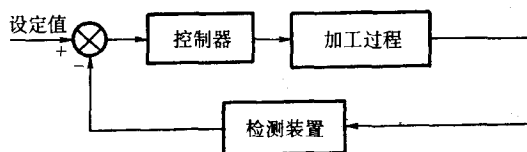


图 1-1 加工过程控制系统框图

图 1-1 中的控制器根据设定值与过程的输出之差按照某种算法或规律运算，其输出结果作为控制量。而按调节规律的不同，控制器算法可分为常规控制（如 PID 控制和前馈控制等）、现代控制（如自适应控制和变结构控制等）及智能控制（如专家控制和模糊控制等），如图 1-2 所示。

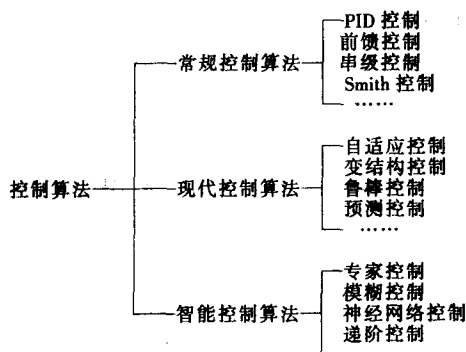


图 1-2 控制算法的分类

由于控制方法众多，本书不可能对每种方法都作详细的介绍。后面各章将结合加工过程的特点，分别介绍具有代表性和应用较多的加工过程控制系统，

如 PID 控制、自适应控制和模糊控制等。PID（比例积分微分）控制是常规控制算法的代表，在工业生产中，获得最为广泛的应用。在加工过程控制的研究中，PID 控制早期研究较多，现在大多集中于自适应控制和智能控制的研究，但 PID 算法是其他控制算法的重要基础，并且与其他控制算法结合而形成诸如自适应 PID、智能 PID 等。此外，其他控制算法的优劣还往往要与 PID 控制进行比较后才能显现出来。自适应控制是现代控制算法的主要代表，在加工过程控制的应用研究较多，并取得了较多的研究成果。鲁棒控制是现代控制的研究热点之一，对于模型具有不确定和非线性的加工过程控制，提供了一种新思路。加工过程的智能控制经过 20 多年发展已取得了大量的成果。由于基于知识的控制（专家控制）存在控制实时性和机器学习等问题，目前对加工过程智能控制的研究较多集中于模糊控制和神经网络控制，特别是加工过程的模糊控制取得了丰富的研究成果，是目前加工过程控制的研究热点之一。

1.2 加工过程的自动控制

数控机床的研究成功使机械制造业发生一次技术革命，也使机械加工自动化发展进入了一个新阶段。在传统的数控机床上，由编程人员预先确定好切削速度及进给速度等，而这些预先给定的工艺参数，与编程人员的经验和知识有关，这些参数往往不是最优的，而且一旦确定下来就不能随切削条件的变化而改变。机床的自适应控制正是为了适应不同切削条件的需要而发展起来的，其主要思想是在加工过程中，随时实测某些状态参数，并且根据预定的评价指标（如最大生产率、最低加工成本、最好加工质量等）或约束条件（恒切削力、恒切削速度、恒切削功率等），及时自动地修正输入参数，使切削过程达到最佳状态，以获得最优的切削效益。

始于 20 世纪 50 年代末 60 年代初的加工过程自适应控制，可分为优化自适应控制（Adaptive Control Optimization, ACO）和约束自适应控制（Adaptive Constraint Control, ACC）两大类。其中 ACO 系统的研究侧重于刀具磨损模型的辨识与建模、切削用量的实时优化算法等方面。由于 ACO 系统中性能指标与控制变量之间存在严重的非线性，加上需要对刀具磨损进行在线检测，使得 ACO 系统寻优过程的期望动态特性的获得变得异常困难，因而难以满足实际加工过程的需要。由于在线检测的局限性和加工过程模型的不确定性，ACO 自适应控制在加工生产上应用不普遍。而 ACC 系统保持约束（切削力、功率等）的恒定，可通过工艺技术指标的充分利用来间接地使粗加工的生产率最大，还可提高零件加工精度。由于不用经济技术指标，回避了刀具磨损在线检测这一至今仍未得到解决的难题，因而得到较快的发展和更深入的研究。

加工过程的约束型控制,可分为常规控制(固定增益控制)、自适应控制和智能控制等。由于被加工的工件几何形状、材料特性和刀具磨损等,导致加工过程的模型具有时变性和不确定性,因此那些采用增益固定不变的常规控制器,在加工过程模型参数发生较大变化时,使控制系统的性能严重地恶化,甚至变得不稳定。由于自适应控制能根据加工过程的参数变化而自动调整控制器的参数,因此获得了人们的更多关注和重视。

图 1-3 是约束自适应控制(ACC)示意图,当背吃刀量或切削宽度增大时,进给速度相应地减小,而采用普通方法加工时,采用固定的进给速度(图中虚线,进给速度按最恶劣条件设定),其进给速度较低,生产率也较低。

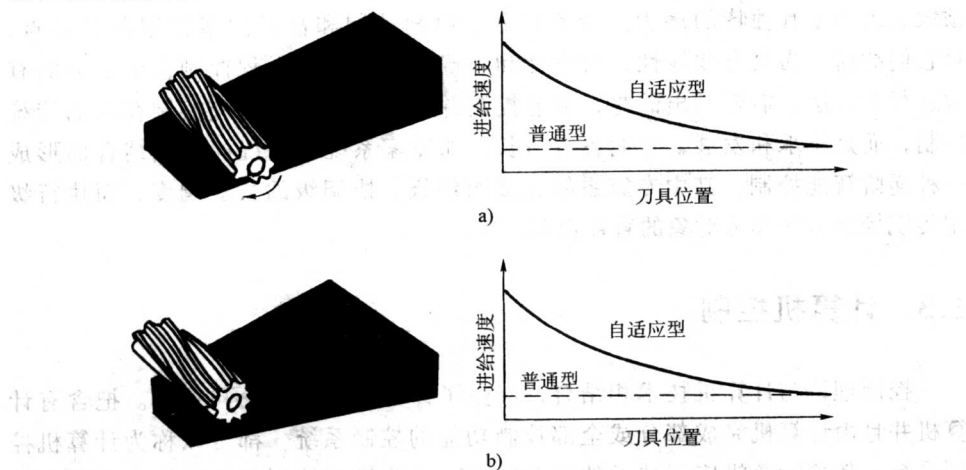


图 1-3 约束自适应控制

a) 可变深度 b) 可变宽度

加工过程的 ACC 又可分为三种形式:可变增益的自适应控制、模型参考自适应控制(MRAC)和极点配置自校正(STC)控制。可变增益自适应调整方案旨在确保系统的开环增益稳定。模型参考自适应控制和自校正控制都是建立在模型参数估计有效的基础上,由于加工过程具有时变性,因此需要实时在线辨识过程模型,而加工过程的非线性使得辨识变得困难和实时控制受到影响。当加工过程的模型具有非最小相位特性时,就不能采用常规的 MRAC,要用修正的 MRAC 或极点配置自校正控制,但修正的 MRAC 算法或 STC 算法较为复杂。由于加工过程模型的非线性、时变性、不确定性和非最小相位特性,使得基于模型的自适应控制在加工生产上的应用受到一定的限制。

智能控制是自动控制发展的新阶段,其特点之一是不依赖被控对象的数学模型。由于传统的自动控制依赖于过程模型,其加工过程受加工参数的影响而具有严重的不确定性和时变性,因此发展不依赖或少依赖于加工过程模型的智

能控制是十分必要的,同时也是适应加工系统的高度集成化和智能化的需要。1980年 Matsushima 等首先研究了机床的智能控制,此后对加工过程的智能控制进行了广泛的研究,包括加工过程的专家控制、模糊控制和神经网络控制等领域。专家控制是专家系统与自动控制技术的结合,它利用被控对象与人操作控制的各种知识来弥补传统控制因难以建立对象模型而无法进行有效控制的不足。模糊控制的本质是将人的操作经验用模糊关系来表示,通过模糊推理和决策方法来对复杂过程进行有效的控制,具有不依赖于被控对象模型和鲁棒性强等特点,为非线性和不确定性的复杂系统控制提供了良好的途径。神经网络因其具有并行计算、分布式信息存储、非线性映射能力和自适应学习能力,已在控制领域表现出了其独特的潜力。专家控制、模糊控制和神经网络控制各具特点,对它们的研究为具有非线性、时变性和不确定性的加工过程控制提供了新的有效途径和方法。需要指出的是,智能控制并不排斥包括自适应控制在内的传统控制,而是继承和发展,它们各有所长,如专家系统与传统控制相结合而形成一种递阶智能控制,其中专家系统完成组织级、协调级的智能调度,而执行级用传统控制方法作为对象的直接控制。

1.3 计算机控制

控制理论与计算机技术相结合,产生了计算机控制理论与技术。把含有计算机并且由计算机完成部分或全部控制功能的控制系统,都可以称为计算机控制系统。随着计算机应用技术的日益普及,计算机在控制工程领域中也发挥着越来越重要的作用,它在控制系统中的应用主要可分为以下两个方面。

(1) 利用计算机帮助工程设计人员对控制系统进行分析、设计、仿真以及建模等工作,从而大大减轻了设计人员的繁杂劳动,缩短了设计周期,提高了设计质量,这方面的内容简称为计算机辅助控制系统设计(Computer aided control system Design, CACSD)或控制系统 CAD,这是计算机在控制系统方面的离线应用。

(2) 利用计算机代替常规的模拟控制器,而使它成为控制系统的一部分,对于这种有计算机参与控制的系统简称为计算机控制系统,这是计算机在控制系统中的在线应用。计算机控制系统与通常的模拟反馈系统最突出的差别是控制规律由数字计算机来实现。由于数字计算机具有采集、传送、存储、处理大量数据的能力,使自动控制进入了以计算机为主要控制设备的新阶段。

计算机与自动控制的结合日益密切和广泛,不仅能实现复杂的控制规则,而且被控对象已从单一回路扩展到企业生产过程的管理和控制。计算机控制系统按功能来分,有顺序控制、程序控制、直接数字控制、计算机监督控制、分

级控制和分布控制等；按控制规律来分，则有 PID 控制、最优控制、自适应控制、模糊控制、神经网络控制和专家控制等。本书主要按控制规律来介绍加工过程的计算机控制。

计算机控制系统由计算机、被控制对象、输入输出通道和检测装置等环节组成，是强调计算机作为控制系统的一个重要的组成部分而得名。计算机通过输入通道将采样得到的数据，按预定的控制规律进行运算，并通过输出通道把计算结果转换成模拟量（或直接以数字量输出）去控制被控对象，使被控制量达到预期的目标。计算机的高速度、高精度、集成化、大容量、多功能，特别是日趋完善和功能强大的各种控制软件的支持，使它参与各类过程的控制有着广阔的前景。

CACSD 专用于研究控制系统的建模、分析、设计与仿真，因其与控制理论、控制系统紧密相联，利用不断汲取的计算机技术新成果，加速设计过程，优化设计结果，并具有直观、快捷、准确等优点，所以，CACSD 自研究开发以来就显示出了极强的生命力，因而在控制理论的研究、教学、工程设计和工业生产中发挥着重大作用，已成为控制理论研究教学不可缺少的工具。CACSD 已引起世界各国控制界的普通重视，开展了一系列专门的研究，取得了卓著的成效，北美、西欧各大学都在使用 CACSD 软件进行教学和科研。CACSD 学术组织陆续成立，CACSD 学术会议经常召开。

CACSD 形成于 20 世纪 60 年代末 70 年代初，是随着计算机技术和控制理论的发展、实际应用的需要以及算法的突破而形成和发展起来的。

在第一台数字电子计算机问世以前和问世以后不久，控制系统的建模、分析、设计、仿真的主要依据是经典控制理论，形成了一套行之有效的工程化设计方法，如根轨迹图、奈魁斯特图、波特图的使用等，只靠试探法手工设计就可以满足控制系统分析设计的需要，无需计算机的介入，而且初期计算机性能差，编程难，不易交互，只用来处理数值计算问题。20 世纪 50 年代中期，航天技术的需求导致了称为现代控制理论的状态空间法的产生和发展，它不仅特别适于各种空间问题，更重要的是现代控制理论是以线性空间和矩阵理论为基础，对控制系统进行的定量分析与设计，能够借助计算机进行必要的运算。空间问题中分析设计的计算量很大，且随着系统的阶数呈几何级数上升，有了计算机的参与，才使人工难以完成的运算得以进行。20 世纪 60 年代大型机批处理运作方式使如频率响应、时间响应、根轨迹、仿真等运算成为可能，世界各地各院所都有自己编写的各种各样的运算程序。欧美逐渐形成可联合使用的各种算法子程序库，但它们几乎没有软件可移植性、可兼容性及可重用性，数据难以通用，当时也没有任何商用软件。20 世纪 70 年代随着主机（Mainframe）终端访问的实现，开始出现各种交互综合功能软件用于一次完成控制系统分析设计和仿

真等不同任务，专用于控制问题的商用软件大量涌现，这些软件一般规模很大，难以修改和扩充，控制系统设计者不得不亲自编写自己需要的专用软件。1980年，Moler 于 LUND Institute of Technology 召开的关于控制系统数值计算的学术会议上，正式公开宣布了矩阵数值计算软件 MATLAB 的开发成功。MATLAB 的问世在控制界产生了巨大的影响，现已成为最有影响和最为有效的 CACSD 编程语言。

自 1993 年以来，Math Works 公司相继推出了 MATLAB4.0、MATLAB4.2、MATLAB5.2、MATLAB6.0、MATLAB6.5 等版本。国内已陆续出版了介绍 MATLAB 的专著，使用 MATLAB 的单位和个人也不断增加。随着 MATLAB 版本的不断升级，其所含的工具箱的功能也越来越丰富，因此应用范围也越来越广泛，已成为涉及数值分析的各类设计不可或缺的工具。本书将利用 MATLAB6.5 和相应的 Simulink 对加工过程进行分析、设计、仿真研究。

1.4 MATLAB 简介

MATLAB 的含义是矩阵实验室 (MATRIX LABORATORY)。经过十几年的完善和扩充，它已发展成为线性代数课程的标准工具。它集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体，构成了一个方便的、界面友好的用户环境。在这个环境下，对所要求解的问题，用户只需简单地列出数学表达式，其结果便以数值或图形方式显示出来。

MATLAB 不仅可完成基本代数运算操作，而且可完成矩阵函数运算，还提供了丰富的实用函数命令。可以用 Help 命令得到有关使用这些函数的详细说明，还可根据需要编写函数。MATLAB 具有非常强的数值计算、图形显示和可视化能力，其编程效率要比传统的计算机语言（如 BASIC、FORTRAN 或 C 语言等）高出几倍，比如用 MATLAB 语言的一个语句（函数）就可实现二维或三维图形的作图，不仅编程效率高，而且还可得到较高质量的图形。

MATLAB 的基本运算单元是复数矩阵，包含了实数和复数矢量、常量及多项式、传递函数等。与其他高级语言一样，MATLAB 也提供了条件转移语句、循环语句等一些常用控制语句，流程控制通过 if、else、for、while 等语句来完成，其格式与 C 语言等计算机语言相似。

MATLAB 中包括被称为工具箱 (TOOLBOX) 的各类应用问题的求解工具，如控制系统工具箱、系统辨识工具箱、模糊控制工具箱、神经网络工具箱等。

交互式的模型输入与仿真环境 Simulink 工具箱是 MATLAB 软件的扩展，主要用于动态的仿真。它在 Windows 中提供了建立系统模型所需的大部分类型模块，用户只需用鼠标选择所需模块复制在模型窗口上，双击模块，对其进行参数设定，然后用鼠标将它们连接起来，就构成一个系统的仿真框图。然后可以通过

选择仿真菜单, 设定仿真控制运行参数, 启动仿真过程, 其仿真结果可以通过 Scope 等模块显示出来。

MATLAB 可以利用图形用户界面 (Graphical User Interface, GUI) 设计环境工具 (GUI Design Environment, GUIDE) 直接进行功能按钮编排、控件属性设定、图形位置排列对齐、操作区设定等。这样, 用户就可以根据实际的需求以及个人爱好, 将研究成果用图形的方式表示出来。GUI 易于将图形表现得多元化, 不需要一行行地用程序指令去设定, 只要用鼠标选择即可。在回调 (Callback) 处理模式下, 也可以用程序设计方式将各个相关的处理程序集成为单一的处理系统, 使研究成果表现得更好。GUI 的设计很简单, 只需用鼠标选择即可增减对象, 并且可将数个图形合并到一个图形上, 增强了可视性, 强化了展示 (Demo) 的功能。利用 GUI 开发的程序同样可以在 MATLAB 命令窗口环境下执行, 所以 GUI 的兼容性很强。

有关 MATLAB 的详细内容, 请参阅有关文献, 虽然 MATLAB 与其他高级语言有许多相同之处, 但 MATLAB 本身具有如下特点:

1. 工作空间

MATLAB 启动就进入其工作空间 (Workspace), 在工作空间可直接进行数学运算并显示运算结果, 如图 1-4 中运算 $3^2 + \cos(\pi/2)$, 显示结果 $\text{ans} = 9$, 因此 MATLAB 被称为纸式演算语言。

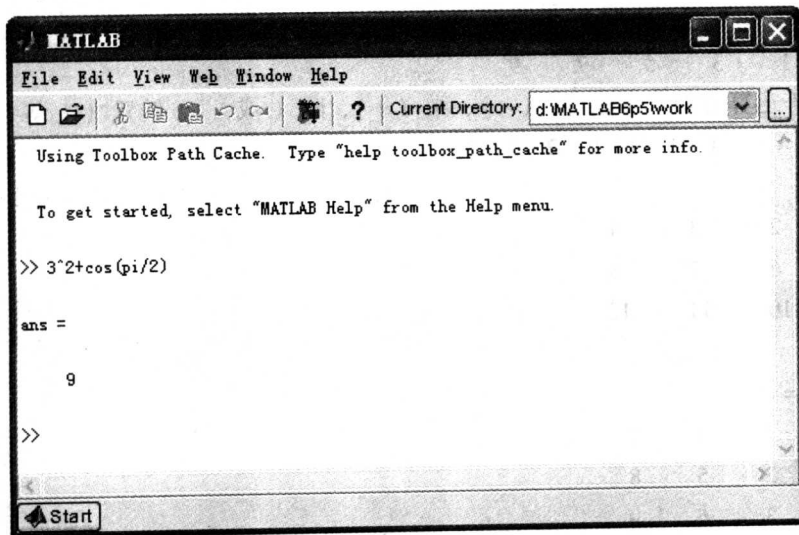


图 1-4 工作空间

2. 矩阵与运算

MATLAB 最基本和最重要的功能是进行矩阵运算。向量可以认为是只有一行

或一列的矩阵，标量（一个数）可以看作只有一个元素的矩阵，向量和标量都可作为特殊矩阵来处理。在工作空间输入一个如下的 3×3 矩阵：

```
A = [1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]
```

得到结果：

```
A =
```

```
1     2     3
4     5     6
7     8     9
```

如果在表达式的最后加上“;”结束，运算结果将不在屏幕上显示，但得到的结果是一样的。在建立矩阵时，元素之间空格和“,”意义相同，“;”起到换行符的作用。在 MATLAB 中可以利用特殊函数构造特殊矩阵，如 `zeros()`、`ones()` 等。

可用“:”来表示行或列的所有元素，如 `A(2,:)` 表示矩阵 *A* 的第 2 行，即有：

```
ans =
```

```
4     5     6
```

“:”也用来构造向量，在增量的前后加上冒号，如：

```
B = [1:2:10]
```

```
B =
```

```
1     3     5     7     9
```

矩阵运算有加 (+)、减 (-)、乘 (*)、除 (/或 \)、转置 (') 等，如：

```
C = A + [1 1 1; 2 2 2; 3 3 3]
```

```
C =
```

```
2     3     4
6     7     8
10    11    12
```

```
A'
```

```
ans =
```

```
1     4     7
2     5     8
3     6     9
```

数组（向量）运算按元素进行，如对矩阵 *A* 的第 2 行的各元素求平方得：

```
A(2,:).^2
```

```
ans =
```

```
16    25    36
```

3. 在线帮助

通过 MATLAB 的在线帮助功能,可获得有关函数的用法,并有具体实例供参考学习,是经常用到的工具。

(1) help 在 MATLAB 工作空间,键入 help 后跟命令或函数,就可获得该命令或函数的用法和相关信息。

(2) lookfor 在 MATLAB 工作空间,键入 lookfor 后跟关键词,就可获得该关键词的相关信息。

(3) Help 菜单 通过 MATLAB 工作空间中的 Help 菜单(图 1-4),可以对选项和条目进行浏览和查询。

4. 作图

绘图函数有 plot ()、subplot () 和 mesh () 等。

(1) plot () 用于绘制二维图形,如绘制 $y = \sin(x)$:

```
x = 0: 0.01: 6 * pi;
```

```
y = sin(x);
```

```
plot(x, y);
```

```
grid;
```

```
title('y = sin(x)')
```

```
xlabel('x')
```

```
ylabel('y')
```

```
gtext('sin(x)')
```

运行上述语句后,得到图 1-5 所示的结果。绘图函数可以对各种线型、颜色等图形特性进行设置,详见有关帮助文件。title 用于标示图题;xlabel 用于标示

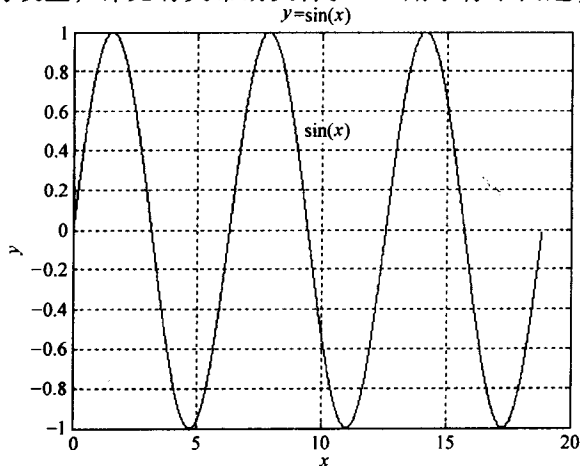


图 1-5 plot (x, y) 绘图

x 轴的名称; ylabel 用于标示 y 轴的名称; gtext 用于鼠标在指定的图形地方加入文字说明; “\it” 将后续文本字体变为斜体。另外, MATLAB 还可显示希腊字母等特殊字符, 如用 “\zeta” 显示 “ ζ ”, “\Omega” 显示 “ ω ” 等。

(2) subplot () 将图形窗口分割为若干个子窗口、其基本格式为:

subplot (m, n, p)

上述函数的功能是将窗口分割为 m 行 n 列个子窗口, p 指定了当前窗口。

(3) mesh () 用于绘制三维图形, 如运行:

$z = \text{peaks} (25);$

mesh (z);

xlabel ('X')

ylabel ('Y')

zlabel ('Z')

将得到图 1-6 所示的结果。

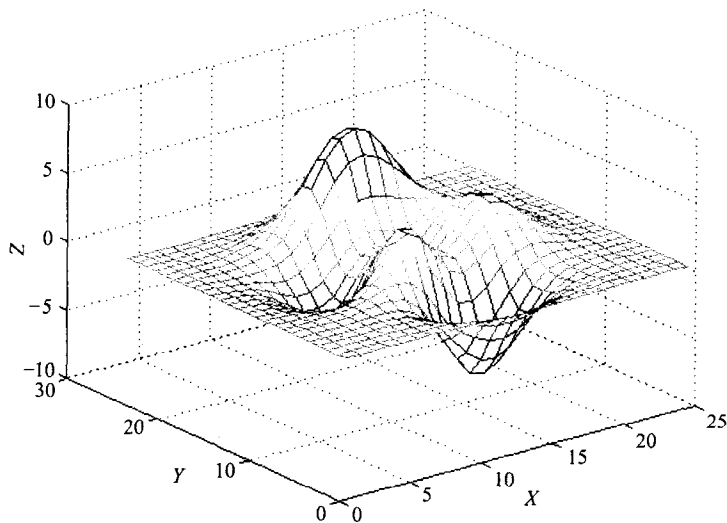


图 1-6 用 mesh () 函数绘制的三维图

5. Simulink

Simulink 与用户交互接口是基于 Windows 的图形编程方法, 因此非常易于被用户所接受, 使用十分灵活方便。在 MATLAB 命令窗口键入 simulink 按回车键, 或按工具栏上的  按钮, 或以打开 mdl 文件方式进入 Simulink 浏览器或模块库 (图 1-7)。与 Simulink 目录并列的有 24 项作为 Simulink 浏览器的第一层目录, Simulink 目录下还有 13 项子目录。

用 Simulink 的 File (文件) 菜单 (或快捷工具栏按钮 ) 建立一个新 mdl