MATLAB 光学仿真 实用教程

屈玉福 陈沛戎 著

電子工業出版社・ Publishing House of Electronics Industry 北京・BEIJING

内容简介

本书主要围绕物理光学的内容,介绍使用 MATLAB 科学计算软件进行光的传播、干涉、衍射、偏振和傅里叶光学等内容的仿真。本书共 7 章。第 1 章和第 2 章介绍 MATLAB 的基础知识;第 3 章介绍光的电磁理论基础与仿真;第 4 章介绍 MATLAB 在光的干涉理论中的应用,包含多个干涉模型的仿真演示;第 5 章介绍 MATLAB 在光的衍射理论中的应用,包含多个衍射模型的仿真演示;第 6 章介绍 MATLAB 在光的偏振理论中的应用;第 7 章介绍 MATLAB 在傅里叶光学中的应用。

本书可用作高等院校光学、光学工程、光电信息科学与工程等相关专业本科生及研究 生学习专业知识的辅导教材、参考书和仿真辅助教材,也可供相关专业的教师和科技工作 者参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。 版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 光学仿真实用教程 / 屈玉福,陈沛戎著. 一北京: 电子工业出版社, 2022.10 ISBN 978-7-121-44274-2

Ⅰ. ①M… Ⅱ. ①屈… ②陈… Ⅲ. ①Matlab 软件-应用-光学-计算机仿真-教材
 Ⅳ. ①O43-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022) 第 163327 号

责任编辑:米俊萍 文字编辑: 靳 平 印 刷: 装 订: 出版发行: 电子工业出版社 北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036 开 本: 720×1000 1/16 印张: 13 字数: 243 千字 版 次: 2022 年 10 月第 1 版 次: 2022 年 10 月第 1 次印刷 印 定 价: 65.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社 发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。 本书咨询联系方式: mijp@phei.com.cn。

前 言

MATLAB 是由美国 MathWorks 公司出品的商业科学计算软件,具有编程 简单易懂、数据可视化和操作简单等特点,主要用于数据分析、无线通信、深 度学习、图像处理、信号分析、控制系统和计算机视觉等领域,现已成为国际 公认的优秀科技应用软件之一。MATLAB 主要面对科学计算、可视化及交互 式程序设计,可以将数值分析、矩阵计算及非线性系统的建模与仿真等诸多强大 的功能集成在一个易于使用的视窗环境中。本书主要介绍如何应用 MATLAB 来 完成物理光学内容的编程与仿真,并针对光的电磁特性、干涉、衍射、偏振和傅 里叶变换性质等给出具体实例演示,帮助读者更好地理解光的物理本质。

本书围绕物理光学主要内容,结合常见物理光学模型、公式计算和仿真结 果进行讨论,使枯燥无味的光学知识变得更为直观,从而能够帮助读者更好地 掌握光学知识,并且学会 MATLAB 语言编程。另外,本书 MATLAB 代码及仿 真图中的物理量符号等未做标准化处理。

本书的主要特点可以概括为以下几点。

1. 结构清晰,由浅入深

全书结构清晰明了,首先介绍 MATLAB 语言的相关知识及如何安装 MATLAB 软件,之后开展针对光的电磁特性、干涉、衍射、偏振和傅里叶特 性的讨论。讨论过程中的实例是从简单的逐步变为复杂的,使读者从中理解其 本质,并提升编程能力。

2. 紧扣专业知识

本书对过于复杂的理论及算法只做简单介绍,重点放在对 MATLAB 的理 解和仿真上。根据专业课程的要求,本书挑选合适的实例,让读者在实例中体 会变量的运算及变化,并学会如何自己编写和使用 MATLAB 中的函数。

3. 结果讨论丰富

在本书实例后面是结果讨论环节。该环节基于理论模型的特点,对模型中的某个变量进行修改,并在修改参数之后重现仿真结果,使读者深刻体会参数 变化对于仿真结果的影响。另外,本书编写的 MATLAB 代码简单易懂,使读 者易于掌握 MATLAB 编程思路,并提高编程水平。

本书全部实例代码可在华信教育资源网(https://www.hxedu.com.cn/)下载。 由于作者水平有限,书中难免存在错误和疏漏之处,恳请广大读者和同行 批评指正。

作者

目 录

第1章	MATLAB 软件简介 ····································
1.1	MATLAB 的下载与安装 ····································
1.2	MATLAB 基础知识 ····································
	1.2.1 MATLAB 的数值计算4
	1.2.2 MATLAB 的数字和格式
	1.2.3 MATLAB 的变量5
	1.2.4 MATLAB的内置函数6
1-	1.2.5 MATLAB的向量8
44	1.2.6 MATLAB 中的绘图函数 ······14
第2章	MATLAB 仿真结果可视化23
2.1	MATLAB GUI 简介23
2.2	MATLAB GUI 的创建24
2.3	MATLAB GUI 的外观设计
	2.3.1 添加按钮组
	2.3.2 添加静态文本
	2.3.3 添加可编辑文本
	2.3.4 添加滑动条控件
	2.3.5 添加按钮控件36
	2.3.6 添加坐标区控件
2.4	编辑控件功能
2.5	测试 GUI 仿真结果42
2.6	MATLAB App 简介44

2.7	MATLAB App 的编写44		
	2.7.1 MATLAB App 的创建44		
	2.7.2 添加 MATLAB App 组件		
	2.7.3 MATLAB App 代码的编写 52		
第3章	光的电磁理论基础与仿真		
3.1	菲涅耳公式		
3.2	光波叠加61		
	3.2.1 频率相同、振动方向相同的光波叠加		
	3.2.2 驻波63		
	3.2.3 频率相同、振动方向垂直的光波叠加		
	3.2.4 光学拍		
第4章	光的干涉仿真		
4.1	杨氏双缝干涉		
4.2	非单色光波的杨氏双缝干涉		
4.3	平面楔形平板等厚干涉		
4.4	牛顿环干涉		
4.5	柱面楔形平板等厚干涉		
4.6	球面楔形平板等厚干涉		
4.7	平行平板等倾干涉		
4.8	双孔干涉		
4.9	三孔干涉		
4.10) 两列平面波干涉		
4.11	1 传播方向不同的平面波干涉		
4.12	2 平面波与球面波干涉		
4.13	3 球面波与球面波干涉		
4.14	4 迈克耳孙干涉仪		
4.15	5 空间相干性		

目录

4.	.16	时间相干性	24
第5章	Z Z	光的衍射仿真	28
5.	.1	单缝单色衍射	28
5.	.2	矩孔单色衍射13	32
5.	.3	圆孔单色衍射	36
5.	.4	矩孔白光衍射	40
5.	.5	多缝夫琅禾费衍射	12
5.	.6	正弦光栅衍射	18
5.	.7	闪耀光栅衍射15	51
5.	.8	复杂图形夫琅禾费衍射	56
第6章		光的偏振仿真	51
6.	.1	马吕斯定律和消光比	51
6.	.2	偏振光的合成	53
6.	.3	平行偏振光干涉	59
6.	.4	会聚偏振光干涉	73
第7章	1	傅里叶光学	77
7.	.1	平面波的复振幅	77
7.	.2	傅里叶光学常用函数17	79
7.	.3	透镜的傅里叶变换性质	35
7.	.4	衍射的傅里叶变换分析) 2
7.	.5	数字全息技术) 8



第1章 MATLAB 软件简介

MATLAB 是由美国 MathWorks 公司出品的商业科学计算软件,主要用于 数据分析、无线通信、深度学习、图像处理、信号分析、控制系统和计算机视 觉等领域。其名称意为矩阵工厂,主要面对科学计算、可视化以及交互式程序 设计,可以将数值分析、矩阵计算以及非线性系统的建模与仿真等诸多强大的 功能集成在一个易于使用的视窗环境中。其优势在于可以使用高效的数值计算 和符号计算功能减轻用户进行繁杂数学运算的压力,同时具备完备的图形处理 功能,将计算的结果和编程可视化。

MATLAB 在使用上十分简易,是一个高级的矩阵语言,包含控制语句、 函数、数据结构和面向对象编程环境。用户可以在窗口中直接输入语句执行命 令,也可以事先编写好一个较大的复杂程序运行。其语法特征与 C++语言类 似,且更为简单,符合科技人员对数学表达式的书写格式,因此 MATLAB 能 够深入各个学科和各个领域的研究和计算中。

1.1 MATLAB 的下载与安装

MATLAB 的下载地址为 MATLAB 的官网。在浏览器中输入该网址即可跳转到 MATLAB 官网首页,如图 1-1 所示。

MATLAB 官网主要介绍了 MATLAB 在人工智能、系统设计与仿真、无线 通信和电子控制设计等方面的使用,同时提供了在统计学、信号处理、数字图 像处理等方面的产品和服务。

将 MATLAB 官网首页拉到最下方,可以看到 MATLAB 可以试用或者购 买。如果是学生,可以选择 MATLAB 学生版软件进行下载。MATLAB 学生版

• 1 •

软件的界面如图 1-2 所示。



图 1-2 MATLAB 学生版软件的界面

在图 1-2 所示的界面,单击"查询校园授权"按钮,跳转到查询授权资格 界面,如图 1-3 所示。在这里可以通过输入所在大学的信息和大学的邮箱,来 查询是否有资格使用 MATLAB 学生版软件。稍等几分钟即可在所填的大学邮 箱中获得查询授权资格的结果,若获得授权资格,则可以按照 MATLAB 官网 的提示进行下一步的下载与安装;若未获得授权资格,则说明所在的大学暂时 无法使用 MATLAB。

在 MATLAB 官网首页的最下方还有"试用软件"按钮。单击"试用软件"按钮即可跳转到获取试用软件的界面,如图 1-4 所示。

	Academia	
	Campus-Wide License	
	授权咨询 Campus-Wide License 为全校教职员工、研究人员以及学生提供了一个高效的方法来访问 MATLAB 和 Simulink 的全面通用配置。更了解您所在学校是否拥有 Campus-Wide License,请填写下表。	
	*表示必項信息	
	提示信息	
	*大学	
	输入正式名称	
	* 电子邮件	
	请使用正式大学邮箱他却以便通过验证	
	設 設	
	图 1-3 查询授权资格界面	
	试用产品	l
		l
	试用 MATLAB、Simulink 和更多其他产品	1
		l
	获取 30 天免费试用版 登录或注册一个账号	1
27	您可以在预觉器中运行MATLAB,也可以在桌面下载安装。 音看试用版包含概题产品。 输入您的联系方式以继续	l
	工作电邮或大学电邮*	1
	*必须穿段 ###5	1
		l .

图 1-4 获取试用软件的界面

输入所在大学的邮箱之后填写实际情况,即可在所填的邮箱中收到验证电 子邮件,在验证电子邮件中注册 MATHWORK 账户,之后便可下载试用的 MATLAB 进行使用。

1.2 MATLAB 基础知识

在之前的简要介绍中,大家已知 MATLAB 是一个进行数值计算的交互系统,它能将科研工作者从大量的与求解数值有关的任务中解放出来,可以通过 编写一两行的代码来进行高效的操作,其本身还具有极好的图形性能,方便将计

• 3 •

算的结果进行可视化。接下来主要介绍一下在光学仿真中常用的 MATLAB 基础 知识,主要包括数值计算、数字与格式、变量、内置函数、向量和绘图函数,掌 握这些基础知识就能够完成光学仿真代码的编写,从而观察仿真的结果。

1.2.1 MATLAB 的数值计算

MATLAB 首先是一个数值计算的交互系统,其最基本的能力是完成各种数 学运算,其中最为基础的数学运算是加、减、乘、除、乘方。这些运算在 MATLAB 中的符号分别为+、-、*、/、^。这些符号通常与圆括号一起使用。符 号^主要用于获得乘方运算的结果,如2^4 表示2的4次方的结果,即2^4=16。

在 MATLAB 中显示有>>的命令提示符处输入:

>>2-	+3/4*5		
ans =	= \\		
	5.7500		
>>			

得到的计算结果为 5.7500。在实际运算中,大家知道是先算乘、除,后算加、减,即先计算 3 除以 4 的结果,再将其乘以 5 之后,再加 2。在 MATLAB 中这样的算法也是适用的。MATLAB 按照以下的优先级对一个式子进行运算。

首先进行括号中的式子的运算,与我们实际运算中的习惯相同;接着进行 指数的运算,即计算乘方的式子,如 2+3^2=2+9=11;再进行乘、除的运算, 如果有多个乘、除符号,就遵循从左往右运算的原则,如 3*4/5=12/5;最后进 行加、减的运算,同样,如果有多个加、减符号,就遵循从左往右运算的原 则,如 3+4-5=7-5=2。

1.2.2 MATLAB 的数字和格式

MATLAB 作为数值计算的工具,需要在输入框中输入数据,并且编写算 法进行计算。输入的数据可以是一些不同种类的数值,主要包括整数、实数、 复数、无穷数和非数值。 在 MATLAB 中,整数可以是 1362、-2156 这样的数值,实数可以是 1.256、-9.88 这样的数值,复数的表示方法和实际使用过程中一致。一个复数 由实数部分和虚数部分组成,虚数部分使用虚数单位 i(i=√-1)来区分,如 一个虚数为 3+2i,其中 3 为实数部分,2i 为虚数部分。无穷表示一个无穷大的 数值,如一个非零常数除以 0 得到的结果为无穷。非数值则表示一个没有意义 的数值,如一个 0 除以 0 得到的结果为非数值。

对于一些比较大的数值, MATLAB 常常会使用一个带"e"的符号来显示。符号"e"常常用于表示一个非常大或非常小的数值, 其用法与科学记数法相同, 例如, 1.34e+3=1.34*10^3=1340; 1.34e-1=1.34*10^-1=0.134。

在 MATLAB 中,都是以双精度浮点数来进行计算的,这也就意味着计 算结果大约有 15 位有效数字。输出的计算结果可以通过"format"命令来控 制。当输入"format short"时,输出的计算结果保留 4 位小数,如输出 10 倍的圆周率为 31.4162。当输入的命令为"format short e"时,输出的计算结 果使用科学记数法的方式,保留 4 位小数,如 3.1416e+01。当输入的命令为 "format long e"时,输出的计算结果同样使用科学记数法的方式,只不过保 留更多的有效数字,如 3.141592653589793e+01。当输入的命令为"format bank"时,输出的计算结果保留更少的有效数字,如 31.42。通过控制输出 的有效数字的设定可以输出不同格式计算结果,方便科研工作者进行数据的 记录和统计。

1.2.3 MATLAB 的变量

首先在 MATLAB 中进行如下运算,输入 3-2^4,得到运算结果,再将运 算结果乘以 5 得到一个新的运算结果。

>> 3-2^4 ans = -13 >> ans*5

• 5 •

ans = -65

在第一次的运算中,计算结果被 MATLAB 标记为了"ans",并且在第二次的运算中,被标记为"ans"的数值参与运算。这个"ans"的具体数值被改变。也就是说,这个"ans"是一个变量,可以用于储存不同的数值,用户可以自己定义一个变量的名称,并且通过"="来对变量进行赋值,例如:

>> $x = 3-2^{4}$	
x =	14
-13	SF F
>> $y = x*5$	
y =	
-65	

经过这样的操作之后, *x* 被赋予-13, *y* 被赋予-65, 这些变量可以在随后的计算中被用到,用来代替某些数值进行运算。

对于一个变量,首先需要给其赋予一个合法的变量名。合法的变量名可以 由任何字母和数字组合而成,并且由字母开头,如 x3、y1、qq 等,而非法的 变量名如 2p、33n 等。在选择变量名时,应该尽可能避免具有特殊意义的名称, 例如,pi=3.14159…=π,因此避免用 pi 作为变量的名称。

1.2.4 MATLAB 的内置函数

MATLAB 是一个强大的数学运算工具,可以对各种不同的数值进行精确的计算。为了达到更加高效的处理数字运算的目的,MATLAB 的开发者在其中设定了内置函数,它是一类比较特殊的底层函数,一般不是由 MATLAB 语言编写而成,可以通过输入其函数名以及所使用的变量来完成对应的运算,极大地减少了编写具体计算方法的工作量。

最常见也是最经常使用的内置函数为三角函数,即 y=sinx、y=cosx 和 y=tanx。在 MATLAB 中,角的度量单位为弧度。角度制和弧度制是度量角度 大小时所使用的两种不同的方式。角度制使用度、分、秒为单位来测量一个角

的大小,规定一个周角的 1/360 为 1 度。度、分与秒之间的换算关系均为六十 进制。弧度制使用弧长与半径的比来度量圆心角,并用符号 rad 表示。弧长等 于半径的圆弧所对应的圆心角为 1 弧度。由换算关系可以推出,1 弧度约等于 57.3 度,即 1rad≈57.3°。弧度制的精髓就在于统一了度量弧与角的单位,大 大简化了有关的公式和计算量。因此在 MATLAB 的使用中,常常需要把习惯 的角度转化为弧度输入公式中进行计算,才能得到正确的计算结果。例如:

>> x = 5*cos(pi/6), y = 5*sin(pi/6) x = 4.3301 y = 2.5000

如果要使用角度计算,需要引用函数名不同的三角函数,分别为 sind、 cosd 和 tand。除三角函数之外,MATLAB 还内置了反三角函数,分别是反正 弦函数 asin、反余弦函数 acos 和反正切函数 atan。它们分别是正弦函数、余弦 函数和正切函数的反函数,可以用于在已知三角函数值的情况下得到角度的大 小,其对应的角度单位为弧度。例如,使用上面的三角函数结果 *x* 和 *y* 做测 试,输入:

```
>> acos(x/5), asin(y/5)
ans =
0.5236
ans =
0.5236
>> pi/6
ans =
0.5236
```

即可得到对应的角度大小。

除此之外,MATLAB 还包含许多其他的初等函数,如 sqrt、exp、log 等。 其中,sqrt 是开算数平方根的函数,即将一个数输入该函数中,就可以得到这 个数的算数平方根,例如: >> x = 9 >> sqrt(x) ans =

3

函数 exp 是一种指数函数,是求以 e 为底数、x 为指数的幂的函数,例如:

```
>> x = 9
>> exp(x)
ans =
8.1031e+03
```

函数 \log 为 e^x 的反函数,在其中输入一个大于 0 的数,即可得到指数的

值,例如:

```
>> x = 9
>> log(sqrt(x))
ans =
1.0986
```

在 MATLAB 中进行数值计算时,可以直接引用这些函数对数值进行处理。在编写 MATLAB 代码时,也可以使用这些函数处理的结果作为中间数值,待完成全部的计算之后再将最后的结果输出,这样可以使得 MATLAB 代码简洁又高效。

1.2.5 MATLAB 的向量

在数学中,向量指的是具有大小和方向的量,可以形象化地表示为一个带 有箭头的线段,箭头的方向表示的是向量的方向,而线段的长度就代表向量的 大小。向量的概念在线性代数中经过抽象化之后,得到了更为一般的诠释。在 学习向量的同时往往会学习到矩阵。矩阵指的是一个按照长方形阵列排列的复 数或者实数的集合,最早是由方程组的系数及常数所构成的方阵。在数学的运 算中常常见到矩阵,如应用数学学科中的统计分析、物理学中的力学、计算机 科学中的动画制作等。在其他学科的学习中,可以将一些数据按照某种方式记 录下来,记为一个向量,通过不同的向量相互组合,可以得到一个矩阵,对矩 阵进行各种运算得到数据的处理结果。

作为一个高效的数值计算器,MATLAB 也支持向量的运算。同时, MATLAB 包含矩阵运算的内置函数,因此可以完成科研工作中的所有对于矩 阵的操作。在科研过程中所用到的公式都可以在 MATLAB 中编写出来,因此 只要在 MATLAB 中确定输入的数据和运算规律,运行 MATLAB 代码即可得 到结果。

向量通常有两种形式,分别称为行向量和列向量。行向量表示的是一个 1×*n* 阶的矩阵,所包含的元素组成一行。列向量则与行向量相反,表示的是一 个*n*×1 阶的矩阵,所包含的元素排成一列。

在 MATLAB 中可以将一系列的元素通过空格隔开,并将所有的元素用方 括号封闭起来表示一个向量,这些元素的个数称为向量的长度,例如:

>> v = [1, 3, sqrt(5)]1.0000 3.0000 2.2361 >> length(v) ans = 3

通过输入向量的元素以及对应的赋值向量的操作得到一个向量长度为3的行向量。在这个赋值的过程中,空格十分重要,如果不严格按照空格的规则去 赋值向量,将得到一个错误的向量,影响向量长度以及每个元素的准确值,并 在运算的过程中会得到错误的结果。

在 MATLAB 中还能对向量进行特定的数学运算。例如:

>> v2 = [7 5] v2 = 7 5>> v3 = [3 4 5] v3 =3 4 5 对通过赋值得到两个向量 v2 和 v3 进行数学运算,例如,对 v 和 v3 进行加的操作:

```
>> v + v3
```

ans =

4.0000 7.0000 7.2361

还可以对 v 向量进行数乘的运算:

>> v4 = 3*v

v4 =

3.0000 9.0000 6.7082

MATLAB 可以将对向量的加运算和数乘运算结合起来完成更为复杂的计算,并得到正确的结果。

```
>> v5 = 2*v - 3*v3
```

v5 =

-7.0000 -6.0000 -10.5279

因此在科研及数学计算时,可以根据推导的公式或者实验数据处理的方法 在 MATLAB 中编写相对应的 MATLAB 代码,并输入在实验中所获得的数 据,运行该 MATLAB 代码即可得到结果。

但是当对向量长度不同的向量进行运算时,MATLAB将会报错,例如:

```
>> v + v2
```

MATLAB 报错,说明对应的向量长度不同。在 MATLAB 中,长度不同的向量不能进行加、减运算,因此在输入数据时需要统一向量的长度,以免处理过程中报错。

在 MATLAB 中,还可以使用冒号的方式输入行向量,这样可以简单快捷 地得到所需要的行向量,常常用于定义函数的横坐标向量,例如:

>> 1:4 ans = 1 2 3 4

• 10 •

>> 3:7 ans =

34567

但是当输入">> 1:-1"这样一个命令时,得到的是一个空向量,也就是没有 完成对向量的赋值。一般地,如果输入的 MATLAB 代码为"a:b:c",MATLAB 将会自动生成一个初始元素为 a,增量为 b,直到最后一个元素最接近 c 为止的向 量,例如:

```
>> 0.32:0.1:0.6
ans =
0.3200 0.4200 0.5200
>> -1.4:-0.3:-2
ans =
-1.4000 -1.7000 -2.0000
```

而当输入"a:b"时,MATLAB 将会自动生成一个初始元素是 a, 增量为 1, 最终的元素为 b 的向量。当输入"1:-1"时,MATLAB 并不能生成一个以 1 为增量,从1 增加到-1 的向量,因此得到的是一个空向量。

得到向量之后,在进行数据处理时,往往有一些数据是不需要的,或者不 在考虑范围之内,这时就要对向量进行截取,根据要求,选择出对应的元素组 成一个新的向量,接着对新向量进行数学运算得到最终的计算结果。例如,首 先使用冒号来生成一个向量:

>> r5 = [1:2:6, -1:-2:-7] r5 = 1 3 5 -1 -3 -5 -7

如果想得到 r5 向量中的第三个元素,可以直接输入 "r5(3)"来获取第三 个元素的取值:

>> r5(3) ans = 5 如果想获取这个向量中的一系列元素,需要首先找到对应的元素位置的关系。例如,当想获取第三个到第六个元素时,可以同样使用冒号的方式来实现:

```
>> r5(3:6)
```

ans =

5-1-3-5

这样就可以实现获取不同位置处的向量元素。当需要每隔一个元素来选取 元素组成新的向量时,可以类比冒号生成向量时的法则:

```
>> r5(1:2:7)
ans =
```

1 5 - 3 - 7

即可实现对向量从第一个元素开始,每隔一个元素之后将满足条件的元 素单独选取出来组成新的向量。当需要对元素从后往前取出,即将元素的位 数从高往低选取时,可以令冒号中间的数为负数,取到最后一个满足条件的 元素停止:

>> r5(6:-3:1)ans = -5.5

向量还可以表示成列向量的形式。顾名思义,列向量中的所有元素按照从 上到下的顺序排成一列。对于两个由相同元素按照相同顺序排列而成的行向量 和列向量,两者是互为转置关系的,在 MATLAB 中可以使用符号"'"来对 一个向量进行转置操作。例如,在 MATLAB 中定义 w 和 c 分别为一个行向量 和列向量,对其进行转置操作:

```
>> w, w', c, c'
w =
1 -2 3
ans =
1
-2
3
```

ans =	-
	1.0000
	3.0000
	2.2361
ans =	

1.0000 3.0000 2.2361

可以看到转置的操作可以完成行向量和列向量的相互转化。与行向量相类 似,列向量与列向量之间也可以完成数乘、加、减的运算,而其要求仍然是列 向量的长度要相等,例如:

```
>> T = 5*w' - 2*c

T =

3.0000

-16.0000

10.5279
```

对于由实数组成的向量,单纯地使用符号"'"完成转置并不会影响向量 内部的元素,但是如果一个向量由复数组成,单纯使用"'"进行转置的话得 到的是复向量的共轭转置,例如:

```
>> x = [1+3i, 2-2i]
ans =
1.0000 + 3.0000i 2.0000 - 2.0000i
>> x'
ans =
1.0000 - 3.0000i
2.0000 + 2.0000i
```

对每一个元素完成转置时,同时对复数的元素进行了共轭的运算,如果是 为了单纯获得具有复数元素向量的转置,不对其进行共轭的操作,需要使用符 号".'"进行转置操作,例如:

```
>> x.'
ans =
1.0000 + 3.0000i
2.0000 - 2.0000i
```

此时,只对各个元素进行了转置的操作,而复数元素并未转化成对应的共 轭复数。

1.2.6 MATLAB 中的绘图函数

MATLAB 作为一个强大的数值计算器,不仅可以对很复杂的数据进行数 学运算,还可以将运算得到的结果进行可视化,利用 MATLAB 内置的绘图工 具,可以将基础数据与经过运算之后的结果绘制成一幅图像,从中可以分析结 果与基础数据之间的函数关系,帮助用户发现数据之间隐藏的关系。

在 MATLAB 中绘制某个函数的图像,其实质是在函数的定义域内取大量的点,然后将每个点所对应的函数值连接,得到的最终结果即为函数在该定义域内的函数图像。

例如,当要绘制函数 y=sinπx 在 0 ≤ x ≤1 区间上的图像时,首先在这个 区间上以某段固定的长度为间隔,取出一系列的间隔相同的点,然后计算这些 点对应的函数值,再使用直线将这些点相连,完成图像的绘制。

输入 MATLAB 代码 "N = 10; h = 1/N; x = 0:h:1",在 MATLAB 中定义 一个点集 x=0, h, 2h, …, 1-h, 1。另外,可以使用 linspace 函数来完成上 述操作,其格式为 "linspace(a,b,n)",输入这句 MATLAB 代码后,MATLAB 将会生成一系列的 a、b之间包括端点 a 和 b 的 n+1 个等间隔点。因此,可 以输入:

>> x = linspace(0,1,11);

生成一个从0开始,以1为间隔,直到11的一系列点。

>> y = sin(3*pi*x);

分别计算每个点的函数值。最后使用:

>> plot(x,y);

将每个自变量的点与对应的函数值描绘出来并用直线连接,如图 1-5 所示。



图 1-5 $y = \sin \pi x \pm 0 \le x \le 1$ 区间上的图像(间隔 h=0.1)

由图 1-5 可见, y=sinπx 的图像并不连续,在各个 x 的取值处均为折线连接,显然是因为间隔取得比较大,使得 i 不连续。

对代码进行修改,将间隔修改为 0.01,再次进行绘图,观察 $y = \sin \pi x$ 的图像。

```
>> N = 100;

>>h = 1/N;

>>x = 0:h:1;

>> y = sin(3*pi*x);

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

修改间隔后的函数图像如图 1-6 所示。

当减小间距之后,得到如图 1-6 所示的图像,此时的函数图像更加光 滑,每个计算函数值的点之间不是折线连接,能够更好地反映这个函数的变 化趋势,但是绘制函数图像时也不是间隔取得越密集越好,间隔越小,需要 计算的函数值越多,花费的计算时间也就越多,因此在绘图时需要找到合适 的绘图间隔。



在完成一幅函数图像的绘制之后,还需要对图像加上标注,比如横轴表示的物理量的含义,纵轴所表示的物理量的含义,以及整个函数图像代表的具体 意义。在 MATLAB 中,都有具体的函数可以对绘制的图像添加上述信息,这 些函数分别是 title、xlabel、ylabel。它们的使用方法都是在函数后面以单引号 封闭,在单引号内输入的内容会以文本的形式展示在函数图像中。例如,在得 到 $y = \sin\pi x$ 图像的 MATLAB 代码的基础上加上:

> >> title(' y = sinπx 的图像') >> xlabel('x 轴') >> ylabel('y 轴')

加上标注后 $y = \sin \pi x$ 的图像如图 1-7 所示。

由图 1-7 可见,加上标注之后,可以直接运行程序得到函数图像,从而 可以直观地理解程序的功能以及运行结果。例如,从图 1-7 中就可以看到整 幅图像所表示出的函数关系。对于一些带有实际物理意义的物理量,在绘制 函数图像时需要在标注的地方加上物理量的单位,以准确地描述函数的物理 意义。

在进行科学研究时,往往会出现某个函数的取值与若干个参数相关,或者

• 16 •

不同情况下函数值的计算需要使用不同的计算方法等情况,此时要求在同一个 坐标系中画出多幅图像。



图 1-7 加上标注后 $y = \sin \pi x$ 的图像

在 MATLAB 中,如果想要在一个坐标系中绘制多幅图像,直接增加 plot 函数会将原有的图像覆盖,此时需要增加一行代码为 "hold on",此代码的功能为在原先的坐标系中保持第一次绘制的图像,并且之后所绘制的图像不会将 其覆盖,可以实现在一个坐标系中绘制多幅图像的目的。

在 MATLAB 中,默认的图线是黑色实线,当一个坐标系中出现多幅图像时,如果全部都以默认的黑色实线绘制,那么图像之间会互相干扰,难以辨认,因此需要对绘制的线型进行修改,不同的图像对应不同的线型,并在图像的右上角标注出来。

常用的改变线型的指令代码如表 1-1 所示。

指令代码	颜色	指令代码	样 式
у	黄色		点
m	洋红色	0	巻
с	c 蓝绿色		x 标记

表 1-1 常用的改变线型的指令代码

MATLAB 光学仿真实用教程

续表

指令代码	颜色	指令代码	样式
r	红色	+	加号标记
g	g 绿色		减号标记
b	b 蓝色		星号标记
w	白色		冒号标记
k	黑色		点画线
			虚线

例如,当在 MATLAB 中绘制两幅函数图像时,可以使用上述指令代码对 其标注,加以区分。输入:

>>N = 100; >>h = 1/N; >>x = 0:h:1; >>y1= sin(3*pi*x); >>y2=cos(3*pi*x); >>plot(x,y1, 'k+'); >>hold on >>plot(x,y2, 'b-') >>legend('y=sin(pi*x)', 'y=cos(pi*x)'); >>title('y=sin(pi*x)和 y=cos(pi*x)的图像'); >>xlabel('x 轴'); >>ylabel('y 轴');

通过这段程序,可以在一个坐标系中同时绘出 y = sinπx 和 y = cosπx 的图 像,并且将其用不同的线型表示出来。其中, legend 函数为标注不同线型的函 数。当程序中出现绘图函数时, legend 函数会在标注线型之后给出对绘图函数 的图例描述。

在同一坐标系中绘制 $y = \sin \pi x$ 和 $y = \cos \pi x$ 的图像如图 1-8 所示。

由图 1-8 可见,在同一个坐标系中出现了两种线型。其中,"减号"线型所表示的是 $y = \cos \pi x$ 的图像,"加号"线型所表示的是 $y = \sin \pi x$ 的图像。通过

hold on 函数、legend 函数以及改变线型的指令代码,可以实现在一个坐标系中画 出多幅可区分图像的目标。在对一些实验结果进行分析时,可以将其绘制在一起, 分析图像的拐点和变化趋势等特点,从而得出不同的因素对实验结果的影响。



图 1-8 在同一坐标系中绘制 $y = \sin \pi x$ 和 $y = \cos \pi x$ 的图像

当需要绘制一个三维图像时,需要构建一个空间直角坐标系,自变量包括 *x*和*y*,如果是用 MATLAB 中的循环语句来赋值自变量的,那么需要嵌套两层 循环语句,整个程序的复杂程度会上升,而且容易出错。meshgrid 函数是 MATLAB 中用于生成网格采样点的一个函数,在使用 MATLAB 进行三维图像 的绘制方面有着广泛的应用。

例如,当需要在3≤x≤5和7≤y≤9区间上绘制一个三维图像时,取整 数点为采样点,那么就要先构造一个坐标矩阵:

(3,7), (4,7), (5,7);

(3,8), (4,8), (5,8);

(3,9), (4,9), (5,9);

然后再通过所要绘制的函数,给每一个采样点赋上因变量的值,就可以完 成一个区间上三维图像的绘制。

对于一个坐标范围比较小,而且只取整数点的坐标矩阵的构造比较简单, 但是区域一旦扩大,各个点之间的间隔变小,那么坐标的个数将爆炸式增长, 手动构建坐标矩阵将不可行。此时,就需要使用 meshgrid 函数生成二维网格, 来绘制三维图像。

Meshgrid 函数的用法: [X,Y]=meshgrid(a,b)。其中, a 和 b 均为一维数 组,用来表示三维图像的坐标范围。例如, a=[1,2,3]; b=[2,3,4],则生成的 X 和 Y 均为三维矩阵。

	>>[X,Y]=m	eshgrid(a,b)
	X=	
	123	
1	123	
1	123	
	Y=	
	234	
	234	
	234	

然后根据实际的函数解析式,计算对应的每个采样点处因变量的取值,最 后绘制出所要求的图像。

例如,绘制出 $-2 \le x \le 2$, $-2 \le y \le 2$ 且采样间隔为 0.5 时的函数 $z=ye^{-x^2-y^2}$ 的图像,并标注坐标轴含义以及图像名称。

>>a=-2:0.5:2; >>b=-2:0.5:2; >> [X,Y]=meshgrid(a,b); >>Z=Y.*exp(-X.^2-Y.^2); >>mesh(X,Y,Z);

```
>>title(' z=ye<sup>-x<sup>2</sup>-y<sup>2</sup></sup> 的图像, 间隔 0.5');
>>xlabel('x 轴');
>>ylabel('y 轴');
>>zlabel('z 轴')
```

运行这段程序,绘制出所要求的坐标范围内的函数图像,如图 1-9 所示。



函数 $z=ve^{-x^2-y^2}$ 的图像 图 1-9

由图 1-9 可见,采样点比较稀疏,不能准确地看出函数的特性,因此要缩 小采样点的间隔,使函数的图像具有更多的细节信息,方便对绘制出的图像进 行分析。因此,缩小采样点的间隔为0.1:

```
>>a=-2:0.1:2;
>>b=-2:0.1:2;
>> [X,Y]=meshgrid(a,b);
>>Z=Y.*exp(-X.^2-Y.^2);
>>mesh(X,Y,Z);
>>title(' z=ye<sup>-x<sup>2</sup>-y<sup>2</sup> 的图像,间隔 0.1');</sup>
>>xlabel('x 轴');
>>ylabel('y 轴');
>>zlabel('z 轴')
```

重新绘制函数图像,如图 1-10 所示。



图 1-10 修改网格间隔之后函数 z=ye-x²-y² 的图像

在图 1-10 中可以清晰地看出,整个函数在规定的坐标范围内有两个极值 点,且函数图像关于 x 轴对称。这些信息都是在没有画出函数图像前不能分析 得到的。通过 meshgrid 函数,可以简便地确定函数的取值范围以及网格的大 小,并在各个网格点处赋函数值,最后绘制出三维函数图像,免去了使用循环 语句来定义变量范围的繁杂步骤,极大提高了绘图的效率。