

高等学校给水排水工程专业指导委员会规划推荐教学用书

水工艺与工程的计算与模拟

李志华 主编

汪德燿 主审

中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

高等学校给水排水工程专业指导委员会
规划推荐教学用书

水工艺与工程的计算与模拟

李志华 主编
汪德燿 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水工艺与工程的计算与模拟/李志华主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 1

高等学校给水排水工程专业指导委员会规划推荐教学用书

ISBN 978-7-112-12840-2

I. ①水… II. ①李… III. ①给排水系统-工程计算-高等学校-教材②给排水系统-计算机模拟-高等学校-教材
IV. ①TU991

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 264907 号

高等学校给水排水工程专业指导委员会规划推荐教学用书

水工艺与工程的计算与模拟

李志华 主编

汪德耀 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京华艺制版公司制版

世界知识印刷厂印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 16 1/4 字数: 326 千字

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-12840-2

(20098)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书是高等学校给排水工程专业指导委员会规划推荐教学用书，全书共分5章，主要包括：计算与模拟基础知识，常用数学方法的应用，水力学、水泵及管网系统，水质工程学与反应工程学，给水排水系统仿真。本书基本不以计算技术的知识点为编排体系，而以专业案例为编排体系，在解决专业问题的同时融会贯通计算技术，本书的专业案例覆盖了水力学、水文学、水文地质、水泵与水泵站、给水排水管网系统、水处理微生物学、水分析化学、水质工程学以及反应工程等多门课程，力求覆盖给排水工程专业在工程实际中面临的典型计算与模拟问题。

本书实用性和专业性强，可作为高等学校给排水工程技术专业教学用书，也可作为相关工程技术人员参考书。

* * *

责任编辑：王美玲 王 跃

责任设计：赵明霞

责任校对：马 赛 陈晶晶

前 言

计算与模拟工作就是通过计算进行数值实验,在给水处理工程的科研、教学、设计、工程建设、运营管理等各个环节都具有重要的地位。随着计算机在工作中的普遍应用和计算技术在各行业的深入,给水处理工作者从事计算与模拟的工具也从使用数学用表、计算尺、计算图以及计算器,逐步过渡到使用科学计算软件。通用数学软件平台的出现使得工程技术人员利用科学计算软件来完成工作中的计算与模拟问题更为便捷。由于在计算机上进行数值实验具有效率高、成本低等特点,越来越多的问题需要借助于计算与模拟工作才能解决,在特殊情况下,甚至只能通过计算与模拟途径完成特殊问题的评估。因此,掌握计算与模拟技术对于给水处理专业至关重要。

本书围绕给水处理工程中的计算与模拟的典型问题,突出现有计算软件简单易用的优势,将专业知识与计算技术融合于一体。在编排上,本书突破了传统的计算语言、数值算法、专业知识三段式的编写框架,而是以提出专业问题、分析问题的专业背景基础,导入解决问题的计算过程及相关函数,最后给出图文并茂的分析结果为基本框架,以解决专业问题为核心,不纠缠复杂的数值算法和抽象的数学问题,以最简短、易懂的代码和最简单的计算过程解决本专业的典型问题。以直观形象的图形结果表达这些典型问题的求解结果,有利于学生进一步加深对专业知识的理解。本书首先通过第1、2章的内容,介绍了给水处理专业涉及的基本计算技术,然后以专业方向为主线,以该方向的典型问题为案例,在案例的求解过程中进一步深化计算与模拟技术的应用。本书的案例覆盖了水力学、水文学、水文地质、水泵与水泵站、给水处理管网系统、水处理微生物学、水分析化学、水质工程学以及反应工程等多门课程,力求覆盖给水处理专业在实际工作中面临的典型计算与模拟问题。

实用性和针对性是本书的又一特色。在案例的选择上,本书特别注重程序的实用性。以给水管网平差为例,不仅考虑了普遍最为关注的水力计算过程(平差),还考虑了通过Excel实现直观的输入输出功能,以及绘制等高线等多个过程,从而使程序可用性更强,基本上可直接用于工程实践。同时案例的选择也注重针对性,通过简单编程完成传统方法较为繁琐或难度较大的计算问题。例如,通过非常简洁的代码编程完成了以往需要采用计算图、表等辅助手段才能完成的污水管网的水力计算问题,并绘制了水力计算图。在通用平台上,通过数十行的代码完成了一般以往需要专用商业计算软件才能完成的污水处理过程的模拟问题。凡此种种,不一而足。

在通用数学与工程计算平台软件领域,功能强大的商业软件与自由开源软件呈现百花齐放的可喜态势。工程技术人员可以根据自己的实际情况或选择价格不菲的商业软件或选择自由开源软件。一般而言,自由开源软件相对于商业软件来说,除了免费之外,还具有安装体积较小、使用方便等特点。将自由开源软件和商业软件平台并重也是本书的最大特色。在代码的编写过程中,编者力求在最大程度上保证绝大部分代码均可以在两种软件平台上运行,便于学习和在实际工程中使用。本书使用的自由开源软件包括与 MATLAB 相似的 Octave 和 SCILAB,以及 Simulink 工具包相似的 Xcos 仿真平台,同时还介绍了建模语言 Modelica 在 Xcos 上的应用等。

通过本书案例的学习,查找复杂的水力计算图、非常有限的 MPN 表、统计分布表等便捷的传统方法将会被更便捷和更准确的计算代码代替,大大提高工作效率;污水生物处理过程模拟、管网平差与等水压线的绘制、实验数据的处理等往往需要借助专用商业计算软件才能完成的问题,可以用很简短的代码在通用计算平台上快速地得到解决。因此,编者相信通过本书的学习,简单、实用、入门容易而功能强大的工程计算平台能够像 Excel、AutoCAD 一样成为给水排水工程师的必备的计算工具。

本书第 2 章由黄廷林、李志华、王俊萍合编,第 4 章由王晓昌、李志华、张建锋合编,其余部分由李志华编写。全书由汪德燿教授主审。编写过程中研究生曾金锋等同学为本书部分案例收集、代码的测试、图片的制作等工作付出了辛勤的劳动,在此表示感谢。同时,本书的编写得到了国家级人才培养模式创新实验区项目《环境类专业通用人才培养创新实验区》的支持,在此表示感谢。

尽管编写组成员尽了最大的努力,参考了大量的国内外已有文献和成果,但限于编者的水平和经验,不足之处在所难免,敬请广大读者不吝赐教。

目 录

第1章 计算与模拟基础知识	1
1.1 计算与模拟技术的基本情况介绍	1
1.2 本书所采用的计算平台与约定	2
1.3 基本概念	5
1.3.1 变量	5
1.3.2 矩阵	7
1.3.3 函数与过程	12
习题	17
第2章 常用数学方法的应用	19
2.1 函数插值与曲线拟合	19
2.1.1 案例：线性插值求蝶阀的局部阻力系数	19
2.1.2 案例：最小二乘法求饱和溶解氧与温度的关系	30
2.1.3 案例：非线性拟合求管道造价公式	33
2.1.4 案例：非线性拟合求暴雨强度公式	37
2.2 非线性方程求解	44
2.2.1 案例：非满流管渠水力计算	44
2.2.2 案例：明渠非均匀流水面曲线	46
2.3 求常微分方程的解析解（符号解）	50
案例：确定含水层的渗透系数	50
2.4 求常微分方程的解析解和数值解	53
案例：河流耗氧动力学模型	53
2.5 概率统计	59
2.5.1 案例：多管发酵 MPN 分析	59
2.5.2 案例：采用 t 检验分析两组实验数据的差异	61
2.5.3 案例：采用方差分析工艺条件对水质的影响	67
习题	74
第3章 水力学、水泵及管网系统	76
3.1 绘制用水量曲线、确定泵站流量、水池或水塔调节容积	76
3.2 水泵特性曲线与工况点	85
3.2.1 确定水泵特性曲线	85
3.2.2 工况点的确定	87
3.3 离心泵并联或串联工况分析	89
3.3.1 单泵多塔供水系统工况分析	89

3.3.2 取水泵站调速运行下并联工作的计算	94
3.4 管网平差	99
3.4.1 解环方程	99
3.4.2 解节点方程	107
3.4.3 绘制等水压线	114
3.4.4 与 Excel 实现数据的输入与输出	118
3.5 排水管网计算	122
3.5.1 非满流圆管水力特性	122
3.5.2 非满流水力计算	126
3.5.3 非满流水力计算图的制作	131
3.5.4 污水管网系统中流量与管径关系图	135
3.5.5 雨水管网设计流量的计算与折减系数	139
习题	149
第4章 水质工程学与反应工程学	151
4.1 酸碱平衡中有关组分浓度的计算	151
4.2 氧的传递与曝气	153
4.2.1 氧转移系数	153
4.2.2 氧的传递	156
4.3 污染物在河流中的扩散	160
4.4 厌氧间歇发酵过程模拟	164
4.5 完全混合反应器有机物去除过程模拟	166
4.5.1 过程动力学和化学计量学矩阵	166
4.5.2 有机物去除过程的模拟	170
4.6 序批式反应器 (SBR) 有机物去除过程的模拟	177
4.7 沉淀池固体通量模型	180
4.7.1 固体通量模型基本理论	180
4.7.2 沉淀池实验数据处理	183
4.8 水处理单元水力混合条件分析	188
4.8.1 水力混合条件分析基本理论	188
4.8.2 示踪实验数据分析	190
习题	192
第5章 给水排水系统仿真	195
5.1 Simulink 仿真平台应用基础	195
5.2 采用用户自定义函数进行仿真	210
5.3 采用 S 函数进行仿真	212
5.3.1 S 函数工作过程	213
5.3.2 S 函数的实现	215

5.3.3 微生物增殖的动力学过程仿真	218
5.4 活性污泥模型	224
5.5 Scilab/Xcos 仿真平台基础	235
5.5.1 Xcos 仿真平台应用基础	235
5.5.2 Modelica 建模语言基础	240
习题	245
函数索引	246
计算与绘图技术索引	248
专业知识案例索引	250
主要参考文献	251

第1章 计算与模拟基础知识

1.1 计算与模拟技术的基本情况介绍

计算与模拟工作在给水排水工程的设计、运行及管理中具有重要的作用。随着计算机在工作中的普遍应用和计算技术在各行业的深入应用,从使用数学用表、计算尺、计算图以及计算器,已逐步过渡到使用科学计算机软件。这些科学软件包括两种类型:一类是针对某一个专业领域开发的软件系统。例如给水管网计算与模拟软件 EPANET、MIKE NET、WATER CAD 等,雨水管网计算与模拟软件 EPA SWMM、MIKE Storm 等,废水处理计算与模拟软件 BioWin、EFOR、WEST 等,流体力学计算 Fluent 软件等。这类软件一般是由专业化的公司组织开发,采用图形化的操作界面,将具体的计算过程进行了封装,是一种全自动的“傻瓜式”计算与模拟工具,其学习和使用相对简单,受到专业人士的青睐,具有广泛的应用市场。另一类是具有强大计算和图形功能的通用数学软件。这类软件的特点是将数学方法和通用的数学过程进行封装,以降低计算技术本身的难度和复杂度,工程技术人员只需调用相关的数学方法以解决本行业的特定问题,将更多的时间和精力用于分析专业问题而不是研究计算技术。这些软件为计算与模拟提供基本的计算平台,但并不针对某一专业问题。因此可以认为通用数学计算机软件属于一种半自动化的计算与模拟工具。以上两类软件各有千秋,前者由于专门针对某一特殊问题,因此使用简单,但计算与模拟过程对用户是完全封闭的,也导致其扩展性较差。后者由于只提供基础计算平台,计算与模拟过程依赖于用户的参与,需要用户对计算与模拟问题本身有深刻和准确的认识,因此扩展性好,但解决问题的效率有所减低。由于给水排水专业涉及多个学科领域,专业交叉性较强,考虑到计算与模拟软件的通用和扩展延伸性能,因此本书选用通用数学软件作为计算与模拟的基本平台。

通用数学软件总体上包括数值计算和符号推导(如公式推导、定理的证明等)两种类型。这些软件几乎覆盖了所有的数学领域,如微积分、线性代数、方程求解、积分和离散变换、概率论和数理统计、矩阵计算、线性规划、级数和积分变换、特殊函数、优化等。这些软件按照授权方式可分为商业软件和自由开源软件。广泛使用的商业软件介绍如下(来自各网站的介绍):

— MathCAD 是一种交互式的数值系统,其特点是输入格式与人们平常的数

学格式极为相近，是一种所见即所得的数学软件平台。可以认为 MathCAD 是一款功能强大的计算器。

— Mathematica 结合了数值和符号计算引擎、图形系统、编程语言、文本系统等，不但可以解决数学中的数值计算问题，还可以解决符号演算问题，并且能够方便地绘出各种函数图形。

— Maple 是目前世界上最为通用的数学和工程计算软件之一，它不仅提供编程工具，还提供数学知识，具有最强大的符号计算工程。

— MATLAB 是 Matrix Laboratory 的简称，用于算法开发、数据可视化、数据分析以及数值计算的高级技术计算语言和交互式环境。它以矩阵为基本单位，简单易学，包含大量函数和算法，编程效率高等特点。

除了上述商业软件外，还有一大批自由开源软件，举例如下：

— SCILAB 是由法国国家信息、自动化研究院（INRIA）的科学家们开发的“开放源码”软件。可以很方便地实现各种矩阵运算与图形显示，能应用于科学计算、数学建模、信号处理、决策优化、线性/非线性控制、图与网络分析等各个方面，而且还提供了可视化建模工具箱 Xcos（基于 SCICOS 的新一代模拟平台）。在功能上，SCILAB 是最能取代 MATLAB 的自由开源软件。由于 SCILAB 的语法与 MATLAB 非常接近，熟悉 MATLAB 编程的人很快就会掌握 SCILAB 的使用。而且，SCILAB 提供的语言转换函数可以自动将用 MATLAB 语言编写的程序翻译为 SCILAB 语言。

— GNU Octave 是一种高级程序语言，是专门的数值计算的免费软件。它与 MATLAB 语法高度兼容，是模拟 MATLAB 最相似的软件。可采用 Octave 软件来学习 MATLAB 的基本使用方法和概念。它提供了一个方便的命令行方式，可以数值求解线性和非线性问题，以及做一些数值模拟。Octave 也提供了一些工具包，可用于解决一般的线性代数问题、非线性方程求根、常规函数积分、常微分方程和微分代数方程。它也很容易地使用 Octave 自带的接口方式扩展和定制功能。该软件的下载地址为：<http://www.octave.org/>。

— Maxima 是可以执行一般数学问题的符号计算的跨平台自由开源软件，wxMaxima 是它的一个 GUI 版本（同时也是目前最好的 Windows 版本）。

1.2 本书所采用的计算平台与约定

在本书中，我们以 MATLAB 和 Octave 为计算平台，以 MATLAB 的 Simulink 工具包和 SCILAB 的 Xcos 工具包为图形化仿真平台，以保证绝大部分功能均可同时在商业软件或自由软件上实现。由于自由开源软件 Octave 在功能上稍逊于 MATLAB，部分功能的实现没有 MATLAB 方便，但为了兼顾 Octave，部分 Octave 中没有或名

字不同的 MATLAB 函数以类似的函数替代，或说明或在注释中给出替换代码。建议用户安装 Octave 时，同时安装 Octave 扩展包（Octave-forge），以便调用。

MATLAB 软件启动后，自动弹出命令窗口，如图 1-1 所示。

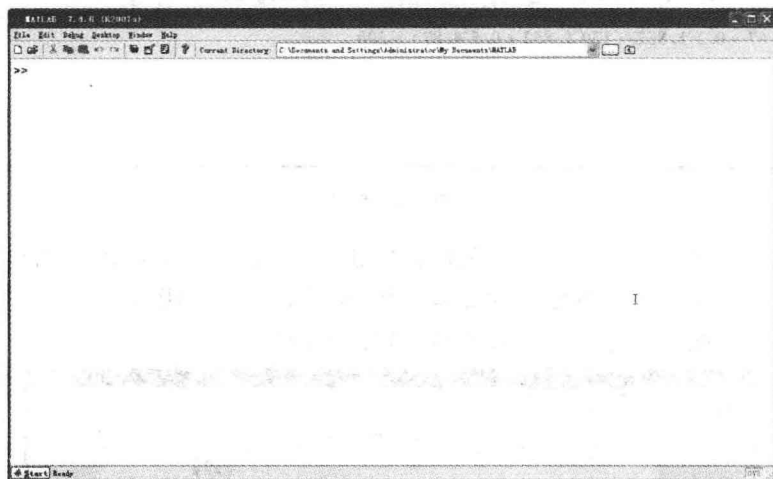


图 1-1 MATLAB 命令窗口

图中“>>”为 MATLAB 命令提示符号，表示系统正在等待用户的输入，用户可在此处输入相应的命令。

类似地，Octave 启动后的界面如图 1-2 所示。

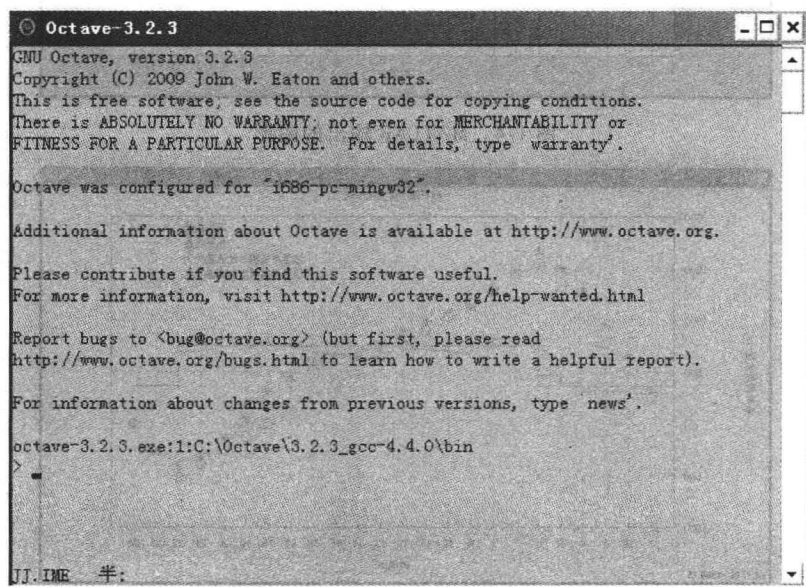


图 1-2 Octave 命令窗口

在本书中,为了表述方便,采用如图 1-3 所示框体,表示 MATLAB 或 Octave 的命令窗口。

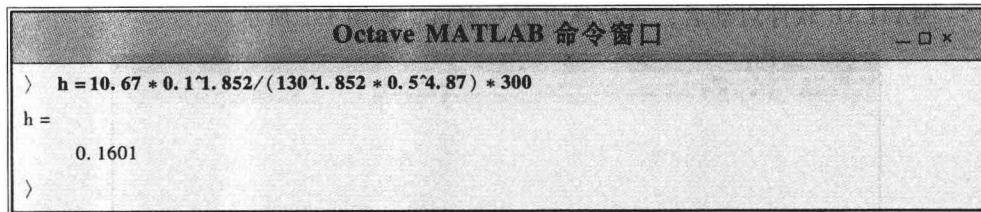


图 1-3 框体

在以上命令窗口中,用户输入的内容为粗体字,系统自动显示内容为常规字体。

Octave 与 MATLAB 的绘图功能基本相似,如图 1-4 和图 1-5 所示。如无特别说明,本书中截图均为 MATLAB 平台下输出的图片。

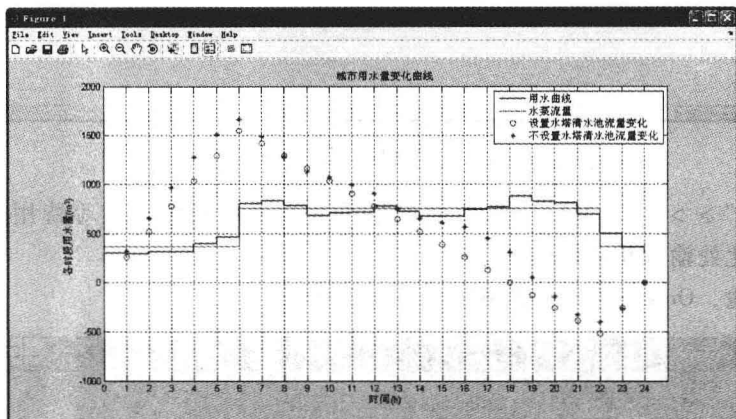


图 1-4 MATLAB 输出的图形

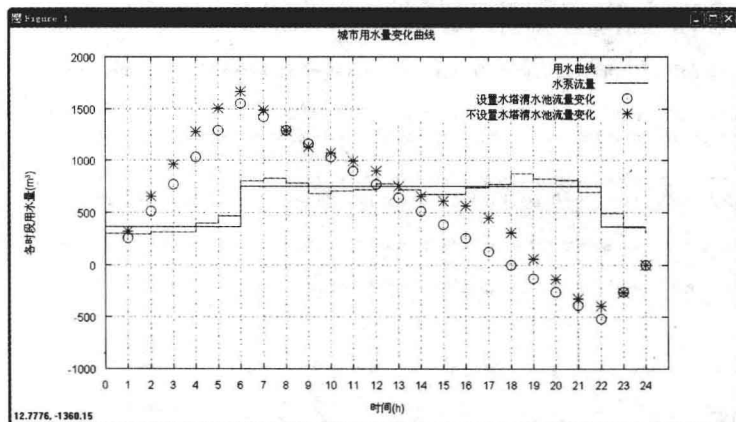


图 1-5 Octave 输出的图形

1.3 基本概念

1.3.1 变 量

【例 1-1】 已知某管段的管径 $D = 500\text{mm}$ ，流量 $q = 100\text{L/s}$ ，管长 $l = 300\text{m}$ ，粗糙系数 $C_w = 130$ ，试按以下海曾 - 威廉 (Hazen-Williams) 公式计算水头损失

$$h_f = \frac{10.67q^{1.852}}{C_w^{1.852}D^{4.87}}l \quad (1-1)$$

在海曾 - 威廉公式中 D ， q 的单位分别为 “m” 和 “ m^3/s ”。

【解】 MATLAB 或 Octave 可用接受类似于计算器一样的输入格式，在本例中输入以下代码：

```
Octave MATLAB 命令窗口
> h=10.67*0.1^1.852/(130^1.852*0.5^4.87)*300
h =
    0.1601
>
```

回车后可得到结果为 0.1601m。

从以上过程可以看出，在 MATLAB 和 Octave 中可以直接对数学表达式进行计算，方便快捷。在本方法中我们直接将数值代入公式，使得公式的意义不明确，不便于检查输入错误，为此我们采用变量存储数值并对其进行计算。

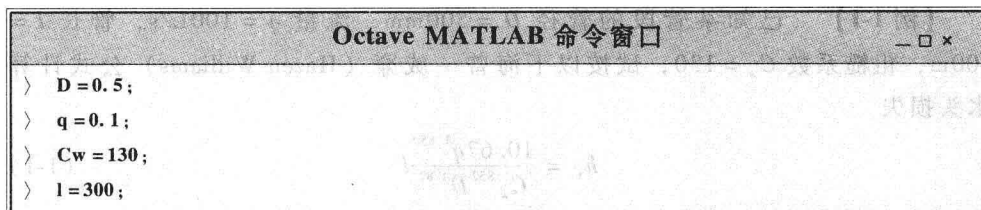
所谓变量是指一个可以存储数值的字母或名称。编程时，可使用变量来存储数字（如管长， $l = 300\text{m}$ ）；或者存储单词（如管材的名称， $\text{PipeMaterial} = \text{'PVC'}$ ）。简单地说，可使用变量表示程序所需的任何信息。

根据以上概念，在命令窗口输入如下代码：

```
Octave MATLAB 命令窗口
> D=0.5
D =
    0.5000
> q=0.1
q =
    0.1000
>
```

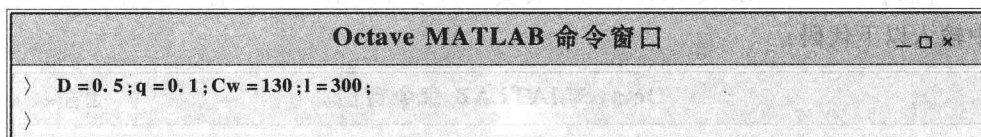
通过以上命令，系统就将管径和流量值分别存储在变量 D 和 q 上了。但从以上输出结果可以看出，每次回车后，系统会将计算结果显示出来，造成计算画面凌乱，如何让计算结果不显示呢？

在 MATLAB 和 Octave 中，我们可以在语句后采用“;”（分号）告诉计算机在计算过程中保持沉默即不显示计算结果。在本例中，我们输入如下代码：



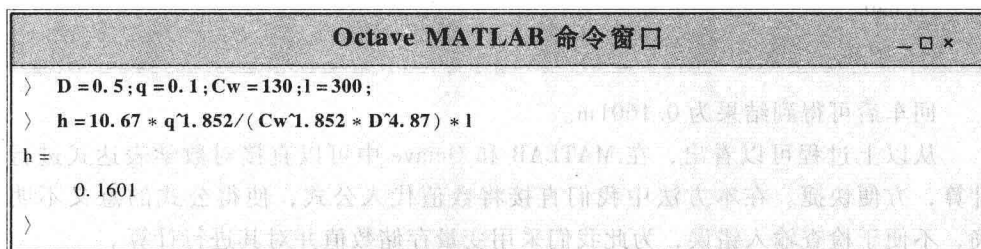
```
Octave MATLAB 命令窗口
> D=0.5;
> q=0.1;
> Cw=130;
> l=300;
```

还有更简洁的办法是将所有的变量输入在一行，然后再回车：



```
Octave MATLAB 命令窗口
> D=0.5;q=0.1;Cw=130;l=300;
>
```

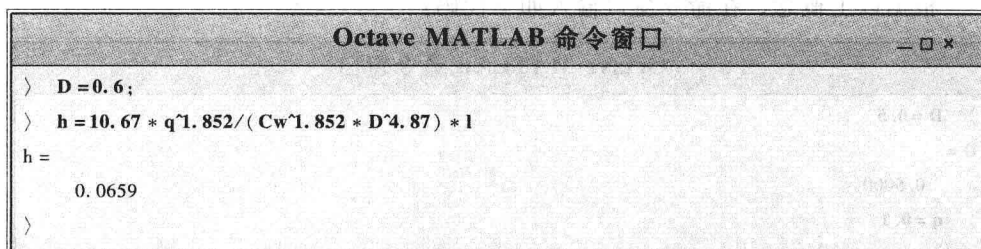
将变量定义好之后，就可以在公式中直接使用变量中的值。例如：



```
Octave MATLAB 命令窗口
> D=0.5;q=0.1;Cw=130;l=300;
> h=10.67*q^1.852/(Cw^1.852*D^4.87)*l
h =
    0.1601
>
```

公式中将变量的值代入运算，最终可以得到水头损失为 0.1601m。

假定现在要计算管径为 0.6m 在相同水量条件下的水头损失，那么只需要改变变量 $D=0.6$ 即可，如下：



```
Octave MATLAB 命令窗口
> D=0.6;
> h=10.67*q^1.852/(Cw^1.852*D^4.87)*l
h =
    0.0659
>
```

从以上输入来看，只改变了变量 D 的值，其他变量 q , C_w , l 没有再次输入。其原因是系统在前面的运算过程中保存了这些变量的值，所以无须再次输入。那

么如何知道现在系统中保留了哪些变量呢？在 MATLAB 或 Octave 中提供了 who 或 whos 指令来查看变量。

```
Octave MATLAB 命令窗口
> who
Your variables are:
Cw    D    h    l    q
```

如果将公式写成如下形式：

$h = 10.67 * Q^{1.852} / (C_w^{1.852} * D^{4.87}) * l$ 。注意，这里将“q”错写成了“Q”。

输入代码后，其结果如下：

```
Octave MATLAB 命令窗口
> h = 10.67 * Q^1.852 / (Cw^1.852 * D^4.87) * l
??? Undefined function or variable 'Q'.
>
```

系统无法计算出结果，而是提示变量 Q 没有定义。由此可以看出，在 MATLAB 和 Octave 中变量名是区分大小写的。

1.3.2 矩 阵

【例 1-2】 已知某管网中所有管段的粗糙系数 $C_w = 130$ ，各管段的流量 q 、管径 D 与管长 l 见表 1-1，试按【例 1-1】中的 H-W 公式计算各管段水头损失。

水头损失计算基本数据

表 1-1

管段编号	流量 (m^3/s)	管径 (m)	管长 (m)
1	0.02914	0.3	750
2	0.04150	0.3	600
3	0.02728	0.3	1012
4	0.04238	0.3	645

【解】 在本例中，仍可利用【例 1-1】中的方法逐步对每个管段进行计算，但对于具有相同数据结构和相同计算方法和过程的工作而言，采用【例 1-1】中的方法分别对每个管段设定变量和输入计算公式其实就是不断地重复相同的工作，显得非常机械。MATLAB 和 Octave 的矩阵运算可以有效地解决这类重复性工作。

矩阵在 MATLAB 和 Octave 中应用最为广泛，是基本数据组织方式。整个矩阵用 “[]”括起来，其中一行中的元素用空格或逗号隔开，而行之间用“;”（分号）或回车键分开（如果用回车分开，则回车之前不应带反括号“]”，即在输完所有的数字才写上反括号“]”）。如矩阵 $a = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$ 在 MATLAB 或

Octave中输入为： $a = [1\ 2\ 3; 4\ 5\ 6]$ ，在窗口中输入与系统表示矩阵结果如下：

```
Octave MATLAB 命令窗口
> a=[1 2 3;4 5 6]
a =
     1     2     3
     4     5     6
>
```

也可以用回车键代替分号输入，得到结果与上面方法一致。

```
Octave MATLAB 命令窗口
> a=[1 2 3
4 5 6]
a =
     1     2     3
     4     5     6
>
```

那么如何获取矩阵中的元素呢？在 MATLAB 中采用行和列的标号来获取，如第 2 行，第 1 列，则输入 $a(2, 1)$ ，举例如下：

```
Octave MATLAB 命令窗口
> a=[1 2 3;4 5 6];
> a(2,1)
ans =
     4
>
```

从以上结果可以看出，在 MATLAB 和 Octave 中，当不给运算结果指定变量时，系统采用 `ans` 变量名来存储运算结果。

如何将上例中 a 矩阵中的元素按矩阵的形式取出来呢？在 MATLAB 和 Octave 中，矩阵中的行与列的标号也可以用矩阵表示，如需要取出的列为 $[1\ 3]$ ，行号为 $[2]$ ，输入命令 $a([2], [1\ 3])$ ，举例如下：

```
Octave MATLAB 命令窗口
> a=[1 2 3;4 5 6];
> a([2],[1 3])
ans =
     4     6
>
```