

可下载教学资料

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



高等学校教材
电子信息

Matlab/Simulink 通信系统建模 与仿真实例分析学习辅导和习题详解

邵玉斌 编著

TN914

清华大学出版社



高等学校教材

电子信息

Matlab/Simulink通信系统建模 与仿真实例分析学习辅导和习题详解

邵玉斌 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是“高等学校教材·电子信息”丛书中《Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真实例分析》的配套教学辅导书。对该教材在教学实践中的教学、学习重点和难点进行了分析与讲解,并对该教材中全部习题做了详细的求解分析和解答。本书配有全部习题解答的模型源代码电子文件,以便于读者追源求本,深入理解建模和仿真的实质。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息类专业本科生和研究生系统仿真课程的辅导教材或教师教学参考书,也可作为相关专业课程设计和毕业设计等综合性实践教学的参考材料,还可作为解决通信系统设计、评估和建模仿真领域实际问题的参考资料。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真实例分析学习辅导和习题详解/邵玉斌编著. —北京:清华大学出版社,2010.4

(高等学校教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-21685-8

I. ①M… II. ①邵… III. ①计算机辅助计算—软件包, Matlab、Simulink—应用—通信系统—系统建模—高等学校—教学参考资料 ②计算机辅助计算—软件包, Matlab、Simulink—应用—通信系统—系统仿真—高等学校—教学参考资料 IV. ①TP391.75 ②TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 239594 号

责任编辑:魏江江 薛 阳

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:12 字 数:289 千字

版 次:2010 年 4 月第 1 版 印 次:2010 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:19.50 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:034940-01

编审委员会成员

东南大学
南京大学
南京航空航天大学
解放军理工大学

上海大学
上海交通大学

华中科技大学

华中师范大学
武汉理工大学

宁波大学
天津大学

中国科学技术大学

苏州大学
山东大学
山东科技大学
东北师范大学
沈阳工业学院
长春大学
吉林大学
湖南大学
长沙理工大学
华南理工大学
西南交通大学

重庆理工大学

王志功 教授

王新龙 教授

王成华 教授

邓元庆 教授

刘景夏 副教授

方勇 教授

朱杰 教授

何晨 教授

严国萍 教授

朱定华 教授

吴彦文 教授

刘复华 教授

李中年 教授

蒋刚毅 教授

王成山 教授

郭维廉 教授

王煦法 教授

郭从良 教授

徐佩霞 教授

赵鹤鸣 教授

刘志军 教授

郑永果 教授

朱守正 教授

张秉权 教授

张丽英 教授

林君 教授

何怡刚 教授

曾喆昭 教授

冯久超 教授

冯全源 教授

金炜东 教授

余成波 教授

重庆通信学院

重庆大学

重庆邮电学院

西安电子科技大学

西北工业大学

集美大学

云南大学

东华大学

曾凡鑫 教授

曾孝平 教授

谢显中 教授

张德民 教授

彭启琮 教授

樊昌信 教授

何明一 教授

迟岩 教授

刘惟一 教授

方建安 教授

改革开放以来,特别是党的十五大以来,我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就,高等教育实现了历史性的跨越,已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上,高等教育规模取得如此快速的发展,创造了世界教育发展史上的奇迹。当前,教育工作既面临着千载难逢的良好机遇,同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾,是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月,教育部下发了《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》,提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月,教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件,指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制定的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分,精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间(2003—2007年)建设1500门国家级精品课程,利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放,以实现优质教学资源共享,提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”

认真评审,最后由清华大学出版社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色精品教材包括:

(1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 高等学校教材·信息管理与信息系统。

(6) 高等学校教材·财经管理与计算机应用。

清华大学出版社经过二十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言

系统仿真是一门新兴的技术性学科,通信仿真技术的应用颠覆了“通信实验”的传统概念,充分发挥了计算机虚拟技术的特长。使用 Matlab/Simulink 进行通信系统的学习过程就是这样一个将专业理论知识用于实践环节极好的锻炼过程。通过对实际通信系统建模、仿真和结果分析,可以更深刻地理解通信系统中信号传输和信号处理理论、技术和方法,也能够促进通信技术中新概念的提出、辅助新系统模型的设计和参数的修正。

《Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真实例分析(高等学校教材·电子信息)》于 2008 年作为清华大学出版社特色精品教材建设系列丛书出版后,承蒙读者厚爱,被多家高等院校师生选用,在通信仿真领域形成了一定的读者群。原书在每章之后配有思考题若干,目的是让读者对讲授内容能够进一步复习和升华。因此,书中许多习题采用了开放性的设计思路,题目中的建模方案和仿真参数可由读者自行设计。使用这些开放性习题作为练习材料,一方面可以大大激发学习者的主动性和创造性,另一方面也体现出系统仿真的灵活性和一定的难度。对于初学者来说,往往可能因为没有仿真的参考结果而感到困惑,难以对仿真结果做出是非判断。鉴于此,应广大读者以及清华大学出版社的要求,我编写了这本配套学习辅导与习题详解,以期能够解答读者在学习过程中的疑惑,提供给读者较深入的建模思路和方法。总之,本书期望能够为读者在解题过程中起到抛砖引玉的作用。

通信系统仿真技术是一门实践性课程,对该课程的学习应理论联系实际,以实践为主,在应用通信理论的过程中加深对通信理论的理解。Matlab/Simulink 仅仅是一种较方便的仿真平台而已,但并非唯一可选的仿真工具。掌握系统仿真的原理和本质,才能够依据所研究问题的特性选择恰当的数值计算工具。学习 Matlab/Simulink 使用方法和学习仿真技术之间的关系就如同学习握笔和学习书法之间的关系一样,读者不应将本书视为 Matlab/Simulink 使用方法的介绍,而应将学习主题放在通过习题求解过程深入理解建模、计算和结果验证这些重要环节上。

通信系统仿真技术涉及到的电子与通信理论知识较为广泛。从电路分析(由给定电路列写微分方程)、信号与系统(微分方程的变换域求解、传递函数、频谱分析以及状态变量分析方法)、模拟电路(放大、滤波、反馈、失真)、数字逻辑(时序电路、逻辑电路)等电类基础课程到高频电路(谐振、滤波、倍频、模拟调制解调、锁相、混频、超外差接收、

AGC)、广播和电视原理、通信原理的全部知识、数字信号处理(FFT, 数字滤波器设计, 频谱分析)、信息论基础(信道容量、编解码)、无线电通信(数字调制和信道传输)和扩频通信等专业基础课程和专业课程的知识均有所涉及, 同时也要求有概率论、统计方法以及线性代数等工程数学基础, 并有 Matlab 程序设计的基础。所以, 可以说通信系统仿真技术课程的学习是通信工程专业综合知识的再应用, 对学生的综合动手能力会有相当大的锻炼。本课程应在本科高年级或硕士研究生阶段开设, 在讲解的基础上应强调实践。

值得提醒读者的是, 本书所提供的解题思路不是唯一的, 更不是最优的。读者不应受到本书的解题思路之局限, 而应当追源求本, 在深入理解建模和仿真的实质后, 以自己的思路去建立仿真模型, 得出仿真结果, 再与本书所给的解法相互参照对比, 取长补短。作为学生的读者, 更不应依葫芦画瓢, 甚至照抄答案, 应付差事, 如果这样做是学不到真功夫的。

感谢昆明理工大学信息工程与自动化学院院长向风红教授, 通信工程系主任龙华教授及本精品课程建设课题组全体同仁在成本过程中给予的关怀和帮助。

本书中错漏之处恳请读者批评指正, 读者在使用本书过程中如有疑问, 也欢迎联系作者。作者的电子邮箱是 shaoyubin999@sina.com。

邵玉斌

2009 年 11 月

第 1 章 通信系统仿真的原理和方法论	1
1.1 内容概要	1
1.2 学习重点和难点	1
1.3 习题解答	2
第 2 章 Matlab/Simulink 系统建模和仿真基础	8
2.1 内容概要	8
2.2 学习重点和难点	8
2.3 习题解答	9
第 3 章 基本通信模块的建模与分析	49
3.1 内容概要	49
3.2 学习重点和难点	49
3.3 习题解答	50
第 4 章 通信系统仿真的原理和方法论	93
4.1 内容概要	93
4.2 学习重点和难点	93
4.3 习题解答	93
第 5 章 模拟通信系统的建模仿真	98
5.1 内容概要	98
5.2 学习重点和难点	98
5.3 习题解答	98
第 6 章 模拟信号数字化	122
6.1 内容概要	122

6.2 学习重点和难点	122
6.3 习题解答	123
第7章 数字通信系统的建模仿真	131
7.1 内容概要	131
7.2 学习重点和难点	131
7.3 习题解答	132
第8章 通信系统建模仿真的评估	164
8.1 内容概要	164
8.2 学习重点和难点	164
8.3 习题解答	165

通信系统仿真的原理和方法论

1.1 内容概要

本章是全书的绪论,概括地讨论了通信系统的仿真意义、原理方法和一般过程。

现代通信系统的研究、设计和开发都离不开建模和计算机仿真手段。根据仿真目的的不同,可以将仿真对象建模为确定性模型、概率和随机模型以及混合模型。对于大系统的建模往往采用层次化建模方法。

对于确定系统的仿真,本质上就是通过对描述系统动态行为的微分方程进行数值求解,从而根据当前系统的状态和激励得出未来某时刻系统输出的过程。微分方程最直接最简单的求解方法就是将其近似为递推的差分方程,从而用循环结构的程序来实现递推求解。这种方法称为欧拉法。教材中实例 1.1 和实例 1.2 给出了这种方法的演示程序。通过对这两个实例的研习,读者可初步掌握动态系统仿真的本质。

系统中无论其状态还是其激励中存在随机变化的,我们均称之为随机系统。对于随机系统,传统的微分方程可能给出系统表述,但由于方程参数或变量的随机性,一般无法得出解析结果。因此数值求解是了解系统行为的捷径。随机系统的解(即我们所关心的输出或系统状态的变化)一般也是随机的。为了对这种随机性有统计性的了解,仿真中总是在不同随机样本信号的激励下重复多次计算,然后对这些计算结果进行统计分析,从而得出仿真结果。蒙特卡罗方法就是随机系统仿真方法的一般统称。教材实例 1.3 给出了蒙特卡罗方法的原理性介绍。而教材实例 1.4 给出了动态系统在随机性激励下的仿真实现。

Matlab/Simulink 是一种优秀的数值计算和系统仿真工具,在通信链路层次仿真建模中有着重要应用。目前,Matlab/Simulink 已经经历了若干版本,逐渐成熟,甚至已经成为了技术科学家公认的数值计算和系统仿真平台。Matlab/Simulink 2008B 版本是 2008 年 9 月最新推出的,改进了以前版本的一些缺点,更加方便实用。当然,最新版本的软件往往对计算机硬件性能要求更高。本书所有习题解答均以 Matlab/Simulink 2008B 版本为计算仿真平台。

1.2 学习重点和难点

本章重点内容和学习中需要练习和掌握的知识如下。

- (1) Matlab/Simulink 的安装和基本使用。

(2) 理解系统仿真的实质,仿真与数值计算的联系和区别。

(3) 会用蒙特卡罗方法(概率方法)进行微积分计算,理解蒙特卡罗方法的优点以及计算代价。

(4) 阅读实例程序,理解波形或作图动画的编程思路。能够对实例程序进行参数修改,对仿真结果进行合理的解释。

1.3 习题解答

【1-1】 计算机仿真与数值计算有哪些不同点? 两者的联系如何?

【解答】

仿真是人们根据研究现实世界中所关心的问题,对现实物理系统的数学属性进行某一层次的抽象和模仿,仿真也称为模拟。仿真的目的是,通过对被仿真系统的数学模型(仿真模型)进行试验(数值计算),得出所关心的问题的解答,以使人们做出相应的决策。由于仿真建模中对现实物理系统的数学属性进行了抽象,忽略了相对次要的因素,因此,任何仿真行为都只能是对真实物理系统某些属性的逼近过程,仿真结果的正确性不是绝对的。另外,针对被仿真物理系统所提出问题的求解需求层次(例如通信系统中的网络层次、链路层次和电路实现层次等),仿真也是具有层次性的。

仿真模型的建立也称为仿真建模,是一个反复迭代的过程,即依据真实系统的求解需求层次,抽象出一个可进行数值计算的数学模型,然后假设系统的激励信号,进行试验(数值计算),得出系统的输出信号,再对结果和模型作出判断和验证,根据判断的情况来修正模型和参数。如此反复地进行,直到试验者认为这个模型已满足仿真的精度要求。注意,仿真结果是对所建立的数学模型的数值计算结果,而不是对所建立的数学模型进行解析分析得到解析解的数值计算结果。因此,可以通过对仿真结果和模型解析解(如果可能解出的话)的数值计算结果进行对比,以验证仿真和解析分析的正确性。而对系统解析解的数值计算过程一般不认为是一个仿真过程。

计算机仿真是利用现代计算机强大的数值计算能力,对依据被仿真系统物理模型而建立的数学模型进行数值计算的过程。计算机仿真技术是一门基于计算机科学和技术的,对设定实验条件下仿真模型进行动态实验的综合性技术。用于计算机仿真的计算机称为仿真机,仿真机分为电子模拟计算机(简称模拟机)和电子数字计算机(简称数字机)。模拟机的精度较差,但由于是全硬件实现计算,速度极快;由于数字计算机的运算能力飞速发展,从1980年起,数字机仿真技术和仿真专用软件得到普及和推广。计算机仿真具有高效、安全、便宜、受硬件条件约束少、可缩放时间比例尺、可对未来系统进行性能评估等诸多优点,已成为理论分析、系统设计、系统性能评估的重要工具。

计算机仿真是基于计算机数值计算能力的,是数值计算的一个应用方面。数值计算是研究如何有效使用数字计算机进行数学问题近似求解的方法、计算理论与计算过程的学科。它主要研究如何利用计算机更好地求解数学问题,包括连续系统离散化和离散形方程的数值求解,并研究求解误差、收敛性和稳定性等问题。数值计算包括数值逼近、多项式插值、数值微分和数值积分、线性方程组的解法、最优化方法、常微分方程数值解法、积分方程数值解法、偏微分方程数值解法、计算几何、计算概率统计、矩阵特征值问题的数值解法、非线性方

程数值解法、蒙特卡罗方法等。

通信系统电路级和链路级的仿真问题一般是基于微分方程数值求解和蒙特卡罗方法(随机模拟法)或两者的混合,其数学模型的基础是信号与系统理论,概率与随机过程以及信号处理等方法;网络级的仿真通常是离散事件动态系统的仿真问题,其数学模型的基础是排队理论,图论和运筹学等。

【1-2】 如果考虑教材实例 1.1 中的落体受到空气的阻力,且阻力与下落速度成正比,试修改数学模型和相应的仿真程序。在考虑阻力的情况下,在相同高度同时下落的质量不同的物体仍然同时落地吗? 请通过仿真验证并解释之。

【解答】

设空气的阻力为 f , 与下落速度 v 成正比, 设正比例系数为 k , 则有

$$f = kv$$

于是根据加速度 a , 速度 v 和位移 s 的关系, 可得考虑落体受到空气阻力的数学模型为

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$v = \frac{ds}{dt}$$

$$F = ma$$

$$F = mg + kv$$

其中 F 为落体所受合力, g 为重力加速度。落体的初始条件为

$$v(t_0) = 0$$

$$s(t_0) = 0$$

将以上微分方程变形为时间 dt 的递推式, 以便于编程求解

$$v(t + dt) = v(t) + a(t)dt$$

$$s(t + dt) = s(t) + v(t)dt$$

$$a(t) = g + \frac{kv(t)}{m}$$

据此编程。程序中设空气阻力系数为 $k = -1$, 仿真了 3 种质量的落体 $m = 1, 2, 10$ 。并计算了无空气阻力时自由落体的轨迹, 程序代码如下。

【程序代码】

```
% ch1problem2.m
g=9.8; % 重力加速度
k=-1; % 空气阻力系数
dt=0.1; % 设置计算步长
N=30; % 设置仿真递推次数, 仿真时间等于 N 与 dt 的乘积
for m=[1, 2, 10] % 3 种落体质量
    v=0; % 设定初始速度条件
    s=0; % 设定初始位移条件
    t=0; % 设定起始时间
    for i=1:N
        a=g+k/m*v; % 计算加速度
        v=v+a*dt; % 计算新时刻的速度
        s(i+1)=s(i)+v*dt; % 新位移
```

```

t(i+1)=t(i)+dt; % 时间更新
end
plot(t,s,'o');
hold on;
end
% 理论计算, 以便与仿真结果对照
t_theory=0:0.01:N*dt; % 设置解析计算的时间点
v_theory=g*t_theory; % 解析计算的瞬时速度
s_theory=1/2*g*t_theory.^2; % 解析计算的瞬时位移
% 作图: 仿真结果与解析结果对比
t=0:dt:N*dt;
plot(t_theory,s_theory, '-');
xlabel('时间 t'); ylabel('位移 s');

```

仿真结果如图 1-1 所示。

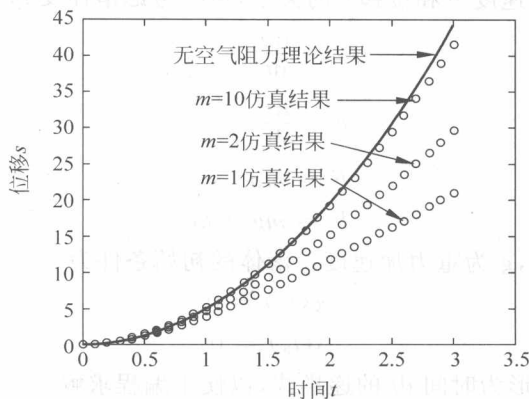


图 1-1 习题 1-2 的仿真结果: 随时间变化落体的位移

从图 1-1 仿真结果可以看出, 由于存在空气阻力, 落体的下落速率减缓了, 在空气阻力系数一定的条件下, 质量较小的物体速率受空气阻力影响较大, 其速率逐渐趋近于匀速。而质量较大的落体则接近于理想自由落体。因此, 在考虑空气阻力的情况下, 在相同高度同时下落的质量不同的物体不是同时落地, 质量较小的物体将最后落地。

【1-3】 接上题, 如果再考虑空气对物体的浮力, 如何进一步修改教材实例 1.1 中的数学模型和相应的仿真程序呢? 请通过仿真验证模型并给出物理解释。

【解答】

浮力与重力方向相反, 且浮力大小与落体体积有关, 等于落体体积所排除的空气质量。设空气密度为 ρ , 落体体积为 V , 则浮力 f_1 为

$$f_1 = \rho V g$$

因此落体动力方程修改为

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$v = \frac{ds}{dt}$$

$$F = ma$$

$$F = mg + kv - \rho Vg$$

相应地,落体加速度方程修正为

$$a(t) = g + \frac{kv(t)}{m} - \frac{\rho Vg}{m}$$

据此编程。程序中仍设空气阻力系数为 $k = -1\text{N}/(\text{m}/\text{s})$,落体质量 $m = 1\text{kg}$ 。落体体积分别为 $V = 0.1, 0.5, 1\text{m}^3$,空气密度为 $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ 。程序代码如下。

【程序代码】

```
% chlproblem3.m
g = 9.8; % 重力加速度
k = -1; % 空气阻力系数
dt = 0.1; % 设置计算步长
N = 30; % 设置仿真递推次数, 仿真时间等于 N 与 dt 的乘积
m = 1; % 3 种落体质量
rho = 1.29; % 空气密度
for V = [0.1, 0.5, 1] % 3 种落体的体积
    v = 0; % 设定初始速度条件
    s = 0; % 设定初始位移条件
    t = 0; % 设定起始时间
    for i = 1:N
        a = g + k/m*v - rho/m*V*g; % 计算加速度
        v = v + a*dt; % 计算新时刻的速度
        s(i+1) = s(i) + v*dt; % 新位移
        t(i+1) = t(i) + dt; % 时间更新
    end
    plot(t,s,'o');
    hold on;
end
% 理论计算, 以便与仿真结果对照
t_theory = 0:0.01:N*dt; % 设置解析计算的时间点
v_theory = g*t_theory; % 解析计算的瞬时速度
s_theory = 1/2*g*t_theory.^2; % 解析计算的瞬时位移
% 作图: 仿真结果与解析结果对比
t = 0:dt:N*dt;
plot(t_theory,s_theory, '-');
xlabel('时间 t');ylabel('位移 s');
```

仿真结果如图 1-2 所示。

从仿真结果中可见,落体体积增加,则所受到的空气浮力亦增加,当落体体积达到 1m^3 时,浮力大于重力,这时物体竖直向上浮起,而不是下落。在本题建模中,忽略了空气密度随高度的变化。因此,仿真结果是实际结果的一种近似。

【1-4】 请举一个时变系统的例子。如何判别一个系统是否是时变系统?

【解答】

时变系统是系统特性随时间变化的系统,又称变系数系统。

例如,当以质量作为系统参数时,火箭是一个时变系统,火箭在飞行中质量由于燃料消耗而随时间减少;另一个常见的例子是无线电通信信道,在不同时间、季节,其信道参数(衰减、群时延特性等)是以时间为自变量的一个复杂函数。在电路系统中,如果电路元件参数

(例如电阻、电容、电感等)随时间变化而变化,则这样的系统也是时变系统。

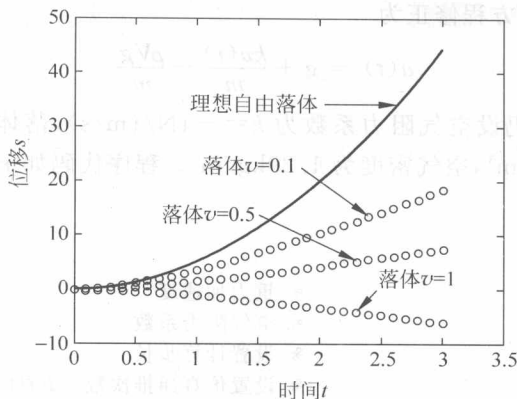


图 1-2 习题 1-3 的仿真结果: 随时间变化落体的位移

时变系统的特点是,其输出响应的波形不仅同输入波形有关,而且也同输入信号加入的时刻有关。时变系统的动力方程基本描述形式是变系数的微分方程或差分方程。对时变系统的运动分析比时不变系统要复杂得多。对于时变系统来说,即使系统是线性的,也只能采用时间域的描述。由于时变系统数学上解析分析的复杂性,特别是考虑到时变系统参数或激励的随机性后,解析分析几乎不可行,因此,在工程上,常常通过对其变系数的微分方程或差分方程的数值求解来进行分析,也即利用仿真手段来进行求解。

如果输入信号 $x(t)$ 产生输出 $y(t)$,那么对于任意时间延迟的输入 $x(t+\Delta)$ 将得到相同时间延迟的输出 $y(t+\Delta)$,则系统为时不变系统。反之,则为时变系统。例如,系统 $y(t)=5[x(t)]^2$ 是时不变系统,因为 $y(t+\Delta)=5[x(t+\Delta)]^2$ 。系统 $y(t)=tx(t)$ 是时变系统,因为使用延迟 Δ 时间的信号 $x(t+\Delta)$ 作为输入信号时,其输出信号为 $y_1(t)=tx(t+\Delta)$,不等于延迟 Δ 的系统输出 $y_2(t)=y(t+\Delta)=(t+\Delta)x(t+\Delta)$ 。

【1-5】 请用解析方法求出抛物线 $y=2-x^2$ 与直线 $y=0$ 所围区域的面积表达式。然后采用蒙特卡罗方法仿真计算该区域的近似面积。从仿真实验中观察随机试验次数与仿真结果精度之间的大致关系。

【解答】

抛物线 $y=2-x^2$ 与直线 $y=0$ 所围区域如图 1-3 所示,其面积可通过积分计算

$$\begin{aligned} S &= \int_{-\sqrt{2}}^{\sqrt{2}} (2-x^2) dx \\ &= \left(2x - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_{-\sqrt{2}}^{\sqrt{2}} \\ &= \frac{8}{3}\sqrt{2} \approx 3.7712 \end{aligned}$$

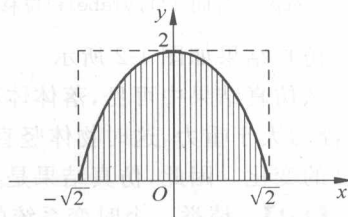


图 1-3 抛物线 $y=2-x^2$ 与直线 $y=0$ 所围区域

用蒙特卡罗方法计算抛物线 $y=2-x^2$ 与直线 $y=0$ 所围区域面积时,可随机产生若干点 $p_i(x \in (-\sqrt{2}, \sqrt{2}), y \in (0, 2))$, $i \leq M$,如图 1-3 中虚线所围区域,然后判别这些点中哪些点位于抛物线 $y=2-x^2$ 之下,并统计这些点的频率值 m/M ,