

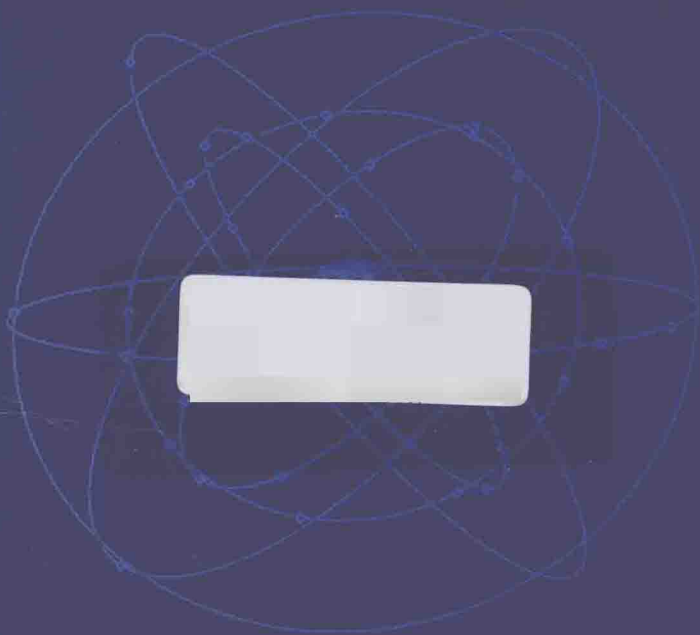
航天科技图书出版基金

国家863计划课题 (2011AA120505) 资助出版

国家自然科学基金项目 (61173077)

GNSS数学仿真原理及 系统实现

许承东 李怀建 张鹏飞 宋丹 等 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金

国家863计划课题(2011AA120505) 资助出版

国家自然科学基金项目(61173077)

GNSS 数学仿真原理及系统实现

许承东 李怀建 张鹏飞 宋 丹 等 编著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

GNSS 数学仿真原理及系统实现/许承东等编著. --
北京:中国宇航出版社,2014.4

ISBN 978-7-5159-0651-5

I. ①G… II. ①许… III. ①卫星导航-全球定位系
统-数学仿真-研究 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 064673 号



责任编辑 杨洁 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出版
发行 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路8号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中画印刷有限公司

版次 2014年4月第1版 2014年4月第1次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 13.5 字数 385千字

书号 ISBN 978-7-5159-0651-5

定价 98.00元

本书如有印装质量问题,可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

前 言

目前全球导航卫星系统 (GNSS) 在轨运行的有四大系统, 分别是美国的全球定位系统 (GPS)、俄罗斯的格洛纳斯系统 (GLO-NASS)、欧盟的伽利略系统 (Galileo) 和中国的北斗卫星导航系统 (BDS)。Galileo 系统的建设尚属于起步阶段, 中国的北斗卫星导航系统也刚刚进入区域性部署向全球定位转换的关键阶段。GNSS 信号模拟器的研制可以为系统建设和系统性能验证提供实验数据支撑。同时, GNSS 信号模拟器作为卫星导航终端产品功能和性能测试的重要仪器, 可以解决外场真实环境下测试费时、费力、费钱且无法提供定量受控的试验验证环境的问题。

GNSS 信号模拟器是由数学仿真系统和射频信号生成系统组成的。数学仿真系统完成卫星导航信号的数学实时仿真, 并将导航电文、观测数据等仿真结果实时发送给射频信号生成系统, 最终生成用户终端天线接收到的卫星导航射频信号。GNSS 数学仿真系统的设计涉及整个导航系统的基础理论和技术, 包括四大导航系统之间坐标系统和时间系统的转换、卫星星座轨道仿真、空间环境仿真以及用户场景仿真等多项技术。因此, 本书从介绍全球卫星导航系统的基础理论和技术出发, 对 GNSS 数学仿真系统的具体设计与实现进行了描述, 旨在让读者在全面掌握全球卫星导航系统数学仿真原理的基础上更好地了解 GNSS 数学仿真系统的构建流程。同时, 本书结合自主研发的 GNSS 数学仿真系统给出了具体的仿真实例, 读者可以结合仿真实例利用 GNSS 数学仿真系统进行相关感兴趣的 GNSS 数学仿真实验研究。

本书共分 12 章, 第 1 章阐述了卫星导航系统的基本概念与

GNSS 数学仿真需求；第 2 章介绍了卫星导航系统常用的坐标系统和时间系统，推导了各坐标系统之间的转换关系和各时间系统之间的转换关系；第 3 章介绍了四大导航系统卫星星座的特点，分析了不同卫星无摄运动和受摄运动下的轨道模型，并给出了卫星轨道仿真实例；第 4 章描述了历书数据、广播星历以及后处理星历的特点，介绍了四大导航系统的导航电文格式与内容；第 5 章介绍了通用的对流层延迟模型和电离层延迟模型，并给出相应的仿真实例；第 6 章针对简单运动、车辆运动、舰船运动、飞机运动以及导弹运动建立了相应的载体运动模型，并以飞机运动为例给出了相应的仿真实例；第 7 章建立了伪距观测模型和载波相位观测模型，并分析了各观测量的主要误差来源；第 8 章介绍了卫星导航系统定位原理，分析了观测方程的线性化模型，并对常用的定位算法进行了研究和仿真分析；第 9 章介绍了三维可视化的基本原理，对卫星导航系统的相关信息进行了三维可视化仿真与分析；第 10 章介绍了 GNSS 数学仿真系统的总体架构和各子系统研发的技术路线，就系统运行的软件和硬件环境进行了介绍，最后介绍了系统的工作流程和具体的仿真流程；第 11 章从各子系统的用例设计和界面设计出发介绍了 GNSS 数学仿真系统的设计与实现；第 12 章从场景设计出发，首先介绍了 GNSS 数学仿真系统中场景的概念及场景的方案设计，然后结合场景设计介绍了几个典型的仿真实例。

本书的编著是众多科研人员辛勤劳动的结果，所涉及的研究成果来源于国家高技术研究发展计划（863 计划）课题（No. 2011AA120505）和国家自然科学基金课题（No. 61173077）的相关研究成果。其中 863 课题是我国地球观测与导航技术领域“十二五”期间先期启动的主题项目——“GNSS 多星座互用关键技术与仿真验证平台”的五个组成课题之一，主题项目由中国伽利略卫星导航有限公司李社军研究员作为首席科学家牵头设立，其余相关课题负责人有中国电子科技集团公司第 54 研究所王珏主任、上海交通大学战兴群教授以及中国航天科工信息技术研究院王千喜主任，他们的

相关工作以及研究成果为本书的内容和最终成稿提供了相应的支撑，在此表示衷心的感谢。在项目立项以及实施过程中，“863”领域专家杨强文研究员、周建华研究员以及中国航天科工信息技术研究院孟波研究员、中国电子科技集团公司第22研究所曹冲研究员、清华大学过静珺教授、中科院天文台施浒立研究员、北京大学朱柏承教授、中科院光电所袁洪研究员对本课题的总体方案提出了很多建设性的意见和很好的实施建议，在此一并表示感谢。本书的出版同时得到了航天科技图书出版基金的资助。

许承东教授作为主编编制了本书的大纲，起草了书稿的章节编排及初稿，并全程指导了书稿的编写。李怀建老师参与了系统的总体方案设计和部分系统的开发，并对文稿内容提出了修改建议。张鹏飞博士为全书的统稿付出了辛勤的劳动。本书第1章宋丹和李剑参编，第2章范国超参编，第3章宋丹和蔡熙参编，第4章张鹏飞参编，第5章李剑和李冬梅参编，第6章李赫编写，第7章张鹏飞编写，第8章宋丹编写，第9章蔡熙编写，第10章张鹏飞编写，第11章宋丹编写，第12章张鹏飞、宋丹和李赫参编。感谢出现在本书参考文献中的各个专著和论文的作者，你们的工作给本书的编著提供了大量的素材，为本书的完成奠定了基础。

由于作者水平有限，书中难免出现不妥甚至错误之处，真诚希望广大读者批评指正。

许承东

2013年11月30日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 卫星导航概述	1
1.1.2 系统仿真技术	4
1.2 GNSS 概述	8
1.2.1 美国 GPS	8
1.2.2 俄罗斯 GLONASS	10
1.2.3 欧盟 Galileo 系统	12
1.2.4 中国 BDS	14
1.2.5 GNSS 的兼容互操作	16
1.3 GNSS 数学仿真系统	16
1.3.1 功能分析	18
1.3.2 性能分析	19
1.3.3 运行环境与数据格式	19
1.3.4 人机交互界面	20
第 2 章 坐标系统和时间系统	21
2.1 坐标系统	21
2.1.1 地球参考模型简介	21
2.1.2 地心惯性坐标系	23
2.1.3 地心地固坐标系	25
2.1.4 大地坐标系	26
2.1.5 当地地理坐标系	27

2.1.6 载体坐标系	28
2.2 坐标系统之间的转换	29
2.2.1 同一参考椭球下坐标系统的转换	29
2.2.2 不同参考椭球间笛卡尔坐标系统的转换	36
2.3 时间系统	38
2.3.1 天文时	39
2.3.2 原子时	41
2.3.3 协调世界时	41
2.3.4 导航卫星系统时	45
2.4 时间系统之间的转换	47
2.4.1 导航系统时与 UTC 之间的转换	47
2.4.2 不同导航卫星系统时之间的转换	49
第 3 章 卫星轨道建模与仿真	51
3.1 GNSS 星座特点分析	51
3.1.1 GPS 卫星星座特点分析	52
3.1.2 GLONASS 卫星星座特点分析	53
3.1.3 Galileo 系统卫星星座特点分析	54
3.1.4 BDS 卫星星座特点分析	54
3.2 卫星轨道基础理论	55
3.2.1 开普勒三大定律	55
3.2.2 开普勒轨道根数	57
3.2.3 开普勒轨道建模	60
3.2.4 受摄运动	62
3.3 基于星历参数的卫星轨道仿真	67
3.3.1 基于 16 参数的 GPS、Galileo 系统和 BDS 卫星 轨道计算	67
3.3.2 基于 18 参数的 GPS 卫星轨道计算	73
3.3.3 GLONASS 卫星轨道计算	75
3.4 仿真实例	79

3.4.1 GPS、Galileo 和 BDS 卫星轨道仿真实例	79
3.4.2 GLONASS 卫星轨道仿真实例	87
第 4 章 卫星星历描述与导航电文	89
4.1 历书数据	89
4.2 广播星历	93
4.3 后处理星历	102
4.4 导航电文编码	107
4.4.1 GPS 导航电文	108
4.4.2 GLONASS 导航电文	115
4.4.3 Galileo 系统导航电文	122
4.4.4 BDS 导航电文	129
4.5 导航电文数据生成	134
4.5.1 广播星历数据拟合	134
4.5.2 卫星星钟参数拟合	141
4.5.3 电离层 Klobuchar 模型参数拟合	142
第 5 章 空间环境仿真	145
5.1 电离层效应	145
5.1.1 电离层简介	145
5.1.2 电离层延迟	147
5.1.3 映射函数	149
5.1.4 电离层延迟模型	153
5.2 对流层效应	162
5.2.1 对流层简介	162
5.2.2 对流层延迟	163
5.2.3 映射函数	166
5.2.4 对流层延迟模型	173
第 6 章 载体运动建模与仿真	184
6.1 载体运动建模	185

6.1.1	简单运动载体模型	185
6.1.2	车辆运动载体建模	187
6.1.3	舰船运动载体建模	191
6.1.4	飞机运动载体建模	197
6.1.5	导弹运动载体建模	213
6.2	仿真实例	230
第 7 章	观测数据仿真	239
7.1	观测量误差来源分析	239
7.1.1	与卫星有关的误差	240
7.1.2	与信号传播有关的误差	245
7.1.3	与接收机有关的误差	248
7.2	伪距观测量仿真	250
7.3	多普勒频移和载波相位观测量仿真	254
第 8 章	载体定位算法分析与仿真	259
8.1	卫星导航系统定位方法	259
8.1.1	单点定位原理	259
8.1.2	差分定位原理	264
8.1.3	相对定位原理	267
8.2	观测方程的线性化	275
8.2.1	伪距单点定位的线性化模型	277
8.2.2	载波相位单点定位的线性化模型	278
8.2.3	相对定位的线性化模型	279
8.3	卫星导航系统常用定位算法	281
8.3.1	最小二乘定位算法	281
8.3.2	卡尔曼滤波定位算法	285
第 9 章	全球导航卫星系统的三维可视化	297
9.1	三维可视化技术基础	298
9.1.1	三维可视化原理	298

9.1.2 三维可视化算法	299
9.1.3 三维可视化的实现流程	302
9.1.4 三维可视化的应用	308
9.2 GNSS 三维可视化	308
9.2.1 GNSS 可视化仿真软件介绍	309
9.2.2 星地一体三维可视化	311
9.2.3 GNSS 数据的可视化	319
第 10 章 GNSS 数学仿真系统总体方案	329
10.1 系统总体设计	329
10.1.1 系统总体架构	329
10.1.2 各子系统研发技术路线	331
10.2 系统运行环境构建	335
10.2.1 系统运行环境硬件架构	336
10.2.2 系统运行环境软件架构	336
10.3 系统工作流程	339
第 11 章 GNSS 数学仿真系统设计与实现	343
11.1 仿真任务设计子系统设计与实现	343
11.1.1 用例设计	343
11.1.2 界面设计	350
11.2 仿真任务运行子系统设计与实现	359
11.2.1 用例设计	360
11.2.2 界面设计	363
11.3 数据管理子系统设计与实现	364
11.3.1 用例设计	364
11.3.2 界面设计	367
11.4 仿真模型管理子系统设计与实现	369
11.4.1 用例设计	369
11.4.2 界面设计	372

11.5 综合显示子系统设计与实现	374
11.5.1 用例设计	374
11.5.2 界面设计	376
第 12 章 GNSS 数学仿真系统仿真实例	380
12.1 GNSS 仿真系统的卫星导航场景设计	380
12.1.1 卫星导航应用场景	380
12.1.2 卫星导航应用场景设计	382
12.1.3 卫星导航应用场景设计实例	386
12.2 定位算法性能仿真	388
12.2.1 场景设计	389
12.2.2 仿真流程	390
12.2.3 仿真结果分析	391
12.3 混合星座 DOP 值仿真	393
12.3.1 场景设计	394
12.3.2 仿真流程	395
12.3.3 仿真结果分析	396
12.4 卫星导航系统的星座覆盖性能仿真	397
12.4.1 场景设计	398
12.4.2 仿真流程	400
12.4.3 仿真结果分析	402
参考文献	408

第1章 绪 论

随着全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 的发展, 卫星导航已深入到现代社会生活的各个方面; 随着计算机技术的不断进步, 系统仿真已成为分析、研究各种系统的重要工具。本章将从卫星导航和系统仿真的基本概念出发, 简述目前在轨运行的四大全球导航卫星系统——美国的全球定位系统 (global positioning system, GPS), 俄罗斯的格洛纳斯 (global navigation satellite system, GLONASS), 欧盟的伽利略 (Galileo) 系统和中国的北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 的现状, 介绍目前国际和国内成熟的卫星导航仿真系统, 使读者在了解 GNSS 建设情况的基础上对当今主流的 GNSS 仿真技术有一定的了解。本章介绍了搭建 GNSS 数学仿真系统的可行性和必要性, 对本书提出的 GNSS 数学仿真系统的设计需求进行了分析。

1.1 引言

本节首先简要地介绍了卫星导航发展简史和其中的一些基本概念, 包括导航、卫星导航和全球卫星导航, 为读者了解卫星导航提供了一些概念性的材料。之后简要介绍了系统仿真技术的概念, 包括数学仿真、半实物仿真和物理仿真, 并对现有的卫星导航仿真系统进行了总结和描述。

1.1.1 卫星导航概述

导航是指实时地测定导航系统的载体在行进途中的位置和速度, 引导其到达目的地的技术或方法^[1]。导航技术可追踪到几百年前,

是为适应航海的需求在实践中逐步发展起来的,最初的导航手段采用的是罗盘领航和天文导航技术,此后逐渐被陆地车辆和航空飞行器所利用。导航主要分为两类:1)自主式导航:利用飞行器或船舶上的设备进行导航;2)非自主式导航:利用飞行器、船舶、汽车等交通设备与有关的地面或空中设备相配合,以无线电通信的方式进行导航^[2]。本书介绍的卫星导航属于非自主式导航。

在无线电通信技术发明之前,地面的无线电导航台是舰船和飞机等载体“定位”和“定向”的测量基准点,因而陆基无线电导航(导航信号来自陆地)系统得到了迅速的发展。随着当代航海、航空及陆地等领域对导航定位精度需求的提高,陆基无线电导航技术已经难以满足,加之20世纪50年代末人造卫星的上天和随后人造卫星技术的发展和运用,天基无线电导航(导航信号来自天空)系统开始崭露头角,并得到了迅猛的发展。卫星导航是天基无线电导航中最常见的一种。

卫星导航是指接收机接收导航卫星发送的导航定位信号,并以导航卫星作为动态已知点,实时测定接收机载体的位置和速度,进而完成导航。卫星导航是利用到达时间(TOA)测距原理来确定载体位置的,所谓到达时间测距原理是指信号从卫星到达接收机所经历的时间乘以光速即二者之间的距离^[3]。接收机通过测量从多颗卫星发射的信号的传播时间,便能确定自己的位置。假设一颗卫星(记作 S_1)在 t_1 时刻发射测距信号,接收机在 t_2 时刻接收到了这一信号,两个时刻相减,便可得到信号从卫星到用户的传播时间,将其乘以光速即卫星与用户之间的距离 R_1 ,如图1-1(a)所示,用户处于以 S_1 为球心, R_1 为半径的球面 A_1 上。如果同时用第2颗卫星(记作 S_2)的测距信号进行测量,卫星与用户之间的距离为 R_2 ,则用户亦处于以 S_2 为球心, R_2 为半径的球面 A_2 上。因此,如图1-1(b)和1-1(c)所示,可以确定用户处于 A_1 和 A_2 的交线上(记作圆周 L_1)。利用第3颗卫星(记作 S_3)重复进行上述测量过程,则以 S_3 为球心, R_3 为半径的球面 A_3 会与 L_1 有两个交点,其中一个即为用户的正确位置(较低的一点),如图1-1(d)所示。

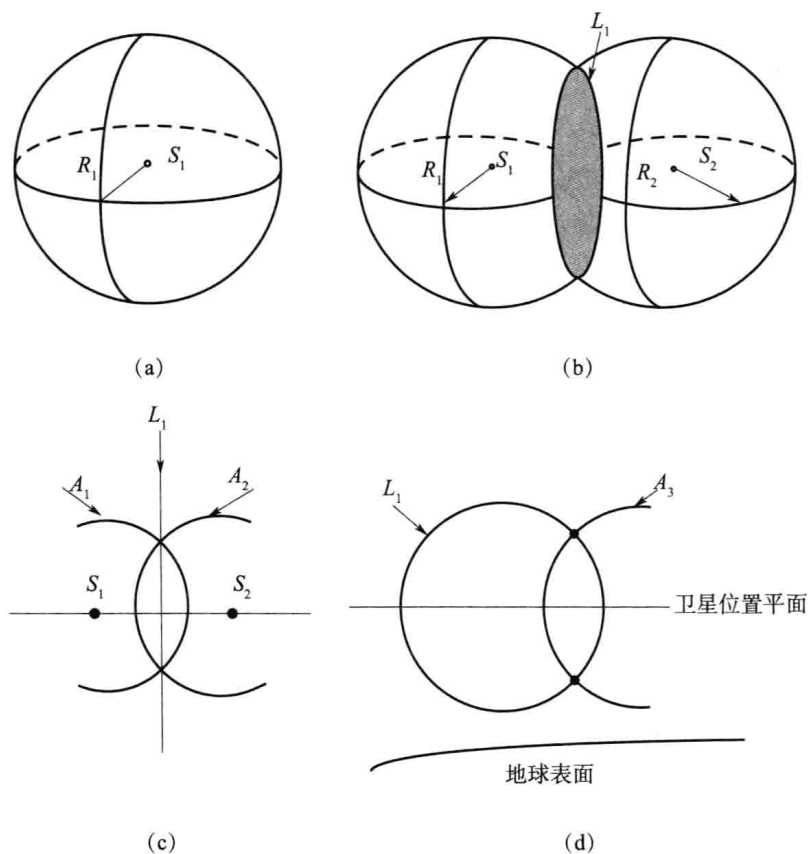


图 1-1 卫星导航定位原理

卫星导航从 20 世纪 50 年代起, 进入了快速发展时期。第一代卫星导航系统——美国的子午仪系统和苏联的 Cicada 系统开创了卫星导航定位的先河, 但它们存在诸多不足, 例如用户得不到连续定位, 每次定位时间过长等, 这些缺点限制了它们仅适合低速运动的用户而不适合高动态用户 (例如飞机、导弹)。为了突破卫星导航系统的应用局限性, 实现全天候、全球性和高精度的连续实时导航与定位, 第二代卫星导航系统——GPS 应运而生^[4]。GPS 的应用几乎渗透到社会生活的各个角落, 它使我们的生活发生了很大的变化。在 GPS 之后, 基于军用和民用的需求, 各国争相发展导航卫星系统, 这些

系统有一部分只能达到区域覆盖（称之为区域导航卫星系统），有一部分可达到全球覆盖（称之为全球导航卫星系统）。区域导航卫星系统有：日本的准天顶卫星系统（QZSS）、印度的区域导航卫星系统（IRNSS）、美国的广域增强系统（WAAS）、印度的 GPS 辅助型静地轨道增强导航（GAGAN）及欧洲的地球同步卫星导航增强服务系统（EGNOS）等。在全球导航卫星系统中，除了美国的 GPS 外，俄罗斯的 GLONASS 也发展得较为成熟，欧盟的 Galileo 系统的建设尚属于起步阶段，中国的 BDS 也刚刚进入区域性部署向全球定位转换的关键阶段。GNSS 从广义上讲包括上述所有的全球导航卫星系统和区域卫星导航系统，从狭义上讲只包括四大全球导航卫星系统 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS^[5]。本书中所提的 GNSS 是狭义上的。

卫星导航系统是由多颗导航卫星构成的导航星座、地面监测网和用户导航定位设备等三大部分组成的。在正常运行的状态下，任何一个全球卫星导航系统都可为地球表面、近地表和地球外空任意地点用户提供全天候、实时、高精度的 PVT 服务（包括三维位置、速度及精密的时间信息）。目前，全球卫星导航系统在各专业应用领域和大众消费市场获得了广泛的应用，对于人们的生产和生活方式产生了深远的影响，已成为名副其实的跨学科、跨行业、广用途、高效益的综合性高新技术。

1.1.2 系统仿真技术

1.1.2.1 系统仿真基本概念

系统仿真是 20 世纪 40 年代末以来伴随着计算机技术的发展而逐步形成的一门新兴学科。系统仿真是指通过构造一个“模型”来模拟实际系统内部所发生运动的过程，建立在以模型为基础构建的仿真系统上的试验技术称为仿真技术^[6]。

根据仿真所用模型的不同，系统仿真可分为数学仿真、物理仿真和半实物仿真^[7]。