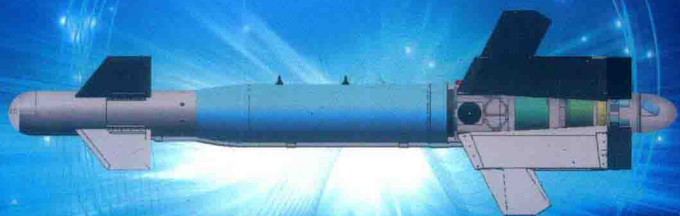


# 制导炸弹仿真试验技术

Zhidao Zhadan Fangzhen Shiyan Jishu

▲ 张培忠 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 制导炸弹仿真试验技术

张培忠 等著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了制导炸弹仿真试验的理论和技術,包括仿真系统的误差传播理论及其对仿真精度的影响、可见光的近红外区目标仿真建模技术、制导炸弹数学实时仿真编程与软件开发技术、制导炸弹半实物仿真技术,以及融合运用半实物仿真结果与实弹试验结果,综合评价制导炸弹制导性能的理论方法,并通过实际应用事例检验应用效果。

本书可以作为大专院校仿真专业的本科生、研究生的教学参考书,也可供从事仿真实理论与技术研究及工程应用人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

制导炸弹仿真试验技术/张培忠等著. —北京:  
国防工业出版社,2019.5  
ISBN 978-7-118-11857-5

I. ①制… II. ①张… III. ①制导炸弹-仿真-实验  
技术 IV. ①TJ765.4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第084127号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 880×1230 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$  字数 187千字  
2019年5月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 48.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 《制导炸弹仿真试验技术》编委会成员

张培忠 黄彦昌 胡林亭 吴 勇 姜兆义

王树恩 冯 田 王 欣 张 鹏 高 坤

李士华 侯习平 杨明华

# 前 言

近几十年以来,系统科学、控制理论、计算机技术、信息分析与处理技术的迅猛发展,推动了系统仿真技术的发展成熟。目前,系统仿真已经成为人们深入探究复杂系统运动机理、揭示系统动态过程和运动规律的一种重要的科学手段和方法,并且向各个科学研究与工程实践领域渗透,使得系统仿真技术成为一门独立发展的综合性学科,为科学决策提供了重要的依据,为国民经济和社会发展做出了巨大贡献。

由于制导炸弹造价昂贵、试验中要动用飞机/无人机,实弹试验费用很高,组织协调难度很大,试验周期较长,一般情况下,难以进行大样本量的实弹试验。若采用仿真试验与实弹试验相融合的方法,可以显著减少实弹试验样本量和动用飞机/无人机的架次,显著节省试验费用,加快制导炸弹研发和试验进度,集约、高效地完成科研试验任务。因此,将仿真试验应用到制导炸弹的鉴定领域,已经成为鉴定试验发展的重要方向之一。

在半实物仿真试验中,将复杂抽象、难以用准确的数学理论模型描述的物理过程直接用实物代替,并与确切的数学理论描述的部分串联

起来,构成仿真回路,进行硬件在回路的半实物仿真试验,提高了仿真结果的精度和可信度,已经成为可以用于武器装备鉴定试验用的重要手段。

当前,仿真技术包括半实物仿真技术的研究与应用已经趋于成熟,但是,仍然存在部分领域有待探究。在半实物仿真系统中,由于仿真环境设备、物理效应设备存在固有的误差,在其参与仿真试验过程中,必然会将这部分误差带入仿真结果中,仿真输出的结果与实际系统输出之间存在的误差是令人关注的。运用误差分析理论分析该类误差的传播过程,以及误差对仿真精度的影响,借此改进仿真技术是重要的课题。

目标模拟器是重要的半实物仿真环境设备,用于产生制导炸弹导引头跟踪的激光目标或者可见光目标,以检测激光导引头和可见光导引头的引导精度,为目标模拟器建立逼真的目标仿真模型,也是重要的仿真技术之一。

数学实时仿真技术具有廉价、灵活、高效的特点,可以用于调试检测仿真程序运行状况的可靠性、稳定性,是提高、改进半实物仿真技术的良好辅助手段,也可以作为半实物仿真试验的重要补充手段。

实弹试验数据价值高、客观性强,是检验制导炸弹性能的重要依据,但是试验样本量偏小,评估结果精度偏低。而半实物仿真试验数据廉价、样本量大,可以提高评估结果的精度。为了保证评估结果的可信度,提高评估精度,需要建立融合仿真数据与实弹试验数据的理论方法,实现对制导炸弹性能的客观、准确评估。

基于上述需要,作者结合近些年的研究成果撰写了本书。全书共分为6章,第1章由张培忠、黄彦昌、王欣撰稿,介绍了仿真技术常用的基本概念;第2章由吴勇、张培忠撰稿,分析了主要误差来源,建立仿真误差传播理论,获得误差对仿真精度的影响;第3章由胡林亭、张鹏撰稿,介绍了可见光近红外区的目标模型建模理论和方法,给出了实例;第4章由高坤、王欣、李士华撰稿,介绍了制导炸弹数学实时仿真的编程技术,以及软件开发技术;第5章由张培忠、姜兆义、侯习平、杨明华撰稿,介绍了仿真模型的常用校核、验证理论和方法,及其在制导炸弹仿真试验中的适用性,确定仿真模型校核、验证方案;第6章由王树恩、冯田、高坤撰稿,以实际应用例子为背景,介绍了融合仿真试验数据与实弹试验数据的理论和方法,综合评估制导炸弹的性能。

在本书编写过程中得到了郭晓波、王国瑞、宋志刚、董臣、程军等同志的指导和支持,在此表示感谢。鉴于作者水平所限,书中尚有不足之处,诚恳希望广大读者提出宝贵意见,在此一并表示感谢!

作 者

# 目 录

第 1 章 仿真的基本概念 .....	1
第 2 章 半实物仿真系统精度分析 .....	6
2.1 半实物仿真系统组成原理 .....	6
2.2 半实物仿真环境设备模型 .....	7
2.2.1 两轴转台模型 .....	7
2.2.2 目标干扰模拟器 .....	8
2.2.3 三轴转台模型 .....	8
2.2.4 负载模拟器模型 .....	10
2.3 炸弹制导控制系统数学模型 .....	11
2.4 均值、协方差传播模型 .....	19
2.4.1 制导控制系统的状态变量方程 .....	20
2.4.2 非线性函数的统计线性化 .....	21
2.4.3 制导控制系统的均值和协方差传播方程 .....	24
2.5 仿真试验 .....	27
2.5.1 仿真试验条件及初始参数 .....	27
2.5.2 基于 Simulink 建立仿真模型 .....	28
2.5.3 仿真试验结果及分析 .....	30
第 3 章 近红外目标建模 .....	39
3.1 视景仿真概述 .....	39
3.1.1 视景仿真 .....	39
3.1.2 视景仿真技术用途 .....	40

3.1.3	国内外发展概况 .....	40
3.1.4	近红外视景仿真的发展动态 .....	40
3.2	视景仿真建模理论 .....	42
3.2.1	视景仿真软件组成与原理 .....	42
3.2.2	仿真环境建模方法 .....	43
3.2.3	三维地形建模 .....	45
3.2.4	海天背景建模 .....	50
3.2.5	天空背景建模 .....	52
3.2.6	云背景的建模 .....	54
3.2.7	坦克目标建模 .....	56
3.2.8	飞机目标建模 .....	60
3.2.9	雨雪特效建模 .....	65
3.2.10	MultiGen Creator 建模技术在视景仿真中的 应用 .....	66
3.2.11	近红外材质建模 .....	68
3.2.12	三维视景仿真系统驱动 .....	70
3.3	仿真技术 .....	79
3.3.1	碰撞检测技术 .....	79
3.3.2	LOD 技术 .....	81
3.3.3	实时阴影技术 .....	83
3.3.4	广告牌技术 .....	84
3.4	视景仿真软件可信度验证方法 .....	85
3.4.1	仿真可信度 .....	85
3.4.2	视景仿真软件评估 .....	87
3.4.3	计算机模型验证方法 .....	89
3.5	建模实例 .....	94
3.5.1	建模步骤 .....	94
3.5.2	素材准备 .....	94
3.5.3	模型构建方法 .....	95

## 第 4 章 制导炸弹建模仿真 .....

4.1	数学仿真概述 .....	99
-----	--------------	----

4.1.1	仿真目的	99
4.1.2	仿真与实弹试验	99
4.2	制导炸弹数学仿真	101
4.2.1	某型制导炸弹系统简介	101
4.2.2	系统工作流程	102
4.2.3	制导炸弹数字仿真	106
4.3	坐标系定义及转换关系	108
4.3.1	坐标系定义	108
4.3.2	各坐标系之间的关系及变换矩阵	109
4.4	电视导引头数学模型	112
4.4.1	电视导引头各环节的数学模型	112
4.4.2	电视导引头数学模型	114
4.5	有控弹道运动学模型	116
4.5.1	力和力矩	116
4.5.2	动力学方程	124
4.5.3	弹体—目标相对运动方程组	126
4.5.4	电视导引头制导律	127
4.6	制导炸弹数学实时仿真	131
4.6.1	基于 Matlab/Simulink 的仿真程序设计与调试	132
4.6.2	自定义 RTX 实时目标环境	136
4.6.3	RTX 实时环境中的仿真程序设计与调试	141
4.7	制导炸弹系统 RTX 实时仿真	144
<b>第 5 章</b>	<b>仿真模型校核与验证</b>	<b>146</b>
5.1	基本概念	146
5.2	仿真模型的校核与验证	147
5.2.1	模型校核验证的理论	147
5.2.2	模型校核验证的试验	149
5.2.3	校核验证参数估计的准确度	149
5.2.4	模型校验过程	153
5.3	仿真系统可信度评估的主要内容	155

5.3.1	仿真系统可信度的概念 .....	155
5.3.2	仿真系统可信度评估 .....	156
5.3.3	仿真系统可信度与 VV&A、T&E 的关系 .....	158
5.4	制导炸弹模型校验及可信度分析方案 .....	159
5.4.1	基本构想 .....	159
5.4.2	制导炸弹系统仿真模型校核验证方法 .....	161
5.4.3	可信度评估方法的适用性分析 .....	163
5.4.4	制导炸弹仿真试验的可信性分析方案 .....	167
5.5	静态性能一致性验证方法 .....	168
5.5.1	参数检验方法 .....	168
5.5.2	分布拟合检验方法 .....	169
5.5.3	非参数检验方法 .....	170
5.5.4	自助法(Bootstrap) .....	172
5.5.5	稳健统计 .....	172
5.6	动态性能一致性验证的时域方法 .....	174
5.6.1	一般时域方法 .....	174
5.6.2	时序方法 .....	176
5.7	动态性能一致性验证的频域方法 .....	176
5.7.1	平稳时序的功率谱密度估计 .....	176
5.7.2	谱估计的相容性检验 .....	177
5.8	仿真系统可信度评估方法 .....	177
5.8.1	层次分析法 .....	177
5.8.2	模糊综合评判法 .....	179
5.8.3	模糊层次分析法(Fuzzy-AHP) .....	180
5.8.4	灰色关联分析法 .....	183
5.8.5	基于相容限的可信度评估方法 .....	183
<b>第 6 章</b>	<b>应用实例 .....</b>	<b>187</b>
6.1	激光制导炸弹仿真试验大纲 .....	187
6.2	激光制导炸弹实弹试验大纲 .....	187
6.3	仿真结果及模型校核 .....	188

6.4	飞行试验结果及模型验证 .....	190
6.5	实例 .....	192
6.5.1	实弹试验 .....	192
6.5.2	脱靶量评估 .....	195
	参考文献.....	202

# 第 1 章 仿真的基本概念

## 1. 模型

为了研究客观的复杂系统,可以利用实际系统进行各种试验,依据输入、输出信息,分析它们之间的关联,确定输入与输出之间的内在规律,从而达到理解、认知这一复杂系统的内部机理的目的。但是,利用实际系统进行试验,其经济性、安全性、时效性及可行性都欠佳,如果在复杂系统的模型上进行试验,相对来说更为经济、方便。另外,在实际系统建立之前,为了预见它的某些性能,用实际系统试验也是不可能的,必须借助于与其具有相似性的一个模型,进行前早期的试验研究。

模型是实际系统某种特定性能的一种抽象描述形式。通过模型可以近似描述实际系统的本质和内在的关系。模型一般分为物理模型和数学模型两大类。

(1) 物理模型:物理模型与实际系统有相似的物理性质。这些模型可以是按比例缩小的实物外形,例如风洞试验的飞行器模型和水槽试验的船舶模型,或者是试制的样机模型,如导弹的导引头、舵机样机。在试验中,物理模型可以表现出实际系统的物理现象。

(2) 数学模型:用抽象的数学方程描述实际系统内部物理变量之间的关系建立的理论模型。数学模型可以揭示系统内在参数的动态变化。

## 2. 系统仿真与分类

系统仿真技术作为分析和研究系统运动行为、揭示系统动态过程和运动规律的一种重要的手段和方法,随着计算机的运用而迅速发展起来。特别是近些年以来,随着系统科学、控制理论、计算机技术、信息处理技术的发展,以及各个领域对仿真技术的应用实践,使得系统仿真技术有了突破性发展,在理论研究、工程应用、仿真工程、开发环境和工

具等领域都取得了巨大成就,形成了一门独立发展的综合性学科。

系统仿真是建立在控制理论、相似理论、信息处理、计算技术等理论和基础之上的,以计算机和其他专用物理效应设备为工具,利用系统模型对真实或者假象的系统进行试验,并借助知识、经验、数据、资料对试验结果进行分析研判,进而做出决策的一门综合性的试验科学。

依据不同的分类标准,可将系统仿真进行不同的分类:

(1) 根据被研究系统的特征可分为两大类:连续系统仿真、离散事件系统仿真。连续系统仿真是指对系统状态变量随时间连续变化的系统进行仿真研究,包括数据采集与处理系统的仿真,其数学模型包括连续模型(微分方程等)、离散时间模型(差分方程等)、连续—离散混合模型。离散事件系统仿真则是指系统状态只在某些点上由于某种随机事件的驱动而发生变化的系统进行仿真试验,其状态变量在两个事件之间保持不变,是离散变化的,其数学模型通常用流程图、网络图来描述。

(2) 按仿真试验中所取得模型时间标尺(模型时间)与自然时间(原型时间)之间的比例关系,可以分为实时仿真、非实时仿真。当模型时间等于自然时间时,称为实时仿真。当模型时间大于或者小于自然时间时,称为超实时仿真或者亚实时仿真。

(3) 按照参与仿真的模型种类可以分为物理仿真、数学仿真、物理—数学仿真(半物理仿真、半实物仿真)。物理仿真又称为物理效应仿真,是按照实际系统的物理性质构造物理模型,进行仿真试验,其特点是直观可信、逼真度高,但是成本高、周期长,调整、修改参数困难,使用不方便。数学仿真是指先建立数学理论方程,再通过仿真硬件软件建立仿真环境、动画图形、输入输出等,数学仿真调整修改灵活方便,具有通用型、实用性,但是需要经过校模、验模过程,才能保证仿真的准确度。物理—数学仿真或者称半物理仿真、半实物仿真是硬件(实物)在回路中的仿真,其仿真系统的一部分用数学模型描述,转化为仿真计算模型,而另一部分则以实物或者物理模型方式,直接接入仿真回路进行仿真,其特点是:将数学上容易准确描述、经过校核验证之后计算结果可信度高的部分用仿真计算模型,对于非线性因素、随机因素数学仿真难以准确实现的,或者效果不理想的部分,用实物或者物理模型参与仿

真,半实物仿真既可以保证可信度,又方便灵活,经济可行。

### 3. 系统仿真过程与步骤

利用系统仿真对系统进行试验研究是一门综合性技术,其过程是一个由简到繁的系统工程,特别是对复杂、综合系统的总体仿真研究,是一件难度很大的工作,一般要分阶段实施。首先是建模阶段,通常是把系统分解成若干个子系统,分块建立子系统的仿真模型;若是数学模型,则需要进行模型变换,将数学模型转化为计算机仿真模型,并进行初步校验;若是物理模型,则需要从功能与性能上覆盖系统的对应部分,然后根据系统的工作原理,将子系统的模型集成为全系统的仿真模型。其次是模型试验阶段,根据仿真试验的目的,制定试验大纲和计划,设计试验流程,选定待测变量和测量点,以及仪器仪表等测试设备,驱动模型运行,进行仿真,记录试验结果。最后是仿真结果分析研判阶段,对测试结果分类整理,去糙取精、去伪存真,完成数据的科学分析;依据结果做出正确的判断和决策;鉴于仿真试验结果是仿真模型输出的数据,其是否能够代表实际系统的真实行为,尚需要进一步分析研究、验证,最后交由用户判定、认可;如果得到用户认可,即可以进行后续文档处理;否则,需要返回建模、校模、验模阶段,检查原因,修改模型及其参数,调整试验流程及测试方法等环节,继续仿真试验,直到达到用户认可为止。

一般意义的系统仿真可以分为 10 个步骤:系统定义,包括其边界条件和约束;数据准备,包括图纸资料、文档信息,为建模做准备;模型表达,把实际系统抽象成数学方程或者逻辑流程图,并对其进行模型校核;模型变换,用计算机语言、软件工具描述模型,建立仿真模型,并进行模型验证;模型认可,依据系统的概念、数学逻辑理论、仿真计算技术,以及模型校核、验证的结果,分析判断模型是否真实反应了实际系统的行为;仿真试验大纲和计划设计,根据研究目的和仿真目标,设计仿真试验的项目、内容、条件和要求,使仿真试验能够获取所需信息。仿真试验流程设计,依据仿真试验大纲和计划设计试验流程,包括选择输入输出参数、测试点、仪器仪表、中断处理等;仿真执行,驱动仿真程序,输出仿真结果;结果整理,对仿真结果进行分析研判、取舍、修正等,

并依据分析判断结论,对仿真模型进行后续调试、改进。实现与维护,使用模型和仿真结果,形成产品并进行后续升级、维护。

#### 4. 仿真系统与仿真实体

仿真系统是一个由计算机及其载体计算机系统、物理效应设备、部分实体组成的系统,构成了仿真试验的平台。仿真系统是研究系统和解决问题的方法和手段,其功能是面向某个系统和问题的,其组成和规模取决于系统和问题。仿真系统的软件包括模型软件、通用软件、专用软件、数据库等。仿真系统硬件包括计算机、接口、非标设备、通信设备,以及激励、采集、记录、监控、动力、测试等辅助设备。仿真系统评估包括软件评估、硬件评估,对仿真系统的性能、可靠性、安全性、维护性等评估。仿真系统的校验与确认,仿真系统经过评估以后,要进行系统仿真试验设计与协调,确定仿真流程,经过试验对其进行考核、检验,检查其是否能够达到仿真试验的目的,且是否具有足够的可信度。仿真系统经过校验与确认以后,完成了由主管部门组织的验收,为其发放认证资格证,正式投入使用。

仿真系统中的实体包括仿真计算机、目标模拟器、转台、负载仿真器、接口装置、试验控制台。目标模拟器分为辐射式和注入式两种,各种光学图像信号模拟均采用辐射式目标模拟器,而微波指令信号则是采用注入式的目标模拟器。转台是模拟飞行器或者运动目标的姿态、运动的仿真器,分为三轴、五轴等转台,也有立式、卧式转台之分,可以模拟出飞行器的俯仰运动、偏航运动、转动运动,以及目标的上下运动、左右运动。负载仿真器是模拟飞行器的舵机受到气动力矩作用、在舵机的铰链上产生的力矩。接口装置是仿真计算机、仿真器、转台、控制台的指令、数据、通信的连接设备。试验控制台是人为指挥、调度、管理、监督各个仿真设备工作状态的操控装置。

#### 5. 半实物仿真

半实物仿真是指在仿真系统中接入了研究系统的一部分实体的仿真。该类仿真系统可以显著提高研制质量、缩短研制周期、节省研制费用,因此大量应用在飞机、导弹、火箭、飞船等复杂系统的仿真试验中。其特点有:一是被研究对象系统结构、原理复杂,难以建立准确的数学

模型,例如射频寻的制导控制系统,导引头在近场条件下工作的数学模型,从目标运动、射频输出、导引头输入和跟踪的全过程,准确建立数学模型很困难,直接接入实物会更为方便,试验结果可信度高;二是利用半实物仿真检验系统设备的功能和性能,更加直接和有效;三是利用半实物仿真可以进一步校准系统的数学模型,提高仿真结果的准确度。