

随机动力学 及其在兵器中的应用

The Random Dynamics and Its
Application in Weapons

王放明 著



国防工业出版社

随机动力学及其 在兵器中的应用

**The Random Dynamics
and Its Application in Weapons**

王放明 著

国防工业出版社

• 北京 •

图书在版编目(CIP)数据

随机动力学及其在兵器中的应用/王放明著. —北京:
国防工业出版社, 2000. 3

ISBN 7-118-02214-4

I. 随… II. 王… III. 随机-动力学-应用-武器-设计
IV. TJ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 54271 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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 5 $\frac{3}{8}$ 134 千字

2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:13.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

序

随机动力学是动力学研究中新兴的学科,无论在理论方面,还是在工程应用方面,都有很大的研究价值和实用价值。

从 1986 年开始,本书作者开始深入研究涉及随机振动的工程应用问题。当时,在—项课题的研究过程中,迫切需要解决系统在非平稳随机激励下其振动响应均值和方差的求解问题,这既涉及数学、随机过程等理论,又涉及动力学模型。

在 1986~1988 年期间,本书作者翻阅了大量中外文资料,做了大量艰苦的研究和探索工作,经过坚韧不拔的努力,最后终于初步解决了非平稳随机激励(过程)平稳化处理问题,在应用上解决了非平稳激励下系统响应的数值求解问题。

从 1990 年开始,作者在理论上对非平稳随机激励下系统响应的求解方法进一步进行了完善,并将此方法从针对振动模型求解扩展到一般的动力系统,从求解振动响应的均值和方差到求解运动(速度和位移)的均值和方差,提出了非平稳随机过程平稳化处理的三个定理。1991 年丹麦奥尔堡大学动力学专家 Neilson 教授曾来函,对本书作者发表的有关随机动力学的几篇论文表示了极大的兴趣,并曾邀请本书作者到丹麦与他一起从事这方面的研究,同时对研究成果给予了较高的评价。

这本书的内容是本书作者十几年来研究成果的一些总结,其中主要的动力学模型都参加过专家鉴定,主要内容在正式刊物上发表过,并得到专家、学者的指导和指正。浙江大学庄表中教授曾阅读了书中部分内容并给予较好的评价。

随机动力学作为一个学科,有大量的理论和应用问题需要研究解决。本书作者治学严谨;善于思考;提出了新颖而先进的分析

方法和思想,对随机动力学理论和应用的发展做了有价值的工作。本书不仅描述了随机动力学的理论问题,还大量介绍了随机动力学的应用问题,尤其在解决非平稳随机动力学的数值求解问题方面具有独创性,取得了杰出成果。

华北工学院

申石炎

教授

1999.10.17 于太原

目 录

绪论	1
第一章 概率论和随机过程原理	10
§ 1.1 概述	10
§ 1.2 随机变量的数字特征	14
§ 1.3 概率密度的分布规律	18
§ 1.4 随机函数(随机过程)	27
§ 1.5 线性非齐次微分方程解的概率特征	48
§ 1.6 常系数微分方程的平稳解	51
第二章 随机动力学	56
§ 2.1 引言	56
§ 2.2 非平稳随机过程(激励)平稳化处理的原理	57
§ 2.3 随机动力学分析方法	70
§ 2.4 实例	74
第三章 多管火箭炮发射随机动力学	78
§ 3.1 引言	78
§ 3.2 多管火箭炮发射随机动力学	78
§ 3.3 火箭炮射击时冲击力随机特性	84
§ 3.4 火箭炮随机振动对射击密集度的影响	90
§ 3.5 多管火箭炮动态特性参数优化	91
第四章 自动武器发射随机动力学	95
§ 4.1 引言	95
§ 4.2 基本假设	96
§ 4.3 动力学方程的建立	97
§ 4.4 随机激励的研究	101

第五章 自动武器采用浮动技术后运动随机动力学·····	111
§ 5.1 引言 ·····	111
§ 5.2 运动动力学模型 ·····	111
§ 5.3 浮动随机运动的计算机模拟和测试 ·····	117
第六章 自动武器膛口随机响应及射击密集度·····	122
§ 6.1 引言 ·····	122
§ 6.2 膛口随机运动与射击密集度的关系 ·····	123
§ 6.3 某冲锋枪膛口随机响应及射击密集度 ·····	126
附录 某自动武器随机动力学分析程序·····	130
参考文献·····	158

Contents

Introduction	1
Chapter 1 The principles of the probability and the random process	10
§ 1.1 The summarization	10
§ 1.2 The datum features of the random variables	14
§ 1.3 The distributing rules of the density of probability	18
§ 1.4 The random process(The random function)	27
§ 1.5 The probability features of the solution of the linear non homogeneous differential equation	48
§ 1.6 The stationary solution of the differential equation with constant coefficient	51
Chapter 2 Random dynamics	56
§ 2.1 The foreword	56
§ 2.2 The principles of making non • stationary random process change into stationary one	57
§ 2.3 The analysis method of random dynamics	70
§ 2.4 The examples	74
Chapter 3 The launching random dynamics of the multiple rocket	78
§ 3.1 The foreword	78
§ 3.2 The launching random dynamics of multiple rocket	78
§ 3.3 The random features of the force on multiple rocket	84
§ 3.4 How does the random vibration influence the launching density of the multiple rocket	90

§ 3.5 The dynamic parameter optimization of multiple rocket	91
Chapter 4 The shoot random dynamics of the automatic weapons	95
§ 4.1 The foreword	95
§ 4.2 The basic hypothesis	96
§ 4.3 The dynamics equation	97
§ 4.4 The random exciting force	101
Chapter 5 The movement random dynamics of automatic weapons equipped with floating device	111
§ 5.1 The foreword	111
§ 5.2 The model of the movement dynamics	111
§ 5.3 The simulation of the random floating movement by computer and the measurement of the floating movement	117
Chapter 6 The muzzle random response and shooting density of automatic weapon	122
§ 6.1 The foreword	122
§ 6.2 The relations between the random movement of the muzzle and the shooting density of automatic weapon	123
§ 6.3 The shooting density of a submachine	126
The analysis program of dynamics	130
The reference	158

绪 论

一、概 述

近年来,随机动力学理论及其在各方面的应用有很大发展,随机动力学理论已成为分析复杂机械结构不可缺少的工具。为了对一些随机过程进行模拟,寻求改进某项随机动力响应指标的措施,必须应用随机动力学理论。

随机动力学是用随机过程理论及其他数学方法组合起来处理动力学问题的一个新学科。从力学观点看,它是古典振动理论的新发展,从数学观点来看,它是随机过程理论在动力学领域内的重要应用。从总的方面来说,随机动力学可分平稳和非平稳两类。

所谓平稳随机过程是这样一类过程:它们随时间近似均匀地变化,且相对于某个平均值作连续不断的随机振荡。此外,该过程的概率特征实质上不随时间变化,这类随机过程(随机函数)叫做平稳随机过程(平稳随机函数),其特征是:

- (1) 均值 $m_X(t) = \text{常数}$;
- (2) 方差 $D_X(t) = \text{常数}$;
- (3) 其相关函数 $R_{XX}(t, t') = R_{XX}(\tau)$ 仅依赖于 t 与 t' 之间的时间间隔(X 为随机过程) τ 。

非平稳随机过程的特点是:

- (1) 各域(时域、幅域、时差域和频域)信息都与时间 t 有关。
- (2) 不是各态经历的。

目前平稳随机动力学理论研究得比较充分。相对而言,非平稳随机动力学问题的研究还不够深入。虽然有些学者对一些物理系统的非平稳响应作了一定研究并取得了有意义的成果,但是缺少应用条件和物理概念上的说明。

工程中普遍存在非平稳随机动力学问题。例如：车辆在起动、制动时的激励，地震、爆炸冲击对结构物的激励，枪械射击时所产生的后坐力等。

为了解决工程中受有随机力作用的系统其位移和速度响应的概率特征，就产生了随机动力学学科。随机动力学是为了预测随机因素对机构动作的影响、计算受随机作用力的动力系统的随机运动状态并对随机运动系统进行可靠性估计而产生的学科，其在机械、航天航空、海洋工程、自动控制和兵器等领域具有广泛的用途。

经典动力学作为一个古老的学科，对推动人类社会的物质文明起到了举足轻重的作用。从牛顿开创的动力学开始，到近代计算机在力学技术中的应用，使得人类对复杂的动力系统进行精确分析成为可能。经典动力学广泛地应用在结构的运动分析和动力设计方面，解决了许多工程中的实际问题，甚至对有些存在随机因素的情况，也可采用非随机动力学方法来处理。

人们为了完善非随机的动力学分析方法做了大量工作，并取得了辉煌成果。对于某些问题应用随机动力学方法是卓有成效的，这些问题包括：第一，预测随机因素对机构动作的影响；第二，预测武器射击密集度；第三，估计随机动力系统的可靠性。在这些方面，采用随机动力学方法可以缩短计算过程，并使随机动力系统的优化设计成为可能。

历史上对随机激励的动态响应的首次研究是 1905 年 Einstein 对布朗运动的开拓性工作，它标志着随机动力学研究工作的起步。作为随机动力学研究内容之一的“随机振动”一词，首先由 Lord Rayleigh 在 1919 年的一篇技术论文的标题中用来描述一个等价于平面上随机步行的声学问题。随机振动这一术语的现在用法则起源于 50 年代中期，与下列三个航空、航天问题有关：大气湍流引起的飞机抖振，喷气噪声引起的飞机蒙皮的声疲劳以及火箭推进的运载工具的可靠性。这三个问题中的共同因素是激励的随机性。开始，大多数的研究工作集中在线性模型上。60 年代中期，许多研究者的注意力转向非线性系统的随机振动问题与随机参数

激振问题。随机振动理论首先应用于运载工具(航天飞行器、舰船、卡车、火车),然后是名义上不移动的结构,如承受随机风与地震载荷的高层建筑,承受随机波载荷的近海结构等。

目前,随机动力学已开始在武器研究中得到应用并引起兵器研究工作者的重视。例如,已经有人对车载机枪在路面平稳随机扰动力作用下的射击精度问题以及随机振动对武器射击密集度的影响进行了卓有成效的研究。

二、动力学分析的初步分类

动力学(包括多刚体动力学或结构动力学)按所涉及因素的性质或特殊现象一般可初步分为四类,即:确定性动力学、随机动力学、模糊动力学和混沌动力学。当然,这种划分是在一定意义下极为初步的划分。

所谓随机动力学是研究动力系统在受随机力作用时、或者系统含有随机参数时其随机运动状态或受力状态的一门学科。或者说,是研究动力学系统中随机因素对随机运动和受力影响的学科,最终目的是为了给改善承受随机载荷的系统、运载工具及设备的可靠性、武器射击密集度等提供坚实的基础。随机动力学与一般动力学的主要区别是:前者研究的是承受随机载荷的系统,或系统全部或部分参数是随机的;而后者研究的是载荷确定、参数确定的系统。随机振动是随机动力学研究的一个方面,包括非线性和线性,可分为平稳和非平稳两大类型,目前已进行了大量的研究工作。目前,对平稳随机振动的研究已比较完善。随机动力学是一门知识密集的学科,它与各学科关系如图1所示。

确定性动力学是研究载荷变化规律确定、参数确定、初始条件和边界条件确定的动力学系统及其运动和受力状态的学科,也可以说,是研究确定性动力系统中确定性因素和运动、受力关系的力学学科。

模糊动力学则是研究动力系统中受模糊作用力或含有模糊因素时,其运动、受力模糊行为的学科,目前还没有形成较完整的理论。

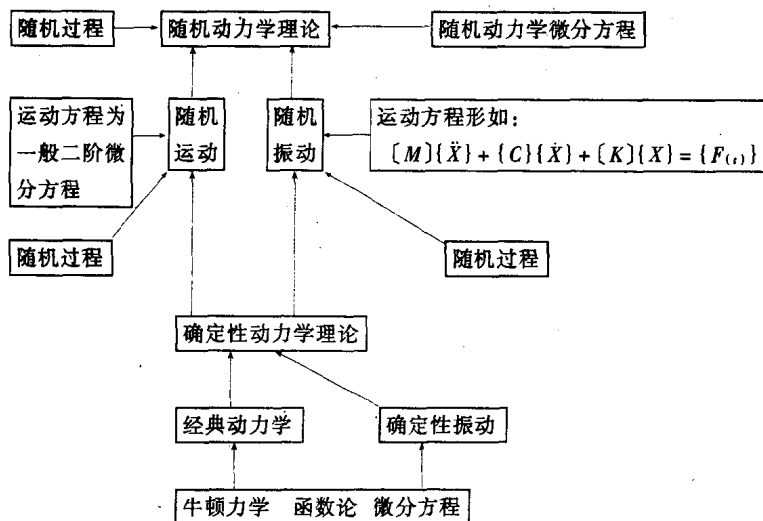


图1 随机动力学与其他各学科之间的关系

混沌动力学是研究混沌现象的学科,研究主要对象是确定性动力学中的非线性系统,是非线性动力学研究的一个专科。目前,完整的混沌动力学理论已经形成。

以上是对动力学各个分支的简单划分,实际的系统往往既存在确定性问题,又存在随机问题或模糊问题,这里不作深入探讨。

本书主要介绍随机动力学的一种分析方法,重点介绍非平稳随机动力学问题,针对多刚体动力学模型,所涉及的因素只包括确定性因素和随机因素。

三、自然因素的确定性、随机性、模糊性及其关系

要对动力学系统进行深刻分析并建立物理模型和数学模型,必然要涉及决定动力学系统运动规律的诸多因素。对影响动力学系统的纷繁的自然因素进行较为精确的划分有助于我们精确地解释和描述动力学系统的行为,使我们能够抓住主要矛盾。

自然因素一般可归为三类:确定性因素、随机因素和模糊因素。

一般说来,在确定性条件下有确定性的变化规律或变化过程,可用确定函数描述的为确定性事件。研究确定性事件所涉及的因

素为确定性因素。确定性因素主宰着确定性事件。确定性条件下所发生的不确定事件称为随机事件,包含在随机事件里面、决定着随机事件性质的诸因素称为随机因素。不确定条件下所发生的不确定事件称为模糊事件,决定着模糊事件存在的因素为模糊因素。

从确定性、随机性和模糊性三者定义来看,确定性和随机性是有条件的、有边界的,因而是相对的;而模糊性是无条件的,是绝对的。在确定的范围内(条件下),事件的随机性又是绝对的,而事件的确定性永远是相对的。无穷多个确定因素组成一个随机因素,无穷多个随机因素组成一个模糊因素,即模糊性包含随机性;随机性包含确定性。这是自然因素模糊性、随机性和确定性三者之间的关系。

确定性因素、随机因素和模糊因素三者之间有着一定的联系,但又有着一定的区别。因此,对这三种因素的研究方法不尽相同。一般说来,确定性因素可以用确定性方法来研究解决,犹如系统误差可以直接修正。而随机因素只能用概率统计性质的方法去研究解决,犹如偶然误差只能用统计方法研究一样。模糊因素只能用模糊数学方法研究解决。

自1933年苏联数学家柯尔莫哥洛夫综合前人的成果,给出了概率论的公理化结构、明确了事件、概率等基本概念以来,概率论成为一个严谨的数学分支。概率论和数理统计是研究大量同类现象所特有的一种规律——统计规律性,其目的在于根据实际观察资料和某些已知规律性去寻找和研究与之有关的一些未知规律性,并据此作出某些人们所希望得到的科学判断和预测。概率统计是研究大量同类现象的统计规律性的,当应用于动力学分析时,便产生了随机动力学学科。

人类认识自然的过程由确定性因素(具体事物)开始,到随机因素,最后过渡到模糊因素的定性定量分析,是认识史上的飞跃。从动力学的发展来看,由最初的确定性动力学(经典动力学)到随机动力学的研究,也是一个认识上的飞跃,并且这个飞跃使得人们对工程动力系统运动的可靠性进行分析、随机运动进行预测成为