

ZUOZHAN FANGZHEN SHIYAN
SHEJI YU FENXI

作战仿真实验 设计与分析

胡剑文 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国家自然科学基金资助

(70401003, 70871120)

作战仿真实验 设计与分析

胡剑文 常青 张岱 李冰 著

国防工业出版社

·北京·

国防工业出版社
(010) 68411535

图书在版编目(CIP)数据

作战仿真实验设计与分析 / 胡剑文等著. —北京:
国防工业出版社, 2010. 5

ISBN 978 - 7 - 118 - 06649 - 4

I. ①作… II. ①胡… III. ①作战模拟—计算机
仿真 IV. ①E072

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 081192 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 字数 190 千字
2010 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 25.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

序

胡剑文等同志最近完成了《作战仿真实验设计与分析》一书，我有幸先睹为快。胡剑文博士在国防科技大学攻博期间，就一直从事有关武器装备系统效能评估与实验等方面的研究，毕业后到国防大学博士后流动站继续从事相关工作，我是他的博士后合作导师之一。所以，我对他的研究工作还是比较熟悉的。虽然出站时间不到两年，但他的研究又有了长足的进步。胡剑文博士虽然跟我的时间并不很长，但他的理论思维和创新研究能力却给我留下了深刻的印象。这一次也不例外。他让我为这本书作序，我一方面深感才疏学浅不能担此大任，但另一方面我又觉得身为师长有必要向大家推介引荐。所以，所写的谈不上序，只是针对作战实验问题谈几点感想而已。

作战实验问题是一个非常复杂的问题。它既与传统科学实验关系密切，但又与传统科学实验明显不同。作战仿真实验作为作战实验的一个重要组成部分，目前已经成为进行作战实验的一种主要方法。但无论作战实验，还是作战仿真实验，仍有许多理论问题尚未解决，还需要我们进行深入的思考：

第一，作战实验与传统科学实验的差异。传统科学实验一个最重要的要求是可重复性，但作战实验从本质上讲却很难做到这一点。这是因为战争的复杂性导致战争本身是不可重复的，那么进行作战实验其结果也不可能重复，或者说不应该重复。这就从本质上对传统的实验理论提出了挑战。我们怎样去理解这种实验的可重复性或不可重复性，必须从理论上找到相应的解释。

第二,仿真实验与传统实验的差异。传统的科学实验采用的方法一切是为了得到准确无误的结论,因此为了消除各种实验误差或不确定性采取了许多方法,例如通过多次实验并采用统计方法来消除实验上的误差。但基于计算机的仿真实验,由于计算机的精确性,不管你实验多少次,只要参数不变,其结果总是一样的。仿真实验往往采用随机数来引入不确定性,但这种不确定性与传统实验是截然不同的。如何区别对待不同类型实验中各种不同的不确定性,正确地运用统计方法,也是作战仿真实验中必须要解决,或者更准确地说,是必须要认识到的问题。

第三,仿真实验带来的一些新问题。仿真实验是用模型替代部分或全部实体、环境或过程进行实验的,而最困难的就是必须要解决复杂系统的建模问题。对作战仿真我们需要的是过程还是结果?建模中如何解决“建模需要了解事物,而了解事物还需要建模”这样一个看起来像是“先有鸡还是先有蛋”的问题?如何解决替代模型的可信性问题?如何解决仿真实验结果的甄别问题,以避免用仿真系统的影响代替实际系统的影响问题等。

虽然这些问题都还在困扰我们,但研究工作仍在不断前进。首先,大家都认识到作战是可以实验的,这在20年前还根本无法想象。其次,计算机仿真为我们提供了虚拟实践的手段,为作战实验奠定了仿真实验的技术基础。再次,经过大量研究和实践,在作战仿真实验方面也已经有了长足的进步。我们并没有等到把一切都想清楚再去做,事实上那也是不可能的,而是通过不断实践去摸索深化我们的认识。尽管我们的认识仍然不足,但我们坚信我们走在了正确的道路上。正如恩格斯所言:“认识就其本性而言,或者对漫长的世代系列来说是相对的而且是逐步趋于完善的……。由于历史材料的不足,甚至永远是有缺陷的、不完善的,而谁要以真正的、不变的、最后的、终极的真理标准来衡量它,那么,他只能是证明他自己的无知和荒谬。”对作战仿真实验研究也是如此。

本书就是胡剑文博士及其同事们根据他们长期的实践,对作战仿真实验基础理论研究的阶段认识,而做出的一个阶段性的总结,重点放在了实验设计与分析方面。有效完成作战仿真实验任务的前提是正确的实验设计与分析,在仿真实验领域长期以来都是运用传统的实验设计与分析技术来指导实验。例如,运用拉丁方、均匀等实验设计手段完成实验设计,运用传统的方差分析与参数估计等数理分析手段来实现数据分析。然而,仿真实验具有特殊性,其实验设计与分析与传统的实验设计分析技术有很大的区别,具有自身的特色,其突出表现在仿真实验控制以及仿真实验的大样本智能数据分析等方面。这些方面既是目前仿真实验设计与分析理论的特色内容,也是研究的薄弱环节。在书中,作者构造了以实验目标、实验模式、实验系统环境为维度的三维理论框架,并在此理论框架的基础上,论述了实验设计模式、实验控制方法、实验数据分析方法等内容,并详细论述了各种实验模式如何应用于实际作战问题的实验设计及其分析。实验控制是本书的一大特色,作者提出了多种实验控制算法分别用于多类实验目标,具有创新性和很好的参考价值。

作战仿真实验理论的研究在我军而言目前还是一个薄弱环节,许多研究还局限在概念阐释、模仿外军的阶段。我相信,本书的出版,能够大大促进我军作战仿真实验理论研究和发

胡晓峰
2009年9月

前 言

在当今信息时代,军事领域正酝酿着一场深刻的革命。对于复杂的军事问题,运用严谨的科学与工程的方法进行深入细致的研究已成为信息化条件下现代战争的必然要求。可以预见,军事科学与工程必将成为一门蓬勃发展的新兴学科。实验方法是近代科学与工程技术的基石,可以说没有实验就没有近代科学。军事科学与工程的发展同样离不开实验。然而,由于军事活动的高度复杂性,在军事领域完成有效的实验活动,难度非常大。它不仅比自然科学领域的实验活动要困难,而且也难于社会科学其他领域的实验活动(如经济学与心理学)。

计算机仿真实验是指设定相关的实验条件,建立并运行仿真模型,获取实验结果与分析实验结果的一种活动。它是通过计算机程序来模拟复杂实际问题的一种实验方式,是信息技术发展到一定阶段的产物,也是方法论上的一场革命。计算机仿真实验由于其廉价、安全与良好的可控性,因此,在军事领域得到了广泛的应用,取得了很好的效果。

显然,实验设计与分析方法是作战仿真实验理论中最核心的内容,其关系到整个实验的成败。本书主要探讨了作战仿真实验设计与分析的相关技术问题。首先,建立了作战仿真实验设计与分析的基本理论框架,其中包括实验模式、实验目标、实验模块等内容。然后,各章逐步展开论述实验框架中的主要内容。包括了 2^k 、 N^k 等实验设计模式,实验控制方法,实验结果的分析方法等。最后,以作战仿真实验的实例来演示如何运用本书所探讨研究的

实验设计与分析方法来解决实际问题。

第1章介绍了作战实验、作战仿真实验以及作战仿真实验的一些基本概念,并以一个典型作战仿真实验实例展开论述了作战仿真实验的基本过程。最后,提出了作战仿真实验的基本理论框架。后续各章基于此框架逐步展开论述。第2章介绍了实验设计中最基础的 2^k 实验模式的相关理论及其在作战仿真实验中的应用。第3章介绍了经典实验设计方法中的正交设计方法,拉丁方实验设计方法,以及均匀设计方法及其在作战仿真实验中的应用。第4章论述了如何通过实验控制实现寻优、寻需、因子筛选、区域分析、并行实验等基本方法及其应用。第5章论述了如何运用数理统计工具以及智能数据分析工具来从实验结果中发掘有用信息以辅助决策。第6章运用三个典型概念上的案例,来说明仿真实验设计与分析技术如何运用到实际作战实验中以解决重大决策问题。其中,胡剑文负责第1、4、5、6章的撰写,常青负责第2、3章的撰写,张岱撰写了4.4节与4.5节部分内容,李冰撰写了5.2节部分内容,董小龙撰写了6.1节部分内容。全书由胡剑文统稿。

本书在撰写过程中得了许多同行和专家的鼓励和帮助,著名军事运筹专家胡晓峰教授在百忙之中为本书作序,给予了极大的鼓励。本书还引用了不少文献,从中汲取了丰富的营养,让作者深深感受到只有站在巨人肩上才能看得更远。另外,国家自然科学基金委员会多年来对我们这几位年轻研究者给予了连续的资助。在此一并表示深深的感谢!

由于作战仿真实验设计与分析是一个很新的领域,加之理论基础与专业知识有限,书中疏漏之处在所难免,敬请广大读者不吝赐教。

作者

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 作战实验与作战仿真实验 | 1 |
| 1.2 作战仿真实验的一个实例 | 4 |
| 1.3 作战仿真实验的设计与分析 | 10 |
| 1.3.1 实验目标 | 11 |
| 1.3.2 实验模式 | 12 |
| 1.3.3 实验环境模块 | 13 |
| 第 2 章 2^k 因子实验设计 | 15 |
| 2.1 因子设计的一般概念 | 15 |
| 2.1.1 基本概念 | 15 |
| 2.1.2 主效应和交互效应 | 16 |
| 2.1.3 因子设计的优点 | 18 |
| 2.2 2^k 因子设计 | 19 |
| 2.2.1 2^k 因子设计相关定义和表述 | 19 |
| 2.2.2 2^k 因子设计的主效应与交互效应的计算 | 20 |
| 2.3 2^{k-p} 分式因子设计 | 29 |
| 2.3.1 2^k 因子设计的二分之一分式设计 | 30 |
| 2.3.2 分辨率 | 34 |
| 2.3.3 2^{k-p} 分式因子设计 | 35 |
| 第 3 章 N^k 抽样实验设计 | 40 |
| 3.1 正交抽样 | 40 |

| | | |
|------------|--------------------------------|------------|
| 3.1.1 | 多因子实验与正交表 | 40 |
| 3.1.2 | 无交互作用情况下的正交实验设计 | 44 |
| 3.1.3 | 有交互作用情况下的正交实验设计 | 58 |
| 3.2 | 拉丁方抽样 | 68 |
| 3.2.1 | 拉丁方 | 68 |
| 3.2.2 | 拉丁方实验设计及分析 | 69 |
| 3.2.3 | 正交拉丁方实验设计及分析 | 75 |
| 3.3 | 均匀抽样 | 78 |
| 3.3.1 | 均匀设计与均匀设计表 | 79 |
| 3.3.2 | 均匀设计实验及其数据分析 | 82 |
| 第4章 | 动态仿真实验控制 | 84 |
| 4.1 | 寻优仿真实验控制 | 84 |
| 4.1.1 | 基于最速上升法的仿真实验寻优 | 85 |
| 4.1.2 | 基于全局优化策略的仿真实验寻优 | 93 |
| 4.2 | 寻需探索性仿真实验控制 | 101 |
| 4.2.1 | 连续型能力指标空间仿真实验寻需控制: 获取能力需求空间 | 104 |
| 4.2.2 | 离散能力空间的寻需实验控制 | 109 |
| 4.3 | 实验因子筛选仿真实验控制 | 113 |
| 4.4 | 实验因子空间敏感区域分析实验控制 | 117 |
| 4.5 | 并行仿真实验控制 | 121 |
| 第5章 | 仿真实验结果的分析 | 127 |
| 5.1 | 仿真结果的统计分析 | 127 |
| 5.1.1 | 随机仿真输出结果的统计量估算 | 127 |
| 5.1.2 | 仿真结果的比较分析 | 130 |
| 5.2 | 仿真结果的 OLAP 与数据挖掘分析 | 135 |

| | | |
|--------------|-------------------------|------------|
| 5.2.1 | OLAP 分析 | 136 |
| 5.2.2 | 数据挖掘规则发现功能 | 140 |
| 5.3 | 仿真结果的克里格回归预测分析 | 147 |
| 5.4 | 寻需仿真实验中的支撑向量机方法 | 151 |
| 第 6 章 | 作战仿真实验设计与分析案例研究 | 157 |
| 6.1 | 超视距空战仿真实验案例 | 157 |
| 6.1.1 | 超视距空战效能模型的建立 | 158 |
| 6.1.2 | 仿真模型的设置和关键能力指标的筛选 | 167 |
| 6.1.3 | 离散能力空间指标仿真实验分析 | 170 |
| 6.1.4 | 仿真实验结果的 OLAP 分析 | 179 |
| 6.1.5 | 仿真实验结果的克里格模型预测分析 | 183 |
| 6.1.6 | 连续能力指标空间仿真实验分析 | 185 |
| 6.2 | 概念上的精确制导武器体系仿真实验需求论证 | 190 |
| 6.2.1 | 问题背景 | 190 |
| 6.2.2 | 实验环境的结构 | 192 |
| 6.2.3 | 基于多维数据分析技术的 能力指标分析结果 | 193 |
| 6.3 | 某军事政治危机下战略决策仿真实验研究 | 200 |
| 6.3.1 | 问题与背景 | 200 |
| 6.3.2 | 过程与方法 | 200 |
| | 参考文献 | 212 |

第1章 绪论

1.1 作战实验与作战仿真实验

韦伯斯特的《新世界词典》中的实验,是指“为发现求知事物或验证已知事物而进行的一切行动或过程”。在自然科学领域,实验是探索自然奥秘的一把钥匙,大量的新发现与新规律都是从实验当中获得或者在实验中得到验证。现代社会科学的研究也广泛运用了实验的手段。例如,对于复杂的社会问题如社会经济问题、社会变革问题、心理学问题等可以运用实验方法加以研究,这一研究方法产生了一系列重大成果。

军事科学既有自然科学的特点又有社会科学的特点。对于武器装备系统的研究属于自然科学范畴,而对于人与人之间的协作与对抗的研究则属于社会科学范畴。科学实验概念和方法在军事领域的应用为军事问题研究提供了新的思路和方法。近年来,国际战略环境和军事斗争形势已变得空前复杂,战略战役决策科学性的要求更是达到了前所未有的程度。作战实验逐渐担负起未来战争设计、创新理论研究、创新体制编制、创新指挥人才培养、创新装备体系发展等重要功能^①,而这些功能的实现,必须依托完善的作战实验体系、科学的实验方法、先进的实验技术作为支撑。可以说作战实验方法和技术正在为军事科学研究提供了一条新的、有效的探索之路。

世界上较早提出作战实验思想的是美国运筹学者莫尔斯(P. M. Morse)和金布尔(G. E. Kimball)。1946年,他们在一个题

^① 马健,加速推进空军作战实验室建设,《空军军事学术》2009年第2期。

为《运筹方法》的研究报告中提出了作战实验的概念,认为“作战实验是一个新思想,能够产生重要影响。只要恰当地进行作战实验,就能使一个国家的军事力量在和平时期跟上新技术的发展。……但若把这样的作战实验当成普通的战术演习,那将是毫无用处的。作战实验必须由专家按照科学实验的要求进行设计和实施。”他们认为作战实验不是普通的战术演习,作战实验更强调对作战问题的科学研究。

目前,美国和北约已将“作战实验”一词纳入军语。美国国防部有关机构的定义是:“作战实验(War-Fighting Experimentation)是支持作战概念和作战能力发展的科学实验活动。”与之相近的基本用语,主要有“联合实验”、“国防实验”、“军事实验”等。“联合实验”是作战实验的最高层次,其定义是“运用科学实验方法评估某种设想或假设的联合作战概念组成要素的有效性,以确认其是否引起实际军事效果的改变。”国防实验和军事实验与作战实验是同义词,主要强调作战实验不仅限于研究正规作战问题,也包括反恐作战和非战争行动。国外军事专家认为作战实验本质上就是发现因果关系,并利用实验得出的因果关系进行决策。

我国学者对作战实验的定义更为具体,例如,文献[1]把作战实验定义为“根据实验目的,有计划地改变军事力量、战法、作战环境等条件,考察各种条件下的作战进程和结局,从而深入认识战争规律和指导规律的研究活动。”

作战实验与其他自然科学和社会科学的实验在本质上一致的,它是一种研究问题的科学方法论。历史上,很多著名的作战理论都是通过反复的作战实验而形成与完善,最后才投入到作战实践当中。例如,著名的潜艇“狼群”战术、“闪击战理论”的提出与发展也是基于反复实验的基础上的,最后在实战中取得非常好的效果。随着信息技术的发展,作战实验手段更加多样化,各种手段的综合运用,使得作战实验效果更佳,作战问题的研究也越来越离不开实验的手段。

现代作战实验可以分成以下几类,如图 1.1 所示。其中一类是实兵的,另一类是非实兵的。实兵的是指基本以实际的作战部

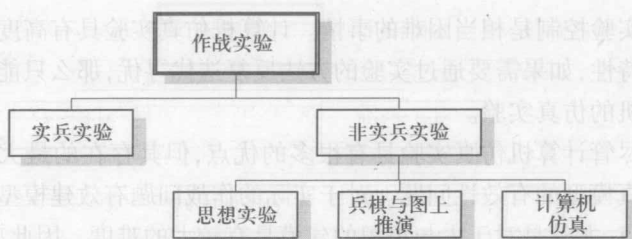


图 1.1 作战实验的分类

队与武器装备为主体参与实验,部分要素用替代品(如敌军以及一些使用代价过高的武器装备等),这种实验方式与实战场景的相似度很高,但其组织比较困难,代价高,难以反复的实验分析研究。另一类是非实兵形式,这类实验没有实兵参与,只是利用一些模拟装置来进行实验推演。其中包括思想实验、兵棋与图上推演以及计算机仿真实验等。思想实验是通过人脑的逻辑推演来完成实验探索;兵棋与图上推演则是利用相关辅助工具的实验探索。计算机仿真实验是指设定相关的实验条件,建立仿真模型,运行仿真模型,获取实验结果与分析实验结果的一种活动。它是通过计算机程序来模拟复杂实际问题的一种实验方式,是信息技术发展到一定阶段的产物,也是方法论上的一场革命。计算机仿真实验技术在作战领域得到了广泛的应用,例如,作战方案的选择,武器装备的论证,指挥控制体制的优化等领域都离不开仿真实验技术。计算机仿真实验相对于其他实验方式有以下几个突出的优点。

(1) 灵活性。计算机建模技术便于实验分析人员更加高效灵活的设定实验问题。对于大规模的作战问题是难以采用实物或半实物的实验方式的,计算机仿真是一个很好的办法。它可以灵活地设定复杂的场景,反复实验,以达到实验目标。

(2) 易重复性。计算机仿真实验的另一个优势是可重复性。可以在计算能力允许的条件下,进行反复实验,获取大量的实验样本数据,可以大大提高仿真实验结果的信噪比,使得结果更可信。

(3) 高可控性。实际的实验过程执行起来比较繁琐,完成复

杂的实验控制是相当困难的事情。计算机仿真实验具有高度自动化的特性,如果需要通过实验的方法反复迭代寻优,那么只能基于计算机的仿真实验。

尽管计算机仿真实验具有很多的优点,但其存在的最大问题是仿真模型的有效性。对于实际的作战问题有效建模型是一个难点,尤其是对于人与组织的建模具有较大的难度。因此,计算机仿真实验手段更适合于在军事科学中的某些自然科学特征明显的问题类型,如武器装备论证、大型作战计划分析等领域。本书主要涉及的是计算机仿真实验的内容。

1.2 作战仿真实验的一个实例

下面用一个简例来描述作战仿真实验问题,这是一个多枚导弹对敌方某不规则面状目标的打击效果仿真实验。多枚导弹对不规则目标的打击的毁伤面积计算是一个运筹学中的典型问题。对于这类问题用常规的解析计算方法是难以解决的,因此,只能采用蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真的方法。多枚导弹打击敌方不规则目标,其毁伤面与导弹的三个要素(实验因子)紧密相关:①导弹的数量;②单枚导弹的圆概率偏差(CEP);③单枚导弹的威力半径。

在本例中,可以通过仿真实验的方法研究以下几个问题。

- (1) 发现问题中导弹数量,精度,威力对目标毁伤面积的定量关系。
- (2) 寻找一种合适的兵力运用方案,使得能够有效地毁伤敌方目标,同时尽可能减少附带的误伤。
- (3) 指导与启示导弹武器装备的规划论证。

如图 1.2 所示,假设我们用导弹打击敌方某一个重点目标,尽可能对敌方重点目标毁伤,即追求尽可能大的毁伤面积。另外,在敌方目标周围,有两个民用设施:一个是公园;一个是医院。在实际作战中,应尽量减少对这两个民用设施的损伤。目标的地理位置如图 1.2 所示。

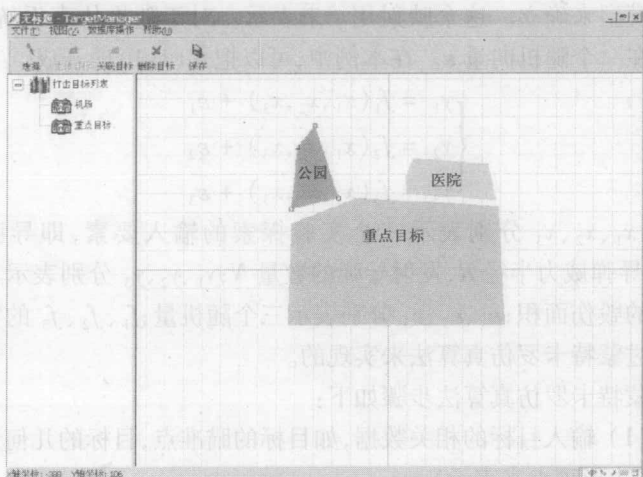


图 1.2 敌方目标示意图

用仿真方法求解毁伤面积的基本思路:根据导弹的 CEP 随机产生常规导弹的落点,然后根据产生的毁伤圆,在其内产生一定均匀分布的蒙特卡罗随机点,通过点数之比来计算面积之比,最后计算出毁伤面积。模型的输入主要内容如下。

- (1) 目标外形顶点坐标(设为定值,简化为多边形),并设导弹的瞄准点在(0,0),以此为参照画多边形。
- (2) 导弹的 CEP。
- (3) 导弹威力半径 R 。
- (4) 发射导弹的数量 N 。

模型的输出主要是相应数量的导弹击毁该目标的毁伤面积。可以把一个仿真实验问题形式化描述为

$$Y = f(X) + \epsilon \quad (1.1)$$

式中: Y 为输出结果向量; X 为实验分析向量; ϵ 为随机向量; f 为仿真模型实现映射。

式(1.1)描述了一个仿真实验系统的基本关系。其中 Y 是仿真的输出结果, X 是输入的可控变量集。 X 与 Y 之间的关系通过

仿真模型来确立。这个映射用 f 来表示。对于随机仿真系统,则还存在一个随机向量 ε 。在本例中,可以把式(1.1)展开成

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3) + \varepsilon_1 \\ y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3) + \varepsilon_2 \\ y_3 = f_3(x_1, x_2, x_3) + \varepsilon_3 \end{cases}$$

式中: x_1, x_2, x_3 分别表示三个实验探索的输入要素,即导弹的 CEP, 导弹威力半径 R , 发射导弹的数量 N ; y_1, y_2, y_3 分别表示三个目标的毁伤面积; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别表示三个随机量; f_1, f_2, f_3 的实现是通过蒙特卡罗仿真算法来实现的。

蒙特卡罗仿真算法步骤如下:

(1) 输入目标的相关数据,如目标的瞄准点,目标的几何形状(用多边形顶点来表示)。

(2) 输入导弹相关数据。如导弹发射数量,综合考虑导弹系统误差与随机误差的 CEP 值,每枚导弹的威力半径。

(3) 根据导弹攻击的瞄准点与 CEP,按照正态分布随机产生导弹落点。其中正态分布的方差 $\sigma = 0.8493 \cdot \text{CEP}$ 。

(4) 根据每个导弹的落点及其威力半径确定相应的毁伤圆,在此圆中均匀产生 M 个点(为了保持一定精度 M 要求足够大),因为导弹数量为 N ,则一共产生了 $M \times N$ 个点。

(5) 由于目标是不规则图形,因此,很难用解析方法判断相交圆的面积。通过判断第(4)步产生的每个点分布情况,计算落入目标区域每个点的重叠状况。假设落入目标区域且属于一共 i 个毁伤圆内点的个数是 Total_i (Total_i 表示产生的点落入目标区域,而且落入了一共 i 个圆中的个数)。在本算法中采用像素判断法,如果与目标填充像素一样,则判断此点在目标区域内。

(6) 计算毁伤面积 $S = \pi R^2 \frac{\sum_{i=1}^N \text{total}_i / i}{M}$ 。

(7) 从第(3)步开始重复计算,最后根据每次计算出的毁伤面积,计算平均值。