随机区间理论及其军事应用

Stochastic Interval Theory and its Military Applications

刁联旺 于永生 贺成龙 王晓璇 著

国防工业出版社
National Defense Industry Press

需要全本请访问 www.ertongbook.com

随机区间理论及其军事应用

习联旺　于永生　贺成龙　王晓璇　著

中国科学技术大学 图书馆藏

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

随机区间理论及其军事应用 / 刁联旺等著. —北京：国防工业出版社,2013.2

ISBN 978-7-118-08628-7

Ⅰ. ①随... Ⅱ. ①刁... Ⅲ. ①区间估计-应用-军事-评估 Ⅳ. ①E0-059

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 023388 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230　1/32　**印张** 5½　**字数** 144 千字

2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷　**印数** 1—2500 册　**定价** 26.00 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

序　言

进入21世纪，随着计算机、通信、传感器等科学技术的迅速发展，现代高技术局部战争的状态已发展成为陆、海、空、天、电磁五维一体的全面对抗。军事效能评估需要考虑的因素越来越多，评估的复杂度也越来越大，如何定量、客观、准确地对军事效能进行评估已成为当前军事领域研究的热点之一。

在处理军事效能评估中的实际问题时，由于涉及的评价指标自身的综合性、复杂性和不确定性以及评价者认识的局限性，决策者往往很难给出评价指标的精确估计值，更容易给出的是带有评价者主观偏好或置信度的评价指标估计值的上界和下界，即用随机区间数的形式表示决策信息。可见，研究带有随机区间数评价值的多属性决策问题具有强烈的现实和军事背景，具有重大的理论意义和应用价值。

事实上，在某些情况下如果用（随机）区间数来分析判断问题，可能更容易接近复杂而不确定的客观实际情况，也更符合人的（模糊）思维习惯。究其原因在于：①主观上，对于同一指标，相对于点估计而言，人们更容易给出指标取值的区间估计（范围）；②客观上，就解决问题的效果而言，决策者针对多属性（指标）点估计而制定的问题解决方案，往往不如针对多属性（指标）区间估计而设计的解决方案更可靠、更稳健。

目前，带有（不确定性）区间数的多属性决策问题的研究已取得不少研究成果。但总体上讲，基于区间数的多属性决策方法仍然存在严重不足，主要表现在：①大多数决策方法未考虑评价多属性（指标）在区间上取值可能性大小（如概率）分布的实际情况，即置信度或主观偏好，而只是利用区间端点的信息（如区间长度、端点差等）对区间数进

行大小比较;②即便少数考虑属性在区间上取值的概率分布,为了处理上的方便,仅仅考虑均匀、正态分布或只用分布的均值和方差进行区间数大小比较。

因此,本书以多属性(指标)军事效能(以作战方案评估、威胁估计和战斗能力评估为例)综合评估为研究对象,建立了随机区间数的综合评估理论框架,该理论框架首先定义了随机区间数大小比较的可能度,然后结合 Monte Carlo 方法产生相关随机变量的抽样序列,模拟实际系统的概率统计模型,给出问题数值解的渐近统计估计值,以解决可能度的计算问题。这种解决基于随机区间数的多属性决策问题的思路能对建立的数学模型进行多次试验,并以此为基础对试验数据作统计处理,得出被研究过程的特征,能够从概率意义上确定解决问题的近似程度,因此提高了评估结果的客观性和准确性,给军事决策这种具有高风险的决策过程带来的直接影响是提高了决策的可靠性和稳健性。

本书对随机区间数理论和方法的探索既有学术研究价值,又为解决军事决策与效能评估技术领域的相关问题提供一条解决之道。本书适合致力于决策分析、信息融合、作战指挥决策和作战效能评估等技术领域的研究工作者,以提供借鉴和启发思维。

本书章节安排如下:

第一章是绪论。概述多属性综合评价、决策分析领域国内外研究现状,重点介绍基于区间数的多属性决策理论和方法的研究现状和发展方向,阐述了随机区间数理论和方法的主要研究内容。

第二章是相关理论基础。重点介绍了构建随机区间数的综合评估方法所需要的理论基础,包括随机数学、误差与不确定度,Monte Carlo 方法等。

第三章是多指标随机区间数综合评价方法研究。主要研究现有区间数理论与方法存在的不足,以及随机区间数的概念、随机区间比较的可能度及其计算方法、多指标随机区间数综合评估方法等。

第四章是作战行动方案评估的随机区间数方法。主要内容包括

需要全本请访问 www.ertongbook.com

作战方案评估的基本层次模型框架，要素分析及其权重计算等，并用实例说明了该方法的实施步骤和过程。

第五章是目标威胁估计的随机区间数方法。主要研究内容包括目标威胁要素提取、权重分析，以及基于随机区间数的目标威胁评估方法，并给出了应用实例。

第六章是部队作战能力评估的随机区间数方法。主要研究内容包括部队战斗力评估的要素以及层次结构模型，给出了基于随机区间数的部队战斗力评估的正态近似方法，并通过应用实例说明了该方法的实施步骤和过程。

本书所述研究成果得到了总参院校局军事理论预研项目和总装“十五”，“十一五”军事电子预研项目的资助。编写工作得到了中国电子科技集团第28研究所、装甲兵学院及国防工业出版社的大力支持，信息系统工程重点实验室毛少杰研究员仔细审阅了本书初稿，并提出了许多宝贵的修改和指导性意见，许阳、张桂林、裘海蓉、徐欣、朱霞等同志也给予了大力帮助。另外，本书作者之一刁联旺博士在信息系统工程重点实验室（中国电子科技集团第28研究所部分）做博士后期间，得到了赵宗贵研究员的悉心指导，受益匪浅。赵鲁宁、汤启超、刘洋、刘飞等同志也对本书做出了一定贡献。在此一并表示衷心感谢。最后，本书编写过程中还参阅、摘引了国内外许多同行的论文、著作，在此谨致谢意。

由于作者理论水平有限以及研究工作的局限性，特别是不确定性信息处理理论本身正处在不断发展之中，书中难免存在一些不足之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2012年11月

目　录

第一章　绪论 …… 1

第一节　研究现状 …… 1

第二节　存在问题 …… 2

第三节　主要工作 …… 4

第二章　相关理论基础 …… 6

第一节　随机数学基础 …… 6

一、一维随机变量及其分布 …… 6

二、离散型随机变量及其分布 …… 8

三、连续型随机变量及其分布密度 …… 10

四、一维随机变量函数的分布 …… 13

五、大数定律与中心极限定理 …… 14

第二节　不确定度的基本理论 …… 18

一、基本概念 …… 18

二、测量误差与不确定度的关系 …… 21

三、不确定度的评定 …… 22

第三节　蒙特卡罗方法 …… 24

一、蒙特卡罗方法概述 …… 24

二、蒙特卡罗方法的收敛性与误差 …… 27

三、蒙特卡罗方法的特点 …… 29

四、蒙特卡罗方法的主要应用范围 …… 32

参考文献 …… 32

第三章　多指标随机区间综合评价方法 …… 33

第一节　问题提出 …… 33

第二节　现有区间数比较方法回顾 …… 34
一、区间数的概念与运算 …… 35
二、区间数比较的可能度方法 …… 36
三、区间数比较的均匀分布方法 …… 37
四、区间数比较的矩方法 …… 38
第三节　区间数比较的随机变量比较法 …… 39
第四节　不确定性信息的随机区间表示 …… 43
一、不确定性信息的表示 …… 43
二、随机区间数法量化表示 …… 47
三、随机区间数法与其他方法的关系 …… 48
四、几种常用的随机区间数分布 …… 50
第五节　多属性决策的随机区间比较方法研究 …… 52
一、权重为确定值情形 …… 53
二、权重为区间值情形 …… 54
第六节　小结 …… 55
参考文献 …… 55
第四章　作战行动方案评估的随机区间方法 …… 57
第一节　作战行动方案构成要素分析 …… 58
一、作战企图 …… 58
二、作战任务 …… 58
三、作战时间 …… 58
四、作战空间 …… 59
五、兵力部署 …… 59
六、作战方法 …… 60
七、作战协调 …… 60
第二节　装甲团作战行动方案评估指标体系的
构建方法研究 …… 61
一、装甲团作战行动方案的可行性 …… 63
二、装甲团作战行动方案的可接受性 …… 66

三、装甲团作战行动方案的适应性 …… 66
第三节 装甲团作战行动方案的随机区间数评估方法研究 … 69
一、装甲团作战行动方案可行性评估研究 …… 69
二、装甲团作战行动方案的可接受性的评估 …… 77
三、装甲团作战行动方案的适应性的评估 …… 79
四、装甲团作战行动方案综合评估 …… 84
第四节 实例分析 …… 84
一、想定基本情况 …… 84
二、敌方我方作战行动方案 …… 86
三、作战行动方案评估 …… 90
第五节 基于矩阵对策的作战行动方案选优 …… 96
一、应用矩阵优先作战行动方案的步骤 …… 96
二、一个例子 …… 97
第六节 小结 …… 99
参考文献 …… 99
第五章 目标威胁估计的随机区间方法 …… 100
第一节 目标威胁要素 …… 100
一、空中目标威胁估计因素的识别 …… 101
二、海上目标威胁估计因素的识别 …… 102
三、陆地目标威胁估计因素的识别 …… 103
第二节 确定目标威胁要素的权重 …… 103
一、相邻指标两两比较法确定权重 …… 104
二、统计秩和法确定权重 …… 107
三、统计分布法确定权重 …… 107
第三节 目标威胁估计的随机方法研究 …… 108
一、装甲目标威胁要素的威胁效用函数 …… 109
二、目标威胁要素的权重 …… 111
三、计算实例 …… 111
第四节 小结 …… 115

参考文献 …… 115
第六章　部队作战能力评估的随机区间方法 …… 117
第一节　部队作战能力评估的分析 …… 117
一、部队作战能力评估的分类 …… 117
二、部队作战能力评估的特点 …… 119
三、部队作战能力评估的步骤 …… 120
第二节　部队作战能力评估的指标体系 …… 124
一、部队与武器子系统指标体系 …… 125
二、信息管理子系统 …… 129
三、指挥决策子系统指标体系 …… 131
四、综合保障子系统指标体系 …… 132
第三节　部队作战能力实时评估的随机区间数方法研究 …… 134
一、常用部队作战能力评估方法述评 …… 136
二、部队整体作战能力评估研究 …… 139
三、部队与武器子系统作战能力评估研究 …… 140
四、信息管理子系统 …… 145
五、指挥决策子系统作战能力评估研究 …… 148
六、综合保障子系统作战能力评估研究 …… 152
七、部队作战能力实时评估的
正态随机区间数近似方法 …… 158
第四节　应用实例—陆军合成师作战能力评估 …… 162
参考文献 …… 165

第一章　绪　论

多属性决策或综合评价，是指在考虑多个属性或指标的情况下，选择最优备选方案或进行方案排序的决策问题，它是现代决策科学的一个重要组成部分。它的理论和方法在工程设计、技术、经济、管理和军事等诸多领域中都有广泛的应用，研究多属性决策理论和方法，具有很重要的理论意义和较高的实际应用价值。

第一节　研究现状

多属性决策或综合评价最基本的目的，是尽可能按照所研究问题的实际状况和水平来描述、刻画被评价对象的相对地位。如何使评价结果能够客观公正、全面完整地反映实际情况，如何提高综合评价的科学性和可信度等诸多问题，一直是该研究领域中值得深入研究的问题。近年来，随着计算机技术的飞速发展，综合评价的思想也日益渗入社会生活、科学技术和军事领域的各个方面，许多学者在综合评价理论上，充分发挥新学科、新理论、新方法以及交叉学科的优势，出现了大量的新理论、新方法用以解决各个不同领域中的多指标综合评价问题，为实现综合评价结果的科学化探索一些新的思路。

从20世纪80年代开始，许多学者在理论层面对综合评价理论和方法进行了系统的研究和探索，国内一些有影响力的专著逐渐问世，如胡永宏的《综合评价方法》(2000)、苏为华的《多指标综合评价理论与方法研究》(2002)、郭亚军的《综合评价理论与方法》(2002)、秦寿康等人的《综合评价原理与应用》(2003)、徐泽水等人的《不确定多属性决策方法及应用》(2004)。这些学术著作都对综合评价的基本理论

需要全本请访问 www.ertongbook.com

问题进行了总结和归纳。随着决策学、系统工程、管理科学与工程等研究领域的众多专家研究工作的开展，大量的新方法不断涌现，如神经网络、数据包络分析、灰色系统、层次分析法、模糊数学、区间数理论等在综合评价中被广泛运用。

胡启洲和张卫华合著的《区间数理论的研究及其应用》(2010)研究了二元区间数和三元区间数的基本定义、运算法则、排序关系，建立了时序灰色关联决策模型、方案偏好标度模型、权重未知二元区间数决策模型、多指标余弦决策模型、基于物元分析的理想区间模型，以及基于三元区间数的投影排序模型、理想决策模型、风险动态模型、综合评判模型等，丰富了区间数理论的内容，完善了多属性决策理论。

总之，综合评价理论经过多年的发展，其研究体系基本形成，评价方法也实现了多学科、多领域的交叉与融合。但仍然存在一些制约综合评价科学化的因素。

第二节　存在问题

一些学者指出，制约综合评价科学化的因素除了制度层面的原因外，还有单一化现象的存在。所谓单一化，是指采取单一的技术手段对综合评价的一个或几个步骤进行处理。综合评价技术单一化现象所涉及的范围较广，包括评价主体、评价方法、评价的层次结构、评价的时间维度、评价的数据表现形式等多个方面。

单一化现象的出现对综合评价的合理应用产生了很大的限制，它忽视了综合评价过程中部分有效信息，削弱了综合评价的“效力”。需要指出的是，在传统的多指标综合评价中，评价指标原始数据、指标权数、评价参数、评价结果等通常是以点值的形式表现的。相应地，综合评价模型与方法也大多是基于这种“点值”形式的统计数据进行设计的。但从综合评价实践活动来看，无论是评价指标原始数据，还是评价权数与有关参数，都更可能是以置信区间——随机区间数的形式呈现的，甚至可以说，这种置信区间形式的数据表达格式更加符合综合评价实际。

本文讨论的主要是，在评价数据结构从点值情况变换为置信区间数情形下的综合评价问题，即随机区间数综合评价问题。虽然已有部分文献在数据表现形式不同的情况下，对综合评价问题进行了讨论，其中也有一些应用层面的文献已经涉及到了随机区间数综合评价的思想。但这些成果十分零散，不成体系，更缺乏整体上对随机区间数综合评价思路的研究。这也正是本书所要探讨的主题。

众所周知，综合评价是通过对研究对象（社会经济现象和军事活动）的多个数量方面的表现进行抽象和概括，以定量的形式评判研究对象的综合优劣程度的一种统计分析方法。前述的评价主体单一化现象对综合评价活动的合理性、科学性都造成了极大的弱化作用。因此，针对评价数据的单一化现象而提出的置信区间综合评价思路，应在综合评价理论的基础上对现有的方法、技术进行整合与创新，以实现综合评价技术的科学化。

将传统综合评价技术中的点值数据扩展为随机区间数，发展这种基于随机区间数的综合评价技术和方法，有着广泛的应用领域和应用前景。这种扩展的意义主要体现在两个方面。

（1）区间形式的数据表达格式更加符合综合评价的实际情况。这一点可以从数据的采集工作、数据的信息量以及评价数据的量化三个角度进行理解和分析。

第一，原始数据采集工作的非全面性决定了原始数据表达方式的置信区间特性。在实际应用中，评价指标体系中不少指标是基于概率抽样的结果，因此，这些评价指标最科学的取值方式应该是在一定置信水平之下的估计区间，而不应该是某一个点估计值，区间估计与点估计值所包含的统计评价信息量是完全不同的。

第二，原始数据信息的不确定性、评价参数信息的不充分性也要求数据表达格式的区间化。有一种观点认为，即使不采用概率抽样，社会生活、科学技术和军事领域中大量现象的高度复杂性也会使许多统计指标的“真值”永远无法获得。无论是指标的主观性观点，还是指标的不确定性观点，都表明了获得的观测值与真值之间总存在着一定

程度的误差，其来源是多方面的（有代表性误差与非代表性误差之分）。测量对象信息的不确定性意味着存在“信息贫化”，而这正是“灰数”存在的基础，区间是灰信息表达的基本方式之一。

第三，基于主观评分的指标、原始数据中的质度变量（具有程度差异的定性变量）以及指标权重的模糊性也要求量化过程与量化结果以区间方式表达。统计作为认识主体的人对于客体——社会生活、科学技术和军事领域中现象数量规律性的一种反映活动，它不仅要反映客体间的差异变化，还要反映主体间认识的差异程度。主观评估的指标与可量化的定性指标通常是综合评价指标体系中不可或缺的特色性指标，一般可采用特定方法（如直接打分、模糊统计或 AHP 等）进行定量化。用随机区间数方式表述量化结果，不仅可以表示人们的主观判断的偏好，而且可以表示判断的不确定性。显然，置信区间形式的表达更加符合人们主观判断的非精确性。

（2）综合评价是一个价值判断的认识过程，其真理性是相对的，或者说是“有限真理”，因此综合评价结果的合理性也是有条件的，是局限于某一个范围之内“相对合理”。对于一个综合评价体系而言，提供一个区间方式表达的评价结果在许多场合比提供一个点值的评价结果更加令人信服，更为人们所接受，当然也显得更加公平合理。

鉴于此，在综合评价活动中引入随机区间数格式的数据，研究在这种数据格式条件下的综合评价技术是很有理论意义的，也是综合评价实践的迫切需求。

第三节　主要工作

从目前所掌握的资料来看，虽然用一个区间来表示数据信息的方式，在灰色系统理论、模糊集理论中有所提及，有部分文献也曾讨论过基于区间信息的数学方法（未确知数学）与决策过程部分环节的区间信息处理方法问题，但从综合评价理论的角度来看，缺乏从综合评价全部要素的区间化角度展开研究，缺乏从区间数的统计分布角度入手

探讨区间数在综合评价过程中的量化与处理。因此，在借鉴有关研究成果的同时，还需要进行创新。根据综合评价技术的基本构件和步骤，从全局上和阶段上对相关问题进行深入研究，科学、有效地实现将随机区间数嵌入到传统综合评价技术中去将随机区间数的数据形式贯穿综合评价的全过程；建立相对较为完善的随机区间数综合评价技术。为此，将讨论以下几个主要问题。

（1）随机区间数综合评价的内涵、理论基础以及与相关概念，并讨论它与其他相关理论的区别与联系。

（2）随机区间数综合评价问题中指标权重问题，从指标权重的概念出发，讨论了权重的确定方法，特别是对群组条件下权重的确定方法，以及构造随机区间指标权重的可行性。

（3）随机区间数的排序问题，重点分析了概率优势法以及正态分布随机区间数的排序方法。

（4）基于随机区间数的多指标综合评价问题，重点研究基于加权和综合评价模型的计算问题。

（5）随机区间数综合评价方法的军事应用问题，介绍了威胁估计、作战方案评估、作战能力评估等几种典型的军事应用。

本书的特色有以下几点

（1）对多指标综合评价中的若干问题进行了探讨，基本确定了随机区间数综合评价的研究框架。虽然有部分综合评价问题的研究涉及到随机区间数综合评价的思路，但就目前文献来看，尚无进行深入的、系统的研究。本文在构建随机区间数评价技术基本内容的前提下，提出了一些初步的观点。

（2）探讨了随机区间数大小比较方法，在基于可能度的区间数排序方法的基础上进行了改进，提出了一种随机区间数比较的概率优势度方法。

（3）利用大样本理论，对复杂系统的综合评价问题提出了正态分布近似的解决方案，并据此设计了一种针对正态分布区间数的排序方法。

第二章　相关理论基础

随机区间数综合评估方法是一种基于随机数学理论的综合评价方法，为此，本章重点介绍随机数学的基础知识，不确定度理论以及蒙特卡罗方法，它们共同构成了随机区间数综合评价方法的理论基础。

第一节　随机数学基础

随机数学是研究不确定性信息处理的基本方法，也是目前公认的具备严格的数学基础的理论框架。本节主要介绍随机变量及其分布、大数定律及中心极限定理等[1]。

一、一维随机变量及其分布

（一）一维随机变量的定义

在对随机现象的研究中，人们所关心的问题往往是和试验的结果有关系的量，这种随试验结果而取值的变量称为随机变量。因此可以说，随机变量是随试验结果的函数。

例 1　将一枚硬币抛 3 次，用 X 表示出现正面的次数。

样本点	HHH	HHT	HTH	THH	HTT	THT	TTH	TTT
X	3	2	2	2	1	1	1	0

例 2　一射手连续射击 4 次，观察他是否击中目标的情况。用“1”表示击中，“0”表示未击中，X 表示击中的次数。则有

$$X = \{(x_1, x_2, x_3, x_4) \mid x_i = 0,1; i = 1,2,3,4\}$$

$$X = X(e) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$$

函数 $X = X(e)$ 称为随机变量，它的定义域为 S，值域为 $R_X = \{0,1,2,3,$

4\}。

定义 1 设 E 是随机试验，它的样本空间是 S，如果对每一个 $e \in S$，有唯一的一个实数 $X(e)$ 和它对应，这样就可以得到一个定义在 S 上的单值实函数 $X(e)$，称 $X(e)$ 为随机变量。

随机变量与普通实函数这两个概念既有联系又有区别，它们都是从一个集合到另一个集合的映射，它们的区别主要在于：普通实函数无需做试验便可依据自变量的值确定函数值，而随机变量的取值在做试验之前是不确定的，只有在做了试验之后，依据所出现的结果才能确定。

一般地，在不必强调 e 时，常省去 e，简记 $X = X(e)$ 为 X。常用大写字母 X, Y, Z 等表示随机变量，用小写字母 x, y, z 等表示随机变量的取值。

注意：

（1）随机变量的取值带有一定的概率。如在例 1 中，$P\{X=1\} = 3/8$，$P\{X=3\} = 1/8$。

（2）用随机变量可以方便地表示任何事件和事件的概率。

如在例 1 中，$\{X=2\}$ 表示事件 $A = \{HHT, THH, HTH\}$，则可以得到 $P\{X=2\} = 3/8$；而 $\{X \geqslant 3\}$ 表示事件 $B = \{HHH\}$，则有 $P\{X \geqslant 3\} = 1/8$。在例 2 中，$\{X \leqslant 1\}$ 表示事件 $C = \{X \leqslant 1\} = \{(0,0,0,0), (1,0,0,0), (0,1,0,0), (0,0,0,1)\}$，则有 $P\{X \leqslant 1\} = (1-p)^4 + 4(1-p)^3$，其中，$p$ 表示射手的单发射击命中概率。

引入了随机变量之后，就可以用数量来描述随机现象，因而可以用数学分析的方法对实验结果进行更深入、广泛的研究了。

（二）随机变量的概率分布

设 X 是随机变量，则它的取值规律（即可能取哪些值，取这些值的概率分别是多少）称为 X 的概率分布。通常，用分布函数、分布律或概率密度函数来描述随机变量 X 的概率分布。

（三）分布函数的定义及性质

设 X 是随机变量，x 是任意的实数，则称函数 $F(x) = P\{X \leqslant x\}$ 为

需要全本请访问 www.ertongbook.com