



岩土与结构工程中 不确定性问题及其分析方法研究

倪红梅 殷许鹏 著



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NNUP.COM

东北师范大学出版社

海外借

岩土与结构工程中 不确定性问题及其分析方法研究

倪红梅 殷许鹏 著



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NNEUP.COM

东北师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

岩土与结构工程中不确定性问题及其分析方法研究 / 倪红梅, 殷许鹏著. -- 长春: 东北师范大学出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5681-3849-9

I. ①岩… II. ①倪… ②殷… III. ①岩土工程—不确定
度—分析方法②结构工程—不确定度—分析方法 IV. ①TU4-
34②TU3-34

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第251992号

策划编辑: 王春彦

责任编辑: 卢永康

封面设计: 优盛文化

责任校对: 田 旺

责任印制: 张允豪

东北师范大学出版社出版发行
长春市净月经济开发区金宝街118号(邮政编码: 130117)

销售热线: 0431-84568036

传真: 0431-84568036

网址: <http://www.nenup.com>

电子函件: sdcbs@mail.jl.cn

河北优盛文化传播有限公司装帧排版

北京一鑫印务有限责任公司

2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

幅画尺寸: 185mm×260mm 印张: 19.5 字数: 454千

定价: 68.00元

前 言

自古希腊开始，对知识确定性的探索已成为哲学家的追求，并且认为知识存在着绝对的确定性。然而，随着近代科学的进步，尤其是20世纪的量子力学的出现以及“测不准理论”的提出，科学知识确定性的根基受到动摇，对科学知识确定性的追求也越来越变得艰难，甚至有学者提出确定性根本就不存在，科学家追求的仅仅是不确定性。那么，如果说科学家努力研究的目标是不确定性，则科学研究对人类社会发展将没有任何意义。但是，哲学的理性分析告诉我们，对确定性的追求不可能实现。所以，对科学知识不确定性问题的历史探讨与反思以及对如何利用好这对矛盾来推动科学的进步与发展，就成了哲学家和科学家研究的主要问题。科学知识不确定性问题不仅是科学研究中的一个难题，而且这个问题已经渗入到社会生活当中，对经济、文化、社会的发展模式都有一定的影响，引起了一些社会学者的注意。对科学知识不确定性的历史探讨和哲学反思，不但对哲学的发展有着重要意义，而且对未来科学的深入研究和人类社会整体的发展都有着重要的启示。

岩土与结构工程同其他科学和工程领域一样，存在着大量的不确定性问题。主要表现在：岩土与结构工程中概念的不确定性；岩土与结构分类的不确定性；岩土与结构材料本构模型及其参数的不确定性；岩土与结构工程荷载与边界条件的不确定性；岩土与结构工程计算模型及计算方法的不确定性与结构工程变形及破坏规律的不确定性；岩土与结构工程量测误差引起的不确定性；岩土与结构工程设计和施工优化的不确定性；岩土与结构工程反分析中的不确定性等。为了解决岩土与结构工程中这些不确定性问题，必须将近代科学中涌现的各种不确定性理论应用于工程实践中，并不断地发展创新。近年来，国内外学者对岩土与结构工程中不确定性问题的研究已取得了丰硕的成果，其成果在一段时期内成为岩土与结构工程学术界研究的主流之一。

本书从目前研究最热门的几大不确定理论研究概念出发，对于其在岩土与结构工程中的应用研究现状进行了深入分析，介绍了工程应用实例，总结了大量学者的工作经验与科研成果，希望可以推动我国不确定性理论在岩土与结构工程中的应用与发展。

目 录

第 1 章 不确定性问题理论概念解析.....	001
1.1 不确定性研究现状 / 001	
1.2 不确定性问题的分类与内涵 / 012	
1.3 不确定性问题的数学表达 / 022	
1.4 岩土与结构工程中的不确定性问题 / 024	
第 2 章 基于随机理论的工程应用.....	029
2.1 随机理论的概念 / 029	
2.2 岩土与结构工程随机分析方法 / 039	
2.3 随机理论在岩土与结构工程中的应用现状 / 047	
2.4 应用实例 / 068	
第 3 章 基于灰色系统理论的工程应用.....	072
3.1 灰色系统理论的概念 / 072	
3.2 灰色系统元素及建模 / 082	
3.3 灰色系统理论的岩土与结构工程应用研究现状 / 093	
3.4 应用实例 / 100	
第 4 章 混沌理论的工程应用.....	110
4.1 混沌理论的概念 / 110	
4.2 混沌理论的岩土与结构工程应用 / 123	
4.3 应用实例 / 127	

第 5 章 基于模糊数学理论的工程应用.....	131
5.1 模糊数学理论的概念 /	131
5.2 模糊数学产生的动力因素 /	133
5.3 模糊综合评判 /	154
5.4 模糊数学理论的岩土与结构工程应用 /	156
5.5 应用实例 /	173
第 6 章 基于人工神经网络的工程应用.....	177
6.1 人工神经网络的概念 /	177
6.2 人工神经网络基本原理和模型 /	182
6.3 人工神经网络理论的岩土与结构工程应用 /	205
6.4 应用实例 /	225
第 7 章 遗传算法理论的工程应用.....	228
7.1 遗传算法概念 /	228
7.2 遗传算法基本原理 /	230
7.3 遗传算法理论的岩土与结构工程应用 /	240
7.4 应用实例 /	256
第 8 章 其他不确定性理论的工程应用.....	261
8.1 粗糙集理论 /	261
8.2 突变理论 /	275
8.3 不确定性问题耦合理论 /	295
参考文献.....	299

第 1 章 不确定性问题理论概念解析

人与客观世界的关系从根本上说是认识和实践的关系，认识世界是为了更好地改造、变革世界，但是，认识世界是一个无限逼近世界本质的过程。人类的认识图景之所以具有历史的相对性，这是与人类认识过程及其结果、科学技术发展的历史阶段性相一致的，人类关于世界的认识图景必然会随着科学技术的发展和认识能力的提高而更加接近客观世界的本质。客观事物或现象是简单的还是复杂的？世界物质状态是确定的还是不确定的？系统演化的规律是线性的还是非线性的？……这些问题都是具有历史相对性的。当人类社会进入 20 世纪之后，尤其是当科学的触角扩展到接近光速的宏观世界，深入到原子、原子核内部的微观世界以及宏观世界中牛顿力学所不能解释的非可积系统领域时，我们看到的大量现象不是简单的而是复杂的，事物的运动轨迹不是表现为确定性而是表现为不确定性，系统演化的规律主要是非线性规律，而将线性规律仅作为极少量的特例。在这样的背景下，深入探讨和揭示客观世界的复杂性、非线性和不确定性的内在本质就成为科学技术的前沿领域，而从哲学的角度来分析和说明客观世界所具有的复杂性、非线性和不确定性，也就成为哲学研究，尤其是科学技术哲学研究的重要课题之一。

1.1 不确定性研究现状

1.1.1 “不确定性”的由来

“不确定性”问题是一个古老而常新的哲学问题。它是关于事物相互联系尤其是事物之间因果联系的一种哲学研究，是对事物因果关系即因果性研究的继续和深化。“不确定性”作为一个重要范畴，起初是从自然科学和自然哲学领域中提出来的，并且其概念内涵的确定比较晚。与不确定性含义相近的概念有哲学上的偶然性和数学上的随机性。不确定性、随机性和偶然性有时可看成是近义词。

不确定性是相对于确定性的概念，是对确定性的否定。“确定性”在英文中的对应词是“certainty”，有确凿、无疑、不可避免、必然发生之意。“确定”在中文是“明确而肯定”“明确地定下”的意思。因此，“不确定性”即“uncertainty”，就有易变、无常、捉摸不定、不能确知、不能断定、难以预料等含义，是对确定性含义的否定。不确定性是与确定性交织在一起的，讨论不确定性自然涉及对确定性、决定性、必然性乃至因果性进行分析。我们知道，对因果性、必然性、确定性的研究可以追溯到古希腊哲学。所以，对不确定性概念的考察也应该从古希腊哲学开始。

1.1.1.1 古代哲学家对不确定性的探索

在古希腊，最早提出自然事物联系具有确定性特征的是自然哲学家德漠克利特，他注重对因果关系的研究，把探求事物的原因视为最高的乐趣和目标。“找到一个原因，胜过当上波斯人的国王”是德漠克利特这种追求的最好说明。

在关于事物因果关系的研究中，德漠克利特坚持因果联系的严格必然性，主张排斥偶然性的决定论观点。在他看来，“万物生长的原因是漩涡”“没有什么事物是偶然生成的，万物都出于必然生成”“不论过去、现在或将来，自古以来就完全为必然所预先决定着。”

因此，德漠克利特认为那种倾向承认偶然性的人是没有理智的人。他说，“人们自己虚构出偶然性的幻影为自己的无有理智辩护，须知理智按其本性来说是反对偶然性的。”这就是说，偶然性、不确定性不是客观事物以及人类理智的固有本性，而是人类理智在实际认识过程中因认识局限而造成的暂时幻影。因为“一切都遵照必然性而产生，漩涡运动是一切事物形成的原因，也就是他所说的必然性。”我们可以看到德漠克利特已经为后世的众多科学家和哲学家肯定严格因果必然性的理想信念埋下了种子。

亚里士多德的哲学是古希腊哲学的最高成就。他在对因果性问题的研究中具体分析了偶然性、不确定性与原因和结果的联系。

在《物理学》中，亚里士多德首先分析了原因的种类或数目，提出了著名的“四因说”——质料因、形式因、动力因和目的因。随后，他研究了原因和结果相互联系的多种情形，明确提出了“本质原因”和“偶然原因”的概念，并对偶然性和自发性做出具体分析。他说，“大家都知道，任何事物的产生都可以被说成有某种原因，但大家一样还是说，这些事物中有的这是由于偶然性而存在的，有的不是由于偶然性而存在的。”这里，亚里士多德明确地把事物产生的原因分为两种不同性质的原因，这就是“本质原因”和“偶然原因”。总是这样发生以及通常这样发生的事物是由必然的“本质原因”引起的事物，其他情形则属于“偶然原因”所引起的事物。

“本质原因”和“偶然原因”都是事物产生的原因，它们的区别就在于原因和结果之间的联系，前者是确定的而后者是不确定的。两千多年前的亚里士多德就对因果关联具有这样的洞察高见，实在令人叹服。他说：“正如事物既可以因本质也可以因偶然属性而存在一样，原因既可以因本质也可以因偶然属性造成结果。”“因本质的原因是确定的，因偶然属性的原因是不确定的，因为一个事物可能具有的属性是为数无限的”。亚里士多德已经明确提出了“确定性”和“不确定性”就是原因和结果的本质联系或非本质联系的思想。那么，偶然性的原因是一种什么样的原因呢？他举例说，一个人为了别的理由到市场上去，却意外地在那里碰到了他的债务人，偶然地取回了他的债款。这个取回债款的原因（到市场上去）和他取回债款的结果之间没有必然的联系，而他能够取回债款，只是和他为别的目的去市场偶然碰见债务人这个原因有关。当然，在亚里士多德看来，他去市场还是有他的意图或目的的。所以，他认为，“偶然性是有意图有目的的行为中的由于偶然属性的原因。”“由于偶然性发生的事，其发生的原因必然是不确定的。”总之，“偶然性就是反乎常规”“偶然性就是变化无常的”“偶然性和自发性两者属于既不是绝对地又不是通常地如此发生的事物，而是属于为了某种目的而发生的事物。”

亚里士多德还对偶然性和自发性做了进一步的区分。他认为，两者的“区别在于：‘自发’使用范围较广，凡由于偶然的事物全都可以说由于自发，由于自发的事情不全可以说由于偶然。”“自发”这个词就其辞源学而言，意指“自身无目的地发生”。例如，石头掉下打了这个人，并不是因为要打他而掉下来的。自发事件就是无目的地实现了的事件。而更为根本的区别则是，“自发的原因是外在的，偶然性的原因是内在的。”

在亚里士多德之后，伊壁鸠鲁对偶然性、不确定性又有了新的认识。他也是一位原子论者，但他认为世界不仅存在着必然性，还存在着偶然性，并且认为原子的本质乃至世界的本原都是偶然的、不确定的。马克思在其博士论文中写到，伊壁鸠鲁认为原子在虚空中有三种运动。一种运动是直线式的下落；另一种运动起于原子脱离直线而偏斜；第三种运动是起于诸多原子的冲击。承认第一种和第三种运动是德漠克利特和伊壁鸠鲁共同的，不过在承认原子脱离直线的偏斜运动这一点上，伊壁鸠鲁便和德漠克利特不同了。伊壁鸠鲁关于“原子脱离直线而偏斜”的观点是他的世界本原乃是偶然的思想的鲜明表现。在伊壁鸠鲁看来，原子的这种自动偏斜运动乃是一种终极的偶然原因，它打断了严格必然的因果链条，把世界从宿命的决定论中解放了出来。而原子脱离直线的偏斜运动就是偶然性，就是万事万物形成的根源，是世界的创造性、新颖性和多样性的源泉。如果一切原子只有垂直下落的运动，就不会结合在一起，就不会有相互之间的凝聚、复合，也就不会生成丰富多样的万千世界。度克莱修深谙并继承了伊壁鸠鲁的这一思想，他在其著作的《物性论》中写道：“如果竟然有谁相信较重的原子当它们更迅速地在虚空中笔直落下时，就能够从上面击中较轻的原子，因此产生了撞击，足以引起那些把事物产生出来的运动，那他们就是远远地离开了真理的大道。而原子，当它们自己的重量把它向下拉垂直地通过虚空的时候，在极不确定的时刻和极不确定的地点，会从它们的轨道稍稍偏斜。”总之，伊壁鸠鲁的原子论既承认偶然性（原子的偏斜运动），又承认必然性（原子的直线下落），自然界是由必然性和偶然性共同创造的，不过偶然性在其中起着不可磨灭的重要作用。伊壁鸠鲁关于原子运动的偶然性和不确定性的天才猜想，自然成为后来自然科学对偶然性、不确定性研究的启迪源泉。

1.1.1.2 近代科学时期的机械决定论思想

经过了中世纪漫长的停滞，在宗教改革和文艺复兴的运动中，自然哲学又开始恢复和发展起来，并且孕育着真正意义上的自然科学，这就是近代自然科学的产生和兴起。在近代，自然哲学和自然科学难解难分地纠缠在一起，在关于因果性的认识发展中相互借鉴、相互促进，共同锻造出机械决定论的因果观和自然观。

近代自然科学的兴起始于哥白尼的《天体运行论》，成熟于1687年牛顿出版的《自然哲学的数学原理》。在牛顿建立起经典力学的理论体系之前，经典力学所蕴含的关于客观事物的因果关系及其必然联系的思想，也已经在一些具有唯物主义思想的哲学家那里得到论述和发展。其中，荷兰哲学家斯宾诺莎就是其重要代表之一。

斯宾诺莎坚持“从世界本身说明世界”的唯物主义立场，提出了著名的“自因”概念，即客观世界的有限事物的存在和运动，都是来自实体（“自然神”）的推动，而实体的存在和运动则来自自身。所以，客观世界的存在是以自身为原因的，“自因”就是客观世界的“第一推

动”。而且，“自因”的实体决定着有限的个体事物，事物之间形成着环环相扣的因果链条，自然界不存在偶然性的东西，偶然性是我们知识缺陷的表征。他说：“每个个体事物或者有限的且有一定的存在的事物，非经另一个有限的且有一定的存在的原因决定它存在和动作，便不能存在，也不能有所动作，而且这一个原因非经另一个有限的且有一定的存在的原因决定它存在和动作，便不能存在，也不能有所动作；如此类推，以致无穷。”“自然中没有任何偶然的东西，反之一切事物都受神的本性的必然性所决定而以一定方式存在和动作。”“其所以说一切是偶然的，除了表示我们的知识有了缺陷外，实在没有别的原因。因为或者我们不知道一物的本质是否包含着矛盾，或者我们虽然明知它的本质不包含矛盾，也因碍于该物的因果关系，对于它的存在不能加以明确地肯定，这样的东西看来既不是必然的，也不是不可能的，因此我们便将其称作偶然的或可能的。”可见，在经典力学之外，因果必然性的思想已经在哲学家的头脑中渐成主流思想。

牛顿力学的建立，充满着伟大的艰辛创造历程。其中，有牛顿对伽利略、开普勒已有天文学研究成果的系统化和理论化继承，又有牛顿和莱布尼兹各自独创的数学工具在力学中的成功应用，这才有了对亚里士多德的“月上世界”和“月下世界”的统一描述，才有了物理学的首次大综合。牛顿力学使用质点、重量、时间、动量等概念，用数学方程定量地解释物体之间的相互作用及其运动变化，把地上的物体位移和太空中的星球运行清晰精确地呈现出来，给人类难以释怀的震撼。尤其是有人应用牛顿力学对一颗未知行星的大胆预测并被成功检验，其精确性和威力更使大家瞠目。天王星脱离自己轨道的无规摄动，无法用已知行星的作用给予充分的解释，要说明这些不规律的摄动，便须假设有一颗新行星的存在。

这个行星的位置由剑桥的亚当斯与法国的数学家勒维烈各自分别计算出来。柏林的天文学家加勒依照勒维烈所指的方位，果然用望远镜发现了这颗新的行星，这就是海王星的发现。随着牛顿力学的成熟及其在解释天体机制方面的惊人成功，人们开始把这种机械概念应用到科学的其他领域，建立起关于声、光、电、磁等现象的机械模型，甚至有人尝试用力学观点解释生命世界，如笛卡儿写出了《动物就是机器》，拉美特利写出了《人是机器》的著作。在牛顿力学建立之后的数十年间，人们过高估计了它的应用能力，形成了一种对于牛顿和牛顿定律的盲目崇拜。18世纪的著名数学家拉格朗日就曾诚心地赞誉牛顿的《原理》是人类心灵的最高产物，而且说牛顿不仅是历史上最大的天才，也是最幸运的一位天才：“因为宇宙只有一个，而在世界历史上也只有一个人能做它的定律的解释者。”

牛顿力学在实践中的巨大成功促使机械论自然观大行其道，它使相信牛顿力学的科学家们对其产生了一种无往不胜、无坚不摧的豪情，认为蕴含在牛顿力学中的严格决定论、因果必然性的观念和理想可以通过数学计算和逻辑推演而加以实现。世界上没有什么事物不是被因果必然性严格决定的，偶然性、随机性被看成是科学的敌人。这种思想在当时的哲学家和科学家中都表现得非常明显。法国哲学家霍尔巴赫在其著作《自然的体系》中写道：“在宇宙中一切事物都是互相关联的，而宇宙本身不过是一条不断互相派生的原因和结果的无穷锁链。只要我们稍加思索，我们就会不得不承认，我们所见的一切都是必然的，或不能不是现在这个样子的；我们所看到的一切东西，以及我们视觉所不及的一切东西，都按照一定的法则而活动。”他还曾举例说明他的这一观点：“在由一阵狂风所卷起的尘土的漩涡之中，在由掀起巨浪的逆风所激起

的最可怕的暴风雨之中，无论在我们看来是多么混乱，可是没有一粒沙一个水分子是偶然放在那里的，它们都有占据现在所处的地位的充足原因，它们严格地按照它们应当活动的方式而活动的。”

在霍尔巴赫看来，客观事物严格遵循着因果必然性的规律，自然界是没有偶然性的。他说：“事实上，我们是把一切看不出与原因有联系的结果归之于偶然。所以，我们使用偶然这个词，不过是来掩盖我们对于产生所见的那些结果的自然原因的无知罢了。”他还说：“在自然中没有偶然，没有任何意外的事物，也并没有无充足原因的结果。一切原因都遵循着固定的、一定的法则活动，这些法则是它们的本质属性和构成它们那永久的或暂时的状态组合和变化所决定的。”

1.1.1.3 拉普拉斯决定论

这种机械决定论的观点，在法国数学家、天文学家拉普拉斯的著作中更是以难以复加的极致口吻阐述：“我们应当把宇宙的现在状态看作它先前状态的结果，随后状态的原因。假定有一位具有超人智力的神明，它能够知道某一瞬间施加于自然界的所有作用力以及组成自然界的所有物体的瞬间位置，如果它的智慧能够广泛地分析这些数据，那么它就可以把宇宙中最重的物体和最轻的原子的运动，均纳入同一公式之中。对于它，再也没有什么事物是不确定的了，未来和过去一样均呈现在它的眼前。人类心智已经能够给天文学的那种尽善尽美性提供这个神明的微弱朦胧的轮廓。力学上和几何上的发现，与万有引力的发现相结合，给世界系统的过去与未来的状态带来了统一的分析公式。在寻求真理中所有人类心智的效力都倾向于迫近我们前面所想象的神明，不过人们距离这个神明还很远很远。”拉普拉斯所说的这位“神明”，实际上就是那具有全知全能、无所不知的上帝，人们有时又称这位超级智慧为“拉普拉斯妖”。拉普拉斯所阐述的这种决定论被称为拉普拉斯决定论，即严格因果的机械决定论。

拉普拉斯决定论成为机械决定论的典型代表。拉普拉斯的上述论断包含了机械决定论的基本的核心观念。①客观事物的联系是遵循严格因果必然性或因果性的——一个原因只有一个结果，一个结果也只有一个原因，原因和结果是一一对应的，事物之间没有偶然性或不确定性。②客观事物的运动变化是严格遵循动力学规律及其方程的。③宇宙的初始状态和边界条件是可以无限精确测得的，因为有一个“神明”或“拉普拉斯妖”做保证。④人类对事物运动变化的认识是不能达到“神明”程度的，只能以此为认识的极限。机械决定论的观念支柱即是严格因果必然性或因果性，牛顿力学的第二定律 $F = ma$ 正是这种严格因果必然性的标准形式。有一个外力作用于一定质量的物体，物体的运动状态就一定会发生与这个力相对应的改变，即产生一个确定的加速度 a ；而由运动速度的改变即加速度 a ，也必定会找到引起这一运动状态改变的原因，即某一外力 F 。机械决定论把这种严格因果必然性或因果性作为世界上一切事物和现象普遍具有的关系，实际上是把因果联系完全力学模式化了。在这种因果联系力学化的模式中，完全排除了世界上偶然性事物和不确定联系的存在，好像世界上的一切事物和现象都被因果必然性严格决定着。

机械决定论的实质是把因果必然性或因果性作为因果律的唯一形式，看不到因果律包含着丰富的内容，有着多种表现形式。实际上，在机械决定论形成的过程中，和这种严格因果必然

性观念不同的非严格因果必然性的思想就已经开始出现，即出现了关于不确定性或随机性现象的数学研究，总结了关于随机现象的因果规律——统计规律。这就是概率论与数理统计的产生及其发展。

1.1.1.4 概率论与统计规律的引入

不确定性现象或随机现象是人们早就注意到的经常性现象，并且在日常生活中通过获取经验来处理这类现象。到了中世纪，由于像纸牌、掷骰子和轮盘赌等赌博游戏的兴盛和社会保险一类社会事业的发展，产生了对于这种本质上具有不确定性现象的规律和数学表达的研究的需要。这种经验和理论的数学研究在 16、17 世纪就开始形成一股热潮，概率论也在这种研究热潮中逐渐形成。比如，据说 1654 年巴黎的一名赌徒梅雷曾向当时的著名数学家帕斯卡提出过一个赌博中的数学问题：两个技艺相当的赌徒预先约定，每赢一盘为赢一点，谁先赢三点就为全赢。如果两人都没有能够赢得三点即要中断赌博时，赌本应当如何摊派才算公平？帕斯卡和当时另外两位著名数学家费玛和惠更斯多次以通信的形式讨论过这类问题。惠更斯曾经在其著作《论赌博中的计算》中写道：“在任何场合，我认为如果读者仔细考虑这些研究对象，就会注意到，所处理的决不仅是赌博问题，其中实际上包含了很有趣、很深刻的理论基础。”

各国一些著名的数学家在概率论的建立中做出了重要贡献。英国数学家伯努利最先从数学上将赌博现象理论化。他在《推测术》中提出了著名的伯努利定理，这是概率论和数理统计中起重要作用的“大数定律”的最初形式，它用数学公式刻画了事物的偶然性与必然性之间的辩证关系。1733 年，法国数学家莫阿弗尔提出了中心极限定理。同一时期，英国数学家贝叶斯提出了贝氏统计理论，运用概率概念来解决从特殊推断一般的问题，开辟了概率论发展中的一个新方向。“贝叶斯公式”也被认为是关于主观概率的一个主要公式。到了 19 世纪初，法国天文学家、数学家拉普拉斯更是综合集成前辈数学家关于概率研究的成果，运用数学分析方法统一处理概率问题，把概率论建立在严密的数学基础之上，有力地促进了概率论的巨大发展，其代表性著作就是 1812 年发表的《概率分析理论》。后来，德国的著名数学家高斯和比利时学者凯特勒都对概率论及其与统计学的结合做出了重要贡献。前者提出了误差理论中著名的正态分布曲线（又称高斯曲线），用数学方法处理了经验观察值与真正值的误差分布；后者用数理统计的方法研究社会现象，发现社会现象的不确定性也遵循着统计分布和统计规律，指出了社会现象与自然现象的一致性，写出了《社会物理学》等重要著作。

到了 19 世纪，在改进和提高热机效率的社会需求下，兴起了对热现象的研究。法国工程师卡诺通过分析热机做功的本质过程，设计了一台理想热机，提出了著名的卡诺循环。物理学家克劳修斯和汤姆孙在 50 年代分别从卡诺循环中总结出提法各异的热力学第二定律。1865 年，克劳修斯又提出熵的概念，把热力学第二定律表述为系统自发变化的熵趋于极大值的熵增加原理。熵增加原理反映了热现象不可逆过程的本质。

热现象是大量微观粒子运动的宏观群体效应，它的本质是具有与动力学对象个体事物不同性质和规律的群体事物的存在。热现象可以分为微观和宏观两个层次，微观层次是大量单个粒子的自由运动，其运动主体是个体事物，遵循着牛顿力学的规律；而从宏观上看，全部粒子构成的总体属于群体事物，其运动演化呈现出新的特点，遵循着与牛顿力学完全不同的新的规律。这表

现为，一方面，微观的每一个粒子都受到其他粒子无限多的作用，因而难以建立这种无限相互作用的微分方程组，难以对单个粒子做出确切的描述；另一方面，大量粒子的集体行为在宏观上又呈现出不可逆的效应。因此，机械决定论的因果必然性在这里遭遇到严重的挫折，热现象研究开始与严格确定性的理想信念分道扬镳。

对热现象群体事物新特性研究的实质性推进是概率概念的引入，因为大量粒子运动的随机性质及其呈现的统计规律性与概率论的研究对象非常相似，能够很好地应用统计决定的观念对之进行分析和说明。例如，玻耳兹曼就是依据统计决定观念对熵增加原理做出解释的。虽然对形成热现象的单个粒子运动无法做出确定性的描述，但是他通过对大量微观粒子运动统计分布的分析，找到了热现象的宏观状态函数熵同形成热现象的大量微观粒子运动的各种概率分布之间的联系，得出了著名的玻耳兹曼定理： $S = k \ln W$ 。其中， S 代表宏观状态函数熵， k 为玻耳兹曼常数， W 是微观粒子运动分布的概率或配容数。玻耳兹曼定理表明，宏观状态熵 S 并不由个别粒子运动决定，而是由大量粒子运动的概率分布决定。群体事物的任何自发变化都是由概率小的微观分布向着概率大的微观分布进行，不可逆的热力学变化总是由概率小的非平衡态向概率最大的平衡态变化， W 值总是增大的。因此，对应的描述宏观状态的熵 S 也总是增加的。这就很好地说明了机械决定论无法解释的热现象不可逆的原因。

科学史家丹皮尔在总结这一段科学认识的历史时说：“麦克斯韦和玻耳兹曼将高斯由概率理论所导出的误差律应用到速度分布的问题上去，这个理论当时对许多研究部门都十分重要。”“不论在物理学、生物学或社会科学上，概率理论与误差曲线都有很大的重要性。预测一个人的寿命长短或一个分子在未来某时刻的速度是不可能的，但如果有了足够数目的分子或人，我们就可以用统计的方法来加以处理，我们可以在极狭窄的范围内，预测有好多分子在某一速度范围内运动，或好多人将死于某年。从哲学角度，我们不妨说已经达到一种统计决定论，虽然在这个阶段里，个体的不确定仍然存在。”因此，统计决定论是一种处理随机性、不确定性现象的有效观念。

统计决定论内含两个基本的观念支撑点：第一是大数，第二是概率。所谓大数的含义是说统计决定的事物是群体事物，事物的性质和状态由群体事物内最大配容数的行为和状态决定。配容数即微观状态数。事物之宏观性质和状态就是由微观状态数分布最多的那一组微观状态所决定。而概率则是群体事物（大量粒子）多种不确定性质、状态的相对确定的量度，是不确定性中的相对确定性。因此，概率概念突破了机械决定论的严格意义的因果关系，它承认科学可以认识不确定的事物，但同时它又在不确定性之中看到了相对的确定性。所以，概率及其统计决定的观念是一种承认和肯定随机性、不确定性而又突破机械决定论的非严格、不完全的决定论。

1.1.1.5 当代科学中的不确定性

20世纪量子力学的建立，使人类认识进入到与宏观世界完全不同的微观世界领域，量子力学揭示出的微观客体运动的一些全新性质和特点，同强调严格因果决定性的机械决定论格格不入，其中，微观粒子运动的不确定性和概率特性表现得更加突出和鲜明，凸现了自然世界客观本性的崭新内容。

按照经典物理学理论，物质由微粒和场两种实体所组成，微观粒子表现为粒子性，即微粒

具有空间的定域性或分立性，也就是具有确定的大小并做轨道的运动；而场表现为波动性，即场具有空间上的连续分布和叠加性。粒子性和波动性是两种互不相容的性质。1900年德国物理学家普朗克在解释黑体辐射时提出的能量子假说以及1905年爱因斯坦在解释光电效应时提出的“光量子”假说，都不约而同地揭示出具有波动性的电磁波（包括光）同时具有粒子性，只是这种波粒二象性是通过不同的实验手段分别地呈现出来。1924年，法国物理学家德布罗意进一步把波粒二象性推广为一切物质微粒的属性，建立了物质波的概念。微观客体的波粒二象性的发现，使经典物理学关于此两种性质不能在同一客体中统一的观点成为陈腐之论。

1925—1926年，德国物理学家海森伯和奥地利物理学家薛定谔分别从不同的方向建立了量子力学的基本方程，得到了量子力学的矩阵力学和波动力学这两种不同的数学形式体系。稍后不久，薛定谔又证明了这二者在数学上的等价性。其中，薛定谔方程用波函数来描述微观粒子的波动性，很好地说明了微观粒子的运动规律。但是，波函数的实质含义是什么？薛定谔本人并没有给出明确的说明，这个说明是稍后由德国物理学家玻恩给出的。玻恩认为，波函数其表征的是微观粒子的某个力学量在抽象的希尔伯特空间中某处出现的概率。尽管波函数本身随时间变化由薛定谔方程确定，但其所描述的单个粒子的状态则是不确定的在某处找到某个粒子只有一定概率的把握，这个概率由波幅的平方给出。波函数的概率解释不能像经典力学那样精确地测定粒子的物理量，如位置和动量，而只能把波函数看作粒子位置或动量的概率分布。

为了进一步解释这种微观运动的新特征，海森伯于1927年提出了不确定性原理。根据不确定性原理，微观客体的任何一对互为共轭的动力学变量，如坐标和动量，都不可能同时具有确定的值，即不可能对它们的测量结果同时做出准确的预言。对于一个微观粒子的位置 X ，所测得的误差 ΔX ，同对它的动量 P 所测得的误差 ΔP 的乘积，大于或等于普朗克常数 h ，即 $\Delta X \Delta P \geq h$ 。这就是说，在对微观粒子进行测量时，测定粒子的坐标愈准确，则测定在这个坐标方向的动量分量的准确性也就愈差。总之，不确定性原理深刻揭示了微观世界的客观本性，它触及了作为宏观认识主体的人类在认识微观客体时所呈现出的一些全新的特点，这些对科学和哲学认识论必将产生深远的影响。

20世纪中叶，一大批科学家把认识的触角伸向更加广泛的领域，研究的问题更趋复杂，从而彻底抛弃了机械决定论的简单观念，不确定性、随机性和偶然性问题成为新科学的研究重点。一般系统论、控制论、信息论以及耗散结构理论、协同学和混沌动力学等即是该研究的重要学科。尤其是耗散结构理论和混沌学的核心思想，深刻揭示了自然界存在的不稳定性、不可逆性和不确定性的基本事实，为我们更加深入地理解自然界的本质提供了坚实的自然科学基础。

普里高津创立的耗散结构理论，揭示了不确定性在系统事物演化中所扮演的重要角色。耗散结构理论从与经典力学完全不同的视角勾画了自然界的图景。在这个科学图景中，普里高津把事物演化的时间方向性，即不可逆性，看作自然界的实在本性，他认为不可逆性在物质世界中起着基本的建设性作用，并深深植根于动力学规律之中。这就明确提出了一种和经典力学可逆时间完全不同的时间观。我们知道，在物理学中首先描述了时间不可逆性的是热力学第二定律，它以熵增加原理第一次把“时间之矢”引进了物理学。可是，熵增加的时间箭头指向的是有序的减少、无序的增加，而在生物学或社会历史领域，我们看到更多的则是无序减少、有序增加，系统朝着复杂性、组织性增长的方向演化，这是一种进化的不可逆性。普里高津通过把熵分解为来自

系统内部的熵产生和与环境交换的熵流, 即 $ds = ds_i/ds$, 从二者之间的作用关系解释了熵增加过程与系统内部是同一原理的不同表现, 把热力学和生物学统一在共同的理论基础之上。其中, 时间不再是与物质运动无关的外部参数, 而是成为系统内部进化的度量指标。这样, 不同的时刻承载着事物演化的不同状态, 我们在时间之流中看到的世界的进化或退化、生成或消亡, 是世界变化的丰富多彩, 那种把时间分离出去一成不变的世界图景显得太不真实了。

耗散结构理论还揭示了系统事物演化的内在机制。系统的演化是从一个稳定态向另一个稳定态的迁移, 其中的一个关键环节是系统的失稳及其下一步的演化方向。耗散结构的分叉点理论指出, 系统在分叉点处失稳, 而失稳后究竟如何演化则受到系统内部微观涨落变化的决定。涨落是对原有稳态的偏离, 并且有多种可能的演化倾向。在远离平衡的条件下, 由于系统内部的非线性相互作用机制, 系统内部的某一微观涨落可能成为自组织核心并且不断放大而成为一个巨涨落, 进而使系统由不稳定状态进入到一种新的有序的宏观状态, 这种宏观有序状态通过与外界交换物质和能量而得以保持, 这就是耗散结构。所以, 普里高津称通过涨落达到有序。在这里, 系统处于分叉点的微观状态的多种可能性是涨落选择之源。从中, 我们可以看到不确定性的身影及其对系统事物演化发展的影响。

混沌动力学的发展向我们揭示了混沌现象及其所遵循的确定性方程存在着“内在随机性”, 从而使得追求拉普拉斯的严格因果决定论理想成为不可能。混沌系统的一个重要特征是对系统初始条件具有敏感依赖性。初始条件的微小差别, 经过确定性过程或确定性方程的演绎而使结果变成完全不确定的了。南美洲亚马孙河流的一只蝴蝶轻轻拍动翅膀, 就可能在太平洋地区演变为一场狂风暴雨。“失之毫厘, 差之千里”的“蝴蝶效应”是对初始条件敏感依赖性的最好说明。

总之, 我们看到, 从古至今的科学史, 是一个不断追求因果确定性而又不断揭示出不确定性具有更加基本地位的历史过程。不确定性随着科学不断发展和深入, 越发突出其在事物演化及其对人类认识的重要意义。

1.1.2 不确定性问题的国内外研究现状

随着不确定性现象在现实世界中的频繁出现和逐渐被认知, 不确定性问题越来越成为各个学科研究的对象。针对各个学科研究领域内的不确定性现象, 提出了关于不确定性的独具特色的概念和方法, 如数学中的随机性概念及其概率计算方法, 经济学中的风险概念及其计算方法等, 推动着对不确定性理论认识的深入。但是, 不确定性的本质含义到底是什么? 它与随机性、偶然性、风险等概念是什么关系? 不确定性是主观的还是客观的? 它与确定性又是什么关系? 这些问题在各个学科中有着或清晰或模糊的回答, 但将这些问题上升到哲学层次上来系统回答, 我们在大量研究文献中收获甚少。

1.1.2.1 国外研究

瑞典斯德哥尔摩皇家技术学院哲学教授斯万·汉森对“确定性”和“不确定性”的看法是, “信念就是高度的(主观)确定性。而不确定性, 也就是不相信(不知道)的认知状态。应该指出, 不确定性是一种主观状态而不是客观状态。”显然, 斯万·汉森不承认客观的“不确定

性”。而在经济学名著《风险、不确定性与利润》一书中，著名经济学家弗兰克·奈特则把“风险”看成是“一种客观的可度量的不确定性”，把“不确定性”看作一种不可度量的不确定性。至于不确定性为什么不可量度，我们又如何把握这种“不确定性”的本质，奈特在书中却是其言不详。总之，在众多学科关于“不确定性”的论述中，提炼概括出“不确定性”的一般意义是一件繁重而艰难的工作，目前这项工作尚没有看到令人满意的研究成果。

在收集到的有关“不确定性”哲学意义探讨的文献中，比利时诺贝尔奖获得者伊·普里高津（与伊·斯唐热合作）的著作《确定性的终结》和《从混沌到有序》，我国学者金观涛的著作《发展的哲学——论“矛盾”和“不确定性”》以及理论物理学家郝柏林关于混沌研究哲学思考的一系列论文具有较强的代表性，它们代表了最近二十多年国内外关于从哲学角度探讨“不确定性”问题的前沿理论成果。

普里高津关于“不确定性”的思想是与他创立的耗散结构理论紧密联系在一起。他在物理学和数学具体研究的基础上，提出了他的自然观以及关于确定性和不确定性的观点。普里高津认为，确定性是经典力学自然法则的基本表述。牛顿力学、量子力学和相对论力学定律以确定性和时间对称性为其基本特征。在确定性的世界里，过去、现在和未来扮演着相同的角色，从过去到未来只有稳定可逆的“世界线”轨道，没有不稳定、不可逆的复杂演化和创造生成。“依照此种方程，自然法则导致了确定性。一旦初始条件给定，一切都是确定了的。”但是，科学的发展处于伽利略和牛顿所开辟的道路走向尽头的转折点，在这里看到的是确定性的终结和新自然法则的诞生。“这个（新）法则不再建立于确定性定律情形下的确定性，而是建立于概率之上。”“在这种新理性之中，科学不再等同于确定性，概率不再等同于无知。”“新自然法则现在表达可能性或概率。”这里，可能性实质上就是不确定性，概率则是不确定性中之确定性的数学表达。所以，普里高津所期盼的新的自然法则应该是既包括时间可逆的确定性过程，又包括时间不可逆的不确定性过程，本质上不确定性是常态而确定性是例外的理论解释。这种新自然法则描述的是一幅以不确定性为基础的新的科学世界图景。

1.1.2.2 国内研究

金观涛是我国国内较早在哲学研究中明确提出“不确定性”概念的学者之一。在其哲学三部曲之《发展的哲学——论“矛盾”和“不确定性”》一文中，他通过分析辩证法的发展原理及其核心概念“矛盾”中的逻辑悖论，提出了将“不确定性”作为对立统一规律的更精确的表达思想，以期实现以不确定性原理为基础对辩证理性进行重建的目标。金观涛认为，传统的辩证法思考一般由两个基本的环节组成，第一步是确定研究对象的质的规定性，第二步是寻找这种质的规定的自我否定，这就是辩证法发展原理的矛盾概念之基本内涵。它在自我肯定中通过引入自我否定来说明和把握事物的内在发展。但是，辩证法的矛盾概念的表达在逻辑上将导致悖论，因而这种思辨性的辩证逻辑并不能清晰明确地说明世界万物的永恒运动和内在发展。随着近现代科学的兴起和发展，科学规范要求任何理论结构不能包括似是而非、相互矛盾的陈述，即理论应该遵循“理论确定性和清晰性原则”。在不违背这一原则的前提下，我们对世界万物内在发展之发展原理进行逻辑无矛盾的概括和说明，并且将辩证法精神加以科学化和精确化。为了实现这一目标，我们需要在科学中寻找与发展原理等价的新的原理，而它又具有“矛

盾”概念所不具有的新特点。这一新的原理就是“不确定性”原理。金观涛认为，“辩证法的万物是发展的这一个基本原理可以用另外一条基础性原理来取代，这就是世界的不确定性背景。”“辩证法将万物是发展的看作最基本的支柱这一核心思想和强调世界本质上存在着不确定性的思路是等价的。”“我认为，可以把矛盾等价于不稳定性和不确定性。”“只要把不确定性作为辩证法哲学的核心概念，理解它就是对立统一规律更精确的表达，那么，一种高屋建瓴的新的存在观和发展观将重新显现出来。”在金观涛看来，“不确定性”是与“矛盾”等价而又符合“理论清晰性和确定性原则”的哲学概念，它是自己从具体科学理论的土壤中生长起来，而不是哲学家为了把握发展原理硬塞到逻辑中的。它和逻辑推理相洽，与逻辑结构融为一体，不会像悖论那样损害逻辑思维。那么，不确定性的内涵是什么呢？金观涛在其论著中并没有就这个关键问题做出深入的阐述。他只是通过对物理学中具体事例的分析，指出解释事物一般都必须遵循这样两个共同原则：

a. 任何系统或客体都处于不可排除的干扰之中。

b. 系统或客体如果具有微小干扰下保持自身性质不变的能力，则意味着它存在一种抗干扰的稳定机制。

a 原则是说干扰造成不确定性，b 原则是说系统通过稳定机制消除不确定性而使自身回到确定状态，从而表现出系统确定的质。至于“不确定性”的真正内涵是什么，他并没有做出详尽全面的分析和阐述。但是，该论著为“不确定性”的哲学研究提供了丰富的思想启迪源泉，成为后继者从哲学上研究“不确定性”的一部不可绕开的重要文献。

我国理论物理学家郝柏林是混沌研究的著名专家之一。他在从事有关混沌现象的物理机制及其数学描述研究的同时，对混沌现象中涉及的关于确定性与随机性、必然性与偶然性等一些重要基础性问题进行了长期哲学思考，提出了一些非常有见地的思想观点。这些思想散见于他的有关“混沌现象启示”的科普文章之中，后又集中编辑在他的科普文集《混沌与分形》一书里。在《自然界中的有序和混沌》《牛顿力学三百年》《世界是必然的还是偶然的》《复杂性的刻画与复杂性科学》等著名文章中，郝柏林认为，对于同一个自然界，物理科学中有决定性和概率性两种描述。牛顿力学是决定性描述的典范，天体运动尤其是海王星的发现成为牛顿力学大获成功的经典证明。但是，决定性方程所能解释和说明的可积可解的力学问题只占力学系统中的极少部分，犹如凤毛麟角，而不可积力学系统则是俯拾皆是，多不胜数。其中一些不可积力学系统后来被发现是具有“内在随机性”的混沌运动系统，不仅成为今天物理科学研究的学科前沿，而且所提出的一些理论难题改变着我们对牛顿力学的传统看法，其中最为重要的就是对于确定性观念的怀疑和对于概率性思想的肯定。郝柏林由此提出了独到的“有限性原则”思想。他指出，完全的决定性和纯粹的随机性都隐含着承认某种无限过程为前提。就确定性而言，精确的运动轨道意味着观察主体可能以“无限”的精度进行测量；对随机性而言，任何有限长的随机数序列都可以通过有限精度的随机性检验，而只有“无穷”长的随机数序列才是“真正”随机的。但是，现实的物理过程并不能完全达到这样的精度要求，我们需要把有限性作为基本原则，从而消除决定性描述和概率性描述之间的人为鸿沟。郝柏林以实际物理过程难以达到“无限”精确度的事实为根据提出“有限性原则”，自然是从现实情况出发进行归纳而提出新的物理学原理的大胆尝试，但他又明确承认“如何表述有限性原则，尚有待继续研究”。