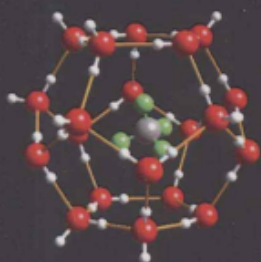


中国石油大学（华东）“211工程”建设重点资助系列学术专著

天然气水合物 开采理论与技术

Theory and Technology of
Natural Gas Hydrates Development



陈月明 李淑霞 郝永卯 杜庆军 编著

中国石油大学出版社

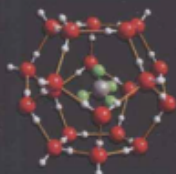


责任编辑: 穆丽娜

封面设计: WOOIL MEDIA · 友一广告传媒

天然气水合物 开采理论与技术

Theory and Technology of
Natural Gas Hydrates Development



ISBN 978-7-5636-3498-9



定价: 55.00元

中国石油大学(华东)“211工程”建设重点资助系列学

天然气水合物 开采理论与技术

陈月明 李淑霞 郝永卯 杜庆军 编 著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

天然气水合物开采理论与技术/陈月明等编著.

—东营:中国石油大学出版社, 2011.9

ISBN 978-7-5636-3498-9

I. ①天… II. ①陈… III. ①天然气水合物—采气

IV. ①TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 136398 号

书 名: 天然气水合物开采理论与技术

作 者: 陈月明 李淑霞 郝永卯 杜庆军

责任编辑: 穆丽娜(电话 0532—86981531)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180 mm×235 mm 印张: 22 字数: 443 千字

版 次: 2011 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 55.00 元

内 容 提 要

天然气水合物是一种非常规的、清洁的、不可再生的天然气资源。它严格受相平衡压力和温度的控制。只有当压力低于相平衡压力、温度高于相平衡温度时,天然气水合物才由固相逐渐分解为水相和气相,分解后的水 and 气才能多孔介质中流动,这和常规油气藏有很大的不同。为此,本书从能源需求关系出发,介绍了天然气水合物的基础知识、天然气水合物成藏和开采机理、天然气水合物开采技术的实验研究、天然气水合物开采技术的数值模拟研究,最后介绍了天然气水合物开采实例和安全评价。

本书可作为油气田开发学科研究生教材,也可供从事天然气水合物勘探和开发的工程技术人员参考。

总序

“211工程”是新中国成立以来，由国家立项展开的规模最大、层次最高的高等教育建设工程，是国家为振兴高等教育、建设人力资源强国而做出的重大教育发展决策。“211工程”抓住学科建设、师资队伍建设和决定高校水平提升的核心内容，通过重点突破带动高校整体发展，探索了一条高水平大学建设的成功思路。经过十多年的努力，“211工程”取得了显著成效，在学科建设、人才培养、科技创新等方面取得了丰富成果，使中国的高等教育产生了重大变化，大幅度拉近了我国高等教育与世界高等教育的距离，对于相关高校整体水平的提升产生了巨大的推动作用。

1997年，中国石油大学跻身“211工程”重点建设高校行列，形成了学校更好地开展高水平大学建设的重大历史机遇。经过“九五”、“十五”两期建设，进入“十一五”第三期建设，三期建设有机衔接，从重点学科建设到学科群建设，再到创新队伍建设和创新人才培养，学校“211工程”建设始终围绕提升学校水平这个核心，不断拓展建设思路和建设内容，其“以优势带整体，以特色促水平”的建设思想与学校发展整体思路实现了高度吻合。所以，十多年来，“211工程”建设的轨迹就是标识学校发展的一条主要线索。

“211工程”建设所取得的成效带来了学校办学水平的全面提升。依托“211工程”，经过十多年的建设和发展，学校主干学科优势和特色更加突出，带动了相关学科水平的提高，学科结构更加优化，学校进一步获得了国家对“优势学科创新平台”项目建设的支持；师资队伍建设成效显著，高层次人才明显增加，特别是培育发展起一些高水平团队；科技创新能力大幅提升，突出了在基础理论研究、应用研究等方面的优势，已初步建立起有学校特色的科技创新体系，在十多个研究领域居国内领先水平，有些达到国际先进水平，科技成果转化取得巨大社会效益和经济效益；人才培养质量明显提高，逐步建立起以素质教育为主导的科学的教育教学体系，有效保证了创新人才的培养；国际学术交流与

合作不断深入,学校开放办学和国际化程度得到大大推进;办学条件大幅改善,建成了先进的公共服务系统,形成了良好的软硬条件支撑。总体上,在“211工程”建设的推动下,办学水平大幅提升,学校办学特色更加鲜明,开创了学校建设高水平大学的良好局面。

“211工程”建设所取得的经验是学校办学的宝贵财富。首先,重点突破的策略保证了学校可以抓住影响办学水平的学科建设、创新能力等重点工作和任务,集中资源、队伍和时间进行重点建设及发展,有效提升了学校的核心竞争力;其次,滚动发展的思路保证了学校找准优势并不断强化优势,以点带面不断完善整体结构,促进了学校的协调发展和可持续发展;另外,以项目为平台进行系统组织的机制保证了学校加强统筹规划、资源整合、队伍整合,加强了对各个环节、各种因素的系统优化,建立了一系列行之有效的工作制度。

“211工程”建设也锻炼形成了一支甘于奉献、勇于创新的队伍,促进了全校在这样一个综合平台上的协同配合。在十多年的建设过程中,许多同志全身心投入有关工作,坚持不懈地追求更高水平和更高目标,有关部门协调一致,切实保证了各项建设任务的顺利实施。所以“211工程”也是学校的一项事业工程、合力凝聚工程。

学校现在已经展开“211工程”三期建设,同时正在进入建设“国内著名、石油学科国际一流的高水平研究型大学”的奋斗征程,“211工程”建设将继续成为学校实现新的发展目标的重要支撑。总结前期“211工程”建设的成功经验,充分展示“211工程”建设的丰富成果,对于更好地推动“211工程”建设,实现学校的奋斗目标,具有重要的现实意义。为此,学校决定设立专项资金,资助出版“211工程”建设有关的系列学术专著,分门别类地介绍和展示学科建设、学术发展、科技创新和人才培养等方面的成果和经验。虽然“211工程”建设作为一项综合性的重大工程,对其进行系统全面的总结存在一定难度,但相信这套丛书完全可以从不同的侧面、从一些具体的内容,展示我校“211工程”建设的巨大成绩和发展思路,对今后“211工程”建设和学校总体发展起到应有的启示和促进作用。

中国石油大学(华东)校长



二〇〇八年十月

序

天然气水合物是一种非常规的、清洁的、不可再生的天然气资源。自 20 世纪 90 年代以来,天然气水合物作为一种新能源已被各国争相研究。美国、俄罗斯、加拿大、日本、德国等相继投入巨资进行勘探和试验性开发,预计 2015 年后将进行工业化生产。我国从 1997 年开始,由国土资源部牵头在南海北部神狐海域和青海省祁连山南缘永久冻土带进行勘探,获得了可喜的成果。经预测,天然气水合物资源量巨大,其有机碳含量约占全球有机碳含量的 53%,约为现有石油、天然气和煤炭资源总量的两倍。天然气水合物的有效开采,必将缓解常规油气资源匮乏的压力,为国民经济的持续发展提供有力的支持。

天然气水合物藏开采的渗流规律和开发动态与常规油气藏有很大区别。在储层原始压力和温度条件下,天然气水合物呈固相存在;当压力低于临界压力、温度高于临界温度时,天然气水合物由固相逐渐分解为水相和气相。分解后的水和气在多孔介质中流动时,水气混流,气体膨胀,水气分布不断变化,各相的饱和度、渗透率均会发生变化。此外,当用加热法、降压法、化学法及综合法等进行开采时,还会出现一些非常复杂的物理化学过程。可见,天然气水合物藏开采的渗流问题是伴有极其复杂的物理化学过程的渗流问题;天然气水合物藏开采工程技术是一种高度复杂的固体-流体性质的资源-能源开采工程技术。为了有效地开发天然气水合物藏,必须及早地开展与此有关的科学研究和技术开发,打好科学基础,做好技术储备。

陈月明教授长期从事油气田开发的教学和科研工作,自 2003 年以来,潜心研究天然气水合物的有效开采,特别是以物理实验和数值模拟为主要手段研究了一系列问题,其中包括国家“863”课题。与之相应,已培养了一批从事天然气水合物开采技术研究的博士研究生,并从 2007 年开始开设硕士研究生课程——“天然气水合物开采理论与技术”。中国石油大学(华东)石油工程学院已成为我国最早从事天然气水合物开采的教学与科

研单位。

《天然气水合物开采理论与技术》一书是在教材试用的基础上修改完成的。该书分析了能源供需关系,综述了天然气水合物的基础性质、成藏机理及开采机理,详细阐述了用实验方法和数值模拟方法研究的与天然气水合物开采有关的一系列重要问题的部分结果。该书内容丰富,系统性强,既介绍了现有理论,又阐述了陈月明教授研究组的最新科研成果。

该书可作为油气田开发工程学科研究生及高年级本科生教材,也可供从事石油和天然气等能源工程的科技人员,特别是从事天然气水合物勘探和开发工程的科技人员参考。



(中国科学院院士)

2011年8月于北京

前言

能源是经济和社会发展最重要的战略资源之一,能源的安全程度关系到一个国家的生存和发展。在我国,常规油气资源的短缺已成为经济发展的瓶颈。天然气水合物是一种非常规的、清洁的、不可再生的油气资源,由于它具有资源量大、分布广的特点,将成为常规油气资源极具潜力的替代能源。

自20世纪90年代以来,世界各国特别是美国、俄罗斯、加拿大、日本、德国等率先投入巨资对天然气水合物藏进行勘探与开发。我国从1997年开始,由国土资源部中国地质调查局牵头,在海域和陆上进行勘探。2007年5月1日,在南海北部神狐海域成功钻获天然气水合物实物样品;2009年9月25日,又在我国青海省祁连山南缘永久冻土带成功钻获天然气水合物实物样品。这就说明我国是既在海域,又在陆域都蕴有天然气水合物的国家,具有广阔的天然气水合物开发前景。

中国石油大学(华东)石油工程学院油气田开发工程学科成立已近60年,具有丰富的油气田开发经验。天然气水合物藏的开发虽有其特点,但与油气田开发仍有很多相似之处,因此,从2003年开始,我们就开始开展天然气水合物藏开采的科研和教学工作,并参加了一系列相关会议:

2003年10月由国土资源部中国地质调查局和国家自然科学基金委员会地球科学部在青岛举办的“未来海底新能源——天然气水合物国际研讨会”;

2004年4月由国际科技数据委员会(CODATA)在北京举办的“天然气水合物工作组中国地区会议”;

2005年7月由国家“863”计划资源环境领域办公室在北京召开的“天然气水合物勘查开发关键技术研究发展战略座谈会”;

2005年12月由中国海洋石油总公司和中国科学院联合在北京举办的“天然气水合物技术研讨会”;

2008年11月由中国科学院广州天然气水合物研究中心等在广州举办的“第一届天然气水合物新能源论坛”;

2010年10月由中国地质调查局主办在青岛召开的“海峡两岸天然气水合物学术交流会”等。

与此同时,我们参与了国家高技术研究发展计划(“863”计划)2006—2010年度海洋技术领域天然气水合物勘探开发关键技术中“天然气水合物注热、降压单原理开采模拟技术”,主要是利用物理模拟和数值模拟方法研究天然气水合物注热、降压开采机理,动态和影响因素,为我国天然气水合物的开采提供了理论依据。

2007年,我们开设了硕士研究生课程——“天然气水合物开采理论与技术”,并编写了同名教材,该教材至今已试用了三届。本书是在试用教材的基础上修改、补充而成的。本书编写者分工如下:

陈月明 第一章;

李淑霞 第二、第三章;

郝永卯 第四、第六章;

杜庆军 第五章。

由于天然气水合物开采尚属探索阶段,缺乏实际开采经验,故书中所述内容必有不足,甚至谬误之处,有待于实践的验证,并敬请读者批评指正。

编著者

2011年8月

C O N T E N T S

目录

第一章 能源需求与天然气水合物	1
第一节 能源供需现状和预测	1
第二节 天然气水合物研究进展	19
第三节 天然气水合物勘探和资源量	26
参考文献	33
第二章 天然气水合物的基础性质	35
第一节 天然气水合物的基本概念	35
第二节 天然气水合物的结构	36
第三节 天然气水合物的热力学性质	42
第四节 天然气水合物的动力学性质	50
第五节 天然气水合物合成和分解实验研究	64
第六节 天然气水合物相平衡	77
参考文献	88
第三章 天然气水合物成藏及开采机理	93
第一节 天然气水合物的成因及成藏模式	93
第二节 天然气水合物的分布和资源量	109
第三节 天然气水合物的开采模式	120
参考文献	129
第四章 天然气水合物开采技术实验研究	132
第一节 多孔介质中天然气水合物实验系统概况	132
第二节 多孔介质中天然气水合物的基础性质	134

第三节 天然气水合物降压开采实验	158
第四节 天然气水合物注热开采实验	174
第五节 天然气水合物注化学剂开采实验	189
第六节 天然气水合物 CO_2 置换开采实验	193
参考文献	197
第五章 天然气水合物开采技术数值模拟研究	199
第一节 数值模拟研究概况	199
第二节 天然气水合物开采参数数学描述	203
第三节 天然气水合物开采数学模型简介	207
第四节 TOUGH2 中 HYDRATE 模块水合物模型	242
第五节 天然气水合物开采数值模拟模型	256
第六节 天然气水合物开采数值模拟技术应用	268
第七节 天然气水合物开采数值模拟研究中存在的问题	292
参考文献	293
第六章 天然气水合物开采实例与安全评价	295
第一节 Mallik 天然气水合物开采实例	295
第二节 麦索雅哈天然气水合物开采实例	319
第三节 天然气水合物开采安全评价	326
参考文献	333
附 录 单位换算表	335

第一章

能源需求与天然气水合物

能源是经济和社会发展最重要的战略资源之一,能源的安全程度关系到一个国家的生存和发展。常规能源包括煤炭、石油、天然气、水电、核能和可再生能源(如太阳能、风能、生物能等)。油气资源的短缺是我国经济发展的瓶颈。天然气水合物是一种非常规的、不可再生的油气资源,它的勘探与开发是由能源供需现状及其客观存在所决定的。从油气产量的预测可以看出,人类必须开发新的替代能源,而天然气水合物是一种资源量丰富的清洁能源。从 20 世纪 90 年代开始,天然气水合物就成了国内外的研究热点。本章从能源供需现状及其预测出发,简单介绍天然气水合物的研究进展、勘探现状及资源量。

第一节 能源供需现状和预测

一、世界油气供给现状和预测

自 19 世纪 70 年代的产业革命以来,化石燃料的消费急剧增大。初期主要以煤炭为主,进入 20 世纪以后,特别是第二次世界大战以来,石油及天然气的开采与消费开始大幅度地增加。1973 年 10 月,第四次中东战争爆发,阿拉伯国家纷纷要求支持以色列的西方国家改变对以色列的庇护态度,并决定利用石油武器教训西方大国。10 月 16 日,石油输出国组织决定提高石油价格。17 日中东阿拉伯产油国决定减少石油生产,并对西方发达资本主义国家实行石油禁运。石油提价和禁运立即使西方国家经济出现混乱。这是第一次石油危机。1978 年,伊朗发生推翻巴列维王朝的革命,社会和经济出现剧烈动荡。从 1978 年底至 1979 年 3 月初,伊朗停止输出石油 60 d,石油市场每天短缺石油约 $500 \times$

10^4 bbl, 约占世界总消费量的 $1/10$, 致使油价动荡和供应紧张。1980 年, 两伊战争爆发, 两国石油生产完全停止, 世界石油产量受到影响, 产量锐减, 全球市场上每天都约有 560×10^4 bbl 的缺口, 打破了当时全球原油市场上供求关系的脆弱平衡, 供应再度紧张, 再次引起油价上扬。这是第二次石油危机。虽然经历了两次石油危机, 且石油价格高涨, 但石油的消费量却不见有丝毫减少的趋势。

从资源总量供给来看, 全球油气资源安全是能够得到保障的。同时, 在经济全球化的大趋势下, 全球油气市场正朝着油气市场一体化和地区化的方向发展, 油气资源全球化成为现实。但在今后很长时期里, 油气资源分布与消费不平衡和产需不平衡的格局依然存在, 资源分配以及消费量的严重不平等是国际政治经济关系中的主要矛盾之一。总的来讲, 未来全球油气资源安全是有保证的, 在反恐大背景下, 各国之间可能会出现“多赢”的局面, 但也不能排除出现新的突变的可能。

世界各国的油气战略都从属于国家的能源战略, 油气战略是国家能源战略的重要组成部分, 是各国实现可持续发展的关键因素。20 世纪 90 年代开始, 各国的油气战略从以维持国家经济安全为核心的经济安全油气战略演变为以可持续发展为核心的油气战略。

1. 世界油气供给现状

近年来世界石油探明储量、石油产量、天然气探明储量以及天然气产量如表 1-1 所示。

表 1-1 世界油气供给现状

年 份	石油剩余可采储量/ (10^8 t)	石油产量/ (10^8 t)	天然气剩余可采储量/ (10^{12} m^3)	天然气产量/ (10^{12} m^3)
2001	1 561	35.98	174.39	2.49
2002	1 612	35.75	176.18	2.53
2003	1 628	37.03	179.21	2.62
2004	1 628	38.68	179.01	2.69
2005	1 638	38.95	179.83	2.76
2006	1 645	39.16	181.46	2.84
2007	1 688	40.75	177.40	2.90
2008	1 708	39.29	185.00	3.07
2009	1 817	38.20	197.50	2.99

注: 资料来源于 BP 公司。

2. 世界油气供给预测

世界油气供给预测如表 1-2、表 1-3 和表 1-4 所示。

表 1-2 世界石油供给预测

年 份	石油供给预测/(10 ⁸ t)		
	参考油价情况下	高油价情况下	低油价情况下
2015	49.15	45.30	50.70
2020	52.05	47.10	55.20
2025	55.35	49.00	59.75
2030	59.00	50.95	63.85

注:数据来源于美国能源情报署(EIA)。

表 1-3 世界常规天然气峰值产量预测(按地区)

地 区	产量 1997 /(10 ¹² m ³ · a ⁻¹)	累积产量		峰 值		储 量			储采 比/a	折耗 /(% · a ⁻¹)
		1997/ (10 ¹² m ³)	2050/ (10 ¹² m ³)	年份	产量 /(10 ¹² m ³ · a ⁻¹)	探明储量 /(10 ¹² m ³)	远景储量 /(10 ¹² m ³)	最终储量 /(10 ¹² m ³)		
北 美	0.783 91	29.205 6	50.713 6	1999	0.809 38	8.348 5	23.715 4	52.949 3	30	3.30
东欧和前 苏联国家	0.707 50	17.970 5	69.278 4	2032	1.024 46	56.684 9	78.560 8	96.531 3	111	0.90
西 欧	0.285 83	5.461 9	15.140 5	2002	0.339 60	4.811 0	10.386 1	15.848	36	2.75
亚 太	0.237 72	3.169 6	19.668 5	2012	0.472 61	9.084 3	19.413 8	22.583 4	81	1.23
中 东	0.135 84	2.122 5	31.582 8	2040	0.829 19	48.845 8	68.853 9	70.976 4	>250	0.20
非 洲	0.093 39	1.386 7	8.574 9	2014	0.203 76	9.876 7	12.055 8	13.470 8	128	0.78
中南美	0.079 24	1.556 5	8.065 5	2018	0.133 01	6.282 6	10.301 2	11.857 7	131	0.76
世 界	2.323 43	60.901 6	203.052 5	2014	2.796 04	143.933 8	223.315 3	284.216 9	96	1.04

表 1-4 世界常规天然气峰值产量预测(按组织)

组 织	产量 1997 /(10 ¹² m ³ · a ⁻¹)	累积产量		峰 值		储 量			储采 比/a	折耗 /(% · a ⁻¹)
		1997/ (10 ¹² m ³)	2050/ (10 ¹² m ³)	年份	产量 /(10 ¹² m ³ · a ⁻¹)	探明储量 /(10 ¹² m ³)	远景储量 /(10 ¹² m ³)	最终储量 /(10 ¹² m ³)		
OPEC	0.297 15	4.556 3	45.761 1	2038	0.987 67	61.552 5	86.456 5	91.012 8	>250	0.34
Non-OPEC	2.026 28	56.345 3	157.291 4	2004	2.230 04	82.381 3	136.858 8	193.204 1	68	1.48
OECD	1.112 19	35.771 2	69.476 5	2001	1.194 26	14.121 7	36.761 7	72.561 2	33	3.02
OECD- Europe	0.297 15	6.112 8	16.074 4	2002	0.348 09	5.150 6	10.669 1	16.781 9	36	2.78

组 织	产量 1997 /($10^{12} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	累积产量		年 份	产 量 /($10^{12} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	储 量			储采 比/a	折耗 /($\% \cdot \text{a}^{-1}$)
		1997/ (10^{12} m^3)	2050/ (10^{12} m^3)			探明储量 /(10^{12} m^3)	远景储量 /(10^{12} m^3)	最终储量 /(10^{12} m^3)		
Non-OECD	1.211 24	25.130 4	133.547 7	2031	2.190 42	129.812 1	186.553 6	211.655 7	154	0.65
IEA	1.064 08	34.299 6	64.269 3	2001	1.143 32	11.914 3	31.073 4	65.373 0	29	3.43
EU	0.240 55	4.895 9	10.301 2	2001	0.283 00	3.339 4	5.461 9	10.357 8	23	4.39

注: OPEC—欧佩克, 石油输出国组织; Non-OPEC—非石油输出国组织; OECD—经济合作与发展组织; OECD—Europe—欧洲经济合作与发展组织; Non-OECD—非经济合作与发展组织; IEA—国际能源署; EU—欧洲联盟。

3. 石油峰值预测

美国能源情报署(EIA)于2000年依据美国联邦地质调查局(USGS)“2000年世界油气评价”资源量结果,按照资源量低值(概率为95%)、期望值(概率为50%)和高值(概率为5%),假设年产量增长率分别按0%、1%、2%和3%计算,并把产量开始下降时的储采比定为10 a,预测了世界石油年产量的12种预测发展情况,如图1-1所示。如果世界原油产量保持2%的年增长率,以低值(概率95%)进行计算,预测的最终可采资源量为 $2\,248 \times 10^9$ bbl,则2026年为其预测产量高峰年,高峰年产量达 42.794×10^9 bbl左右;如果世界原油保持2%的年增长率,以期望值(概率50%)进行计算,预测的最终可采资源量为 $3\,003 \times 10^9$ bbl,则2037年为高峰年,高峰年产量达到 53.209×10^9 bbl左右;如果世界原油保持2%的年增长率,以高值(概率5%)进行计算,预测的最终可采资源量为 $3\,896 \times 10^9$ bbl,则2047年为高峰年,高峰年产量达到 64.862×10^9 bbl左右。以其他增长率(0%、1%、3%)预测的具体趋势分析及数据如图1-1和表1-5所示。

根据EIA的预测,无论是可采资源量的低值、期望值和高值,还是产量年均增长率为0%、1%、2%、3%,都会产生产量高峰年和高峰年产量,高峰年后产量将下降。但是随着经济的发展,对能源的需求总是不断增加的,因此当常规油气产量下降后,必然要用其他能源来替代,其中包括非常规油气资源(如煤层气、页岩气、天然气水合物等)。

4. 石油峰值产量预测理论

由于常规油气资源是不可再生能源,自然界的资源量是有限的。因此资源量和产量不可能无限增长,出现了各种峰值(Peak Value)理论及其预测方法。

石油峰值理论是研究石油产量长期评估和折耗的理论。综合对比国内外10多种关于石油峰值定量研究的模型,大体分为如下三类:① 基于生命有限体系的生命模型,如Hubbert模型、广义翁氏生命旋回模型和龚帕兹模型;② 基于概率论和统计学理论的随机模型,如威布尔模型、对数正态分布模型、瑞利模型和t模型;③ 基于生产实践和理论推理的广义数学模型,如HCZ模型、HC模型、广义I型数学模型和广义II型数学模型。