

露天矿开采方案优化

——理论、模型、算法及其应用

LUTIANKUANG KAICAI FANG'AN YOUHUA
——LILUN MOXING SUANFA JIQI YINGYONG

王 青 顾晓薇 胥孝川 著

非外借



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

露天矿开采方案优化

——理论、模型、算法及其应用

王青 顾晓薇 胥孝川 著

北京
冶金工业出版社
2018

内 容 提 要

本书系作者多年从事露天矿开采方案优化的研究成果及其应用的总结,内容包括最终境界优化、生产计划优化、境界与计划的整体优化以及分期开采优化等。全书系统地阐述了作者提出的优化理论、数学模型和优化算法。结合应用案例,对优化结果进行了比较详细的分析,对优化模型和算法的合理性、实用(适用)性和局限性进行了客观的评价。

本书可供从事矿山开采的工程技术人员、科研人员和管理人员阅读,也可供相关领域的工程技术人员和高等院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

露天矿开采方案优化:理论、模型、算法及其应用/
王青等著. —北京:冶金工业出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-5024-7773-8

I. ①露… II. ①王… III. ①露天开采—研究 IV.
①TD804

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 088748 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010) 64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 高娜 宋良 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红 禹蕊

责任校对 郑娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7773-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2018 年 5 月第 1 版, 2018 年 5 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 8.25 印张; 244 千字; 253 页

40.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010) 64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010) 64044283 传真 (010) 64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号 (100010) 电话 (010) 65289081 (兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjchs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

改革开放四十年来，我国的采矿业随着经济的快速增长取得了长足发展，在矿产资源的开采量上我国已经成为名副其实的矿业大国。如今，采矿业与其他行业一样，迎来了又一次历史性的转折：从追求量的增长的粗放式扩张转向以质的提升为核心的科学发展。实现这一转折，进而向矿业强国迈进，两大支柱不可或缺：一个是在行业层面上的科学宏观调控；一个是在企业层面上的科学开采。前者是采矿业科学发展的制高点和方向盘，后者是采矿业科学发展的具体实现。

就采矿业应用的科学技术而言，也许可以将之分为两大类：“硬技术”与“软科学”。前者主要包括开采装备、采矿方法和工艺，解决的是如何把矿石采出来的问题；后者主要包括开采方案和相关参数的优化与决策，解决的是如何更好地把矿石采出来的问题。一直以来，硬技术在我国采矿业的发展中占主导地位，采矿技术的进步也主要体现在硬技术上。如果说在改革开放初期我国采矿业发展的主要制约因素以及与国际先进水平相比的主要差距是硬技术，尤其是装备水平，那么如今我国在这方面可以说已经基本赶上了世界先进水平，不再是问题；如今的差距主要体现在软科学在采矿实践的应用上，而这也正是实现采矿业科学发展必须解决的核心问题之一。

露天开采的作业空间相对自由, 开采方案和相关参数的取值有较大的允许范围, 为相关软科学尤其是优化的应用提供了广阔的空间。另一方面, 露天矿生产规模一般较大, 投资高, 投资风险也高, 优化在最大限度地降低投资风险、提高投资收益上可以发挥重要作用, 发达国家的实践也充分表明了这一点。

然而, 露天开采是一个多层次的复杂系统工程, 在露天矿可行性研究及设计和生产过程中, 需要作出大大小小的决策, 确定各种方案和众多参数。在需要优化的众多要素中, 最终境界、生产能力、开采顺序和开采寿命等, 组成了露天开采的“大方案”, 对露天矿的总体经济效益和投资风险起着举足轻重的作用。如果这一大方案不科学, 那么无论其装备水平再先进、信息化程度再高, 也不能算作实现了科学开采。

作者三十余年来一直致力于露天矿开采方案的优化研究和应用开发, 基本上形成了一个较完整和较实用的理论、模型和算法体系。本书是这一体系及其应用案例的集成, 除第2章、第3章及第4章中境界优化的正锥开采法和图论法外, 均是作者的研究成果。第2章和第3章是对露天开采和矿床模型的概述, 是为后续的优化内容提供基础知识, 同时也使全书更具完整性和系统性。对这部分内容熟悉的读者可以跳过这两章。

本书的写作目的, 一是向读者介绍优化方法及其思路, 对有志于这一领域研究的读者有所启发; 二是以案例分析引导读者正确看待和应用优化。虽然本书对优化方法的阐述及

其应用案例均是针对金属露天矿，但优化模型与算法适用于除近水平矿层（如绝大多数煤矿）外的所有矿床；其优化思路也可为近水平矿层的露天开采优化提供借鉴。

科学研究是无止境的，一个问题往往没有最终答案。露天矿开采方案的优化问题也是如此，它会随着科学技术的发展和研究的不断深入，得到越来越好的解决。笔者衷心希望有更多的人加入到这一领域的研究之中，也希望学术界与工业界的读者以批评、挑剔的眼光阅读此书，提出不同的学术观点，甚至是不客气的批评。

希望本书的出版能为我国露天矿实现科学开采做出一点贡献。谨以此书献给致力于实现科学采矿的人们。

王 青

2018 年元月

于东北大学

目 录

1 绪论	1
1.1 计算机及优化在采矿业的应用概述	1
1.2 最终境界优化方法概述	3
1.3 生产计划优化方法概述	5
1.4 生产计划和最终境界同时优化方法概述	8
1.5 地质不确定性及其在露天矿优化中的应用概述	8
2 露天开采概述	10
2.1 露天开采的一般时空发展程序	10
2.2 最终帮坡角	13
2.3 境界剥采比与经济合理剥采比	16
2.4 工作帮坡角与生产剥采比	20
2.5 分期开采	25
3 矿床模型	29
3.1 矿床模型基本概念与类型	29
3.2 地质统计学概论——克里金估值法	32
3.2.1 基本概念与函数	32
3.2.2 实验半变异函数及其计算	36
3.2.3 半变异函数的数学模型	41
3.2.4 半变异函数的拟合	44
3.2.5 各向异性	46
3.2.6 半变异函数平均值的计算	48
3.2.7 克里金估值	49
3.2.8 影响范围	53

3.2.9 克里金法建立矿床模型的一般步骤	54
3.3 距离反比法	55
3.4 价值模型	57
3.5 标高模型	59
3.6 小结	63
4 最终境界优化与分析	66
4.1 基本数学模型	66
4.2 浮锥法 I——正锥开采法	67
4.2.1 基本算法	68
4.2.2 锥壳模板	72
4.3 浮锥法 II——负锥排除法	73
4.3.1 最大境界的圈定——几何定界	74
4.3.2 负锥排除算法	77
4.4 LG 图论法	85
4.4.1 基本概念	85
4.4.2 树的正则化	88
4.4.3 境界优化定理及算法	89
4.4.4 算例	91
4.5 案例分析	96
4.5.1 矿区地表地形及地表标高模型	96
4.5.2 矿体及块状品位模型	98
4.5.3 相关技术经济参数	101
4.5.4 优化结果	101
4.5.5 境界分析	103
4.6 小结	111
5 境界优化与边界品位	113
5.1 露天矿边界品位的计算模型	114
5.2 案例矿床模型	118
5.3 给定条件下境界和总利润随边界品位的变化	119

5.3.1	境界总利润随生产边界品位的变化特征	121
5.3.2	境界总利润随设计边界品位的变化特征	124
5.4	不同技术经济条件下境界和总利润随边界品位的变化	125
5.5	技术经济参数出现较大变化而境界不变对总利润的影响	128
5.6	小结	132
6	全境界开采的生产计划优化理论与模型	134
6.1	相关概念与定义	134
6.2	优化定理	137
6.3	优化模型	142
6.4	动态规划模型	144
6.5	枚举模型	147
6.6	储量参数化模型	149
6.7	小结	152
7	全境界开采的生产计划优化算法与应用	153
7.1	地质最优开采体序列的产生算法	153
7.2	可行计划路径	157
7.3	动态规划算法	158
7.4	枚举算法	161
7.5	算法应用与评价	165
7.5.1	输入数据	165
7.5.2	地质最优开采体序列	168
7.5.3	生产计划优化结果	171
7.5.4	分析与评价	174
7.6	小结	180
8	最终境界与生产计划的整体优化	181
8.1	地质最优境界	181

8.2	地质最优境界序列的产生算法	182
8.3	境界与生产计划整体优化算法	186
8.4	案例应用与分析	187
8.4.1	给定技术经济条件的优化结果	188
8.4.2	精矿价格对最佳方案的影响	191
8.4.3	精矿价格和生产成本随时间变化对最佳 方案的影响	196
8.5	境界和生产计划整体优化与单独优化的对比	199
8.6	小结	204
9	分期开采优化	205
9.1	分期方案优化原理	205
9.2	分期方案优化模型	208
9.3	分期方案优化算法	212
9.4	分期方案优化案例	216
9.5	分期开采计划优化原理	221
9.5.1	相关概念与定义	221
9.5.2	可行采场状态的产生算法	225
9.5.3	开采计划优化原理	227
9.6	分期开采计划优化模型	232
9.7	分期开采计划优化算法	238
9.8	小结	243
	参考文献	245

1 绪 论

采矿领域的优化研究和应用是随着计算机技术的发展而发展的。在半个多世纪的发展历程中,逐渐成为采矿领域一个相对独立的研究方向——矿山系统工程,也逐渐形成了一个活跃在全世界的研究和开发队伍。APCOM (Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry) Symposium, 作为矿山系统工程研究、开发和应用的国际学术交流平台,到2017年已经在世界各国举办了38次。国际上先后出现了多家实力雄厚的矿用专业软件公司,专门开发以矿床建模和矿山优化设计为核心功能的软件系统,促进了相关研究成果的转化。可以说,优化研究和应用的日益广泛和深入,是采矿业技术进步的重要标志之一。

本章首先对计算机及优化在国内外采矿业的应用历史和现状作一概述,然后对与本书内容直接相关的研究文献作一较为全面的梳理,并对相关优化方法进行归类 and 简要综述,为致力于矿山系统工程研究的读者提供文献查阅引导。

1.1 计算机及优化在采矿业的应用概述

计算机从20世纪60年代开始在西方国家应用于采矿业。计算机处理能力的不断提高,极大地促进了矿山(特别是露天矿)设计与生产中各种优化方法和算法的研究与应用,也使矿山生产的自动化水平不断提高。国际上计算机和优化在采矿业的应用大致可以分为如下几个阶段:

(1) 简单计算阶段。这个阶段大约对应于20世纪60~70年代。计算机主要用于手工设计与计划编制等工作中的基本数据运算,其作用主要是节省计算时间,加快设计与计划编制速度。

(2) 计算机辅助设计(CAD)阶段。到20世纪80年代,计算机的处理能力达到了一定的水平,以AutoCAD为代表的一些图形处

理软件开始出现,矿山的设计与计划工作开始在这样的软件平台上进行,设计、计划图纸的绘制、输出以及设计和计划中矿岩量和品位等的计算均在计算机上完成,大大提高了工作效率,也使多个开采设计方案的分析比较和优选成为可能。同时,计算机管理信息系统也开始得到应用。到后来,计算机辅助设计主要用于优化结果的后处理(即把优化结果加工为符合所有现实约束条件的可行方案),以及其他一些辅助性的图形处理工作。

(3) 优化应用阶段。计算机使优化理论走出书本,在矿山设计和生产中发挥作用。虽然有关矿山优化方法的研究始于20世纪60年代,但相关研究的大量开展和研发成果在实践中“较成气候”的应用和推广,则始于20世纪80年代;到20世纪90年代,研究和应用的深度和广度都达到了相当高的水平。优化方法及其应用涉及矿山的许多方面,例如:地质统计学品位估值;最终境界优化;生产计划优化;边界品位优化;运输调度优化;设备配置、更新及维修和养护计划优化;备品备件存量优化;等等。优化实质上是在矿山企业的这一微观层次上为管理和工程技术人员提供科学的决策支持,对降低生产成本和提高矿山项目的投资收益发挥了重要作用。

(4) 自动化与智能化阶段。功能日益强大的计算机网络与定位和传感技术一起,使矿山开采中主要设备和设备系统的全自动化和智能化运行成为可能,如铲运机、凿岩台车、锚杆机、电铲等的远程操控,无人驾驶的全自动化运输系统等。这些系统的研发与试验大约始于20世纪90年代,如今已在越来越多的矿山得到应用。许多业内人士认为,矿山开采将在可预见的将来进入采场无人的全自动化、智能化时代。

在我国,计算机在矿山的应用始于改革开放初期的20世纪80年代。改革开放使这一领域的信息涌入国内,掀起了一阵计算机和优化热。一些大学的采矿工程系成立了系统工程研究室;当时的冶金工业部组织多家高等院校和研究院所在试点矿山开展科技攻关,研发矿山设计、计划、调度等方面的软件系统和控制系统。然而,研发成果未得到推广,在试点矿山的应用也很快流产。

到20世纪90年代,国内采矿业界似乎对计算机和优化在生产中

的作用感到失望,失去了兴趣。这一时期随着计算机网络的发展,计算机在矿山的应用重点转向了管理领域,管理信息系统、网络化办公系统、财务管理系统等在越来越多的矿山得到应用;在与矿山生产直接相关的设计和计划工作上的应用,主要方式是在 AutoCAD 上的计算机辅助设计,但应用并不普遍,许多矿山仍停留在手工设计阶段;在露天矿运输调度方面,从国外引入了一套计算机自动调度系统,但并未得到推广。

进入本世纪,计算机及其网络技术在一些其他行业的应用迅速推广,可谓形势逼人。采矿界再次意识到信息化是矿山技术发展的一条必由之路,“数字矿山”一时间成了我国采矿业界的热词。于是,不少矿山与科研单位合作,开展所谓的数字矿山建设。这一轮新热潮推动了计算机网络系统在矿山非生产性领域(主要是管理方面)越来越广泛的应用;在与生产直接相关的领域,开始出现少数专门为矿山开发建模、设计和计划软件的专业化公司,其产品也得到一定程度的推广应用,但所发挥的作用仍属于计算机辅助设计范畴;在露天矿运输调度方面,开始有了国内开发的计算机调度系统,在一些矿山得到应用。

值得重视而又不无遗憾的是,优化在我国的矿山生产中一直没有得到较为广泛的、经常性的应用;少数应用基本上是“一次性”的,几乎都是矿山与科研单位以科研项目形式,对某个方案或某些参数进行优化,项目结束后优化不再持续。更为不幸的是,如今致力于矿山优化研究的学者也越来越少了。优化的应用应该是科学发展观落实在采矿业的重要体现和标志之一。试想,即使是实现了全自动化的无人采矿,如果开采方案本身不好,未必能算得上是科学开采。而且,发达国家的实践表明,优化在矿山生产中的应用能够带来巨大的经济效益(包括降低投资风险)。如果说我国当今的采矿技术水平与国际先进水平还有差距的话,最突出的差距之一恐怕就是优化的应用了。

1.2 最终境界优化方法概述

在传统的手工设计中,最终境界的设计以“境界剥采比等于经济合理剥采比”为基本准则,一般是在垂直剖面图上以试错的方式

找出各个剖面上的境界位置,而后投影到分层平面图上进行调整,形成设计方案。这一方法也有优化的成分,因为经济合理剥采比是使盈利增量为0的境界剥采比,依据上述准则设计的境界是总盈利最大的境界。在计算机辅助设计中,基本原理和方法步骤与手工法相同,计算机代替了手工设计中的图板、求积仪和计算器;绘图在计算机屏幕上(或借助数字化仪)进行,相关计算和图纸输出都由计算机完成。

块状矿床模型(Block Model)的出现,为各种境界优化方法的研究和应用开辟了广阔的天地,许多优化方法问世。所有优化方法几乎都是基于块状矿床模型,以最大允许帮坡角为约束条件,求解使总盈利最大的模块的集合(即最佳境界)。这些方法大体上可以分为两大类:近似(也称为“准优化”)方法和数学方法。

近似法中最具代表性的是浮锥法,它是直到20世纪80年代应用最广的境界优化方法。浮锥法包括正锥开采法和负锥排除法,在本书的第4章有详细的介绍。由于浮锥法不能保证所得结果就是总盈利最大的那个境界,所以一些研究者对浮锥法进行了算法上的改进^[1,2]。还有一些优化最终境界的其他近似方法^[3-5],但未得到较广泛的应用。

数学方法中最具代表性的是图论法。该方法首先由 Lerchs 和 Grossmann 于1965年提出^[6],所以也称为“LG图论法”。这是一个严格意义上的境界优化方法,即对于给定的矿床块状价值模型,一定能得出总盈利最大的境界。该方法依据最终帮坡角的约束,将矿床块状价值模型转化为一个有向图来求解总盈利最大的境界,在本书的第4章有详细的介绍。由于该方法的运算量和对内存的需求都较大,受到当时计算机运算速度和内存容量的制约,其应用在一段时间里受到限制;一些研究者也因此具体算法上进行了改进^[7-10]。上世纪80年代,Whittle公司开发了LG图论法的软件包,向矿山推广并免费提供给学校的使用者,大大促进了该方法的推广应用^[11,12]。到上世纪末,计算机的速度和容量不再是图论法的制约,这一方法已经成为国际上几乎所有商业化矿用专业软件系统的“标配”模块,如Whittle、Maptek和Datamine等公司的产品均含有LG图论法^[13-15]。该方法在国际上得到普遍应用,已经成为境界优化的经典方法。

另一种优化境界的数学方法是动态规划法。二维动态规划法也是首先由 Lerchs 和 Grossmann 于 1965 年与图论算法在同一篇论文中提出的^[6]。该方法在二维空间中很有效,但不适用于三维空间。一些学者试图将这一方法扩展到三维空间^[16-18],但都不很成功。

网络流法是优化最终境界的又一种数学方法。该方法最早由 Johnson 在其求解多时段开采计划问题中提出^[19],之后,不少学者进行了研究^[20-25],但在实践中并未得到推广应用。也有个别研究者把境界优化问题转化为运输问题进行求解的^[26]。

就求解最大盈利的境界而言,境界优化问题可以说是一个已经解决的问题。由于没有了计算机速度和容量的限制,LG 图论法已成为实践中应用的“标准”方法。因此,进入本世纪以来,鲜有人研究这一问题了。近期对境界优化问题的研究主要是针对各种相关参数和条件的处理,提出不同方法,如考虑地质构造、水文和岩土条件等因素用神经网络 (Neural Network) 和人工智能 (Artificial Intelligence) 求得一个好境界^[27],或考虑境界形态的不确定性 (概率),应用马尔科夫链求解^[28]。

1.3 生产计划优化方法概述

露天矿生产计划在本书中特指贯穿整个开采寿命的长期计划,包括生产能力、开采顺序和开采寿命。编制生产计划就是确定每年开采多少矿石、剥离多少废石 (即生产能力),每年开采和剥离哪些区域或各个台阶如何推进 (即开采顺序),以及开采时间跨度 (即开采寿命)。一般情况下,生产计划是在已圈定的最终境界中进行 (若采用分期开采,先要圈定各分期境界)。传统的编制生产计划的一般步骤是:首先依据可采储量确定年矿石生产能力;然后依据最终境界 (或各分期境界) 中各台阶的矿石和废石量,应用 PV 曲线法进行生产剥采比均衡,大致确定每年的废石剥离量;最后在分层平面图上,逐年进行采剥过程模拟,确定每年末各台阶的推进位置,使开采的矿石量满足预定的年矿石生产能力、剥离的废石量基本与生产剥采比均衡结果相一致。这是一个繁琐的试错过程。进入计算机辅助设计阶段后,这一试错过程在计算机上进行,大大加快了计划编制速度,也使

计划方案的比较和优选成为可能。

长期生产计划为一个矿山（新矿或已投产矿山）提供了未来生产策略，而且对于一个给定矿床，生产计划的优劣对基建投资和投产后的现金流在时间轴上的分布，进而对整个矿山项目的投资收益率，有重大影响。这就是为什么国际上的矿业公司对生产计划的优化有浓厚的兴趣，生产计划优化方法一直是矿山系统工程的一个热门研究课题。

从优化的角度看，露天矿生产计划就是确定块状矿床模型中每个模块的开采时间，或者说确定每年应开采哪些模块，以使总净现值达到最大，同时满足露天开采的时空关系和技术及经济上的一些约束条件。

最早出现并得到应用的生产计划计算机优化方法是“开采增量排序法”。该方法首先产生一系列符合帮坡角要求的开采增量，然后用某种方法对这些增量进行排序，找到满足预定目标和约束条件的生产计划。有时，开采增量的产生和排序是同时进行的。这一方法最早由 Kennecott 公司的工程师们首先提出并在该公司得到应用^[29]。他们通过构造锥体来产生开采增量，以人机交互的试错方式进行锥体构造、评价和排序。这一试错法被称为“浮锥开采器”法，有较强的实用性，也被应用到其他一些案例^[30,31]。

用于生产计划的开采增量可以通过产生一系列嵌套境界来求得。“嵌套”是指小的境界被所有比它大的境界完全包含，系列中境界之间的增量就是计划中的开采增量。“参数分析（Parametric Analysis）”是产生嵌套境界系列的常用方法。参数化的思想首先由 Lerchs 和 Grossmann 于 1965 年提出^[6]，后来又发展为“储量参数化（Reserve Parameterization）”法，不少学者对储量参数化的求解及其在生产计划中的应用进行了研究^[32-37]。参数化的一个内在缺陷是“缺口”问题，即在所产生的境界系列中，某些相邻境界之间的增量很大，以至于境界系列无法用于生产计划优化。为此，一些研究者用近似（Heuristic）算法产生嵌套境界序列以克服缺口问题^[38-40]。对于开采增量（或境界系列）的排序，较常用的优化方法是动态规划^[41-43]。

如前所述，生产计划优化问题的本质是在满足必要的约束条件的

前提下,找出每一模块的最佳开采时间,以获得最大的总净现值。这是一个典型的线性规划问题。因此,线性规划(具体形式包括混合规划、纯整数规划和0-1规划)是求解生产计划优化问题的最常用的数学优化方法之一,早在20世纪60年代末就有相关研究^[19,44];不少研究者针对生产计划问题的不同侧面建立了不同具体形式的线性规划模型^[45-50]。

然而,当以块状矿床模型中的单个模块作为决策单元时,优化生产计划的线性规划模型的变量数目和约束方程数目太过巨大,即使是今天的计算机,也难以直接求解;如果是整数规划,就更难求解了。因此,一些研究者试图在数学模型形式(主要是约束条件)的构造上或求解算法上(通常是借助近似算法)寻求出路,以提高求解速度^[51-55]。更常见的途径是通过增大决策单元来减少变量和约束数目,例如,把矿床模型中的模块组合为“单元树”作为优化中的决策单元,或以台阶或盘区(Panel)为决策单元^[56-63]。然而,大决策单元由于计划精度(或分辨率)低而导致结果与最优计划有较大差距,也降低了结果的实用性。为此,不少研究者利用数学模型的特殊结构,用拉格朗日松弛法来减小模型规模,并借助一些其他措施和算法(如迭代、分解、梯度法、Dantzig网络流法等)求解^[64-74]。这一方法的最大障碍是“缺口”问题,一些研究者们针对这一问题想了各种办法,但始终未得到较好的解决。

露天矿生产计划是一个典型的多时段决策问题,而且时段之间相互联系,所以也很适合用动态规划求解。因此,动态规划也是求解这一问题的最常用的数学优化方法之一,不少研究者用动态规划研究了生产计划不同侧面的优化问题^[75-86]。

由于应用数学优化模型求得生产计划的精确解有难以克服的困难,一些研究者转而求助于近似算法,如遗传算法(Genetic Algorithm)、随机局部搜索(Random, Local Search)、颗粒群移动算法(Particle Swarm Algorithm)、模拟(Simulation)等,来求得一个或多个“好”的计划^[87-96]。

可见,由于生产计划优化问题的高度复杂性和由此带来的求精确解的困难,至今还是一个较为热门的研究课题。