

基于优化决策的非传统海外油气项目 评价的动态规划模型研究

张向东¹, 张传平²

(1. 中石化胜利石油管理局 黄河钻井总公司, 山东 东营 257060; 2. 中国石油大学 经济管理学院, 山东 东营 257061)

[摘要] 近年来,在国际石油/天然气合作领域中,对已探明或正在开发的油田的开发和生产作业项目,因其不涉及石油勘探,故称其为非传统油气项目合同,研究这类合同项目的评估也引起了极大关注。基于投资者增加推迟投资选择从而增加管理柔性的实物期权决策法,被引入石油勘探开发投资的经济评价中。但实物期权决策法对油气项目评估的实践意义,由于问题过于复杂,目前尚未建立起具有可操作性的评估模型;实物期权方法虽凸显出净现值方法的某些局限性,但是仍不足以动摇净现值方法的基础地位。在净现值法基础上,利用动态规划实现跨期优化,解决了非传统油气项目合同经济评价中的原油价格、自然递减率等外生参数的选择,实现了资金等约束条件下的内生变量——每年钻井数的优化,不仅得到多阶段决策问题的最优策略(最优开发方案),基于此基础上的净现值计算结果也实现了对非传统海外油气项目的评估。

[关键词] 油气项目;评估;现金流;跨期最优化;动态规划

[中图分类号] F407.22 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-5595(2009)03-0005-(05)

中国经济社会发展对石油表现出了旺盛需求,“十五”期间的年均增长率为6.2%。2007年中国原油表观消费量约为3.46亿吨,同比增长7.3%,达历史高位。2007年中国净进口原油15928万吨,同比增长14.7%,原油对外依存度达到46.05%^[1]。根据“立足国内资源、充分利用国际资源,在保证供给和经济可承受性的前提下最大限度地优化能源结构;保障国家能源安全;环境质量明显改善,可持续发展能力明显增强”的能源政策,充分利用国内国外两种资源、两个市场,开拓国外油气资源,中国对外合作取得了较快发展,目前已在五大洲20多个国家拥有勘探开发项目40多个。因此,进行海外油气项目评估具有极大的现实意义。

一、非传统的海外油气项目简介

对海外油气项目而言,在国际石油合作的发展过程中,经历了租让、对抗和合作三个不同性质的阶段,在三个阶段演变的过程中,国际石油合作合同也发生了质的变化。20世纪70年代以来,随着国际

政治形势的变化,国际石油合作合同逐步体现了公平合理、双方平等、双赢互利的原则,并在全球范围内形成了几种相对固定的模式与惯例,如租让制合同(License Agreement)、产量分成合同(Product Share Contract)、风险服务合同、纯服务合同、联合经营(Join Venture)^[2]等。

近些年来,出现了一些不属于上述五种类型的石油合同。采用这些合同形式的主要是那些原来没有对外开放、全部上游业务都由本国国家石油公司经营的国家。这类合同包括以下几种形式:(1)东道国与外国石油公司签订合同,将一个油田(或其中一部分)交给外国石油公司进行生产(如阿根廷、阿尔及利亚、中亚国家);(2)东道国与外国石油公司签订合同,由外国石油公司来开发那些由东道国国家石油公司发现,但尚未开发的油田(如印度、土库曼斯坦);(3)东道国与外国石油公司签订合同,由外国石油公司对那些已经开发,但又已停产的油田进行重新开发生产(如委内瑞拉、缅甸);(4)东道

[收稿日期] 2008-12-08

[作者简介] 张向东(1966-),男,陕西三原人,胜利石油管理局黄河钻井技术发展科副科长,高级工程师;张传平(1957-),男,山东淄博人,中国石油大学(华东)经济管理学院教授,博士,研究方向为管理科学与工程。

国与外国石油公司签订合同,由外国石油公司在投产油田进行提高采收率作业(如印度尼西亚、缅甸、阿尔及利亚、罗马尼亚)。尽管这几种合同可能沿用前述五种合同的基本框架,但是它们涉及的作业领域都是已探明或正在开发的油田的开发和生产,而不涉及石油勘探。从这个意义上讲,它们与上述五种类型的合同是有明显区别的,故称之为非传统的油气项目合同,并且这类合同的运用已经越来越普遍。

二、油气项目评估方法评述

随着资产评估学的发展,项目经济评价方法得到了极大丰富。尤为引人关注的是基于投资者增加推迟投资选择从而增加管理柔性,以求使石油勘探开发投资的经济效果得到更为客观的评价,许多理论研究者与业界人士作了大量工作,亦有不少成果问世^[3-5]。这种发现蕴含于管理柔性中的价值的方法,实质是实物期权决策法。至于实物期权决策法对油气项目评估的实践意义,更多的结论是“由于问题过于复杂,目前尚未建立起具有可操作性的评估模型”^[6],实物期权方法虽凸显出净现值方法的某些局限性,但是仍不足以动摇净现值方法的基础地位。

本文在年现金流计算净现值基础上的跨期最优化,利用动态规划(Dynamic Programming, D. P.)计算结果实现对多阶段决策问题——非传统海外油气项目的评估。

三、多阶段决策问题与 D. P.

对多阶段决策问题,当用 $x(k)$ 表示决策系统的状态时,描述决策系统内在规律的状态方程记为:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \tag{1}$$

决策问题的目标函数记为:

$$J_N = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k)) \tag{2}$$

其中,式(1)、(2)中的 $u(k)$ 为决策变量。

多阶段决策问题就是求一个决策序列 $u(0), u(1), \dots, u(N-1)$, 使得目标函数 J_N 最大(或最小)。

假设系统给定的初始状态为 $x(0) = x_0$, 在目标函数中逐次应用状态方程,可得到 N 步决策的目标函数值:

$$J_N = L(x(0), u(0)) + L(x(1), u(1)) + \dots + L(x(N-1), u(N-1)) = L(x(0), u(0)) + L(f(x(0), u(0)), u(1)) + \dots \tag{3}$$

经逐次代入可得到:

$$J_N = J_N(x(0), u(0), u(1), \dots, u(N-1)) \tag{4}$$

如果用某种方法求出了使 J_N 最大/最小的最优策略 $u^*(0), u^*(1), \dots, u^*(N-1)$, 则式(4)为:

$$J_N^*(x(0)) = J_N(x(0), u^*(0), u^*(1), \dots, u^*(N-1)) \tag{5}$$

式(5)表明,多阶段决策的最优策略只依赖于系统的初始状态 $x(0)$ 。

(一)多阶段决策问题的最优性原理

多阶段决策问题的最优性原理可表述为:如果 $u^*(0), u^*(1), \dots, u^*(N-1)$ 是最优策略序列,那么它的一部分 $u^*(1), u^*(2), \dots, u^*(N-1)$ 也是一个最优策略序列。其反证法的证明是无须赘述的^{[7]156-192; [8]1-27}。

(二)多阶段决策问题的 D. P. 技术与 Bellman 方程

假设 $u^*(0)$ 已给出,那么求 $u^*(1), u^*(2), \dots, u^*(N-1)$ 的问题就构成一个初始条件为 $x(1) = f(x(0), u^*(0))$ 的 $N-1$ 阶段决策问题,这一问题的目标函数最大值记作 $J_{N-1}^*(x(1))$, 则有:

$$J_N^*(x(0)) = \max_{u(0), u(1), \dots, u(N-1)} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k)) \right\} = \max_{u(0), u(1), \dots, u(N-1)} \left\{ L(x(0), u(0)) + \sum_{k=1}^{N-1} L(x(k), u(k)) \right\} = \max_{u(0)} \left\{ L(x(0), u(0)) + \max_{u(1), u(2), \dots, u(N-1)} \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} L(x(k), u(k)) \right\} \right\} = \max_{u(0)} \left\{ L(x(0), u(0)) + J_{N-1}^*(x(1)) \right\} \tag{6}$$

方程 $J_N^*(x(0)) = \max_{u(0)} \left\{ L(x(0), u(0)) + J_{N-1}^*(x(1)) \right\}$ 称为 Bellman 方程或动态规划的基本方程,它给出了 N 阶段决策问题的目标函数值与它的子问题(一个 $N-1$ 阶段决策问题)的目标函数值之间的递推关系,即递归关系,故 Bellman 方程也称递归方程。与式(6)同理可得一般的多阶段决策问题的递归方程形式:

$$J_{N-i}^*(x(i)) = \max_{u(i)} \left\{ L(x(i), u(i)) + J_{N-i-1}^*(x(i+1)) \right\} \tag{7}$$

于是,通过 Bellman 方程可以把一个多阶段的决策问题化为若干个子问题,而在决策的每一阶段,只需对一个变量进行优化。

当一个多阶段的决策问题从最后一步开始递归求解,即逆序(顺序法同理)递归求解时,有如下步骤。

首先考虑最优化问题:

$$J_1^*(x(N-1)) = \max_{u(N-1)} L(x(N-1), u(N-1)) \tag{8}$$

这是一个对 $u(N-1)$ 静态最优化的问题,解这

个问题得到 $u^*(N-1)$,代入式(8)后求得 $J_1^*(x(N-1))$ 。由 Bellman 方程又得:

$$J_2^*(x(N-2)) = \max_{\substack{u(N-2) \\ x(N-1)=f(x(N-2),u(N-2))}} \{L(x(N-2), u(N-2)) + J_1^*(x(N-1))\} \quad (9)$$

由于 $J_1^*(x(N-1))$ 已求出,故式(9)又是一个静态优化问题,通过一阶必要条件:

$$\frac{\partial L}{\partial u(N-2)} + \frac{dJ_1^*(x(N-1))}{dx(N-1)} \frac{\partial x(N-1)}{\partial u(N-2)} = \frac{\partial L}{\partial u(N-2)} + \frac{dJ_1^*(x(N-1))}{dx(N-1)} \times \frac{\partial f(x(N-2), u(N-2))}{\partial u(N-2)} = 0 \quad (10)$$

求得 $u^*(N-2)$,代入 $J_2^*(x(N-2))$,进而实现下一步递推。一般形式的一阶必要条件为:

$$\frac{\partial L}{\partial u(i)} + \frac{dJ_{N-i-1}^*(x(i+1))}{dx(i+1)} \frac{\partial f(x(i), u(i))}{\partial u(i)} = 0 \quad (11)$$

表 1 海外非传统石油合同中的现金流核算

主营业务收入	主营业务利润	营业利润	无负债应税利润	税后净营业收入
减:操作成本	加:其他业务利润	加:投资收益	减:所得税	加:折旧
折旧	减:营业费用	补贴收入	加:递延税收增加	减:营运资本增加
税与费	管理费用	营业外收入		资本费用
	财务费用	减:营业外支出		长期投资
主营业务利润	营业利润	无负债应税利润	税后净营业收入	净现金流

对项目寿命期内的第 k 年而言,其现金流取决于该年生产井数、单井年产量、油价及费用支出等。但是,更需注意的是第 k 年的生产井数既有第 k 年新井,也有已往老井,新井、老井不仅年产量不同、产量递减率不同,而且新井还有钻井费用及其伴随新井投产发生的地面建设成本的问题。当取 $x(k)$ 表示累计至 k 年末油井数, $u(k)$ 表示 k 年新投产井数,非传统合同的油气项目(多阶段决策与跨期最优化问题)的最优控制模型可概念性地表示为:

$$\max z = \sum_{k=0}^{n-1} L(x(k), u(k)) \quad (12)$$

$$\text{s. t. } x(k-1) = x(k) - u(k)$$

(二)基于优化决策的油气项目评估的 D. P. 模型的具体设计

1. 原油价格

主营业务收入取决于当期原油产量及其价格,由于原油价格预测长期以来一直是令预测者大跌眼镜之事,但不违实际,一定时间内的原油价格变化区间还是可以确定的。如利用随机函数产生的在未来可预见的时间内,原油价格在 60~100 美元/桶间的价格序列如表 2 所示。

逐次应用 Bellman 方程,就可以由后向前逐次求出所有决策变量,整个过程就把原来 N 阶段的决策问题化成一系列对单变量求最大/最小值的问题^{[7]156-192;[8]1-27}。最优性原理保证这种分步最优化的过程得到的结果与同时确定最优控制的结果相同^[9]。

四、基于优化决策的海外非传统油气项目评估的 D. P. 模型

(一)总体概念模型设计

海外非传统合同油气项目的经营涉及多阶段决策问题,因此,不仅其开发方案可用 D. P. 进行优化,而且用 D. P. 跨期优化的开发方案的结果,也完全可以用来进行项目自身的评估。

项目评估中,现金流计算是最基本的,为此,在项目寿命期内需要逐年计算表 1 中条款(但也有项目并不包括这么多项)。

表 2 一个连续 20 年的原油价格随机序列 美元/吨

序号	价格	序号	价格
1	580	11	519
2	511	12	452
3	579	13	527
4	495	14	643
5	567	15	599
6	467	16	532
7	459	17	587
8	591	18	539
9	515	19	508
10	619	20	655

2. 产量自然递减率

油藏地质条件决定的自然递减率是能够得到的,如某个案实例,见表 3。

表 3 国外某区块的自然递减率 %

序号	价格	序号	价格
1	10	11	13
2	10	12	12
3	10	13	10
4	25	14	10
5	25	15	10
6	20	16	10
7	20	17	10
8	18	18	10
9	16	19	5
10	15	20	5

基于油井服役年限,考虑不同递减率对项目计算期内油井产出的影响时,不违一般的可以实际递减率对油井产出作用时限为权数,用下述方法计算平均自然递减率:

$$aVer_dij = \sum_{i=1}^{20} dljian_i \times \frac{20-i+1}{20} / \sum_{k=1}^{20} k \quad (13)$$

$aVer_dij$ 是平均自然递减率, $dljian_i$ 是 i 年自然递减率, $(20-i+1)/20$ 为 i 年递减率的作用权数。

3. 状态变量与决策变量

当采用 D. P. 的顺序解法时,取累计至 k 年末的总井数为状态变量 $x(k)$;取当年投产井数为决策变量 $u(k)$,则有状态方程:

$$x(k-1) = x(k) - u(k) \quad k=1,2,\dots,n \quad (14)$$

4. 可达状态集合与允许决策集合

由状态变量的选取可知,可达状态是 k 年末的投产井数,而由所有可达状态构成的可达状态集合,当阶段枚举时,其应为:

$$x(k) \in \{0,1,2,\dots,S_N\} \quad (15)$$

其中, S_N 为海外油气项目设计总井数。

决策变量——每年新投产井数,考虑其与状态变量(累计至 k 年末的总井数)的关系以及资金限制,如某个案中规定每年可用于钻井的资金为 2000 万美元,在平均井深 1500 米、钻井成本 500 美元/米及单井投产费用 16.1 万美元、单井地面建设费 24.9 万美元的条件下,每年可能的的新投产井数的全部取值,即允许决策集合是:

$$0 \leq u(k) \leq \min\{x(k), limit\} \quad (16)$$

其中, $Limit$ 为钻井工程可用资金总额所决定的钻井数,如在个案中:

$$Limit = 20000 \times 10^3 / (500 \times 1500 + 161 \times 10^3 + 249 \times 10^3) \quad (17)$$

5. 目标函数

在以上状态变量及决策变量的选取下,阶段目标函数值 $L(x(k), u(k))$ 是 k 年的现金流,故其涉及 k 年原油价格、累计至 k 年末总井数、 k 年新钻井数、自然递减率、财务贴现率等,但考虑系统内部联系,其仅是状态变量及决策变量的函数。

在每年现金流的计算中,阶段目标函数值分两部分计算:

$$k \text{ 年新投产井产生的现金流 } (cash-flow-1) = (k \text{ 年新投产井数} \times \text{单井年产量} \times \text{原油价格}) - (\text{税金及其附加} + \text{钻井费用} + \text{投产及地面建设费用} + \text{操作成本}) \quad (18)$$

$$\text{累计至 } k-1 \text{ 年末拥有的油井产生的现金流 } (cash-flow-2) = (\text{累计至 } k-1 \text{ 年末拥有井数} \times \text{单井年产量} \times \text{综合递减率} \times \text{原油价格}) - (\text{税金及其附加} + \text{操作成本}) \quad (19)$$

为实现各年现金流的可加性,将 k 年的现金流利用折现率折算成现值,从而实现递推(可加性)计算。

$L(x(k), u(k)) = \{ (cash-flow-1 + cash-flow-2) / (1+frate)^k \}$

$$k=1,2,\dots,n \quad (20)$$

6. D. P. (递归)方程

综合式(3)、(4)、(5),把连续函数基础上的一阶条件式(11)转化为离散基础上的枚举(完全看透),则非传统合同的油气项目现金流与净现值跨期最优化计算的递归方程为:

$$J_0^*(x(0)) = 0$$

$$J_k^*(x(k)) = \max_{\substack{x(k-1)=x(k)-u(k) \\ 0 \leq u(k) \leq \min\{x(k), limit\}}} \{L(x(k), u(k)) / (1+frate) + J_{k-1}^*(x(k-1))\}$$

$$k=1,2,\dots,n \quad (21)$$

由于 D. P. 计算结果,即应用式(21)递归计算结果是海外非传统合同油气项目跨期最优化后的最大净现值,故可据其进行项目评估。

五、算例

有一个储量足够经营 20 年,规划钻 110 口油井且每年钻井资金限制为 2000 万美元,综合税金及附加费为销售收入的 17%,现金操作成本为 5.35 美元/桶,平均井深 1500 米,钻井成本为 500 美元/米,单井投产及地面建设费为 41 万美元,单井初始日产量 17 吨,油井产量递减率如表 3 的海外项目,在 14% 贴现率下,原油价格采用表 2 数字,应用 D. P.,第 1、2 年的递归计算如表 4,该项目跨期最优化的全部净现值为 212254.05×10^3 美元。

表 4 国外某区块 D. P. 递归计算

累计井数 (口)	1		2	
	当年钻井 (口)	净现值 (千美元)	当年钻井 (口)	净现值 (千美元)
0	0	0.00	0	0.00
1	1	624.07	0	1654.68
2	2	1248.14	0	3309.37
3	3	1872.20	0	4964.05
4	4	2496.27	0	6618.73
5	5	3120.34	0	8273.42
6	6	3744.41	0	9928.10
7	7	4368.48	0	11582.78
8	8	4992.54	0	13237.47
9	9	5616.61	0	14892.15
10	10	6240.68	0	16546.83
11	11	6864.75	0	18201.52
12	12	7488.82	0	19856.20

续表

13	13	8 112. 89	0	21 510. 88
14	14	8 736. 95	0	23 165. 57
15	15	9 361. 02	0	24 820. 25
16	16	9 985. 09	0	26 474. 93
17	17	10 609. 16	0	28 129. 62
18	0	0	1	28 487. 50
19	0	0	2	28 845. 39
20	0	0	3	29 203. 27
21	0	0	4	29 561. 15
22	0	0	5	29 919. 04
23	0	0	6	30 276. 92
24	0	0	7	30 634. 80
25	0	0	8	30 992. 69
26	0	0	9	31 350. 57
27	0	0	10	31 708. 46
28	0	0	11	32 066. 34
29	0	0	12	32 424. 22
30	0	0	13	32 782. 11
31	0	0	14	33 139. 99
32	0	0	15	33 497. 88
33	0	0	16	33 855. 76
34	0	0	17	34 213. 64

六、结论

D. P. 是经济系统跨期优化的简单有效算法;对涉及多阶段决策问题的海外非传统合同油气项目,应用 D. P. 结果评估,其核算过程逻辑合理,技术可操作性强,结果更为可信;D. P. 作为一种算法,其不

仅适用于复杂系统的跨期优化,且计算结果是全局最优解。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2007 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2008-02-28). [http://: www. xinhua. org/](http://www.xinhua.org/).
- [2] 葛家理. 现代石油战略学[M]. 北京:石油工业出版社, 1998:5-17.
- [3] 吴秋南. 评估石油储量价值的期权方法[J]. 石油勘探与开发, 2002(2):14-17.
- [4] 张永峰. 石油勘探开发项目实物期权特性分析[J]. 石油勘探与开发, 2006(1):19-23.
- [5] 郭秋麟,等. 油气勘探目标经济评价与决策系统[J]. 石油勘探与开发, 2002(2):8-11.
- [6] 罗东坤. 石油开发项目实物期权评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2007(8):34-38.
- [7] 王翼,王歆明. 经济系统的动态分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [8] Ian King. A Simple Introduction to Dynamic Programming in Macroeconomic Models [J]. Department of Economics University of Auckland Auckland New Zealand, 2002, 4.
- [9] Wayne L. Winston, Operations research (Third edition) [M]. 北京:清华大学出版社, 2004:490-542.

[责任编辑:张岩林]

Optimization Decision-Based DP Model Study of Nontraditional Foreign Oil & Gas Project Evaluation

ZHANG Xiang-dong¹, ZHANG Chuan-ping²

(1. Sinopec Shengli Oilfield Yellow River Drilling Cop. Dongying, Shandong 257060;

2. China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: In recent years, in international oil & gas cooperation, there has appeared a kind of contract known as nontraditional oil & gas project contract, which concerns developing oil & gas fields or reservoirs proven rather than oil & gas exploration activities. With the asset evaluation evolvement, real option that is based on adding investor's option and management flexibility, is introduced into the economic evaluation of oil & gas exploration and exploitation, and practiced hotly. But nontraditional oil & gas project real option evaluation model that may be exercised is not set forth because of the complexity of objective problems. Although the real option method reveals some weakness of net present value method, it can't replace N. P. V. In this paper, multiple period optimization of nontraditional oil & gas project is studied based on N. P. V. with dynamic programming. How to select the exogenous parameters as oil price, oil output natural step-down, endogenetic variable are solved. Further result that is the nontraditional oil & gas project economic evaluation is obtained likewise.

Key words: oil & gas project; evaluation; cash flow; multi-period optimization; dynamic programming