

计算 LNG 接收站周转及储备能力的数学模型

郑云萍¹ 李薇¹ 李伟² 章哲华²

1.西南石油大学石油工程学院 2.中石油 LNG 接收站项目经理部

郑云萍等.计算 LNG 接收站周转及储备能力的数学模型.天然气工业,2010,30(7):73-75.

摘要 科学确定 LNG 接收站的周转及储备能力、明确 LNG 储备天数,有助于合理进行 LNG 接收站战略规划、科学调配 LNG 船运资源及 LNG 接收站的储存资源。为此,分析了 LNG 接收站储备能力的影响因素,针对 LNG 接收站系统的离散混合特性,将离散事件建模方法中的库存系统模型作为理论依据,结合 LNG 接收站的供需特点,对经典的库存系统模型进行扩展及调整,建立了 LNG 接收站周转能力数学模型、库存水平数学模型和储备能力数学模型。上述模型可模拟不同 LNG 船型、资源地、储罐数量、外输量条件下 LNG 接收站的储备能力,为优选 LNG 供需调配方案及船期策略,合理选择船型、安排船期、确定 LNG 储罐数量提供了参考,对 LNG 接收站远期规划及功能定位的调整具有指导意义。

关键词 LNG 接收站 储备能力 周转能力 库存水平 数学模型 影响因素

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.07.020

科学确定 LNG 接收站的储备能力、明确 LNG 储备天数,对合理进行 LNG 接收站战略规划、科学调配 LNG 船运资源及接收站的储存资源具有指导意义^[1]。

1 LNG 接收站周转能力研究

建立 LNG 接收站储备能力数学模型,首先需要确定接收站的周转能力,当其周转能力大于计划外输量的情况下,接收站才具有储备意义。预测各建设期 LNG 接收站的周转能力,需建立 LNG 接收站周转能力数学模型。由于 LNG 接收站的周转能力与 LNG 接收站的库存水平、LNG 运输船的卸船量、卸船间隔时间、LNG 外输工艺等诸多因素有关,可将 LNG 接收站的接收、存储、外输环节看成一个整体系统进行研究。从外输和储备的角度来讲,LNG 接收站系统类似于物流系统中的库存系统,可引入离散事件建模方法中的库存模型并结合 LNG 接收站的运行特点进行建模。

针对 LNG 接收站的工艺流程及贸易特点,对离散事件建模方法中解决确定性库存问题最常用的 EOQ 模型进行调整,建立了考虑周转量最大的 LNG 接收站库存系统的 EOQ 模型^[2-3]:

$$N_x V_{dx} = \int_{T_{xs}}^{T_{xz}} f(t) dt + V_q \quad (1)$$

式中 N_x 为单次卸船个数; V_{dx} 为 LNG 运输船抵港卸船量, m^3 ; T_{xs} 为卸船间隔期的卸船起始时刻; T_{xz} 为卸船间隔期的卸船终止时刻; V_q 为单次卸船间隔时间内产生的库存, m^3 。

将日平均周转量(q)带入式(1),将其转换为日平均周转量的极值问题:

$$\begin{aligned} \max(q) &= \frac{N_x V_{dx} - V_q}{T} \quad (2) \\ \text{st. } q &\leq 24 Q_p (2n - 1) \\ q &\leq \frac{n V_g}{T_b} \\ q &\leq \frac{n V_g - V_{dx}}{T_{dx}} \\ q &\leq \frac{V_{dx}}{T_{dx}} \\ T_{dy} &\leq T \\ 0 &\leq V_q \end{aligned}$$

式中 $q \leq 24 Q_p (2n - 1)$ 为低压泵排量约束, Q_p 为低压泵排量, m^3/d ; n 为储罐数量, m^3/d ; $q \leq \frac{n V_g}{T_b}$ 为储罐容量约束, V_g 为储罐净工作容量, m^3 , T_b 为连续不可作业天数, d ; $q \leq \frac{n V_g - V_{dx}}{T_{dx}}$ 为 LNG 储罐剩余空间约束,

T_{ds} 为卸船时间, $d; q \leq \frac{V_{dx}}{T_{dx}}$ 为 LNG 船容约束; $T_{dg} \leq T$ 为卸船间隔时间约束, T_{dg} 为单船最短卸船间隔时间, d 。

应用极值求解方法, 可对该模型进行求解。

2 LNG 接收站库存水平数学模型

在明确周转能力的前提下, 需预测任意时刻接收站的库存水平, 建立储存水平数学模型。首先要研究任意时刻 LNG 接收站的库存水平。LNG 接收站的供气需求通常是随季节变化的, 在秋冬季一个特定的时间段内需求开始逐渐增加, 经一段时间增加至峰值后, 需求开始下降, 在春夏季需求降为最低。可根据离散事件建模方法的季节性商品库存系统模型进行建模。

从宏观层面来讲, LNG 接收站的库存水平与供货及需求有关, 通常采用天然气管网供气负荷预测方法来确定天然气的需求率。但由于 LNG 供货渠道的特殊性, 即 LNG 接收站的原料供应通常采用长期合同的方式, 即使是现货贸易最少也需在数月之前签订合同, 因此 LNG 接收站的机动性也存在一定的狭义相对性。故讨论的 LNG 接收站储备能力除了极限情况下(比如战略需要)以外, 是指在保证 LNG 接收站正常运转的前提下的储备能力。现将一供气负荷的经典函数带入季节性商品的库存控制模型, 建立 LNG 接收站季节性库存水平模型。

根据天然气的需求特点, 令 T 为“季节”周期, 在这种情形下, 区间 $[0, T]$ 内的需求率函数如下:

$$D_L(u) = Bu(T-u)^{m-1} + C \quad (0 \leq u \leq T, 0 < C) \quad (3)$$

式中 $m > 1$ 且为整数; $B > 0$, 表示需求的尺度参数; C 为最低需求, LNG 的需求率通常要满足一个最低水平, C 一般不为 0。

将需求率函数带入库存水平模型, 可得任意时刻 x 处的 LNG 接收站库存水平:

$$\begin{cases} V(x) = N_x V_x - \left[\int_{T_1}^{T_s} f(u) du + \int_{T_s}^x f(u) du \right], & (x - T_1 \leq T) \\ V(x) = N_x V_x - \left[INT \left(\frac{x - T_1}{T} \right) \int_0^T f(u) du + \int_{T_1}^{T_{1z}} f(u) du + \int_{T_s}^x f(u) du \right], & (T \leq x - T_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $V(x)$ 为任意时刻 LNG 接收站库存水平, m^3 ; N_x 为 LNG 运输船卸船次数; V_x 为 LNG 运输船卸船量, m^3 ; T_1 为第一次运输船卸船开始时刻; T_s 为所求时刻

所属“季节”期起始时刻; T_{1z} 为第一次运输船卸船开始时刻所属季节期的终止时刻。

3 LNG 接收站储备能力数学模型

LNG 接收站的储备库存取决于库存水平与日常供气消耗之差。建立 LNG 接收站储备能力数学模型以储备能力最大、订货策略(卸船间隔时间)最优作为求解目标^[4]。任意时刻 LNG 接收站的储备库存函数表示如下:

$$V_c(x) = V(x) - Q - V_{gl} \quad (5)$$

式中 Q 为日常供气消耗量, m^3 ; $V_c(x)$ 为接收站储备库存, m^3 ; V_{gl} 为接收站最低操作容积, m^3 。

将式(4)带入式(5), 则任意时刻 LNG 接收站的储备库存数学模型如下:

$$\begin{cases} V_c(x) = N_x V_x - \left[\int_{T_1}^{T_s} f(u) du + \int_{T_s}^x f(u) du \right] - \int_{T_{xs}}^{T_{xz}} f(u) du, & (x - T_1 \leq T, T_s < T_{xs}) \\ V_c(x) = N_x V_x - \left[\int_{T_1}^{T_s} f(u) du + \int_{T_s}^x f(u) du \right] - \left[\int_{T_{xs}}^{T_s} f(u) du + \int_{T_s}^{T_{xz}} f(u) du \right], & (x - T_1 \leq T, T_{xs} < T_s < T_{xz}) \\ V_c(x) = N_x V_x - \left[INT \left(\frac{x - T_1}{T} \right) \int_0^T f(u) du + \int_{T_1}^{T_{1z}} f(u) du + \int_{T_s}^x f(u) du \right] - \int_{T_{xs}}^{T_{xz}} f(u) du, & (T \leq x - T_1, T_s < T_{xs1}) \\ V_c(x) = N_x V_x - \left[INT \left(\frac{x - T_1}{T} \right) \int_0^T f(u) du + \int_{T_1}^{T_{1z}} f(u) du + \int_{T_s}^x f(u) du \right] - \left[\int_{T_{xs}}^{T_s} f(u) du + \int_{T_s}^{T_{xz}} f(u) du \right], & (T \leq x - T_1, T_{xs} < T_s < T_{xz}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 T_{xs} 为所求时刻所属卸船间隔期的卸船起始时刻; T_{xz} 为所求时刻所属卸船间隔期的结束时刻, 即下一次卸船作业的开始时间。

按 Bellman 最优化原理可得到求解该问题的动态

规划模型^[5]：

$$\max V_c = \max [V(x) - Q - C_{gl}] \quad (7)$$

st: $T = T_{xz} - T_{xs}$
 $V_c \leqslant n(V_{gh} - V_{gl})$
 $T_m \leqslant T$

式中 T 为卸船间隔时间, d; V_{gh} 为储罐最高工作容积, m^3 ; V_{gl} 为储罐最低工作容积, m^3 ; T_m 为最大日平均外输量对应的卸船间隔时间, d。

储备时间可表示如下：

$$t_c = \frac{V_c}{q_c} \quad (8)$$

式中 t_c 为储备时间, d; q_c 为外输气量, m^3/d 。

4 实例计算

现以澳大利亚为资源地, 以 $14.7 \times 10^4 m^3$ LNG 运输船为例, 将渤海某 LNG 接收站各建设期规划的储罐数量、LNG 日均外输量、储罐工作容积以及约束条件等基础参数带入数学模型, 预测各建设期的周转能力和储备能力, 各建设期各储罐数量条件下的均月均储备库存、均月均值储备时间、均月高值储备库存、均月高值储备时间。预测结果见表 1, LNG 接收站周转能力与储罐数量的变化关系见图 1, LNG 接收站储备时间与储罐数量的变化关系见图 2。

表 1 渤海某 LNG 接收站储备能力表

建设期	泊位数	储罐数量/个	日均 LNG 最大周转量 ¹⁾ / m^3	接收站最大年周转量 ²⁾ / $10^4 t$	卸船间隔时间/d	均月高值输出量 ³⁾ / $10^4 m^3 \cdot d^{-1}$	均月高值接收站最大储备库存/ m^3	均月高值储备时间/d	均月均值输出量/ $10^4 m^3 \cdot d^{-1}$	均月均值接收站最大储备库存/ m^3	均月均值储备时间/d
一期	1	2	30 240	497	5.0	1 722	179 730	6.3	1 288	215 166	10.2
	1	3	50 400	828	5.0	1 722	339 895	12.0	1 288	375 331	17.7
二期	1	4	70 560	1 159	2.7	3 137	500 060	9.7	2 384	533 810	13.6
	1	5	90 720	1 490	1.8	4 806	660 226	8.4	2 384	731 081	18.6
	1	6	110 880	1 821	1.8	4 806	820 391	10.4	2 384	891 246	22.7
远期	1	7	131 040	2 152	1.8	4 806	980 556	12.4	2 384	1 051 412	26.8
	2	8	151 200	2 483	1.8	4 806	1 140 721	14.4	2 384	1 211 577	30.9
	2	9	171 360	2 815	1.8	4 806	1 300 886	16.5	2 384	1 371 742	35.0
	2	10	191 520	3 146	1.8	4 806	1 461 051	18.5	2 384	1 531 907	39.1

注: 1) 指 LNG 接收站日均 LNG (液态) 最大周转量; 2) 指 LNG 接收站 LNG (液态) 最大年周转量; 3) 指在 20 ℃、101.325 kPa 条件下 LNG 气化后的输出量。

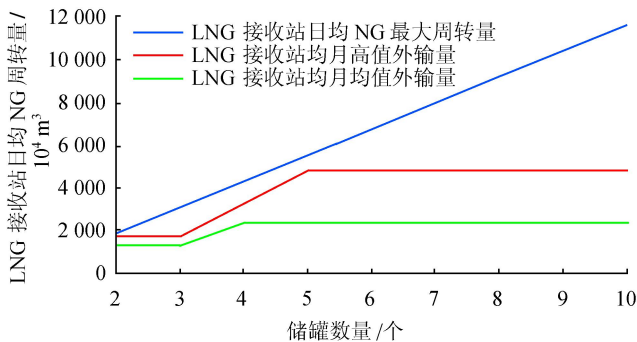


图 1 渤海某 LNG 接收站周转能力折线图

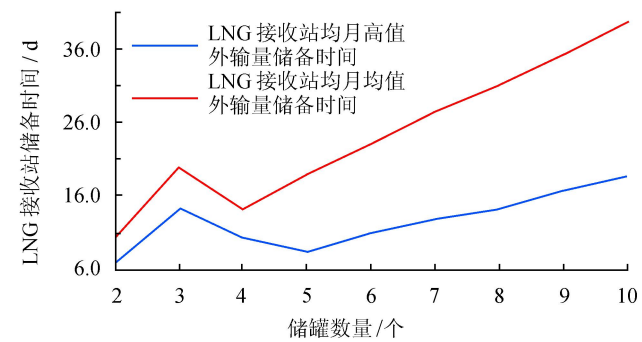


图 2 渤海某 LNG 接收站储备时间折线图

5 结论

1) LNG 接收站的接收、存储、外输系统属于生产物流系统, 可运用离散事件系统方法的库存系统模型对其进行模拟。以周转量最大作为建模目标, 对经典

的 EOQ 模型进行调整, 建立了考虑周转量最大的 LNG 接收站库存系统 EOQ 模型, 利用该模型和极值求解方法可计算接收站的周转能力。该模型的建立, 为 LNG 运输船船型选择、船期确定、LNG 接收站工程改扩建提供了参考依据, 可为 LNG 接收站储备能力

数学模型提供约束条件。

2)以 LNG 贸易特点,供应方式,天然气需求随季节变化规律为研究依据,对 LNG 接收站的储存规律进行分析。参考经典季节性商品的库存控制模型,结合接收站库存变化特点,建立了 LNG 接收站季节性库存水平模型,在此基础上,确定了 LNG 接收站储备能力数学模型。该模型的建立,为供需调配方案的优选,船期策略的选择提供了帮助。

3)由模拟结果可知,接收站的储备库存与储罐数量成正比,在周转量一定的情况下,储备时间与储罐数量成正比,与周转量成反比。

参 考 文 献

- [1] 徐烈,徐永生,李兆慈,等.我国液化天然气(LNG)的陆地储存与运输[J].天然气工业,2002,22(3):89-91.
- [2] 顾启泰.离散事件系统建模与仿真[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [3] J 朋克思.离散事件系统模拟[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [4] 王亚超.生产物流系统建模与仿真——Witness 系统及应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [5] 席少霖,赵凤治.最优化计算方法[M].上海:上海科学技术出版社,1983.

(修改回稿日期 2010-05-13 编辑 何 明)