

天然气长输管线投产关键指标参数规律研究

顾为, 赵蔚蓝, 李天俊

国家管网集团西南管道有限责任公司重庆输油气分公司, 重庆

收稿日期: 2023年8月11日; 录用日期: 2023年9月4日; 发布日期: 2023年9月15日

摘要

随着全球气候变暖的影响, 天然气作为清洁能源得到大力推广, 继而推动着越来越多的天然气长输管线建成并投入运行。天然气的易燃易爆性, 使得很有必要对天然气长输管线投产进行研究, 以得出投产中的规律并以此制定相关的措施和注意事项, 继而确保天然气长输管线投产的安全性和平稳性。在天然气长输管线投产中, 一般采用氮气隔离天然气和空气的方式进行投产, 这就使得投产中会产生两个混气段, 而气头推进速度和氮气段长度是天然气长输管线投产中最重要的两个指标参数。本文对某长输管线投产中相邻阀室间气头推进速度与气头到某阀室瞬时氮气段长度进行数据分析, 后选择数学模型进行整合。研究表明: 相邻阀室间气头推进速度与气头到某阀室瞬时氮气段长度均满足正态分布模型。将该数学模型对某天然气长输管线投产上进行验证, 结果显示符合该模型的指标参数可保证天然气长输管线投产的安全性和平稳性。综合上述可以得出建议: 为确保天然气长输管线安全性与稳定性, 建议在天然气长输管线投产中相邻阀室间气头推进速度与气头到某阀室瞬时氮气段长度可预先利用正态分布模型确定均值, 并在实际投产中控制指标参数其在均值波动范围内即可。

关键词

正态分布, 天然气长输管道, 氮气段长度, 气头推进速度, 指标参数

Research on the Key Index Parameters of Natural Gas Long Distance Pipeline Production

Wei Gu, Weilan Zhao, Tianjun Li

Chongqing Oil and Gas Transportation Branch of State Grid Southwest Pipeline Co., Ltd., Chongqing

Received: Aug. 11th, 2023; accepted: Sep. 4th, 2023; published: Sep. 15th, 2023

Abstract

With the impact of global climate change, natural gas has been vigorously promoted as a clean energy source, which has driven the construction and operation of more and more long-distance natural gas pipelines. The flammability and explosiveness of natural gas make it necessary to conduct research on the production of long-distance natural gas pipelines, in order to determine the rules during production and formulate relevant measures and precautions, in order to ensure the safety and stability of long-distance natural gas pipeline production. In the production of natural gas long-distance pipelines, nitrogen is generally used to isolate natural gas and air, which results in two mixed gas sections. The gas head propulsion speed and nitrogen section length are the two most important indicator parameters in the production of natural gas long-distance pipelines. This article analyzes the data of the gas head propulsion speed between adjacent valve chambers and the instantaneous nitrogen section length from the gas head to a certain valve chamber during the production of a long-distance pipeline, and then selects a mathematical model for integration. Research has shown that the pushing speed of the gas head between adjacent valve chambers and the instantaneous nitrogen section length from the gas head to a certain valve chamber both satisfy a normal distribution model. The mathematical model was validated on the production of a certain natural gas long-distance pipeline, and the results showed that the index parameters that meet the model can ensure the safety and stability of the natural gas long-distance pipeline production. Based on the above, it can be concluded that in order to ensure the safety and stability of natural gas long-distance pipelines, it is recommended to use a normal distribution model to determine the mean value of the gas head propulsion speed between adjacent valve chambers and the instantaneous nitrogen section length from the gas head to a certain valve chamber during the production of natural gas long-distance pipelines, and to control the indicator parameters within the fluctuation range of the mean value in actual production.

Keywords

Normal Distribution, Natural Gas Long-Distance Pipelines, Length of Nitrogen Section, Air Head Propulsion Speed, Indicator Parameters

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 天然气长输管道投产研究介绍

近年来,随着全球气候变暖,越来越多的清洁能源开始得到大力推广,天然气作为国际公认的清洁能源,尤其获得许多国家的推广。由于天然气资源的分布不均和运输费用的影响,众多天然气长输管线建成并投运。天然气长输技术水平得到了很大提高,我国天然气长输在近年来也有很大的发展,有的已经达到世界先进水平[1]。

关于天然气长输管道的投产也随之得到越来越多的关注,国内许多学者开始对其进行研究,并就国内外不同长输天然气管线的投产技术发表文章[2] [3] [4]。薛继军在文献中比较了长输天然气投产中不同的置换方式,认为不加隔离器而采用氮气置换的方法具有置换效率高、费用低以及安全可靠等优点,是一种有前途的新工艺,新方法[5]。同时,孙兴祥对涩宁兰天然气管道的投产置换采用的不同方案进行了对比分析,总结各自有缺点,对检测数据进行定性的分析,并提出了一种大口径长距离天然气管道投产

置换方案[6]。胡其会在其硕士论文中就氮气置换混气规律进行研究,并推出混气段的理论计算模型,继而得到混气量和混气长度的理论计算公式,通过对氮气置换进行稳态与非稳态的计算,并与现场实际对比,以验证模型的准确性[7]。牛立道在其硕士论文中就氮气置换在淄博-莱芜天然气管道中的应用进行了研究,以理论模型指导现场生产,取得了较好的效果[8]。张青勇就川气东送投产进行研究,得出“气推气”方式进行置换作业,应用经验公式进行必要估算,分阶段科学合理升压稳压技术可有效提高投产的安全性与经济性[9]。胡其会在其硕士论文中所得混气长度的理论计算公式也证实其受投产时气头推进速度影响较大;张嵘[10]对输气管道投产的混气公式利用实际数据进行拟合,结果显示混气长度与压力和速度成正比;段威[11]等利用经验公式结合 FLUENT 模拟软件对天然气长输管道进行模拟,也得出混气段长度受速度、管径和长度的影响较大,由于天然气长输管线的管径和长度保持不变,故速度成为唯一影响因素;张楠[12]等结合我国中西部起伏地形,将起伏管道简化成一定倾角的直管段,利用 FLUENT 软件进行模拟,结果建议长输天然气管线投产速度不超过 5 m/s。综合上述,很有必要对天然气长输管线投产中的气头推进速度进行规律研究,并保证其在推进过程中,不产生较多的混气量,同时也保证投产时间。崔茂林[13]在总结我国多条天然气长输管道投产数据的基础上,得出了投产注氮量的公式,并提出氮气置换过程中的多项技巧;范开峰[14]通过建立管道模型,给定边界条件,在 FLUENT 软件中进行求解器设置后,运用组分运输模型模拟分析了氮气置换过程,并总结了氮气段和混气段的相互关系;杨文辉[15]对注氮技术方案和氮气置换技术进行了分析,取得了良好的可用于工程实际的结论;刘建新[16]利用二级调流方法,完成江西支线气推气置换和天然气升压过程,取得了良好的控制效果。投产置换过程的检测数据表明:氮气置换天然气的效果良好,置换方案是可行的。

综合上述,在天然气长输管线投产中,一般采用氮气隔离天然气和空气的方式进行投产,这就使得投产中会产生两个混气段,虽上述描述中前人对此进行相关的研究,但未能有效结合现场实际,其实用价值有限。所以在本文中重点研究气头推进速度和氮气段长度两个指标参数,它们是天然气长输管线投产中重要的参考参数,并且可基于已经投产的天然气管线数据进行分析研究,其结果具有实用价值。

2. 天然气长输管道投产数学模型研究

2.1. 正态分布[17] [18] [19] [20] [21]

若随机变量 X 服从一个位置参数为 μ 、尺度参数为 δ 的概率分布,且其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\delta^2}\right) \quad (1)$$

尺度参数为 δ 的计算公式为:

$$\delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (2)$$

则这个随机变量就称为正态随机变量,正态随机变量服从的分布就称为正态分布,记作:

$$X \sim N(\mu, \delta^2) \quad (3)$$

正态曲线呈钟型,两头低,中间高,左右对称,曲线与横轴间的面积总等于 1。正态分布是一种概率分布。正态分布是具有两个参数 μ 和 δ 的连续型随机变量的分布,第一个参数 μ 是遵从正态分布的随机变量的均值,第二个参数是此随机变量的标准差计算公式如下,故正态分布记作 (μ, δ^2) 。正态分布的随机变量的概率规律为取 μ 邻近的值概率大,而去离 μ 越远的值得概率越小; δ 越小,分布越集中在 μ 附近, δ 越大,分布越分散。

正态曲线下,横轴区间 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 内的面积为 68.3%以上,横轴区间 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 内的面积为 95.5%以上,横轴区间 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 内的面积为 99.7%以上,故所研究的一系列数据必须满足以上比例,方可确定满足正态分布模型。

2.2. 所研究的天然气长输管道情况介绍

某国内天然气长输管线长约 1727 km,设计输量为每年 120 亿方,管道外径为 1016 mm,设计压力为 10 MPa。全线干线共计有 17 个站场,60 个阀室。在实际投产过程中,该管线分两段进行投产,第一次投产的是 RL 到 LF 段,由于 LF 段下游连接以支线(2 站 3 阀室),故第一阶段参与投产的站场有 9 个站场(干线 7 个),25 个阀室(干线到 22#阀室),总长约 600 km,共计 34 个研究点。由于投产前 RL 站、1#阀室和 2#阀室间充满氮气,故该段天然气管线投产中研究点有 31 个;第二次投产的是 LF 到 GG 段,参与投产的站场 10 个,阀室 38 个,总长约 1200 km,共计有 48 个研究点。由于投产前 LF 站、23~25#阀室间充满氮气,故该段天然气管线投产中研究点有 45 个。上述两端投产中在 RL 站和 LF 站均有调节阀进行进气量调节,基本保证投产过程中的起头推进速度可控。

在天然气长输管道投产过程中,由于气体分子的热运动,会出现氮气-空气混气段与氮气-天然气混气段。由上描述可得相邻阀室气头推进速度与气头到某阀室瞬时氮气段长度是天然气投产过程中两个重要的指标参数。相邻阀室气头推进速度直接决定投产时间并可以间接判断管道内的积水量,而氮气气段长度是判定投产成败的重要依据。

2.3. 第一段投产中相邻阀室气头推进速度和气头到某阀室瞬时氮气段长度规律研究

研究方法为:1. 利用第一段投产的相邻阀室气头推进速度和气头到某阀室瞬时氮气段长度进行数据分析;2. 利用数据处理结果确定恰当的模型;3. 利用确定的模型预测第二段投产中的相邻阀室气头推进速度和气头到某阀室瞬时氮气段长度可控范围,并用 LF 站调节阀进行适当调节,并依次记录数据;4. 对第二段的第二段投产中的相邻阀室气头推进速度和气头到某阀室瞬时氮气段长度进行再次验证。

在该天然气长输管道第一段投产过程中,前两个个阀室提前注入氮气,并根据初设方案控制气头行进速度为 5 m/s。

相邻阀室气头推进速度计算依据为两相邻阀室的距离除以投产时气头在该距离所运行的时间。

由于投产开始时,前两个阀室氮气处于憋压状态,不考虑。而压力释放后第二到第三阀室速度过快也不考虑。依次计算剩余各阀室间的速度,数据表如表 1。

Table 1. Gas head propulsion speed (m/s) for production in RL-YX section

表 1. RL-YX 段投产气头推进速度(m/s)

编号	4#	MS	5#	6#	LL	7#	8#	9#	10#	BS	11#	12#	13#	14#	15#
速度	5	4.98	4.99	4.99	4.98	4.99	4.99	4.98	4.97	4.89	4.96	4.95	4.96	4.95	4.95
编号	16#	MD	17#	18#	19#	20#	21#	CX	22#	LF	支 1	AN	支 2	支 3	YX
速度	4.95	4.95	4.95	4.94	4.94	4.93	4.92	4.92	4.93	4.93	4.91	4.92	4.91	4.9	4.89

通过分析上表的数据,得到刚开始投产时气头推进速度略快,后期随着气阻的增加,速度逐步降低。氮气段的计算公式为:

$$L = ((F_2 - F_1) \times 1000 - (t_2 - t_1) \times 24 \times 3600 \times v) \div 1000 \quad (4)$$

其中: L 氮气段的长度,单位为: km;

F_2 、 F_1 分别是相邻两站相对首站的距离(F_2 为下游站), 单位为: km;

t_2 是纯氮气头到达下游阀室的北京时间, 单位为: h;

t_1 是氮气 - 天然气头到达上游阀室的北京时间, 单位为: h;

v 是两阀室之间的气头推进速度, 单位为: m/s。

由于投产开始时, 前三个阀室氮气处于憋压状态, 不考虑。在投产后由于压力释放, 整个纯氮气管段会变长, 故从 5#阀室开始计算。依次计算氮气段长度, 数据表如表 2。由于管道变径造成氮气段长度变化, 故本次研究的终点为 LF 站。

Table 2. Instantaneous nitrogen section length from the production gas head of the RL-YX section to a certain valve chamber (km)

表 2. RL-YX 段投产气头到某阀室瞬时氮气段长度(km)

编号	5#	6#	LL	7#	8#	9#	10#	BS	11#	12#	13#	14#	15#
长度	55.79	55.7	55.63	55.54	55.45	55.37	55.31	55.23	55.14	55.1	55.02	54.93	54.84
编号	16#	MD	17#	18#	19#	20#	21#	CX	22#	LF			
长度	54.72	54.65	54.53	54.45	54.34	54.22	54.12	54.06	53.98	53.9			

应用公式(4)计算得氮气段长度, 表 2 的均值为 $\mu = 54.95$, 随后用公式(2)计算得 $\delta = 0.57$ 。通过验证结果是显示: 在区间($\mu - \sigma, \mu + \sigma$)内的点占总比例的 52%, 在区间($\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma$)内的点占总比例的 96%, 在区间($\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma$)内的点占总比例的 100%。综合上述数据得到该阶段气头到某阀室瞬时氮气段长度不满足正态分布模型。

通过分析原因可得: 由于该阶段投产过程中气头推进速度过快, 造成混气量增加, 而氮气段减少较快, 在正态分布模型中较离散;

基于第一段投产数据的处理得出建议: 由于第二段较第一段投产长度约增加一倍, 为了确保投产的安全性和平稳性计划在第二段天然气管线投产中利用 LF 站的调节阀严格控制速度, 并将气头推进速度控制在 4 m/s 以下。

2.4. 第二段投产中相邻阀室气头推进速度和气头到某阀室瞬时氮气段长度规律研究

研究方法同上, 由于投产开始时, 前三个阀室氮气处于憋压状态(LF 站、23#阀室~25#阀室)不考虑。而压力释放后 25#阀室到 26#阀室速度过快也不考虑。依次计算剩余各阀室间的速度, 数据表如表 3。

Table 3. LF-GG section production gas head propulsion speed (m/s)

表 3. LF-GG 段投产气头推进速度(m/s)

编号	XD	27#	28#	QJ	29#	30#	31#	32#	33#	34#	35#	36#	37#	38#	39#
速度	3.85	3.84	3.85	3.85	3.83	3.84	3.85	3.83	3.84	3.84	3.93	3.84	3.83	3.84	3.82
编号	AS	40#	41#	42#	GY	43#	44#	45#	46#	DY	47#	48#	49#	50#	51#
速度	3.85	3.83	3.84	3.83	3.85	3.84	3.83	3.84	3.86	3.84	3.83	3.85	3.84	3.83	3.84
编号	52#	53#	HC	54#	YZ	55#	XC	56#	57#	58#	LB	59#	60#	GG	
速度	3.83	3.85	3.84	3.83	3.83	3.85	3.84	3.83	3.84	3.83	3.84	3.85	3.83	3.83	

表 3 中相邻阀室气头推进速度均值为 $\mu = 3.84$, 随后用公式(2)计算得 $\delta = 0.01$ 。

结果显示: 在区间($\mu - \sigma, \mu + \sigma$)内的点占总比例的 100%, 在区间($\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma$)内的点占总比例的

100%，在区间 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 内的点占总比例的 100%。综合上述数据得到该阶段投产的气头推进速度满足正态分布模型。

前三个阀室氮气处于憋压状态(LF 站、23#阀室~25#阀室)不考虑。而压力释放后氮气段变长，故从28#阀室开始计算氮气段长度。依次计算剩余各阀室间的速度，数据表如表 4。

Table 4. Instantaneous nitrogen section length from LF-GG production gas head to a certain valve chamber (km)
表 4. LF-GG 段投产气头到某阀室瞬时氮气段长度(km)

编号	28#	QJ	29#	30#	31#	32#	33#	34#	35#	36#	37#	38#	39#
长度	66.7	66.68	66.65	66.65	66.64	66.63	66.58	66.54	66.49	66.44	66.38	66.34	66.28
编号	AS	40#	41#	42#	GY	43#	44#	45#	46#	DY	47#	48#	49#
长度	66.24	66.23	66.19	66.14	66.13	66.14	66.12	66.1	66.07	66.04	66.04	66.03	66.02
编号	50#	51#	52#	53#	HC	54#	YZ	55#	XC	56#	57#	58#	59#
长度	66.02	66.03	66.02	66.01	66.02	66.01	65.96	65.94	65.94	65.92	65.88	65.84	65.84
编号	60#	GG											
长度	66.02	66.03											

应用公式(4)计算得氮气段长度，表 2 的均值为 $\mu = 66.36$ ，随后用公式(2)计算得 $\delta = 0.33$ 。

结果显示：在区间 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 内的点占总比例的 97.8%，在区间 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 内的点占总比例的 100%，在区间 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 内的点占总比例的 100%。综合上述数据得到该阶段投产的投产气头到某阀室瞬时氮气段长度满足正态分布模型。

比较表 2 和表 4 可得：在天然气长输管线投产气头推进速度小于 4 m/s，且利用首站调节阀控制进气量的情况下，氮气段减少量很少(混气量产生较少)；这里再次验收投产速度不能太快。

综合上述可得：基于该天然气长输管线投产成功经验，在今后投产中只要控制相邻阀室气头推进速度和气头到某阀室瞬时氮气段长度满足正态分布模型即可。如果长输天然气管道投产速度过快，其气头到某阀室瞬时氮气段长度就不会满足正态分布模型。

3. 结论

1. 正态分布模型可用于估算长输天然气管线投产时的相邻阀室气头推进速度和气头到某阀室瞬时氮气段长度；

2. 在实际天然气管道投产中，可预先基于正态分布模型的估算结果，通过估算结果指导投产管线首站调节阀开度，可保证投产的安全性和稳定性。投产速度不宜过快(不超过 4 m/s)时，气头到某阀室氮气段长度满足正态分布模型，这也从侧面显示该指标参数在投产中的重要作用；

3. 由于天然气投产中影响因素较多，如管道内存水量会影响气头推进速度，本文中所概括的数学模型(正态分布模型)仅对未来天然气管道投产作业起到参考作用。

参考文献

- [1] 阎光灿. 世界长输天然气管道综述[J]. 天然气与石油, 2000, 18(3): 9-19.
- [2] 陈传胜, 敖锐, 姚琳, 等. 大口径、高压力长输天然气管道的投产技术[J]. 油气储运, 2013, 32(5): 469-473.
- [3] 温晓峰, 许琛琛, 安焱, 等. 中贵天然气管道工程中卫-南部段投产技术[J]. 管道技术与设备, 2014(2): 14-15, 18.
- [4] 许忠亮. 加纳天然气海底外输管道试运和投产[J]. 海洋工程, 2015, 41(5): 28-31.
- [5] 薛继军, 张鹏云, 王俊奇, 等. 输气管道投产置换过程气体混合规律研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 147-149.

- [6] 孙兴祥, 刘保侠, 刘乃刚. 长距离天然气管道投产置换技术研究[J]. 油气储运, 2004, 23(4): 48-51.
- [7] 胡其会. 天然气管线氮气置换混气段规律研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2006.
- [8] 牛立道. 氮气置换在淄博-莱芜天然气管道中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2006.
- [9] 张青勇. 从川气东送管道工程投产探讨天然气长输管道投产工艺[J]. 石油与天然气化工, 2011, 40(1): 90-94.
- [10] 张嵘. 输气管道投产过程混气规律探讨[J]. 山东工业技术, 2015(6): 87.
- [11] 段威, 张健, 张硕, 等. 天然气管道投产置换混气段长度的研究[J]. 油气储运, 2012, 30(3): 5-7.
- [12] 张楠, 胡其会, 李玉星. 起伏输气管道投产置换混气过程机理研究[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(z1): 56-60.
- [13] 崔茂林, 吴长春. 输气管道投产中氮气置换的原则及技巧[J]. 天然气工业, 2015, 35(2): 81-86.
- [14] 范开峰, 王卫强, 马跃, 等. 天然气管道氮气置换过程混气段数值模拟[J]. 石油化工高等学校学报, 2013, 26(1): 63-67.
- [15] 杨文辉, 马利. 氮气置换在天然气管道中的应用[J]. 硅谷, 2013(8): 143, 149.
- [16] 刘建新, 李刚川. 川气东送管道江西支线的投产置换[J]. 油气储运, 2011, 30(4): 276-278.
- [17] 束怀符. 正态分布法[J]. 中国卫生统计, 1985(2): 1-7.
- [18] 王秀艳, 周凤鸣. 浅谈利用正态分布法识别水淹层[J]. 测井技术, 1999, 23(1): 29-32.
- [19] 孙志文, 马彩琴, 吴辉, 等. 应用正态分布法判别青西复杂油藏的油层[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(6): 721-723.
- [20] 曾争, 陈红芳, 黄友朋, 等. 基于正态分布优化的计量准确性方案研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 127-131.
- [21] 聂志强, 王明培, 孙玉博, 等. 基于韦布尔分布和对数正态分布的高功率半导体激光器寿命估计和失效分析研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(z1): 64-71.