

# 不同工况下区域天然气管道水力测算分析与建议

蔡更新<sup>✉</sup>

(国家管网集团广东省管网有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的]管道水力计算是天然气输配系统的重要组成部分,运用该理论可以分析管道管径与流速、压力降以及燃气密度等之间的关系,贯穿于天然气管道建设和管道运营的全生命周期。管道水力计算对管道输配的设计优化和运行调度有重要影响,文章旨在对某区域长输天然气主干管道水力进行模拟计算研究和分析,以期为该区域主干管道建设和运行优化等实践工作提供参考依据。[方法]在现有的区域管网中,利用 PIPELINE STUDIO 软件模型计算,模拟不同工况下该区域主干管道运行状况,聚焦“迎峰度夏”和“冬季保供”两个工况的极限条件,及时发现管线运行中存在的问题,分析存在的主要输气瓶颈。[结果]研究表明:无论是“迎峰度夏”还是“冬季保供”,该区域现状管道系统存在输气瓶颈,需要优化调整管道运行调度、管输流向和水力压力,进一步发挥区域管网最大输气能力。[结论]通过分析不同极限工况下的输气能力,提出优化运行、互联互通、技术改造方案,能够消除管输瓶颈,保证区域管网安全高效运行,满足市场用户变化的用气要求。

**关键词:** 区域管道;水力计算;模型;输气瓶颈;运行调度

中图分类号: TK01; TE973

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0132-06

开放科学(资源服务)二维码:



## Analysis and Suggestions on Hydraulic Calculation of Regional Natural Gas Pipelines Under Different Working Conditions

CAI Gengxin<sup>✉</sup>

(PipeChina Guangdong Natural Gas Pipeline Network Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] Pipeline hydraulic calculation is an important component of the natural gas transmission and distribution system. Applying this theory allows for the analysis of relationships between the pipeline diameter, the flow velocity, the pressure drop, and the gas density. It plays a crucial role throughout the entire lifecycle of natural gas pipeline construction and operation. Pipeline hydraulic calculation has an important impact on the design optimization and operation scheduling of pipeline transmission and distribution. This article aims to simulate and analyze the hydraulic calculation of a long-distance natural gas main pipeline in a certain region to provide reference data for practical works such as the construction and operation optimization of the main pipeline in that region. [Method] In the existing regional pipeline network, the PIPELINE STUDIO software model was used to calculate and simulate the operation status of the main pipeline in the region under different working conditions. The focus was on extreme working conditions, such as "peak demand in summer" and "supply guarantee in winter", aiming to identify potential issues in pipeline operation and analyze the main gas transmission bottlenecks. [Result] The research has shown that whether the working condition is of "peak demand in summer" or "supply guarantee in winter", the current pipeline system in the region has gas transmission bottlenecks, and it is necessary to optimize and adjust the pipeline operation scheduling, the gas flow direction, and the hydraulic pressure to further maximize the gas transmission capacity of the regional pipeline network. [Conclusion] By analyzing the gas transmission capacity under different extreme working conditions, it is possible to propose plans in optimized operations, interconnections, and technological improvements, which can eliminate pipeline bottlenecks, ensure the safe and efficient operation of regional pipeline networks, and meet the changing gas consumption requirements of market users.

**Key words:** regional pipelines; hydraulic calculation; model; gas transmission bottleneck; operation scheduling

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

天然气是世界能源发展的重要趋势,也是国民经济稳定、健康发展的重要动能。本世纪初世界天然气在一次能源中占比都是 24%,而中国还不到 3%<sup>[1]</sup>。随着国家石油天然气管网集团有限公司(简称国家管网集团)的成立,天然气市场向着上游资源多主体多渠道供应、中间统一管网高效集输、下游销售市场充分竞争的“X+1+X”市场体系加速推进<sup>[2]</sup>。随着新能源和天然气机组在电力能源系统的装机比例不断增长,天然气系统对含大规模新能源电力系统的短期运行影响需要深入地研究<sup>[3]</sup>。但是,当前省级管网融入进程缓慢,部分区域管网仍分属多个不同主体运营,中间统一管网高效集输尚未完全实现。

近年来,国家高度重视天然气管道基础设施互联互通工程,西气东输、陕京线、新气管道、中俄东线等主要输气干线相互连接。截至 2022 年底,全国天然气管道里程超过 12 万 km,干线管道一次管输能力超过 3 100 亿 m<sup>3</sup>/a,管道互联互通加快推进,资源串换和互供互保能力进一步增强<sup>[4]</sup>。随着管道里程和气源点输入的增加、管道分输支线逐步织密,为区域多气源保供提供了基础,但所谓“互联互通”并不仅仅是各输气干线的相互连接,而是希望通过此种方式实现输气通道多元化,提升国内天然气串换调峰能力。但大多干线在建设之初并没有考虑到要满足当下“互联互通”的需求,所设计的管径、站场规模和设备载荷等可能难以完成部分多管输气串换的工况<sup>[5]</sup>。同时带来了管道气流输送方向频繁变化、多场景复杂工况下输气方案难以确定等新问题。开展区域主干管道水力计算和分析,是推动天然气管网互联互通,进而消除输送瓶颈,增强调峰和应急保供能力,真正实现管网优化运作和管理的关键性任务。

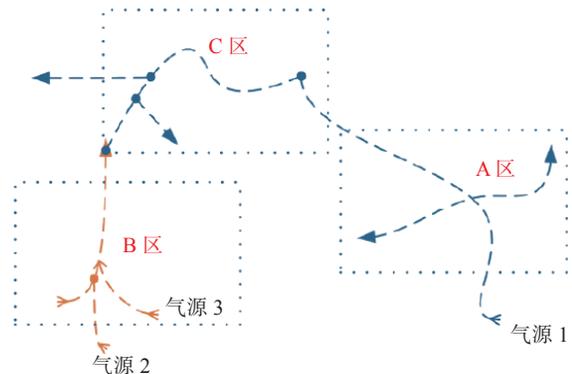
本文介绍了 Z 区域管网在天然气发展利用中发生的工况变化,采用 Pipeline Studio 软件模拟 Z 管网水力测算,同时模拟了“迎峰度夏”和“冬季保供”2 种极限工况,并对不同工况下的管输瓶颈进行了分析,提出了管网建设和运行的改进建议,充分利用已

敷设的管网实现管输能力最大化。

## 1 区域管网发展历程

### 1.1 I 阶段区域管网概况和供气模式

I 历史阶段是 Z 区域管网初始建成时期,主要发生在 2006—2010 年期间,该时期的输气模型示意图如图 1 所示。该阶段主要建立在气源 1 和气源 2、3 的投产基础上,在气源 2、3 投产前,供气模式全部来自于气源 1,这种输气任务虽然大,但是由于单气源单点供气,而且全线不存在复杂分输,输送距离仅仅覆盖 A、C 区域,因此供气模式和水力水压相对简单。随着气源 2、3 的投产和管线的建成,该区域形成了“第一环网”的雏形,在 B 区域的供气模式中便出现了气流方向“南上”或“北下”的可选项。由于气源 2 的接入气量多,所以 B 区域的气流大部分是自南向北输送。



注：图中虚线表示管道走向，所有管道连接点均已实现互联互通，实线表示气流走向。

图 1 Z 区域管网 I 阶段输气模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the gas transmission model in Phase I of the pipeline network in Z Area

### 1.2 II 阶段区域管网概况和供气模式

II 历史阶段是 Z 区域管网规模发展扩大时期,主要发生在 2011—2017 年期间,该时期的输气模型示意图如图 2 所示。该阶段主要依托气源 4 和气源 5 的接入,逐步建设投产“第二环网”,与“第一环网”共同组成了内外环网雏形。此时,在 B 区域实现了内外环网的联通,但是在 A 区域的末端管道尚未与 D 区域的末端连接。因此,在 D、F 区域的输气流向

主要是自北向南输气,在 E 区域的供气模式中气流方向既可以“南上”也可以“北下”。在该阶段,随着气源的增加和管道的环网,管道输气流向逐步复杂化,但是由于在用气负荷区域尚未形成极其复杂的用气工况,即使在不进行调度优化运行的情况下,管输能力仍足够满足下游市场需求。

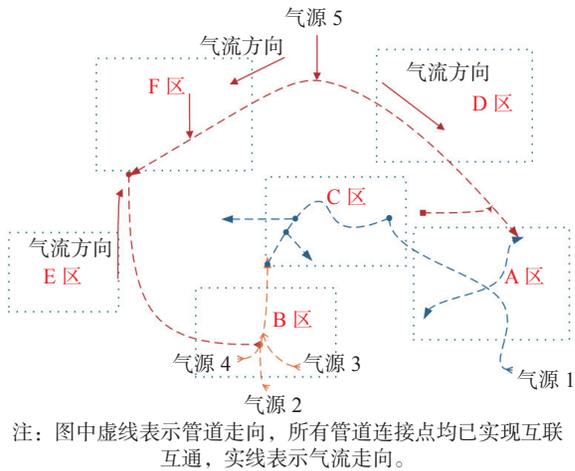


图 2 Z 区域管网 II 阶段输气模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the gas transmission model in Phase II of the pipeline network in Z Area

### 1.3 III 阶段区域管网概况和供气模式

III 历史阶段是 Z 区域管网的成型时期,主要发生在 2018 年至今期间,该时期的输气模型示意图如图 3 所示。该阶段主要依托区域管网的东部、南部新增气源 6、气源 7 的接入,进一步形成互联互通、多气源供应的供气格局。新增气源 6、7 的接入,使

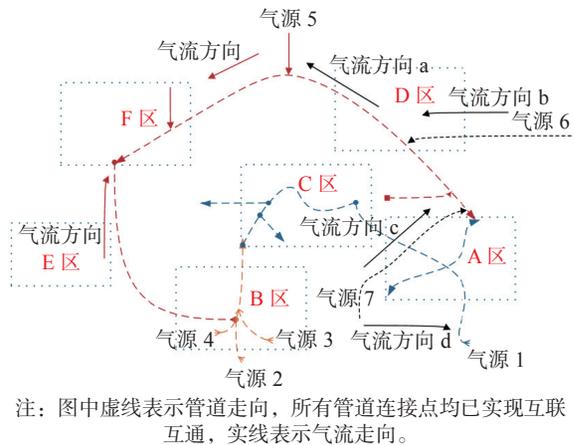


图 3 Z 区域管网 III 阶段输气模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the gas transmission model in Phase III of the pipeline network in Z Area

得 D 区域原来自北向南的气流转变为自南向北的气流 a。气流 b 自东向西输入、气流 c 自南向北输入,两路气流气头在 D 区域汇合,导致气流 b 和气流 c 相互影响制约,影响气源送出能力。在气源 6 加大送出能力时,气源 7 将被迫减少气流 C 的送出气量,转向增加气流 d 的送出气量。未来,随着该区域管网东西部的新增气源接入,整个区域输气模型将更加复杂,亟需对区域水力水压开展平衡测算,以满足新增用户尤其是电厂用户的用气需求。

## 2 现状管网仿真模型建立

Pipeline Studio 是目前在天然气管网模拟中应用非常广泛的一种管道模拟软件,是天然气能源工业中常用的管网模拟器之一,得到广泛的实践验证。主要应用于天然气管网公司的输气调度方案准备、比选和优化,以及关键工艺设备的运行分析<sup>[6]</sup>。

### 2.1 仿真模型的结构简化

通过上述区域管网发展里程分析可知,Z 区域管网现状实际结构复杂,本次仿真模型是以该区域第三阶段的供气模式为基础建立的(如图 3 所示)。通过 PipelineStudio5.0 软件建立管网仿真模型时,可以进行简化处理,管网简化为气源点、管线和用气点 3 部分。

1)气源点:气源点为天然气处理站出口处,提供的天然气为净化处理后的洁净天然气,气源点的流量为标准状况下天然气处理站出口处的流量,气源点的压力为天然气处理站出口处的压力,不考虑处理站内压缩机的影响。

2)管线:管线上的阀门在通常情况下处于全开状态,在管网简化时,将管线看成基本单元,不考虑阀门的影响。

3)用气点:用气点为配气站的进口处,用气点的流量为标准状况下配气站入口处的流量,气源点的压力为配气站的入口处的压力,不考虑配气站内配气管网的影响。

### 2.2 仿真模型参数设置

#### 1)气源点及用气点参数设置

①流体模型设置:仿真模型的流体模型设为复杂流体模型,在各气源点输入气质组分参数,气源的气质组分情况来自各气源单位提供的组分。

②气体状态方程设置:仿真模型的气体状态方

程选用 BWRS 方程。一般情况下,对于长输天然气管道而言,更适合采用 BWRS 方程计算天然气的物性,因为它可以获得更准确的结果<sup>[7]</sup>。

③约束控制条件设置:使用 PipelineStudio5.0 软件进行仿真时,至少有一个节点的约束控制条件为压力,这样才能进行仿真运行。

④温度参数设置:各气源点天然气的初始温度设为 20 ℃,且本次仿真计算中不考虑管道与土壤之间的换热。

⑤压力参数设置:在气源点某处输入压力参数。

⑥流量参数设置:在其余气源点和用气点处输入流量参数。

⑦单位设置:压力设为表压,单位为 MPa;流量设为体积流量,单位为万方/d。

## 2) 管网参数设置

①管线规格参数设置:管线规格包括管线的内径、壁厚、高程和管长,将实际管道规格参数输入管网仿真模型中。

②选择摩阻系数公式:本次仿真选用 Colebrook 公式。在水力摩阻系数公式的运用过程中,应当根据实际情况,合理选择计算公式,才能得到最为准确的结果<sup>[8]</sup>。

③输气效率的设置:输气效率与管道是否经常清管有关,在实际生产过程中,可以通过进行有计划的清管,在一定范围内提高。有清管计划的管线输气效率设为 0.9~1.0。本次测算有内涂层的管线输气效率设为 0.97,无内涂层的管线输气效率设为 0.93。

④管道粗糙度设置:应认真研究管内壁粗糙度的取值<sup>[9]</sup>,初步设置接气干线管道粗糙度较大于支线管壁粗糙度。当管网仿真模型运行结果与实际运行数据的相对误差大于 5% 时,可通过调节各管线的管道粗糙度来校准仿真模型。

## 2.3 仿真模型的建立

使用 Pipeline Studio 5.0 软件的 TGNET 模块建立输气管网模型,在工艺流程设计界面中,按照当前区域管网结构初步建立输气管网仿真模型。

## 3 不同工况下管网现状系统输气能力分析

### 3.1 工况 1 迎峰度夏用气高峰

建立能源投入的基础支持数据库,利用区域间投入产出表,构建区域间能源投入产出模型<sup>[10]</sup>。仿

真模型建立了天然气的日输入气量和不同区域管段的输入气量,模拟输出不同天然气用户分配的管输气量、最高及最低边界压力,通过边界压力是否满足用户需求,判断是否需要输入和调度进行调整,如表 1、表 2 所示:

表 1 仿真边界条件设置及模拟参数值

Tab. 1 Simulation boundary condition settings and simulation parameter values

一次气源	日气量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )			
	合计	输向DEF管网	输向AC管网	输向B管道
气源1	4481(≤8.9 MPa)	—	4271	210 (临时)
气源2	2177(8.9 MPa)	2200	—	2503
气源4	2526(8.85 MPa)	(7.08 MPa)	—	—
气源3	300(7.0 MPa)	—	—	300
气源5	2000(7.02 MPa)	2000	—	—
气源6	1594(≤9.0 MPa)	1594	—	—
气源7	3241	2700 (6.98 MPa)	541 (8.9 MPa)	—
合计	16319	8494	4812	3013

表 2 仿真边界条件下输出结果

Tab. 2 Output results under simulation boundary conditions

用户负荷区	高负荷	气源输入量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	计算最	计算最	负荷区 压力需 求/MPa
	下日需 求气量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )		高边界 压力/MPa	低边界 压力/MPa	
AC区域	6430	4812	8.9	4.5	4.8
B区域	3090	3013	8.7	4.48	4.5
DEF区域	10563	8494	8.7	5.5	4.5
合计	20083	16319	—	—	—

由表 1、表 2 可知,从供需上看,在迎峰度夏的工况情况下,Z 区域管网的市场需求量大于资源输入量,高负荷全时,该区域总用气需求量约 20083 万方/d,但是总输入气量仅 16319 万方/d,缺口达 3764 万方/d。从运行压力上看,如果在气源 7 支援气流方向 d 下,AC 区域的气量可以得到弥补,但是由于在 A 区域的大量提气,导致 C 区域的电厂压力不足,往往无法满足 C 区域 4.8 MPa 的边界压力要求。若 B 区域管道沿线电厂同时用气高峰,仅输送气源 2、3、4 难以满足 B 区域末端电厂压力需求(≥4.5 MPa),需从气源 1 转供部分资源至 B 区域才能保证供气压

力。DEF 区域虽然在压力上暂不存在输气瓶颈,可以满足沿线电厂的高峰用气,但当新增电厂如果要求压力不低于 5.8 MPa 时,需要调整气源 5、7 的接入气量和运行压力。

### 3.2 工况 2 冬季保供用气高峰

根据区域管网实际运行中的资源市场数据,同时结合输气能力参考边界条件,设置仿真模型的边界条件参数和模拟参数值,见表 3、表 4:

表 3 仿真边界条件设置及模拟参数值

Tab. 3 Simulation boundary condition settings and simulation parameter values

一次气源	日气量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )			
	合计	输向DEF管网	输向AC管网	输向B管道
气源1	4166(≤8.9 MPa)	—	4166	—
气源2	1520(8.5 MPa)	2700(8.4 MPa)	—	1346
气源4	2526(8.53 MPa)		—	
气源3	0	—	—	—
气源5	2400(7.02 MPa)	2400	—	—
气源6	1420(≤9.0 MPa)	1420	—	—
气源7	3634(≤8.9 MPa)	3100(7.91 MPa)	534(8.9 MPa)	—
合计	15666	9620	4700	1346

表 4 仿真边界条件下输出结果

Tab. 4 Output results under simulation boundary conditions

用户负荷区	高负荷	气源输入量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	计算最	计算最	负荷区
	下日需 求气量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )		高边界 压力/MPa	低边界 压力/MPa	
AC区域	4700	4700	8.9	4.2	4.8
B区域	1346	1346	8.7	7.2	4.5
DEF区域	5124	9620	8.7	6	4.5
合计	11170	15666	—	—	—

由表 3、表 4 可知,从供需上看,在冬季保供的工况情况下,Z 区域管网的市场需求量小于资源输入量。该区域总用气需求量约 11 170 万方/d,但是总输入气量达 15 666 万方/d,仍有余量 4 496 万方/d,可实现向区域外供气。从运行压力上看,如果气源 7 气流全部北上,C 区域的电厂压力不足问题依然存在,往往无法满足 C 区域 4.8 MPa 的边界压力要求。但是 B 区域管道沿线压力足够,能够保证供气平稳。DEF 区域在供气量和压力上暂不存在输气瓶颈,每

天仍有 4 496 万方气可以支援区域外。但是 DEF 区域,如果在输送区域外气量增加的情况下,将面对气源 6、7 在 D 区域相互制约的问题,该问题需要重新调整优化 6、7 的出气能力。

## 4 建议

### 4.1 区域管网内资源置换,以外环管网的多气源保障内环用气

逐步建立区域内不同管道主体之间气量互换的商业模式,统一代输合同,规范交易流程,将气量置换交易流程化,为用户跨管网输气创造切实可行的条件。目前该区域管网输气瓶颈主要集中在 AC 区,结合现状分析结果,要从气源上缓解输气瓶颈,必须调整气源 1 和其他气源共同供气的区域,增大从其他气源侧下载量,以外环管网的气源输入量保障内环用气。对 B 区域的末端输气瓶颈,从气源上缓解输气瓶颈,是通过气源 1 向 B 区域转供天然气,再由外环气源补充气源 1 的缺口,以实现内环用气安全。

### 4.2 加快互联互通管道建设,实现内外环之间的多点互联

进一步构建并完善布局合理、灵活高效、安全可靠的现代天然气管网系统,加快区域内互联互通工程,建议从外环 E 区域向内环 B 区域末端建设一条互联互通管道,解决 B 区域末端压力不足问题;从外环 D 区域向内环 C 区域建设一条互联互通管道,解决 C 区域末端气量不足、压力不够问题。同时,对已有管道联通点还存在不能双向输气的情况,应要求各管道主体加快设施改造,物理上具备双向联通输气的条件。

### 4.3 完善区域管网调度运行机制,优化内外环供气模式

该区域管道运营压力均有所不同,外环管网运行压力低于内环管网运行压力,由外环管道无法向内环管道输送天然气,所以外环管道与内环管道之间要形成统一的调度运行机制或协调机制。避免出现互联互通分输站的设计为双向输气,但在实际运行中也只能是单向输气,即“互联不互通”,甚至造成跨管道的天然气输送存在局限性。建议完善区域管道调度运行机制,气源 1 在 A 区域降低管道压力,由外环气源进入 A 区域供气,达到供气压力相一致,同时,在新增的互联互通管道建成后,通过调度机制

优化 BC 区域运行压力。

Z 区域管网做上述改进调整之后,可以达到迎峰度夏和冬季保供两种极限工况下的水力平衡,使 Z 管网逐步实现输气效率最大化。

#### 参考文献:

- [1] 华贲. 从战略高度审视中国天然气发电, CHP 和 CCHP [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(2): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.001.  
HUA B. Regarding natural gas power, CHP & CCHP at the strategic height [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(2): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.001.
- [2] 温凯, 焦健丰, 袁运栋, 等. 基于瞬态仿真的天然气管道动态管存分析 [J]. *油气与新能源*, 2022, 34(5): 122-133. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2022.05.019.  
WEN K, JIAO J F, YUAN Y D, et al. Dynamic storage analysis on natural gas pipeline based on transient flow simulation [J]. *Petroleum and new energy*, 2022, 34(5): 122-133. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2022.05.019.
- [3] 张夏平. 天然气网络对含新能源电力系统短期调度运行影响 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(1): 1-7. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.001.  
ZHANG X P. Impact of natural gas system on short-term scheduling with volatile renewable energy [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(1): 1-7. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.001.
- [4] 国家能源局. 石油天然气“全国一张网”建设实施方案 [R]. 北京: [s. n.], 2023.  
National Energy Administration. Implementation plan for the construction of the "national one network" for oil and natural gas [R]. Beijing: [s. n.], 2023.
- [5] 陈利琼, 高茂萍, 王力勇, 等. 极限工况下的管网“互联互通”改进方案 [J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 122-128. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.014.  
CHEN L Q, GAO M P, WANG L Y, et al. An improvement scheme of "interconnected" pipeline network under extreme working conditions [J]. *Natural gas industry*, 2020, 40(2): 122-128. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.014.
- [6] 杨桓, 张理. PIPELINE STUDIO 软件在管网模拟分析中的应用 [J]. *天然气勘探与开发*, 2015, 38(3): 91-93. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3177.2015.03.021.  
YANG H, ZHANG L. Application of PIPELINE STUDIO to simulation and analysis of pipe network [J]. *Natural gas exploration and development*, 2015, 38(3): 91-93. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3177.2015.03.021.
- [7] 刘燕宁. 关于长输天然气管道水力计算的分析 [J]. *化工管理*, 2018(18): 107. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2018.18.083.  
LIU Y N. Analysis on hydraulic calculation of long distance natural gas pipeline [J]. *Chemical enterprise management*, 2018(18): 107. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2018.18.083.
- [8] 马钧. 关于长输天然气管道水力计算的分析 [J]. *化工管理*, 2016(35): 180. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2016.35.154.  
MA J. Analysis on hydraulic calculation of long distance natural gas pipeline [J]. *Chemical enterprise management*, 2016(35): 180. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2016.35.154.
- [9] 李猷嘉. 燃气管道水力计算公式的分析与比较 [J]. *煤气与热力*, 2000, 20(5): 323-326, 330. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4416.2000.05.001.  
LI Y J. Analysis and comparison on practical flow equations [J]. *Gas & heat*, 2000, 20(5): 323-326, 330. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4416.2000.05.001.
- [10] 陈晖. 基于投入产出模型的区域间能源流分析方法研究 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(1): 26-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.005.  
CHEN H. Research on interregional energy analysis with input-output model [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(1): 26-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.005.

#### 作者简介:



蔡更新

蔡更新 (通信作者)

1989-, 男, 工程师, 学士, 主要从事天然气管网建设运营、天然气产供储销体系建设、天然气体制机制改革等工作(e-mail) caigx@gdngg.com.cn。

(编辑 赵琪)