文章编号:1673-5005(2022)02-0160-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2022.02.017

天然气管网系统的输气能力曲线

宋晨辉1,肖 峻1,陈 潜2,屈玉清1,秋泽楷1,李 航3

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室,天津 300072; 2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院,北京 102249;3. 国网江苏省电力有限公司检修分公司苏州运维站,江苏苏州 215000)

摘要:输气能力(GTC)是天然气管网系统的关键指标,用于描述系统的输送能力极限。天然气管网系统存在输气能力曲线,能更完整地描述系统的输送能力极限。描述天然气管网系统运行时的工作点和输气安全性,并给出 GTC 的数学模型。提出 GTC 曲线的定义、模型、指标及绘制方法。分别基于小型天然气管网和大型比利时天然气管网验证所述方法,并与现有方法对比,分析 GTC 曲线的理论意义与应用前景。结果表明:GTC 仅是 GTC 曲线中的极大值点,达到 GTC 的临界安全状态不只一个,同时还存在很多小于 GTC 的临界安全状态;GTC 曲线能反映系统在不同负荷分布下的输气极限,有助于更深入理解管网的输气能力范围,并指导规划运行。

关键词:天然气管网系统; 输气能力; 输气能力曲线; 输气安全性; 输送能力极限

中图分类号:TE 832 文献标志码:A

引用格式:宋晨辉,肖峻,陈潜,等.天然气管网系统的输气能力曲线[J].中国石油大学学报(自然科学版),2022,46 (2):160-167.

SONG Chenhui, XIAO Jun, CHEN Qian, et al. Gas transmission capability curve of natural gas pipeline system[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022,46(2):160-167.

Gas transmission capability curve of natural gas pipeline system

SONG Chenhui¹, XIAO Jun¹, CHEN Qian², QU Yuqing¹, QIU Zekai¹, LI Hang³

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Mechanical and Storage and Transportation Engineering, China University of Petroleum(Beijing),

Beijing 102249, China;

3. Suzhou Operation and Maintenance Station, Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Suzhou 215000, China)

Abstract: The gas transmission capability (GTC) is a key index for the natural gas pipeline system, which is used to describe the transmission capability limit of the system. There exists the GTC curve in the natural gas pipeline system, which can describe the transmission capability limit of the system more completely. The operating point and the security of natural gas transmission were defined, and the mathematical model of GTC was presented meanwhile. Then, the definition, model, indices and plotting method of the GTC curve were proposed. A small-scale natural gas pipeline network and large-scale natural gas pipeline network (Belgium system) were used to verify the proposed methods. The method in this paper was compared with the traditional method, and the theoretical value and application prospect of GTC curve were discussed further. The results show that GTC is just the maximum point on the curve. The critically secure state of GTC may not be unique, and there exist many critically secure states whose gas transmission volumes are less than GTC. The GTC curve can reflect the gas transmission limit of the system under different load distributions, which is beneficial to better understand the range of transmission limit of natural gas pipeline system, and to guide the planning and operation.

收稿日期:2021-00-00

基金项目:国家自然科学基金项目(51877144)

第一作者:宋晨辉(1993-),男,博士研究生,研究方向为天然气与综合能源系统的安全分析。E-mail: songchenhui66399@163.com。 通信作者:肖峻(1971-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为能源系统规划与运行安全性。E-mail: xiaojun@tju.edu.cn。 Keywords: natural gas pipeline network system; gas transmission capability; gas transmission capability curve; gas transmission security; transmission capability limit

天然气在保障能源安全方面具有战略意义[1]。 中国已建成天然气管线 10 万公里,其一次能源消费 占比已超8%^[2]。用气增长对管网运行安全提出了 挑战,准确分析管网输送能力是保障安全的前 提^[3]。提出了输气能力(gas transmission capability, GTC)^[45]描述管网输送能力。GTC 是系统运行极 限,是保障输气安全的关键状态。相关研究主要针 对正常工况^[4-10],包括模型概念^[4-8,10]、优化方法^[5-9] 以及工程应用^[4,8,10] 等。Thorsten 等^[7] 总结了 GTC 模型和求解方法。黄燕菲等^[9]对用气量不确定时 的 GTC 进行了研究。Benjamin 等^[10]指出了 GTC 的 商业价值。除正常工况外,部分研究还考虑了故障 工况^[11-12]。Pavel 等^[11]基于图论方法提出了元件故 障时的 GTC 模型。Trung 等^[12]提出了元件失效情 况下的 GTC 计算方法。对于单元件构成的简单系 统,可通过单一指标描述其能力,如管道通过最大允 许流量描述输送能力。但对于更复杂系统,往往需 多个指标描述其能力特性,如压缩机不仅通过最大 压力增量描述最优工况下的增压能力,还会采用绝 热压头-转速、流量特性曲线^[13]完整描述其在不同 工况下的工作特性。天然气管网是多元件构成的网 络^[3],GTC 仅在特定状态下可以达到。实际运行 中,用户需求存在不确定性,在许多负荷分布下,系 统极限状态并不是 GTC, 而是其他未知极限状态, 因此有必要找到管网系统完整的输气能力极限。笔 者研究发现天然气管网存在输气能力曲线,能完整 刻画输气能力极限,对评估输送能力与管网规划具 有应用价值。

1 预备概念

1.1 状态变量与工作点

为简化天然气管网安全分析,定义工作点:工作 点为可独立描述系统输气安全性的状态变量集合。 工作点概念源于电力系统^[14],是简化安全分析的有 效手段,同样适用于天然气管网系统。

在管网分析时,状态变量可分为水力变量和可 控变量。选取节点流量 f_i 作为工作点,且只选取负 荷和气源节点流量,其模型可表示为

 $W = (f_{1,1}, \dots, f_{1,i}, \dots, f_{1,n}, f_{s,1}, \dots, f_{s,j}, \dots, f_{s,m}).$ (1) 式中, $f_{1,i}$ 为第 *i* 个负荷节点的流量; $f_{s,j}$ 为第 *j* 个气源 节点的流量, 规定天然气流出节点的方向为正; *n* 和 m分别为负荷节点和气源节点的个数。

仅选取负荷和气源节点流量的原因如下:①非 负荷、非气源外的联络节点的流量恒为0,因此未选 取联络节点流量;②在安全分析时,为满足负荷需 求,气源节点的压力应在安全范围内可调,因此未选 取气源压力;③通过水力计算,全部水力变量可由负 荷节点流量和气源节点压力计算得到,需判断这些 计算到的状态量是否满足自身约束,但不需将其计 入工作点;④在安全分析时,系统会对可控变量进行 主动调节,以满足管网运行安全,可控变量只需满足 自身的上下限约束即可,因此未选取可控变量。

1.2 安全工作点与运行约束

1.2.1 安全性与安全工作点

天然气管网的安全性指对于一个工作点,其所 有状态量是否满足运行约束,若满足,则管网安全, 该工作点是安全工作点,记为 W_s;若不满足,则输气 时存在安全隐患,该工作点不安全。全部的安全工 作点构成了安全工作点集合,记为 **D**_s。

上述定义借鉴了电力系统的安全性^[14]。"不安 全"的含义是该工作点不是"安全"的,会产生安全 隐患^[15-16],若存在隐患继续运行,将可能引发安全 故障。

1.2.2 运行约束

运行约束包括管道压降方程、节点流量平衡、回 路压降平衡、节点流量与压力上下限等,具体如下:

$$\begin{cases} C_{1}:f_{ij} = k_{ij}s_{ij}\sqrt{|p_{i}^{2} - p_{j}^{2}|}, \\ k_{ij} = \left(\frac{T_{0}d_{ij}^{5}}{1.62\rho TZ l_{ij}\lambda_{ij}}\right)^{0.5}, \\ C_{2}:\sum_{j \in I} f_{ij} = f_{i}, \\ C_{3}:\sum_{ij \in loop_{n}} \Delta p_{ij} = 0, \\ C_{4}:f_{i}^{\min} \leq f_{i} \leq f_{i}^{\max}, \\ C_{5}:p_{i}^{\min} \leq p_{i} \leq p_{i}^{\max}, \\ C_{6}:f_{ij} \leq C_{ij}, \\ C_{7}:\varepsilon_{i}^{\min} \leq \varepsilon_{i} \leq \varepsilon_{i}^{\max}, \end{cases}$$

$$(2)$$

 C_1 为管道压降方程约束^[17]。

式中, k_{ij} 为管道ij的压降方程系数; s_{ij} 为天然气流 动方向的状态系数, 当 $p_i \ge p_j$ 时取 1, 否则取-1; T_0 为标准状态下的零摄氏度; $\rho \ T$ 和 Z 分别为天然气 密度、输送温度和压缩因子; d_{ij} 、 l_{ij} 和 λ_{ij} 分别为管道ij内径、长度和摩阻系数。

 C_2 为节点流量平衡约束。

式中,I为与节点 i 通过管道相连的节点集合。

C3 为回路压降平衡约束。

式中, $j \in loop_n$ 表示管道 ij 属于回路 $n; \Delta p_{ij}$ 为管道 ij 压降。

 C_4 为节点流量上下限约束。

式中, f_i^{max} 和 f_i^{min} 分别为节点i流量上、下限值。 C_5 为节点压力上下限约束。

式中, p_i^{max} 和 p_i^{min} 分别为节点i压力上、下限值。

 C_6 为管道容积约束。

式中,C"为管道ij容积。

 C_7 为压缩机压比约束。

式中, $\varepsilon_i^{\text{max}}$ 和 $\varepsilon_i^{\text{min}}$ 分别为压缩机*i*压比上、下限值。

1.3 输气能力

输气能力(GTC)为天然气管网系统在满足运行 约束时最大的天然气输送量^[5,7]。基于安全工作 点,GTC 的数学模型为

 $Q_{\rm GTC} = \max \sum_{i=1}^{n} f_{1,i}$,

s. t. $\{f_{1,1}, \dots, f_{1,i}, \dots, f_{1,n}\} = W_1 \subseteq W \in \Omega_s.$ (3) 式中, Q_{crc} 为管网的最大流量; W_1 为由工作点集合 W中全部负荷节点流量构成的向量。 $W \in \Omega_s$ 表示 W属于安全工作点集合,需为安全工作点。

2 输气能力曲线

2.1 定义与模型

2.1.1 临界工作点

为描述系统极限状态,定义临界工作点:对于某 安全工作点,若任意负荷流量增加,且其他负荷流量 不减少,都会导致系统存在安全隐患,则称该安全工 作点为临界工作点,简称临界点,记为 W_b。全部临 界点构成临界点集合,记为 **Ω**_b,模型为

$$\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{b}} = \begin{cases} \boldsymbol{W}_{\mathrm{b}} & (f_{1,1}, \cdots, f_{1,i}, \cdots, f_{1,j}, \cdots, f_{1,m}) \subseteq \boldsymbol{W}_{\mathrm{b}} \in \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{s}}, \\ (f_{1,1}^{*}, \cdots, f_{1,i}^{*}, \cdots, f_{1,j}^{*}, \cdots, f_{1,m}^{*}) \subseteq \boldsymbol{W}^{*} \\ f_{1,i}^{*} = f_{1,i} + \varepsilon, \\ f_{1,j}^{*} = f_{1,j}, \ j \neq i; \\ \forall \varepsilon > 0, \ \forall \ i = 1, 2, \cdots, m, \ \boldsymbol{W}^{*} \notin \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{s}}. \end{cases}$$

(4)

式(4)含义如下:工作点 W_b 需为安全工作点, 因此属于 Ω_s ,即 $W_b \in \Omega_s$; $(f_{1,1}, \dots, f_{1,i}, \dots, f_{1,j}, \dots, f_{1,m})$ 是 W_b 中由负荷节点流量构成的向量;第 *i* 个负 荷增加后形成新工作点 W^* ;如果对于 $\forall \varepsilon > 0$, $\forall i = 1, 2, \dots, m$,使得 $W^* \notin \Omega_s$,则 W_b 具有临界安全性, 是一个临界点。全部的 W_b 构成了临界工作点集 合 Ω_b 。

2.1.2 输气能力曲线

基于临界工作点,定义输气能力曲线:输气能力 曲线是将所有临界工作点的输气量按大小升序排列 形成的曲线,简称 GTC 曲线。模型为

$$Q_{\text{GTCcurve}} = \left\{ \sum_{i=1}^{n} f_{1,i,j} \middle| \begin{array}{l} f_{1,i,j} \in \boldsymbol{W}_{\mathrm{b},j}, \ \boldsymbol{W}_{\mathrm{b},j} \in \boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{b}}; \\ \sum_{i=1}^{n} f_{1,i,j} \leqslant \sum_{i=1}^{n} f_{1,i,j+1}. \end{array} \right.$$
(5)

式(5) 含义如下: $Q_{GTCurve}$ 表示由全部临界工作 点输气量构成的 GTC 曲线; $W_{b,j}$ 表示临界工作点*j*, 即 $W_{b,j} \in \Omega_{b}$; $f_{1,i,j}$ 表示 $W_{b,j}$ 中负荷节点*i*的流量,即 $f_{1,i,j} \in W_{b,j}$,因此 $W_{b,j}$ 的输气量可表示为 $\sum_{i=1}^{n} f_{1,i,j}$; GTC 曲线中,临界工作点的输气量按大小升序排列, 因此 $W_{b,j}$ 的输气量将小于 $W_{b,j+1}$ 的输气量,即 $\sum_{i=1}^{n} f_{1,i,j} \leq \sum_{i=1}^{n} f_{1,i,j+10}$

GTC 曲线的横坐标取排序后的临界工作点序 号,这是因为该方式下曲线将具备排序特征,能更好 地反映管网输气能力从小到大的范围和变化幅度。

2.2 绘制方法

由于临界工作点的个数具有无穷性,可通过采 样法绘制 GTC 曲线,包括5步。

(1)按照节点流量约束确定状态空间。

(2)以β为采样步长,在状态空间中生成 X 个 工作点。β 是影响 GTC 曲线求解精度与时间的关键,其选取依据为该β值下可求解到超过 100 个的 临界点,该数量级足以保证绘制精度,且时间可控。

(3)安全工作点求解。依次对生成的工作点进 行水力计算,筛选出满足运行约束的安全工作点集 $\Omega_s = \{W_1, \dots, W_x\}, x 表示 \Omega_s$ 中的安全工作点个数。 工作点 $W_k(k=1,2,\dots,x)$ 的安全校验过程为:在允 许范围内,对气源压力与压缩机压比进行遍历,每次 遍历时都对 W_k 对应的运行状态进行水力计算,并 校验是否存在全部状态量的结果均安全的运行状 态,若存在,则记录 W_k 是一个安全工作点;若遍历 后找不到 W_k 对应的安全运行状态,则 W_k 不安全。

(4)临界工作点求解。在 Ω_s 中取一个工作点 W_i,取 W_i 中负荷节点流量组成向量 W_{1,j},将 W_{1,j}的 任一元素增加 β,可得 n 个新向量(n 为负荷节点 数),若 Ω_s 中存在包含任一新向量的工作点,则原 工作点 W_i 不临界;否则,记录 W_i 为一个临界工作 点。同理,校验 Ω_{s} 中所有工作点的临界性。

(5)逐个计算临界工作点输气量,将临界点按输 气量由小到大排序,得到采样点。以采样点序号为横 坐标、采样点输气量为纵坐标绘制 GTC 曲线。

2.3 指标

GTC 曲线包括以下指标。

(1) *Q*^{max}_{CTC}。其表示 GTC 曲线的最大值,即传统的 GTC 代表管网输送能力极限的最高水平。

(2) *Q*^{min}_{CTC}。其表示 GTC 曲线的最小值,可在求 得 GTC 曲线后得到,代表了管网输送能力极限的最 低水平。

(3) $\overline{Q_{\text{CTC}}}$ 。其表示 GTC 曲线的均值,反映管网 输送能力极限的平均水平,表达式为

$$\overline{Q_{\text{GTC}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Q_{\text{GTC}}^{i}.$$
(6)

式中,N为采样到的临界工作点个数;Qⁱ_{crc}为第 i 个临界工作点的输气量。

(4) Q_{CTC}^{M} 。其表示 GTC 曲线的中位数,反映管 网输送能力极限的中等水平;较 $\overline{Q_{CTC}}$, Q_{CTC}^{M} 不会受到 临界点集合中极端值的影响。表达式为

$$Q_{\rm GTC}^{\rm M} = \begin{cases} \frac{Q_{\rm GTC}^{(N/2)} + Q_{\rm GTC}^{(N+1)/2}}{2} , N \, \text{为偶数}; \\ Q_{\rm GTC}^{(N+1)/2} , N \, \text{为奇数}. \end{cases}$$
(7)

式中,Q^(N/2)为第 N/2个临界工作点的输气量。

3 算 例

3.1 小型天然气管网

采用5节点天然气管网^[18]作为小型测试系统 进行验证。系统结构如图1所示,包含5个节点、3 条管道以及1台压缩机。



Fig. 1 Structure of 5-node natural gas pipeline system

表1和2给出了系统的管道与节点参数,压缩 机的压比为1~1.5。

表1 管网系统管道参数

Table 1	Pipe	parameters	of	pipeline	system
---------	------	------------	----	----------	--------

管道	起点	终点	内径/ m	长度/ km	容积/ (m ³ ·s ⁻¹)
1	N2	N1	0.88	33.0	275
2	N4	N3	0.88	34.3	300
3	N5	N4	0.88	88.7	500

表 2 管网系统节点参数

节点	节点类型	压力范围/ MPa	流量范围/ (m ³ ・s ⁻¹)
N1, N4	负荷节点	3~7	80~300
N5	气源节点	5~6	$-\infty \sim 0$

3.2 输气能力曲线

图 2 为 1 m³/s 采样步长下的 GTC 曲线结果。 由图 2 可以看出,GTC 曲线反映了系统完整的输气 极限,曲线的最大值 $Q_{\text{CTC}}^{\text{max}}$ 为 377 m³/s, $Q_{\text{CTC}}^{\text{min}}$ 、 $\overline{Q_{\text{CTC}}}$ 和 $Q_{\text{CTC}}^{\text{M}}$ 分别为 356、374 和 377 m³/s。



pipeline system

验证 GTC 曲线结果的正确性,即曲线上的采样 点是临界安全的。以采样点1,即(275,81,-356)为 例进行说明。表3给出了气源节点的压力为6 MPa、压缩机的压比为1.5时采样点1的校验结果。 从表3可以看出,采样点1是安全的,因为此时的状 态变量均满足安全约束。验证采样点1的负荷节点 流量增加后,新工作点将不安全。

(1)当节点 N1 的流量增加 1 m³/s 后,工作点 流量变为(276,81,-357)。由水力计算可知,此时 N1 压力为 2.95 MPa,小于下限(3 MPa);管道 1 和 管道 2 的天然气流量为 276 m³/s,超出上限(275 m³/s),这些情况均会引发安全隐患。

需说明,流量增加后,无论在允许范围内如何 调整气源压力和压缩机压比,均不能消除安全 隐患。

(2)同理可验证当节点 N4 的流量增加后,N1
的压力变为 2.97 MPa,将小于节点压力下限(3
MPa),同样会引发安全隐患。因此,采样点1(275,81,-356)是临界安全的。

2022年4月

		•••								
	Table 3	8 Result	s of crit	icality c	hecking o	f sample	point 1			
医结骨太	工作点流量/	节,	点压力/M	Pa	管道法	充量∕(m ³	• s ⁻¹)	压缩机	安全性	临界性
杀犯状态	$(m^3 \cdot s^{-1})$	N1	N4	N5	1	2	3		校验结果	校验结果
采样点1	(275, 81, -356)	3.02	3.46	6	275	275	356	1.5	安全	平样占1
负荷节点流量	(276, 81, -357)	[2.95]	3.44	6	[276]	[276]	357	1.5	不安全	不什点 I 日去於田姓
增加后的系统状态	(275, 82, -357)	[2.97]	3.44	6	275	275	357	1.5	不安全	具有帕介性

表 3 采栏占 1 的临界性校验结果

注:方括号中数据表示不满足安全约束的状态变量。

3.3 与传统方法对比

采用文献[5]中的传统优化方法和本文中方法 计算 GTC,对比两种方法的计算结果。

对比两方法计算结果的相同部分,均能得到 GTC,如表4所示。可看出二者计算结果一致,说明 通过本文方法可正确求解系统的 GTC。

表4 计算结果的相同部分(GTC)对比

Fable 4	Comparison	of the	same	part of	calculated	results	(GTC)
---------	------------	--------	------	---------	------------	---------	-------

士计	$Q_{ m GTC}^{ m max}$ /	工作点流量/	节点济	〔量/(m ³	• s^{-1})	节,	点压力/N	MPa	管道济	ξ量∕(m ³	$\cdot s^{-1}$)	压缩机
刀伝	$(m^3\boldsymbol{\cdot}s^{^{-1}})$	$(m^3 \cdot s^{-1})$	N1	N4	N5	N1	N4	N5	1	2	3	压比
传统优化方法	377	(219, 158, -377)	219	158	-377	3.07	3.01	6	219	219	377	1.5
本文方法	377	(219, 158, -377)	219	158	-377	3.07	3.01	6	219	219	377	1.5

但本文中方法所得结果比传统方法更加丰富, GTC 曲线包括全部的 GTC 点与输气量非 GTC 的临 界工作点,见表5。由表5和图2可看出:①本文中 方法可求得更完整的 GTC 点,共 140 个(采样点 57~196),在 GTC 曲线中占比 71%,传统优化方法 仅可求得其中之一(与优化初值相关): ②本文中方 法还得到大量非 GTC 的临界工作点,共 56 个(采样 点 1~56),在 GTC 曲线中占比 29%,这些工作点的 输气量较 GTC 有不同程度下降。

本文中方法优势如下:可描述系统完整的输气 极限状态,即GTC曲线包含全部GTC点、输气量非 GTC 的临界工作点信息,这些工作点均具有临界安 全性.代表系统在不同负荷分布下的输气极限:而传 统方法只能描述其中的一个极限状态。

表 5 GTC 曲线中的 GTC 点、输气量非 GTC 的临界工作点举例

Table 5 Examples of GTC points and critical points whose total gas volumes not being GTC on GTC curve

	GTC 点			输气量非 GTC 的临	富界工作点	
采样点 序号	工作点流量/ (m ³ ・s ⁻¹)	输气量/ (m ³ ・s ⁻¹)	采样点 序号	工作点流量/ (m ³ ・s ⁻¹)	输气量/ (m ³ ・s ⁻¹)	较 GTC 减小 的比例
57	(219, 158, -377)	377	1	(275, 81, -356)	356	5.6%
117	(159, 218, -377)	377	33	(253, 126, -369)	369	2.1%
196	(80, 297, -377)	377	56	(220, 156, -376)	376	0.3%

3.4 输气能力曲线应用

基于5节点天然气管网系统,对GTC曲线的应 用进行说明,通过计算不同管网设计方案的 GTC 曲 线,可以评价其输气性能的优劣。

设计改进5节点天然气管网系统(改进系统) 作为对照,较图1所示的原始5节点天然气管网(原 始系统),改进系统的压缩机向 N4 方向移动了 2.5 km.但管道总长度未变。

利用传统 GTC 指标与本文方法评价原始系统 与改进系统的输气性能。表6为评价结果对比,图 3 对比了两系统的 GTC 曲线。

由表6和图3可看出:

(1)利用传统方法对两系统进行评价,发现二者 的 GTC 均为 377 m³/s,评价结果为二者输气性能相同。

(2)利用本文方法对两系统进行评价,发现二者 GTC 虽然一致,但 GTC 曲线却存在很大差异,改进系 统的 GTC 曲线要高于原始系统的 GTC 曲线,更多临 界工作点的输气量达到了 GTC:同时改进后系统的 Q_{GTC}^{\min} 为368 m³/s, $\overline{Q_{\text{GTC}}}$ 为376 m³/s, 均高于原始系统, 因此评价结果为改进系统的输气性能更优。

表 6 原始系统与改进系统的评价结果对比

Table 6 Evaluation results comparison of original system and modified system

	传统 GTC	指标			本文方法		
系统	$\frac{Q_{\text{GTC}}^{\text{max}}}{(\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})}$	评估结果	$Q_{\text{GTC}}^{\text{max}}$ / (m ³ · s ⁻¹)	$Q_{\mathrm{GTC}}^{\mathrm{min}}/$ (m ³ · s ⁻¹)	$\overline{Q_{\text{GTC}}}/$ (m ³ · s ⁻¹)	$Q_{\text{GTC}}^{\text{M}}$ (m ³ · s ⁻¹)	评估结果
原始	377	二者输气	377	356	374	377	改进系统的
改进	377	性能相同	377	368	376	377	输气性能更优



Fig. 3 GTC curves of modified and original systems

综上,传统 GTC 指标无法区分两个方案,本文 方法能有效区分这两方案的优劣,显示了本文方法 对天然气管网评价与优化设计的良好应用潜力。

3.5 大型比利时天然气管网

通过比利时天然气管网^[19]进一步验证 GTC 曲 线的存在性,并说明其在发现输气瓶颈与利用管网资 源方面的优势。图 4 为系统结构示意,以东南地区管 网(图中红框内范围)为例验证。具体参数见表 7~9。





Fig. 4 Structure of Belgium natural gas pipeline system

图 5 为本例的 GTC 曲线,采样步长选取 2.31 m³/s,即 0.2×10⁶ m³/d。该步长下采样到 GTC 点共 445 个(采样点 136~580),占比 77%;输气量小于 GTC 的临界工作点共 135 个(采样点 1~135),占比 为 23%。系统的 Q^{max}_{CTC}、Q^{min}_{CTC} 和 Q^M_{CTC} 分别为

388. 89、337. 96、384. 26 和 388. 89 m $^3/s_{\circ}$

表7 管网系统管道参数

Table 7 Pipe parameters of natural gas pipeline system

盔道	却占		内径/	长度/	容积/
旧坦	爬品	经品	$10^{-3}\mathrm{m}$	km	$(m^3 \cdot s^{-1})$
1	N8	N9	890.0	5	347.22
2	N8	N9	395.5	5	57.87
3	N9	N10	890.0	20	347.22
4	N9	N10	395.5	20	57.87
5	N10	N11	890.0	25	231.48
6	N10	N11	395.5	25	57.87
7	N11	N17	315.5	10.5	115.74
8	N17	N18	315.5	26	115.74
9	N18	N19	315.5	98	57.87
10	N19	N20	315.5	6	57.87

表8 管网系统节点参数

Table 8 Node parameters of natural gas pipeline system

节点	节点类型	压力范围/MPa	流量范围/(m ³ ・s ⁻¹)
N8	气源节点	6~6.1	-405.09~0
N9	联络节点	0~8	—
N10	负荷节点	4~8	69.44~173.61
N11	负荷节点	4~8	115.74~231.48
N17	联络节点	0~8	_
N18	联络节点	0~7.5	—
N19	负荷节点	2~7	0~23.15
N20	负荷节点	2~7	11. 57~23. 15

注:由于 N11 需向 N12 输气,故 N11 也应等效为负荷节点。

表9 压缩机压比范围

Table 9 Pressure ratio ranges of compressors

压缩机	进气方向	出气方向	压比范围
1	N8	N9	1~1.1
2	N8	N9	1~1.1
3	N17	N18	1~11



图 5 比利的天然飞官网系统 GIC 曲线 Fig. 5 GTC curve of Belgium natural gas pipeline system

GTC 曲线有助于充分利用管网资源,提升输气

效率。以采样点1(83.38、231.6、0、23.16和 -338.14)和采样点136(138.96、231.6、0、18.53 和-389.09)为例进行说明。可以看出,二者负荷分 布的区别不大,节点N11和N19的负荷相同,仅节 点N10和N20的负荷存在区别;但二者总输气量却 存在明显区别,采样点1的输气量为338.14 m³/s, 远小于采样点136的389.09 m³/s。这是由于二者 输气瓶颈不同,在采样点1的负荷分布下,管网输气 资源未得到充分利用。表10通过分析各状态量的 安全裕度^[20]对其进行解释。

表 10 采样点 1 和 136 的各状态变量安全裕度对比

Table 10	Security margin	comparison of s	state variables of	f sampling points	1 and 13	36
	• •	-				

采样点		节点压力/MPa					管道流量/(m ³ ・s ⁻¹)												
		N8	N9	N10	N11	N17	N18	N19	N20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1#(83.38, 231.6,0,23.16, -338.14)	状态变量	6.1	6.0	5.7	5.5	5.4	5.4	2.4	[2.0]	301	37	301	37	227	28	23	23	23	23
	安全裕度	—	2	1.7	1.5	2.6	2.1	0.4	[0]	46	21	46	21	4	30	93	93	35	35
136#(138.96, 231.6,0,18.53, -389.09)	状态变量	6.1	6.0	5.6	5.3	5.3	5.5	3.9	3.7	[347]	42	[347]	42	223	27	19	19	19	19
	安全裕度	—	2	1.6	1.3	2.7	2	1.9	1.7	[0]	16	[0]	16	8	31	97	97	39	39

注:(1)安全裕度指状态变量距其安全运行范围上下限的裕量值^[20];(2)方括号内状态变量的安全裕度为0,为对应运行状态下的输气 瓶颈。

表 10 展示了气源节点压力为 6.1 MPa,压缩机 压比分别为 1、1、1.1 的情况,同理易验证其他情况。 由表 10 可看出,采样点 1 和采样点 136 的输气瓶颈 不同,采样点 1 的输气瓶颈为节点 N20 的压力,任 意负荷输气量增加,将导致该节点压力低于下限;采 样点 136 的输气瓶颈为管道 1 和 3 的流量,任意负 荷输气量增加,将导致两管道的流量超出上限。显 然,采样点 136 的运行状态下,管网输气资源得到了 较充分利用;而采样点 1 的运行状态下管道容量存 在较大裕量,输气资源没有得到充分利用。

上述现象反映了管网输气时的"有气无力"^[21] 问题,对于管网末端负荷,虽然管道仍有输气资源可 用,但由于输气过程压降较大,易导致末端压力不 足。该问题常发生在纵深较长管线的用气高峰期, 单纯通过管道输气来保障末端用户需求,往往会造 成输气资源浪费。天然气公司通常会采用储气调峰 与订立供用气合同的方式来兼顾用户需求与管网资 源利用效率。

传统 GTC 指标只能描述系统在理想状态下的 输气极限,无法发现类似的输气瓶颈,难以为管网公 司运行方式调整提供有效依据,易造成输气资源 浪费。

4 结论

(1) GTC 的局限性为 GTC 仅能描述输气量为 GTC 的一个极限状态,但系统运行时,不仅存在多 个输气量为 GTC 的极限状态,还存在输气量小于 GTC 的极限状态,这些状态都是临界安全的。

(2) GTC 曲线可完整描述系统的输气极限,传统 GTC 是曲线的一个指标,即曲线的最大值点。

(3) GTC 曲线扩展了 GTC 指标,可明确系统完整的能力极限,有助于全面评价管网输气性能、发现输气瓶颈并提升管网的资源利用效率。

参考文献:

[1] 李阳,廉培庆,薛兆杰,等.大数据及人工智能在油气 田开发中的应用现状及展望[J].中国石油大学学报 (自然科学版),2020,44(4):1-11.

LI Yang, LIAN Peiqing, XUE Zhaojie, et al. Application status and prospect of big data and artificial intelligence in oil and gas field development [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020,44(4):1-11.

- [2] 张劲军,苏怀,高鹏.天然气管网韧性保供问题及其研究展望[J].石油学报,2020,41(12):1665-1678.
 ZHANG Jinjun, SU Huai, GAO Peng. Resilience-based supply assurance of natural gas pipeline networks and its research prospects [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020,41 (12):1665-1678.
- [3] 黄维和.大型天然气管网系统可靠性[J].石油学报, 2013,34(2):401-404.
 HUANG Weihe. Reliability of large-scale natural gas pipeline network [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34 (2):401-404.
- [4] FESTUS O. OLORUNNIWO, PAUL A J. Optimal capacity expansion for natural gas transmission networks-a de-

composition approach [J]. Engineering Optimization, 1982,6(1):13-30.

- [5] 杨毅,李长俊,尚蜀娅. 天然气管网输配气量优化研究
 [J]. 天然气工业,2006,26(1):123-125,170.
 YANG Yi, LI Changjun, SHANG Shuya. Study on gas transmission and distribution optimization of pipeline system [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1):123-125,170.
- [6] 杨毅,李长俊.优化算法在天然气管网运行中的应用
 [J].西南石油学院学报,2006,28(1):79-82,10.
 YANG Yi, LI Changjun. Application of algorithms in optimal operation of natural gas pipeline network [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006,28(1):79-82,10.
- [7] THORSTEN K, BENJAMIN H, MARC E, et al. Evaluating gas network capacities [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2015:65-84.
- [8] CLAUDEMIR D V, SÉRGIO R L, ANTONIO C G, et al. Network flows modeling applied to the natural gas pipeline in Brazil [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2013,14(14):211-224.
- [9] 黄燕菲,吴长春,陈潜,等.基于不确定性用气量的输 气管网供气可靠度计算方法[J].天然气工业,2018, 38(8):126-133.

HUANG Yanfei, WU Changchun, CHEN Qian, et al. A computation model for gas supply reliability analysis in a gas pipeline network based upon the uncertainty of gas consumption [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(8): 126-133.

- [10] BENJAMIN H, THORSTEN K, LARS S, et al. A system to evaluate gas network capacities: concepts and implementation [J]. European Journal of Operational Research, 2018,270:797-808.
- [11] PAVEL P, VYTIS K. Monte-Carlo based reliability modelling of a gas network using graph theory approach: 2014 9th International Conference on Availability, Reliability and Security[C]. Switzerland: Fribourg, 2014:380-386.
- [12] TRUNG H T, SIMON F, RHYS A, et al. Impact of compressor failures on gas transmission network capability [J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 55: 741-757.
- [13] 李立刚,张朝晖,戴永寿,等. 基于改进模式搜索算法的天然气管网运行优化[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(4):139-143.
 LI Ligang, ZHANG Zhaohui, DAI Yongshou, et al. Op-

eration optimization based on improved pattern search algorithm in gas transmission networks [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2012,36(4):139-143.

- [14] 余贻鑫.电力系统安全域[M].北京:中国电力出版 社,2014:3-11.
- [15] 高乐,赵连琢,蒋万荣,等. 天然气输气压力对管道的 影响分析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2013,33 (15):261.
 GAO Le, ZHAO Lianzhuo, JIANG Wanrong, et al. Analysis of influence of gas transmission pressure on pipeline [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013,33(15):261.
- [16] 曹字光,伍志明,司伟山,等. 基于小冲杆试验的 X80 管道钢断裂韧性研究[J].中国石油大学学报(自然 科学版),2020,44(5):131-138.
 CAO Yuguang, WU Zhiming, SI Weishan, et al. Study on fracture toughness of X80 pipeline steel based on small punch test [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2020,44(5): 131-138.
- [17] 左丽丽,吴长春,丁明江. 输配气管网稳态仿真问题的拓广[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(1):111-114.
 ZUO Lili, WU Changchun, DING Mingjiang. Widened steady state simulation of gas distribution networks [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2006,30(1):111-114.
- [18] ANDRZEJ J O, SYLWESTER S. Optimal control of gas transportation systems: 1994 Proceedings of IEEE International Conference on Control and Applications [C]. UK:Glasgow, 1994:795-796.
- [19] DANIEL D W, YVES S. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm [J]. Management Science, 2000,46(11):1454-1465.
- [20] 杜志明,范军政.安全裕度研究与应用进展[J].中国 安全科学学报,2004(6):9-13.
 DU Zhiming, FAN Junzheng. Progress in study and application of safety margin [J]. China Safety Science Journal, 2004(6):9-13.
- [21] 魏欢,田静,李波,等.中国天然气储气调峰方式研究
 [J].天然气工业,2016,36(8):145-150.
 WEI Huan, TIAN Jing, LI Bo, et al. Research on natural gas storage and peak-shaving modes in China [J].
 Natural Gas Industry, 2016,36(8):145-150.

(编辑 沈玉英)