

“西气东输”管道工艺运行方案优化

吴长春 杨廷胜

(石油大学·北京)

吴长春等.“西气东输”管道工艺运行方案优化. 天然气工业, 2004; 24(11): 127~130

摘 要 “西气东输”管道全长 3900 km, 设计输气量为 $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 设计压力为 10 MPa, 外径为 1016 mm, 采用带内涂层的 X70 钢管敷设, 管道沿线分布着 10 座压气站和 11 条分气支线。在“西气东输”管道达到 $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的设计输气能力时, 全线投运的压气站和压缩机组数目较多。利用笔者自行研制的“西气东输”管道优化运行专用软件, 计算了在多种条件下的稳态优化运行方案, 并从输气工艺角度对计算结果进行了较深入的分析与讨论, 在此基础上总结了“西气东输”管道优化运行的基本规律, 对该管道投产后的运行调度及后期的增输改造具有参考价值。

主题词 西气东输 输气管道 稳定 运行 方案 最优化

一、优化模型、算法及软件系统

笔者根据“西气东输”管道的工艺设计方案建立了自己的稳态优化运行数学模型, 该模型与国外目前普遍采用的模型类似^[1,2], 包括管线级优化和站级优化 2 个层次^[3]。管线级优化的目的是确定全线各压气站的最优进、出站压力, 站级优化的目的是在给定压气站流量和进、出站压力的条件下确定其压缩机组的最优运行方案(包括运行压缩机组以及其中每台压缩机的运行参数)。这 2 级优化是相互关联的, 站级优化可以看作是管道级优化的子问题。对管道级优化我们采用动态规划法求解, 在求解过程中需要求解一系列站级优化问题。基于这些算法笔者开发了“西气东输”管道稳态优

化运行专用软件 WEGPOPT(West to East Gas Pipeline Optimization), 只要指定管道沿线各管段的输气流量等条件, 利用该软件就可以迅速计算出相应的最优稳态工艺运行方案。该软件还具有自选方案模拟功能, 可模拟用户指定的运行方案的实施效果, 同时还可用以验证计算得到的优化运行方案的最优性。

二、压缩机组配置研究及其特性

按照“西气东输”管道的工艺设计方案, 笔者利用国外压缩机厂家提供的 Pipeline Configurator 软件对“西气东输”管道进行了压缩机配置, 共选择了 3 种规格的离心压缩机, 分别为 PCL500-1、PCL500-2 和 PCL500-3, 其基本参数见表 1。

表 1 3 种型号离心式压缩机的基本参数表

型号	额定功率 (kW)	最高转速 (r/min)	最低转速 (r/min)	滞止流量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	喘振流量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	最大压比	最小压比
PCL500-1	12709	6300	3000	62.171	13.737	1.334	1.043
PCL500-2	18279	6300	3000	67.446	15.434	1.501	1.069
PCL500-3	19977	6300	3000	68.997	16.098	1.531	1.07

特性曲线拟合时所选转速为 4800 r/min

	PCL500-1	PCL500-2	PCL500-3
压头-流量曲线	$H=16.3216+0.5450Q-0.0125Q^2$	$H=22.5527+0.7692Q-0.0159Q^2$	$H=24.8803+0.7475Q-0.0161Q^2$
效率-流量曲线	$\eta=0.3579+0.0295Q-0.005Q^2$	$\eta=0.2816+0.0318Q-0.005Q^2$	$\eta=0.2537+0.0305Q-0.004Q^2$
滞止-转速曲线	$Q_{\max}=-0.0824+0.0099N+2.1 \times 10^{-9}N^2$	$Q_{\max}=0.5387+0.0090N+2.49 \times 10^{-7}N^2$	$Q_{\max}=-0.5297+0.0094N+2.57 \times 10^{-7}N^2$
喘振-转速曲线	$Q_{\min}=-0.1505+0.0046N-3.15 \times 10^{-9}N^2$	$Q_{\min}=3.2179+0.0035N+2.01 \times 10^{-7}N^2$	$Q_{\min}=5.6059+0.0025N+3.42 \times 10^{-7}N^2$

作者简介: 吴长春, 1962 年生, 石油大学(北京)油气储运工程系教授。地址: (102249) 北京市昌平区石油大学油气储运工程系。电话: (010)89734398, 13601026885。E-mail: wucc@bjpeu.edu.cn

表1中的流量对应进口状态,最大、最小压比是根据软件所给出的压头数据利用气体组分换算出来的;表2列出了各压气站的压缩机组配置情况。

表2 “西气东输”沿途各站压缩机组配置表

站名	里程(km)	配置机组数	备用机组数	压缩机	原动机	气价或电价
轮南	0	1	1	PCL500-2	燃气轮机	0.42元/m ³
四道班	319	1	1	PCL500-3	燃气轮机	0.42元/m ³
哈密	673	1	1	PCL500-3	燃气轮机	0.42元/m ³
红柳	972	1	1	PCL500-3	燃气轮机	0.42元/m ³
玉门	1286	1	1	PCL500-2	燃气轮机	0.42元/m ³
山丹	1630	1	1	PCL500-2	电动机	0.301元/度
中卫	2025	1	1	PCL500-2	电动机	0.281元/度
靖边	2363	1	1	PCL500-2	燃气轮机	0.42元/m ³
蒲县	2668	1	1	PCL500-1	电动机	0.275元/度
郑州	3009	1	1	PCL500-1	电动机	0.355元/度

三、运行方案优化与结果分析

基于上述基础数据,利用WEGPOPT软件计算了“西气东输”管道在3种输量下的稳态优化运行方

案,并对其进行了初步分析。这3种输量分别为3600×10⁴ m³/d、3000×10⁴ m³/d和2500×10⁴ m³/d,代表了“西气东输”管道设计输量、中等输量和低输量3种情形。通过对这3种输量下运行方案的计算分析,可进一步了解管道稳态运行的规律。

1. 总输量为3600×10⁴ m³/d时的运行方案

按年工作天数350天计算,3600×10⁴ m³/d的输量相当于126×10⁸ m³/a,超过设计输量6×10⁸ m³/a。一般说来,输气干线在设计输量上还有一定的裕量,据“西气东输”管道的工艺设计方案,最大输量可达3600×10⁴ m³/d,故选择3600×10⁴ m³/d输量进行计算分析。表3即为该输量下“西气东输”管道的稳态优化运行方案。值得注意的是,以下所有表中的功率都为驱动机的输出功率。

在总输量为3600×10⁴ m³/d的最优方案中,前面9座压气站都满负荷运行,只有末站的出站压力低于设计压力10 MPa,这是为了使管道终点压力尽量接近允许最低进站压力,从而避免明显的能量浪费。可见在设计输量下,可优化的空间很小。

表3 输量达3600×10⁴ m³/d时管道的稳态优化运行方案参数表

站号	站名	进站流量(10 ⁴ m ³ /d)	进站压力(MPa)	出站压力(MPa)	压比	开机(台)	进站温度(°C)	出站温度(°C)	转速(r/m)	多变效率(%)	功率(MW)	耗气量(10 ⁴ m ³ /d)	能耗费(万元/d)
1	轮南	3600	7.3	10	1.406	1	14	40.26	5875	82.81	17.32	15.89	6.672
2	四道班	3584.1	7.39	10	1.388	1	26.42	52.32	5836	79.43	18.355	16.83	7.0707
3	哈密	3567.3	7.1	10	1.446	1	27.23	56.53	6184	79.5	20.83	19.1	8.0239
4	红柳	3548.2	7.43	10	1.38	1	27.63	53.12	5784	79.44	17.935	16.45	6.9088
5	玉门	3531.7	7.49	10	1.37	1	23.37	48.07	5759	82.72	16.363	15.01	6.303
6	山丹	3516.7	7.52	10	1.363	1	20.57	44.69	5668	82.77	15.767	0	11.6222
7	中卫	3516.7	7.26	10	1.413	1	19.07	46.03	5965	82.82	17.63	0	12.1324
8	靖边	3516.7	7.49	10	1.37	1	23.08	47.73	5746	82.74	16.249	14.9	6.2592
9	蒲县	3501.8	7.94	10	1.291	1	25.53	45.51	6145	82.25	13.17	0	8.87
10	郑州	3067.5	7.76	9.42	1.245	1	24.83	41.84	5643	82.23	9.811	0	8.5297
终点		1202.7	4.04										
合计						10					163.431	98.18	82.3919

备注:各分输支线的分气量(单位:10⁴ m³/d)

分输点	博爱	郑州	淮阳	刘巷子	定远	青山镇	营房镇	夏家村	常州	无锡	苏州	总计
分气量	106	329	91.4	74.57	70.6	131.4	495.7	57.14	643	60.6	240	2299

2. 总输量为2500×10⁴ m³/d时的运行方案

为满足“西气东输”管道分气支线的分气量要求,输气量应不低于2500×10⁴ m³/d,表4为该输量下的稳态优化运行方案,表5为隔站开机的自选方案,图1为该输量下2种方案的沿程压降比较。

对于电机驱动压气站,其单位功率对应的能耗费是燃气轮机驱动压气站的1.74~2.19倍,以表5

中的轮南站为例,驱动机输出功率为12.64 MW,燃气轮机驱动时能耗费用为4.996万元/d,若换为电机驱动,利用该软件的自选功能算出能耗费用为8.6995~10.9904万元/d,气价和电价来源于表2。

比较表4、5可知,自选方案1比优化方案少开2座压气站,隔站开机的运行方案的总能耗费用比优化方案高了21.12%。2个方案的总压降很接近,优

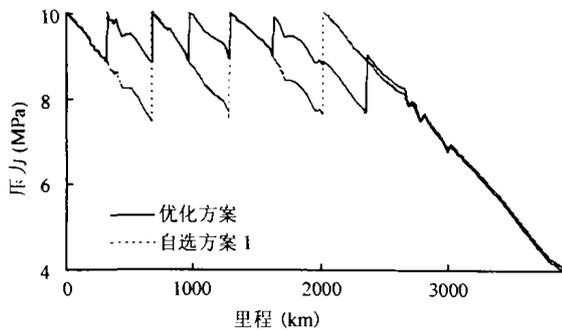


图 1 2500×10⁴ m³/d 输量下优化与隔站开机方案的沿程压降比较图

化方案为 13.02 MPa, 自选方案为 13.46 MPa。优化方案中第 8 站承担了绝大部分功率; 自选方案 1 第 7 站承担了绝大部分功率。第 7 站为电机驱动, 第 8 站为燃气轮机驱动, 故自选方案 1 的能耗费用高于优化方案。

表 6 给出了另一个自选方案 2, 该方案的运行压缩机组合不同于优化方案, 共有 5 台压缩机运行, 图 2 为优化方案与自选方案 2 的沿程压降比较。与优化方案相比, 自选方案 2 的能耗费用比优化方案高 102.6%, 同时全线总功率高 46.13%, 这表明优化方案相对于自选方案 2 具有显著的优越性。产生这种

表 4 2500×10⁴ m³/d 时管道的优化运行方案参数表

站号	站名	进站流量 (10 ⁴ m ³ /d)	进站压力 (MPa)	出站压力 (MPa)	压比	开机 (台)	进站温度 (°C)	出站温度 (°C)	转速 (r/m)	多变效率 (%)	功率 (MW)	耗气量 (10 ⁴ m ³ /d)	能耗费 (万元/d)
1	轮南	2500	7.3	10	1.406	1	14	40.26	5694	78.92	12.642	11.59	4.8697
2	四道班	2488.4	8.81	10	1.16	1	25.93	37.41	3773	79.22	5.51	5.05	2.1226
3	哈密	2483.4	8.81	10	1.16	1	25.42	36.9	3773	79.18	5.491	5.04	2.1151
4	红柳	2478.3	8.81	10	1.16	1	23.42	34.85	3748	79.13	5.427	4.98	2.0905
5	玉门	2473.3	8.89	10	1.15	1	19.73	30.37	3696	82.5	4.771	4.38	1.8379
6	山丹	2469	8.93	9.92	1.135	1	18.04	27.64	3516	82.71	4.259	0	3.1392
7	中卫	2469	8.88	8.88	1	0	17.53	17.53	0	0	0	0	0
8	靖边	2469	7.67	9.04	1.209	1	18.68	33.17	4315	82.54	6.583	6.04	2.5357
9	蒲县	2462.9	8.08	8.08	1	0	21.59	21.59	0	0	0	0	0
10	郑州	2058.9	6.92	6.92	1	0	21.22	21.22	0	0	0	0	0
合计		775.5	4.02			7					44.682	37.07	18.7107

备注: 各分输支线的分气量(单位: 10⁴ m³/d)

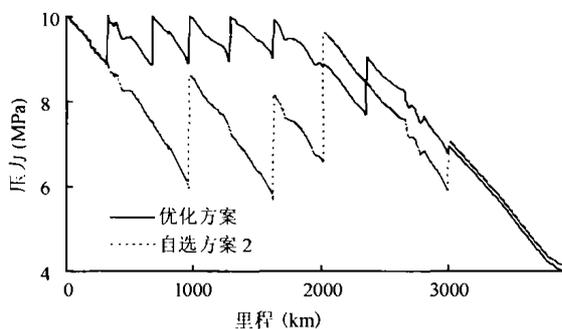
分输点	博爱	郑州	淮阳	刘巷子	定远	青山镇	营房镇	夏家村	常州	无锡	苏州	总计
分气量	96	308	81.1	54.57	62.9	65.71	404.6	38.29	352	35.7	189	1687

表 5 2500×10⁴ m³/d 时隔站开机的自选运行方案 1 参数表

站号	站名	进站流量 (10 ⁴ m ³ /d)	进站压力 (MPa)	出站压力 (MPa)	压比	开机 (台)	进站温度 (°C)	出站温度 (°C)	转速 (r/m)	多变效率 (%)	功率 (MW)	耗气量 (10 ⁴ m ³ /d)	能耗费 (万元/d)
1	轮南	2500	7.3	10	1.406	1	14	40.26	5694	78.92	12.642	11.59	4.8696
2	四道班	2488.4	8.81	8.81	1	0	25.93	25.93	0	0	0	0	0
3	哈密	2488.4	7.44	10	1.379	1	24.59	49.87	5488	76.46	12.856	11.79	4.9524
4	红柳	2476.6	8.78	8.78	1	0	24.57	24.57	0	0	0	0	0
5	玉门	2476.6	7.52	10	1.363	1	18.69	42.72	5462	79.42	11.479	10.53	4.422
6	山丹	2466.1	8.9	8.9	1	0	18.81	18.81	0	0	0	0	0
7	中卫	2466.1	7.69	10	1.334	1	16.9	39.13	5243	79.47	10.472	0	7.2061
8	靖边	2466.1	8.89	8.89	1	0	20.96	20.96	0	0	0	0	0
9	蒲县	2466.1	7.94	8.12	1.049	1	20.1	23.7	3000	74.54	1.801	0	1.2129
10	郑州	2062.1	6.96	6.96	1	0	21.41	21.41	0	0	0	0	0
合计		778.7	4.07			5					49.25	33.91	22.6631

表6 2500×10⁴ m³/d时管道的自选运行方案2参数表

站号	站名	进站流量 (10 ⁴ m ³ /d)	进站压力 (MPa)	出站压力 (MPa)	压比	开机 (台)	进站温度 (°C)	出站温度 (°C)	转速 (r/m)	多变效率 (%)	功率 (MW)	耗气量 (10 ⁴ m ³ /d)	能耗费 (万元/d)
1	轮南	2500	7.3	10	1.406	1	14	40.26	5694	78.92	12.642	11.59	4.8696
2	四道班	2488.4	8.81	8.81	1	0	25.93	25.93	0	0	0	0	0
3	哈密	2488.4	7.44	7.44	1	0	24.59	24.59	0	0	0	0	0
4	红柳	2488.4	5.87	8.6	1.513	1	21.94	54.42	6300	78.42	16.513	15.14	6.3609
5	玉门	2473.3	7.22	7.22	1	0	20.8	20.8	0	0	0	0	0
6	山丹	2473.3	5.63	8.13	1.494	1	17	48.05	6300	82.24	14.831	0	10.9329
7	中卫	2473.3	6.59	9.61	1.501	1	18.03	49.75	6281	79.54	15.396	0	10.5949
8	靖边	2473.3	8.41	8.41	1	0	21.87	21.87	0	0	0	0	0
9	蒲县	2473.3	7.36	7.36	1	0	20.15	20.15	0	0	0	0	0
10	郑州	2069.3	5.98	7.04	1.215	1	21	35.83	5243	82.06	5.914	0	5.142
终点		785.8	4.13										
合计						5					65.296	26.74	37.9003

图2 2500×10⁴ m³/d输量下优化与隔站开机方案的沿程压降比较图

结果的主要原因是:①自选方案2的开机方案使得某些压气站的进站压力太低,导致某些站段的平均压力偏低、压降增大。自选方案2的全程总压降为15.18 MPa,优化方案的总压降为13.02 MPa,全线各压气站的压比升高且总功率增大;②自选方案2中有3个电机驱动的压气站运行,而优化方案中只有一个电机驱动的压气站(山丹站)运行且功率很小。

四、结 论

(1)在“西气东输”管道配置中,对于电机驱动压

气站,其单位功率对应的能耗费用大于燃气轮机驱动压气站,故应分配给燃气轮机驱动的压气站较多的功率,分配给电机驱动的压气站相对较少的功率。

(2)每个压气站的进站压力不能太低,平均压力维持在较高的水平;越站数目应尽量少,全线压气站的压比应比较均匀,“多站低压比”的运行方式较为经济。

(3)为避免明显的能量浪费,末站出站压力始终低于管道设计压力,管道终点压力尽量接近允许最低进站压力。

参 考 文 献

- 1 Peter J Wong, Robert E Larson. Optimization of natural gas pipeline systems via dynamic programming. IEEE Transactions on Automatic Control, V. AC-13, No. 5, Oct, 1968
- 2 佴北南. 干线输气管道(网)稳态优化运行研究. 石油大学(北京)硕士学位论文

(收稿日期 2003-07-23 编辑 居维清)