

文章编号: 1000-8241(2021)02-0208-07

天然气流量计检定站仿真模型及工艺操作优化

韩旭¹ 孙楠² 张熙然² 刘喆² 温凯¹

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·城市油气输配技术北京市重点实验室;

2. 国家管网集团西气东输分公司

摘要: 随着天然气消费量的爆发式增长,天然气贸易交接计量对流量计的检定需求越来越大。针对流量计检定过程中工况多样、人工检定效率低下等问题,利用水力仿真软件 SPS,通过现场瞬态数据分析与校准,构建出与检定站现场精度水平一致的仿真模型。采用阀的流量系数,推导出各阀所对应流量调节的区域范围。将理论计算得出的调节方式通过仿真模型进行验证,结果表明:该调节方法可以减少调节阀的反复动作,优化了检定操作,加快了检定速度。(图 5,表 3,参 20)

关键词: 天然气管道;天然气流量计检定;仿真模型;检定优化

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Establishment of simulation model and optimization of process operation for verification station of natural gas flowmeter

HAN Xu¹, SUN Nan², ZHANG Xiran², LIU Zhe², WEN Kai¹

1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)/Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology; 2 PipeChina West East Gas Pipeline Company

Abstract: With the explosive growth of natural gas consumption, the demand of gas measurement in trade transaction for flowmeter verification is increasing. In response to the problems of diversified working conditions during flowmeter verification and low efficiency of manual verification, a simulation model with same accuracy of the verification station was established with the hydraulic simulation software SPS through transient data analysis and simulation model calibration. The range of flow regulation for each valve was deduced with the flow coefficient of valve, and the theoretically-calculated regulation method was verified with the simulation model. As indicated by the results, by adopting this method, the repeated action of control valve can be reduced, the verification operation is optimized, and the verification speed is accelerated. (5 Figures, 3 Tables, 20 References)

Key words: natural gas pipeline, verification of natural gas flowmeter, simulation model, verification optimization

为了适应中国天然气工业的快速发展,2008年国家石油天然气大流量计量站按照国家质检总局和中国石油天然气集团公司的要求编制完成了《天然气流量值溯源体系 2020 年发展规划》,规划新建一批覆盖西北、华北、东北、华中、华南、新疆等地区的计量检定站,以满足全国天然气管网的检定需求^[1]。中国石油和中国石化都按照国家质检总局的要求,依托各自不同的天然气管网条件,相继设计建立南京、成都、北京采育、大庆、武汉、乌鲁木齐、广州、塔里木、长庆、重庆等天然气流量计检定站。

天然气实流检定站工艺流程复杂,站内管道型号

多样,各部分管道的运行参数相互影响,因此研究检定站的工艺优化设计尤为重要。陈群尧等^[2]通过对比国内外大口径天然气流量计检定实验室流程和检定水平,探讨了提高国内天然气流量计检定水平的措施。徐明等^[3]以武汉分站的站内流程、现场标准装置以及量值溯源与传递分析了检定站的工艺特点。史昊等^[4]针对乌鲁木齐分站设计中存在的高压、大压差、直排管道工艺复杂、温度不稳定等问题,从调整分站压力、流量及计量系统入手,采用“等压切换、分流调节”的设计思路,提出一套天然气计量直排检定工艺优化方案。晁宏洲等^[5]针对塔里木检定站从工艺、设备及控制

3 方面进行优化,论证了优化方案与稳定措施对计量性能的作用和效果。宋春红等^[6]围绕河北省天然气大流量实流检定中心检定方案设计工艺流程、配置仪表、工艺设备及计量检定控制系统,对检定系统的技术要求、设备技术指标以及检定操作过程等进行了深入研究。

为了提高检定的准确度,有学者在检定误差、量值溯源以及不确定度分析方面开展研究。Belligoli 等^[7]提出一种非理想流动条件下超声波流量计测量不确定度的修正方法,采用贝叶斯方法进行数据校准,可减小不确定度和非理想条件下流量计的测量误差。于洋等^[8]分析了实流检定中不同压力对超声流量计的影响。孙立军等^[9]通过控制水泵转速模拟了 10 种不同的流量稳定性状况,测试了 4 种典型的流量计测量性能受流量稳定性的影响。Mousavi 等^[10]分析了瞬态过渡过程对超声流量传感器的影响,指出在检测中需要考虑实时性的影响。Mills^[11]考虑到现场温度、压力、流体物性等与实验模型存在差异,搭建相应的实验装置,研究了流量计在高温和高压下的性能,为流量计在高压和高温下运行时提供可追踪数据。

在实际检定过程中,工艺流程切换、压力调节、流量调节、检定操作、检定过程稳定及证书结果处理均需要人工逐步完成,尤其压力、流量调节需要检定员凭借多年的工作经验进行调节阀控制^[12-19]。面对日益增长的检定需求,优化检定操作流程,提高检定操作效率,压缩单台流量计的检定时间,成为流量检定站亟待解决的问题。在此以某天然气流量计检定站为原型,开发适用于站场检定流量调节的仿真模型。以现场工艺细节为基础,通过水力仿真模型对检定站内部工艺流程进行模拟。将采集的实时工艺生产数据自动输入水

力仿真模型,以获取无法直接分析的生产运行信息,再将流量的各种调节方式进行优化,获得与实际系统接近的调节方案。

1 检定站概况

1.1 计量检定站介绍

大口径天然气流量计检定一般采用实流检定方法,即对天然气支线或干线截流使天然气进入计量检定站,气体经过检定工艺后重新流入支线或者干线。天然气流量计检定站的工艺与检定流程为:接上游来气,通过天然气流量计检定站场的过滤分离器,然后按照被检表的口径以及需要检定的流量点选择相应的工作级标准表、流量核查表及检定台位,通过调节检定站场的旁通调节阀与多个流量调节阀,使得经过被检表的流量达到预设流量,最后通过背压调节使天然气汇入下游管道。为了保证检定的一致性,一般干线来气压力 6.0~9.8 MPa,下游回气压力 6.0~9.8 MPa,对口径不超过 600 mm 的气体超声流量计、涡轮流量计、旋进漩涡流量计、容积式流量计、差压式流量计及质量流量计进行实流检定。而一般支线压力可调范围为 4.1~7.8 MPa,对口径 300 mm 及以下的各类流量计进行实流检定。

1.2 检定工艺现状

为了达到天然气的检定要求,现场流量计检定方法一般采用标准表法(图 1),该方法将标准表与被检表串联在同一管径的管道上^[20]。在流动稳定的情况下,任何时刻流经两台表的质量流量是相同的。通过改变流量调节阀的阀位,调节检定通路的流量,使其

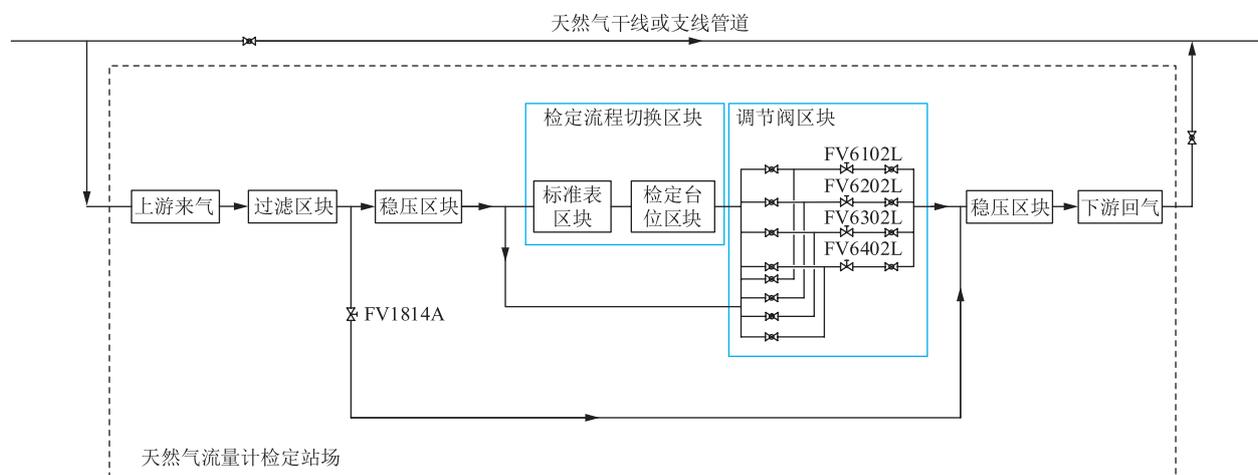


图 1 计量检定站工艺流程示意图

在待检流量点±5%范围内变化。

基于标准表法,常见检定系统的主要工艺装置包括:中压保护及调节装置、高压调节装置、工作级标准装置、检定台位、流量调节装置、天然气组分检测装置等。其中,中压保护及调节装置和高压调节装置均由两路调节装置组成,一路设置口径400 mm电动调压阀,另一路设置口径200 mm的电动调压阀。某天然气流量计检定站工作级标准装置由8路标准表管路组成,每条管路有一台核查超声流量计和一台标准涡轮流量计。对于干线来气,总流量测量范围为8~20 200 m³/h;对于支线来气,总流量测量范围为8~12 200 m³/h。针对不同的测量范围选择某一工作标准管路或多个工作标准管路并联。检定台位设有7路通路,依此可检定口径为50 mm、150 mm、200 mm、250 mm、300 mm、400 mm、600 mm的流量计。针对不同的测量范围,选用不同口径的涡轮流量计;对于一些测量范围广且量程比大的大口径流量计,可以将其测量范围分段,选取对应的标准器开展检定工作。

1.3 检定站操作要求

《中华人民共和国国家计量检定规程》要求:①流量计的检定应包含以下流量点, q_{min} 、 q_t 、 $0.40 q_{max}$ 、

q_{max} (q_{min} 为最小流量, q_t 为分界流量, q_{max} 为最大流量);对于准确度等级优于0.5%的流量计,增加 $0.25 q_{max}$ 、 $0.70 q_{max}$ 两个流量点;对于准确度等级优于0.5%,且量程比大于20:1的流量计,再增加一检定点,其流量为 $0.10 q_{max}$ 。②在检定过程中,每调整一个流量点,都应待压力、温度、流量稳定后方可进行检定。③在检定过程中,每个流量点的实际检定流量与设定流量的偏差不应超过±5%。④每个流量点的检定次数不应少于3次,对于准确度等级优于0.5级的流量计,每个流量点的检定次数不应少于6次。⑤在每个流量点的检定过程中,压力波动不应超过±0.5%。

2 检定站的仿真模型

2.1 模型建立

根据计量检定站工艺流程图,首先对工艺流程图中的管道进行简化,去除其中的放空、消防以及安全管道,并对其中的阀门进行简化。结合供货单上给定的站内设施参数与工艺流程图,运用112个节点、57条管道、51个阀门及4个边界条件建立SPS水力模型,模型拓扑结构和工艺分区如下(图2)。

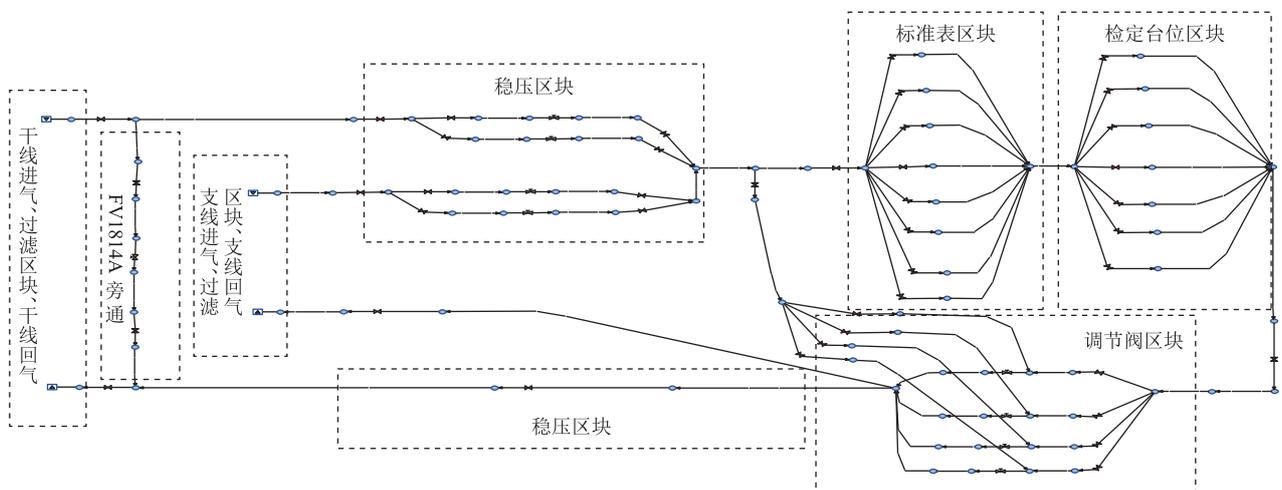


图2 计量检定站的SPS水力模型图

2.2 模型修正

将建立模型的工艺参数按供货单设置好,为了使建立的水力模型接近实际情况且更加精确,对水力计算中的摩阻损失进行修正。摩阻损失分为沿程摩阻损失和局部摩阻损失,分别反映在站内管道粗糙度与阀的流量系数上。

站内管道摩阻的计算选取柯列勃洛克(F·Colebrook)公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{K_e}{3.7D} + \frac{3.7}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (1)$$

式中: λ 为管道摩阻系数; K_e 为管内壁的当量粗糙度,mm; D 为管道内径,mm; Re 为雷诺数。

阀门的压降损失通过非阻塞流的临界流量系数法计算:

$$K_v = \frac{q_v}{341} \sqrt{\frac{\rho_1 T}{\Delta p (\rho_1 + \rho_2)}} \quad (2)$$

式中: K_v 为公制流量系数, m^3/h ; q_v 为标准状态下(绝对压力为 1 013 kPa, 15 °C)气体流量, m^3/h ; T 为进口温度, K; ρ_1 为气体在标准状况下的相对密度, kg/m^3 ; p_1 为进口压力, 100 kPa; p_2 为出口压力, 100 kPa; Δp 为进出口压差, 100 kPa。

根据上述计算方法, 结合现场 SCADA 系统所采集的运行数据, 对模型的摩阻进行修正, 从而使模型的工况模拟更接近现场实际。

3 模型验证

将现场的进出站压力设置 SPS 的边界条件, 利用程序实时控制仿真模型, 将现场的进出站压力、各个调节阀开度以及截断阀的开关输入 SPS, 将 SPS 输出的流量和站内中部的压力与现场实际数据进行对比, 从而验证检定站 SPS 模型的准确性。

3.1 干线进气

根据检定站实际运行数据, 通过 SCADA 系统以 2 s 的采样间隔, 连续采集现场 454 个仪表和控制点位的信息, 共采集到 6 864 880 个数据, 选取其中与检定流程导通相关的阀数据、调节阀阀位数据, 并以进出站压力作为 SPS 的边界条件, 模拟计算从而检验模型的准确性。由于现场通过干线进气的压降变化小, 瞬态造成的影响也较小, 因此, 将所有采集到的 438 380 个数据全部代入, 检验模型的效果。由检定站 SPS 模型验证图(图 3)可见: 模拟得到的计量检定站压力、流量的总体趋势与现场数据基本一致, 能够满足现场实际运用。

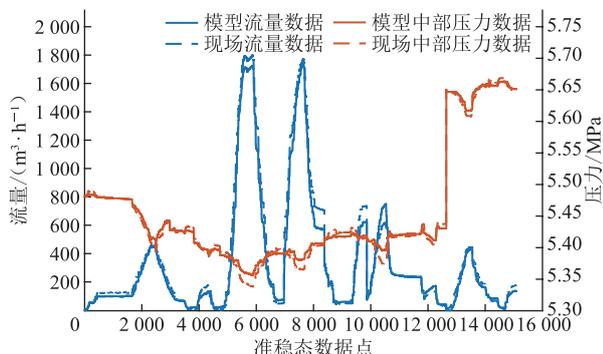


图 3 干线进气的检定站 SPS 模型验证图

3.2 支线进气

经由支线进站流程的站内压降较大, 直接代入仿真模型易造成 SPS 计算不稳定。进一步增加工况数据, 将数据采集量增加至 82 041 个时间点。在此基础

上, 对从 SCADA 系统采集到的 37 246 614 个数据进行筛选, 选出 177 514 个稳态数据点。抽取其中与检定流程导通相关的阀数据、调节阀阀位数据, 并以进出站压力作为 SPS 的边界条件, 代入模型进行模拟。通过对比现场数据的实际流量与仿真模拟的流量可知: 对于支线流程进气下的 SPS 模型, 在稳态点处的模拟结果与现场数据基本一致(图 4)。

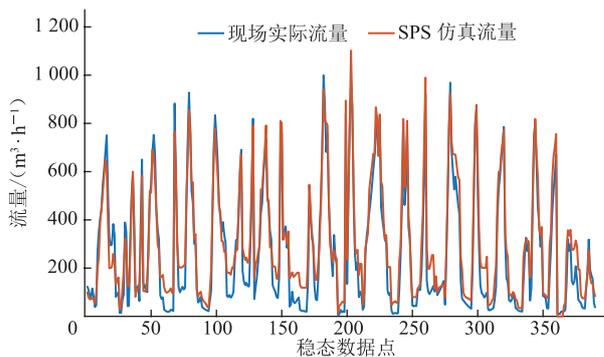


图 4 支线进气的检定站 SPS 模型验证图

4 模型应用

选取干线进气流程建立的仿真模型进行应用检验: 检定口径 150 mm 流量计时, 检定的流量点分别为 1 864.5 m^3/h 、738.6 m^3/h 、184.65 m^3/h 、46.72 m^3/h 。现场对各检定流量点进行调节操作(表 1), 为避免经过被检定表的流量超量程, 在检定时采用流量点从大到小的调节方式, 各调节阀初始状态为全关。检定口径 150 mm 流量计的 1 864.5 m^3/h 流量点时, 现场通过调节旁通阀 FV1814A 的开度至 19.971 2, 调节 FV6202L 调流阀的开度至 59.110 7, 调节 FV6302L 调流阀的开度至 64.392 2, 调节 FV6402L 旁通阀的开度至 30.036 3, 使过表流量达到 1 864.5 $m^3/h \pm 5\%$ 的流量范围内。如果将流量调至 738.6 $m^3/h \pm 5\%$ 的流量范围内, 需要在此次调节的基础上继续调节 4 次阀门开度。同理, 若将流量调至 184.65 $m^3/h \pm 5\%$ 的流量范围内, 共动作调节阀 3 次。若将流量调至 46.72 $m^3/h \pm 5\%$ 的流量范围内, 共动作调节阀 4 次。完成口径 150 mm

表 1 被检表口径为 150 mm 时现场检定操作数据

检定流量 点/($m^3 \cdot h^{-1}$)	旁通阀开度		调流阀开度		
	FV1814A	FV6402L	FV6102L	FV6202L	FV6302L
1 864.50	19.971 2	30.036 3	0.000 0	59.110 7	64.382 2
738.60	44.227 6	36.892 3	0.000 0	61.118 0	49.232 8
184.65	59.178 0	36.892 3	0.000 0	29.276 8	23.406 3
46.72	59.492 1	36.892 3	49.121 9	26.291 8	8.341 0

流量计4个检定流量点的检定全程需要调整阀位共计15次。

4.1 调阀方案优化

为了达到不同口径流量计的检定要求,检定站设计的工艺流程可使过表流量在几万至上万方的范围内变动。控制流量变动主要涉及两部分阀门的开度控制:进站大旁通阀门(FV1814A)和流量调节区阀门组(FV6102L、FV6202L、FV6302L、FV6402L)。正常流程下,过检定台位和标准表管路的压降很小,可以忽略不计,因此调节阀的4个调节阀视为前后均由汇管相连接,温度、压力及气体物性相同。由式(3)可知,过阀流量与流量系数成正比,即4条支管路的流量按调节阀流量系数分配。

$$Q_1:Q_2:Q_3:Q_4=C_{v1}:C_{v2}:C_{v3}:C_{v4} \quad (3)$$

式中: $Q_1 \sim Q_4$ 分别为4个阀门的流量, m^3/h ; $C_{v1} \sim C_{v4}$ 分别为4个阀门的流量系数。

由现场提供的阀门供货单可知,4个调节阀均为等百分比阀门,其流量系数与阀门开度的关系为指数形式:

$$\begin{cases} C_{v1}=A_1e^{k_1FR_1}-A_1 \\ C_{v2}=A_2e^{k_2FR_2}-A_2 \\ C_{v3}=A_3e^{k_3FR_3}-A_3 \\ C_{v4}=A_4e^{k_4FR_4}-A_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A_1 \sim A_4, k_1 \sim k_4$ 均为系数; $FR_1 \sim FR_4$ 分别为4个阀门的开度。

对于线性阀,采用如下拟合公式:

$$C_v=A \cdot FR+B \quad (5)$$

式中: A, B 均为系数; FR 为阀门开度。

根据出厂试验数据对每个阀门流量系数与阀门开度的关系进行拟合,得到 A, k 的值。根据以上公式可得到在任意开度下各阀门的流量系数。通过非阻塞流的临界流量系数法,根据式(2)可计算出不同开度下流经各个阀的流量。根据式(1)可得到任意工况下4条

调节阀管路的流量分配比例。将检定流量 Q_c 按 C_{v1}, C_{v2}, C_{v3} 阀门流量系数均分,得到单位流量系数的流量 i :

$$i=Q_c/(C_{v1}+C_{v2}+C_{v3}) \quad (6)$$

随后计算流量偏差 Q_e 所占流量系数份额 C_{ve} :

$$C_{ve}=\left| \frac{Q_{set}-Q_c}{i} \right| \quad (7)$$

式中: Q_{set} 为流量设定值, m^3/h 。

计算各个阀在当前位置下动作一个百分点造成的流量系数变化量:

$$\begin{cases} \Delta C_{v1}=|C_{v1}(FR_1)-C_{v1}(FR_1 \pm 0.01)| \\ \Delta C_{v2}=|C_{v2}(FR_2)-C_{v2}(FR_2 \pm 0.01)| \\ \Delta C_{v3}=|C_{v3}(FR_3)-C_{v3}(FR_3 \pm 0.01)| \\ \Delta C_{v4}=|C_{v4}(FR_4)-C_{v4}(FR_4 \pm 0.01)| \end{cases} \quad (8)$$

寻找与 C_{ve} 最接近的 ΔC_v 值,选择与之对应的调节阀进行调节。通过以上方法实现了只利用阀位和检定流量完成调节阀的选择,使得单次阀门动作最小。

通过公式拟合可知, FV1814A 阀开度与流量之间的关系为:

$$Q=341 \times 12 \times (154.34 FR - 1 223.8) \sqrt{\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2}{\rho_1 T}} \quad (9)$$

因此,整体的优化方案是:先通过式(9),即旁通阀 FV1814A 进行流量的初始调节,将流量调至一个基本范围,然后根据式(8)确定选择动作哪一个调节阀,减少动作调阀个数,从而提高检定效率。

依据各个需要检定的流量点所属的流量区间,根据式(8)和(9)计算得出初始调节方式(表2)。计算得出当调节阀 FV1814A 与 FV6402L 均按检定流量点的基本要求调节至相应范围后,检定流量点为较小流量时,优先选用调节阀 FV6102L 进行调节;检定流量点为较大流量时,优先选用调节阀 FV6202L 进行调节;检定流量点为大流量时,优先选用调节阀 FV6302L 进行调节。

表2 不同口径流量计检定流量点所属流量区间初始调阀数据

流量范围/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	标准表的选择	旁通阀开度		调流阀开度		
		FV1814A	FV6402L	FV6102L	FV6202L	FV6302L
0~22	第1路	66.5	39	0~100	0	0
22~74.457	第1路	66.5	39	100	0~100	0
40~194	第2路	66.5	39	100	0	0~100
88~429	第2路	25.0	39	100	0~100	0
88~443	第2路	25.0	39	100	0	0~100
90~1 221	第4路	25.0	39	100	0~100	0
1 233~1 841	第3,4路	25.0	39	100	100	0~100

4.2 优化方案模拟

经计算和模拟的调节方法如下(表 3、图 5),在相同工况下,模拟仿真结果表明:按照表 2 给出的方案对被检表口径为 150 mm 的流量计进行检定。首先将调节阀 FV1814A 的开度调节至 25,调节阀 FV6202L 的开度调节至 2.7,调节阀 FV6302L 的开度调节至 75,调节阀 FV6402L 的开度调节至 39,则可将通过标准表与被检表的流量调节至检定流量点 1 864.5 m³/h 的流量区间,该检定流量点的调节过程共涉及动作的调节阀 4 个。检定 738.6 m³/h 流量点时,只需在上一步的基础上调节调节阀 FV6302L 的开度至 32,便可完成该检定流量点的调节。依此类推,完成所有流量点的检定共涉及动作的调节阀为 8 个。较表 1 现场实际操作涉及的 15 个调节阀,效率提高了 85%。

表 3 被检表口径为 150 mm 时计算的检定操作数据

检定流量点/(m ³ ·h ⁻¹)	旁通阀开度		调流阀开度		
	FV1814A	FV6402L	FV6102L	FV6202L	FV6302L
1 864.50	25.0	39	0	2.7	75
738.60	25.0	39	0	2.7	32
184.65	66.5	39	0	2.7	12
46.72	66.5	39	0	8.0	0

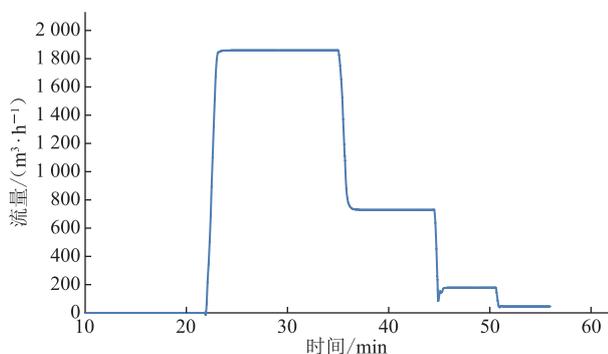


图 5 被检表口径为 150 mm 时通过检定台位与被检表的流量曲线

5 结论

通过对现场流程图的分析,结合水力仿真软件 SPS,构建了计量检定站的仿真模型,并根据站内流程,细分为干线进气和支线进气两套模型,通过现场实际数据的模拟,验证了模型的准确性。同时,通过流量系数、阀的单位开度与流量之间的关系,得出当调节阀 FV1814A 与 FV6402L 均按检定流量点的基本要求调节至相应的范围后,检定流量点为较小流量时,优先选

用调节阀 FV6102L 进行调节;检定流量点为较大流量时,优先选用调节阀 FV6202L 进行调节;检定流量点为大流量时,优先选用调节阀 FV6302L 进行调节。

通过阀门流量系数与流量变化量之间的关系,旁通阀 FV1814A 与进出站压力和流量的关系,得到不同检定流量点所属流量区间初始调阀数据的表格。通过优化调节,避免了对检定流量点的盲目调节,调至各被检表所需检定的流量点所涉及动作阀的个数减少,加快了检定效率,避免了反复多次动作调节阀,有利于延长调节阀的使用寿命。

参考文献:

- [1] 崔建华. 国家天然气计量检定能力规划和建设[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(5): 1-3, 7.
CUI J H. Plan and construction of national natural gas metrological verification capability[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37(5): 1-3, 7.
- [2] 陈群尧, 赵矛. 国内外天然气流量计检定流程及水平比较[J]. 石油工业技术监督, 2018, 34(11): 37-42.
CHEN Q Y, ZHAO M. Comparison of verification processes and levels of natural gas flowmeters at home and abroad[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2018, 34(11): 37-42.
- [3] 徐明, 闫文灿, 陆玉城. 基于 HPPP 法的高压大流量天然气计量检定站系统工艺[J]. 油气储运, 2018, 37(7): 810-815.
XU M, YAN W C, LU Y C. Technologies based on HPPP method used in high pressure and high flowrate natural gas metrological verification station[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(7): 810-815.
- [4] 史昊, 王数智. 国家石油天然气大流量计量站检定工艺的优化[J]. 油气储运, 2015, 34(1): 96-99.
SHI H, WANG F Z. Optimization of verification process in national large oil/gas flow rate metering stations[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(1): 96-99.
- [5] 晁宏洲, 黄明基, 方林剑. 高压天然气流量标准装置设计优化[J]. 石油工业技术监督, 2019, 35(2): 35-37, 44.
CHAO H Z, HUANG M J, FANG L J. Design optimization of high-pressure natural gas flow standard device[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2019, 35(2): 35-37, 44.
- [6] 宋春红, 张东, 杨静. 天然气流量计量检定中心的设计研究[J]. 石油工业技术监督, 2019, 35(2): 32-34.
SONG C H, ZHANG D, YANG J. Design research of the natural

- gas metrological verification centre[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2019, 35(2): 32-34.
- [7] BELLIGOLI Z, DWIGHT R P, KOK G P, LUCAS P. A Bayesian study of uncertainty in ultrasonic flow meters under non-ideal flow conditions[J]. Metrologia, 2017, 54(4): 584.
- [8] 于洋, 孙瑾. 超声流量计实流检定后在不同压力下使用分析[J]. 工业计量, 2017, 27(3): 18-20.
- YU Y, SUN J. Analysis of ultrasound flowmeter used under different pressure after real-flow verification[J]. Industrial Measurement, 2017, 27(3): 18-20.
- [9] 孙立军, 党士忠, 张涛, 刘艺伟. 流量计性能受流量稳定性影响实验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(4): 422-432.
- SUN L J, DANG S Z, ZHANG T, LIU Y W. Experiments on flowmeter performance affected by flow stability[J]. Transactions of Tianjin University, 2018, 51(4): 422-432.
- [10] MOUSAVI S F, HASHEMABADI S H, MOGHADDAM H A. Design, simulation, fabrication and testing of ultrasonic gas flowmeter transducer (sensor)[J]. Sensor Review, 2019, 39(2): 277-287.
- [11] MILLS C. Calibrating and operating Coriolis flow meters with respect to process effects[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 71: 101649.
- [12] 黄雨, 江华根. 基于 iFIX 的差压流量计自动检定系统设计与实现[J]. 冶金自动化, 2019, 43(6): 68-73.
- HUANG Y, JIANG H G. Design and implementation of automatic verification system for differential pressure flowmeter based on iFIX[J]. Metallurgical Industry Automation, 2019, 43(6): 68-73.
- [13] 周春生, 何延萍. 液体流量计检定系统全自动化的实现[J]. 中国计量, 2017(1): 70-72.
- ZHOU C S, HE Y P. Realization of full automation of liquid flowmeter calibration system[J]. China Metrology, 2017(1): 70-72.
- [14] 唐浩然. 定压条件下水流量计自动检定系统的设计[D]. 成都: 西南石油大学, 2018: 19-34.
- TANG H R. Design of automatic calibration system for water flowmeter under constant pressure[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018: 19-34.
- [15] 李杨, 周传亮, 阳帆. 流量计现场检定方法及自动检定系统[J]. 计量技术, 2017(4): 46-49.
- LI Y, ZHOU C L, YANG F. On-site verification method and automatic verification system of flowmeter[J]. Measurement Technique, 2017(4): 46-49.
- [16] 张春杰, 李振林, 董新利, 徐明. 天然气计量检定站检定流程工艺模拟研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2014, 22(2): 40-44.
- ZHANG C J, LI Z L, DONG X L, XU M. A simulation study on calibration process of gas metering station[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2014, 22(2): 40-44.
- [17] 韩巍, 陈行川, 郑传波, 刘译文, 孙楠. 智能化流量计检定系统的应用初探[J]. 工业计量, 2018, 28(5): 80-83.
- HAN W, CHEN H C, ZHENG C B, LIU Y W, SUN N. Preliminary exploration of application of intelligent flowmeter verification system[J]. Industrial Metrology, 2018, 28(5): 80-83.
- [18] 吴泽梁, 杨晓东, 李秀学, 徐玉朋. 流量计在线检定控制系统的研制[J]. 测控技术, 2016, 35(2): 148-151.
- WU Z L, YANG X D, LI X X, XU Y P. Development of flowmeter online verification control systems[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(2): 148-151.
- [19] 徐宝昌, 黄冬. 大流量天然气检定站最优逻辑控制方法研究[J]. 计算机与应用化学, 2014, 31(11): 1329-1332.
- XU B C, HUANG D. Study on optimal logic control method for large flow natural gas verification stations[J]. Computers and Applied Chemistry, 2014, 31(11): 1329-1332.
- [20] 王勇, 王晓霖, 张松伟. 基于 HPPP 法的 Pigsar 天然气流量计检定站工艺[J]. 油气储运, 2015, 34(9): 988-992.
- WANG Y, WANG X L, ZHANG S W. HPPP-based Pigsar gas flowmeter calibration facility[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(9): 988-992.
- (收稿日期: 2020-07-18; 修回日期: 2020-12-24; 编辑: 刘朝阳)
-
- 基金项目:** 国家重点研发计划资助项目“国家石油及天然气储备库安全保障技术与装备研发”, 2017YFC0805800.
- 作者简介:** 韩旭, 男, 1997年生, 在读硕士生, 2019年毕业于长江大学油气储运工程专业, 现主要从事天然气管道优化控制研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102200。电话: 15872354127。Email: 240487370@qq.com
- 通信作者:** 温凯, 男, 1983年生, 副教授, 2012年博士毕业于北京大学力学系统与控制专业, 现主要从事天然气管道优化控制与可靠性方向的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 102200。电话: 13811171868。Email: kewin1983@126.com