维普资讯 http://www.cqvip.com

天然气引射调峰新技术的研究与应用*

姜小敏　王财友　钱尚源
（上海工程技术大学）

姜小敏等. 天然气引射调峰新技术的研究与应用. 天然气工业，2004；24(6)：119～121

摘　要　天然气输配的特点是上游天然气的产量是相对均匀的，而下游天然气用气量却是不均匀的：中午和傍晚为用气高峰，用气量很大，半夜时则用气量很少；相对于城市人工煤气而言，天然气供气调峰问题更为突出，务必采用合适的调峰方法，才能使天然气输配系统保持供需平衡。为此，提出了一种应用超音速引射器配套高压储气球罐协同进行天然气调峰的新技术，并对该项技术中的关键设备——超音速引射器进行了设计研究。工程应用表明，该技术是一种非常经济有效的天然气输配调峰新技术，大大提高了天然气储气球罐的利用率，显著改善了天然气供气调峰效果。

主题词　天然气　供应　引射调峰　超音速引射器　供需平衡

在我国，天然气输配系统常用的调峰方式是建造一些大型高压储气球罐，在用气低谷时，把多余的天然气充入储气球罐储存起来（储气球罐的压力升高），到用气高峰时，又将储气球罐内储存的天然气释放出来弥补供气量的不足（储气球罐的压力降低）（图1）。其问题是储存在储气球罐内的天然气不能够被全部放出投入调峰，储气罐的压力至多只能降低到出站管网压力，因而储气球罐的利用率不高。为满足调峰要求，只得投巨资建造比较多的天然气高压储气球罐，造成财力的巨大消耗。

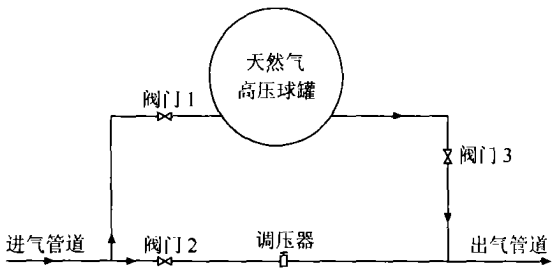


图1　常用天然气调峰系统示意图

引射调峰新技术

针对现有技术的缺陷和问题，经过计算分析和试验研究，笔者在此提出了一种应用超音速引射器配套高压储气球罐协同进行天然气调峰的新技术❶，其方案如图2所示，在原有天然气高压储气球罐储气调峰系统中接入一组超音速引射器装置。在调峰过程中，首先开启球罐出口阀门3放气（此时，阀门4、5、6关闭），待球罐压力下降至接近出站管道压力时，关闭阀门2、3，同时开启阀门4、5、6，利用长输管线末端的高压天然气作为动力源，通过超音速引射器产生引射作用抽吸储气球罐内的天然气并提升其压力再输入下游中压管网。这样可以使储气球罐的压力降低到大大低于出站管道压力的水平，储气球罐利用率得以大大提高。

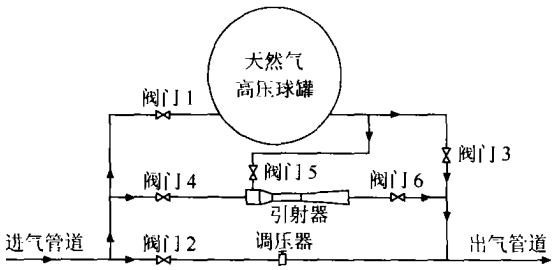


图2　天然气引射调峰系统示意图

引射调峰技术是一种非常经济有效的天然气输

* 本成果受到上海市科委自然科学基金资助（项目编号：01ZG14031）。

作者简介：姜小敏，1955年生，研究员；1995年毕业于上海理工大学，获博士研究生学位；现主要从事流体工程和燃气工程的研究和技术开发工作。地址：（200336）上海市仙霞路350号上海工程技术大学能源与环境工程研究所。电话：（021）62759779转4159。E-mail：jiangxm8@online.sh.cn

❶已获得国家实用新型专利，专利号：ZL01252963.X。

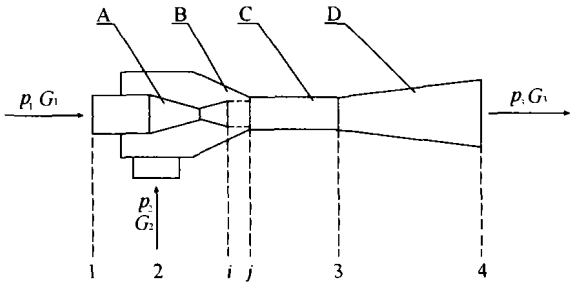
维普资讯 http://www.cqvip.com

配调峰新技术，可大大提高天然气储气罐的利用率，同时又无需投巨资添置大型增压设备，运行时也不需要消耗额外能量，设备占地面积也较小。引射器是一种结构简单的流体设备，无任何运动部件，维修成本很低，具有较高的经济性和可靠性。

超音速引射器的优化设计

天然气引射调峰新技术中的关键设备是超音速引射器装置，其设计好坏将直接影响到储气罐的利用率和调峰效果。

超音速引射器由（拉伐尔型）工作喷管、吸入室、混合管和扩压管组成（图3）。有关引射器的设计理



A.工作喷管　B.吸入室　C.混合管　D.扩压管

图3　超音速引射器结构及工作原理示意图

论和工程应用的研究已有较长的历史。引射器虽然结构简单，但其内部气体流动及掺混的物理过程十分复杂，湍流射流、掺混流、逆压流以及漩涡、激波等现象交织在一起，至今对其流动过程还未有一个比较清楚的了解。因此，引射器的设计理论也还不十分完善。笔者根据等截面混合分析模型[1]发展了超音速引射器设计计算与分析方法。等截面混合模型是假定喷管出口射流和被引射气体在到达等截面混合管进口处（j 截面）之前没有发生混合，混合是从等截面混合管进口处开始的，工作气体和被引射气体在混合管进口处有各自的流通截面积，二者之和等于混合管进口处总的截面积，至等截面混合管出口处（3 截面）混合完成。此后，混合气体进入扩压管减速增压直至引射器出口。

根据等截面混合分析模型，由已知的工作气体进口参数，应用喷管计算公式可计算得到喷管出口处 i 截面上的气流参数，这些气流参数可视为工作气体在 j 截面上（混合管入口处）的参数；由已知的被引射气体的进口参数，可计算得到其在 j 截面处的流动参数。取 $j-3$ 两截面间的混合管为控制体，可建立基本方程和本构方程。

连续方程　$\rho_{1j}V_{1j}A_{1j}+\rho_{2j}V_{2j}A_{2j}=\rho_3V_3A_3$　　(1)

动量方程

$$p_{1j}A_{1j}+p_{2j}A_{2j}+\varphi_3(G_1V_{1j}+G_2V_{2j})=p_3A_3+G_3V_3 \quad (2)$$

能量方程

$$G_1\left(\frac{k}{k-1}\frac{p_{1j}}{\rho_{1j}}+\frac{V_{1j}^2}{2}\right)+G_2\left(\frac{k}{k-1}\frac{p_{2j}}{\rho_{2j}}+\frac{V_{2j}^2}{2}\right)=G_3\left(\frac{k}{k-1}\frac{p_3}{\rho_3}+\frac{V_3^2}{2}\right) \quad (3)$$

通流面积关系　$A_{1j}+A_{2j}=A_3$　　(4)

引射系数　$\mu=\frac{G_2}{G_1}$　　(5)

联立求解方程组可解得 p_3、ρ_3、V_3 等未知气流参数。然后根据扩压器计算公式可计算得到扩压管出口截面（4 截面或引射器出口处）的气流参数。

在上述计算过程中需假定被引射流体在 j 截面的压力 p_{2j} 和引射系数 u，因此，引射器出口的参数是 p_{2j} 和 u 的函数。在一系列由 u 和 p_{2j} 决定的出口参数中，经过优化分析和处理，可以得到既满足出口参数要求，又使得引射器的 u 达到最大值的一组流动参数，由此可计算确定引射器几何尺寸，达到优化设计的目的。

考虑到喷管、混合管和扩压管中气体的流动都是非等熵流动，存在气流的撞击损失、掺混损失和摩擦损失，为计算这些损失，分别引入喷管、吸入室、混合管和扩压管的效率系数。

根据上述引射器设计计算与分析的内容，进行了计算机优化设计与分析的研究工作，开发出相关的引射器优化设计软件和变工况性能计算分析软件，可对引射器进出口条件发生变化时的引射器性能进行模拟仿真，形成了一整套具有一定特色的超音速引射器优化设计与变工况性能分析体系。

为验证超音速引射器优化设计与分析方法的正确性，建造了引射器试验装置，进行了比较试验。试验结果表明，测试数据与计算分析数据吻合良好，二者偏差小于5%，证实了该优化设计和分析体系具有较高的准确性，完全可以用于天然气引射器的工程设计与计算分析。

天然气引射调峰技术的工程应用

上海天然气管网有限公司在浦东天然气储配站建有10座3500 m^3 的高压储气球罐，储气压力为1.35 MPa，天然气进站压力为1.5 MPa，出站压力为0.8 MPa，由于高压储气球罐系统中阀门、调压器、过滤器、变径管、弯头等管部件都不可避免的存在阻力的缘故，因此，球罐的实际操作压力范围为1.35～

维普资讯 http://www.cqvip.com

0.85 MPa，球罐实际可用调峰气量仅为原设计值的45.45%。笔者根据上海天然气管网有限公司提供的参数设计了引射调峰系统。引射器的设计指导思想是在达到引射器要求出口压力前提下，充分利用来自上游天然气的压力能，尽可能引射出较多的来自球罐的天然气，使球罐内压力下降至尽可能低的水平，从而提高球罐的利用率，满足供气调峰气量和调峰时间的要求。引射器应用于高压储气球罐引射调峰的特点是在调峰过程中球罐的压力在不断下降，即引射器的被引射气体的压力不断下降，使引射器一直处于非设计工况条件下运行。为此，必须对天然气引射器的性能进行较为详细的计算分析，求解引射器抽吸高压球罐储存气时的被引射气体流量动态变化过程和引射器出口流量动态变化过程，在此基础上制定出最佳调峰方案，同时也可以为引射器的运行操作提供参考。这些必须考虑的因素和特点增加了引射器的设计难度。笔者根据高压储气球罐内压力变化要求，在被引射天然气压力为0.8～0.4 MPa的范围内，进行了一系列的设计计算，给出了按不同被引射天然气压力进行设计计算的引射器引射系数的性能特性(图4)。由图4可以看出，各引射

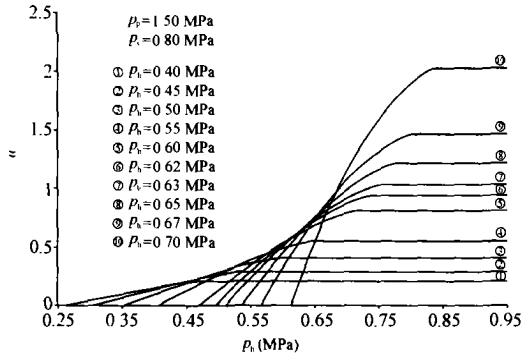


图4　按不同被引射压力设计的引射器引射系数特性曲线

器的引射系数都存在着一个极限值，该极限值随着设计的被引射压力值的减小而减小。通过优化分析，确定了引射器运行时的被引射天然气压力范围为0.85～0.5 MPa。考虑到上游日供气量和下游用气量变化情况，引射调峰系统配备了2台设计参数相同的引射器，每台引射器的工作气体流量均为$2.5\times10^4 Sm^3/h$(S表示在15℃下的体积)。这样，当储气球罐自放气至0.85 MPa时，即可根据下游用气情况启动1台或2台引射器，引射储气球罐内的天然气，使球罐压力降至不低于0.5 MPa。

上海天然气引射调峰工程于2002年12月竣工并旋即投入使用，在冬季用气高峰时期已发挥了重要的作用。实际运行的测试与分析表明，引射调峰系统可以在5 h内，使10座3500 m^3储气球罐的压力从0.85 MPa降至0.5 MPa，放出调峰气量超过$10\times10^4 Sm^3$，调峰效果得到显著改善，高压储气球罐的利用率相对提高了68%，具有良好的经济效益。

结　论

(1)引射调峰技术是一种非常经济有效的天然气输配调峰新技术，可大大提高天然气储气罐的利用率，显著改善调峰效果，具有很高的实用性和经济性，具有非常广阔的推广应用前景。

(2)引射调峰技术中的关键是根据调峰气量和调峰时间的要求及原高压天然气球罐系统的运行参数进行调峰方案优化设计和超音速引射器(组)的优化设计。

(3)发展了引射器设计计算与分析方法，形成了一整套具有一定特色的超音速引射器优化设计与变工况性能分析体系。试验结果和工程实际应用表明，该优化设计和分析体系能充分满足天然气引射调峰装置的工程设计要求。

参 考 文 献

1　Sun Dawen, Eames I W. Recent developments in the design theories and applications of ejectors—a review. Journal of the Institute of Energy, June, 1995

2　Keenan J H, Neumann E P, Lustwerk F. An investigation of ejector design by analysis and experiment. J Applied Mechanics, Trans ASME, 1950; 72: 299—309

3　Hoogarth M L. The design and performance of high-pressure injectors as gas jet boosters. Proc Inst Mech Eng, 1970-71; 185(56/71): 755—766

4　Dutton J C, Carroll B F. Optimized ejector-diffuser design procedure for natural gas vapor recovery. J Energy Resources Tech, Trans ASME, 1983; 105: 388—393

5　索科洛夫和津格尔著，黄秋云译. 喷射器. 北京：科学出版社，1977

(修改回稿日期　200-03-15　编辑　居维清)