

输气管道系统供气调峰技术进展

郑志炜, 吴长春

中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249

摘要 介绍了国外关于输气管道系统供气调峰的4个主要研究方向,包括调峰可以采取的措施、地下储气库采气计划的制定、应用稳态模型分析中长期调峰问题以及短期调峰过程的仿真。对生产中所采用的主要调峰措施进行了详细介绍。根据国内外研究状况和运行调度经验,提出了3种短期调峰方案模式。对调峰方案的优化进行了论述,提出了短期调峰方案的多目标优化原则。对TGNET、SPS、SIMONE等主流输气管道仿真软件的特点进行了介绍。分析归纳了目前短期调峰方案优化研究的难点在于建立合理的多目标优化原则体系、对该体系中模糊因素的处理方法,以及多目标模糊优化模型的高效求解方法等。

关键词 输气管道;调峰运行;优化

中图分类号 TE832

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.12.012

Advances in Peak Shaving Technology of Gas Pipeline System

ZHENG Zhiwei, WU Changchun

Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Four abroad research directions of peak shaving problems involving gas pipeline system are summarized, they include the measures of peak shaving, how to set up the withdrawal schedules of underground gas storage, how to apply the steady model to analyze middle or long-term peak shaving problems, and the simulation of short-term peak shaving problems. Several main peak shaving measures in the production are introduced. Three short-term peak shaving scenarios are proposed based on research achievements at home and abroad and the operators' experience. The optimization of peak shaving scenarios is discussed and a multi-objective optimization guideline for short-term peak shaving scenarios is proposed. The characteristics of some popular gas pipeline simulation software, such as TGNET, SPS, and SIMONE, are introduced. The current difficulties in the short-term peak shaving optimization are reviewed, these difficulties include how to set up a sensible multi-objective optimization guideline, how to deal with the fuzzy factors in the multi-objective optimization guideline and pursue an effective algorithm to solve the multi-objective fuzzy optimization.

Keywords gas pipeline; peak shaving operation; optimization

0 引言

随着中国经济的快速发展,天然气作为高效的清洁能源,在中国能源消费中的比例也在不断增加。根据有关部门的预测资料,2020年中国的天然气需求量将达到 $3500 \times 10^8 \text{m}^3$,供需矛盾突出^[1]。随着西气东输、西气东输二线、陕京一线、二线、三线、涩宁兰管线及若干联络线的建成,中国正在逐步形成全国性的多气源、多用户的输气管网,该管网的输气量和运输周转量正以超预期的速度迅速增长,在中国能源体系中的地位日益凸显。一般而言,用户的用气量几乎随时

都在变化,以民用气和商业用气为主的用气系统、或用气负荷对环境温度很敏感的系统尤其如此。而上游气源的供气流量在一段时间内是相对均衡的,这种供气的相对均衡性和用气的不均衡性导致了输气管道系统在运行过程中面临一个无法避免的重要问题——供气调峰。调峰措施和方案的选择与许多因素有关,其中一个关键因素是调峰周期^[2]。供气调峰从时间上可以分为中长期调峰和短期调峰,一般认为调峰周期达到或超过一个月的可称为中长期调峰,而一个月以下的为短期调峰^[3]。也可以直接以调峰周期来命名,如日调峰、周

收稿日期:2011-01-25;修回日期:2011-03-23

作者简介:郑志炜,博士研究生,研究方向为油气储运及营销系统工程、城市燃气输配,电子信箱:zhengzhiwei_1@126.com;吴长春(通信作者),教授,研究方向为油气储运与城市输配系统工程,电子信箱:wuchangchun@vip.sina.com

调峰,月调峰等。中长期调峰问题具有周期长、用气量变化幅度大且持续时间长、难以准确预测该周期内用气量随时间的详细变化规律等特点,故一般只能从整个周期内各个时间段的供气量、用气量、储气量的总体平衡来宏观地考虑调峰方案,这种方法在工程上称为“削峰填谷”。短期调峰问题的周期短,可以比较准确地描述用气量随时间的具体变化规律。因此,在解决短期调峰问题时,可以针对每个具体调峰方案检验相应的调峰过程和效果,具体描述实施该调峰方案后管道系统的工况和运行参数随时间和空间的变化规律即对短期调峰方案进行动态仿真。随着计算机技术的发展及数值计算方法不断完善,世界上发达国家尤其是美国的长输管道仿真技术发展速度很快,应用范围日益扩大,仿真效果更加准确^[4]。短期调峰问题和中长期调峰问题并非互不相关,短期调峰过程通常叠加在中长期调峰过程中,短期调峰方案的制定往往在很大程度上受制于中长期调峰的状况。国外对输气管道调峰问题的研究主要分为4类^[5]:第1类是研究调峰可以采取的措施,包括地下储气库、LNG调峰厂、调峰用户、管存和“照付不议”合同等^[6-9],但没有介绍制定和评价调峰方案的具体方法;第2类是根据气体需求量的预测数据制定储气库的采气计划,在采气计划给定的前提下,优化储气库的运行^[10-12],但没有考虑管道系统运行参数的变化;第3类是应用稳态模型分析天然气管道的中长期调峰问题,为储气库制定最优的调度计划以平衡气体总体需求和供应的矛盾^[13-15];第4类是采用输气管道或管网系统动态仿真软件进行短期调峰过程仿真。

1 输气管道调峰措施

短期调峰措施主要有储气罐、地下储气管束、输气管道末段储气等。对于长输管道供气系统,管道末段储气是一种比较有效的短期调峰方式。中长期调峰措施主要有地下储气库和各类LNG设施,必要时也可将其用于短期调峰,地下储气库是容量最大、功能最全、适应性最强、经济性最佳的储气设施^[16-20]。

1.1 地下储气库

在世界天然气储存设施总容量中,地下储气库的容量在90%以上^[21]。储存的天然气主要用于满足用气量的季节波动和日波动对供气的要求,保证用气高峰期的用气量,同时也可以作为供气系统发生事故时的应急储备以及国家的战略储备。按地质构造划分,地下储气库有衰竭油气田储气库、含水层储气库、盐穴储气库、岩洞储气库和废弃矿井储气库5种类型。衰竭油气田储气库是通过油气田原有的生产井和建库时新建的气井向枯竭油气层注入或采出天然气,是世界上使用最广泛、运行最久的一种储气库,具有建库周期短、投资和运行费用低的特点。含水层储气库就是人为地将天然气注入到地下合适的含水层中而形成的人工气藏,优点是构造完整,钻井完井一次到位,缺点是气—水界面较难控制,投资和

操作费用较高,建库周期较长,风险较大。盐穴地下储气库是利用地下较厚的盐层或盐丘,采用人工方式在盐层或盐丘中制造洞穴形成储存空间来存储天然气的,具有构造完整、夹层少、厚度大、物性好、结构坚实、非渗透性好,对液态和气态的碳氢物质都可以完好地储存等优点,是目前重点研究的一类储气库。岩洞储气库是利用在岩石中专门开挖出的封闭空间储存天然气,它可以建在大多数岩石上,选址较为灵活,然而岩石型储气库的施工费用高且密封难度大。废弃矿穴储气库是利用废弃煤矿等遗留的洞穴储存天然气。此种储气库存在严重缺陷,例如原有井筒难以密封、存在气体向地面泄漏的危险、抽出储存气体的质量会发生变化、热值有所降低。

1.1.1 最大允许压力

一般情况下,储气库中最大允许压力可根据矿体侧压力计算:

$$P_{\text{min}} \leq P_{\delta} = \eta_r P_{\text{sc}} \quad (1)$$

式中, P_{min} 为最大允许压力; P_{δ} 为矿体侧压力; η_r 为岩石内摩擦角系数; P_{sc} 为矿体静压力。

对于塑性岩石, η_r 可按式计算:

$$\eta_r = \frac{1.73 - \tan\alpha}{1.73 + 2\tan\alpha} \quad (2)$$

式中, α 为岩石内摩擦角。

当 $\alpha \geq 60.4$ 即 $\tan\alpha \geq 1.73$ 时,无意义。考虑到安全系数,储气库中的最大允许压力应比矿体侧压力小30%—50%。

1.1.2 最大储备量

对于数量最多的衰竭油气田型地下储气库,最大储气规模为

$$Q = Shm\alpha \frac{P_n T_0}{P_0 T_n Z} \quad (3)$$

式中, Q 为储气容量(工程标准状况), m^3 ; S 为储气层面积, m^2 ; h 为储气层高度, m ; m 为孔隙度; α 为气层含气饱和度; P_n 为储气层压力, Pa ; T_n 为储气层温度, K ; P_0 为工程标准状况下压力, Pa ; T_0 为工程标准状况下温度, K ; Z 为在 P_n, T_n 下气体的压缩因子。

储层容量与储层压力呈正比。扩大储气库规模可降低储气库的单位投资和储气成本。在同一条件下,建造一个规模较大的储气库比建造几个规模较小的储气库合理得多。

1.1.3 垫层气量

垫层气量按下式计算:

$$Q_{\sigma} = \Omega_k \frac{P_k Z_k}{Z_k P_a} + \alpha_k (\Omega_{II} - \Omega_k) \frac{P_{II} Z_{II}}{Z_{II} P_a} \quad (4)$$

式中, Q_{σ} 为垫层气量, m^3 ; Ω_k, Ω_{II} 分别为矿层空隙空间开始的(抽气前)非水淹容积和最终的非水淹容积, m^3 ; P_k, P_a 分别为矿层空隙空间开始的(抽气前)非水淹容积和最后的非水淹容积计算的加权平均压力, MPa ; P_a 为地层压力, MPa ; α_k 为水淹地带气体体积饱和度系数。

垫层气量一般为有效气量的60%—140%。有效气量通常是根根据耗气量的月不均衡性系数计算:

$$Q_{\alpha} = \frac{Q_R}{12} \sum_{i=1}^n (KM_{\max} - 1)$$

或

$$Q_{\alpha} = \frac{Q_R}{12} \sum_{i=1}^n KM_{\min} \quad (5)$$

式中, Q_R 为根据所有用户用气定额并考虑地区用气发展计划计算的年平均用气量, 10^6m^3 ; n 为总月数; KM_{\max} 为大于 1 的月不均衡性系数; KM_{\min} 为小于 1 的月不均衡性系数。

1.1.4 季节储备量

为缓解季节性耗气量的不均衡性而实行天然气季节储备, 在已知耗气量的月不均衡性系数情况下, 必须的季节储备量计算式为^[2]

$$Q_a = \sum_{i=1}^n (Q_{\text{CM}} - Q_M) = \sum_{i=1}^n Q_{\text{CM}} \left(1 - \frac{Q_M}{Q_{\text{CM}}} \right) = \frac{Q_R}{12} \sum_{i=1}^n (1 - K_M) \quad (6)$$

式中, Q_a 为储备气量, m^3 ; Q_{CM} 为月平均耗气量, m^3 ; Q_M 为月实际耗气量, m^3 ; Q_R 为年耗气量, m^3 ; K_M 为月不均衡系数, $K_M \leq 1$ 。

1.2 输气管道末段储气

对于长距离输气管道的末段(从最末一座压气站到终点配气站), 在设计时要根据通常日用气量的波动情况赋予一定的储存能力, 借以进行负荷调节; 而对于没有中间压气站的输气管道, 全线都可以进行天然气的储存^[7]。当管道的终点压力在一定范围内波动时, 管内气体的平均压力也相应有一个最高值和最低值, 如果适当选择一个储气管段的始终点压力波动范围和管段容积, 即可使管道具备所需要的储存能力。输入储气管段的气量是一个稳定值, 但其输出气量则受日用气负荷规律的支配。输出量小于输入量时为储存过程, 大于输入量时则为管道储存气量的消耗过程。

末段管道的储气量计算式为

$$V_s = V_{\max} - V_{\min} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{p_{j\max} - p_{j\min}}{p_0} \frac{T_0}{TZ} l_z \quad (7)$$

式中, D 为末段管道管内径, m ; l_z 为管道末段长度, m ; $p_{j\min}$ 和 $p_{j\max}$ 为储气开始、结束时管道的平均压力, Pa ; p_0 为工程标准状况下的压力, Pa ; T_0 为工程标准状况下的温度, K ; T 为管内气体温度, K ; Z 为管内气体压缩因子。

如果计算结果不能满足管道末段储气需要, 可使用两个方法解决。一是在管道强度和压气站工况允许的情况下, 提高出站压力, 以增大最高平均压力; 二是可以增大末段管径, 以增加管道几何容积。

1.3 液化天然气 (LNG) 和液化石油气 (LPG)

1.3.1 LNG 调峰

利用 LNG 调峰与传统的容积式气柜或高压球罐储气调峰有着较大的区别。LNG 调峰是在 LNG 调峰站中安装 LNG 储罐储存 LNG 进行调峰。与其他调峰设施相比, LNG 储罐自身的优点如下:

(1) LNG 储罐的储气量较大, 一座 $6 \times 10^4 \text{m}^3$ LNG 储罐, 气化后的天然气容量可达 $3600 \times 10^4 \text{m}^3$, 相当于中国一座中小城

市半年的用气量;

(2) 全容式 LNG 储罐运行安全可靠, 由于 LNG 燃点高, 储存十分安全, 可将 LNG 储罐建在城市近郊;

(3) LNG 储罐对地质条件要求不高, 因此库址选择比较灵活;

(4) 中小型 LNG 储罐及其相应设施比地下储气库一次性投资少, 建设周期短;

(5) 天然气不易受污染, 气化后可以直接进入城市供气管网, 无须进行再处理;

(6) 可用槽车将液化天然气从 LNG 接收站送至城市用户。

1.3.2 LPG 调峰

城市冬季用气量比较大, 条件允许时可以选择 LPG 调峰。如果 LPG 产量大, 因其便于储存和运输, 可以通过成品油管道或罐车将 LPG 输送到需要的城市, 夏天储存冬季用。储存方式既可带压储存, 也可以在 -40°C 下常压储存。其调峰方式的关键是需采用专门设备和措施, 将丙烷和空气掺混, 使其华白指数与管道中天然气的华白指数相近时才可供调峰使用。其缺点是气态丙烷比空气重, 一旦发生泄漏, 若沉积在地面不容易发散。

2 短期调峰方案的制定、优化和仿真

解决调峰问题的关键是制定恰当的调峰方案, 除了要满足供气保障的基本要求之外, 还要满足安全性、可靠性、经济性、平稳性、便利性等多方面要求。输气管道调峰过程对应的是非稳态工况, 其运行参数的变化规律相当复杂, 调度人员难以根据经验制定能够保障供气的调峰方案, 更难对调峰过程进行综合性的优化。

2.1 短期调峰方案的制定

所谓短期调峰方案, 是指在输气管道系统供气调峰过程中压气站的运行方案及储气库的采气方案等。在用气高峰时, 输气管道一般按设计输量运行, 其出站压力均接近设计压力, 压气站运行方案的调整空间很小。所以, 此时用气高峰期的调峰方案主要体现在地下储气库的采气方案。制定地下储气库采气方案的总体原则是在调峰周期内储气库的总采气量等于系统的总用气缺口。一般而言, 在实际生产中主要有以下采气模式。

(1) 根据每天预测的用气量减去输气管路的供气量得到用户每天的用气缺口, 保持储气库每天小时采气流量不变, 利用管道管存平衡用户的小时不均匀用气量。

(2) 根据每周预测的用气量减去输气管路的供气量得到用户每周的用气缺口, 保持储气库每周小时采气流量不变, 这就要求用户的用气不均匀系数不大或管道本身调峰能力比较强的情况。

(3) 每天用气高峰时储气库多采气, 用气低谷时少采气。

储气库自身的特点要求其采气量应尽量保持平稳, 所以

第三种采气模式通常只在应急供气时采用。

2.2 调峰方案的优化

短期调峰的最优方案必须满足可行性和最优性两方面的要求。可行性就是要满足各供气点对供气流量和允许最低供气压力的要求。关于调峰方案优化,国内外并没有一个普遍公认的优化原则。在广泛查阅国内外文献并与输气管道运行调度人员充分交流的基础上,认为短期调峰方案的优化原则应该是一个包含有多个目标的优化体系。结合生产实践的可操作性,建立了一个包含4个目标的优化原则。

(1) 可靠性。在调峰周期内,输气管道系统中各供气点的压力要大于或等于其供气合同允许的最低供气压力。

(2) 经济性。在调峰周期内,输气管道系统中所有压缩机组的总能耗费用与储气库的采气费用之和最小。

(3) 平稳性。在调峰周期内,输气管道系统在运行过程中管路的气体管存量应尽量保持平稳。

(4) 便利性。在调峰周期内,调节储气库采气流量变化的次数应尽可能少。

短期调峰方案的优化属于瞬态优化,瞬态优化的目的是进行一个时步的计算要找到相应的控制变量最优值,寻找最优解时则需要采用更加复杂的优化算法,并且优化需要更高的计算速度。同时,短期调峰方案的优化也是一个多目标优化问题,其并不一定存在一个逻辑上的最优解,在很大程度上最优解取决于决策者对于解的满意程度,因此建立一个与决策者交互式的求解平台是比较有效的求解方式。

2.3 调峰方案的仿真

在制定短期调峰方案时,必须针对所提出的调峰方案检验相应的调峰过程和效果,即需要对调峰过程进行仿真。目前,商业仿真软件基本主宰了输气管道仿真领域,主流软件有 TGNET、SPS、SIMONE、SIROGAS 和 GREEG 等。考虑到用气量随时间的变化规律具有一定程度的随机性,国外一些专业软件公司专门开发了用气量预测软件,与动态仿真软件配套使用可以更合理地制定短期调峰方案。

TGNET(Transient Gas Network)软件由美国 SSI(Scientific Software Intercomp)公司开发,是中国最早从国外引进的输气管道仿真软件,其主要功能是气体管网的稳态和瞬态工况仿真。TGNET 软件可以仿真各种管网的正常工况,以确定最佳的设计方案、改扩建方案以及最优的运行方案等,还可以对各种事故工况(如管道泄漏、设备失效等)进行预测,以确定最有效的应急措施^[23-24]。

美国 Stoner 公司开发了用于长输管道瞬态工况模拟的软件 SPS(Stoner Pipeline Simulator)。SPS 既可以对管道系统的水力、热力工况进行仿真,又可以对管道系统的控制、调节过程进行仿真。

SIMONE 是捷克斯洛伐克开发的气体输配系统仿真软件,基本上可以模拟管网可能出现的所有瞬变过程,如阀门操作、压气站工作点的变化以及各种自然灾害引起的事故

(如输量变化、管道破裂)等。

瞬态仿真可以求出管道沿线运行参数随时间的变化,在瞬态仿真中,预测的用气量和供气量都是时间的函数,并且需要建立压缩机、控制阀等设备的模型,指定运行的设备,给出所有设备的控制参数。

3 展望

输气管道系统的调峰过程是一个复杂的非稳态工况,制定一个技术上可行且满足某些优化原则的调峰方案具有较大难度。根据目前的研究进展,主要在以下方面需要进一步探索。

(1) 由于输气管道系统调峰方案的优化涉及诸多方面,例如管道运行的经济性、可靠性、安全性、平稳性、便利性和节能减排等,所以如何制定一个合理的且可操作性强的优化原则体系十分重要。

(2) 在输气管道系统短期调峰方案优化原则体系中,存在一些模糊因素,例如平稳性指在调峰周期内输气管道系统运行管存尽可能保持平稳,但是这种表述并没有一个定量标准,存在模糊性,需要通过运行仿真、生产调研、咨询专家等途径寻求这些模糊因素的定量处理方法。

(3) 中国主干输气管网拓扑结构较为复杂,而且短期调峰方案优化是属于瞬态优化,因此建立输气管网短期调峰方案多目标模糊优化模型具有较大难度。

(4) 由于建立的多目标模糊优化模型复杂,要求得其全局最优解亦具有相当难度,而多目标模糊优化本身目前也没有公认的有效求解方法,因此需要继续探索有效、实用的针对输气管网供气调峰问题的多目标模糊优化算法。

中国目前供气调峰形势严峻,建立一套真正实用的输气管道系统调峰方案仿真、分析、评价和优化的方法对于解决目前生产中遇到的调峰瓶颈问题具有很好的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 丁国生, 梁婧, 任永胜, 等. 建设中国天然气调峰储备与应急系统的建议[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 98-100.
Ding Guosheng, Liang Jing, Ren Yongsheng, et al. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 98-100.
- [2] 吴长春, 张鹏, 蒋方美. 输气管道仿真软件及其在供气调峰中的应用[J]. 石油工业技术监督, 2005, 21(5): 33-36.
Wu Changchun, Zhang Peng, Jiang Fangmei. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2005, 21(5): 33-36.
- [3] Orin Flanigan. Underground gas storage facility: Design and implementation [R]. Houston, TX: Gulf Publishing Company, 1995.
- [4] 常大海, 王善珂, 肖尉. 国外管道仿真技术发展状况 [J]. 油气储运, 1997, 16(10): 9-13.
Chang Dahai, Wang Shanke, Xiao Wei. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 1997, 16(10): 9-13.
- [5] 左丽丽. 输气管网调峰方案仿真与优化研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2008.
Zuo Lili. Simulation and optimization of peak shaving scenarios for gas

- pipeline networks[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2008.
- [6] Northwest gas outlook—natural gas demand, supply and service capacity in the pacific northwest [J/OL]. http://www.nwga.org/pub_docs/final_pnw_gas_outlook.pdf, 2004.
- [7] Mingot A P, Cristiani H. Peak shaving plant at general rodriguez (buenos aires, argentina) and its role to fulfill natural gas demand[C]. SPE 38208, Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1997.
- [8] Westhoff M A. Using operating data at natural gas pipelines [C]. International Symposium on Transportation Recorders, Arlington, VA, USA, May 3–5, 1999.
- [9] Whitting I J. Natural gas supply demand strategy in the UK [R]. SPE 8293, Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1979.
- [10] Henderson J H, Dempsey J R, Tyler J C. Use of numerical models to develop and operate gas storage reservoirs [C]. SPE 2009, Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1968.
- [11] Wattenbarger R A. Maximizing seasonal withdrawals from gas storage reservoirs [C]. SPE 2406, Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1970.
- [12] Brown K G, Sawyer W K. Practical methods to improve storage operations—A case study [C]. SPE 57460, Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 1999.
- [13] Hoogwerf M, van der Hoeven T. Underground storage scheduler [C]. PSIG 2000, Pipeline Simulation Interest Group, 2000.
- [14] James W G. Seasonal modeling using steady state techniques [C]. PSIG Annual Meeting, Detroit, Michigan, USA, October 27–28, 1983.
- [15] Schroeder D W. Modeling seasonal gas system operations using the technique of consecutive steady-state simulations [C]. PSIG Annual Meeting, Detroit, Michigan, USA, October 27–28, 1983.
- [16] 赵树栋, 王皆明. 天然气地下储气库注采技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- Zhao Shudong, Wang Jieming. Underground gas storage injection technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [17] 奥林·弗拉尼根. 储气库的设计与实施[M]. 张守良, 陈建军, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Flanigan O. Underground gas storage facilities design and implementation[M]. Zhang Shouliang, Chen Jianjun, et al, tran. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [18] 龙庆晏. 城市用气调峰[J]. 石油规划设计, 1995, 6(6): 20–21.
- Long Qingyan. *Petroleum Planning & Engineering*, 1995, 6(6): 20–21.
- [19] 罗富绪. 国外地下储气库发展综述[J]. 油气储运, 1998, 17(3): 58–59.
- Luo Fuxu. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 1998, 17(3): 58–59.
- [20] 丁国生, 谢萍. 中国地下储气库现状与发展展望 [J]. 天然气工业, 2006, 26 (6): 111–113.
- Ding Guosheng, Xie Ping. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(6): 111–113.
- [21] 吴洪波, 何洋, 周勇, 等. 天然气调峰方式的对比与选择[J]. 天然气与石油, 2009, 27(5): 5–9, 58.
- Wu Hongbo, He Yang, Zhou Yong, et al. *Natural Gas and Oil*, 2009, 27 (5): 5–9, 58.
- [22] 吴忠鹤, 贺宇. 地下储气库的功能和作用[J]. 天然气与石油, 2004, 22 (2): 1–4.
- Wu Zhonghe, He Yu. *Oil & Gas Transportation and Storage*, 2004, 22 (2): 1–4.
- [23] 杨光大. 天然气集输管网瞬态模拟软件 TGNET 及其应用[J]. 天然气与石油, 1998, 16(1): 1–4.
- Yang Guangda. *Natural Gas and Oil*, 1998, 16(1): 1–4.
- [24] 金浩. TGNET 软件在烟台输气工程设计中的应用 [J]. 油气田地面工程, 2003(5): 53–57.
- Jin Hao. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2003(5): 53–57.

(责任编辑 朱宇)

· 学术动态 ·



“中国感光学会 2011 年学术年会”征文

中国感光学会将于 2011 年 11 月在北京召开“中国感光学会 2011 年学术年会”。

会议征文范围: 影像的捕获方法、系统与设备; 色彩科学与技术; 数字图像处理、操作与传送; 新型成像材料和相关功能材料; 紫外光固化材料与技术; 数字影像呈现和显示技术与器件; 数字影像及其相关性能的评价方法和设备; 数字成像技术和系统; 硬拷贝和输出系统相关领域的科学与技术; 数字冲印技术和系统; 数字和按需印刷 / 出版技术和系统; 其他与影像相关的科学技术、器材和系统。

联系方式: 北京市海淀区中关村北一条 2 号(100190)吴言; 电话: 010-82543686; 传真: 010-82543687; 电子信箱: xh@csist.org.cn;

会议网址: www.csist.org.cn/cn/tzgg/2011/0307/462.asp。