

输气管道非稳态优化运行技术研究进展

左丽丽¹, 刘欢¹, 张晓瑞¹, 冯亮^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室;城市油气输配技术北京市重点实验室,北京 102249
2. 中国石油西南管道公司,成都 610041

摘要 天然气在管道系统中流动时,需要依靠压缩机组提供能量,压缩机组的能耗很大,一般可占所输送天然气的3%~5%,因此非常有必要研究输气管道的优化运行问题。本文论述了输气管道系统非稳态优化运行技术的研究现状及发展趋势,总结了国内外研究的典型输气管道非稳态优化运行问题以及采用的数学模型,包括决策变量、目标函数和约束条件等。分析了输气管道非稳态优化运行数学模型的求解难点、主要算法、典型算例及其应用效果。

关键词 输气管道;非稳态;最优化;数学模型

中图分类号 TE832.9

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.18.012

Review on Transient Operation Optimization of Gas Pipelines

ZUO Lili¹, LIU Huan¹, ZHANG Xiaorui¹, Feng Liang^{1,2}

1. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology; National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Petrochina Southwest Pipeline Company, Chengdu 610041, China

Abstract When the gas flows through the pipeline, compressors are used to compensate the pressure loss due to the friction by consuming the fuel gas. For the fuel gas used by compressors constitutes a significant part (about 3%~5% of the gas running through the pipeline), it is quite necessary to study how to optimize the operation of the gas pipeline in a better way that the consumer's demands are satisfied and the compressors are set cost-efficiently. The paper summarizes related typical transient operation issues. The mathematical model for optimizing the gas pipeline operation in a transient flow is built, and the commonly used algorithms and the relevant results are analyzed in detail.

Keywords gas pipeline; transient; optimization; mathematical model

输气管道系统安全、高效、可靠、节能、灵活地运行是管道公司以及用户共同追求的目标。在为输气管道制定中长期运行方案或者为日输量比较平稳的输气管道制定日运行方案时,通常采用稳态优化方法;在输气管道日常运行管理过程中,当供气压力、温度、流量改变、用户用气量变化、切断或接通缓冲用户、启/停压缩机组、开/关阀门、管道发生事故性漏气或断裂时,输气管道系统会进入非稳态工况运行,这时稳态优化运行的方法不能精确地描述输气管道系统内天然气的真实流动过程,不足以为其提供充分、合理的运行方

案,此时应该采用非稳态优化运行的方法指导输气管道系统的运行管理。

输气管道系统在非稳态工况下运行,会不同程度地降低管道的输气能力。非稳态优化的方法可以指导管道运行管理人员合理利用供气合同、存储设施、管存和压缩机组等完成输气任务,及时有效地处理各种突发工况,并且使得管道系统在一段时间内的总运行费用最小,从而最大程度地恢复输气管道损失的输气能力^[1-4]。

输气管道稳态优化运行技术相对成熟,在输气管道的实

收稿日期:2014-01-28;修回日期:2014-05-01

基金项目:中国石油大学(北京)青年教师专项培养基金项目(KYJJ2012-04-02)

作者简介:左丽丽,讲师,研究方向为油气管道仿真、优化与能耗预测,电子信箱:zuolili@cup.edu.cn

引用格式:左丽丽,刘欢,张晓瑞,等.输气管道非稳态优化运行技术研究进展[J].科技导报,2014,32(18):73-78.

际运行管理过程中得到较好的应用^[5-10],但是输气管道非稳态优化运行技术却仍停留在理论研究阶段。在国内,关于输气管道非稳态优化运行方面的研究未见报道,只有一些对于输气管道非稳态工况仿真的分析和研究^[11,12]。2009年,赵小平等^[11]针对704泵站-独山子输气管道下游用气负荷波动导致输气管道进入非稳态工况运行这一问题进行了研究,利用TGNET软件模拟该输气管道在非稳态运行工况下的运行参数变化,分析非稳态工况对管道运行的影响。2011年,杨毅等^[12]利用SPS软件对阀门开/关、泵机组启/停、泄漏等输气管道典型的非稳态工况进行了模拟计算,分析了不同的非稳态工况下输气管道系统运行参数的变化。在国外关于输气管道非稳态优化的研究报道虽然很多^[1-4,7,13-16],却鲜有实际应用情况以及应用效果的报道。目前,解决输气管道的非稳态工程问题时,国内一般采用优选方法,即基于历史运行经验事先拟定几个非稳态运行方案,然后采用比较成熟的商业仿真软件(SPS软件、TGNET软件等)进行对比分析,选出其中较好的非稳态运行方案,不足之处在于该方案可能不是真正意义上的最优方案^[9]。

1 输气管道非稳态优化运行问题的描述

输气管道系统非稳态优化运行,是指当输气管道系统的边界条件发生扰动或者一直处于扰动状态时(例如各分输点分气流量随时间变化),输气管道系统进入非稳态工况运行,此时可以借助非稳态优化的方法针对相应的非稳态问题制定一段时间内压气站出站压力或压气站开机方案(压缩机启/停状态、压缩机转速)、气源供气流量等随时间变化的连续的控制措施,使输气管道系统能够在满足一系列约束条件的前提下,实现一定的优化目标(例如运行费用最小),完成从一个初始状态过渡到一个终了状态的输气任务。

从20世纪60年代开始进行输气管道优化运行研究以来,国内外学者在非稳态优化领域进行了不同的探索和研究。输气管道非稳态优化运行主要用于解决以下5个方面问题。

1) 输量切换的过渡过程。

由于季节交替,用户的用气量需求呈周期性波动,或者由于输气管道系统的改扩建,都会导致输气管道系统的任务输量发生变化,一旦确定管道需要切换任务输量,一般要求输气管道系统尽快完成该过渡过程。非稳态优化方法可以用于指导输气管道系统尽快(或者在一定的优化时间段内)从一个初始输量状态过渡到目标输量状态,满足用户合同气量、供气压力以及其他一些约束条件,并使得优化时段内的总运行费用最少^[17]。

2) 完成连续供气任务。

输气管道系统与城市配气管网直接相连时,这些分输点的分输流量会随着居民用气的小时不均匀性、日不均匀性等因素连续波动,这可能会导致输气管道系统严重偏离稳态工

况运行。非稳态优化方法可用于优化输气管道系统的日常运行计划(例如24h),指导输气管道系统完成日输气任务^[18],甚至在输气日结束前使管道过渡到指定终态,为下一个输气日的输气任务做好准备^[19]。

3) 完成间歇供气任务。

输气管道系统有时会间歇给用户(调峰电厂、工业用户等)供气,这类用户的特点是用气时间段不连续,且一旦开始分输用气量较大,有时甚至不能提前确定分输计划(分输地点、分输时间段、分输量等)。此时非稳态优化方法可以用于:制定优化运行方案,合理使用管存,不仅在分输时间段内进行优化控制,而且在间歇分输开始之前,可以将输气管道系统内的管存调整到目标状态,为即将开始的分输任务做好准备,并在间歇分输任务完成后(或者一定的时间段内),将输气管道系统内的管存状态恢复到初始状态^[20]。

4) 完成额外供气任务。

理想情况下,输气管道在设计输量下按照设计方案运行是最有效的,但在管道实际运行过程中,输气管道的输量可能低于设计输量,因而存在运行方案优化和增加额外分输合同的可能性,且输量偏离设计输量越远,输气管道系统的运行灵活性越大。非稳态优化方法可以用于确定:在原分输条件的基础上,输气管道系统是否可以在指定地点额外完成短期分输任务;如果可以,有多大的分输能力,从而利用指定地点的销售机会最大化输气管道系统的经济效益^[1,19]。

5) 事故工况。

在非正常运行条件下,例如设备故障、管道破裂、或输送任务无法完成等,非稳态优化方法可以用于确定管道系统如何做出最有效的应急操作。例如输气管道系统还可以利用管存量满足用户的正常用气多长时间,当不能满足合同供气要求时如何进行有效的缩减管理,确定分输量缩减的时间、地点(可中断供气用户)以及缩减量等,这些都是值得深入探讨的问题^[1]。

总体来说,所研究的非稳态优化运行问题从简单到复杂多样,早期主要研究终点单点输气量波动的问题,且波动幅度较小;后来逐渐开始研究输量切换问题,多个分输地点间歇性短期分输问题等。

2 数学模型

输气管道非稳态优化运行数学模型可以描述如下。

1) 决策变量。随时间变化的每座压气站的出站压力、每台压缩机开启状态及转速等,在少数情况下,优化首座压气站随时间变化的进口流量。

2) 目标函数。一般为优化时段内总运行费用最小,该费用包括:压缩机组能耗费用、设备维护费用、压缩机组启/停费用、违反分输合同的惩罚费用等。

3) 约束条件。(1) 管道运行约束,管流控制方程(连续性方程、动量方程、能量方程)和管道允许最大操作压力等;(2)

设备运行约束,压缩机组的最大功率限制、压缩机的压比范围、压缩机流量范围、压缩机运行的可行域、压缩机的进出口压力限制、最小运行时间/停机时间约束等;(3) 边界条件约束,随时间变化的分输需求、上下游合同限制(压力、流量)、不同时间/地点气体质量要求等;(4) 优化时段终了状态约束,优化时段结束时刻对管存的要求,为了确保优化时段结束后输气管道系统能够继续正常运行,避免管存耗尽等问题,一般要求优化时段终了时刻的总管存水平不能低于初始时刻的总管存水平或者不能低于某个设定值;(5) 其他约束,终了状态约束(例如管存),若是输气管网,还需要满足节点流量平衡及环内闭合压力差为0的条件。

完整的输气管道非稳态优化问题是一个具有非线性、组合性、随机性且与时间有关的混合整数非线性规划问题。在上述数学模型中,管道所有的运行参数都是随时间变化的;压缩机组能耗是由质量流量、压比以及压缩机绝热效率等参数构成的非线性函数,若为燃气轮机驱动,则还与燃气轮机耗气率有关;约束条件中管流控制方程式是非线性的,压缩机的可行域是非凸的;随机性包括分输合同改变、事故工况等;不优化压气站站内开机方案时,输气管道非稳态优化模型为非线性优化模型,若考虑压气站站内开机方案,则为混合整数非线性优化模型。

相比于稳态优化模型,非稳态优化模型所有的参数不仅是距离的函数,还是时间的函数,对模型中时间项进行离散以及对非线性项进行处理都会大大增加模型变量的数目,使模型规模巨大,所以,输气管道非稳态优化模型的求解十分困难。在现场实际工程应用时,除了计算精度需要满足工程要求外,对计算速度的要求也很高,需要能尽快提供有效、可靠、优化的运行方案实时指导管道运行优化,以进一步增大输气管道非稳态优化运行数学模型的求解难度。

3 算法及应用

自20世纪60年代开始了输气管道系统非稳态优化运行研究的进程,所研究的管道系统结构由简单到复杂。最初仅针对单座压气站单条管道的简单系统进行研究,随着研究程度的加深,逐渐扩展到相对复杂的管道系统,如多座压气站的单条输气管道系统、枝状输气管道系统等。为了降低求解非稳态优化运行问题的难度,对输气管道系统的物理模型进行了不同程度的简化,如将压气站作为一个整体单元,而不考虑压气站内的具体开机方案(如站内压缩机组的类型、连接方式、开机组合及每台压缩机的转速等)。为了求解方便,对数学模型也进行了一些简化和近似,如对压缩机燃料消耗函数等非线性函数进行线性近似,用切线或割线代替抛物线等;使用管段的平均流量计算压降,用该压降方程代替动量方程(微分方程)等。随着对求解算法研究的不断深入,对模型的简化程度越来越小。为了使输气管道非稳态优化运行的研究成果得到实际应用,对算法的求解速度提出很高

的要求。目前为止,可以用于求解非稳态优化运行问题的优化算法很多,根据所建立的非稳态优化模型的类型和特点,可以采用不同的算法,主要包括动态规划算法、非线性规划算法、混合整数非线性规划算法等,但尚无普遍认可的能够较好地求解完整的输气管道系统非稳态优化运行模型的方法。

3.1 动态规划法(DP)

动态规划算法在算法结构上适合求解输气管道的优化运行问题,因为其针对的问题为多阶段决策问题,输气管道非稳态优化运行问题在时间上可以看作是多阶段决策问题。动态规划算法已经被用于优化单条输气管道和有分枝输气管道的非稳态优化问题。

1968年,Wong等^[13]使用动态规划方法(按时间递推)求解输气管道末段的非稳态优化问题,研究了单座压气站供气、单用户、无分支输气管道的短期(24 h)非稳态优化问题。已知压气站进口压力、终点分输流量的小时波动情况以及终点供气合同压力,求解不同时间步长内压气站的最优供气流量。求解思路如下:按照时间步长划分阶段,将不同时间步长内的压气站流量(即供气流量)作为决策变量,将不同时间步长内管段内部两个节点(位于管段1/4和3/4处)的压力作为状态变量,目标函数为优化时段内压缩机组能耗最小。优化计算结果表明:终点压力接近最低允许压力可使管道接近最优运行状态。Goldberg等^[21,22]使用遗传算法求解了上述问题,得出了类似的结论。1985年,Mantri等^[23]将动态规划算法与启发式规则相结合用于确定输气管道非稳态优化问题中的压气站站内开机方案。

随着输气管道系统向多气源、多用户方向发展,输气管道系统的结构越来越复杂,只针对单条输气管道的研究已经不能满足实际需求,但大型、复杂输气管道系统非稳态优化模型的求解十分困难,需要基于一定的条件对模型进行合理简化。1971年,Larson等^[17]在求解大型、复杂枝状输气管网系统的非稳态优化运行问题时,采用了分层控制理论思想,将其拆分成若干个简单的子系统,每个子系统包含一座压气站及直接由该座压气站供气的管道系统,与子系统连接的后续压气站被视作一个分气点。从最后一座压气站及其供气的管道构成的子系统开始,依次向前递推对每个子系统使用Wong等^[13]得出的关于输气管道末段最优控制策略的结论,从而使整个系统达到最优状态。1994年,Osiadacz等^[24]采用了同样的分层控制理论研究了枝状管网的非稳态优化问题,并对英国国家管网的一部分(枝状管网系统)进行了测试,计算结果表明该算法能够给出相应的优化方案,但文中缺少对求解问题、算法的详细描述以及对求解结果的详细说明和分析。

3.2 非线性规划(NLP)

为了缩小优化模型规模,较早的研究中不考虑压气站的具体开机方案,将压气站看作输气管道系统的一个单元,将

压气站随时间变化的出站压力、过站流量等参数作为决策变量,所建立的模型通常为带时间项的非线性规划模型。针对这些模型采用的优化算法主要有梯度法、二次规划法、序列线性规划法等。

1987年, Dupon等^[25]针对一条简化的实际管道系统(一条实际输气管道的最后724.2 km,共5座压气站)的非稳态优化问题进行了研究,受站场实际控制策略的启发,控制压缩机功率为14914.0 kW,选择1、3、5压气站的开启时间和关闭时间作为模型的决策变量,采用下降类算法求解。计算结果表明,通过非稳态优化方法确定的最优控制策略比根据现场经验制定的基本控制策略节省7%~8%的燃料消耗,验证了采用数值优化方法确定输气管道运行策略进而降低能耗费用的可行性。

1993年, Furey^[18]研究了British Gas国家输气管网日用气负荷波动条件下的非稳态优化运行问题。优化时段为1 d,时间步长为1 h,决策变量为不同时步内通过压缩机的流量,目标函数为优化时间段内总运行费用(主要指压缩机能耗)最小。将有效集策略、拉格朗日函数法、准二次规划法等相结合,提出了一种求解非线性规划模型的新算法。算法分为3个层次:首先,利用有效集策略和增广拉格朗日函数法处理不等式约束;然后,处理优化问题中的等式约束并将问题转化为二次规划问题;最后,采用广义梯度有效集算法求解每一次迭代产生的准二次规划子问题。将该优化算法在两个管网上进行了测试,并使用仿真软件验证了由非稳态优化程序计算得到优化运行方案的正确性。

2000年, Rachford等^[19]基于牛顿法提出了一种求解输气管道非稳态优化问题的方法,既适用于长期处于非稳态工况的输气管道,也适用于需要经过非稳态过渡过程达到新的稳态工况的输气管道。在其构建的优化模型中,决策变量为随时间变化的压气站出口压力,目标函数为优化时间段内燃料消耗最小,并首次提出需要将输气管道非稳态过程的终了状态作为约束条件,否则所得到的优化方案可能趋向于充分利用现有管存,存在抽空管存的风险,该终了目标状态可以通过压力分布、流量分布、压气站开机方案、阀门状态、子系统内管存等工艺参数描述^[19]。所研究的输气管道全长500.5 km,沿线共设7座压气站,研究任务为:在给定的优化时间段内(24、16、8 h等)制定非稳态优化运行方案,使输气管道从初始状态过渡到目标状态(目标状态的管存比初始状态的管存增加12.5%),并满足用户的分输需求和约束条件。研究表明:采用非稳态优化方法计算得到的优化运行方案,可以在较短的时间内完成过渡任务,且比基于经验的人工控制策略节省了5%的燃料消耗。2001年, Pietsch等^[14]将Rachford等^[19]提出的非稳态优化方法应用于Vector管道,并采用瞬态仿真软件验证了该方法的可行性。研究表明:Vector管道系统存在很大的在沿线指定地点分输的灵活性(尤其是在两座压气站之间),可以完成各种情况下的分输任务,但并没有明显节省燃料。

2000年, Kelling等^[26]提出采用序列线性规划(SLP)方法求解任意类型输气管网非稳态工艺运行方案优化问题—TTO(transient technical optimization)。决策变量为优化时段内管道入口流量和压气站过站流量,目标函数为燃料消耗最小。模型假设和简化如下:将一个管段作为一个空间步长;对动量方程进行简化处理,在每一个时步内,采用压降方程(适合稳态计算)代替动量方程,管段流量取该时步内管段进、出口流量的平均值;对连续性方程进行简化处理:利用实际气体的状态方程,采用相邻两个时步的平均压力(根据稳态平均压力公式得到)计算管段进出口流量的变化;对模型中的非线性项进行线性化处理:凸函数采用多根割线进行线性化,以分段线性函数替代非线性函数;对于非凸函数,采用上一次的解处的切线进行替代。将该方法在两条实验管道系统上进行了测试,结果表明该方法可以获得非稳态优化方案,同时利用仿真软件SIMON验证了优化方案的可行性和准确性。德国鲁尔天然气管道公司(Ruhrgas AG)拟将TTO优化程序作为其新开发的调度应用和信息系统的(DAISY)的一个功能模块,作为建议性工具供调度人员使用。

3.3 混合整数非线性规划(MINLP)

为了精确描述输气管道系统内非稳态水力、热力过程,就需要精确描述每一个元件,如管段、压缩机、阀门等。完整的输气管道非稳态优化运行模型是一个混合整数非线性模型,含时间维度、且具有非线性、组合性、随机性等特点,使得该模型变量数目很多、规模巨大,求解困难,有时甚至连可行解都难以找到^[27]。各国学者在该模型的求解算法方面进行了很多尝试,主要有:将混合整数非线性规划模型线性化,转化为混合整数线性规划模型,借助商业求解器求解(如CPLEX等)^[28];应用模拟退火算法^[28]、遗传算法等智能算法求解输气管道非稳态优化问题,智能算法具有使用灵活、求解效率高、求得全局最优解的概率大等优点。

1985年, Mantri等^[23]最早采用混合整数非线性优化模型求解输气管道非稳态优化运行问题,采用的算法为广义简约梯度算法和动态规划算法结合。为了减小模型规模,将非稳态优化模型分为系统级优化和站级优化两部分,系统级优化将压气站作为一个整体,决策变量为每个时间步长内每座压气站进/出站压力、过站流量,目标函数为优化时间段内所有压气站总运行费用(压缩机组能耗费用和启停费用)最低;而站级优化的决策变量为每个时间步长每座压气站的开机方案(压缩机启/停状态及转速)及不同压缩机组之间的流量分配方案,目标函数为优化时段内该压气站的运行费用最低。在系统级优化算法中,采用简约梯度算法确定不同时步内压气站流量和进/出站压力,站级优化则根先利用启发式规则与动态规划算法确定各时步内各压气站内压缩机的启/停机状态,然后采用简约梯度算法求解压缩机之间的流量分配问题。该非稳态算法在两根无分支输气管道上进行了测试,一条为假想的有3座压气站的管道,另一条为实际有7座压气站的管道,算法能够在10 min内(实施硬件为VAX 11/780)给

出非稳态优化方案。由于输量波动幅度较小以及算法寻优能力有限等原因,未能体现出非稳态优化的优势。研究发现:只有当管道输量低于设计输量的60%时,非稳态优化算法相比稳态优化算法得到的目标函数值下降才>1%。

2004年,Möller^[29]针对输气管道非稳态优化运行问题的“静态情况”(stationary case)建立了完整的混合整数非线性规划模型,完整的非稳态优化模型可以看作将多个“静态情况”耦合在一起。作者针对“静态情况”进行试探性研究,旨在设计出高效的求解算法,为后续研究作铺垫。例如先扩展到求解几个时间步长的非稳态优化问题,进而完整求解整个优化时段的非稳态优化问题。所建立优化模型中的变量包括管道、压缩机、阀门的流量、节点压力、压缩机和阀门转换变量、压缩机燃料耗气流量等,目标函数为所有压缩机组燃料费最小。作者将分支定界算法和割平面算法相结合设计了一种新的求解算法——分枝-切割算法(branch and cut),并基于测试管道系统,验证了使用分枝-切割算法进行求解相比于单独使用分支定界算法、割平面算法进行求解的优势。

2006年,Martin等^[30]进一步以德国E.ON Ruhrgas AG输气管网系统(总长度11000 km、26座压气站和数百个阀门)为对象研究了输气管网系统非稳态优化问题的“静态情况”,采用同样的算法求解非稳态优化数学模型。在管道的日常运行管理中,调度人员以小时为时间单位调整管网的运行方案,为了能给运行人员提供及时的指导性建议,要求非稳态优化运行软件能够在较短的时间内(例如15 min)给出优化运行方案。案例计算结果表明:随着网格点数目增加,运行时间增加,但是增加幅度较小,优化结果更精确。但是当网格点数目增加大一定程度以后,运行时间会显著增加,但是优化结果精度不会显著提高,因而需要找到计算精度和计算速度的优化平衡点。

2007年,Moritz^[31]针对输气管道非稳态优化运行问题建立了完整的混合整数非线性规划模型,作者采用SOS(special order set)方法对所建立的模型进行线性近似,然后采用模拟退火算法在较短的时间内生成非稳态优化模型的可行解,得到分枝-切割算法的上下边界,进而采用分枝-切割算法进行求解,作者认为能否得到全局最优解取决于线性近似的精度。

2011年,Domschke等^[32]将非线性优化技术和线性优化技术相结合,求解了输气管道非稳态优化问题。优化时段为1天,决策变量为随时间变化的压缩机的功率、压缩机的开/关状态、阀门开/关状态;目标函数为:优化时段内所有压缩机组的燃料消耗最少。采用的求解算法为:采用隐式箱法离散管流控制方程,从而得到混合整数非线性规划模型;将其分段线性近似得到混合整数线性规划模型,采用混合整数线性规划求解器(CPLEX)求解;根据求解结果所确定压缩机和阀门的开/关状态,将混合整数非线性规划模型转化为连续非线性规划模型,进而采用非线性优化求解器求解得到局部优化

解;使用求得的局部最优解改进原混合整数非线性模型的线性近似精度,依次递推循环,直至收敛。通过两个假想案例和一个实际案例对优化所提出的组合优化算法进行了验证,结果表明,采用组合算法得到的计算结果优于单独采用非线性优化技术或线性优化技术得到的结果。

4 结论

随着天然气管道运行灵活性和复杂性增加,稳态优化运行方法的局限性将会体现的越来越明显,而非稳态优化方法可以更真实地反应输气管道的运行工况,并针对不同的非稳态运行工况制定出实时的优化控制策略,保证输气管道系统安全、高效、可靠、节能、灵活地运行,并获得最大的经济效益。虽然国内外学者对输气管道非稳态优化问题进行了很多研究,但迄今还没有在输气管道的实际运行管理过程中得到很好的应用。主要原因如下:

1) 目前研究所建立的部分非稳态优化数学模型与管道实际运行过程存在差异,如没有考虑阀门、空冷器等元件,导致优化模型所描述的输气管道系统中的非稳态水力、热力过程与实际不符(压力波的传播速度不同),尤其对于输气管道短期非稳态优化问题尤为显著,以至于所制定的非稳态优化运行方案无法用于指导管道实际运行。

2) 缺少高效的求解算法。完整的输气管道非稳态优化运行模型变量数目多、且含有非线性、组合性和随机性因素,所以优化模型难于求解,或无法得到全局最优解,或求解速度太慢,无法用于实时指导管道实际运行。动态规划算法主要用于单根输气管道非稳态优化问题,求解效果较好,但是使用范围有限;非线性规划算法主要用于求解不考虑压气站开/关状态的输气管道非稳态优化问题,求解速度较快,但是不能考虑具体的压气站开机方案,近似程度较大;非线性混合整数规划算法用于求解完整的输气管道非稳态优化问题,模型较精确,但是求解难度大,求解速度慢。

虽然输气管道非稳态优化运行技术尚未成熟,但是仍可以灵活、充分地利用现有研究成果,建议如下:

1) 将不同优化算法相结合以提高求解效率,例如使用智能算法寻找初始可行解,然后再采用经典优化算法求出非稳态优化运行问题的最优解。

2) 可以利用非稳态仿真软件验证非稳态优化运行方案的可行性,当非稳态优化方法可以帮助管道系统完成输送任务,并在一定程度上降低能耗时,即可以考虑将其作为建议性工具使用,指导输气管道优化运行。同时可以在实际应用过程中总结经验指导非稳态优化运行问题的建模和求解,为输气管道非稳态运行优化开辟了新的思路。

参考文献(References)

- [1] Carter R, Reisner M, Sekirnjak E. Transient optimization—examples and directions[C]. PSIG Annual Meeting, Bonita Springs, Florida, May 11–

- 14, 2010.
- [2] Rossi B, Casotto B, Maitre A L, et al. Computing and optimizing the available linepack in gas network to address the issue of flexibility[C]. PSIG Annual Meeting, Santa Fe, New Mexico, May 15-18, 2012.
- [3] Rachford Jr H H, Carter R G, Dupont T F. Using optimization in transient gas transmission[C]. PSIG Annual Meeting, Gavelston, Texas, May 13-15, 2009.
- [4] Hoogwerf M, Hoeven T. Underground storage scheduler[C]. PSIG Annual Meeting, Savannah, Georgia, October 28-30, 2000.
- [5] 初飞雪, 吴长春. 输气管道优化运行的研究现状[J]. 油气储运, 2004, 23(11): 3-6.
Chu Feixue, Wu Changchun. Optimizing natural gas pipeline operation [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(11): 3-6.
- [6] 杨义, 郑宏伟. 中石油主干输气管网稳态优化运行研究[J]. 上海煤气, 2008(2): 10-14.
Yang Yi, Zheng Hongwei. Research on steady optimization operation of China Petroleum main gas transmission pipe network [J]. Shanghai Gas, 2008(2): 10-14.
- [7] Wright S, Ditzel C, Somani M. Compressor station optimization[C]. PSIG Annual Meeting, Denver Colorado, October 28-30, 1998.
- [8] 贺三, 邹永莉, 王欣. 天然气管道的运行优化[J]. 油气储运, 2009, 28(6): 1-7.
He San, Zou Yongli, Wang Xin. Operation optimization of natural gas pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(6): 1-7.
- [9] 初飞雪, 吴长春. 输气管道优化运行的研究现状[J]. 油气储运, 2004, 23(11): 3-6.
Chu Feixue, Wu Changchun. Research progress of operation optimization of natural gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2004, 23(11): 3-6.
- [10] 高松竹. 输气干线压缩机站运行优化研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2002.
Gao Songzhu. Operation optimization of compressor stations in gas transmission pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2002.
- [11] 赵小平, 万捷. 704泵站-独山子输气管道非稳态运行工况分析[J]. 油气田地面工程, 2009, 28(4): 10-12.
Zhao Xiaoping, Wan Jie. Analysis of transient operating conditions of the gas pipeline from #704 pump station to Du Shanzi[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2009, 28(4): 10-12.
- [12] 杨毅, 吕晓华. 输气管道的典型瞬态工况分析[J]. 集输工程, 2011, 31(7): 71-73.
Yang Yi, Lv Xiaohua. Analysis of typical transient conditions of the gas pipeline[J]. Gathering Engineering, 2011, 31(7): 71-73.
- [13] Wong P, Larson R. Optimization of natural-gas pipeline systems via dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1968, 13(5): 475-481.
- [14] Pietsch U, Rachford Jr H H, Carter R G. Investigating real-world applications of transient optimization[C]. PSIG Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, October 17-19, 2001.
- [15] Vostry Z, Zaworka J, Jenicek T. Optimum control of gas transport[C]. PSIG Annual Meeting, San Diego, California, October 13-14, 1994.
- [16] Sekirnjak E. Optimal control—a realistic goal for gas transmission[C]. PSIG Annual Meeting, Calgary, Ontario, Canada, October 24-26, 2007.
- [17] Larson R E, Wismer D A. Hierarchical control of transient flow in natural gas pipeline networks[J]. Society of Petroleum Engineers, 1971(1): 1-10.
- [18] Furey B P. A sequential quadratic programming-based algorithm for optimization of gas networks[J]. Automatica, 1993, 29(6): 1439-1450.
- [19] Rachford Jr H H, Carter R G. Optimizing pipeline control in transient gas flow[C]. PSIG Annual Meeting, Savannah, Georgia, October 28-30, 2000.
- [20] Carter R G, Rachford Jr H H. Optimizing line-pack management to hedge against future load uncertainty[C]. PSIG Annual Meeting, Bern, Switzerland, October 15-17, 2003.
- [21] Goldberg D E. Computer-aided gas pipeline operation using genetic algorithms and rule learning[D]. Michigan: The University of Michigan, 1983.
- [22] Goldberg D E. Computer-aided pipeline operation using genetic algorithms and rule learning. Part I: Genetic algorithms in pipeline optimization[J]. Engineering with Computers, 1987, 3(1): 35-45.
- [23] Mantri V B, Preston L B, Pringle C S. Transient optimization of a natural gas pipeline system[C]. PSIG Annual Meeting, Albuquerque, New Mexico, October 24-25, 1985.
- [24] Osiadacz A J. Dynamic optimization of high pressure gas networks using hierarchical systems theory[C]. PSIG Annual Meeting, San Diego, California, October 13-14, 1994.
- [25] Dupon T F, Rachford H H. Optimization of power using in transient gas transmission lines[C]. PSIG Annual Meeting, Tulsa, Oklahoma, October 22-23, 1987.
- [26] Kelling C, Reith K, Sekirnjak E. A practical approach to transient optimization for gas networks[C]. PSIG Annual Meeting, Savannah, Georgia, October 28-30, 2000.
- [27] Mahlke D, Martin A, Moritz S. A simulated annealing algorithm for transient optimization in gas networks[J]. Mathematical Methods of Operations Research, 2007, 66(1): 99-115.
- [28] Geißler B, Kolb O, Lang J, et al. Mixed integer linear models for the optimization of dynamical transport networks[J]. Mathematical Methods of Operations Research, 2011, 73(3): 339-362.
- [29] Möller M. Mixed integer models for the optimization of gas networks in the stationary case[D]. Darmstadt: Technical University Darmstadt, 2004.
- [30] Martin A, Möller M, Moritz S. Mixed integer models for the stationary case of gas network optimization[J]. Mathematical programming, 2006, 105(2-3): 563-582.
- [31] Moritz S. A mixed integer approach for the transient case of gas network optimization[D]. Darmstadt: Technical University Darmstadt, 2007.
- [32] Domschke P, Geißler B, Kolb O, et al. Combination of nonlinear and linear optimization of transient gas networks[J]. Informs Journal on Computing, 2011, 23(4): 605-617.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。