热油管道优化运行研究现状

杨兴兰[1], 张 鹏[1], 张志勇[2], 曾渊奇[3]

(1. 西南石油大学, 四川 成都 610500;
2. 中石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 842017; 3. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 400021)

摘 要: 我国长距离原油管道主要采用加热的输送方式, 消耗大量的燃料, 因此对热油管道进行优化运行是非常有必要的。论述了热油管道优化运行的国内外现状及建模所需要考虑的目标函数和约束条件, 讨论了几种常用的优化方法, 结合目前热油管道优化运行的发展趋势, 给出了具体的建议。

关键词: 热油管道; 运行优化; 模型

文章编号: 1006-5539(2009)02-0008-05 文献标识码: A

1 热油管道优化运行研究目的和意义

我国几大油田所产原油大多属易凝高粘型, 在常温下流动性差, 这一特点决定了我国目前陆上原油运输的主要方式就是加热输送[1~2]。在其输送过程中要消耗大量的电力和燃料, 其综合能耗在输油成本中占有很大比例, 因此对热油管道进行优化运行的一个重要目标就是节能降耗。例如, 1987 年美国的一家管线系统有限公司完成了输油管道系统优化可行性研究。优化研究的内容包括电量优化和电费优化。一个月的运行优化结果表明: 电量减小了 5%, 启停泵的数量减小, 泵变化的次数减少了约 40%, 稳定连续的运行过程使管线操作者更容易控制, 使运行费用减小了 12.4%。故研究降低能耗为目标的优化运行问题具有重要的实际意义[3], 体现在以下几方面:

1.1 节约能源

节约能源及提高经济效益是当前国家两项重要要求, 石油企业既是能源生产企业, 又是能源消耗大户, 仅输油的能源消费就占生产成本的相当大一部分, 能源消耗费用是企业生产成本中重要的可控部分, 降低单位产品的能源消耗量是企业能否有效控制生产成本的重要因素。能源的开发和合理利用是社会发展的源泉和战略依据, 标志和决定着一个国家的竞争实力和综合实力。

1.2 降低油品的生产成本

随着国内市场的不断规范以及同国际市场的逐步接轨, 石油企业在激烈的市场竞争中通过国家政策和地区保护而获得较好的经济效益的机会越来越少, 只有按照市场的需求对运行的管道进行优化, 降低产品的单位成本, 才能提高企业在市场经济中的竞争能力。

1.3 利于环境保护

大量燃料不能合理和有效的利用, 增加了污染物的排放, 加重了对环境的污染。对热油管道的优化运行不但达到了节能降耗的目的, 而且可以降低企业治理工业污染的费用, 对企业自身也有着直接的经济效益。

收稿日期: 2008-09-23

基金项目: 国家十一五科技支撑计划重点项目(2006BAJ16B03); 高等学校博士学科点专项科研基金(20060615003); 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金(PLN0113); 中国石油科技风险创新研究项目(050511—5—2)

作者简介: 杨兴兰(1983-), 女, 四川广安人, 2006 年毕业于西南石油大学油气储运工程专业, 现为西南石油大学油气储运工程硕士研究生, 主要从事输油管道优化运行和天然气管网优化运行研究。电话: 13458578178

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　国内外热油管道优化运行的研究现状

在热油管道运行优化技术方面, 国外研究较早, 相对水平较高。优化分析模型从最初的泵管解耦、单站计算逐渐发展到泵管耦合、逐站计算的全线系统模型, 分析结果则从初期的二阶段处理 (即先优化加热方案再据此经二次分析确定泵的运行方式) 发展到全线泵炉设备综合优化的最佳运行方案, 使研究更接近实际, 应用范围更广。

前苏联的契尔尼金在 20世纪 50年代最早提出热油管道最优工况的概念, 对于输送原油为牛顿液体, 采用开式流程及往复泵的热油管道, 用微分法导出了最优出站油温的关系。美国从 20世纪 60年代初开始将动态规划应用于等温密闭输油管道的站间压力分配, 后来又有人应用隐枚举法确定站内最优泵组合, 但在当时未见有关热油管道优化运行的文献。

1961年, Geffersoh[4] 就对热油管道的运行优化问题进行了探讨, 对于站间压头分配问题, 在文中假定输量一定, 根据各泵站所能提供的压力不同, 应用动态规划方法求解总压力在各泵站的合理分配, 这种方法所求出的能耗最低是应用在等温管线假定条件下的最优值。

1980年, Gopal[5] 等人提出了一个对管道泵站的运行最优化的方法。目标是根据每个动力机的燃料耗费率, 决定应开启哪些泵组, 在保证所需流量的前提下, 使总燃料的费用最少。用数学规划算法来选择最优的泵组搭配, 只需要对很少几种组合进行计算。此外, 还用动态规划的方法对出站压力进行最优化。这成为以后管道运行优化研究的基础。

1988年, 东德克萨斯成品油管道公司[6] 将电力优化软件应用到该管线的泵组合优化问题中, 共节省了 600万美元的电力费用。德国的 The Pichler Engineering GmbH, Munich (PE)[3] 公司开发出了一个优化原油和成品油管道运行的软件包 PACOS, 并已应用于欧洲许多大型管道, 譬如 AWP, NOW, MERO等等, 取得了较好的效果。计算机编程逐步与管道优化运行研究相结合, 为研究提供了更广大的平台。

1999年, 美国 CNGT[7] 输气公司在该公司某条管道上应用了优化运行技术, 选择动态闭环、实时优化技术使系统中的燃料耗费最少。初步实验表明, 优化运行技术可以使这条管道的运行能耗费用下降 10%左右。

2000年, Chi Ki Sun, V. Uraikul 和 C. W. Chan[8] 等人建立了一个综合的管线运行优化专家系统, 这个专家系统能够测出管道填充物的状态, 以便系统决定控制要求的大小, 还能求出相应的能耗要求, 在这两步的基础上, 通过一个模糊模型就可以定出究竟应开启哪些压缩机。最优化方法在管道运行优化研究中得到越来越广的运用。

以上是国外对热油管道优化运行的研究, 由于国外油品性质与国内存在较大差异, 其研究是把输油动力消耗为目标, 只适用于等温输送的输油管道。而我国的油品属于高凝、高粘、高含蜡的三高原油[9], 一般采用加热输送, 因此, 国外研究不适应于国内的情况。

国内最早见于 1985年严大凡、吴长春[10~12] 的研究论文。早期主要针对单一原油输送管道的加热输送工艺, 通常都是以输油成本为目标函数, 以输量和炉、泵的不同组合为变量。首次提出了热油管道稳态运行的统一模型——两级递阶模型[10], 并建立相应的算法, 全线各站最佳泵组合采用动态规划法求解, 输油温度的约束优化问题采用罚函数法将模型转化为无约束优化问题, 再用 POWELL方向加速法求解。建立了我国输油管道优化运行研究的基础。

1992年, 金岗、张心等[13] 对热油管道优化运行技术进行了探讨, 指出输油管道的能耗及运行费用除受油泵压力和油品温度变化影响外, 还必须考虑动力和热力设备在不同负荷下系统效率变化的影响。通过计算机系统的反馈验证, 找出了偏差并制定了能控制最小运行费用的新优化运行方案。

1993年, 重庆大学的王勇勤等[14] 将线性规划法用于油田输油泵站原油外输机组的优化运行, 减少了原油外输中油泵工况搭配和搭配机组运行时间的盲目性, 有利于优化运行。

1998年, 东北输油管理局[15] 对铁秦线输油管道优化运行进行了研究, 通过分析管道系统结构及稳态运行方案的逻辑结构, 认为可将该系统稳态工

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

况最优化问题分解为输油温度最优化和泵管匹配最优化两个可顺序求解的子问题，介绍了两个子问题的数学模型和算法，以及实际应用情况，该方法对其它大型工业系统的优化具有一定的启发性和参考价值。

1999年，清华大学的张信荣等[16]以东辛含硫管道为例，对孤岛原油和清河原油相混后的流变性进行了研究，提出了一种计算东辛管道输送混合原油粘度的新模型。模型中考虑了管道运行能耗费用和投资改造费用，实现了优化与改造方案相结合，该模型既可用于寻求最优运行参数又可指导最优改造方案。

2001年，魏安河等[17]以庆铁线新庙和牧羊泵站为例，提出通过运用降低进站温度的方法，对降低油电消耗总费用的可行性进行了具体分析，通过计算证明在保证低输量的安全运行的前提下，降低进站温度的方法对减少节流损失，降低输油成本是完全可行的。

2002年，孟振虎、陈毅忠、马平[18]应用非线性规划和逐站工艺计算，实施了全线运行方案的优化，计算结果表明，采用该方法可直接得到定输量下管道各站泵炉的运行方式、加热温度、出站压力的运行控制参数。

2003年，徐严波、赵金洲等[19]通过计算机编程运用MDCP法对各加热站的输油温度进行了优化计算。该计算方法具有速度快、准确度高的特点，在实际应用中得到了比较满意的效果。

2004年，严宏东、汪玉春[20]采用改进混沌综合法对所建模型进行优化求解。通过算例与其它优化算法（方案比较法、复合形法、改进混沌法）的对比表明，采用该算法可节省工程投资，降低设计成本，缩短设计时间。

2006年，吴明、王金华等[21]采用两层嵌套法来求解模型，并编制了相应软件，有利于加热原油的长距离优化输送决策。

综上所述，虽然我国在输油管道优化运行方面的研究起步较晚，但其进步很快，石油科技人员在不断的朝着这个方向努力，建立了许多数学经济模型，寻求最优运行参数和最优运行方案，为节能降耗做出了重大贡献。目前在这方面的研究还不是很完善，建立的模型都比较简单，求解的方法也不是很先进，仍有较大的研究空间。

3 热油管道优化运行问题的描述

热油管道优化运行的研究可分为两个步骤，一是建立数学模型，将实际工程最优化的问题用数学语言描述；二是对已建立的数学模型进行数学分析，选用合适的优化方法，编写计算程序，求出实际问题的解[22]。

热油管道优化运行，通常以“管线系统单位时间内的运行能耗费用最低”为目标函数，其中包括了单位时间内加热站（或热泵站）的燃料费用和泵站的动力费用[23~24]，通常根据所处的不同工况考虑的因素不一样而建立不同形式的目标函数。加热站的燃料费主要取决于各加热站（或热泵站）的进、出站温度。但由于受到油品过泵温升和节流温升存在的影响，燃料费实际上是各加热站（或热泵站）的出站油温与全线泵组合的函数。泵站的动力费用主要取决于全线的泵组合形式，而输油温度又会影响管线所输油品的物性，从而影响泵的特性，所以其费用不仅是与全线泵组合有关而且是与出站温度有关的函数[25]。约束条件由泵管匹配约束、泵站约束、热站约束、站间管段水力条件约束和热力条件约束组成。泵站约束包括泵站进站压力上、下限约束（进站压力下限、出站压力上限）、泵配电机额定功率、泵组合方式、站内流程等约束；热站约束包括进站温度下限、出站温度上限约束、加热炉负荷上、下限等约束；泵管匹配约束指全线泵组合与管路特性相匹配的约束。这是管道系统运行过程中的一个最重要的物理约束；站间管段水力条件约束必须满足站间管段高点的压力下限约束、站间管段低点的压力上限约束；热力条件约束必须满足出站温度上限和进站温度下限约束[26]。在瞬态条件下，只有计划期和总流量都是给定的，所以在进行非稳态优化运行时，管线的流量和运行方案都可随时间变化。

优化运行问题基本可以归结为：分析系统所处的工况，在保持管道原有结构和工艺的基础上，对其本身的生产要素（如设备组合、工艺流程、运行参数）进行最佳配置和协调。满足管道的全部约束条件的前提下，使其在单位时间内的能耗最低。并求出泵的最优组合方式和加热炉的最优出站温度，该

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

问题属于多变量的非线性规划问题[27]。

4　热油管道优化运行模型的求解方法

4.1　动态规划算法 (DP)

动态规划法是一个适用于多阶段决策的最优化方法, 通常能够获得全局最优解。由于动态规划是依次分段地选择一些决策来解决整个过程的最优化问题, 因此在求解油气管道优化运行问题上应用广泛。1992年, 蒲家宁[28]运用动态规划原理, 针对密闭输送工艺, 简明、扼要的阐述了长输管道优化运行的分析与计算方法。1998年, 吴长春等人[29]将输油单管的两级递阶优化模型推广到庆铁线的双管系统, 针对其双管系统优化的复杂性, 文中对处于主导层的输油温度优化模型采用坐标轮换法 (即多变量的黄金分割法)求解, 其泵管最优匹配模型采用动态规划法求解。但该方法的缺点是在变量数目较多的情况下, 会产生通常所谓的 "维数灾难 ", 使得问题的求解非常困难。

4.2　模拟退火法 (SA)

模拟退火算法 (simulated annealing algorithms, 简称 SA)的思想最早是由 Metropolis等在 1953年提出的, 1983年 Kirkpatrick等将其用于组合优化。SA算法是基于 Mente Carlo迭代求解策略的一种随机寻优算法, 其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性。模拟退火算法在某一初温下, 伴随温度参数的不断下降, 结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解, 即局部最优解能概率性地跳出并最终趋于全局最优解, 因此, 模拟退火算法是一种通用的优化算法。文献[30]采用了模拟退火方法求解原油长输管道的运行优化模型。实例计算结果表明, 模拟退火算法优化结果优于动态规划算法的优化结果, 运行方案能够节约 5.54%的运行费用。

4.3　非线性规划方法

2004年, 孟振虎[31]根据输油工艺实际, 提出了泵性能粘液影响修正系数动态查取及粘液性能曲线自动换算数解方法, 应用非线性规划方法, 实施了全线运行方案优化分析, 探讨了管壁结蜡及主要约束条件值变化对运行优化的影响。然而, 目前对于应用数学和计算数学应用分析都十分活跃的非线性规划领域, 由于管道的实际问题越来越复杂, 在众多的非线性规划算法中, 尚无一种象单纯形法那样行之有效的算法, 用以解决一切非线性规划问题。特别是对约束非线性混合离散变量优化问题的求解, 到目前为止尽管有很多针对具体问题的成功算法, 但是其通用性差、效率低、可靠性差。所以寻求高效、可靠、通用性好的约束非线性优化算法是管道运行优化研究的一个重要发展方向。

5　问题的存在及解决方法

对热油管道运行进行优化所得到的运行方案必须在实践中进行检验、应用并易于管理、实施。因此对构成管道系统的各个组成部分进行准确地模拟是非常有必要的, 并要求所建立的数学模型能够准确如实的反映各部分之间的物理函数关系。目前, 对热油管道进行优化运行的工艺计算和运行工况分析时, 通常将热力非稳态工况按稳态工况处理, 这使得计算结果与实际情况偏差很大, 不能客观的反映实际工况。当管网或管道在稳态或准稳态下运行时, 稳态优化是一个非常有效的手段, 它可以保证管道在给定流量下, 持续平稳地经济运行。然而, 在管道输量波动很大或者所受外界环境影响呈周期性变化时, 稳态优化就显得无能为力, 这就需要进行非稳态优化。事实上, 所有的管道系统都不可能完全在稳态条件下运行。因此, 将稳态优化和非稳态优化结合起来非常必要, 它对提高管道的运行管理水平和降低运行成本将会起到重要的作用[32]。

对于热油管道运行的优化, 不只局限于用数学方法来求解最优运行方案, 还可以从改进设备 (如提高动力、热力设备效率、泵调速等)、热处理、中外油混输、采用加剂降凝降粘等措施来达到降低能耗的目的。中宁 —银川输油管道[33]是我国第一条加降凝剂输送设计的管道, 夏季为常温输送, 春、秋及冬季为采用热处理加降凝剂综合处理输送, 解决了 2号阀室至银川管段压力波动问题, 有效地延长了清管周期。库鄯输油管道全长 476 km[34], 在库尔勒首站设一用一备两台主泵, 主泵耗电量占全线耗

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电量的 75%以上，主泵采用变频调速电机驱动，根据数量的变化可以采用相应的转速达到节约电能的目的。

在未来的几年里，我国输油管道建设将迎来大发展时期，无论在输油管道的设计，还是在建成后的运行维护过程中，都需要进行输油管道或管网优化运行方面的研究[35]。如果在设计阶段就将输油管道的节能降耗作为方案优化的重要手段，管道实现高效输油就能得到保证。

参考文献：

[1] 严大凡. 输油管道设计与管理[M]. 北京：石油工业出版社，1986. 55-82.

[2] 杨筱蘅，张国忠. 输油管道设计与管理[M]. 东营：石油大学出版社，1996.

[3] Linke A. Computer Aided Computer Minimization of Crude Oil and Product Pipeline Transport Costs[J]. Oil Gas European Magazine, 1996, 15(4): 56-58.

[4] Yong T R, Jefeerson J T. Shell Pipeline Calls It Dynamic Programming[J]. Oil & Gas Journal, 1961, 59(19): 8-12.

[5] Vijerden N G. Optimization Pipeline Operation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 32(11): 2063-2067.

[6] Kurak S K. Power Optimization Yields Savings for Products Pipeline[J]. Oil & Gas Journal, 1989, 87(26): 65-66.

[7] Ferber E P. CNGT Installs Fuel Minimization System to Reduce Operation Cost[J]. Pipeline & Gas Industry, 1999, 23(2): 97-102.

[8] Chi Ki Sun. An Integrated Expert System-Operation Research Approach For the Optimization of Natural Gas Pipeline Operations[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2000, 13(4): 109-115.

[9] 王建卫，周宇飞，王 斌. 辽河油区“三高”热油管道的优化运行[J]. 特种油藏，1994, 1(1): 52-56.

[10] 吴长春，严大凡. 热油管道稳态运行的两级递阶优化模型[J]. 石油学报，1989, 10(3): 109-115.

[11] 吴长春，严大凡. 热油管道运行管理最优化[J]，江汉石油学院学报，1992, 14(3): 83-88.

[12] 吴长春，严大凡. 热油管道优化运行软件包简介[J]，油气储运，1992, 11(2): 5-10.

[13] 金 岗，张 心，任继善. 热油管道优化运行技术的探讨[J]. 油气储运，1992, 11(3): 49-51.

[14] 王勇勤，杨明寿，段复友，等. 输油泵站并联泵运行的优化[J]. 油气储运，1993, 12(3): 16-19.

[15] 吴长春，邵国泰，赵忠泰. 庆铁线输油管道系统稳定工况的最优化[J]，油气储运，1998, 17(7): 4-8.

[16] 张信荣，李 才，苏忠勋，等. 油田老原油管道的节能技术[J]. 油气储运，1999, 18(9): 57-59.

[17] 魏安河，时建辰，刘巧云，等. 降低泵站油电消耗的可行性分析[J]. 油气储运，2001, 20(10): 49-50.

[18] 孟振虎，陈毅忠，马 平. 输油管道运行优化实用分析[J]. 油气储运，2002, 24(4): 9-13.

[19] 徐严波，徐严义，赵金洲. MDCP法在输油管道优化运行中的应用[J]. 油气储运，2002, 21(12): 19-22.

[20] 严宏东，汪玉春. 用改进混沌综合法实现热油管道的优化设计[J]. 油气储运，2005, 24(2): 15-19.

[21] 吴 明，王金华，刘建锋，等. 长输热油管道运行方案的优化[J]. 辽宁石油化工大学学报，2006, 26(1): 63-65.

[22] 吴长春. 热油管道的优化运行[J]. 石油规划设计，1994, 5(2): 48-49.

[23] 刘建锋，吴 明，邱姝娟，等. 低输量下含蜡热油管道的优化运行研究[J]. 辽宁石油化工大学学报，2005, 24(4): 39-41.

[24] 周诗岽，江国业，吴 明，等. 长吉输油管道优化运行研究[J]. 辽宁石油化工大学学报，2003, 23(2): 39-42.

[25] 任继善. 热油管道运行费用问题分析[J]. 油气储运，2003, 22(12): 31-33.

[26] 张增强，畅忠民. 秦京输油管道优化运行研究[J]，油气储运，1998, 17(10): 9-10.

[27] 孟振虎，陈毅忠. 输油管道运行优化目标函数的讨论[J]. 油气储运，2003, 22(3): 4-8.

[28] 蒲家宁. 长输管道运行优化的分析与计算[J]，油气储运，1992, 11(1): 25-30.

[29] 孙青峰，吴长春. 庆铁输油管道系统稳态优化运行分析[J]. 油气储运，2004, 23(6): 7-14.

[30] 宋红波，杨毅. 原油管道运行优化技术研究[J]，西南石油大学学报，2007, 29(增刊 1): 70-72.

[31] 孟振虎. 输油管道运行优化理论与方法的分析[J]. 天然气与石油，2004, 22(1): 18-22.

[32] 刘晓燕，刘 扬，孙建刚，等. 输油管道运行优化研究[J]，工程热物理学报，2004, 25(4): 558-561.

[33] 高新楼. 中宁—银川原油管道冬季运行工艺研究[J]. 石油规划，2006, 17(4): 29-32.

[34] 孙胜戈，唐 愚，姜永涛，等. 库鄯输油管运行方案的优化[J]. 油气储运，2004, 23(3): 13-14.

[35] 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.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net