

ENGINEERING ANALYSIS OF  
GAS TRANSPORTATION & DISTRIBUTION

燃气输配工程分析

严铭卿 等著

石油工业出版社

# 燃气输配工程分析

Engineering Analysis of Gas Transportation & Distribution

严铭卿 等著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是介绍有关燃气输配工程的基础技术理论以及分析计算方法的一本专著。内容包括：燃气负荷分析与预测；天然气长输管道流动分析、系统配置、管线设计与运行、调度的优化；天然气地下储气库模拟；燃气分配管网水力工况分析与模拟，管网结构分析，设计优化，分配管网供气可靠性，燃气系统运行调度分析，燃气系统安全风险评价，管网故障诊断；压缩天然气工程分析；吸附天然气工程分析；液化天然气输送、储存与冷能利用分析；液化石油气输送、储存与分配工程分析；燃气置换分析、燃气混合安全性等。

本书适用于天然气工业、石油化工、燃气工程等专业的科研人员、工程技术人员、管理人员及有关院校的教师、研究生和本科生阅读参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

燃气输配工程分析/严铭卿等著.  
北京：石油工业出版社，2007.8  
ISBN 978-7-5021-5904-7

- I. 燃…
- II. 严…
- III. 煤气输配
- IV. TU996.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 164116 号

### 燃气输配工程分析

严铭卿 等著

---

出版发行：石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址：www.petropub.cn

发行部：(010) 64210392

经 销：全国新华书店

印 刷：石油工业出版社印刷厂

---

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：35.5

字数：906 千字 印数：1—1500 册

---

定价：140.00 元

(如出现印装质量问题，我社发行部负责调换)

版权所有，翻印必究

# 前 言

燃气工业是能源工业的一个大门类。燃气工业包括燃气资源、燃气工程系统、燃气应用 3 个领域。当今，在我们特别注意天然气工业系统时，资源即指天然气资源；而天然气的应用则包括天然气发电，天然气的工业、商业、居民生活与采暖、制冷、车用燃料等应用，以及作为原料的天然气化工应用。

天然气工程系统由 3 个子系统构成：天然气开发、输送以及分配。天然气开发指的是气田（或油气田）天然气开采工程。输送与分配指的是长输管道或运输槽船、槽车、地下储气库工程以及城市分配管网工程。

我国的燃气工业正逐步进入以天然气为主导气源的新阶段。由于燃气工业的注意力转向了天然气工业，相应地关于燃气输配工程也是以天然气输配工程系统为中心。在这种工程技术背景下，本书叙述和讨论的范围包括一般的燃气输配工程技术系统，但核心内容将基于天然气输配工程技术系统。

燃气输配工程技术系统是多环节、多层次、多种物理和化学过程的物质和能量系统。同时它又是与其他技术和经济部门密切相关的国民经济系统的一个子系统。从更广的范围看，它处在社会大系统中并与之相互作用。所以燃气输配系统是一个复杂的、开放的系统；在其内部和内外因素间存在着各种近似线性或非线性的关系和作用。对其需要有全面而深入的研究以大力促进燃气输配学科的发展，从而更好地建设和运行燃气输配系统。

随着我国社会 and 经济发展，燃气工业特别是天然气工业开始了新的跨越进程。燃气输配工程技术各种内容的联系变得更为紧密，实际工作互相渗透融合。因此将输送与分配整合为一门工程技术进行研究与探索，也是十分自然的一种趋势。

作为一门应用技术，燃气输配工程分属于油气储运和城市基础设施学科；其工程与工艺的科学基础除了相关的工程力学、材料科学、热工仪表及自动控制科技外，主要是工程流体力学和热工学，以及数学分析、普通物理、普通化学等基础理论学科。

本书作者认为，对于一门工程技术学科，区别于关于工程技术的实际硬件设施的研究和开发，对其基础的、理论的分析 and 计算方法的研究可以用“工程分析”一词予以概括。因之对燃气输配工程相应地有“燃气输配工程分析”（译为 Engineering Analysis of Gas Transportation & Distribution），用它从燃气输配工程技术中划分出属于软学科的工程技术范畴，构成一种学科分支。其中关于输配管网系统的内容可分类为：

管网系统分析：水力分析（静态水力分析、动态模拟），配置与结构分析（结构分析、系统配置与管网优化、可靠性评价等）。

管网运行分析：调度与运行优化（实时调度分析、运行优化），管网安全性分析（安全风险评价、故障诊断）。

目前我们已经涉及的、对其展开了研究并取得不同程度成果的燃气输配工程分析的内容包括：燃气负荷分析与预测；天然气长输管道流动分析，末段储气分析，系统配置、管线设计与运行、调度及其优化，天然气地下储气库模拟；燃气管网水力工况分析与模拟，分配管网结构分析，设计优化，分配管网供气可靠性，燃气系统实时调度分析，燃气系统

安全风险评价, 管网故障诊断; 压缩天然气工程分析; 吸附天然气工程分析; 液化天然气输送、储存与冷能利用分析; 液化石油气输送、储存与分配分析; 燃气置换工程分析、燃气混合安全性等。

可以看到, 本书所涉及的关于燃气输配的各主题, 其中一部分在国外已经进行了研究工作, 有了较为成熟的研究成果, 国内在借鉴的基础上结合我国的实情和需要, 近年相继对其展开了探讨并有所建树; 另有相当一部分是从我国燃气工程建设实践中提出来, 自主研究并取得一定成果的。这些已经完成的工作初步形成了燃气输配学科的创新系统。可以说通过本书的集成与开拓, 体现了燃气输配学科的更新换代。

在本书整合的燃气输配工程分析的内容中, 综合运用了经典的、解析的与现代的、非解析的各种方法。对于研究对象, 有直接按物理原理推导出的数学表达式和方程, 并径直得出问题的解; 更多的则是采用建立数学模型的方法, 对系统的现象、状态、过程和变化进行描述和表达, 以及将连续的物理量在时间和空间上离散化, 从而得到关于数学模型的多元联立方程并用计算机求解。在这种分析研究对象—建立数学模型—数值求解的模式中, 运用传统的数学物理方程、概率论, 新兴的运筹学数学规划、现代优化方法, 网络图论原理等作为建模的架构; 过程中经常用到拟合、回归等数理统计方法; 同时积极运用模糊数学、灰色理论以及关于非线性系统的混沌理论等新的理论和方法来刻画状态、描述规律。从这一方面看, 本书的工作有助于全面赋予燃气输配学科领域以现代科技的内涵。

本书由国内燃气界多位著名专家和科技工作者共同撰写, 着重对燃气学科技术理论和输配工程基础前沿的课题内容进行了介绍; 普遍包括了作者们进行探索与研究的课题成果, 结合了实际工作的发挥与完善, 及对国内外相关进展的追踪。因此本书既具有一定的理论深度又富于实践素质。

本书共分 16 章。第 1 章对燃气负荷的定义、内容、性质、指标体系及燃气负荷模型作了完整论述, 从而建立了燃气负荷的基本系统。特别对中长期燃气负荷预测这一既是难点又最具实用意义的课题进行了讨论, 指出了我国正处在经济社会迅速发展阶段, 能源需求有显著的增长趋势, 进行中长期燃气负荷预测要注意到时间和地域背景, 并给出了分析实际数据的示例。

第 2、第 3、第 4 章内容是关于燃气管道的流动和输送。在第 2 章中全面地分析了管道中燃气流动稳定的、不稳定的, 等温的、不等温的流动过程, 并得出了相关的流动方程, 系统地介绍了解析的或数值的求解方法。对燃气在管道中流动的相关状态方程应用以及摩擦系数进行了分析。第 3 章中对长输管道和压气站的输气工艺、运行优化和模拟进行了范围广泛的讨论。第 4 章针对城市输送和分配管网展开内容, 给出了来自重要研究课题的成果实例。

对燃气输配管网各项系统结构内容的确定, 需要从基本是一种基于经验的工程活动提升到紧密依据科学原则和方法的水平上。为此需要对燃气管网, 特别是中、高压管网进行多角度、多层次的研究。第 5 章的内容从系统形态学角度首次提出了管网的结构学问题。从工程和技术实践中归纳出了管网的结构元素, 并进而分析、讨论了管网结构的内涵、各项结构元素对管网的技术合理性和经济性的作用、用以定量化评价管网优劣的指标系统, 以及列举了综合运用技术和方法。管网结构与管网优化内容密切相关, 关于管网优化, 国内相对有较多研究, 但缺乏实际的应用成果。本章在课题研究的基础上全面论述了优化的理论和方法, 为推动管网优化的实用性, 强调管网优化需与管网功能要求密切相结合,

提出了综合经济性与功能性的优化原理和方法。

对燃气管网配置与结构需有全景的分析和评价，它包括结构的合理性、经济的优化和功能的可靠性。燃气管网可靠性问题最有实用意义的是供气的可靠性，它是一种燃气管网性能的评价技术。作为其度量的供气可靠度是指管网具有的一定概率的供气能力。在第6章中系统推导了管网供气可靠度的计算公式，并将维修率因素考虑进来。除介绍基于故障时操作运行的减供量计算方法外，还提出了便于实用的基于水力分析的减供量计算方法。本章同时讲述了适于特定用户管网可靠性分析的 FTA 方法。

第7章讨论了燃气管网系统的供气调度问题，指出了由管网水力计算方法模拟管网运行工况进行供气调度存在多方面的问题。作者另辟蹊径，采用由运行数据回归得到的经验公式建立宏观模型，可有效地用于供气调度，并在本章给出了课题研究的实例。

第8章结合研究工作完成的课题成果，系统地介绍了燃气输配系统安全性风险评价的内容。从风险的危险源辨识、采用 FTA 分析系统的风险形成、模糊综合评价等各环节进行阐释，介绍了利于实用的、将关于基本事件的模糊性的估计转变为定量概率值的方法。

燃气管网故障诊断是燃气管网安全性范畴的一类前沿问题。对燃气管网系统来说，风险评价是事前的、预测性问题，故障诊断则是事后的、判别性问题。前者工作在于预估问题，采取对策，改善薄弱环节，消除隐患；后者工作在于及时发现、判别故障或失效，采取行动，排除故障，防止发生安全事故。对这一崭新问题，作者在第9章进行了启发性及系统的探讨，指出燃气管网故障诊断的特点、采用模式识别途径及可供应用的方法，以引导研究工作的开展。

第10、第11章的内容涵盖了液化石油气（LPG）工程的主要技术原理和方法。14个专题都来源于作者多年的工程实践和研究成果。这两章解决了 LPG 工程技术的主要难点问题，构成了 LPG 工程的技术理论基础。

第12章针对压缩天然气（CNG）供气形式的两个突出的工程实际问题，减压供气和储气分区进行了分析，推导出实用公式，并给出对技术参数的分析和技术问题的处理原则，这有助于使工程设计方法从经验提高到理论层次。此外，还专用一节详细讨论了天然气引射器及其工况的问题。

吸附天然气（ANG）迄今为止仍未获实际应用，但 ANG 是一种有发展前途的天然气储气方式和供气类型。第13章在综合国内外文献资料的基础上对这一新课题作了较全面和系统的论述，包括吸附原理、超级活性炭吸附质性质、吸附热效应、吸附模型和储气模型研究等，提出并讨论了吸附热力循环。

液化天然气（LNG）是一个大而复杂的技术和工程系统。本书的第14章在作者集研究和教学多年工作成果的基础上，对 LNG 工程分析的课题进行了全面且深入的论述。主要内容有关于压力、温度、物量、组分分析，紧急切断与安全装置的分析；气化工艺增压热力过程，绝热技术（材料、型式、结构）和漏热分析；复杂的储罐传热与流动分析（压力上升速率、无损储存时间、超压和安全排放），及涡旋分析（涡旋现象、模拟预测模型和涡旋防止技术）和冷能回收技术（冷能利用领域特别是冷能发电和空分利用、冷能利用的焓分析）等。

天然气工业的发展需要有大型天然气地下储气库设施对全系统的支撑。本书的作者们率先在国内展开了天然气地下储气库数值模拟研究。第15章分别讨论了枯竭气田、含水层以及盐穴三种型式的储气库。通过深入分析天然气和储气层基本性质以及储气层中流体渗



流或储气腔中热力过程进行建模；采用有限差或有限元数值方法解算，并就示例进行分析。具有内容全面，方法适用，技术深度和学术水平都达到可工程实用的层面。

第16章首先介绍燃气置换问题。伴随着燃气，特别是天然气在各种类型供气城市的应用，很有可能在系统方案阶段遇到这一问题，它最主要的技术因素是需按燃气互换性原则予以处理。本章对此进行了既有外延扩展又深入细致的论证和分析。燃气的爆炸危险性一直是燃气界关注的焦点，本章基于作者完成的研究成果，给出了燃气爆炸极限函数、燃气混合安全性动态分析方法，及可直接应用于实际问题论证的燃气混合安全性定律。这部分内容已在很多城市或煤矿区工程项目中及煤层气安全性分析中应用。

本书创作过程很好地体现了团结协作精神，本书的另7位作者（按姓氏笔画）是：

田贯三 博士，教授（山东建筑大学）

宓亢琪 教授（华中科技大学）

周伟国 博士，教授，博士生导师（同济大学）

展长虹 博士，副教授（东北林业大学）

顾安忠 教授，博士生导师（上海交通大学）

郭揆常 教授级高工（上海石油天然气有限公司）

谭羽非 博士，教授，博士生导师（哈尔滨工业大学）

本书章节的分工（按姓氏笔画）为：

田贯三：第4章，第7章，第2章2.4，2.5；严铭卿：第1章，第6章，第9章，第10章，第11章，第12章，第13章，第4章4.4，第5章5.1，5.2，5.3，5.6，第16章16.1，16.3；宓亢琪：第12章12.4，第16章16.2；周伟国：第2章，第8章，第5章5.3，5.4，5.5；顾安忠：第14章；展长虹：第15章15.3；郭揆常：第3章；谭羽非：第15章。

在第2、第3、第4章稿件中，3位作者对某些内容写作有重复，成书时统一进行了合并、取舍。主著者严铭卿拟出编写大纲并进行了全书的统稿工作。

著者们并不满足于已完成的工作。“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索”。我们希望今后能有更多的新内容对本书进行提高与充实，并欢迎来自各方的批评或建议。

在本书完成之际，我们要向众多的被本书参考与引用的文献和资料的原作者们表示由衷的感谢。特别要感谢多位曾协助本书工作的当时我们的学生：博士生何淑静、曹琳、黄志光、卜宪标，硕士生寇虎、周游。

博士生导师姜正侯教授，王昌道总工程师为本书向石油工业出版社作了热情的推荐。谨向他们表示诚挚的谢意。

本书作者严铭卿愿借本书出版的机会，向哈尔滨工业大学老师盛昌源、吴元炜致意。他们的学识、人品都是我学习的榜样；对给予过我的教诲和帮助，始终深怀感激之情。同时，我也要借本书表达我对已故的湖南长郡中学邹容宜老师，哈尔滨工业大学徐邦裕教授的深切怀念。

严铭卿

2006年6月

# 目 录

<b>第1章 城市燃气负荷</b> .....	(1)
1.1 概述 .....	(1)
1.1.1 燃气负荷的定义及应用 .....	(1)
1.1.2 燃气负荷的分类 .....	(2)
1.2 燃气负荷的工程指标系统 .....	(3)
1.2.1 用气量指标 .....	(3)
1.2.2 用气不均匀系数 .....	(4)
1.2.3 用气量高峰系数 .....	(7)
1.2.4 城市燃气输配系统小时计算流量 .....	(7)
1.2.5 最大日不均匀系数与日高峰系数的区别 .....	(8)
1.2.6 同时工作系数及支管计算流量 .....	(9)
1.2.7 储气系数 .....	(10)
1.3 燃气负荷指标的制订 .....	(11)
1.3.1 燃气用气定额及用气小时高峰系数 .....	(12)
1.3.2 同时工作系数 .....	(13)
1.4 燃气负荷用气工况 .....	(14)
1.4.1 用气工况的性质 .....	(14)
1.4.2 燃气负荷模型分类 .....	(15)
1.5 燃气负荷工况模型 .....	(16)
1.5.1 曲线拟合模型 .....	(16)
1.5.2 傅立叶级数模型 .....	(18)
1.5.3 回归模型 .....	(19)
1.5.4 弹性系数 .....	(22)
1.5.5 人工神经网络模型 .....	(23)
1.5.6 灰色预测模型 .....	(25)
1.5.7 指数平滑预测模型 .....	(29)
1.5.8 时间序列分析预测模型 .....	(30)
1.5.9 负荷模型的组合 .....	(34)
1.6 燃气负荷中、长期预测 .....	(36)
参考文献 .....	(38)
<b>第2章 管道中燃气的流动</b> .....	(40)
2.1 概述 .....	(40)
2.1.1 城市燃气输配管网系统的压力级制 .....	(40)
2.1.2 燃气管道内的流动状态 .....	(41)
2.2 管道中燃气流动基本方程 .....	(42)



2.3	燃气不稳定流动方程 .....	(46)
2.3.1	解析法 .....	(46)
2.3.2	数值法 .....	(48)
2.4	燃气非等温流动 .....	(50)
2.4.1	燃气非等温流动方程及其简化 .....	(50)
2.4.2	燃气非等温稳定流动 .....	(53)
2.4.3	燃气非等温不稳定流动 .....	(56)
2.5	常用状态方程 .....	(58)
2.5.1	对比态原理与通用压缩因子 .....	(59)
2.5.2	范德华方程 .....	(60)
2.5.3	BWR 方程 .....	(60)
2.5.4	BWRS 状态方程 .....	(61)
2.5.5	精度比较 .....	(62)
2.5.6	BWRS 方程的应用 .....	(63)
2.6	流动摩阻系数 .....	(66)
	参考文献 .....	(71)
<b>第3章</b>	<b>天然气长输管道工程分析 .....</b>	<b>(72)</b>
3.1	概述 .....	(72)
3.1.1	长距离管道输气系统 .....	(72)
3.1.2	长距离管输技术现状 .....	(73)
3.1.3	发展趋势 .....	(74)
3.2	输气管道的稳定流动分析 .....	(75)
3.2.1	稳定流动简化方程 .....	(75)
3.2.2	输气管道的水力计算 .....	(76)
3.2.3	输气管基本参数对流量的影响 .....	(78)
3.3	长输管道输气过程的模拟 .....	(80)
3.3.1	慢瞬变流的隐式中心有限差分法求解 .....	(82)
3.3.2	快瞬变流的显式特征差分法求解 .....	(84)
3.4	输气管道的增压输送 .....	(90)
3.4.1	压气站与管路的联合工作 .....	(90)
3.4.2	干线输气管的工况分析 .....	(92)
3.4.3	末段储气 .....	(93)
3.4.4	压气站布置 .....	(95)
3.4.5	工艺参数优化选择 .....	(97)
3.5	输气管道运行优化 .....	(100)
3.5.1	输气管道运行优化的特点及发展 .....	(100)
3.5.2	运行优化模型 .....	(102)
3.5.3	输气系统的动态模拟 .....	(105)

参考文献 .....	(106)
<b>第4章 燃气输配管网水力分析与动态模拟</b> .....	(107)
4.1 概述 .....	(107)
4.1.1 燃气管道分类 .....	(107)
4.1.2 燃气管网 .....	(108)
4.2 分配管网的水力分析基础 .....	(109)
4.2.1 燃气管网计算图论基础 .....	(110)
4.2.2 稳定流动方程 .....	(113)
4.3 城市燃气管网水力分析 .....	(114)
4.3.1 燃气管网水力分析数学模型 .....	(114)
4.3.2 燃气管网水力分析的3种解法 .....	(115)
4.3.3 各种算法的比较与评价 .....	(118)
4.4 燃气管网流量迭代节点法水力分析 .....	(119)
4.4.1 流动方程的简化形式 .....	(119)
4.4.2 节点方程及管网节点关联矩阵 .....	(119)
4.4.3 管网稳态分析方程 .....	(120)
4.4.4 节点法计算 .....	(121)
4.5 燃气输配管网不稳定流动模拟的解析解法 .....	(124)
4.5.1 输配管网数学模型的修正与简化 .....	(124)
4.5.2 输配管网不稳定流动数学模型求解 .....	(127)
4.5.3 城市高压输气管道不稳定流的计算 .....	(133)
4.6 燃气输配管网不稳定流动模拟的数值解法 .....	(137)
4.6.1 不稳定流动模拟的有限差分格式 .....	(137)
4.6.2 不稳定流动模拟的差分方程求解 .....	(140)
4.6.3 实例运用 .....	(143)
4.7 城市天然气输气管道稳定流动 .....	(147)
参考文献 .....	(148)
<b>第5章 燃气输配管网结构分析与优化</b> .....	(150)
5.1 概述 .....	(150)
5.2 燃气输配管网的结构分析 .....	(150)
5.2.1 燃气管网结构与结构分析 .....	(150)
5.2.2 管网的结构因素 .....	(151)
5.2.3 管网结构特性指标 .....	(158)
5.2.4 管网结构分析技术 .....	(160)
5.3 城市燃气管网优化设计 .....	(161)
5.3.1 城市天然气输配管网优化模型 .....	(162)
5.3.2 城市燃气管网成本函数 .....	(164)
5.3.3 城市燃气管网优化计算方法 .....	(165)
5.4 拉格朗日乘数法管网优化的计算 .....	(170)
5.5 遗传算法管网设计优化 .....	(172)

5.5.1	遗传优化算法的基本原理 .....	(172)
5.5.2	遗传优化算法燃气管网优化应用 .....	(177)
5.6	燃气管网综合优化原理 .....	(179)
5.6.1	准边值管网 .....	(180)
5.6.2	管网压力储备与综合优化原理 .....	(181)
5.6.3	燃气管网综合优化模型 .....	(183)
5.6.4	小结 .....	(185)
	参考文献 .....	(185)
<b>第6章</b>	<b>燃气输配管网系统可靠性评价</b> .....	(187)
6.1	概述 .....	(187)
6.2	可靠性的度量指标及分布函数 .....	(187)
6.2.1	可靠性基本函数 .....	(187)
6.2.2	故障率分布函数 .....	(188)
6.2.3	维修性 .....	(189)
6.2.4	系统的可靠性 .....	(190)
6.2.5	系统的状态转移 .....	(191)
6.3	燃气管网系统的供气可靠性 .....	(194)
6.3.1	管网供气可靠度 .....	(194)
6.3.2	燃气管网供气可靠度算例 .....	(196)
6.4	燃气管网可靠性故障树分析 .....	(199)
6.4.1	燃气管网故障树 .....	(199)
6.4.2	故障树数学模型 .....	(202)
	参考文献 .....	(206)
<b>第7章</b>	<b>燃气输配管网运行调度宏观模型</b> .....	(207)
7.1	概述 .....	(207)
7.2	管网水力计算确定供气调度方案的弊端 .....	(207)
7.3	管网运行工况宏观模型 .....	(208)
7.3.1	无运行信息的宏观模型 .....	(208)
7.3.2	有运行信息的宏观模型 .....	(209)
7.4	建模原始数据与应用要点 .....	(209)
7.5	模型应用特性与应用范围 .....	(210)
7.6	模型的应用示例 .....	(211)
7.7	模型的应用说明 .....	(214)
	参考文献 .....	(215)
<b>第8章</b>	<b>城市燃气输配系统风险评价</b> .....	(216)
8.1	概述 .....	(216)
8.2	燃气输配系统危险源辨识 .....	(221)
8.3	故障树分析 (FTA) 模型 .....	(223)
8.3.1	故障树的分析流程 .....	(224)
8.3.2	故障树分析的基本名词和符号 .....	(225)

8.3.3	故障树的最小割集及其算法	(227)
8.3.4	底事件概率确定方法	(231)
8.4	模糊数学及模糊综合评价方法	(232)
8.4.1	模糊数学	(232)
8.4.2	模糊综合评价	(236)
8.4.3	利用模糊数学方法确定故障树底事件的发生概率	(239)
	参考文献	(244)
<b>第9章</b>	<b>燃气输配管网故障诊断</b>	(245)
9.1	概述	(245)
9.2	燃气管网故障诊断特征空间	(246)
9.2.1	模式识别的基本方法	(246)
9.2.2	燃气管网节点压力特征空间	(247)
9.3	燃气管网故障诊断的模式识别方法	(248)
9.3.1	位势函数法	(248)
9.3.2	正态模式参数判别法	(249)
9.3.3	特征提取与选择	(251)
9.4	燃气管网的现场泄漏检测	(252)
	参考文献	(255)
<b>第10章</b>	<b>液化石油气输送与储存工程分析</b>	(256)
10.1	概述	(256)
10.2	LPG 管道输送	(258)
10.2.1	管道输送系统年费用的计算	(258)
10.2.2	经济流速	(260)
10.2.3	管道输送的经济规模	(262)
10.2.4	小结	(264)
10.3	LPG 贮罐储存压力与设计压力	(264)
10.3.1	LPG 贮罐储存压力问题	(264)
10.3.2	合理确定 LPG 贮罐设计压力的意义	(265)
10.3.3	国内外对 LPG 贮罐设计压力的规定及应用情况	(267)
10.3.4	LPG 贮罐设计压力问题的基本内容、实质	(270)
10.3.5	确定 LPG 贮罐设计压力的途径	(271)
10.3.6	LPG 球罐贮存压力计算模型及数值解	(273)
10.3.7	研究实例	(278)
10.4	LPG 冷冻贮存参数的优化	(280)
10.4.1	冷冻贮存的设计问题	(281)
10.4.2	冷冻降压贮存的参数优化	(282)
10.4.3	冷冻常压贮存的参数优化	(292)
10.4.4	算例	(294)
10.5	LPG 卸车公式	(294)
10.5.1	LPG 卸车系统	(294)

10.5.2	LPG 卸车公式推导 .....	(295)
10.5.3	卸车公式的应用 .....	(302)
10.6	LPG 容器过量灌装危险分析 .....	(307)
10.6.1	LPG 容器过量灌装危险 .....	(307)
10.6.2	LPG 容器全充满温胀破裂的解析模型 .....	(307)
10.6.3	算例及小结 .....	(310)
10.7	LPG 管道安全阀的设计参数 .....	(311)
10.7.1	LPG 液相管道安全问题 .....	(311)
10.7.2	管道安全阀工作过程分析 .....	(311)
10.7.3	管道安全阀结构参数的设计控制与配置通用公式 .....	(314)
10.7.4	小结 .....	(315)
10.8	叶片泵工艺分析 .....	(316)
10.8.1	叶片泵工作原理与性能特点 .....	(316)
10.8.2	叶片泵的流量 .....	(317)
10.8.3	双作用叶片泵的定子曲线 .....	(318)
	参考文献 .....	(321)
<b>第11章</b>	<b>液化石油气分配与供应工程分析 .....</b>	<b>(323)</b>
11.1	概述 .....	(323)
11.1.1	气瓶供气量问题 .....	(323)
11.1.2	液化石油气贮罐天然气化分析 .....	(323)
11.1.3	液化石油气露点直接计算公式 .....	(324)
11.1.4	管道供气防凝结问题(防再液化) .....	(324)
11.1.5	气化器负荷模型及热力计算问题 .....	(324)
11.1.6	引射混合器性能与设计 .....	(325)
11.1.7	供气系统的压力缓冲问题 .....	(325)
11.2	LPG 气瓶组供气非稳态分析 .....	(325)
11.2.1	气瓶天然气化供气及气瓶工作基本方程 .....	(325)
11.2.2	气瓶定用气量供气 .....	(327)
11.2.3	气瓶工作的约束条件 .....	(330)
11.2.4	气瓶变用气量供气 .....	(330)
11.3	LPG 贮罐天然气化供气 .....	(334)
11.3.1	卧式贮罐液相工作容积 .....	(334)
11.3.2	卧式贮罐天然气化液相温度方程 .....	(335)
11.4	LPG 露点的直接计算 .....	(336)
11.4.1	拟合 LPG 的饱和蒸气压与温度的关系 .....	(336)
11.4.2	露点直接计算公式 .....	(338)
11.5	LPG 管道供气无凝动态分析 .....	(340)
11.5.1	LPG 管道供气无凝动态分析的必要性 .....	(340)
11.5.2	气态 LPG 压力、温度沿管道的变化 .....	(340)
11.5.3	气态 LPG 管道供气无凝动态分析 .....	(342)

11.5.4	管道的停气凝结 .....	(343)
11.6	LPG 气化器气化模型及热负荷计算 .....	(345)
11.6.1	气化器的应用及存在问题 .....	(345)
11.6.2	LPG 气化模型 .....	(345)
11.6.3	气化器的热负荷计算 .....	(348)
11.6.4	气化器的热负荷计算实例 .....	(350)
11.6.5	小结 .....	(352)
11.7	燃气引射混合器 .....	(353)
11.7.1	燃气引射混合器的新研究 .....	(353)
11.7.2	混合器自由射流模型与结构参数 .....	(353)
11.7.3	燃气引射混合器的基本方程 .....	(356)
11.7.4	燃气引射混合器的供气压力极限与焓效率 .....	(357)
11.7.5	计算式的推导 .....	(358)
11.7.6	小结 .....	(361)
11.8	混气系统供气量调节与储气罐容量分析 .....	(361)
11.8.1	混气系统供气量的调节 .....	(361)
11.8.2	储气罐的工况分析 .....	(362)
11.8.3	混气系统储气罐容量 .....	(364)
	参考文献 .....	(366)
<b>第12章</b>	<b>压缩天然气系统工程分析 .....</b>	<b>(368)</b>
12.1	概述 .....	(368)
12.2	压缩天然气供气调压 .....	(368)
12.2.1	压缩天然气供气调压工艺 .....	(368)
12.2.2	焦耳—汤姆逊效应 .....	(369)
12.2.3	供气调压设备的状态参数 .....	(372)
12.3	压缩天然气储气分区 .....	(375)
12.3.1	压缩天然气储气分区工艺 .....	(375)
12.3.2	储气分区方程组 .....	(376)
12.3.3	储气分区的参数和性质 .....	(378)
12.3.4	设计实用方法 .....	(380)
12.4	天然气引射器特性方程与工况 .....	(380)
12.4.1	特性方程式与最佳结构参数 .....	(380)
12.4.2	运行工况分析 .....	(383)
12.4.3	小结 .....	(386)
	参考文献 .....	(386)
<b>第13章</b>	<b>吸附天然气工程分析 .....</b>	<b>(388)</b>
13.1	概述 .....	(388)
13.2	ANG 吸附剂 .....	(389)
13.2.1	超级活性炭的制备 .....	(389)
13.2.2	超级活性炭的微孔容积 .....	(390)

13.2.3	吸附作用与吸附理论 .....	(391)
13.3	ANG 吸附过程及热效应 .....	(393)
13.3.1	van't Hoff 方程 .....	(393)
13.3.2	吸附与解吸热力学循环 .....	(394)
13.4	ANG 吸附模型 .....	(396)
13.4.1	SLD 高压吸附模型 .....	(397)
13.4.2	超临界吸附模型 .....	(399)
13.4.3	基于 N <sub>2</sub> 吸附的确定 PSD 的 HK 模型 .....	(403)
13.5	ANG 储气模型 .....	(405)
13.5.1	Vasiliev 模型 .....	(405)
13.5.2	Chang-Talu 模型 .....	(408)
13.6	克劳修斯-克拉伯龙热力图与吸附热力循环 .....	(410)
	参考文献 .....	(412)
<b>第14章</b>	<b>液化天然气系统工程分析 .....</b>	<b>(413)</b>
14.1	概述 .....	(413)
14.1.1	LNG 的生产、输送与应用 .....	(413)
14.1.2	LNG 接收站的工艺系统 .....	(414)
14.2	LNG 储运工艺分析 .....	(416)
14.2.1	LNG 计量 .....	(416)
14.2.2	LNG 的气化 .....	(420)
14.2.3	LNG 自增压供气 .....	(421)
14.3	LNG 储运的传热与流动分析 .....	(427)
14.3.1	绝热技术 .....	(427)
14.3.2	LNG 储罐传热与流动分析 .....	(432)
14.4	LNG 储罐涡旋分析 .....	(437)
14.4.1	LNG 储罐的分层与涡旋 .....	(437)
14.4.2	分层与涡旋的预测模型 .....	(440)
14.4.3	防止涡旋的措施 .....	(449)
14.5	LNG 冷能回收分析 .....	(450)
14.5.1	冷能回收意义 .....	(450)
14.5.2	冷能利用原理与有用能分析 .....	(451)
14.5.3	LNG 冷能的利用 .....	(455)
14.5.4	LNG 冷能发电 .....	(456)
14.5.5	LNG 冷能用于空气分离装置 .....	(459)
14.5.6	冷能利用技术经济简析 .....	(461)
	参考文献 .....	(462)
<b>第15章</b>	<b>天然气地下储气库数值模拟 .....</b>	<b>(465)</b>
15.1	概述 .....	(465)
15.1.1	天然气地下储气库类型与特性 .....	(465)
15.1.2	天然气地下储气库数值模拟进展 .....	(467)



15.2	枯竭气藏天然气地下储气库数值模拟	(469)
15.2.1	枯竭气藏储气库物理描述	(470)
15.2.2	枯竭气藏储气库数学模型	(470)
15.2.3	模型有限差分法求解	(473)
15.3	含水层天然气地下储气库数值模拟	(474)
15.3.1	含水层特性	(475)
15.3.2	含水层储气库数学模型	(479)
15.3.3	模型有限元法求解	(486)
15.3.4	模型应用——单井注采模拟	(494)
15.4	盐穴天然气地下储气库数值模拟	(512)
15.4.1	盐穴地下储气库物理描述	(512)
15.4.2	盐穴储气库数学模型	(513)
15.4.3	模型数值法求解	(520)
	参考文献	(525)
<b>第16章</b>	<b>燃气置换与混合</b>	<b>(529)</b>
16.1	概述	(529)
16.2	配制天然气置换气	(529)
16.2.1	燃气互换性与判定	(529)
16.2.2	天然气置换气的配制	(533)
16.2.3	配制气燃烧稳定性的判定	(537)
16.2.4	小结	(538)
16.3	燃气混合安全性	(538)
16.3.1	燃气爆炸极限	(538)
16.3.2	混合型燃气爆炸上限的直接计算公式	(540)
16.3.3	混合燃气的爆炸上限函数	(540)
16.3.4	燃气混合安全性定律	(542)
16.3.5	燃气混合安全性分析实例	(545)
	参考文献	(551)

# 第 1 章 城市燃气负荷

## 1.1 概 述

### 1.1.1 燃气负荷的定义及应用

负荷是一个含义很广泛的概念。燃气系统终端用户对燃气的需用气量形成燃气系统最基本的负荷，即燃气用气负荷，简称燃气负荷。传统采用燃气需用量术语。用户对燃气的需用不只是一个在一定时段内的某一用气数量，而且具有随时间变化的形态。从燃气工程技术系统角度，可以将终端用户对燃气一个时段内的需用量以及用气量随时间的变化统称为燃气负荷。

按生产和生活需用燃气用途的不同，可将燃气负荷区分为狭义的城市燃气负荷；广义的城市燃气负荷和系统燃气负荷。

狭义的城市燃气负荷概念包括居民生活用气量、商业用气量、工业用气量、采暖和空调用气量、燃气汽车用气量以及其他用气量。广义的城市燃气负荷概念，除了上述以外，还包括集中发电动力用气量。将广义城市燃气负荷加上作为原料的化工用气量则构成系统燃气负荷（或燃气系统负荷）。可见一定的燃气负荷概念相对应于一定的燃气系统的作用范围。不同的燃气负荷对燃气的质量和物理参数会有不同的要求，但本章对燃气负荷的讨论只限定在燃气负荷的数量方面。

此外，在讨论燃气负荷时，一般并不需要对燃气负荷的范围进行区分，都可以统称为燃气负荷。本章某些部分内容主要阐述具有显著变化形态的（狭义的）城市燃气负荷，即一般所指的城市燃气负荷，另一些部分则涉及系统燃气负荷。

随着社会和经济环境的变化，燃气负荷会随时间推移而改变。在我国城市（镇）燃气正在向以天然气气源为主导方面转变，这就促使我国燃气系统的规模变大，并在相当长的一段时间内保持增长趋势。燃气在全国范围内的应用更加普及，相应地引起城市能源结构和燃气用户结构发生变化。在城市能源结构方面，天然气的供应会推动煤、电、气等能源供应的增加和互相替代。燃气会尽可能地替代煤，部分地替代油用于车辆燃料，也可能用于发电的同时，部分地又被电能所取代。在用户结构方面，城市燃气由原来以居民生活用气为主，变为以工业、采暖、空调、汽车用气以及发电动力用气为主。国民经济中第三产业比重的增加，导致了燃气用户结构发生变化。城市居民生活方式发生变化，生活水平提高，社会化程度增加，热水用量增加，外购成品食品比例加大和更多地出外餐饮、娱乐和旅游等都会影响到燃气需用情况的改变。

在任何工程技术中，负荷值都是基础的数据，燃气负荷也不例外。在燃气系统中，燃气负荷数据对项目规划、工程设计中设施和设备容量的确定、运行与调度以及工程技术分析都具有根本性意义。

最常用的燃气负荷数据是其在一定时段中的燃气总量、幅值和时间序列的变化。在城市（镇）燃气规划、设计中，需要年需用气量的基础数据，以便与可供燃气资源协调，确定系统的配置规模、计算项目的经济性和建设所需资金。