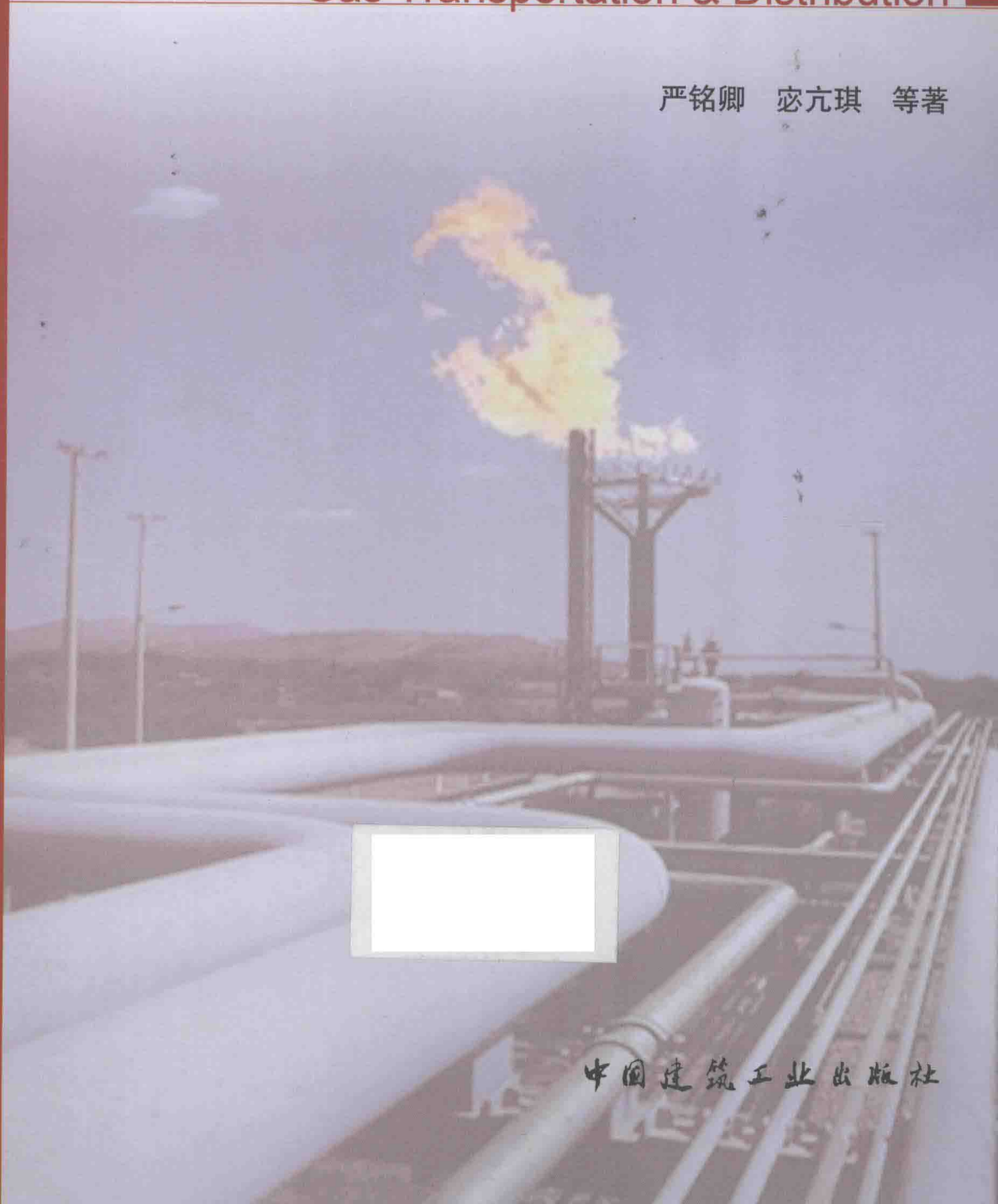


# 燃气输配工程学

Gas Transportation & Distribution

严铭卿 宓亢琪 等著



中国建筑工业出版社

# 燃气输配工程学

**Gas Transportation & Distribution**

严铭卿 宓亢琪 等著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

燃气输配工程学/严铭卿, 宓亢琪等著.

—北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-112-16610-7

I. ①燃… II. ①严… ②宓… III. ①煤气输配 IV. ①TU996. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 055052 号

本书内容包括燃气输配系统的工艺原理、系统构成、主要设备、材料及其工程与设计方法、安全管理模式等; 含有城镇燃气、燃气的物理和热力性质、燃气负荷、储存、输配、燃气管网水力计算和分析等章节; 还含有燃气管网优化与可靠性、燃气泄漏与燃气安全性评价、燃气输配测控与信息系统、燃气规划与工程文件等章节; 另设立压缩天然气、液化天然气、液化石油气章节; 特设输气管道一章, 将长输管道纳入燃气输配专业范围。

本书力求有所创新, 给出了一系列属于原创性的、适用于本专业的概念、定律、定理、计算公式、数学模型和分析方法。

本书定位于燃气输配工程学高级教程和专著。读者对象为城镇燃气、石油与天然气领域的高校本科生、研究生、科研设计工程技术人员、项目规划与技术管理人员。

责任编辑: 胡明安

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 刘 钰

## 燃气输配工程学

## Gas Transportation & Distribution

严铭卿 宓亢琪 等著

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京楠竹文化发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 55 字数: 1370 千字

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月第一次印刷

定价: 150.00 元

ISBN 978-7-112-16610-7

(25434)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

我国高等学校设立燃气工程专业或专业方向已超过 50 年，伴随着国家燃气事业的发展变化，开设燃气专业或方向的学校由 20 世纪 50 年代的几所，增加至今天的 30 余所，迄今为止已经培养了近万名包括博士生、硕士生在内的毕业生。但是，与国家的经济社会发展，特别是改革开放以来的连续翻番发展不相适应，与国家能源供需规模、石油天然气工业的迅猛增长不相匹配；燃气专业人才培养规模和包括教材在内的专业体系建设都极大地落后于需要。这是启动本书工作的背景。

本书的撰写，不能脱离对已有燃气输配工程经验和科技成果的继承，也需要对国外进展和邻近专业的借鉴。它们构成了本书内容的一个基本面。同时，本书尽可能充实新内容，进行深入讲解，探索扩展专业范围。从而努力实现一种创作。

马克思说，一门科学，只有成功地应用数学时，才算真正发展了。对燃气输配工程学科同样可以认为，需要努力运用数学工具，尽可能将专业从工程和工艺技术经验层面提升其理论高度，然后得以运用获得的规律性，解释客观存在、预测新的事实和指导新的实践。本书将反映作者对这一方式的努力追求。

本书完全不同于已在国内延续使用的教材。不局限于从用气定额、不均匀系数等简单数据规定到日调峰储量计算，从城镇管网压力分类、布置原则、管网设计参数到定常流动管网手工水力平差，从管网敷设知识到关于管网工程的简单经济比较等十分限定且较为初等的內容。本书对上述每一部分都作了内容扩展、理论深化和系统重构，形成了城镇燃气、燃气的物理和热力性质、燃气负荷、燃气储存、燃气输配、燃气管网水力计算和分析等章节。新辟了燃气管网优化与可靠性、燃气泄漏与燃气安全性评价、燃气输配测控与调度管理、燃气规划与工程文件等章节。分别就压缩天然气、液化天然气、液化石油气设立章节。特别单设输气管道一章，将长输管道纳入燃气输配专业范围。

本书力求有所创新，尽力充实内容，反映专业的新技术、新工艺和新的工程发展方向；深入探讨专业技术的本质联系和内部规律。它们体现在本书给出了一系列属于原创性的、适用于本专业的概念、定律、定理、计算公式、数学模型和分析方法。

这些表明，我们正在致力于提高专业的科学水平，以重构燃气专业学科体系。为高校本科生提供一本可用于充实提高的教材，为研究生提供一本新学习阶段的基础教程，为科研设计人员提供一本更新知识、夯实基础、扩展视野的有益参考的著作。

下面分别就各章作提要的介绍。

第 1 章，对燃气的多种气源类型进行概括的列举，并对每种气源着重指出其特性。各种燃气是燃气输配的处置对象，了解其特性是非常必要的。在本章特别简述了新涌现的页岩气、煤层气内容。通过对其认知，能够感受到燃气专业有着持续发展的广阔前景。

第 2 章，对燃气物性内容除全面依次讲解各物性参数外，特别增加了对状态方程的深入一步的知识。概述了对应态原理，以了解表明分子作用层次的参数如偏心因子等与宏观

物性如压力、比容、黏度等的关系，以及有助于对物性预测和状态方程式的实质的解读。本章除包含传统经典的内容外，还引入了新的进展，例如关于黏度的新预测方法，经过实践应用的燃气混合安全性定律，工程适用的液化石油气露点直接计算公式等。

第3章，关于燃气负荷，除传统的关于定额和不均匀系数等定义和表达式外，增加了燃气用气负荷参数和指标的意义、性质、分类以及制定方法等深入的内容，其中，着重阐述了燃气负荷模型分类的实质。反映燃气工程技术发展的需要，用一定篇幅讲解了燃气用气负荷预测的内容。特别讨论了具有重要意义的燃气用气负荷中长期预测方法。从而构筑了燃气用气负荷的知识系统。这也是燃气输配工程技术提升科技内涵的标志性的一个方面。

燃气用气负荷预测应用了数理统计和预测学丰富的内容，本章并未将它们加以全面引述，而是着重指出针对燃气输配工程应用实际的概念、原理和方法要点。例如，关于制定用气定额、小时计算流量的数理统计方法，多项式拟合模型，建立燃气负荷变化函数的傅里叶级数逼近方法，负荷的回归分析方法等内容的有针对性的处理。

第4章，考虑到燃气专业读者在天然气为主导气源的工程环境下，必须对输气管道有全面的、基本的了解，在工作有所涉及的情况下能很快展开。本章篇幅主要参考现有天然气输气管道书籍，对内容进行提炼和整理综合。重点讲述了天然气输气管道工艺设计，输气管道设计参数的优化模型。特别较详细介绍了关于压气站和透平式压缩机特性和调节方法，压气站和管道联合工作的分析以及压气站运行优化等内容。对其核心内容输气管道不定常流动分析，将在第7章讲解。

第5章，关于燃气储存，传统书籍限于讲述各种燃气储罐方面的知识。本书对内容进行了全新扩展和深化。首先提出从储存功能和目的的不同对储存进行分类，梳理了储存的工程概念；宏观论述了国家天然气储备和关于三级储存的储存系统结构，向读者展示关于燃气储存问题更广的视野。然后分类讲述各种储存方式。作者在1996年提出地下储气库的数值模拟课题并相继合作指导博士研究生完成枯竭油气田、含水层、盐穴三种类型地下储气库的数值模拟学位论文，从而将燃气输配专业研究拓展到新的领域。本章就三种储气库类型分别详细推导了解析解法、扼要介绍了有限元法，以及建立了洞穴型地下储气库热力分析基本模型和求解的有限差分法。以此通过对孔隙地层型和洞穴型地下储气库的渗流或热力学原理的表述，以期读者对这一类工程设施本质有较深入的了解。

第6章，本章与第4章、第5章同是本书的基本章节。在本章首先重点分析讲解了城镇燃气管网系统的压力分级问题。这表明本书作者不限于一般地叙述压力级制规定，而是从设施的全系统层面，将其作为根本技术决策问题阐述其实质。

本章全面地讲述了各级管网的结构，门站、调压站工艺，调压计量设备，管道布置，阀门配置，管道材质，阀门类型，管道防腐层和阴极保护以及城镇区域管道工程。对于新出现的质量流量计原理，较详细地作了介绍。

同时，介绍了具有合理性且便于实用的借助回归分析方法建立的城镇燃气管网运行调度模型；特别分析了天然气的压力能，列出其表达式并简要介绍其利用方向。

在管网的结构中，阀门配置十分重要，关系到安全性和经济性。不论中外，阀门配置设计一直是经验性的。本章讲解了关于阀门配置的全新内容，既有对工程实际的指导意义，也表明对长期依赖于经验的问题，需要并可以上升到理论层面加以解决。其结果也有

利于相关工程科技问题的分析研究。

第7章,管道中燃气流动和燃气管网水力分析是本学科的核心内容之一。有鉴于此,本章内容从管道中燃气流动运动方程、连续性方程及状态方程开始,从源头起步推导了管道中燃气流动基本方程(偏微分方程)及其实用简化公式。还从源头推导了定常流动高中压管道、低压管道实用公式以及输气管道设计计算公式。详细讲解了按定常流动考虑的城镇燃气管网水力计算方法和设计参数问题。讲授了不定常流动基本方程的解析法和数值法的基本原理和求解步骤;并且超越传统的方式,细致讲解了燃气流动问题的定解条件类型及定解条件的具体形式。分别通过4类典型高中压管道不定常流动问题,完整且清晰地讲解原理及解题过程,并结合算例以帮助理解。包括:燃气输气管道末段实际边界条件问题的基于分离变量法的特征函数展开法;结合管道放散问题的拉氏积分变换法;有分气、变管径枝状管道的克兰克-尼尔松格式有限差方法以及适于一般管道计算的特征线法。

最后,完整讲解了考虑温度变化的以方程组形式给出的定常流动方程组龙格-库达法,枝状管道不定常流动方程的有限差分方程组牛顿迭代法等经典解法。通过掌握本章全面而系统的内容,作者希望燃气输配专业的读者能打下关于燃气管道流动问题的坚实理论基础,并掌握计算原理和实用方法。

第8章,讲授关于燃气工程分析的两项内容:燃气管网优化和燃气管网供气可靠性。与各种流体网络一样,燃气管网的各构成管段通过配置互相联系在一起,即管段的流量及压降都是互相联系在一起的,亦即管网水力工况的全局性。对于燃气管网优化的研究一般是在优化方法上的探讨和应用。本章介绍了分属两类的典型方法:熟知的拉格朗日乘法,遗传算法优化法。还推荐了作者提出的综合优化方法。在可靠性部分概述了可靠性基本概念,推导了燃气管网供气可靠性评价模型和基于水力计算的供气可靠度计算方法,因而提供了燃气管网供气可靠性评价实用途径。

第9章,压缩天然气。为提高天然气的储运效率发展了压缩天然气的供气方式。在系统的设施中为适应高压和利用高压这一技术特征,工艺流程上有压缩、干燥以及储存分区、充储气顺序优先工艺、加热降压、压力能利用等基本工艺过程。本章除对这一类型工程技术系统作较详细讲解,还重点论述了充储气顺序优先工艺,以及关于储存分区、加热降压的基本原理。由于焦耳-汤姆逊效应对燃气生产和输配工艺具有基本的意义,结合加热降压工艺问题严格推导了基于焦耳-汤姆逊效应的节流温度计算公式。

第10章,首先讲述液化天然气的液化工艺原理,介绍了关于其液化工艺的完整知识(净化、液化流程),特别总结了其液化热力学过程的工艺要点;分别列举了级联式液化流程、混合工质制冷剂液化流程和带膨胀机液化流程。接着讲述其储运内容。然后讲述该系统的终端站以及极可能与终端站相邻而建的液化天然气冷能利用设施工艺,气化<sup>①</sup>站以及加气站。考虑到对燃气输配专业,液化天然气是比较新的内容,因此在每一工艺部分都较详细地介绍了相关设备。液化天然气冷能是一种量大且品位高的能量。液化天然气冷能利用符合节能减排和发展低碳经济的大方向。在本章中用较大篇幅讲解了液化天然气冷能利用基本流程和类型,涉及液化天然气冷能发电、空分、冷藏和空调、破碎等各种利用

---

<sup>①</sup> 物质由液态转化为气态的过程一般叫作“汽化”,但GB 50028—2006《城镇燃气设计规范》中用“气化”一词,本书依此用词。

途径。

第11章，包括液化石油气工程的工艺和工程，但侧重于工艺原理。依次涉及管道输送优化、卸车过程、储罐储存压力状况、低温储存参数优化、天然气化、强制气化过程，管道供气凝结，引射混合，容器过量灌装分析等。考虑到燃气引射器对本专业是一种有基本意义的设备形式，在本章给出了基于自由射流模型的详细推导。对于被认为非常重要且难于求解的液化石油气容器过量灌装风险分析也给出了完整的推导。通过学习本章的内容，读者应能深入领会到液化石油气工程技术的理论内涵。

第12章，燃气系统及其应用的安全应得到首要的关注。本章从燃气泄漏、扩散物理现象进行基本的讲述。全程推导了输气管道大裂口燃气连续泄漏计算模型。全面讲解了燃气火灾、爆炸与中毒的物理特性和危害。然后简明扼要地讲解了燃气输配系统风险评价含义、基本过程、定性和定量方法（概率风险评价）以及模糊综合评价方法等内容。从而提供了关于燃气安全技术管理的系统方法。

第13章，在燃气输配的工程实际中已经广泛采用基于监控和数据采集的测控系统以及管理信息系统和地理信息系统。由于其基本内容属于计算机和信息领域，在一般的专业教材中难于表达，因而缺乏适合于燃气专业人员的书籍文献。但这一新技术内容已成为燃气输配工程专业的重要组成部分，读者有必要对其有基本的概念和较完整系统的知识。本书特别按照燃气输配专业人员可以理解、能够运用的方式撰写了本章内容。

第14章，实际经验表明，在燃气规划与工程文件编制中，存在一些对于这些工作的作用、意义、特点、主要内容和重点等的模糊认识。有必要充分说明究竟，使燃气规划与工程文件编制工作走到正确的轨道上来。本书通过本章阐述了一系列观点并就如何开展工作提出指导性意见。

本书由严铭卿，宓亢琪等撰写。参加者有来自全国、设有燃气相关专业高校的教师们（按姓名笔画及所在学校）：马红艳（西南石油大学），田贯三、宋永明、李兴泉（山东建筑大学），玉建军、刘凤国、全志利、李军、严铭卿（天津城建大学），冯良、周伟国、秦朝葵（同济大学），石玉美、林文胜、顾安忠（上海交通大学），孔川（四川大学），宓亢琪、管延文（华中科技大学），侯根富（福建工程学院），徐文东、解东来（华南理工大学），张兴梅、苗艳姝、展长虹（哈尔滨工业大学），唐建峰（中国石油大学〈华东〉），黄小美、彭世尼（重庆大学），郭揆常（华东理工大学），黎光华（北京建筑大学），潘嵩（北京工业大学）。书稿由严铭卿，宓亢琪进行统编。

试图全面概括一个专业基本内容的著述是一项难度较大的工作，既需要经历对知识的长时间积累，又需要持续地保持对新事物的追求以及深入的思考。我们已经做到何种程度，应通过本书的系统安排、内容取舍和充实性，以及讲解深度和理论高度等方面反映出来。

爱因斯坦认为“追求客观真理和知识是人的最高和永恒的目标”。作者以为，这既是我们应有的为人做事的态度，又与我们社会倡导的人生观是意义相通的。编写本书也是意在践行这种信念。

本书的出版得力于中国建筑工业出版社胡明安、姚荣华、刘慈慰等编审的宝贵支持与帮助；刘慈慰一直为我们的三部书稿进行编审，他所展现的严谨工作态度和学识修养得到我们一致的赞赏。在本书出版之际，我应当对他们表示真诚的谢意。



在编写本书时，我不禁回忆起就读于哈尔滨工业大学当时的一批年轻且优秀的老师们，他们兢兢业业，人品正直，充满革命激情，表现了中国新一代教师的敬业与奉献精神，有如秦兰仪，刘谔夫，谢培青，赵学端，盛昌源，吴元炜，廉乐明，郭骏，陈琰存，朱德懋，陈荣林，陈秀，刘牟尼，丁潍坚等等老师。我愿借本书出版的机会，提及曾经为新中国高等教育事业做出贡献的卓越的一辈，谨表对他们的敬意，并殷切期望本书读者新一代的传承与超越。

严铭卿

2013.10 北京



# 目 录

<b>第1章 城镇燃气</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 燃气气源种类及特性</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 天然气 .....	1
1.1.2 人工燃气 .....	5
1.1.3 液态燃气 .....	6
1.1.4 生物质燃气 .....	7
1.1.5 各种燃气组分与热值 .....	8
<b>1.2 城镇燃气的质量要求</b> .....	<b>8</b>
1.2.1 城镇燃气的基本要求 .....	8
1.2.2 人工燃气的质量要求 .....	9
1.2.3 天然气的质量要求 .....	10
1.2.4 液化石油气的质量要求 .....	10
1.2.5 燃气的加臭 .....	11
参考文献 .....	11
<b>第2章 燃气的物理和热力性质</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1 单一气体的物理特性</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2 质量成分和体积成分</b> .....	<b>15</b>
2.2.1 混合物组分的表示方法 .....	15
2.2.2 混合物组分的换算 .....	16
<b>2.3 密度</b> .....	<b>17</b>
2.3.1 平均分子量 .....	17
2.3.2 平均密度和相对密度 .....	17
<b>2.4 临界参数与对应态原理</b> .....	<b>19</b>
2.4.1 临界参数 .....	19
2.4.2 拟临界参数 .....	20
2.4.3 对应态原理 .....	21
<b>2.5 黏度</b> .....	<b>24</b>
2.5.1 黏度方程 .....	24
2.5.2 混合气体常用的黏度算法 .....	27
2.5.3 液态碳氢化合物的动力黏度 .....	30
<b>2.6 液体的表面张力</b> .....	<b>31</b>
<b>2.7 导热系数</b> .....	<b>32</b>

2.7.1	气体的导热系数	32
2.7.2	混合液体的导热系数	36
<b>2.8</b>	<b>液态烃的体积膨胀系数</b>	<b>37</b>
<b>2.9</b>	<b>蒸气压及相平衡、露点</b>	<b>38</b>
2.9.1	饱和蒸气压与温度的关系	38
2.9.2	混合液体的蒸气压	40
2.9.3	相平衡常数	41
2.9.4	沸点和露点	45
<b>2.10</b>	<b>气体的压缩因子与气体状态方程</b>	<b>49</b>
2.10.1	理想气体与实际气体	49
2.10.2	气体的压缩因子	49
2.10.3	气体状态方程	54
<b>2.11</b>	<b>气化潜热</b>	<b>59</b>
2.11.1	气化潜热与温度的关系	59
2.11.2	混合液体的气化潜热	60
<b>2.12</b>	<b>比热容</b>	<b>61</b>
2.12.1	定容比热容与定压比热容	61
2.12.2	比热容的性质	62
2.12.3	混合气体的比热容	63
2.12.4	混合液体的比热容	66
<b>2.13</b>	<b>焓</b>	<b>68</b>
2.13.1	理想气体的焓	69
2.13.2	实际气体的焓	70
<b>2.14</b>	<b>熵</b>	<b>72</b>
2.14.1	理想气体的熵	72
2.14.2	实际气体的熵	72
<b>2.15</b>	<b>焓</b>	<b>74</b>
<b>2.16</b>	<b>热值</b>	<b>75</b>
2.16.1	混合可燃气体的热值	75
2.16.2	干、湿燃气的热值	76
<b>2.17</b>	<b>燃气爆炸极限与燃气混合安全性</b>	<b>76</b>
2.17.1	影响燃气爆炸极限的因素	77
2.17.2	燃气爆炸极限的计算	80
2.17.3	混合燃气爆炸极限函数	85
2.17.4	燃气混合安全性定律	87
<b>2.18</b>	<b>天然气含水量、水合物</b>	<b>87</b>
2.18.1	气体在水中的溶解度	87
2.18.2	水在液态烃中的溶解度	88
2.18.3	算法确定天然气的含水量	89
2.18.4	天然气水合物的生成	92

参考文献 .....	96
<b>第3章 城镇燃气用气负荷 .....</b>	<b>97</b>
<b>3.1 城镇燃气用气负荷的定义及分类 .....</b>	<b>97</b>
3.1.1 城镇燃气用气负荷的定义 .....	97
3.1.2 燃气用户分类 .....	97
3.1.3 天然气的应用领域 .....	97
<b>3.2 城镇燃气负荷的指标和参数 .....</b>	<b>99</b>
3.2.1 用气量指标及制订 .....	99
3.2.2 城镇燃气年用气量计算 .....	100
<b>3.3 城镇燃气负荷工况 .....</b>	<b>102</b>
3.3.1 月用气工况 .....	103
3.3.2 日用气工况 .....	103
3.3.3 小时用气工况 .....	104
<b>3.4 燃气输配系统的小时计算流量 .....</b>	<b>105</b>
3.4.1 城镇燃气分配管道的计算流量 .....	105
3.4.2 室内和街坊燃气管道的小时计算流量 .....	107
<b>3.5 燃气输配系统的供需平衡 .....</b>	<b>108</b>
3.5.1 供需平衡方法 .....	108
3.5.2 储气容积的确定 .....	108
<b>3.6 燃气负荷指标的制订 .....</b>	<b>110</b>
3.6.1 燃气负荷指标的制订途经 .....	110
3.6.2 燃气用气定额及用气小时高峰系数的制订 .....	111
<b>3.7 城镇燃气用气负荷预测 .....</b>	<b>112</b>
3.7.1 燃气负荷的变化特性 .....	113
3.7.2 燃气负荷模型 .....	113
3.7.3 燃气负荷预测 .....	120
参考文献 .....	127
<b>第4章 输气管道系统 .....</b>	<b>129</b>
<b>4.1 燃气输送方式与管道输送 .....</b>	<b>129</b>
4.1.1 燃气输送方式 .....	129
4.1.2 天然气管道系统 .....	129
<b>4.2 输气管道工程与技术 .....</b>	<b>130</b>
4.2.1 输气管道工程组成 .....	130
4.2.2 现代输气管道技术 .....	130
<b>4.3 输气管道工艺 .....</b>	<b>131</b>
4.3.1 工艺设计 .....	131
4.3.2 管道水力计算 .....	132
4.3.3 管道温降计算 .....	137

4.3.4	输气管道工艺设计参数与优化	139
<b>4.4</b>	<b>输气管道的设计与敷设</b>	<b>150</b>
4.4.1	线路选择	150
4.4.2	输气管道材质及选择	151
4.4.3	输气管道强度计算及稳定性校核	153
4.4.4	输气管道敷设	155
<b>4.5</b>	<b>输气管道场站</b>	<b>161</b>
4.5.1	概述	161
4.5.2	首站	161
4.5.3	清管站	168
4.5.4	压气站	169
4.5.5	分输站	185
4.5.6	末站	187
<b>4.6</b>	<b>输气管道系统运行工况</b>	<b>188</b>
4.6.1	压气站与管道系统的联合运行	188
4.6.2	输气管道压气站运行优化	199
<b>4.7</b>	<b>防止水合物生成的方法</b>	<b>204</b>
4.7.1	天然气参数控制防止水合物生成	204
4.7.2	采用抑制剂防止水合物生成	205
	参考文献	205
<b>第5章</b>	<b>燃气储存</b>	<b>207</b>
<b>5.1</b>	<b>概述</b>	<b>207</b>
5.1.1	燃气系统的储气要求	207
5.1.2	储气分类	207
5.1.3	储气的系统	211
<b>5.2</b>	<b>孔隙地层地下储气库</b>	<b>214</b>
5.2.1	枯竭油气田地下储气库	217
5.2.2	含水层地下储气库	223
<b>5.3</b>	<b>洞穴型地下储气库</b>	<b>231</b>
5.3.1	盐穴地下储气库	231
5.3.2	岩洞地下储气库	232
5.3.3	洞穴型地下储气库热力分析	234
<b>5.4</b>	<b>地下储气库的运行方式</b>	<b>237</b>
<b>5.5</b>	<b>管道及高压钢制容器储气</b>	<b>238</b>
5.5.1	长输管道末段储气	238
5.5.2	高压球型罐储气	241
5.5.3	高压管束储气	244
<b>5.6</b>	<b>液化天然气储存</b>	<b>245</b>
5.6.1	调峰液化天然气厂储存	245

5.6.2	液化天然气终端站储存	245
<b>5.7</b>	<b>天然气新型集态储存</b>	<b>248</b>
5.7.1	低温液化石油气溶液中天然气储存	248
5.7.2	天然气水合物储存	249
5.7.3	超级活性炭吸附天然气储存	250
<b>5.8</b>	<b>低压储气罐</b>	<b>253</b>
5.8.1	低压湿式储气罐	254
5.8.2	低压干式储气罐	255
5.8.3	干式罐与湿式罐比较	257
	参考文献	257
<b>第6章</b>	<b>城镇燃气输配系统</b>	<b>260</b>
<b>6.1</b>	<b>城镇燃气输配系统压力级制与分类</b>	<b>260</b>
6.1.1	输配系统的压力级制	260
6.1.2	输配系统的分类	261
<b>6.2</b>	<b>场站</b>	<b>263</b>
6.2.1	门站	263
6.2.2	储配站	267
6.2.3	调压站	269
6.2.4	场站设备	276
<b>6.3</b>	<b>管道布置、阀门配置与管材</b>	<b>316</b>
6.3.1	管道布置	316
6.3.2	用户管道敷设	319
6.3.3	阀门配置	324
6.3.4	管道材质	330
6.3.5	阀门	335
<b>6.4</b>	<b>埋地钢管的电化学腐蚀与防腐</b>	<b>338</b>
6.4.1	电化学腐蚀的机理	338
6.4.2	土壤电化学腐蚀性的测定	339
6.4.3	埋地钢管的防腐	341
<b>6.5</b>	<b>管道穿跨越工程</b>	<b>350</b>
6.5.1	水域、冲沟穿越工程	351
6.5.2	铁路、公路穿越工程	352
6.5.3	跨越工程	354
<b>6.6</b>	<b>埋地钢管的抗震设计</b>	<b>355</b>
6.6.1	直管轴向应变计算	356
6.6.2	直管轴向应变校核计算	357
<b>6.7</b>	<b>城镇燃气管网运行调度</b>	<b>357</b>
6.7.1	概述	357
6.7.2	管网运行工况宏观模型	358

6.7.3	建模原始数据与应用要点	359
6.7.4	模型特性与应用范围	360
6.7.5	应用示例	361
6.7.6	应用说明	362
<b>6.8</b>	<b>天然气压力能利用</b>	<b>363</b>
6.8.1	天然气压力能及有效利用	363
6.8.2	天然气压力能利用系统	366
	参考文献	369
<b>第7章</b>	<b>燃气管网水力计算与分析</b>	<b>370</b>
<b>7.1</b>	<b>管道中燃气流动基本方程</b>	<b>370</b>
7.1.1	管道内的流动状态	370
7.1.2	流动基本方程	372
7.1.3	流动摩阻系数	374
<b>7.2</b>	<b>燃气管道定常流动</b>	<b>376</b>
7.2.1	定常流动方程	376
7.2.2	输气管道定常流动水力计算	379
7.2.3	城镇燃气管网定常流动水力计算	383
<b>7.3</b>	<b>燃气管道不定常流动</b>	<b>401</b>
7.3.1	简化的不定常流动方程	401
7.3.2	燃气管道不定常流动方程的定解问题	403
7.3.3	不定常流动方程解析法求解	410
7.3.4	不定常流动方程数值法求解	422
<b>7.4</b>	<b>燃气管道非等温流动</b>	<b>435</b>
7.4.1	燃气管道非等温流动能量方程	435
7.4.2	燃气管道非等温定常流动	437
7.4.3	燃气管道非等温不定常流动	440
<b>7.5</b>	<b>管道的水力等效计算</b>	<b>450</b>
7.5.1	并联管段	451
7.5.2	串联管段	451
7.5.3	管段替代	452
7.5.4	管道局部阻力系数的当量长度	453
	参考文献	453
<b>第8章</b>	<b>燃气管网优化与供气可靠性评价</b>	<b>455</b>
<b>8.1</b>	<b>燃气管网优化</b>	<b>455</b>
8.1.1	燃气管网优化问题的特点	455
8.1.2	城镇燃气输配管网优化模型	456
8.1.3	管网设计优化拉格朗日乘法	460
8.1.4	管网设计优化遗传算法	462

8.1.5	管网设计综合优化 .....	474
<b>8.2</b>	<b>燃气输配管网供气可靠性评价 .....</b>	<b>478</b>
8.2.1	概述 .....	478
8.2.2	可靠性基本概念 .....	479
8.2.3	系统的状态转移 .....	484
8.2.4	输配管网供气可靠性 .....	487
	参考文献 .....	494
<b>第9章</b>	<b>压缩天然气输配 .....</b>	<b>496</b>
<b>9.1</b>	<b>概述 .....</b>	<b>496</b>
<b>9.2</b>	<b>压缩天然气加气站 .....</b>	<b>498</b>
9.2.1	加气站工艺 .....	498
9.2.2	加气站设备 .....	504
9.2.3	加气站设施的安全防护 .....	509
9.2.4	加气站的平面布置 .....	510
9.2.5	压缩天然气储气分区 .....	510
<b>9.3</b>	<b>压缩天然气供气站 .....</b>	<b>516</b>
9.3.1	供气站工艺 .....	518
9.3.2	供气站设备 .....	520
9.3.3	加热设备工艺计算 .....	520
9.3.4	储气设备 .....	527
9.3.5	供气站运输车运行模式 .....	528
9.3.6	供气站平面布置 .....	529
<b>9.4</b>	<b>压缩天然气汽车加气子站 .....</b>	<b>529</b>
9.4.1	加气子站工艺 .....	531
9.4.2	加气子站设备 .....	532
	参考文献 .....	534
<b>第10章</b>	<b>液化天然气供应 .....</b>	<b>535</b>
<b>10.1</b>	<b>液化天然气的特性 .....</b>	<b>535</b>
10.1.1	液化天然气的特性 .....	535
10.1.2	关于液化天然气的物理现象 .....	535
<b>10.2</b>	<b>天然气液化 .....</b>	<b>537</b>
10.2.1	天然气预处理 .....	537
10.2.2	天然气液化流程 .....	544
10.2.3	天然气液化装置的主要设备 .....	553
<b>10.3</b>	<b>液化天然气储运 .....</b>	<b>565</b>
10.3.1	槽船运输 .....	565
10.3.2	槽车运输 .....	571
10.3.3	储罐 .....	575



10.3.4	储存相关设备 .....	589
<b>10.4</b>	<b>液化天然气终端站 .....</b>	<b>597</b>
10.4.1	终端站工艺流程 .....	597
10.4.2	终端站主要设备 .....	601
<b>10.5</b>	<b>液化天然气的冷能利用 .....</b>	<b>608</b>
10.5.1	液化天然气冷能利用的焓分析概念 .....	609
10.5.2	液化天然气发电 .....	611
10.5.3	液化天然气冷量用于空气分离 .....	620
10.5.4	液化天然气冷量用于食品冷冻 .....	622
10.5.5	液化天然气冷量用于低温粉碎 .....	626
10.5.6	液化天然气冷量制取液态二氧化碳和干冰 .....	626
10.5.7	蓄冷装置 .....	628
<b>10.6</b>	<b>液化天然气气化站 .....</b>	<b>628</b>
10.6.1	气化站工艺 .....	628
10.6.2	气化站主要工艺设备 .....	631
10.6.3	气化站总平面与安全 .....	637
10.6.4	瓶组供气站 .....	642
<b>10.7</b>	<b>液化天然气加气站 .....</b>	<b>643</b>
10.7.1	加气站 .....	643
10.7.2	液化天然气-压缩天然气加气站 .....	645
	参考文献 .....	647
<b>第 11 章</b>	<b>液化石油气输配 .....</b>	<b>649</b>
<b>11.1</b>	<b>液化石油气运输 .....</b>	<b>649</b>
11.1.1	运输方式 .....	649
11.1.2	管道输送 .....	650
11.1.3	槽车运输 .....	658
<b>11.2</b>	<b>液化石油气分配与供应 .....</b>	<b>659</b>
11.2.1	储配 .....	659
11.2.2	常温压力储存 .....	661
11.2.3	储配站 .....	663
11.2.4	储罐储存压力 .....	673
<b>11.3</b>	<b>液化石油气低温储存 .....</b>	<b>677</b>
11.3.1	液化石油气低温降压储存 .....	677
11.3.2	低温常压储存 .....	680
11.3.3	低温储存参数优化 .....	693
<b>11.4</b>	<b>液化石油气气化供气 .....</b>	<b>699</b>
11.4.1	天然气化供气 .....	699
11.4.2	强制气化供气 .....	708
11.4.3	混合气供气 .....	725

11.5	液化石油气汽车加气站	741
11.5.1	汽车加气站规模	741
11.5.2	加气站主要设备	741
11.5.3	加气站站址与总平面	742
11.6	液化石油气容器过量灌装危险分析	743
11.6.1	容器过量灌装危险	743
11.6.2	容器全充满温胀破裂的解析模型	744
11.6.3	事故模拟算例	747
	参考文献	747
<b>第12章</b>	<b>燃气泄漏与燃气系统安全风险评价</b>	<b>749</b>
12.1	燃气泄漏危险性概述	749
12.2	燃气泄漏与扩散	750
12.2.1	燃气泄漏	750
12.2.2	泄漏燃气扩散	759
12.3	燃气火灾、爆炸与中毒	772
12.3.1	燃气火灾	772
12.3.2	燃气爆炸	775
12.3.3	燃气中毒	781
12.4	燃气输配系统安全风险评价	782
12.4.1	风险概述	783
12.4.2	风险评价与风险管理	783
12.4.3	燃气输配系统风险评价基本过程	785
12.4.4	风险评价的基础数据	787
12.4.5	燃气输配系统危险源辨识	788
12.5	燃气输配系统安全风险评价方法	790
12.5.1	风险评价方法分类	790
12.5.2	安全检查表法	791
12.5.3	危险性预分析法	791
12.5.4	风险矩阵法	792
12.5.5	肯特管道风险指数法	792
12.6	概率风险评价方法	802
12.6.1	事件树分析法	802
12.6.2	故障树分析法	804
12.7	模糊综合评价方法	812
12.7.1	模糊数学基本概念	812
12.7.2	模糊综合评价	816
	参考文献	819
<b>第13章</b>	<b>燃气输配测控与信息系统</b>	<b>821</b>
13.1	监控和数据采集系统	821