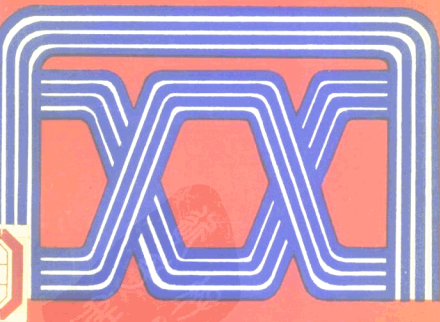


输配气管网的 模拟与分析

江茂泽 徐羽键 王寿喜 曾自强 编著



石油工业出版社

登录号	· 087395
分类号	TE978
种次号	003

输配气管网的模拟与分析

江茂泽 徐羽镗 王寿喜 曾自强 编著



200778587

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书针对天然气输配管网中的不同流动状态,主要介绍了用数值法求解稳态和不稳态流动模型的理论和办法;以及用解析法求解不稳态流动模型的基本理论和办法;另外还简要地介绍了有关的图论基本知识。

本书可作为石油院校有关专业本科生高年级提高课的参考用书和研究生的基础教材。对于从事石油天然气和城市煤气输配系统管理和设计的工程技术人员也有实用价值。

输配气管网的模拟与分析

江茂泽 徐羽樟 王寿喜 曾自强 编著

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168 毫米 32 开本 $17\frac{3}{8}$ 印张 455 千字 印 1-1000

1995 年 1 月北京第 1 版 1995 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-1162-X/TE·1071

定价: 19.00 元

前 言

我国有丰富的天然气资源。随着国民经济的发展，天然气的消费量日益增长，气体输送系统和配气管网蓬勃发展。为了保证向用户合理地供应天然气，同时降低操作管理费用，必须解决与整个输配气管网合理运行有关的深层次问题。但是，只有在应用了科学的模拟方法之后，才有可能解决最优化发展天然气输配管网以及经济上合理管理等这些深层次问题。

天然气输配系统由高度整体化的管网所组成。这个系统是一个统一的水动力系统；在系统内操作压力和流量变化很大。所谓模拟就是将所研究的系统用一模型来等效地代替，然后在模型上进行一种实验；模型的输入和输出信号等同于系统的有关信号。根据测试所得到的结论，在所考虑的条件下，模型就可转用于该实际系统。在绝大多数情况下，模型的输入起着自变量的作用。应用对模型的测试，我们需要回答下列问题：在给定情况下，系统将怎样运行？亦即如果输入信号已知的话，模型的输出信号将是怎样的？我们感兴趣的是在知道系统输入信号值或其变化值的情况下，将产生的输出信号值。从模型和测试系统的等效性来看，在模型上以这种方式所得到的实验结果，就可以转用于系统。事实上，这种实验（模拟研究）可以看作是利用模型对系统进行实验，模拟分析可以为工程师们在分析所给系统时感到困惑的具体问题提供答案，因此模拟是一种有效的工具，它本身并不是目的。

气体管网的模拟是利用气体在管道中流动的模型来进行的，这种模型是根据控制流动过程的物理定律而提出来的。然而，从问题的复杂性（方程的建立、问题的规模和模型的复杂性）来看，没有计算机是不可能进行模拟的。

正如已经谈到的那样，模拟能使我们预测气体管网系统在不

同情况下的状态。这种预测可以用来指导关于实际系统的设计和操作的决策。在管网设计阶段，模拟将帮助我们选择管网结构，以及在供气和用气的给定参数情况下选择管道的几何参数。模拟也可以使我们能够容易地选择所要设置的非管子元件的位置。为了得到在管网给定地点的压力和流量的信息，也需要进行模拟来对管网系统加以控制。

根据系统内气体流动的特性，可分为稳态流动和不稳态流动。气体管网内的稳态流动用代数方程组（一般为非线性）来描述，进行稳态模拟相对说来比较简单，且非常容易理解。然而在某些情况下，为了不带来严重误差，就不能忽略流动的动力特性。此时，需要应用动力模型，这样就将导致模型的求解计算更加复杂。

本书的目的，就是向读者介绍输配气管网在稳态和不稳态情况下的模拟问题。

全书分三部分：第一篇（包括第 1、2、3 章）为热力学、流体力学和图论基础；第二篇（包括第 4、5、6、7、8、9 章）为用数值法求解输配气管网内稳态和不稳态流动模型的理论和方法；第三篇（包括第 10、11、12 章）为用解析法求解输配气管网内的不稳态流动模型问题。最后还有两个附录。

总的说来，这些内容主要介绍了国外在输配气管网模拟与分析领域内的最新研究资料（参阅美国海湾出版公司 1987 年出版的由 A.J.Osiadacz 所著的 SIMULATION AND ANALYSIS OF GAS NETWORKS 一书）；同时也扼要地介绍了我们最近几年在指导研究生时所取得的某些研究成果。

编写本书的具体分工为：序言和第 3、7、9 章由曾自强（主编）编写；第 1、2 章和附录 A 由王寿喜编写；第 4、6 章由徐羽镗编写；第 5、8、10、11、12 章和附录 B 由江茂泽编写；全书各章由曾自强校阅、修改后定稿。

有关输配气管网的模拟与分析这个领域的资料较多，有些不太容易理解，因为它涉及到很多数学问题和计算机应用等问题；

再加上篇幅所限，因此本书属于一种中等偏上层次的读物。它可作为有关院校高年级学生的参考书；也可以作为有关院校研究生的基础教材。我们认为读者在掌握了这些基础理论和方法之后，对进一步去解决大型复杂输配气管网模拟与分析的生产实际问题，也就不是很困难了。我们已在四川气田的大型复杂输配气管网进行了这方面的研究工作，并取得了令人满意的成果。如果有条件的话，我们愿将这些研究成果贡献给我国的天然气工业，使科学技术转变为生产力，为提高我国天然气工业的生产、管理和销售水平创造良好条件。

本书在编写出版过程中，得到了西南石油学院院系领导的关心和支持，其他不少同志给与了很多的具体帮助，在此特向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，缺点和错误在所难免，我们真诚地希望读者批评指正。

编著者

1993年4月15日

目 录

第一篇 输配气管网模拟分析基础

第一章 热力学和流体力学基础	1
1.1 气体热力学基础	1
1.1.1 术语和定义	1
1.1.2 气体定律和气体方程	3
1.2 气体在管道中流动的基础知识	10
1.2.1 粘度	10
1.2.2 雷诺数	11
1.2.3 管内流动类型	11
1.2.4 流量	14
1.2.5 流动的连续性	14
1.2.6 伯努里方程	16
1.2.7 实际流体的稳定流动方程	18
参考文献	19
第二章 气体管网中的非管元件	21
2.1 引言	21
2.2 压缩机站	21
2.2.1 离心式压缩机	22
2.2.2 往复式压缩机	26
2.3 压力调节器	31
2.3.1 直接作用式气体调节器	34
2.3.2 指挥阀式气体调节器	37
2.4 阀门	39
参考文献	40
第三章 图论基础知识	41

3.1 引言	41
3.2 图论的基本术语及定义	41
3.3 管网结构学	47
3.3.1 支管-节点关联矩阵	49
3.3.2 支管-环路关联矩阵	50
3.4 管网图的计算机表示方法	52
3.4.1 节点-节点表示法	52
3.4.2 连接表	53
3.4.3 环链场	54
3.4.4 节点-支管表示法	56
3.4.5 组合表示法	56
3.4.6 列支管目录表	57
3.4.7 支管-环路表示法	58
3.5 环路生成的方法	59
3.5.1 深度第一搜索法 (DFS)	59
3.5.2 广度第一搜索法 (BFS)	61
3.5.3 环路生成算法	62
3.5.4 对图 3.16 所示网络的结果	67
3.5.5 对图 3.17 所示网络的结果	70
3.5.6 对图 3.18 所示网络的结果	72
3.5.7 对图 3.19 所示网络的结果	73
3.5.8 对图 3.20 所示网络的结果	78
3.5.9 小结	80
参考文献	81

第二篇 管网数学模型的数值解法

第四章 稳态分析用方程的建立	83
4.1 引言	83
4.2 一般流动方程	83

4.3 实用的流动方程	89
4.3.1 气体在管道中的流动特性	89
4.3.2 效率因子	90
4.3.3 常用的流动方程	92
4.4 节点公式	98
4.5 环路公式	100
参考文献	101
第五章 代数方程组的数值解法	103
5.1 引言	103
5.2 稳定的迭代方法	103
5.3 线性代数方程的数值解	110
5.3.1 情况 I——矩阵 A 是非对称的	111
5.3.2 情况 II——矩阵 A 是对称的	122
参考文献	130
第六章 稳态分析方法	132
6.1 引言	132
6.2 多维情况时的牛顿节点法	132
6.2.1 理论的计算方法	132
6.2.2 节点雅可比矩阵的特性	138
6.2.3 例题	141
6.3 一维情况时的牛顿节点法	148
6.3.1 理论的计算方法	148
6.3.2 例题	152
6.4 多维情况时的牛顿环路法	158
6.4.1 理论的计算方法	158
6.4.2 环路雅可比矩阵的特性	164
6.4.3 例题	172
6.5 一维情况时的牛顿环路法	181
6.5.1 理论的计算方法	181
6.5.2 例题	183

6.6 多维情况时的牛顿环路-节点法	190
6.6.1 理论的计算方法	190
6.6.2 雅可比矩阵的特性	197
6.6.3 例题	198
6.7 具有非管元件的管网模拟方法	205
6.7.1 方法 I	206
6.7.2 方法 II	211
6.7.3 方法 III	212
6.7.4 例题	219
参考文献	231
第七章 瞬变分析方程的建立	234
7.1 引言	234
7.2 偏微分方程的分类	234
7.3 瞬变流动的基本方程	238
7.3.1 连续性方程	239
7.3.2 动量方程	241
7.3.3 能量方程	244
7.4 简化的数学模型	247
参考文献	258
第八章 求解偏微分方程的计算机方法	260
8.1 引言	260
8.2 有限差分网格	260
8.3 导数的有限差分近似	261
8.4 收敛性、相容性和稳定性	266
8.5 抛物型方程	268
8.5.1 显式法	270
8.5.2 隐式法	271
8.6 双曲型方程	278
8.6.1 显式法	280
8.6.2 隐式法	282

8.6.3 转变为两个方程	283
8.6.4 特征线法	284
8.6.5 直线法	289
参考文献	298
第九章 瞬变分析的方法	300
9.1 引言	300
9.2 气体在单管内不稳定流动的模拟	300
9.2.1 方法1	300
9.2.2 方法2	309
9.3 在简单输送系统内气体不稳定流动的模拟	319
9.4 在复杂输气管网内气体不稳定流动的模拟	322
9.4.1 方法1	322
9.4.2 方法2	325
9.4.3 方法3	333
9.4.4 方法4	337
参考文献	346

第三篇 管网数学模型的解析解法

第十章 流体在管道中不稳定流动的数学描述	349
10.1 管道中气体和液体流动的基本方程	349
10.2 线性化函数的变化特点	352
10.3 哈尔内的线性化方法	357
10.4 带有变系数的实际流体流动方程	361
10.5 在带变系数的实际流体流动方程中考虑惯性项	367
10.6 实际流体流动方程线性化方法精确性的估计	369
参考文献	375
第十一章 天然气管网分析中的一些数学方法	377
11.1 管网分析中的广义函数	377
11.1.1 Heaviside 函数 (单位函数)	377

11.1.2 δ 函数 (Dirac 函数)	379
11.2 分离变量法	382
11.3 拉普拉斯积分变换法	389
11.4 有限积分变换法	399
11.5 实际问题解例	409
参考文献	434
第十二章 用解析方法分析天然气在复杂输气管网中的不稳定流动	436
12.1 具有集中输出 (输入) 流量的干线中天然气不稳定流动的 数学模型	436
12.2 带有中间压气站的简单树枝状干线内天然气不稳定 流动分析	440
12.3 单环管网中天然气不稳定流动分析	453
12.4 双环串联管网中天然气不稳定流动分析	470
12.5 双环并联管网中天然气不稳定流动分析	487
12.6 复杂枝状管网系统内天然气不稳定流动分析	505
12.6.1 数学模型的建立	505
12.6.2 联立模型的求解	513
12.6.3 计算实例	515
参考文献	524
附录 A 交互式气体流动分析	527
A.1 引言	527
A.2 交互式系统的典型组成	528
A.2.1 图形终端	528
A.2.2 硬拷贝设备	529
A.2.3 其他输入/输出设备	529
A.3 交互式气体流动分析程序	529
A.3.1 交互作用方法	530
A.3.2 主菜单	531
参考文献	533
附录 B 有限积分变换简表	534

第一篇 输配气管网模拟 分析基础

第一章 热力学和流体力学基础

1.1 气体热力学基础

1.1.1 术语和定义

一些常用的状态参数被用来决定气体明确的状态。最方便且应用最广泛的反映气体状态特性的参数是气体的温度、压力和比容（或密度）。

温度反映气体的热力状态。这里引入下面表达式

$$T = 273.15 + t^{\circ}\text{C} \quad (1.1)$$

T 的量纲是温度，可以将其看成是一特定温标下的温度，该温标不同于摄氏温标，其零度位于 -273.15°C ，这种温标下的温度单位称为 K (Kelvin)。

压力 p 是边界上单位面积所受的气体作用力 F 的法向分力。压力是对一定大的微元面积来定义的，该面积允许将气体按连续介质来处理。这样

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow \Delta A'} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad [\text{N}/\text{m}^2] \quad (1.2)$$

式中， $\Delta A'$ 是气体作为连续介质时的最小面积。一般而言，只要气体分子间发生碰撞所走的平均距离小于边界尺寸（在

此情况下，相当于微元面积 $\Delta A'$ 一边的长度）时就可观察到气体的连续特性。

作用于边界层上的总压力叫做绝对压力。大气作用于单位面积上的压力叫做大气压力，它随纬度和海拔高度而变化。大气压力是在特定位置上由空气重量而产生的。

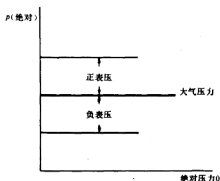


图 1.1 压力术语间的相互关系

表压是绝对压力与一特定系统的大气压力之差，表压通常用以大气压力为参照压力的仪表来测量。

真空度是指大气压力超出系统绝对压力的量值。各种压力间相互关系如图 1.1 所示。

气体的比容指单位质量的气体所占据的容积。比容 v 同气体质量 G 和体积 V 有如下关系：

$$v = \frac{V}{G} \quad [\text{m}^3 / \text{kg}] \quad (1.3)$$

气体密度是比容的倒数，即

$$\rho = \frac{G}{V} = \frac{1}{v} \quad (1.4)$$

重度是指单位体积气体的重量，用 γ 表示。根据牛顿第二定律，气体的密度和重度有如下关系

$$\gamma = \rho \cdot g = g / v \quad [\text{N} / \text{m}^3] \quad (1.5)$$

式中 g 是重力加速度 (m / s^2)。

1.1.2 气体定律和气体方程^[1]

(a) Boyle 定律

若一定量气体的温度保持恒定，则气体的体积与其绝对压力成反比，如下式所示

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \text{ 或 } p_1 v_1 = p_2 v_2 \text{ 或 } p v = \text{常数} \quad (1.6)$$

这种关系如图 1.2 所示。

(b) Charles 定律

Charles 定律包括两部分：

(1) 若作用于一定量气体的压力保持不变，则随着气体状态的任何变化，气体的体积将随其绝对温度成线性变化，如下式所示：

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ 或 } \frac{T_1}{v_1} = \frac{T_2}{v_2} \text{ 或 } \frac{T}{v} = \text{常数} \quad (1.7)$$

该关系如图 1.3 所示。

(2) 若特定量气体的体积保持不变，则随着气体状态的任何变化，气体的绝对压力将随其绝对温度成线性变化：

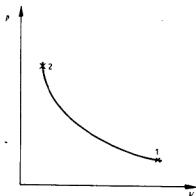


图 1.2 按照 Boyle 定律的压力-体积关系
(温度为常数)

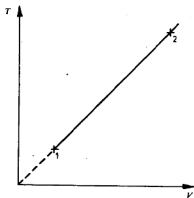


图 1.3 按照 Charles 定律的温度-体积关系 (压力为常数)

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ 或 } \frac{T_1}{p_1} = \frac{T_2}{p_2} \text{ 或 } \frac{T}{p} = \text{常数} \quad (1.8)$$

图 1.4 表示了这个关系。

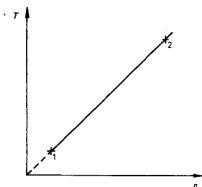


图 1.4 按照 Charles 定律的温度-压力关系
(体积为常数)

(c) Boyle 和 Charles 定律

将 Boyle 和 Charles 定律联合起来可得到如下关系式:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \text{ 或 } \frac{pV}{T} = \text{常数} \quad (1.9)$$

式 (1.9) 中的常数与气体状态无关, 它仅依赖于气体的性质, 被称为气体常数, 每一种气体有不同的值。用 R ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$) 表示气体常数。式 (1.9) 可写成如下形式: