

管网中不稳定流动的水力分析

〔英〕J.A.福克斯 著

石油工业出版社

169356

管网中不稳定流动的 水力分析

〔英〕 J. A. 福克斯 著

陈 祖 泽 译

石油工业出版社

11/39
内 容 提 要

本书是一本对管网系统中的不稳定流进行水力分析的理论专著，书中阐述水击理论，研究计算方法，分析泵、阀等不稳定流的边界情况。该书对水击问题有独特的见解，是一本比较系统全面的新书。

在翻译过程中，袁恩熙同志进行了审校。

可作从事石油、化工、给排水管网工程的科研人员、生产技术人员、大专院校师生的理论参考书。

Hydraulic Analysis
of Unsteady Flow
in Pipe Networks

J. A. Fox

First published 1977 by

THE MACMILAN PRESS LTD

管网中不稳定流动的水力分析

〔英〕J. A. 福克斯 著

陈 祖 泽 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

通县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 77/8印张 189千字 印1—4,000

1983年1月北京第1版 1983年1月北京第1次印刷

书号：15037·2392 定价：1.00元

序 言

读者也许很想知道这本书是怎样写成的。作者始终对不稳定流这个题目感到极大的兴趣，故把全部精力投入于探索不稳定流的专门应用上，因此，他的大部分研究成果都集中在这一领域，而许多读物理博士学位的学生在他指导下进行的研究也正是这方面的课题。

1969年，地方顾问工程师事务所的一位工程师向作者索取有关水击分析方法的资料，以便估计流体中游离气泡所引起的波速变化。当时恰好作者已编完一套分析简单总立管中水击现象的计算机程序，但是在程序中并没有考虑到这种波速影响。于是作者立即把这种影响编入了程序，以用来分析曾发生过爆裂的一条干管，从而判定爆裂的主要原因。作者并不知道，就在同一个时候，他从前的一位读物理博士学位的学生已对干管压力随时间的变化关系作了测定。对比表明，理论分析结果与实测结果极为一致，唯一有较大出入的是压力峰值的定时问题，但对最大和最小实际压力值的预计是完全正确的。

作者和顾问工程师事务所的工程师布劳恩·史密斯(Bryan Smith)了解到这些结果后，就决定成立一家公司——利兹(Lee-ds)水力分析有限公司，承担计划中的或已有的管网系统的分析。这一冒险事业居然获得很大成功，公司成立以来，承接分析的管网系统越来越复杂，从排放污水至处理场的简单总立管到诸如北海Forties油田的水下油管。请求公司进行分析的项目有：世界上许多地方当局的供水管网、中东的输油管线、北海油田建成的或拟建的大部分管线、提高油层出油量的注水系统、在Condeep的管网、以及其它如炼油厂和天然气液化工厂中的管网。这样，公司只得扩大规模，吸收一位计算机专家

安德鲁·基奇(Andrew Keech)作为合伙人,并雇用更多的职员来处理公司业务。

经过这段时间的实践,有必要扩展当初的那个原始程序,而现在则已达到了相当高级的水平。

作为一个大学教师,作者感到应该把这个程序中的基本内容公诸于众,因此决定撰写本书。要在一本书内把编在程序里的所有内容都包括进去,显然是不可能的,故删去了许多浅易的内容,但作为程序基础的基本材料则全部写进了这本书里。

作者愿提醒读者,他并不试图写出一本有关水击问题的权威性的著作。在目前这样的书或许是不可能写出来的,因为这方面的研究仍在飞速发展中。尽管如此,本书对水击有独特的见解。在水击研究方面作出过重大贡献的许多人,可能会由于本书没有采用他们的资料、或者没有提到这些资料而感到不快,对此,作者声明限于篇幅,谨向他们表示歉意。

本书的另一些特点是:勒克斯(Lax)、温德罗夫(Wendroff)及其它合作者所主张的有限差积分法仅一带而过,而作者确信今后大有前途的有限单元法,在书中也完全没有提及。然而,至少作者本人满意地认为,运用经实例论证了的特征线法已完全能解决问题,而这一点正是作者对一个非常广泛、非常复杂的课题仅作了有限论述的部分缘由。

利兹, 1976

J. A. 福克斯

符 号 表

全书所用符号的定义列表如下。对于仅有局部意义的变量未包括在表内，将在正文里加以说明。

- A 流通面积
- A_0 时间为 0 时的阀门开度面积(第一章)
- A_t 时间为 t 时的阀门开度面积(第一章)
- a_p 管路面积(第一章)
- a_v 阀门开度面积
- A 泵方程 $H = AN^2 + BNQ - CQ^2$ 中的常数(第六章)
- A_s 泵叶轮出口面积(第六章)
- A_{sw} 抽水井的计划面积(第六章)
- a_e 有效阀门开度面积(第九章)
- R 泵方程 $H = AN^2 + BNQ - CQ^2$ 中的常数(第六章)
- B 水渠表面宽度(第十章)
- b 平均水渠宽度(第十章)
- C_d 阀门的流量系数
- c 小压力波的速度
- C 用于分析调压井的摩阻公式中的常数(第三章)
- C 泵方程 $H = AN^2 + BNQ - CQ^2$ 中的常数(第六章)
- c_v 伺服控制阀冲程方程中的系数(第七章)
- C_v 气体的定容比热(第八章)
- C_p 气体的定压比热(第八章)
- c 微表面波的速度(第十章)
- C 电容/单位长输电线路(第九章)
- C Chezy C(第十章)
- C_d 水闸门的流量系数(第十章)

- c_w 明渠中浪波的速度(第十章)
- dt 时间增量(无穷小)
- dx 距离增量(无穷小)
- dp 压力增量(无穷小)
- dp 密度增量(无穷小)
- dv 速度增量(无穷小)
- d 管路直径
- D 泵叶轮直径
- D₁ 泵效率方程中的常数
- d_{s,w} 抽水井深度
- d_i 空气包内径
- E 杨氏弹性模数
- E 泵效率(第三章)
- E₁ 泵效率方程中的常数(第三章)
- e 气体内能/单位质量(第八章)
- E₁ } 为文中所定义的不稳定气体方程特征式中的常数(第八章)
- E₂ }
- E₃ }
- E g(j-i)(第十章)
- f 达西(Darcy)公式 $h_f = \frac{fLV^2}{2gm}$ 中的达西系数 f (见正文定义)
- f_b 管壁中的圆周应力
- f 当波向下游传播时的“函数”符号和波高(第二章)
- F 当波向上游传播时的“函数”符号和波高(第二章)
- F₁ 泵效率方程中的常数
- F 作用在流体上的力/单位管长(第八章)
- f 作用水头振荡频率(第九章)
- F_n 弗劳德(Froude)数(以绝对速度为基础)(第十章)
- g 当地重力场强度(适用于各章)

- G_t 泵速度梯度—时间衰减曲线(第六章)
 h 静压头—局部压力水头和任意基准上的标高之和
 h_f 由摩擦引起的压头损失
 h_s 静压头或S点的水头, 根据上下文的意思而定
 h_n 紧靠阀门或喷嘴上游的水头
 h_i 由于动量变化引起的静压头变化(注意 $p = wh$)
 h_{air} 以当量液柱高度表示的空气包中空气的压头(第三章)
 h_a 大气压头
 h_p 空气包底部距管路中心线的高度
 h_w 与上面的 h_n 同义(第七章)
 h_{tr} 由控制伺服电动阀的压力传感器自动检测的压头
 h_{crit} 使伺服电动阀开始动作的临界压头
 $\bar{h}$ 稳态压头(第九章)
 h' 非稳态压头分量(第九章)
 H 压力波振幅(第九章)
 h_p 水库水面距溢水道的高度(第十章)
 h_w 波顶至水渠底面的高度(第十章)
 I 泵—电动机组转动部分的惯性(第六章)
 i 电流(第九章)
 i $\sqrt{-1}$ (第九章)
 i 水渠底的坡度—以向下为正(第十章)
 j 摩擦水头损失/单位流体重量/单位水渠长度(第十章)
 K 阀的局部摩擦损失公式 $h_f = K \frac{v^2}{2g}$ 中的常数, $K = \frac{4f' L}{d} + k$ (第一章和第五章)
 K 液体的体积弹性模量
 k 有时表示局部摩擦公式 $h_L = k \frac{v^2}{2g}$ 中的常数(由弯头、接头等引起), 在第一章中也用作 $k = \frac{v_0 L h s}{g T}$

- k 压头— q 方程 $h = kq^2$ 、即用于 Schnyder-Bergeron 方法中的摩阻公式中的常数 (第五章)
- k Colebrook-White 公式中管壁粗糙度的平均高度
- k_s 泵叶轮的压头损失系数 (第六章)
- k_s 泵蜗壳的压头损失系数 (第六章)
- k 溢流道常数 (第十章)
- L 长度 (通常指管路长度 L)
- L 水击微分方程特征式展开式中的常数 (第七章)
- l_a 空气包内部高度 (第七章)
- L 电感/单位输电线长度 (第九章)
- m 平均水力半径 $= \frac{A}{P}$ (见正文定义)
- n 面积比 $\frac{a_p}{A_0}$ (第一章)
- N 泵转速, 转/分 (第二和第六章)
- n 多变指数 (第八章)
- P_i 由于动量变化而产生的压力
- P 湿周
- P 泵的功率 (第三章和第六章)
- P_{air} 空气包中的空气压力 (第三章)
- P_a 大气压力
- Pwr 泵的功率 (第六章)
- q 流量
- q_t 时间为 t 时的流量
- q 热流/单位面积 (第八章)
- $\bar{q}$ 稳定流量 (第九章)
- q' 不稳定流量分量 (第九章)
- Q 流量振荡幅度 (第九章)
- Re 雷诺数 $= \frac{pvd}{\mu}$ 或 $\frac{vd}{\nu}$

R	通用气体常数(第八章)
R	水力摩阻/单位长度(第九章)
R_{el}	电阻/单位输电线长度(第九章)
s_i	Δt 周期开始时的阀门行程(第七章)
s_f	Δt 周期终了时的阀门行程(第七章)
s_{req}	由压力传感器规定的所必需的阀门行程(第七章)
S	取 + 1 或 - 1 值的整数(第七和第十章)
T	管路工作周期 $\frac{2L}{c}$ (第二和第三章)
T	管壁厚度
T	泵方程中用到的扭矩(第三章)
T	绝对温度(第八章)
t	时间
u	叶轮叶片端部的速度(第六章)
v	平均流速(第一章)
V_{∞}	当 $t \rightarrow \infty$ 时管路中的流速(第一章)
v_0	时间为零时的流速(第一章)
v_t	时间为 t 时的流速(第一章)
V_{air}	空气包中空气的体积(第三章)
V_g	溶解气体的体积
V_w	泵叶轮出口处的涡流速度(第六章)
V_r	泵叶轮出口处的相对速度(第六章)
V	泵叶轮出口处的绝对速度(第六章)
V_f	泵叶轮出口处的流速(第六章)
V	电压
V_w	在明渠中的波动速度(第十章)
w	流体的重度
W_H	Suter压头曲线中的无因次压头参数(第六章)
W_T	Suter扭矩曲线中的无因次扭矩参数(第六章)
x	管路的距离

- X** 管路的距离
- z** 管路中心线至基准面的高度(第三章)
- z** 调压井液面至水库静止水面的高度(第三章)
- Z_w** 抽水井底部的标高
- Z** 在管路与空气包连接处管路中心线的标高
- Z** 水力阻抗(第九章)
- Z₀** 特性阻抗(第九章)
- z** 明渠横截面质量中心的高度(第十章)
- α** γ 的有效分量(传播常数)(第九章)
- α** 确定明渠横截面特性的常数(第十章)
- β** 乘积 $\frac{CdAv}{Ap} \sqrt{2g}$ (第二章)
- β** γ 的虚分量(传播常数)(第九章)
- γ** 泵叶片角(第六章)
- γ** 第九章中的传播常数
- γ** 气体热容比(第八章)
- σ** 明渠横截面积与其表面宽度之比(第十章)
- Δx** 距离增量(有限)
- Δt** 时间增量(有限)
- ΔV** 体积增量(用下标来说明所指的是哪一种体积变化)(第一章)
- Δp** 由于动量变化而引起的压力增量(有限)(第一章)
- Δh_i** 与 Δp_i 有关的静压头($\Delta p_i = w\Delta h_i$)(第一章)
- ε** 液体中自由气体的相对体积(第五章)
- ε** a_e/a_0 之比(第九章)
- $\bar{\varepsilon}$** ε 的稳定部分(第九章)
- ε'** ε 的非稳定部分(第九章)
- ζ** 压头比的平方根: $\left(\frac{h}{h_0}\right)^{0.5}$ (第二章)
- ζ** 特征线的斜率

- η 阀门的相对开度: $\frac{a_v}{a_{v_0}}$ (第二章)
- θ Suter的四象限泵特性表达式中的角度
 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{N}{N_1^1} \frac{Q_1}{Q}\right)$ (第六章)
- λ 水击方程特征式中的常数(第四章)
- λ $\alpha \frac{d}{B} \frac{\partial B}{\partial x}$ (第十章)
- μ 流体的动力粘度
- ν 流体的运动粘度 $= \frac{\mu}{\rho}$
- π 3.14159
- ρ 密度
- ρ Allievi 特性: $\frac{cv_0}{2gh_0}$ (第二章)
- τ 表面张力系数(第五章)
- τ 粘滞剪应力(第二章和第十章)
- χ 在Schnyder-Bergeron方法中两个潮波叠加所产生的复合线(第二章)
- ψ 在Schnyder-Bergeron方法中阀的特性(第二章)
- ψ 相角(第九章)
- Ω 泵叶轮的角速度(第三和第六章)
- Ω 作用水头振荡的角速度(第九章)

目 录

序言

符号表

第一章 简单水击理论	(1)
§1.1. 引言	(1)
§1.2. 刚性管——不可压缩流体理论	(2)
§1.3. 管路下游终端阀门突然打开	(4)
§1.4. 阀门缓慢关闭	(7)
§1.5. 膨胀管——弹性流体理论	(10)
§1.6. 阀门瞬时关闭	(10)
§1.7. 液柱分离	(15)
§1.8. 简单管路终端阀门的瞬时关闭引起的瞬变值的计算	(16)
§1.9. 阀门瞬时关闭引起的压力增值	(20)
§1.10. 阀门突然关闭	(21)
第二章 分析法和图解法	(23)
§2.1. 引言	(23)
§2.2. 分析法	(23)
§2.3. 阀门在管路周期的时段内逐步关闭	(23)
§2.4. 埃利维联锁方程	(26)
§2.5. 施纳德-伯杰龙(Schnyder-Bergeron)图解法	(38)
第三章 应用图解法的边界条件	(60)
§3.1. 引言	(60)
§3.2. 泵	(60)
§3.3. 泵的四象限工况	(67)
§3.4. 调压井	(67)
§3.5. 调压井的类型	(68)
§3.6. 调压井瞬变过程的分析	(71)
§3.7. 调压井的水体振荡	(71)

§3.8.	压力调压井或空气包	(74)
§3.9.	调压井方程的积分法	(76)
第四章	特征线法	(78)
§4.1.	引言	(78)
§4.2.	水击方程特征式的推导方法	(80)
§4.3.	水击方程的特征式	(83)
§4.4.	影响区和相关区	(85)
§4.5.	平静区	(86)
§4.6.	特征方程的积分	(86)
§4.7.	边界条件	(88)
§4.8.	方格网法	(89)
§4.9.	其它有限差分法	(93)
第五章	不稳定流的可变参数	(95)
§5.1.	波速的变化	(95)
§5.2.	气体逸出	(96)
§5.3.	可变波速值和气体逸出量	(99)
§5.4.	可变波速方程的应用	(103)
§5.5.	蒸气气穴	(103)
§5.6.	摩阻计算	(105)
§5.7.	可变 f 值的应用	(106)
§5.8.	内插法	(107)
§5.9.	自由气泡量的计算	(108)
§5.10.	管路沿线内部各点的速度和势头的估算	(109)
第六章	边界条件: 泵	(110)
§6.1.	引言	(110)
§6.2.	装有单向阀的泵(只允许前向流动)	(110)
§6.3.	泵特性曲线方程的推导	(111)
§6.4.	在前向流动情况下, 泵起测功计或涡轮机的作用	(113)
§6.5.	泵的效率	(116)
§6.6.	泵的功率	(116)
§6.7.	泵的起动	(117)
§6.8.	停泵减速	(118)
§6.9.	串联在管线中的泵的边界条件	(119)

§6.10. 抽井泵	(122)
§6.11. 泵的四象限工况	(123)
§6.12. 苏特曲线的应用	(131)
§6.13. 泵起动增速达到稳定的转速	(133)
§6.14. 装有旁通阀的泵	(134)
§6.15. 泵站	(135)
§6.16. 抑制停泵引起的瞬变压力波动	(138)
§6.17. 管线充填和衰减	(142)
§6.18. 同步	(142)
第七章 其它边界条件	(144)
§7.1. 会交点	(144)
§7.2. 连结点	(146)
§7.3. 空气包	(149)
§7.4. 电动阀	(151)
§7.5. 伺服控制阀	(158)
§7.6. 水库	(159)
§7.7. 弯头	(163)
第八章 气体管网中的不稳定流动	(164)
§8.1. 引言	(164)
§8.2. 基本方程	(164)
§8.3. 特征线方程	(166)
§8.4. q 值	(168)
§8.5. 边界条件	(171)
第九章 分析管路系统的阻抗法	(173)
§9.1. 引言	(173)
§9.2. 电力阻抗与水力阻抗之间的相似关系	(174)
§9.3. 水击方程的线性化	(176)
§9.4. 线性化的水击方程的解	(179)
§9.5. γ 值的计算	(181)
§9.6. 阻抗的概念	(183)
§9.7. 接收端和发送端	(184)
§9.8. 阻抗方程	(185)
§9.9. 边界条件	(187)

§9.10. 管网的阻抗	(190)
§9.11. 谐波分析	(192)
§9.12. 强迫振荡	(193)
§9.13. 振荡阀	(194)
§9.14. 可由管网不同部位的强迫振荡而引起共振的管网	(197)
第十章 明渠中的不稳定流动	(198)
§10.1. 引言	(198)
§10.2. 明渠的不稳定流方程	(199)
§10.3. 明渠方程的特征式	(203)
§10.4. 行波	(215)
§10.5. 有行波时的自由表面流的纵断面	(217)
§10.6. 有行波存在时的不稳定自由表面流的分析方法	(218)
§10.7. 其它分析方法	(222)
第十一章 综合程序设计	(224)
§11.1. 引言	(224)
§11.2. 综合程序设计的路由(route)法或链环(link)法	(224)
§11.3. 管路描述	(226)
§11.4. 纵断面	(227)
§11.5. 上游水库	(227)
§11.6. 下游水库	(227)
§11.7. 泵的描述	(228)
§11.8. 在 Δx 区间的管路纵断面	(228)
§11.9. 程序调用	(228)
§11.10. 时段扫描	(229)
参考文献	(231)
书刊目录	(232)

第一章 简单水击理论

§ 1.1. 引言

对管网中的流动的水力分析通常建立在稳定流态的基础上，这是有历史原因的：对非稳定流态的分析与对稳定流态的分析相比在难度上要差一个数量级，只有粗略地作一些简化假设，非稳定流态的分析才有完全的可能。直到电子计算机发展到比较近代的水平，唯一可用的方法就是正待付印中的图解法，而且这些方法仅适用于简单的管网，在这种管网中水力调节是其基本特性，管路数目也不是很多。

既然可利用电子计算机，因此使得所能采用的分析方法的质量大为改善，而且不再需要把对管网的数学模拟局限于稳定流态的情况。对非稳定流态的分析可把稳定流态作为一种特殊情况而包括在内，但是这需要比稳定流态更多的资料。管网系统起动时的变化状况、达到稳定流态的过程、以及系统关闭后的瞬变状态，所有这一切都能相当精确地加以描述。常常可以发现，在稳定流态下工作时所发生的情况是较为次要的，而在起动和关闭阶段所发生的情况却更为重要。管网的各种复杂的水力调节过程都能加以模拟，但对管网的规模和复杂性受到的唯一限制是计算机存储器的容量。

水击这个名称通常是指压力瞬变过程，这个名称的由来是：当急剧升降的压力波波前通过管路时，产生一种声音，犹如用锤子敲击管路时发出的噪音。当然在事实上，所有的瞬变过程都不会产生声音，但因这个名称既已得到了如此广泛的使用，因此试图改变这个名称是毫无意义的。凡在本书中用到水击这个字的地方，都应理解为这是包括了所有压力瞬变过程在