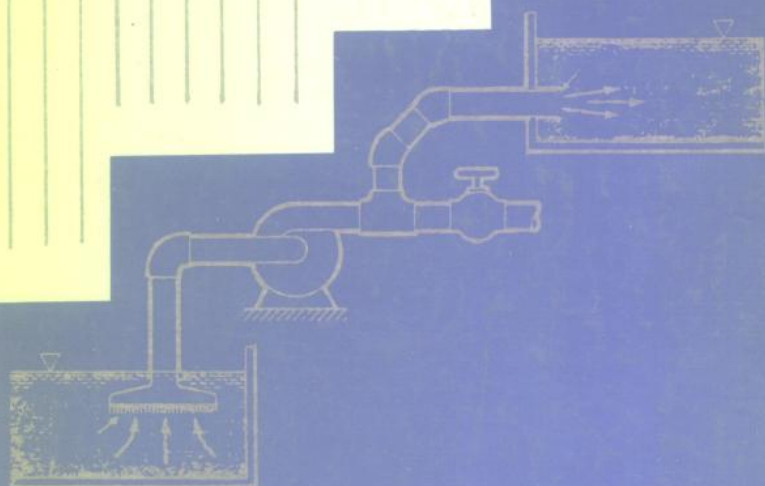
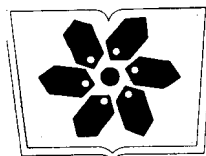


工业管道中的水锤

王学芳 叶宏开 汤荣铭 何枫 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

工业管道 江苏工业学院图书馆

藏书章

王学芳 叶宏开
汤荣铭 何

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

在工业管道中输送液体和气体时,不可避免地要发生流速的变化,这可能引起系统压力的剧增或剧减,从而诱发水锤事故。事故严重时爆破管道和设备,使工业生产陷入瘫痪,造成经济上的巨大损失。

本书是有关水锤问题的专著,内容包括理论分析和试验研究两个方面,着重讨论数值模拟计算。书中介绍了国内外水锤事故及研究现状,给出了水锤研究的基本理论和方法,涉及到许多工程领域中的水锤计算和试验,还概括了目前难度较高的研究方面。

本书可供从事核电、火电、阀门、水利、供水、输油、热水供热网、化工、流体机械等领域的科技人员参考,也可作为高等院校相应专业的高年级学生和研究生的教材或教学参考书。

工业管道水锤

王 宏开 著

潘荣铭、何 枫

责任编辑 王文芳

科学出版社出版

北京西城根北街16号

邮政编码:100071

北京朝阳大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年8月第一版 开本:850×1168 1/32

1995年8月第一次印刷 印张:12 1/8 插页:2

印数:1—1000 字数:306 600

ISBN 7-03-004660-9/TH·37

定 价: 28.80 元

前 言

《工业管道中的水锤》一书,经过作者多年的努力终于与读者见面了。“水锤”是一个既古老又新鲜的名词,在实际生活和工业发展的历程中,人们大约在 100 多年前就已经感受到水锤的破坏作用。许多学者力图寻找水锤的机理和规律,但研究中却遇到很多困难,进展缓慢,因为水锤的发生、发展和破坏都是瞬时发生的。随着现代计算机的高速发展和快速测量技术的进步,水锤的分析研究进入了一个崭新的时代。

随着我国工业的飞速发展,“工业管道中的水锤分析研究”由各工业部门陆续提出,其研究涉及到密闭输油,大城市长距离输水,火电厂和核电厂,化工厂的热力交换和循环系统,热水供热网及具有防水锤特性的阀门等。研究结果要求给出工程上水锤发生的机理和现象,水锤波传播的速度和规律,在多种事故下水锤的强度以及由此而产生的管道变形、甩摆和系统的安全性结论,以便为工程设计人员、运行操作人员、安全评审员提供工作的参考和依据。作者从 70 年代末就致力于水锤理论和水锤分析的的教学和研究工作,在 10 多年间完成了国家的“七五”、“八五”重点科技攻关项目,以及大量工程领域中的水锤分析任务。如由石油部管道局和华东输油管理局委托的“原油多泵站密闭输油的水锤计算模拟和试验研究”;由上海市政设计院委托的“城市承压长距离的输水管线的水锤分析”;由国家核安全局委托的国家“七五”重点科技攻关项目“核电厂冷却循环系统水锤计算模拟和试验研究”;由上海石油化工总厂机修厂等厂委托的“防水锤缓闭蝶式止回阀”和“旋启式止回阀”防水锤性能的研究;由中华人民共和国核工业部、中国核动力研究院、中国原子能科学研究院委托的“主管道事故断裂下的水锤力及管道变形和甩摆”,“快堆的水锤分析、水力热力系统的计

算”，“钠池液面波动”等项目。这些研究结果得到了国家各部门及国内外同行、学术界的高度评价和重视。作者和专家们认为应总结和整理所有科学研究的精华并贡献给广大读者。本书正是在这个基础上写成的，它是我国近代水锤模拟和试验研究的新发展。

本书共分十一章，涉及到有液体循环和输送的大多数工业工程领域，详细阐述了水锤发生的机理、现象、水锤分析的基本理论和方法。本书还利用了大量篇幅来阐述应用这些理论和方法解决的许多工业管道的水锤分析、计算和试验研究的问题，并给出了两个简单而有代表性系统的计算程序。由于篇幅的限制，对于工程领域的一些实际问题，只给出了计算程序的框图。本书所涉及的程序用 FORTRAN 和汇编语言编写。

本书由王学芳、叶宏开、汤荣铭、何枫共同撰写，分工如下：王学芳教授负责编写前言，第一、四、八、九章和第十一章的 11-1 和 11-2 节；叶宏开副教授负责编写第二、七、十章；汤荣铭副教授负责编写第三、五章及第十一章 11-3 节；何枫副教授负责编写第六章、主要符号表、参考文献及全书的汇总和校对工作。

本书能在今天得以出版，应该感谢国家许多部门各级领导的大力支持及同行们的关心和帮助。美国的 E. B. Wylie 教授，英国的 A. R. D. Thorley 教授、J. A. Fox 教授和日本的秋元德三教授都曾为作者提供了非常有价值的参考资料。作者还要感谢清华大学工程力学系各届领导和流体力学教研组各位教授的关心和支持，特别是 10 年前本系前系主任朱文浩教授为创建我们研究组给予的帮助。在这 10 年间，作者的硕士、博士研究生和大学生李国伟、侯宇、姚朝晖、张伟立、王仲民、蔡卫东、李锐、张锡文、李凯、黎倩云、彭晓星、丁元、吴立新等在论文阶段做了艰苦和卓越的工作，他们的研究成果融汇于本书之中。

作者感谢中国科学院科学出版基金的资助，感谢中国科学院及中国工程院两院院士张维教授这十几年来对我们研究工作和教学工作的悉心指导和关心，感谢清华大学水利电力系梅祖彦教授和王树人教授多年来对作者工作的关心和帮助，感谢王树人教授

对本书的推荐和仔细审阅.最后,衷心感谢科学出版社陈文芳副编审对本书出版所给予的精心细致的审定、编辑加工和大力帮助.此外,对为本书出版做了许多细致工作的韩标、张锡文同志,以及为本书出版给予帮助的其他同志,在此一并致谢.

作者谨以此书献给父母、家人和培育我们成长的母校——清华大学.

作者

1994年10月于清华园

主要符号表

拉丁字母符号

A	管子横截面积, m^2
A_e	当量面积, m^2
A_G	阀的开启流通面积或孔口过流面积, m^2
A_g	气相截面积, m^2
A_P	管壁横截面积, m^2
A_{s1}	水压缸上腔活塞面积, m^2
A_{s2}	水压缸下腔活塞面积, m^2
a	水锤波传播的速度, m/s ; 音速, m/s
B	$a/(gA)$, s/m^2 ; 当量特性阻抗
C	针阀流量系数; 流体容抗, m
C_D	孔口流量系数; 阀门流量系数
C_M	特征线方程的已知常数之一, m
C_m	水冲力矩系数
C_P	特征线方程的已知常数之一, m
C_v	定容比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C^+	特征线方程的名称
C^-	
C_1	描述管子约束状态对波速影响的无量纲参数
D	管径, m
d	内插单元中心到自由面距离, m ; 阀瓣直径, m
d_c	内插单元中心到自由面单元中心的距离, m
E	弹性模数, N/m^2
e	管壁厚度, m ; 阀芯转轴的偏心距, m ; 流体单位质量内能, J/kg
F	作用力, N ; 沿管的负 x 方向传播的压力波; 流体体积函数; 泄压阀泄流系数
F_f	作用在活塞上的摩擦力, N

F_T	连杆作用在阀瓣上的力, N
F_u	沿管的负 x 方向传播的速度扰动波
F_y	连杆力在 y 方向分量, N
F_1	阀瓣的重量, N
F_2	阀瓣摇臂的重量, N
F_3	配重量, N
F_4	连杆重量, N
f	沿管的正 x 方向传播的压力波; 频率, Hz; 摩擦系数
f_{ex}	激发频率, Hz
f_u	沿管的正 x 方向传播的速度扰动波
G	剪切弹性模数, N/m ²
g	重力加速度, m/s ²
H	压头, m; 在特征线网格的 $x-t$ 平面计算点上已知的上一时刻压头, m
H_A	绝对压头, m
H_G	阀门出口压头, m
H_b	大气压头, m; 阀门进口压头, m
H_R	水库恒定压头, m; 泵的额定扬程, m
H_P	在特征线网格的 $x-t$ 平面中一未知计算点的压头, m
HP	用马力表示的轴功率, hp
H_{PRV}	减压阀设定的恒定压头, m
H_s	泵的断流压头, m
H_v	饱和蒸汽压头, m
H_0	定常压头, m; 定常态阀门的压头降, m; 绝对标准大气压头, m
$\bar{H}$	平均压头, m
h	无量纲压头 H/H_R ; 阀芯位置, m; 脉动压头, m
$\bar{h}$	阀芯相对开度
I	转动惯量, kg · m ²
Im	复数的虚部
I_P	管道对中心轴惯性矩, m ⁴
i	沿管线的计算截面编号; 二维计算网格编号之一
j	沿管线的计算截面编号; 二维计算网格编号之一
J	蒸汽的凝结率

J_P	管道截面的极惯性矩, m^4
K	体积弹性模数, N/m^2 ; 绝热指数 $= C_P/C_v$; 弹簧刚度, N/m^2
K_e	液体有效体积弹性模数, N/m^2
K_q	压力脉动衰减总率
K_i	衰减率
$K_{\max}$	最大值衰减率
K'	流体和容器的有效弹性模数, N/m^2
L	长度, m ; 流体感抗, $= 1/(gA)$, s^2/m^3 ; 共振管长, m
M	质量, kg ; 马赫数; 传递矩阵
M_{el}	等效集中质量, kg
M_f	摩擦力矩, $N \cdot m$
M_G	阀门重锤力矩, $N \cdot m$
M_H	水流对阀瓣的作用力矩或水冲击力矩, $N \cdot m$
M_T	活塞通过连杆作用在阀瓣上的力矩或油缸活塞杆的阻尼力矩, $N \cdot m$
M_V	阀瓣及其配重, N ; 摇杆的自重矩, $N \cdot m$
m	活塞及连杆质量, kg
$\dot{m}$	气体质量逸出速率, kg/s ; 空气流出或流入空穴终了质量流量, kg/s
m_0	空穴中空气的起始质量, kg
$\dot{m}_0$	空气流出或流入空穴的起始质量流量, kg/s
N	转速, r/min ; 划分管子的分段数
NL	压水堆一回路并联环路数目
N_R	泵额定转速, r/min
NS	$= N+1$
N_s	比转速
n	多变指数
P_R	泵的额定轴功率, W
p	压力, N/m^2
p_g	气体分压, N/m^2
p_N	与自由液面单元相邻的内插流体单元中的压力, N/m^2
p_{p1}	活塞上腔压力, N/m^2
p_i	泄压阀开启压力, N/m^2 ; 自由液面上给定的压力, N/m^2
p_v	蒸汽压力, N/m^2

p'	脉动压力, N/m^2
$\bar{p}$	平均压力, N/m^2
p_1	活塞下腔压力, N/m^2
Q	流量, m^3/s ; 在特征线网格的 $x-t$ 平面计算点上已知的上一时刻的流量, m^3/s
Q_b	蒸汽发生器的蒸汽质量流量, kg/s
Q_h	单位时间的加热量, J/s
Q_R	泵的额定流量, m^3/s
Q_P	在特征线网格 $x-t$ 平面上一未知计算点的流量, m^3/s
$\bar{Q}$	平均流量, m^3/s
q	脉动流量, m^3/s
q_c	单位质量的气体对外交换的热量, J/kg
R	阻力系数, s^2/m^5 ; 气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 单位管长的线化阻力, N/m ; 脉动力, N
Re	雷诺数
Re	复数的实部
R_g	旋转质量的回转半径, m
R^x	作用在管道上的扭转角速度, $1/\text{s}$
R^y	管道 y 向弯曲角速度, $1/\text{s}$
R^z	管道 z 向弯曲角速度, $1/\text{s}$
r	半径, m ; 波的反射系数
S	波的通过系数; Herry 公式中溶解系数
s	复频率, $=\sigma+i\omega$
T	泵轴的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; 作用在管道上的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; 绝对温度, K
T_c	坐标转换矩阵
$T_{\max}$	最大计算时间区间, s
TOL	迭代精度
T_R	泵的额定扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
T_v	阀门全关闭所需时间, s
T_0	相长
t	时间, s
U^x	管道单元在 x 方向的运动速度, m/s
U^y	管道单元在 y 方向的运动速度, m/s

U^z	管道单元在 z 方向的运动速度, m/s
u	速度在 x 方向的分量, m/s; 沿管轴的蒸汽流速, m/s
V	速度, m/s; 沿管轴的流体速度, m/s
V_0	流体初始速度, m/s; 定常态速度, m/s
V	体积, m^3
V_g	气体体积, m^3
V_l	流体体积, m^3
V'	振荡体积, m^3
v	无量纲流量 Q/Q_R ; 速度在 y 方向分量, m/s; 比容, m^3/kg
v'	脉动速度, m/s
W	旋转部件及进入该部件液体的总重量, N
WB	无量纲泵扭矩特性
WH	无量纲泵压力特性
WR_g^2/g	旋转部分的极惯性矩, $kg \cdot m^2$
w	速度在 z 方向的分量, m/s
X	蒸汽干度
x	从管左端起距离, m; 泵的相对流动角, $=\pi+\tan^{-1}v/a$
Y	蒸汽膨胀因子
y	活塞移动距离, m
Z	自基准算起的标高, m; 水力阻抗
Z_c	特征阻抗

希腊字母符号

α	夹角; 无量纲转速比 N/N_R ; 空穴比
α_G	重锤偏转角
α_0	初始空穴比
β	夹角; 无量纲扭矩比 T/T_R ; 内插系数 d_c/d
Γ	单位体积中气体的释出率或逸出率, $1/(m^3 \cdot s)$
γ	流体的重度, $=\rho g, N/m^3$
δ	压力不均匀度; 阀门关闭角
δ_{st}	弹簧的静伸长, m; 静扰度, m
ζ	换热效率系数; 修正系数
η	汽化潜热, J/kg

θ	特征线网格比 $\Delta t/\Delta x$; 阀瓣的开启角
λ	特征线法的因子
μ	泊松 (poission) 系数
ν	运动粘性系数, m^2/s
ξ	局部阻力系数
ξ_1	单位轴向应变
ξ_2	单位周向应变
π	圆周率
ρ	密度, kg/m^3
ρ_f	流体密度, kg/m^3
ρ_g	气体密度, kg/m^3
ρ_l	液相密度, kg/m^3
ρ_p	管道材料密度, kg/m^3
σ	管壁单位应力, N/m^2 ; 复频率的实数; 凝结系数
σ_1	轴向单位应力, N/m^2
σ_2	周向单位应力, N/m^2
τ	切向应力, N/m^2 ; 阀门无量纲开度 $(C_D A_G)/(C_D A_G)_0$
Ψ	波速修正系数
ψ	加权因子
ω	角频率, $1/\text{s}$; 角速度, $1/\text{s}$; 振动频率, Hz

目 录

前言

主要符号表

第一章 绪论	(1)
1-1 水锤的基本概念及水锤事故	(1)
1-2 水锤分析的重要性	(3)
1-3 水锤研究的历史及现状	(5)
1-3-1 水锤研究的历史	(5)
1-3-2 水锤研究的现状	(6)
第二章 水锤分析的基本理论和方法	(9)
2-1 一维不定常流动的基本微分方程	(9)
2-1-1 运动方程	(9)
2-1-2 连续方程	(11)
2-2 水锤波在管道中的传播	(13)
2-2-1 波动方程 水锤波的传播速度	(14)
2-2-2 水锤波的反射与通过	(16)
2-3 简单管路中的水锤波	(23)
2-3-1 末端阀门瞬时关闭产生的水锤波	(23)
2-3-2 阀门逐渐关闭时的水锤	(28)
2-3-3 末端阀门开启时的水锤	(30)
2-3-4 含气液体中的波速、气体释放	(31)
2-4 特征线解法	(34)
2-4-1 特征线方程	(34)
2-4-2 有限差分方程	(36)
2-4-3 基本边界条件的处理	(38)
2-5 特征线法在实际管线中的应用	(43)
2-5-1 在单管上的应用	(43)
2-5-2 在复杂管系中的应用	(44)
2-6 大摩擦和衰减	(49)

2-6-1 衰减和管线填充	(49)
2-6-2 摩擦项积分的二阶近似	(51)
2-7 带插值的特征线法	(53)
2-8 泵引起的水锤计算	(56)
2-8-1 离心泵的量纲全特性曲线	(57)
2-8-2 停泵计算用的方程	(62)
2-8-3 管线中的单泵	(65)
2-8-4 串联泵系统	(68)
2-8-5 并联泵系统	(70)
2-9 蓄能器和冷凝器的边界	(71)
2-9-1 集中元件	(71)
2-9-2 考虑惯性和耗散的蓄能器	(75)
2-9-3 水冷凝器	(76)
第三章 防水锤止回阀的研究	(79)
3-1 研究目的 普通止回阀的缺陷	(79)
3-2 新阀的设计思想和结构研究	(80)
3-2-1 新阀的设计思想	(80)
3-2-2 阀门的结构特点和工作原理	(80)
3-3 阻力特性的试验研究	(83)
3-3-1 试验的理论依据	(83)
3-3-2 试验装置	(85)
3-3-3 试验测量系统及仪器	(85)
3-3-4 结果及分析	(87)
3-4 针阀流量系数的试验研究	(90)
3-4-1 试验模型	(91)
3-4-2 试验装置与测量仪器	(91)
3-4-3 针阀流量系数的估算和试验结果	(92)
3-5 防水锤关阀特性的计算和软件编制	(95)
3-5-1 关阀特性及管网水锤计算的目的	(95)
3-5-2 计算模型和基本方程组	(96)
3-5-3 求解方案及结果	(101)
第四章 新型防水锤偏心蝶阀的研究	(103)

4-1	研究目的	(103)
4-2	设计要求	(103)
4-2-1	阀门所在系统	(103)
4-2-2	阀门的设计思想和要求	(104)
4-2-3	阀门的结构特点和工作原理	(104)
4-3	阀门阻力特性的试验研究	(107)
4-3-1	概述	(107)
4-3-2	试验的理论依据	(107)
4-3-3	试验装置	(109)
4-3-4	试验测量仪器	(110)
4-3-5	试验结果分析	(110)
4-4	水冲力矩的确定	(112)
4-4-1	简介	(112)
4-4-2	测量水冲力矩的试验研究	(112)
4-5	防水锤关阀特性的优化计算	(120)
4-5-1	关阀特性优化的目标	(120)
4-5-2	数学物理模型和基本方程组	(120)
4-5-3	上下游的边界条件	(129)
4-5-4	程序设计要点及计算框图	(129)
4-5-5	计算结果和工业性试验的验证	(130)
第五章	长输水管线的水锤分析	(133)
5-1	研究目的	(133)
5-2	系统简介	(134)
5-3	事故工况下的水锤计算和分析	(136)
5-3-1	停泵水锤计算及结果	(136)
5-3-2	不变波速的液柱分离	(139)
5-4	水锤的防护措施	(140)
第六章	多泵站长距离的密闭输油管线的水锤	(149)
6-1	密闭输油的先进性及其存在的问题	(149)
6-2	水锤数值模拟分析的目的	(150)
6-3	输油管线和泵站的瞬变计算	(152)

6-4	事故工况下水锤计算的软件编制	(159)
6-5	输油管线工业性水锤试验	(164)
6-6	结论	(168)
第七章	管道中的空泡溃灭水锤	(170)
7-1	空泡的形成与溃灭	(170)
7-1-1	空泡的形成	(170)
7-1-2	空泡溃灭水锤及其危害性	(172)
7-2	气泡均匀分布模型	(174)
7-2-1	气泡均匀分布模型的基本方程	(174)
7-2-2	特征线解法	(175)
7-2-3	Lax-Wendroff 两步法	(177)
7-3	气泡离散布置模型	(181)
7-3-1	基本假设和气泡体积计算	(181)
7-3-2	模型的数学处理	(182)
7-3-3	实验验证	(184)
7-4	用 VOF 法计算截留蒸汽团溃灭水锤	(185)
7-4-1	蒸汽泡的形成与溃灭过程	(185)
7-4-2	管中液体运动的数学模型	(186)
7-4-3	确定自由液面形状的 VOF 法	(190)
7-4-4	边界条件的数学处理	(194)
7-4-5	蒸汽泡的溃灭计算	(197)
第八章	城市热水供热网的水锤分析	(200)
8-1	研究背景	(200)
8-2	热水供热网系统的水锤分析	(201)
8-2-1	最简单的热水供热模型及其水锤	(201)
8-2-2	热水供热网诱发水锤的原因	(203)
8-2-3	索引编码用于热网的水锤分析	(203)
8-2-4	基本方程和边界条件	(205)
8-2-5	供热网水锤分析计算的数理模型和模拟计算工况	(207)
8-2-6	计算结果	(208)
8-2-7	供热网水锤的防护措施	(211)
第九章	核电厂液体冷却循环系统的水锤分析	(212)

9-1	研究背景	(212)
9-2	压水堆、快堆核电厂冷却循环系统	(213)
9-2-1	压水堆核电厂液体换热循环系统	(213)
9-2-2	快速增殖反应堆换热液体循环系统	(216)
9-3	国外核电厂的水锤事故及分析	(216)
9-3-1	事故调查	(216)
9-3-2	美国 San Onofre 核电厂严重的水锤事故	(218)
9-4	压水堆核电厂一回路的水锤分析	(221)
9-4-1	一回路示意图及说明	(221)
9-4-2	一回路停泵关阀的水锤模拟	(224)
9-5	压水堆核电厂主蒸汽回路在负载调节时的汽锤 计算	(231)
9-5-1	二回路系统	(231)
9-5-2	主蒸汽回路在负载调节时的汽锤计算	(233)
9-5-3	蒸汽一元流动的基本方程	(234)
9-5-4	边界条件	(236)
9-5-5	初值计算	(241)
9-5-6	模拟工况	(242)
9-6	二回路主给水系统水锤计算	(243)
9-6-1	概述	(243)
9-6-2	系统	(243)
9-6-3	主给水系统中的重要设备	(245)
9-6-4	主给水系统水锤分析的数理模型、基本方程组及边界 处理	(248)
9-6-5	摩擦项的修正	(253)
9-6-6	模拟工况计算说明及计算结果分析	(253)
9-7	核电厂三回路水锤计算分析	(256)
9-7-1	核电厂三回路系统	(256)
9-7-2	三回路中产生水锤的主要原因	(256)
9-7-3	三回路的水锤模拟计算	(257)
9-7-4	三回路计算系统模型	(259)
9-7-5	模拟事故工况和计算结果	(260)