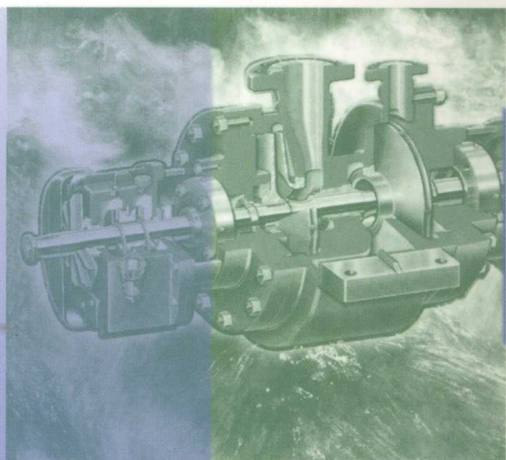


停泵水锤及其防护

(第二版)

● 金 锥 姜乃昌 汪兴华 关兴旺 编著



中国建筑工业出版社

停泵水锤及其防护

(第二版)

金 锥 姜乃昌 汪兴华 关兴旺 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

停泵水锤及其防护/金锥等编著. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2004

ISBN 7-112-06274-8

I. 停... II. 金... III. 水锤 IV. TU991.39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 122853 号

本书是水锤及停泵水锤方面的专著, 内容包括水锤基本概念和理论、水锤的各种计算方法、停泵水锤的计算原理和计算方法以及停泵水锤防护措施。

本书以工程实用为惟一宗旨, 对于重要的或复杂的水锤防护措施与工程均给出设计 (计算) 程序、电算源程序和工程实例, 以便读者采用; 同时, 以大量篇幅介绍了作者在停泵水锤防护技术与工程设计方面的最新研究成果, 特别是在“伴随有多处水柱分离停泵水锤的分析与综合防护设计”方面的成果, 并给出两个城市的工程实例。

本书供从事给水排水、农田水利、核电、火力发电、采油、输油、化工、供热、环境工程和流体机械等领域的专业科技人员使用, 亦可作为高校相应专业的高年级学生和研究生的教材或教学参考书。

* * *

责任编辑: 田启铭

责任设计: 彭路路

责任校对: 王 莉

停泵水锤及其防护

(第二版)

金 锥 姜乃昌 汪兴华 关兴旺 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 22½ 字数: 546 千字

2004 年 11 月第二版 2004 年 11 月第二次印刷

印数: 2,001—4,500 册 定价: 35.00 元

ISBN 7-112-06274-8

TU · 5534 (12288)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

序

《停泵水锤及其防护（第二版）》将与读者见面，特表示祝贺。

停泵水锤的危害是巨大的。水锤事故能造成管道破裂，设备损坏，大量漏水乃至断水；有时造成泵站淹毁，泵船沉没，人身伤亡等。大量事实与事故表明：任何先进的国家，都防止不了停泵水锤的发生。人类的努力就在于把它的危害和损失减至最小。

本书作者抓住此题锲而不舍，经过 10 年努力，终于完成此书。写书目的，用作者的话说，是“给人类做点事情”。这种身体力行的精神，在伟大中华民族复兴的启动时期，非常值得提倡。

我阅读了包括插图、电算源程序和工程实例在内的书稿，并观看了关于水柱分离实验研究的光盘。首先觉得此书以工程实用为惟一宗旨是很恰当而且是意味深长的。写书就是为了给读者看，看了以后增加知识和能力，收到实效，并在自己的工作中发挥作用。从此书的结构安排、技术内容看，是能达到这个目的的。

其次，就是书中纳入了不少在泵站水锤领域内有创新性的科研和工程设计研究的内容，其中包括作者在伴随有多处水柱分离的泵系统水力过渡过程方面的新的实验研究成果。这些成果都已用于“停泵水锤综合防护”工程的设计，故有较大的参考价值。

第三，本书很重视国家标准的规范和准绳作用，此书内容能比较全面地在工程实际中解释了国家标准《泵站设计规范》（GB/T 50265—1997）在泵站水锤防护方面的规定的要求。

感谢作者给我们带来了一本宗旨明确、内容丰富、取材新颖、概念清楚、说理翔实的具有创新性的好书。

深信此书的出版将积极推进与提高我国泵站水锤防护技术和工程设计水平；同时，对《泵站设计规范》的全面推行与实施，亦有所帮助。

窦以松

2003.9

第二版自序

《停泵水锤及其防护（第一版）》自1993年问世以来，蒙广大读者关注与培扶，已走完了它自己的途程——前几年主编人在北京举办“水锤讲习班”时曾将该书定为主教材，虽经中国建筑工业出版社和全国几个城市有关书店协助，最后也仅购得寥寥数本；而向作者询问书源者，那就更多了。从诸侧面了解到，广大读者对该书颇感兴趣，并认为：该书内容丰富，可读性强；能结合工程实际，比较实用；具有一定特色，对一些专题和难题有新的独特见解；概念清楚，说理较详尽。哈尔滨工业大学、原西北建筑工程学院和原陕西机械学院等院校有关学科的研究生将该书作为主要教材；有些设计院还依该书提出的停泵水锤分析与防护的方法和设计程序进行工程设计，反映良好。

上述评价和反映是广大读者对我们的鼓励和鞭策，其实我们自己深知，该书中错误、缺点和不足之处是不少的，主要是：创新并前进之处少，当时作者的新科研和工程设计（研究）成果，均没来得及纳入；个别地方，如单向注水消锤机理和不同型号泵并联工作时的停泵水锤计算等，论述与交代欠深；在选材和论证上，思想、观念仍很拘谨不敢展开；尤其是在最后校清样时，比较匆忙，一些明显的错误没能改正过来，以致给读者带来不少麻烦，每思及此，深感内疚！

物换星移，转眼十年过去了，在此期间我们一版作者都以不同的方式在泵站水锤防护方面做了一些新的有前进性的工作，这同时也是“十年磨一剑”的过程。“人生能有几次搏？”，我们为“搏击”，准备了“利剑”。

既然我们来到了人间，就应当给人类留下点什么。

《停泵水锤及其防护（第二版）》的撰写与出版就是我们的“搏击”，本书将留给人类；我们一定成功，因为现在我们队伍中又增加了生力军——关兴旺同志，同时又有一版的经验和教训。

在中国建筑工业出版社的大力支持下，在诸前辈和同行们的指导及帮助下，《停泵水锤及其防护（第二版）》的撰写与出版工作——“搏击”，进展顺利；几易寒暑，今天，我们可以给“搏击”结果做初步总结了。

《停泵水锤及其防护（第二版）》编写的指导思想主要体现于以下三个方面：

(1) 以工程实用为本书惟一宗旨，即以现行的国家标准——《泵站设计规范》为准绳（同时参考发达国家的有关法规），从我国泵站水锤防护工程的实际需求出发，实事求是地选材和深入地编写，使读者阅后，在自己的泵站水锤防护工作中收到实效，增强实力，能下手运作。对书中所纳作者的新科研成果（新现象、新概念、曲线、数学模型、计算原理和计算机软件等），均能为书中后续的泵站水锤防护工程的章节所实用，即转化为生产力。此指导思想，统率全书贯穿始终，而最明显地、典型地体现于本书最后一节——“伴有多

处水柱分离停泵水锤的分析与综合防护设计的工程实例”中。

(2) 增加了相当数量的在本学科领域内有创新性的科技(含工程设计研究)内容,其中主要是作者在伴有多处水柱分离的泵站管路系统水力过渡过程方面的新的实验研究成果,而且是首次较系统地公开发表,它们主要是:①首次提出完全水柱分离及两种完全断流型大空腔的概念及特点,进而建立了“多点(处)固定完全断流型大空腔数——理模型”,在前两者的基础上创立并完善了伴随有多处完全水柱分离并可能产生两种完全断流型大空腔的泵系统水力过渡过程分析计算的原理和体系,最后给出相应的工程设计方法(必要的内容与程序)和一个完整的工程设计实例,这些也是“创新(造)的主线”;②向水柱分离处单向注水以消除水锤危害的流体力学机理和“残留空腔”的新概念以及单向注水的计算与设计方法;③首次公开发表对复杂泵站管路系统(如多台不同型号泵并联、多处发生水柱分离以及多处注水或注空气等)的停泵水锤过程进行计算机动态模拟的电算源程序以及工程实例;④提出了“停泵水锤危害综合防护”的概念、作法、方案优选以及运用计算机进行动态模拟的方法和两个城市的工程实例;⑤提供出许多新的实验、实测资料及照片等,如“注水时残留空腔对消锤效果的影响”(照片)和“完全断流型大空腔(蒸汽)最大长度 CL 与弥合水锤压力 P 的关系曲线”等等。

(3) 更新思想与观念,扩大视野,与国际先进泵站水锤防护科技与工程搭桥、挂钩,取长补短,优势互补。例如,在总结国际近几十年来有关水柱分离问题研究收效不大的主要原因是“定义与概念欠清,主攻对象不明确且与工程实际结合欠紧密”的基础上,本书提出了“完全水柱分离”与“完全断流型大空腔”的现象、概念与明确定义;然后,作者又对水锤过程中所产生的空腔(空穴)分类方法,提出了新的建议。对国际上有名著作中的“疏忽”,也能在本书中做恰当的“改进”。

本书共分十一章,由金锥、姜乃昌、汪兴华、关兴旺共同撰写,分工如下:金锥负责编写绪论、第一章、第六章、第七章中第一、二节、第十章中第二、三、六、八、九、十节和第十一章;姜乃昌负责编写第二章、第三章、第四章和第十章中第一、四、五、七节;汪兴华负责编写第五章和第九章;关兴旺负责编写第七章中第三节和第八章。

本书由金锥筹划、主编并最后统稿。

在撰写本书的过程中,得到毕延龄教授级高级工程师和栾鸿儒教授的指导和帮助,在此,表示衷心的感谢。

本书中引用不少由主编人领导并始终参加运作的原西北建筑工程学院水锤科研组的实验资料、数据和部分研究成果,在此,对该科研组其他成员表示感谢,他们是:杨玉思同志、丁峰同志和周莉嘉同志。

中国市政工程华北设计研究院熊水应同志为本书的编写提供不少宝贵的科技资料 and 重要信息,在此一并致谢。

如果没有田启铭先生的鼎力支持以及与我们极为密切的合作,本书的出版是不可能的;他千里迢迢赴陕西翠华山医院,磋商出版事宜,因此,向他致谢并致礼。

再有,必须提出的是,在本书收尾之际,主编兼统稿人因病住进医院,现已将近两个月,如果没有他的亲属特别是车月璋女士的精心安排和护理,本书绝大部分书稿恐要长期束之高阁,而失去出版价值!为此,特向车月璋女士表示深切的谢意。

最后,深深感谢中国工程建设标准化协会常务理事、学术委员会副主任委员,中国水

利学会理事、泵及泵站专业委员会副主任委员，《泵站设计规范》主编窦以松教授对本书编写工作的指导并撰写序言。

我们诚恳地欢迎广大读者对书中的缺点和错误，提出批评或指正。

作 者

定稿于陕西翠华山医院

2003.9.18

第一版前言

随着四化建设的进展,各类泵站也日益增多,而如何保证泵站及管路系统安全运行,免遭水锤破坏,越来越显得重要。

停泵水锤的危害是巨大的。水锤事故能造成管道破裂,设备(水泵、止回阀等)损坏,大量漏水乃至断水;有时造成泵站淹毁,泵船沉没,人身伤亡等。

停泵水锤是一个难度较大的课题。因为它具有概念性系统性强,影响因素较复杂,计算工作量大,难于直接观察到水锤瞬间本身动态等特点。

目前,国内对停泵水锤理论、计算方法和防护措施等方面,均需进行普及提高和深入的探索。如有人对有压非恒定流动中的“压力波动”与“介质流动”的关系问题,在理解上常感困难;有人则感到计算方法懂了,但计算无从下手;水柱分离现象中的两相流动问题以及断流弥合水锤的防护措施仍需进行深入研究等等。

从50年代以来,就国内各有关部门总体而言,水锤工作成果是不少的,但是需要提炼、归纳、综合、提高和推广。可是,目前国内在停泵水锤方面比较系统公开出版的书籍还很少,不能满足客观上的需要,不利于普及和提高工作。

为树立正确的停泵水锤基本概念,掌握停泵水锤的水力学机理和计算原理;能依各种泵站的工况特点与条件正确地进行水锤计算与分析;能正确评估停泵水锤的危害程度并采取可靠而经济的防护措施,本书注意体现以下六方面特点:(1)深入浅出地加强水锤基本概念、基本理论和基本方程等的系统阐述。特别注意以波动理论统率全书;(2)对各种基本边界条件的有关内容,如水泵的全面性能曲线、水泵机组转速变化的规律、水池、阀门及管路中水柱分离现象等均做出详细论述,在讲清原理的基础上注意到边界条件的模式化及其表示方法;(3)在计算方法方面,根据各种方法的特点,着重介绍了具有奠基作用的数解综合法和能反映现代计算技术成就的电算法。对图解法则主要介绍其原理与常见算例;(4)对每一计算方法均由浅入深地按其自身的理论体系,介绍到能够实际应用的程度,并给出不同类型的生产实际算例,主要例题常用多种方法计算,通过计算结果的对比,可使三种主要计算方法互相连贯,前后呼应,在电算法中给出了 BASIC 语言的源程序;(5)对目前研讨最引人注目的水柱分离和断流弥合水锤等新课题,进行了较深入的介绍;(6)对各种停泵水锤防护措施,比较详细地介绍其基本原理、基本结构、主要特点及其适用条件。由于篇幅所限,其细部设计与计算从略。

本书供从事给水排水、农田水利、火力发电、水能利用、采油、输油等专业的科技人员和大专院校师生参考。

本书由金锥主编,第一章(第一、二、四节)及第二、三、四、八、十一章由姜乃昌编著;第五、九章由汪兴华编著;第一章(第三节)及第六、七、十章由金锥编

著。

在撰写本书的整个过程中，得到北京市市政设计院毕延龄高级工程师的指导和帮助，并作了认真审阅，提出了很多宝贵的意见。在此，表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中难免有缺点或错误，敬希读者批评指正。

主 要 符 号

x : 以泵站(或阀门)为原点,沿管轴线选取的坐标

L : 管路(线)全长

l : 管路部分长度

d 、 D : 管路直径

A : 管路断面积

L_0 : 两分离开水柱间的最大距离

K : 水的体积弹性模量、局部阻力系数

ρ : 水的密度;

γ : 水的容重

a : 水锤波传播速度

σ : 管壁应力

E : 管壁弹性模量、比能

e : 管壁厚度

H : 水头、扬程

P : 压力(压强)

V : 管内流速

Q : 流量

N : 机组的转速,有时也用 n

η : 效率

GD^2 : 机组回转部分的飞轮力矩(惯性矩)

M : 力矩、转矩;质量

ω : 角速度

J : 转动惯量,而 $J = \frac{GD^2}{4g}$;有时表示水力坡度

H_n 、 Q_n 、 M_n 、 N_n : 额定情况下的扬程、流量、转矩及转速

h : 相对水头, $h = \frac{H}{H_n}$,或相对扬程

q : 相对流量, $q = \frac{Q}{Q_n}$,有时用 $v = \frac{Q}{Q_n}$

β : 相对转速, $\beta = \frac{N}{N_n}$

α : 相对转矩, $\alpha = \frac{M}{M_n}$,有时用 $m = \frac{M}{M_n}$

H_0 、 Q_0 、 N_0 、 M_0 、 V_0 : 初始状况下的水头(扬程)、流量、转速、转矩及流速

P_v : 水的饱和蒸汽压强 (绝对压强), 而 $H_v = P_v/\gamma$

f : 水力摩阻系数

2ρ : 管路特征系数, $2\rho = \frac{aV_0}{gH_0}$, 有时称管路常数

t : 由突然停泵 (或关闭阀门) 开始算起的时间

μ : 水锤相, $\mu = \frac{2L}{a}$; 有时表示流量系数

$F\left(t - \frac{x}{a}\right)$: 直接波、初生波, 沿 x 增大方向传播

$f\left(t + \frac{x}{a}\right)$: 反射波, 沿 x 减小方向传播

h_f 、 H_f : 管路中水头损失

T_s : 阀门关闭历时、水泵启动历时

W : 流体的体积; 功率

H_s : 真空值

H_{st} : 静扬程、几何输水高

N_r : 飞逸转速

N_s : 比转速

λ : 线性比例 (尺), $\lambda = \frac{\text{原型尺寸}}{\text{模型尺寸}}$; 特征线法中乘数 (因子); 水力摩阻系数

ΔH_p : 水泵处扬程降

ΔH : 水锤升 (降) 压、事故停泵后管线首端总水头降

$|\Delta H_{\max}|$: 最大总水头降

Z : 位置水头

R : 圆管半径, 有时代表水力半径

i : 水锤分段计算中的序号

g : 重力加速度

T_a : 机组加 (减) 速时间

H_t : 水池高度

X : 泵站中同时工作的型号相同的水泵台数

Y : 同时工作的输水管根数

目 录

主要符号	
绪论	1
第一章 水锤基本概念与水柱分离问题	4
第一节 水锤波动性	4
第二节 水锤分类	11
第三节 水柱分离与断流再弥合水锤	14
第四节 停泵水锤特点	26
第二章 水锤基本理论	30
第一节 刚性水柱(锤)理论	30
第二节 弹性水柱(锤)理论	33
第三节 水锤压力波的反射和干涉	38
第三章 水锤基本微分方程式	41
第一节 水锤基本微分方程式的推导	41
第二节 水锤基本微分方程式的简化解	45
第三节 基本方程组的讨论和应用	49
第四节 水锤共轭方程式	54
第四章 水锤计算图解法	59
第一节 水锤波的传播和反射图式	59
第二节 边界条件	60
第三节 图解法举例	62
第五章 水锤数值解原理和电算方法	66
第一节 特征线方程式	66
第二节 边界条件方程式	70
第三节 简单管路暂态流动的计算程序	74
第四节 几种复杂管路的计算方法	79
第六章 停泵水锤计算原理	87
第一节 停泵水锤技术特征及基本方程式	87
第二节 停泵水锤计算综述	95
第三节 水泵—水轮机机组的惯性方程式与突然停泵后机组转速变化规律	98
第四节 叶片泵(离心泵)的全面性能曲线或四象限特性曲线	101
第五节 最低水头包络线与水柱分离	116
第六节 水柱分离与断流空腔的波动分析及物理——数学模型	122
第七节 水锤波在完全断流型大空腔边界处的反射	125
第八节 向水柱分离处注入空气时停泵水锤的计算原理	132
第九节 向水柱分离处单向注水时停泵水锤的计算原理	139

第七章 停泵水锤计算的数解综合法	151
第一节 数解综合方法与步骤	151
第二节 向水柱分离处注入空气时停泵水锤计算方法与步骤	155
第三节 停泵水锤计算举例	157
第八章 停泵水锤计算的图解法及简易图算解法	207
第一节 无阀管路停泵水锤图解	207
第二节 有止回阀管路停泵水锤图解	214
第三节 停泵水锤计算的简易图算解法	216
第九章 停泵水锤计算的电算法 (I)	220
第一节 叶片泵全面性能曲线的改造	220
第二节 事故停泵时泵处的边界条件方程式	226
第三节 停泵水锤中泵处暂态参数的计算方法	228
第四节 无阀管路停泵水锤	230
第五节 有阀管路停泵水锤	234
第六节 有防止负压自动进气装置的管路停泵水锤	237
第七节 管路中发生断流(汽)的停泵水锤	244
第八节 不同型号泵并联工作的停泵水锤 (I)	246
程序一 无阀管路停泵水锤计算源程序	251
程序二 有自动进气装置的管路停泵水锤计算源程序	253
程序三 考虑结点2发生断流(汽)的有普通止回阀管路停泵水锤计算源程序	256
程序四 不同型号泵并联, 设置缓闭阀, 并考虑断流(汽)管路停泵水锤计算源程序	258
第十章 停泵水锤防护措施	262
第一节 调压塔——双向调压塔	262
第二节 单向调压塔和单向调压池	263
第三节 注空气(缓冲)用阀	273
第四节 空气罐	276
第五节 停泵水锤消除器	281
第六节 蓄能式液控缓闭蝶阀	284
第七节 缓闭止回阀	286
第八节 采用转动惯量大的水泵机组或增装惯性飞轮	288
第九节 其他防护措施	298
第十节 防护措施的选择	300
第十一章 停泵水锤计算的电算法 (II) ——专题	305
第一节 不同型号泵并联工作的停泵水锤 (II)	305
第二节 水锤过程中“阀门控制”的计算机动态模拟	316
第三节 伴有多处水柱分离的停泵水锤及其综合防护的计算机动态模拟	322
第四节 伴有多处水柱分离停泵水锤的分析与综合防护设计的工程实例	328
新程序一 多台不同型号泵并联(两大一小)、无防护措施泵系统停泵水锤计算机 动态模拟电算源程序	337
新程序二 多台同型号泵并联、四处同时单向注水并双阀控制的停泵水锤综合防护 计算机动态模拟电算源程序	341
主要参考文献	346

结 论

在压力管流中因流速剧烈变化引起动量转换，从而在管路中产生一系列急骤的压力交替变化的水力撞击现象，称为水锤现象。这时，液体（水）显示出它的惯性和可压缩性。

水锤也称水击，或称流体（水力）瞬变（暂态）过程，它是流体的一种非恒定（非稳定）流动，即液体运动中所有空间点处的一切运动要素（流速、加速度、动水压强、切应力与密度等）不仅随空间位置而变，而且随时间而变。

现在，国内外普遍将泵站管路系统中所发生的多种多样的水锤现象，一律称为“泵站管路系统水力过渡过程”，这一名词不仅覆盖了所有泵站水锤现象，而且科学地概括了在泵站管路系统中，从某一稳定状态过渡到另一稳定状态的过程中所发生的非稳定的一切。

水锤现象的延续时间虽然短暂，但它会造成严重的工程事故。如果在水锤过程——水力过渡过程中，在管路中发生水柱分离（现在最新的说法称为大空腔现象——MACRO-CAVITATION）和断流空腔再弥合水锤，则其破坏力更为严重。

水锤成灾的实例是多种多样的。例如，水电站水轮机甩负荷时，为限制转速上升而关闭水轮机导叶，这时压力水管内就产生压力上升；如果关闭导叶时，操作失误，则水锤成灾，国外就曾发生过由于水锤危害致使整个水电站被冲毁。

在安装有离心泵的水泵站中，因突然事故断电或其他原因而突然（开阀）停泵时，则在压水管内首先产生压力下降；随后视流速大小及管路系统情况而产生程度不同的压力上升，即停泵水锤，严重时将造成灾害。

泵站中发生水锤事故的现象，是较为普遍的，其中以地形复杂、高差起伏较大的我国西北、西南地区，尤为突出。根据以前各地区 200 次以上有记录的水锤事故调查可看出：泵站中多数水锤事故的结果是轻则水管破裂，止回阀的上顶盖或壳体被打坏大量漏水，造成暂时供水中断事故；重则酿成泵站被淹毁，泵船沉没等严重事故。个别的，还因泵站水锤事故，造成冲坏铁路路基、损坏设备、伤及操作人员造成人身伤亡等次生灾害。东北某给水加压站，1977 年 3 月，因检修电路，人为拉闸后，下开式停泵水锤消除器动作，阀板下落；检修后又重新供电，但消除器尚未复位，必须立刻解决。有二位工人去复位，这时消除器排水很急，工人先按规定关闭消除器与主管间闸阀，已锈死关不动，情急之下将阀板（弁）向上抬起，结果导致二次水锤，消除器上盖被打破、打开，不幸有重器物击中一人头部，再加上水冲、水闷致死，教训惨痛！

在农田灌溉泵站中，常因扬程高、流量及功率均较大，故其水锤危害及影响毫不亚于给水工程系统，人们还特别将泵站水锤的危害列为泵站三害（即水锤、泥砂、噪声）之首。

在火电厂循环水系统中，因停泵水锤引起的最低、最高压力、最大倒流量及机组最大反转数等最不利参数，乃是系统设计的主要依据；不合理的设计往往导致浪费，或使设备及管路等遭到破坏。近年来，现场测试证明，循环水系统中因水柱分离而引起的断流空腔

再弥合水锤现象是相当严重的；特别是近来因采用了轻型的立式泵、较长的管道和更大的虹吸高度，就更易于发生断流空腔再弥合水锤。

几乎所有的水锤专家们都一致认为：对现已发生的水锤危害事故，必须如实地彻底查明其起因，此乃推动水锤防护工程与技术发展的巨大动力。

但是，“如实地彻底查明起因”，是件相当困难的事情；仅从技术角度看，水锤成灾也是越来越复杂化、综合化、跨专业和非典型化了。请看下述媒体报导。

1995年7月8日晚8时许，湖南省长沙市五水厂一泵房发生重大淹机停水事故，致使省会河东部分地区约30万人酷暑季节停水3天，给人民生活和生产带来严重困难和影响，这次事故的直接经济损失约50万元。在省委领导下长沙市于7月12日组成了联合调查组。本着科学求实、客观公正的原则，经过半个多月的周密调查，在取得大量确凿证据的基础上，做出了正确的调查结论：“‘7.8’淹机停水事故，是一起由多种因素综合造成的社会影响大、经济损失严重的重大责任事故”。

长沙“7.8”重大停泵综合水锤事故，已经过去了整整8年，但作者深知，对其主要起因，国内有关专家间，在看法上尚未完全一致。

我国多丘陵地区，该处远距离输水工程中管线长、流量大，管中流速一般较大，沿线地形起伏点多，多处小丘顶点标高有时比管末端出口水面标高还高。另外，近几年来水泵机组转动惯量(J)显著减小，因此，当发生停泵水锤时，整个泵系统中水压猛降，最低水头包络线普遍低于输水干管轴线，从而导致多处发生水柱分离，随后极易产生具有破坏性的断流空腔再弥合水锤。在这种复杂情况下，传统的、单一的水锤防护措施很难奏效，必须同时采用多种停泵水锤防护措施，即进行“有重点的综合防护”，“重点”就是首先防止事故停泵后整个泵系统中出现真空。这种新问题引发出新的观念。

由此可见，按照各种泵系统工作的特点与条件，正确地进行停泵水锤计算，全面地实事求是且有预见地进行水锤分析，从而采取安全可靠、管理方便、经济实用的水锤综合防护措施，是有关设计（研究）及生产管理部门的当务之急，也是确保泵站安全输水的重要前提。

但是，由于水锤现象是一种瞬态流动现象，它在一定程度上阻碍人们对水锤的物理性质和微观机理做进一步的深入了解。

对泵站中水锤现象的实验研究，目前有实验室试验和现场试验两种方式。一般讲，这两种研究方式都存在着各自的优缺点。实验室试验方式虽然能有比较宽的工况试验范围，便于造成各种特定的试验条件和边界条件等，但进行这样的研究，通常需要一整套昂贵的水工、水机装置和相应的精密量测手段，而且其试验结果仍还存在比例效应和缺乏某些工况相似等问题。同样，现场试验方式对特定条件下的装置虽然其试验数据具有较高的真实性，但常受到现场条件的限制，故对许多水锤问题的分析仍必须建立在研究水锤过程某些不同效应的基础上，而无法依赖于直接观察现象本身。另外，现场试验具有相当大的冒险性，很容易发生破坏性事故，一般生产单位很难提供试验条件。这些都是造成对水锤危害的消除、控制和研究仍达不到完满程度的原因，尽管人们很长一段时期以来都已确实认识到泵站及管路系统中水锤危害的严重性。

最近20余年是伟大中华民族复兴的启动时期，各种各类高新产业发展极快，各类城镇与工业企业的供水事业蓬勃发展。高扬程、大流量、长距离地形复杂的输水管道工程日

益增多（仅中国市政工程华北设计研究院一个单位。自 1978 年以来承担和参加的国内大型长距离输水工程累计达 18 项之多），各种类型复杂的工业管道也越来越多。随着西部大开发，这种形势将有序地持续下去。因此，如何保证各类泵站管路系统安全运行，免遭水锤破坏，就越来越重要和迫切。

在具体的技术条件下进行水锤分析并判断其危害程度以及采取何种防护措施并预测其技术经济效果，都要以相应的水锤计算为基础。因此，在正确掌握泵站水锤水力学机理及其技术特点的基础上，进行泵站水锤计算方法的研究并将研究成果尽快地应用于工程实际中去，从来就是水锤专家们的主要工作。

关于停泵水锤的计算，从方法上分，有数解综合法、图解法和电算法（特征线法）等。从计算的目的上分，有水锤危害的预估算及精确计算。

在这里要特别强调，停泵水锤的计算，系统性概念性很强，起点高，影响因素复杂、跨多个专业，因而计算难度高，工作量很大，因此必须牢固地掌握好各种水锤（含水柱分离）的基本概念及技术特点，从而能合乎逻辑地抽象概括出比较正确的水力学——数学模式，进而引入必要的假设和相应的边界条件后，方能开始计算；按照国际惯例，对于复杂的泵站管路系统的水锤分析及其综合防护设计，必须应用以特征线法为基础的电算法，进行计算机动态模拟。但是，应用瞬变流理论来分析和计算实际复杂泵系统的计算模型、方法和软件，均属知识产权保护的范围，故非常少见。有鉴于此，作者依国家建设需要，根据我国国情，在本书中特增加专门研讨和叙述“计算机动态模拟”的第十一章，并给出两个在工程实际中已多次应用过的软件。

第一章 水锤基本概念与水柱分离问题

概念，是事物的本质、事物的全体以及事物的内部联系等的综合与科学抽象。对“水锤和停泵水锤”以及“管路中水柱分离”问题树立起正确的基本概念是学习和研讨它们的首要基点。

通过本章第一节，要树立起水锤波动性的基本概念。通过第二、三节，要对水锤的类型、它的成因、水锤波动是否连续（即是否出现水柱分离）以及研究方法等方面有一个宏观的总体概念。控制停泵水锤乃本书之主旨，通过第四节，可对停泵水锤问题树立起工程与技术方面的基本概念。

第一节 水锤波动性

一、水锤波动现象

波动是物质的一种运动形式，也是能量传递的一种方式，而振动是产生波动的根源。

波动可分为两大类：一类是由于机械振动在弹性介质中引起的波动过程，叫做机械波，例如水波、声波以及在液态和固态内部传播的弹性波等。水锤波动是液体（水）的压力振动在弹性液体介质（水）内所引起的波动过程，因而属于机械波动。另一类则是电磁波。电磁波是由于电磁振荡所产生的交替变化的电场和磁场在空间的传播过程，例如无线电波、红外线、可见光、紫外线等都是电磁波。电磁波的传播不需要介绍（媒质），在真空中亦能传播。

机械波的产生，首先要有产生机械振动的物体，称为波源；其次是要有能够传播这种机械振动的介质。波源在弹性介质中振动时，通过弹性力的作用，可以影响介质，使它们也陆续地发生振动，即波源能够把振动向周围介质传播出去。如前所述，这种机械振动的传播过程称为机械波动或机械波。

应特别提出，机械波动传播时，各质点仅在它们各自的平衡位置附近振动，并没有在波动传播方向流动或继续前进，即波动是运动状态的传播过程而不是运动质点的流动。通过下例，读者可形象地抓住其要领。

一列以一定速度前进的老式火车列车，由于某种原因而使机车急刹车时，首先是机车停住，而它后面拖着的列车并不马上都能停住，它们由于惯性作用仍继续前进。紧靠机车的第一节列车厢先停住（其他列车厢仍在前进），并与机车相撞击，发出声响，使两者间的缓冲器弹簧受压缩。接着，同样的现象在第二节列车厢处发生。随后，是第三节、第四节等，如此类推，最后缓冲器弹簧均被压缩，整个列车厢到达全停的状态。人们加以注意便可看出，列车厢的撞击声和缓冲器弹簧的压缩等现象，都是由机车向列车尾部传播的，其方向与列车前进方向相反。

最后一节列车厢（尾车）只能暂时地停住，因为已被压缩的缓冲器弹簧的恢复力使该