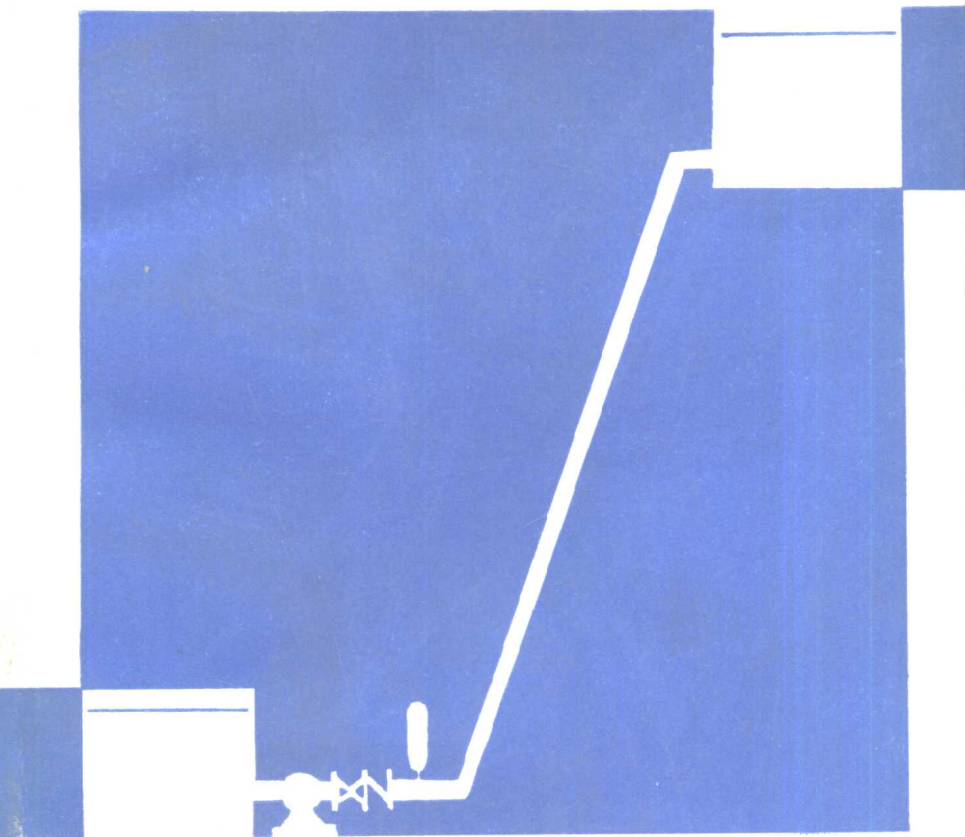


停泵水锤 及其防护

金 锥 姜乃昌 汪兴华 编著

中国建筑工业出版社



86.63
9300433

停泵水锤及其防护

金 锥 姜乃昌 汪兴华 编著

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书系统介绍了停泵水锤的公式推导和多种计算方法，
列举了计算实例和代表性电算成果。并简介了各种水锤防护
措施、设备的特点和适用条件等。

本书可供给水排水、农田水利等专业技术人员使用。

* * *

责任编辑 魏秉华

技术设计 黄 燕

责任校对 臧红心

停泵水锤及其防护

金 锥 姜乃昌 汪兴华 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

北京顺义燕华印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 16³/₄ 插页: 2 字数: 377 千字

1993年2月第一版 1993年2月第一次印刷

印数: 1—2,100 册 定价: 7.80 元

ISBN 7—112—01824—2/TU·1394

(6849)

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帅全书；(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作出详细论述，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 : 两分离水柱间的最大距离
 K : 水的体积弹性模量、局部阻力系数
 ρ 、 γ : 水的密度
 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
 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, $h = \frac{H}{H_n}$

q : 相对流量, $q = \frac{Q}{Q_n} = v$

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、流量、转速、转矩及流速

P_v : 水的饱和蒸汽压强 (绝对压强)

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 : 水力半径; 圆管半径

i : 水锤分段计算中的序号

g : 重力加速度

T_s : 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	5
第一节 水锤波动性	5
第二节 水锤分类	20
第三节 管路中的水柱分离	23
第四节 停泵水锤特点	31
第二章 水锤基本理论	38
第一节 刚性水柱(锤)理论	38
第二节 弹性水柱(锤)理论	44
第三节 水锤压力波的反射和干涉	53
第三章 水锤基本微分方程式	59
第一节 水锤基本微分方程式的推导	60
第二节 水锤基本微分方程式的解	66
第三节 基本方程组的讨论和应用	74
第四节 水锤共振方程式	85
第四章 水锤计算图解法	93
第一节 水锤波的传播和反射图式	93
第二节 边界条件	95
第三节 图解法举例	99
第五章 水锤数值解原理和电算方法	108
第一节 特征线方程式	109
第二节 边界条件方程式	117

第三节	简单管路暂态流动的计算程序	124
第四节	几种复杂管路的计算方法	132
第六章	停泵水锤计算原理	148
第一节	停泵水锤技术特征及基本方程式	148
第二节	停泵水锤计算综述	166
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	171
第四节	叶片泵（离心泵）的全面性能曲线或四象限特性 曲线	177
第五节	最低水头线与水柱分离	201
第六节	水锤波在断流空间边界处的反射	211
第七节	向水柱分离处注入空气时停泵水锤的计算原理	223
第七章	停泵水锤计算的数解综合法	235
第一节	数解综合方法与步骤	235
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	244
第三节	停泵水锤计算举例	248
第八章	停泵水锤计算的图解法	359
第一节	无阀管路停泵水锤图解	360
第二节	有止回阀管路停泵水锤图解	370
第三节	长吸水管路水锤图解	373
第四节	水泵启动和停车的水锤图解	375
第九章	停泵水锤计算的电算法	377
第一节	叶片泵全面性能曲线的改造	377
第二节	事故停泵时泵处的边界条件方程式	383
第三节	停泵水锤中泵处暂态参数的计算方法	392
第四节	无阀管路停泵水锤	394
第五节	有阀管路停泵水锤	403
第六节	有防止负压自动进气装置的管路停泵水锤	409

第七节	管路中发生断流的停泵水锤	421
第八节	不同型号泵并联工作的停泵水锤	424
第十章	停泵水锤计算的其它方法	453
第一节	装有普通止回阀管路断流弥合水锤最大压力值的 计算	453
第二节	停泵水锤计算的简易图表解法	467
第十一章	停泵水锤防护措施	483
第一节	调压塔	483
第二节	空气罐	487
第三节	停泵水锤消除器	497
第四节	缓闭止回阀	505
第五节	快闭止回阀	510
第六节	重锤蓄能式自闭蝶阀	511
第七节	其它防护措施	513
第八节	防护措施的选择	517
主要参考文献		525

绪 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。

早在二百多年前，英国的一位钟表匠约翰·怀特赫尔斯特(John·Whitehurst)首先利用压力管流中的这种水锤现象，为当地的啤酒厂制造了一台早期的水锤泵，这台泵就是世界上最早的一台由人工操纵的水锤泵。3年后，法国第一个热气球发明人蒙特高菲尔(Montgolfier)以同样的水锤原理，发明了一台能自动工作的水锤泵，省去了人力控制。

19世纪中叶在欧洲的一些城市给水工程中，修建了不少设有以蒸汽机为原动机的活塞泵泵站的供水系统。由于活塞泵的活塞是通过曲柄——连杆机构来驱动的，活塞在泵缸内的往复运动是周期性的变速运动。虽然人们可以增设一些调节(均衡)设施，但输入城市给水管网中的流量还是不够均匀，仍呈现非恒定流动。所以，在当时的城市供水管网系统中，经常出现水锤现象，轻则水泵机组产生振动和水力撞击噪声，严重时，水泵机组震坏，管道锤裂造成停水事故。

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；如因事故停泵在管路中产生水柱分离和断流弥合水锤，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它原因而突然（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。

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，

就更易于发生断流弥合水锤。

由此可见，按照各种泵站工作的特点与条件，正确地进行停泵水锤计算，全面地实事求是地进行水锤分析，从而采取有效的水锤防护措施，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。

对水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。

对泵站及管路系统中的水锤问题，一直是国内外研究和防治的重要课题。建国40多年来，随着工农业的日益现代化，高扬程、大功率的大型泵站及大口径、长距离输水系统的广泛修建，因而进一步研究泵站供水系统中水锤发生的机

理、计算、预测方法及有效防护措施，就显得十分迫切。

目前，在我国正在推行各种类型的防护措施（如水锤消除器、液控蝶阀、缓闭止回阀、进气阀、爆破膜片和空气罐等），均处在不断更新和完善中。

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估其技术经济效果，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，从来就是水锤研究者的主要工作。

关于停泵水锤的计算，从方法上分，有数解综合法、图解法、电算法等。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，不拟叙述各种计算方法的内容，只特别强调提出，停泵水锤的计算，系统性概念性强，起点高，影响因素复杂，因而计算难度高，工作量大，因此必须：

（1）掌握好基本概念及技术特点，从而抽象出比较正确的水力学模式，进而引入必要的假设和前提后方能开始计算；

（2）计算结果既要准确，也要节省计算工作量，因此必须推广使用以特征线法为基础的停泵水锤电算法，这在国内尚属起步的课题。为了满足这两点要求，本书详细地介绍了数解综合法（它不仅综合运用了各有关的基本概念、基本理论、基本公式及泵的性能曲线，且侧重于阐述原理）和电算法（源程序用比较简便易学的BASIC语言编写，而且在易于推广的经济的PC-1500型袖珍计算机上操作）。

总的说来，对停泵水锤的研究，主要朝两个方向发展，一是研究水锤过程机理及预测计算方法；二是研究水锤防护方法及其设计。本书着重针对这两个方向，结合较新的研究成果，作一比较系统的介绍并对重要问题进行讨论。

第一章 水锤基本概念

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”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质（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，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（其它列车厢仍在前进），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车厢要向后退，这种后退的现象是由尾车向机车方向蝉联地传播的。当这种现象抵达机车时，除机车外的整个列车在此瞬间是向后退的。由于机车已固定不动，且因惯性，所以第一节车厢的缓冲器弹簧就受到拉伸，同时本身停止后退，瞬时速度为零。这种现象向尾车传播，当抵达尾车时，整个列车停住（瞬时速度为零），此