

[日]秋元德三 著

支 培 法
徐 关 泉 译
严 亚 芳

水 击 与 压力脉动

增 订 版

电力工业出版社

内 容 提 要

本书主要是通过计算方法、实测资料以及物理概念的阐述对水击和压力脉动进行较全面的分析。

第一篇水击, 主要介绍水击波的传播, 用弹性理论和刚体理论建立水击基本方程, 管路阀门启闭后的水击计算以及分段关闭、调压阀等问题。本篇引用实测资料较多, 阐述详细, 对研究管路阀门启闭的水击计算有参考价值。

第二篇压力脉动, 主要介绍各种管路(异径管、分叉管、孔口管及旁通管等)压力脉动的物理现象, 压力脉动物理特性的计算方法以及防止管路共振的措施。本篇内容较新、比较实用, 可供研究管道振动和噪音等问题参考。

本书可供水力机械设计、水火电厂管路系统设计、管道工程(水、油管道)、泵站和民用配管等方面的工程技术人员参考, 并可供有关科研单位和理工科院校师生参考。

水撃作用と压力脈動

(増補版)

秋元 徳三

日本工業新聞社 昭和52年

水击与压力脉动

(増订版)

[日]秋元徳三著

支培法 徐关泉 严亚芳译

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 18.5印张 406千字

1981年2月第一版 1981年2月北京第一次印刷

印数 0001—3170册 定价 2.00元

书号 15036·4168

初 版 前 言

水击方面的文献，早期的以阿利也维（Allievi）的名著开始，以瑞希（Rich）、叶格尔（Jaeger）等人的著作比较有名。近期比较著名的有派玛京（Parmakian）的水锤分析（Waterhammer Analysis, 1955）、斯特里特（Streeter）与威利（Wylie）合著的水力暂态（Hydraulic Transients, 1967）。

派玛京的著作已经由小堀和横山译成日文〔パーマキヤン，水撃解析法，コロナ社，（昭44）〕。该书图解法叙述很详细，适用于设计技术人员。

据说斯特里特和威利的合著在本书编写时也在译成日文，将由日本工业新闻社出版。该书除详细叙述计算机计算水击的方法外，对水击学科的新领域叙述也较多，对研究水击的人来说值得一读。

其他，在水力学书上都谈到水击，但是内容上往往多偏重于设计，对物理概念说明较少。

作者从1952年前后开始，有十年之久从事水电站吉普逊测流、调速器试验和压力脉动等水击现场试验研究工作。对我们现场技术人员来说首先要知道的问题，不是什么“根据计算结果如何”或者“根据弹性理论（或刚体理论）结果如何”，而是“现象产生的缘由如何”或者“哪种现象可以用刚体理论求解”等。然而，写这方面的书却还没有。

又，阿利也维建立的水击理论，作为一种水击计算方法

也许不及波格龙 (Bergeron) 和施奈德 (Schnyder) 图解法, 但对了解水击的物理概念却非常有益。

可是, 由于图解法的广泛应用, 对阿利也维理论的叙述逐渐减少。在作者学生时期《机械工学便览》上曾经登载过的阿利也维理论, 最近被删去了。这也是近年来旧式产品连零件也没有的消费经济的结果吧, 令人苦笑。但是, 到了最近, 计算机计算方法发展以来, 与只知道用计算机计算的从事水击工作的技术和研究人员经常接触后, 深感光是苦笑不行。

虽然阿利也维的逐步计算法和波格龙、施奈德图解法确可认为是水击工作者的福音, 但在这些方法上就存在出错的陷阱, 例如, 逐步计算法要计算大数值之差, 有效数位不足引起误差, 图解法则存在作图误差, 即使在公开发表的论文中有时也明显存在这种误差。由计算机引起的误差比起上面来更令人担心, 因而作者总是认为没有掌握物理概念前不许使用计算机, 不仅限于水击是如此。

从上述情况出发, 作者认为将掌握物理概念方面探索所得成果汇集起来, 是我们曾学过阿利也维古典理论者的义务, 这就是编写本书的缘由。

水击现象因边界条件不同有很大变化, 要叙述其一般倾向是困难的。可是, 如果对可以求解的情况求出一般规律, 将它们综合起来就不难从物理上掌握各种边界条件下的水击现象。

由于本书采用这种可说是间接的方法来说明物理概念, 所以在性质上不是一本供生搬硬套的书。相反, 如套用局部内容来说明某一现象的物理概念, 有可能犯大错误。

本书使用的算式只要具备大学初期的数学知识就能完全

理解。本书内容在工程学方面估计没有问题，在数学方面难免有错，如发现有错请予指正。

希望本书有助于从事水击工作的技术人员了解水击的物理概念。如果多少有些作用，应当归功于一直给作者关心、指导和帮助的国内外各位，借此机会向他们表示深切感谢。

又，本书编写时很多地方作了新的探讨，是一次很好的学习机会，这要归功于促进本书编写的日本工业新闻社出版局菊地先生，在此也向菊地先生表示深切感谢。

秋元德三

1972年4月5日

增订版前言

在编辑向我提出本书再版发行以前，就想如有可能要出版一本修订版，希望修订的内容如下：

第一，增加计算图表。

在初版时，对比较简单的公式认为计算简便，谁都可以自己计算，往往就不再用计算图表表示。作者试用本书时感到很不方便。为要了解现象的物理意义，需要概略估计与现象有关各因素的数值及其变化倾向，这时就不能依靠公式而必须利用图表。

第二，近似误差的估计。

本书有些部分采用忽略平方以上项所得近似解。为了解现象的物理概念务必需要定量知道省略的影响。然而，这些近似解中多数是因为不能简单求解不得已求近似解的。在这种情况下，了解近似解的误差与省略项中有关因素的关系，对大致估计误差也很有用处。

第三，修订一些不确切的说明和订正一些用语，不过后者不多。

第四，初版发行后，作者进行的研究，现场试验的经验，以及回答国内外各方面提出的问题进行的探讨等方面获得新的成果，其中适合本书的水击方面的通用内容需要在修订时增入。

但是，和编辑磋商结果，认为全面重写一本修订版价格较高，同时希望尽量价廉以便更多人阅读本书，决定出版增

订版。

增订版执笔时，对初版图、公式和章节安排均保持不变，对能够插进去的部分进行订正，插不进去的部分则在各章末尾另设新节阐述。而与新节所述内容有关的部分标了*号，请参看后面的新节。这样做会给读者带来阅读困难，请予谅解。

在本版中订正最多的部分是 3-2-3(a) 项、3-3-2 项和第四章的第四节。

3-2-3(a) 项和第四章第四节仅订正了说明不妥的部分和文字加工，内容上没有多大改动。

3-3-2 项的订正是因为采用了更恰当的推导方法重新推求公式，结果与初版时不同，在增订版中作了订正，并致歉意。

初版发行后，蒙各界提出各种宝贵意见和问题，就中遇到最多的问题是水击计算结果是否与实际现象一致，作者对这个问题的回答是，计算使用条件与管路和机器的实际相符时两者是一致的。

事实上，在实验室里为验证理论的实验结果与理论结果很一致，在最简单的水电站管路中，即使末端条件为特性复杂的水泵水轮机，很多报告也表明计算结果和理论结果很相符。

但是，在一般的工业配管中，计算条件多数情况与实际条件不符。

其中最主要的问题是管道内积存气体。如本书所述，只要有非常少的气体积存，水击和压力脉动现象就会有很大改变，而且这种改变不一定是压力变化或者说振幅比没有气体时小，有时反而增大。

其次，一个大的问题是阀门动作，特别是象逆止阀和排

气阀等自动阀门，各个机器有自己独有的特性，或者由于常年的变化等原因，使所发生的现象往往应当按阀门动作每个都有不同特性考虑。

尤其是压力脉动，如本书所述，计算结果与实际现象不同是一个带有根本性的问题。

如上所述，多数情况实际工厂管道的条件与设计拟定的不同，因而可以说多数情况计算结果与实际不一致。

特别是，在查究事故或特异现象的原因时，用一种计算往往不能说明现象，反过来，为了与实际发生现象一致，改变各因素数值进行计算，这样做不说是笨也可说是可叹的。

这种情况下，作者认为重要的是首先要考虑现象的物理意义，应该仔细研究是否存在设计所未包括的条件。

在计算机发达的今天，用普通台式计算机可以计算的问题，在本书中还进行详细阐述，其意义也就在此。

在初版时已经说过，在此还要再次表示，本书如对从事水击工作的各位了解水击现象的物理概念有所助益，作者深感荣幸。

最后，向允许发表贵重资料的有关方面，向给作者提出质问引起作者进行新的研究的有关方面，以及向对增订版再次给以种种帮助的日本工业新闻社菊地先生表示感谢。

秋元德三

1976年12月13日

主 要 符 号

x ：	以压力变化发生端为原点，沿管轴线选取的坐标	(米)
L ：	管路全长	(米)
l ：	管路部分长度	(米)
d ：	管路直径	(米)
H ：	任意时刻在 $x = 0$ 点的压力水头 (以 $x = 0$ 点的标高为基准)	(米)
H_x ：	任意时刻在 $x = x$ 点的压力水头与以 $x = 0$ 点的标高为基准的位置水头之和	(米)
H_0 ：	$x = 0$ 点的静水头 (以 $x = 0$ 点的标高为基准)	(米)
h_L ：	水头损失	(米)
$F(t)$ ：	压力进行波	(米)
$f(t)$ ：	压力后退波	(米)
P ：	周期性变化之压力进行波的振幅	(米)
$\mathcal{A}_p$ ：	压力脉动振幅	(米)
t ：	以压力变化开始时刻为基准的时刻	(秒)
T ：	末端阀操作时间或现象发生过程的时间	(秒)
$\mu (= 2L/\alpha)$ ：	$x = 0$ 点至管路端压力波往返所需的时间	(秒)
$\mu_x (= 2(L - X)/\alpha)$ ：	$x = x$ 点至管路端压力波往返所需的时间	(秒)
$M_{0L} \left(= \int_0^L \frac{dx}{a} \right)$ ：	$x = 0$ 点至管路端的管路系数	(1/米)
$M_{xL} \left(= \int_x^L \frac{dx}{a} \right)$ ：	$x = x$ 点至管路端的管路系数	(1/米)
f ：	压力脉动频率	(赫)
a ：	管路断面积	(米 ²)
v ：	任意时刻在 $x = 0$ 点的管内流速	(米/秒)

v_x : 任意时刻在 $x = x$ 点的管内流速 (米/秒)
 v_0 : 末端阀开始关闭前及末端阀开启后压力变化稳定时的管内流速或管内平均流速 (米/秒)
 $\mathcal{A}_0$: 脉动流振幅 (米/秒)
 α : 压力波传播速度 (米/秒)
 $\phi(t) [= (Q/\sqrt{H})/(Q_0/\sqrt{H_0})]$: 末端阀开度比
 Q : 任意时刻 $x = 0$ 处管路中的流量 (米³/秒)
 Q_x : 任意时刻 $x = x$ 处管路中的流量 (米³/秒)
 Q_0 : 末端阀关闭前或末端阀开启后压力变化稳定时管路中的流量 (米³/秒)
 g : 重力加速度 (米/秒²)
 p : 任意时刻 $x = 0$ 点的压力 (公斤/米²)
 p_x : 任意时刻 $x = x$ 点的压力 (公斤/米²)
 γ : 管路内流体的容重 (公斤/米³)
 $\tau \left(= \frac{t}{T} \right)$: 无因次时刻
 $\theta \left(= \frac{T}{\mu} \right)$: 时间常数
 $\xi \left(= \frac{H - H_0}{H_0} \right)$: 任意时刻在 $x = 0$ 点的压力变化率
 $\xi_x \left(= \frac{H_x - H_0}{H_0} \right)$: 任意时刻在 $x = x$ 点的压力变化率
 ξ_M : $x = 0$ 点的最大压力变化率
 ξ_m : $x = 0$ 点在小压力变化率时的最大压力变化率
 $\eta [= F(t)/H_0]$
 $\zeta (= Q/Q_0)$: 任意时刻 $x = 0$ 点的流量比
 $\zeta_x (= Q_x/Q_0)$: 任意时刻 $x = x$ 点的流量比
 $\rho \left(= \frac{\alpha v_0 / 2gH_0}{= n\theta} \right)$: 阿利也维管路常数
 $n (= T_p/T)$
 $T_p (= M_{0L}Q_0/gH_0)$: 管路时间常数

$n_x (= M_x L Q_0 / g H_0 T)$

$m_x [= 2f(L-x)/\alpha]$: 无因次管路长度

m' : 等值无因次管路长度

I_{px} : 压力波干涉系数

R_L : 管路端压力波反射系数

R'_L : 等值管路端压力波反射系数

S : 压力脉动通过率

r : 压力波反射物所在处的压力波反射系数

s : 压力波反射物所在处的压力波通过系数

目 录

初版前言

增订版前言

主要符号

水击与压力脉动..... 1

第一篇 水 击

第一章 概述..... 3

第一节 压力变化的物理意义..... 3

第二节 分类..... 6

1-2-1 直线关闭(开启)和非直线关闭(开启)..... 7

1-2-2 急关闭(开启)领域..... 9

1-2-3 缓关闭领域..... 14

1-2-4 缓开启领域..... 18

1-2-5 压力变化特征的比较..... 21

第三节 其它..... 23

1-3-1 刚体理论和弹性理论..... 23

1-3-2 直线关闭(开启)时最大压力变化率计算图表..... 24

1-3-3 水柱分离..... 29

第二章 基本方程..... 33

第一节 运动方程和连续性方程..... 33

第二节 刚体理论基本方程..... 36

2-2-1 基本方程及物理意义..... 36

2-2-2 忽略回复水头的基本方程..... 42

2-2-3	吉普逊测流法原理	46
第三节	弹性理论基本方程	48
2-3-1	压力波的反射和通过	48
2-3-2	连接水池的单一管路的水击基本方程	66
2-3-3	逐段计算法	69
2-3-4	图解法	72
2-3-5	吉普逊的测流法的理论误差	75
2-3-6	管路平均流速和末端阀流速的关系	80
2-3-7	压力变化衰减率	87
第四节	其它	91
2-4-1	末端阀条件	91
2-4-2	压力波传播速度	92
2-4-3	几个常数	99
2-4-4	管路上游端装设阀时的水击	101
第五节	补充	103
2-5-1	补充说明	103
2-5-2	弹性理论与刚体理论的联系	117
2-5-3	管路中孔口的压力波的反射与通过	125
2-5-4	惯性长度	129
第三章	末端阀关闭时的水击	132
第一节	急关闭领域	132
第二节	直线关闭时的缓关闭领域	139
3-2-1	压力变化状态	139
3-2-2	各领域的分界条件	149
3-2-3	多往复领域	157
3-2-4	高落差领域	171
3-2-5	各领域压力上升的相互关系	174
第三节	二次曲线缓关闭领域	182
3-3-1	压力变化状态	184

3-3-2	低落差领域的简化式	195
第四节	补充说明	197
第四章	末端阀开启时的水击	202
第一节	基本方程	202
第二节	急开启领域	203
第三节	直线开启时的缓开启领域	208
4-3-1	压力变化状态	208
4-3-2	最大压力下降率	213
第四节	预开后直线开启时的水击	214
4-4-1	急开启领域	214
4-4-2	过渡领域	217
4-4-3	多往复领域	223
第五章	末端阀曲折变化时的水击	227
第一节	直线曲折变化时的水击	227
5-1-1	μ 时段的压力变化	227
5-1-2	多往复领域中直线曲折后压力变化的衰减	237
第二节	调压阀动作时的水击	243
5-2-1	压力变化状态	244
5-2-2	调压阀动作时压力上升率的简化式	253
第三节	补充	255
5-3-1	补充说明	255
5-3-2	压力变化衰减率的精确解	263
第六章	其它	270
第一节	水轮机甩负荷时的水击	270
6-1-1	水轮机特性与压力变化的趋势	270
6-1-2	混流式水轮机水击的估算式	278
第二节	水泵断电时的水击	282
6-2-1	基本方程	282

6-2-2	水泵端的条件与压力变化	285
第三节	自激振动的水击	291
第四节	根据现象的解析方法	298
6-4-1	利用吉普逊测流法	298
6-4-2	利用弹性理论解析法	304
第五节	测压用的导压管内水柱的固有振动（多往 复领域）	319
第六节	其他简化式	322
6-6-1	有分叉管管路的压力上升率简化式 （低落差领域）	322
6-6-2	末端阀下游侧连接管路的影响（低落差领域）	327
6-6-3	从阀门流出气体变为流出液体时的压力上升	330
第七节	补充	333
6-7-1	补充说明	333
6-7-2	测压用的导压管中水柱的固有振动（急变化领域及 过渡领域）	335
6-7-3	单自由度系统强迫振动时的压力变化	344
6-7-4	容器内急剧产生气体所伴随的压力上升	354
6-7-5	用弹性大的短管减小冲击波波及范围的措施	361

第二篇 压 力 脉 动

第七章	概说	373
第一节	单一管路的压力脉动	373
第二节	管路中有压力波反射物的管路压力脉动	379
第三节	有多个压力波反射物的管路压力脉动	385
第四节	管路始端条件	387
第八章	基本方程	392
第一节	单一管路的压力脉动	392

8-1-1	一般式	392
8-1-2	$ R_L = 1$ 时的压力脉动	395
8-1-3	水泵性能试验时的压力脉动	397
第二节	管路中有压力波反射物时管路的 压力脉动	398
8-2-1	基本方程	398
8-2-2	上游侧管路中的压力脉动	400
8-2-3	下游侧管路中的压力脉动	402
第九章	有异径管、阀门或孔口的管路及管路中压力 波速变化时管路的压力脉动	404
第一节	一般式	404
9-1-1	压力波的相互关系	404
9-1-2	等值管路端反射系数、等值无因次管路长度和 压力脉动通过率	407
第二节	$ R_L = 1$ 时有异径管管路的压力脉动	409
第三节	有阀门或孔口管路的压力脉动	415
第四节	管路中掺气或下游侧管路压力波速变化时的 压力脉动	421
第十章	有分叉管管路的压力脉动	428
第一节	基本方程	428
第二节	$ R_{L2} = R_{L3} = 1$ 时的压力脉动	433
第三节	$ R_{L3} = 1$ 、 $ R_{L2} \neq 0$ 时的压力脉动	443
第十一章	设置空气罐或大弹性短管管路的压力脉动	449
第一节	一般式	449
第二节	$ R_L = 1$ 时的压力脉动	455
第三节	$ R_L \neq 1$ 时的压力脉动通过率	462
第四节	空气罐的形状效应	466
第五节	压力脉动实验方法	470

第六节	补充说明	474
第十二章	其他	483
第一节	容积式水泵引起的压力脉动共振现象	483
第二节	自由振动的压力脉动	490
第三节	旁通管或支管内压力脉动的共振现象	493
12-3-1	压力脉动共振现象的物理意义	494
12-3-2	等值管路和共振现象	497
第十三章	有异径短管管路的压力脉动	504
第一节	压力波的相互关系	504
第二节	等值管路端反射系数、等值无因次管路长度 和压力脉动通过率	508
第三节	有异径短管 $ R_L = 1$ 时管路的 压力脉动	511
第四节	用异径短管防止压力脉动共振	524
第十四章	管路系统压力脉动问题注意事项	532
附录		
附录 1	压力波干涉系数 (I_{px} 、 I_{vx}) 的运算	540
附录 2	有异径短管管路考虑异径损失的压 力脉动运算	541
附录 3	有分叉管管路的压力脉动运算	546
附录 4	有空气罐管路的压力脉动运算	552
附录 5	有异径短管管路的压力脉动运算	556
参考文献		570