

C·耶格尔 著

SHUI LI
SHUI LI
RI WEN
BU WEN
DING LI
DING LIU

水力不稳定流

王树人 刘天雄 彭天玫 译

大连工学院出版社

水力不稳定流

(在水力发电工程中的应用)

C、耶格尔 著

王树人 刘天雄 彭天玫 译

梅祖彦 谷兆祺 审校



大连工学院出版社

1987年

大 连

内 容 提 要

本书共分三大部分：第一部分调压室系统的质量波动；第二部分水击理论；第三部分工程实例。

本书特点：重视基本理论；理论密切联系实际，各国工程实例较多，内容丰富；便于自学和应用。

本书可作为中专毕业生、大学生、研究生的教材或参考书，对工程技术人员、研究人员均有参考价值。

0060/17

水 力 不 稳 定 流 SHUI LI BU WEN DING LIU

著者 C·耶格尔

著者为瑞士科学技术博士和总工程师，

曾任：苏黎世联邦科技大学教授，

英国皇家学院水力发电工程客座教授；

美国科罗拉多州立大学岩石力学客座教授。

王树人 刘天雄 彭天玖 译

梅祖彦 谷兆祺 审校

大连工学院出版社出版发行 辽宁省新华书店发行

(大连市甘井子区凌水桥) 大连海运学院印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16；印张 23 $\frac{1}{8}$ 字数：520 千字

印数 0001—1500

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

责任编辑 侯 君 封面设计 羊 戈

责任校对 心 伟

统一书号：15400·16 ISBN 7-5611-0013-2/TV·2

定 价：3.80元

译 者 的 话

由于水力资源的开发利用,推动着流体瞬变研究迅速地进展。目前,国内外均有专门的著作问世,已成为一门独立的学科。

C·JAEGER 博士这本专著有与其他著作不同的特点。他为瑞士总工程师同时又先后在瑞士、英国、美国担任大学教授。他学识渊博,经验丰富,长期从事教学、科研和生产工作,因而这本书有其独特的优点:(一)重视基本理论,在第一、第二两部分专门讲述调压室和水击理论,总结各种计算方法和计算技术。(二)加强理论与实际的联系,故在第三部分专门介绍流体瞬变在实际工程中的应用。计算成果与试验、原型观测的分析对比。各国实例较多,内容丰富。(三)全书讲述方式较好,深入浅出,便于自学应用。对于中专毕业生、大学生、研究生、工程技术人员、教师以及科研人员均有参考价值。

翻译时对书中的印刷错误,作了订正,并加了注释。

参考文献除放于书的最后以外,在每章之后也同时列出,为便于查阅,未加翻译。

本书绪言及第一部分的第一章至第十五章由王树人译出。第二部分的第十六章至第二十五章及第三部分的第三十六章至第三十八章、结束语、参考文献等由刘天雄翻译。第三部分的第二十六章至三十五章由彭天玫翻译。

全书由谷兆祺校核,梅祖彦审阅。

由于水平所限,译文中错误与不当之处,殷切地希望广大读者批评指正。

译者 1983 年 12 月

前 言

虽然在五十年代初期,流体瞬变理论的轮廓已经形成,但自那时以后又有了很大的进展,图解法和计算机技术在工业上的应用研究得到扩展。本书将概述现代流体瞬变,并描述新技术的应用实例。

在过去廿年中,作者在巨型水电站、现代抽水蓄能电站、供水系统以及热电站和核电站冷却水系统的设计中,获得了很多的经验。对于调压室的波动稳定性或者压力管道中的振动问题进行了模型和现场试验。这些方面的研究结果已经在国际工程学会和讨论会中提出过。

本书讨论设计工程师所面临的问题,并提供具体的实例。本书不仅对设计和顾问工程师有用,亦对在校学生介绍分析问题的方法。现在在学术界和工程中都趋向于认为,今后大学中的研究工作应和工程实践更密切的结合。

为了使所列的实例分析易于理解,将有关基本理论,图解法和计算机法各章的内容发展到可以应用的地步。

本书分三部分:第一部分讲调压室系统的质量波动问题;第二部分讲水击理论;第三部分介绍工程问题(调压室水位波动或水击)、实例、模型和现场试验。所用的分析方法可能是解析法,图解法或计算机法、有些实例现象是多方面的,以致需用几种方法平行的来分析。

掌握有关理论知识是对设计人员的首要要求。但反过来,对实例的处理又推动新的理论研究。在本书中将多次反映这种理论与实践的相互关系。

目 录

前 言

绪 论

第一部分 调压室系统的质量波动

第一章 基本调压室系统的波动 (压力隧洞、高压管道和调压室)	5
第二章 符号	7
第三章 简单调压室质量波动的基本方程式	8
(a) 动力方程式	8
(b) 连续方程式	9
第四章 方程式 (I) 和 (II) 忽略隧洞摩擦阻的解	11
(a) 水轮机阀门突然关闭	11
(b) 水轮机阀门突然开启或突然增加负荷	12
(c) 负荷按线性速率变化	12
第五章 计入隧洞摩擦阻的水位波动计算。直接积分法	13
(a) 水轮机阀门突然全关闭	13
(b) 负荷按线性速率减少或负荷突然增加	13
(c) 摩擦损失系数 F 的选择	13
(d) 进口损失	14
第六章 逐步积分法	15
(a) 普雷塞耳 (Pressel) 方法	15
(b) 由方程 (1*) 和 (2*) 直接确定 ΔZ	16
(c) 艾斯卡德 (Escande) 有限差分法	16
(d) 调压室分析的进一步讨论	17
第七章 调压室计算中的参数	21
(a) 伏格特 (Vogt) 参数	21
(b) 卡拉姆 (Calame) 和加丁 (Gaden) 参数	21
(c) 阀门瞬间全关闭的水位波动计算 (瞬时丢弃全负荷)	22
(d) 阀门逐渐线性关闭的水位波动计算 (负荷按线性减小)	25
(e) 阀门从关闭状态突然开启的水位波动计算 (负荷突然投入)	25
第八章 双室式调压室	28
(a) 一般计算法	28
(b) 双室式调压室增加部分负荷	29

第九章 岔管的水头损失 (管路分岔)	33
第十章 阻抗式调压室	39
(a) 设有阻抗孔的圆筒式调压室	39
(b) 杜逊 (Johnson) 差动式调压室	44
第十一章 其他调压室问题	47
(a) 复式调压室	47
(b) 地下式水电站	50
(c) 封闭式气压调压室	57
(d) 由多条隧洞供水的调压室	59
(e) 有许多中间进水竖井供水的长隧洞	60
(f) 保证隧洞末端压力一定时阀门关闭速率的求法	62
(g) 管路破裂问题	63
第十二章 单调压室和复式调压室的波动稳定	65
(a) 圆筒式和双室式调压室的波动稳定——小波动和大波动情况	66
(b) 阻抗式、差动式及复式调压室的波动稳定	73
(c) 影响调压室稳定的其他因素	75
(d) 安全系数 n 的选择。波动过程中系数 n 的影响	83
(e) 关于下游调压室稳定的附加评论	87
第十三章 肖克里奇 (Schoklitsch) 图解法	93
(a) 图解法的基本原理	93
(b) 溢流式调压室	96
(c) 从外水源进入调压井流量 Q_d 的情况	97
(d) 阻抗式调压室 (突然增减负荷)	98
(e) 差动式调压室	98
(f) 复式调压室	99
第十四章 计算技术	106
第十五章 试验与计算成果的比较	109

第二部分 水击理论

第十六章 不变管径和壁厚的 Allievi 水击理论	110
(a) 注释	110
(b) 水击基本方程式的推导	110
(c) 方程式 (II) 的物理意义	114
(d) 关于水击波速 a 的计算说明	115
(e) 简单管路的 Allievi 连锁方程	117
(f) 某些重要问题的分析	121
(g) 沿管道任意点上的压力波	125

(h) 管路反向流的水击	126
第十七章 管道或隧洞系统中水击的一般理论	131
(a) 主要方程式	132
(b) 反射系数 α_i 的计算	132
(c) 并联管路	134
(d) 锥形管路	135
(e) 水击分析的近似方法	137
第十八章 具有调压室的管路的水击理论	141
第十九章 具有压气室管路的水击理论	144
(a) 对于大气室的 Foch 理论 (不计气室本身变形)	144
(b) 对于小变形气室的 Allievi 理论	145
(c) 理想气体定律	146
第二十章 管路周期振荡和共振理论	147
(a) 简单管路中水体的周期振荡	147
(b) 复式管道周期振荡的基本方程式	148
(c) 复式管路的共振。谐波振荡	149
(d) 自激振荡	153
第二十一章 水轮机调节	157
(a) 出力随时间的变化	157
(b) 旋转质量的测定	158
(c) 包括调速方程的计算	161
(d) 计入旋转质量惯性的逐步计算法	165
第二十二章 师内德和伯格龙 (Schnyder 和 Bergeron) 图解法	169
(a) 图解法的基本原理	170
(b) 管径为常数的水击分析 (忽略摩擦)	176
(c) 变管径管路的水击分析 (忽略摩擦)	182
(d) 三条管路相交和简单支管情况	184
(e) 在上下游隧洞之间装有反击式水轮机的管道系统的水击	186
(f) 对摩擦的考虑	187
(g) 将惯性项 WR^2 引入 Schnyder—Bergeron 图解	191
第二十三章 水力不稳定流的计算机技术	195
(a) 数字计算机	195
(b) 电子模拟机	199
第二十四章 控制压力升高。阀门调节。抽水蓄能电站的控制阀门	202
第二十五章 关于水击和波动理论与计算方法的评论	204
第三部分 工程问题, 实例, 水力不稳定流的模型和现场实验	
[、引言	205

Ⅰ、水力发电工程中波动的稳定。现场观测	205
第二十六章 大波动稳定问题。现场观测	206
(a)理论的发展	206
(b)现场观测结果与工程实例	209
(c)改善波动稳定的方法	213
(d)Bersimis Ⅰ级水电站检验波动稳定的模型试验	215
(e)挪威的模型试验	217
(f)关于选用稳定系数的附加评论	217
(g)关于大波动稳定理论的结论	219
第二十七章 调压室系统的稳定	221
(a)在同一压力隧洞或坑道上设置两个调压室	221
(i)一般方程	222
(ii)稳定条件	224
(iii)稳定条件的讨论	227
(b)在反击式水轮机上下游的双调压室系统	230
(c)一台水轮机由两个压力系统供水	242
第二十八章 与大电力系统联网的中低水头水电站的稳定性	246
(a)在单独系统中工作的调压室	247
(b)并联到大电网中的不稳定水力系统	247
Ⅱ. 压力系统中的共振	248
第二十九章 控制管道系统共振的一般分析方程式	250
(a)系统基波的共振	251
(b)管路系统的谐波共振	252
(c)并联管路的共振	253
第三十章 用数字计算机解共振问题	255
第三十一章 事故过程及其评论	256
(a)Lac Blanc—lac Noir 事故	256
(b)Kandergrund 隧洞的事故	257
(c)Bersimis Ⅰ水电站的共振	258
(d)Festiniog 事故	264
(e)其他的事例	265
(f)水电站管道的形状和尺寸与可能产生共振之间关系的评论	266
(g)结论	267
(i)构件的固有频率	267
(ii)共振的预防和处理	267
第三十二章 共振的现场试验	271
(a)压力管道共振的早期试验	271

(b) Bersimis I 系统的试验与量测	272
IV 水泵引起的水击	275
第三十三章 水泵引起水力不稳定的一般介绍	277
(a) 水泵问题的简单处理	277
(b) 典型水泵的水击问题	281
第三十四章 水泵跳闸。图解或电算法与试验的校验	290
第三十五章 抽水蓄能电站	292
(a) 一般的评论	292
(b) 装有可逆机的系统	293
(c) 装有组合式机组的系统	296
(d) 关于转轮特性的评价	299
V. 专门问题, 方法与结果。水电站的检验与试验。其他的工程问题	301
第三十六章 各计算方法与计算结果的比较分析	302
(a) 解析法与图解法	302
(b) 模型试验	303
(c) 现场试验	304
(d) Hussain 所提出的一些方法和现场试验	306
(i) 第一种方法: 以质量方程 (刚性理论) 为依据	307
(ii) 压力不稳定流理论的比较方法	307
(iii) 用质量方程和弹性波方程进行比较计算	309
(iv) Simmenflus 水电站的现场试验	310
第三十七章 水柱分离, 真空, 空化	313
(a) 空化 (气蚀)	313
(b) 阀门动作在管道上引起的真空	313
(c) 水电站上水柱分离与真空	313
(d) 水泵系统的水柱分离	314
(e) 实验室和现场试验	316
第三十八章 与共振不同的管路振动	321
(a) Geesthacht 抽水蓄能电站的振动	321
(b) 一个大型水电隧洞钢板内衬破裂的实例	323
VI. 结束语	327
参考文献选辑	327

绪 论

前言介绍了本书讲述的轮廓。其目的在于弥补水力不稳定流理论和专业工程师所解决的实际工程问题之间的差距。本书的主要贡献,是对不稳定流过程做了详细的分析,不但叙述了所解决的问题,而且分析了设计和运行人员的使用方法。

为了引导读者入门,在论述实际应用的第三部分之前,介绍了质量波动(第一部分)以及水击理论和计算方法(第二部分)的基础知识。

如前言中曾提到过的,实例的选择是根据在国际工程学会和讨论会上发表过的专题。

为了适应更先进的理论和充分地利用过去二十年发展起来的有效的计算方法,在工科院校已经出现了工程科学化、数学化的趋势。而且,近代的调查已发现了这一变革并指出“深感于大学的教育将来要更紧密地联系实际工程项目以及对这些工程负有职责的工程师”和许多科技大学直接取得联系的结果,已经证实了这个相当受拥护的改进。

目前这本书是针对关心不稳定流评价的工程师所写的,但同样也能为急于探索“实际工程”情况的高年级学生所用。他们应先全面学习第一和第二部分的基础知识,然后再阅读第三部分。

(a) 应解决的问题

关系到水力不稳定流的工程问题领域近二十年已有很大的发展。在具有复杂压力管道的大型水力发电站与大型电力系统相联的情况下,相应的水轮机调节和可靠的波动稳定就变得愈加重要。

理论家一直关心管道的共振问题,但是当大型工业管道出现剧烈共振情况时,工程师们对此也必须过问。这样,理论和试验方法都必须再深入一步。

为了平衡大型热电站或核电站的基荷,目前常果用抽水蓄能电站,这种电站在许多工业化国家中几年之内就大量发展起来了。一系列关于泵的设计和泵或可逆机产生水击的难题必须解决。大型水泵常用于热电站冷却系统中的水循环。过去,泵的设计和制造人员是凭经验办事的,而在现代工程中压力波动的新解法和精确分析已成为非常重要的了。

(b) 采用的方法

分析这些实例的方法逐步得到发展。在工程中引进电子模拟和数字计算机导致了早期不稳定流分析方法的重新评价。以前的一些专家预见图解不稳定流分析将使许多解析法过时。与此类似,现在又认为电子和数字计算将取代图解法。当然,已经编出针对水力不稳定流的计算程序,这使从事实际工作的工程师可以解决出现的任何问题。计算机方法所得到的计算精度大大超过以前的解析法和图解法。

但是近年来的进展,表明并非完全如此,图解法和解析法仍在应用,而并未失去其重要性。一个典型的例子就是对出现在 Bersimis I (在加拿大)压力系统的强烈的共振压力波的分析(1961年6月11日和29日),其过程将在第三部分详细地介绍。当知道了这次压力振荡的类型后,即判断出它是1936年和1939年发表的解析理论(当时当作学术问题)的一个特例²。同样的理论于1946年用来解释 Kandergrund (在瑞士)压力隧洞的破坏³。这些解析方程式就用来分析 Bersimis I 电站发生的共振波。在准备几个月之后在现场进行广泛的试验前,设计工程师 H.G.埃克斯(Acres⁴)以及 Bersimis I 地下电站的所有者安大略水电管理局亦用了师内德—伯格龙(Schnyder—Bergeron)图来分析压力的振荡。

1965年斯特里特(Streeter)和怀利(Wylie)编制了一个很完善的数字计算机程序⁵对上述共振试验做了非常深入的分析。他们的论文成了一项经典著作。这项探索的步骤具有以下特点:首先用解析法导出基本方程式,然后用图解法描述它,最后用计算机计算,以得到更详细和更精确的结果。数学分析开创了研究水力不稳定流更有效的计算机处理方法。

在第三部分将给出用不同方法解算水力不稳定流问题的例子。将牵涉到用电子模拟、模型试验和原型观测来检验调压室波动稳定性的数学分析。为了说明 Simmenfluh 电站(在瑞士)整个压力管道系统和调压室的现场试验,哈桑(Hussain⁶)编制了一个部分以波动方程为基础,部分以水击波理论为基础的计算程序。此程序密切地依赖于 Bergeron 图。

最近一次有关抽水蓄能电站⁷水击的学术讨论会,表明了有材干的专家们如何同时使用图解法和计算机解决问题。工程师们解决许多问题的方法,使作者确信,解析理论、图解法和计算机程序是同样重要的技术,应该平行的进行研究。

(c) 水力不稳定流理论、方法和工程发展史

前面讲到了工程要求与理论研究之间的相互影响。这一时期的水力学和实践之间相互影响的详细历史尚待编写。笔者在“工程流体力学”一书中已扼要介绍过1950年以前的波动和水击理论的早期发展。最近 C.S.马尔敦(Martin⁸)把他的探索推进到1973年的水平。他的论文和论文所引起的讨论很好地表达了在欧洲理论、方法和模型试验三者的近期发展。同时在全面回顾技术状况时也要注意到,国际水力研究协会和许多国家组织,如英、法、德、意、葡萄牙等国所做出的努力。

俄国人儒柯夫斯基(Joukovsky⁹)是首先分析水击波引起压力升降的学者之一,而且显然由早期开始俄国科学家们即已在系统地研究水力不稳定流理论。罗马尼亚科学家继续研究康斯頓梯内什(Constantinescu¹⁰)提出来的声波振荡问题。

而西方世界的英语国家在正确评价水力不稳定流领域中的现代研究趋向方面做出了更重要的贡献。美国和英国科学家也属于首先用计算机分析不稳定流理论做出贡献的。早在1953年美国土木工程学会发表了一篇关于电子模拟的重要论文¹¹。美国这些使用数字计算机探索水力不稳定流理论论文¹²的重大价值已为大家熟知。

英国科学家紧接在美国学者之后写出了同样重要的论文。

美国和英国研究者的另一重要贡献是把科学研究成果运用到工程问题中去。美国的土木和机械工程师学会和英国机械工程师学会（伦敦）建立了委员会并组织了专题讨论，致力于提高工程技术并且弥合理论与实际间的差距。许多国家的专家出席了他们发起的这些会议。

1965年的抽水蓄能讨论会是一个典型的例子¹³，会上设计师、工艺师和理论家之间充分地交换了意见和认识。

作者将着重，特别是在第三部分，介绍一些可以称之为科学与工程相结合的成就。

作者注释

- [1] "Education, less maths more involvement" *New Civil Engineer*, 14 March 1974, p. 48.
- [2] Jaeger, C., "Note sur les phenomenes periodiques dans les conduites forcees a caracteristiques multiples", *La Houille Blanche*, vol. 35, Nos. 233—236, May—August 1936. Jaeger, C., "Theory of Resonance in Pressure Conduits", *Trans. A.S.M.E.*, February 1939, pp. 109—115.
- [3] Jaeger, C., "Water Hammer Effects in Power Conduits" *civil Engineering and Public Works Review*, Vol. 43, Nos. 500—503, February—May 1948. On auto-oscillations, see also Jaeger, C., *Engineering Fluid Mechanics*, Blackie, Glasgow 1956, pp. 322, 323, and Rocard, Y., *Les phenomenes d'auto-oscillation dans les installations hydrauliques*, Herman, Paris 1937, and *L'instabilite en mecanique*, Masson, 1954.
- [4] Abbott, H.F., Gibson, W.L. and McCaig, I.W., "Measurements of Auto-oscillation in a Hydro-electric Supply Tunnel and Penstock System", *Journal Basic Eng.*, Vol. 85, December 1963, pp. 626—630.
- [5] Streeter, V.L. and Wylie, E.B., *Hydraulic Transients*, McGraw-Hill, New York, 1967, pp. 116—149.
- [6] Hussain, *Chambres dequilibre*, Paris, Dunod, 1966.
- [7] American Society of Mechanical Engineers (A.S.M.E.) *International Symposium on "Water Hammer in Pumped Storage Plants"*, New York, 1965.
- [8] Martin, C.S., "Status of Fluid Transients in Western Europe and the United Kingdom: Report on laboratory visits by Freeman Scholar", *Journal of Fluids Engineering*, June 1973, pp. 301—317.
- [9] Joukovsky, N.E., "Water Hammer", *Mem. Imperial Academy Sc. of St Petersburg*, 1898 and 1900, Vol. 9, No. 5 (translated by Mss O. Simin, *Proc. Am. Water-Works Assoc.*, 1904), p. 341.

- [10] Constantinescu, G., *Theory of Sonics. A Treatise on Transmission of Power by Vibrations*, Vol. I, London, 1918.
- [11] American Society of Civil Engineers. "Electrical Analogies and Electronic Computers", Paper No. 2569, Trans., Vol. 118, 1953, pp. 961-1067.
- [12] Streeter and Wylie's book *Hydraulic Transients* is a classic which includes a detailed bibliography.
- [13] A.S.M.E. International Symposium on "Water Hammer in Pumped Storage Plants", New York, 1965.

第一部分 调压系统的质量波动

第一章 基本调压系统的波动

(压力隧洞、高压管道和调压室)

我们所考虑的主要水力系统由以下几部分组成 (如图 1.1) :

- (1) 水库,
- (2) 压力隧洞,
- (3) 高压管道 (或高压钢管),
- (4) 调压室,
- (5) 控制阀门。

压力隧洞对水压变化很敏感, 设调压室的目的是用来截断水击波沿高压管道向上传播, 使隧洞不受或少受水击压力变化的影响。如后面将要指明的, 设置调压室后也降低了高压管道中的水击压力。但是与隧洞不同, 高压管道在大多数情况下, 必须做得有足够的强度去承受可观的水击荷载。

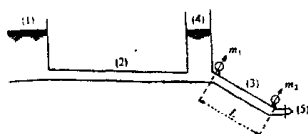


图 1.1 主要调压系统

为了给出调压系统特性的明显概念, 压力计装在高压管道下端 m_2 和上端 m_1 断面上。上端压力计 m_1 自动记录压力振荡, 它的周期较长 (100 至 500 秒)。在调压室中同时读出水位的波动表明, 水位的振荡与压力计的振荡一致。上端压力计 m_1 的振荡只取决于调压室自由水面的振荡。

下端压力计 m_2 自动记录两种完成不同类型的振荡。第一种振荡的周期很短 (几秒钟)。这种振荡加在另一种缓慢振荡的波上, 人们不难看出, 这种缓慢振荡与高压管道上端 m_1 的振荡相同。经常是第一种振荡 (周期短的) 消失后, 第二种振荡 (周期长的) 才逐渐开始。

只被下游压力计 m_2 记录的第一种振荡的短周期, 给出了振荡的起点。产生于长度为 L 高压管道中的压力波与空气或水中的声波, 或与固体的弹性波相似, 可用简单实验测定。例如突然关闭阀门 (5), 由压力计得知所产生压力波 (见图 1.2) 是它沿

着高压管道继续往返发展的，而可以推知波速 a 为： $a = 800$ 至 1400m/s 。水击波由阀门行驶至调压室并返回所需的时间是和第一种振荡的周期相等，这种振荡叫压力波，有时叫“水击”

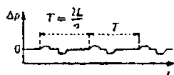


图 1.2 水击波



图 1.3 连通器中质量振荡

压力计 m_1 和 m_2 两者自动记录长周期的首次振荡，与连通器的质量振荡是一样的（见图 1.3）。在图 1.3 中，我们假定一个连通器是很大的（如水库），这样它的振荡波幅 Z_1 可以忽视，因之只需考虑较小连通器（如调压室）的振荡波幅 Z_2 。压力隧洞用水平连接管来代表。在这样系统中的缓慢振荡叫质量振荡或质量波动。

上例说明压力波是主要现象，质量波动是次要现象。因此，一个合乎逻辑的程序是从分析压力波开始，但是颠倒一下次序，从质量波动较简单的物理现象入手更可取。

本章作者注释

[1] Jaeger, C., Theorie generale du coup de belier, Dunod, Paris, 1933.

第二章 符号

H = 毛水头。

H_0 = 稳定流态时，在调压室的有效水头。

A_T = 隧洞的横截面积。

L = 隧洞长度。

A_s = 调压室水平横截面积。

v = 隧洞内流速，水流从水库流向调压室为正。

$A_T v$ = 隧洞内流量。

$A_T v_0$ = 稳定流态，满负荷时隧洞内流量。

Q = 水轮机瞬时引用流量。

Q_0 = 稳定流态满负荷时水轮机引用流量。

$Q_1 = nQ_0$ = 部分负荷时水轮机引用流量。

$\pm Fv^2$ = 隧洞水头损失 (F 为常数)，当 $v > 0$ 时取正号。

Fv_0^2 = 稳定流态时隧洞的水头损失。

$P = W \eta Q H$ = 水轮机出力。

η = 水轮机和高压管道的效率。

z = 以库水位为基准面的调压室水位。

$z_0 = -Fv_0^2$ = 稳定流态满负荷时的调压室水位。

$z_{\max}$ = 调压室最高水位。

$z_{\min}$ = 调压室最低水位。

t = 时间。

$u = \frac{dz}{dt}$ = 调压室内水流竖向流速，向上为正。

$T = 2\pi \sqrt{\frac{L A_s}{g A_T}}$ = 忽视摩擦阻时质量波动的周期。

$z_* = v_0 \sqrt{\frac{L A_T}{g A_s}}$ = 水轮机引用流量突然停止时波动的振幅 (忽视摩擦阻)。

τ = 水轮机阀门关闭或开启的时间。