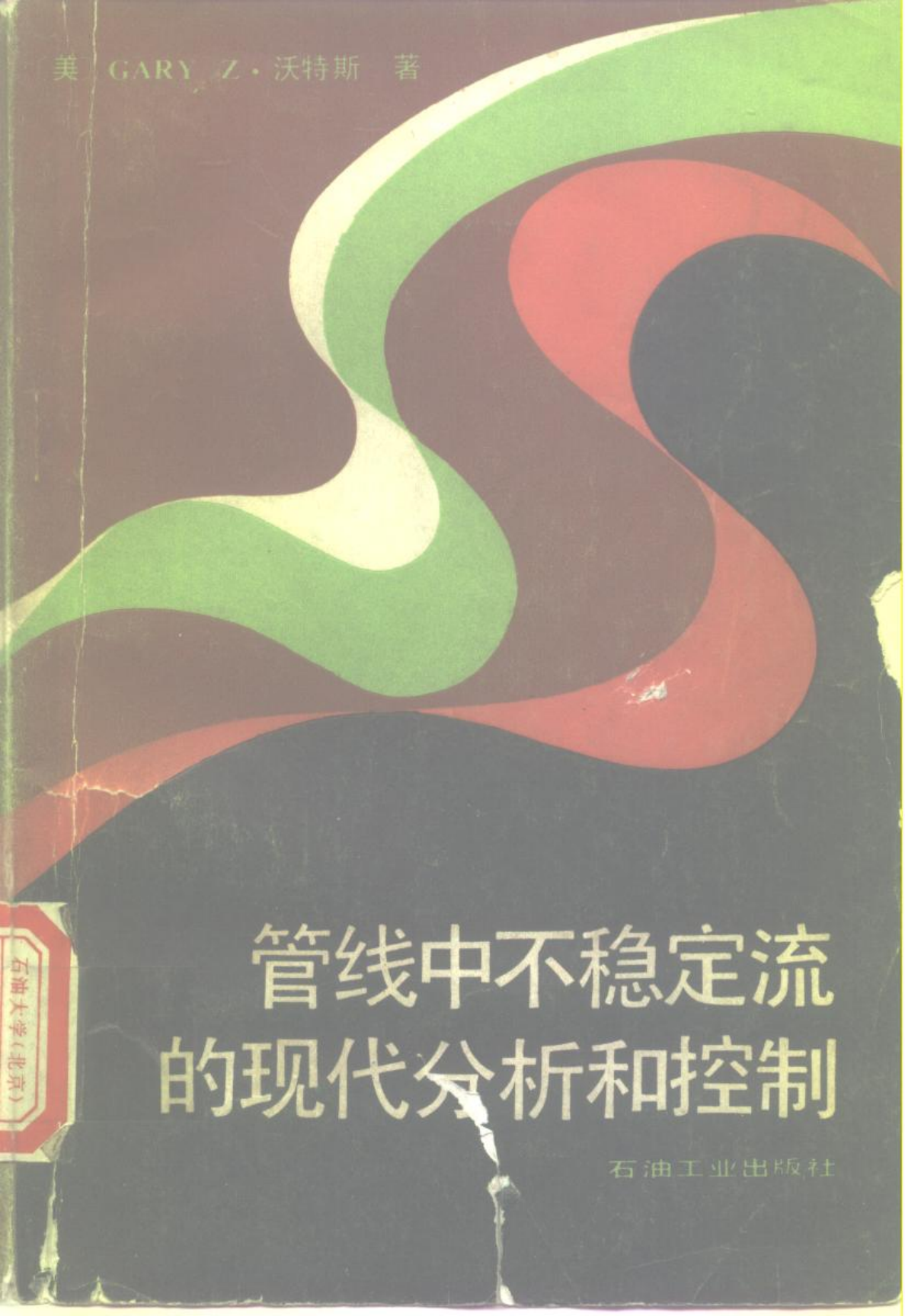


美 GARY Z. 沃特斯 著



管线中不稳定流 的现代分析和控制

石油工业出版社

石油大学(北京)

29397

管线中不稳定流的 现代分析和控制

[美] GARY Z. 沃特斯 著

董启贤 译 袁恩熙 校

石油工业出版社

内 容 提 要

在工程中不稳定流会引起超压、噪声、抽空和振动,以致造成管道系统的性能和结构的破坏。本书根据基础水力学原理,由浅入深地应用刚性水柱理论和弹性理论两种学说,去论述和求解与管道设计有关的不稳定流各种问题,并给出了常用的计算机分析示例,读者可借助这些计算机程序进行不稳定流分析和建立起自己的程序。

本书可供石油、化工、给排水工程等专业的科研设计人员、工程技术人员和大专院校师生阅读、参考。

MODERN ANALYSIS AND
CONTROL OF UNSTEADY FLOW IN PIPELINES
GARY Z. WATTERS
ANN ARBOR SCIENCE PUBLISHERS INC

1979

管线中不稳定流的现代分析和控制

[美] GARY Z. 沃特斯 著

董启贤 译 袁恩熙 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 8印张 208千字 印1—2,000

1987年5月北京第1版 1987年5月北京第1次印刷

书号: 15037·2664 定价: 1.80元

前 言

有经验的工程师常常认为，写书的人往往缺乏详细的、完全实用的数据或方法；只会些不切实际的数学和理论推导；一般都忽视了对工程实际的直接应用。本书力图克服这些弊病，揭开围绕着不稳定流分析的秘密，给出一些为专业工程师能够直接引用的东西。可惜，不稳定流现象和水击问题实际上是相当复杂的，是难于理解和分析的。这就无需严格限定分析的应用范围，能极方便地抓住这种不稳定流现象的实质。尽管这需要具备一定的知识水平，但除了涉及最近十五年内硕士学位论文有关的知识外，就不再需要别的学识了。

这本书并非论述不稳定流问题的专著，也不是写给高级分析人员或职业分析者的。它也没能把大量应当讨论的课题全都包括进去。相反，它只扼要地叙述了一些工程师们在设计管线所遇到的不稳定流问题，而这种管线是输送液体介质，主要是输水系统。在此领域内，大部分课题是和水击分析有关的问题。幸好，这一狭小的范围和更深入的发展使其对有经验的工程师更为有用。

唯一可用以解决水击问题的分析方法是特征法。其应用比较容易。该方法的计算精度较高、耗资少而且所得结果也比较可靠。但是，它却要求分析者具备中等FORTRAN编程能力。其它的分析方法则不作介绍，因为在多数情况下特征法具备它们的优点。如遇到需要专门方法的问题可以参阅其它著作。

为了让工程师能有把握地解决自己所遇到的不稳定流问题，该书根据基础水力学原理写成。从较为浅显的概念和问题入手，随着论题的逐步深化，内容变得更加广泛。最常见的、能够引起水击的管路结构和管线设备都谈到了，并给出了常用的计算机分析示例。然而，要把所能遇到的各种管线问题都估计到也是不可能的。因此，读者应当用这本书和其中的程序作为起点，去解决自

己所遇到的问题。

多数问题是可以相当小的计算机求解，因为大多数问题并不占用多大的内存量。显然，书内所列的程序都可以转换成BASIC语言，这种程序适用于通常的小型计算机。因为有不少种数字计算机可以解算各种工程项目，唯一要考虑的因素似乎是要看这种机器的计算精度、价格和快速设备等。

书内给出不少计算程序，它们包括了从简单的到相当复杂的计算程序。尽管这些东西在一定程度上可用以解决实际问题，但作者对其计算精度概不负责。从任何一种计算分析所得的结果总是要认真核对的。过于相信数值分析结果往往会使工程师为难，因为数字是以纸带上的孔洞表示的。

为帮助不打算制作程序卡组的用户，作者愿意为之复制程序卡组，也可邮寄书内所列的任一种或全部程序。这种服务将以合理的价格提供，其中包括有复制、管理和邮寄成本。感兴趣的用户应当函购一份计价表。

书内关于管网内稳定流分析的章节是根据R. W. Jeppson所著的《管网内流动分析》一书写成的，该书由Ann Arbor Science出版发行。在Jeppson的管网分析程序内做了一些修改，尤其在那些和水击程序相关的地方。

作为大学教程，这本书由相当于大学高年级或大学毕业生水平的数学和工程内容组成。当前，在犹他(Utah)洲立大学为高年级和毕业生用作两季课程教材。对于从事实际工作的工程师，就其内容而言这本书给出了足以满足自学不稳定流课题的详尽内容。

在为这份教材撰稿的过程中，作者深感缺乏使工程师开始关注要掌握这一课题和运用这种技术的课本、参考书。可惜，在咨询工程公司内，用现代技术解决实际工程问题都有专门的机构。所幸，作为一种专门技艺正日趋完善，所有的工程师都将在不稳定流分析和控制领域内奉献出自己的经验和方法。

GARY Z. 沃特斯

犹他，洛根

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
1.1 不稳定流分析	(1)
1.2 水击分析的历史	(2)
第二章 基本概念	(5)
2.1 水击的简单描述	(5)
2.2 管道系统的不稳定流	(10)
2.3 不稳定流方程	(10)
第三章 刚性水柱理论	(13)
3.1 水平管内的流态建立	(13)
3.2 水平管内关阀所引起的压力	(16)
3.3 串联管路的不稳定流	(19)
3.4 并联管路的不稳定流	(21)
3.5 计算主要局部阻力	(25)
第四章 弹性理论	(26)
4.1 ΔH 方程	(26)
4.2 a 方程	(29)
4.3 其它类型管路里的波速	(37)
4.4 不稳定流的基本微分方程	(43)
第五章 特征法求解	(48)
5.1 实用特征法	(48)
5.2 特征法	(63)
5.3 参数对计算结果的影响	(73)
第六章 复杂管系	(85)
6.1 串联管系	(85)

6.2	支管系统	(99)
6.3	内部局部损失	(103)
6.4	阀门	(104)
6.5	减压阀	(114)
6.6	稳态流管网分析	(117)
6.7	管网内的水击	(134)
6.8	液柱分离和排气	(154)
6.9	管线联接处水击波的传输和反射	(156)
第七章	管线上用的泵	(159)
7.1	泵的理论 and 运行	(159)
7.2	管线上用的泵	(164)
7.3	泵特性和动力事故停机	(166)
7.4	选择性停泵	(191)
7.5	处于倒流和水轮机工况的动力事故	(192)
7.6	选择性启泵	(198)
第八章	管内不稳定流所引起的问题	(200)
8.1	问题的后果	(200)
8.2	问题的起因	(201)
第九章	控制设备和方法	(206)
9.1	阀门	(206)
9.2	管线里的空气	(213)
9.3	泵的动力事故	(213)
	参考文献	(235)
	附录 I	(237)
	附录 II	(241)
	本书所用单位与法定计量单位换算	(248)

第一章 绪 论

工程上的不稳定流问题十分重要，因为它可能引起的超压、噪声、抽空和振动比起由稳定流分析所得的结果要厉害得多。事实上，由于水力瞬变而产生的问题是如此严重，以致于会造成系统结构或性能上的破坏。

1.1 不稳定流分析

管线系统内的不稳定流分析可以分为两大类。第一类可称为“振荡”或“刚性水柱”理论，它把液体看成是没有弹性的刚体物质。其压力变化很快会在系统内传播，而不考虑管壁弹性的影响。描述这种流态的方程多用常微分方程，它可以按古典的方式求解，也可以用直接数值技术求解。只要应用对路这种方法极易实施，而且应当把它看作获得足够近似解的手段。

第二类是按“弹性”或“水击”理论划分的。其液体和管壁在计算时都被看成是弹性体。由于流速变化而产生的压力波取决于它们的弹性属性，而且以一定的速度传播到整个管线系统，其传播速度直接取决于这种弹性。由于弹性理论能更确切地反映出不稳定流的特点，而成功的分析关键是求解二个非线性偏微分方程。因此，要掌握这种分析方法比起第一类刚性水柱理论要更为繁杂和困难。Streeter和Wylie^[1]告诉我们：借助于高速数字计算机，特征法可以按比较普通的和易于理解的方法求解方程。他们所写的课本提出了计算机分析技巧的编译程序，而且这也是近年来在水击领域里出版的最重要的一本书。

在进行计算机分析之前，为了能用算术、图解或代数方式求解，不得不把描述管线系统内水击的方程式以某些方式进行简

化。略去非线性项，用集中参数方式或逼近法求解，它可以包括摩阻，也可以把摩阻完全忽略掉。泵和透平机组边界条件更是难以确定的。最好的情况也只有少数工程师能够理解。如今，现代分析技术包括求解偏微分方程的数值方法，已能够使多数工程师有能力精确地解出大多数水击问题。尽管这需要电子数字计算机，但这绝非是大型机。无疑，在不久的将来某种简化型的不稳定流问题甚至可以用袖珍可编程序计算器求解。

因此，本书意在使工程设计能够应用“刚性水柱”理论和弹性理论两种学说，求解与管线系统设计者有关的各种问题。繁杂的、模糊不清的问题和现象不包括在内。对当前还不宜于用计算机分析的方法也没有触及。本书的重点在于提供一本易读的自学书，工程师可以借助充足的实例和计算程序指导他自己进行不稳定流分析，该书还可引导工程师建立起自己的程序库。

由于这本书主要是论述不稳定流的分析，对没有弹性效应的不稳定流的历史就不再赘述了。只给出水击分析的主要简史，以便读者知道在过去一百多年内这种分析演变的脉络。

1.2 水击分析的历史

一般地讲，很难确切地说出管内不稳定流分析是什么时候开始的，这就得追溯到十九世纪初期，然而，水击分析的历史却有完整的资料记载。根据Wood^[2]的记载，Wiehelm、Weber在十九世纪五十年代测定水击波传播速度的管壁弹性效应时就属于一些早期的工作。他还推导了连续性方程和流体动力学方程，这些方程是后来分析研究的基础。Wood^[2]还讲述了Marey在1875年发表了他那精心的、实验室研究的工作成果。这项成果证实了在确定的工况条件下，波速是个常数，其值取决于管子的弹性。在1878年Korteweg考虑了管子和介质两方面的弹性导出了波速方程，他的方程本质上是当前所沿用的方程。

由Wood的著作我们还可以知道：Jules Michaud为了减小突

然截断或关闭阀门的影响，在1878年首次用空气包和管线上的减压阀试验性地做了水击实验。1883年Grameka发表了考虑摩阻影响的分析方法，但他当时并不能解出这些方程。

在水击压力的计算方面，液体和管子的弹性是个重要的因素，确定其起始年代要容易一些。按照Rouse和Ince^[3]的著作，Nicolai Joukowsky在1898年第一个清楚地证明了：水管线内压力的上升值和流速、波速及介质密度变化有关。然而，Wood^[2]认为不大出名但同等重要的是：J. P. Frizell于1897年在犹他洲的奥格登(Ogden)水电站对于水轮机机组调速时，对水击压力影响进行的分析。显然，他并不知道欧洲人的工作，但他却推导出自己的因突然关阀所产生的波速、压强方程。同时他也注意到支线效应和波的反射，并指出了关阀时间和波周期的关系。

事实上就在这时，Nicolai Joukowsky在莫斯科发表了他的水击分析试验研究成果，这项研究成果是和莫斯科市政供水系统有关的。Joukowsky十分通晓前人所做的工作。他推导了波速和压力上升的方程，而且也考虑了压力波传播到小管内的问题，由开口管传来的波反射、阀门关闭时间与水击波周期之间的关系、气包效应和弹簧控制的调压阀门应用。当然，在追溯往事时，Frizell和Joukowsky应当分享水击分析之父的尊称。

在水击分析这一领域内，另一伟人是Lorenzo Allievi。由Rouse^[3]等人的著作可知在1913年这位意大利水力学家提出了水击问题的数学和图解分析，这种方法在后来的五十年内是这一领域进一步发展的基础。他的贡献如此不朽，无需详加评述。

二十世纪初期，是致力于把Joukowsky和Allievi的研究成果应用于水击问题分析的时期。随着历史的推移Frizell的贡献几乎被忽视了，多数研究工作似乎是和水电站的水轮机机组直接相关的各种问题。如今，绝大多数这类书籍^[4,5,6,7]基本上都与这方面的应用有关。

在二十世纪三十年代，水击问题的分析包括了摩阻因素。第一次关于水击的学术会议于1933年在芝加哥举行。论文的題目

有：高压头引水管、组合管网、调压罐、带有空气包的离心泵装置和调压泄压阀。

1937年在纽约举行了第二次水击学术会。论文是由美国和欧洲的工程师们提供的。当宣读离心泵管线中空气包、调压阀和论述水轮机调节上摩阻效应的论文时，这一领域的著名学者出席了会议。

此期间水击分析的图解技术，在Allievi、Angus、Bergeron、(Schnyder)、Wood、Knapp、Paynter和Rich影响下时兴起来。后几年的研究更精确地把摩阻效应考虑到方程里。还引入了更为复杂的边界条件，而且在分析中使用的基本方程为通用形式。

到二十世纪六十年代时，高速数字计算机的出现揭开了水击分析的新纪元。Streeter、Wylie^[1]的工作第一次应用了计算机分析复杂的水击问题。打开了在工程设计中把水击分析作为正常设计程序的起点，而无需再雇用一名具有这种分析能力的专家。这样Victor Streeter就和其他学者一样，应和Allievi、Joukowsky并列为水击分析史上做出杰出贡献的学者。

目前，不稳定流分析的重点几乎完全集中在计算机应用上。自Streeter、Wylie的著作问世以来，这些年来还出了唯一的一本参考资料。1970年Tullis在克罗拉多洲立大学学会论文集上发表了关于密闭管道内流量控制的文章。有趣的是就在这一年内除这以外还有两部著作正在付印。Streeter、Wylie^[9]写的是论密闭管道系统内水力瞬变的教科书，而Martin^[10]写的也是论述水力瞬变分析的书。庆幸的是在不稳定流分析上可用的最新技术的趋势会延续若干年。

第二章 基本概念

在详细论述不稳定流分析之前，重要的是讲清在简单工况下水击作用。这有助于确定在什么情况下应用弹性理论，有助于理解日后可能遇到更为繁杂问题的变化层次。

由于包括摩阻因素的不稳定流分析十分重要，也因为有必要把这种分析应用于除水以外的其它介质。因此一定要使用完全可以满足上述各种要求的通用公式。按Darcy-Weisbach公式：

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (2-1)$$

它和Moody图一起使用，而摩阻系数 f 可以由Moody图内查得。读者最好能参考最近出版的水力学初等教科书，重温一下该公式的基础和它的应用。

2.1 水击的简单描述

为了对在水击波作用下液体管线系统的工况有个基本的理解，最容易的做法是考虑一个尽可能简单的系统。我们所研究的系统示于图2-1，这是一段由水箱引出的直径不变流向远处的水平管线，阀门安装在距水箱为 L 长的地方。为简化分析，管内的摩阻就忽略不计。由于速度头相对于水击压力通常要小得多，在能量坡降(EL)和水力坡降(HGL)之间的差也被忽略了。

水击是由突然关阀引入系统的。要不是我们有意地控制它，水击现象将会出现在阀的上游侧和下游侧。但是，我们的目的只是研究阀的上游侧会发生什么样的变化。

由于突然地关阀，阀门处的介质流速就被强制地突然降为零。随即，阀上的压力头就突然地增加了 ΔH 值（参看图示）。

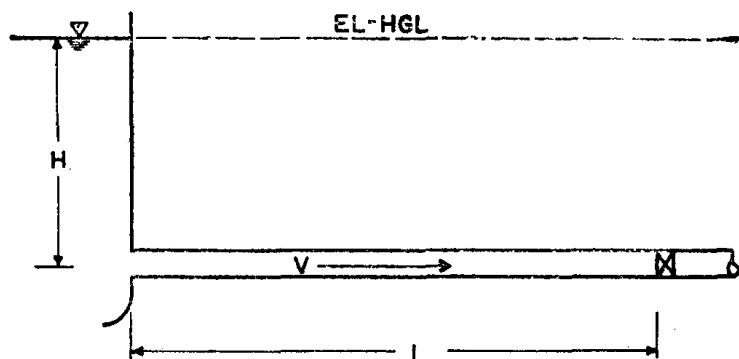


图 2-1 产生简单水击的稳定流工况

ΔH 的数值正好是在阀门处介质以速度 V 流动，动量变为零时所需要的压力头。

阀门处压力的上升会引起管子的膨胀、介质的密度增加。管子膨胀的总量和介质体积减少值取决于管子的材料、尺寸和介质的弹性。一般地说，对于普通的管材和介质，变化的百分比在0.5%以下。为了明显起见图2-2大大地夸张了这种变形情况。

上升的压力会以波速 a 向上游传播，波速 a 的数值是由管路系统和介质的弹性、管路系统的几何尺寸决定的。只要上述诸条件保持不变，波速 a 就会保持恒定。当水击波以波速 a 传播时，在 $t = \frac{L}{a}$ 时水击波就会到达水箱处。此刻，管内各处的流速都降为零，

而压力头均为 $H + \Delta H$ 。管子膨胀了，流体受到了压缩。

在此工况下，因为水箱内的压头仅为 H ，管内的介质就处于不平衡状态。因此液流开始朝着水箱的方向流动，如同由膨胀了的管子朝着水箱的方向喷出液体。反向流速在数值上恰好等于原来的稳态流速（这是由于忽略了摩阻的原因）。而反向流的液体源正是在膨胀了的管壁内多贮存的那部分受到压缩的液体。

该过程将继续。在 $t = \frac{2L}{a}$ 时，整个管内的压力又恢复到正常值（但却是反向流）。但是，阀门处再没有往上游方向流动的液

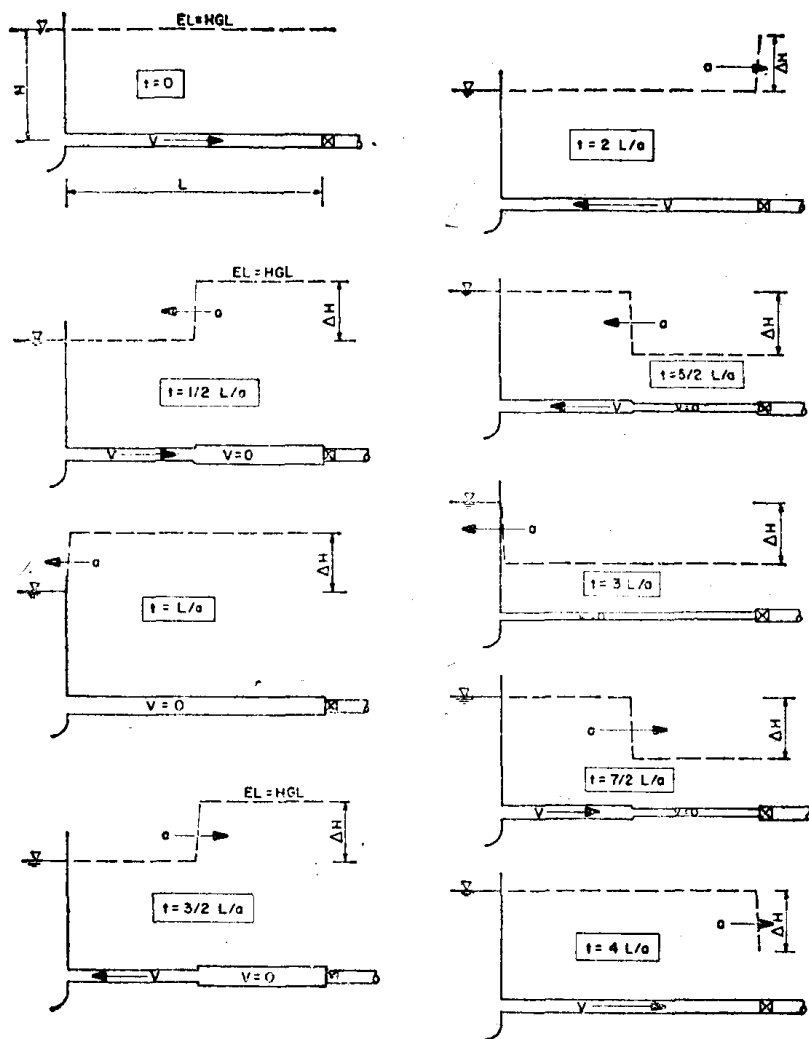


图 2-2 压力波在简单管道系统内的传播

体源了。随即压力头下降了 ΔH ，迫使反向流速降为零。这个压力降引起管子收缩，液体膨胀。

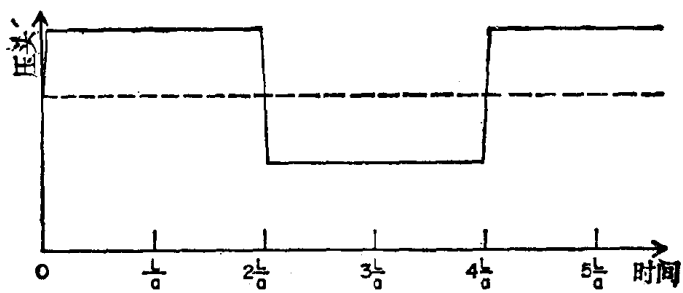
在 $t = \frac{3L}{a}$ 时，该效应就传递到水箱，而且各点的流速又降为零。管内压头比水箱压力低了 ΔH ，结果管线又从水箱内吸出液体，建立起与原来稳态流相同流速和方向的液流。此工况一旦发生，管内压力也就恢复到它的原来数值上。

在 $t = \frac{4L}{a}$ 之后，水击波就传到了阀上。就在此刻液流与原来的稳态状况相同。这段历时正好构成了一个水击周期。在没有摩擦阻的情况下，随着时间的推移，这种循环将无休止地继续下去。

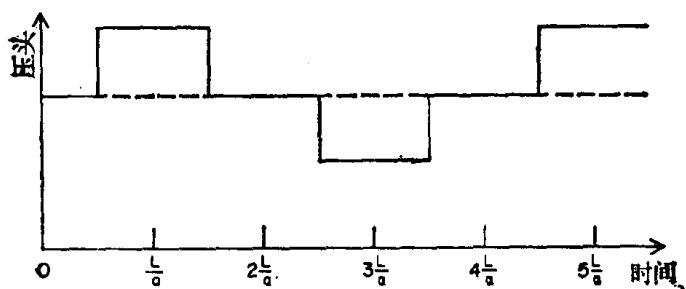
在进一步仔细地研究这个系统里所发生的变化之后，可以得到一些基本概念。显而易见最适于描述瞬变过程的时间参数，其含义不只是时间，而是 $\frac{L}{a}$ 比值。更值得参考的是，以时间为函数所绘制的不同管段上各点的压头如图 2-3 所示。当水箱的压头为 H 时，阀上的压头在 $H \pm \Delta H$ 之间波动，而且其它各点上的压头也呈现出同样的时间周期。

由图 2-3 b 可得出一个基本观点，即某点的压力只能经过足够长的时间后，由关阀点传来的水击波才会使该点的压力升高。该点的压头一旦升高，高压就一直保持到当由水箱回授的波传到才能消除。这种“通信时间”或“消息传播的时间”的想法是深入理解系统中正在发生水击作用的基础。

深入研究图 2-3 a 后可以看到另一个基本要领。假定不是突然地把阀关死，而是分成十步去关它，那么在阀上压头每次只增加了 $\frac{\Delta H}{10}$ 。另一个假定条件是在 $t = \frac{2L}{a}$ 秒之前把阀门完全关死。很明显，阀上的压头仍会上升到 ΔH 值。这是因为从水箱出来的“泄压”作用在 $\frac{2L}{a}$ 秒以前是不会到达这里的。值得指出的



a) 阀上压头相对时间的关系



b) 中点处压头相对时间的关系



c) 靠近水箱处管内压头相对时间的关系

图 2-3 沿管长分布的三个点的压头与时间的关系

是，阀门不突然地关死也会产生最大的水击压力。确实，只要关阀时间小于由水箱返回的“泄压”作用所必需的时间(大型管道可以充裕些)就会导致完全的水击压力。事实上，如我们后面将要讲述的那样，由于管路特性用增大压头损失关阀截流时，为防止高压出现关阀时间必须比 $\frac{2L}{a}$ 大的多。

2.2 管道系统的不稳定流

在管道系统内不稳定流是屡见不鲜的事。其实，稳定流却很少见；以致有人要问用这么多的时间研究稳定流的属性是否得当？事实上，所有的水力设计都是以稳定流分析为基础的，而且在很大程度上管线系统内所发生的不稳定性影响并不大。这是由于瞬变特性和变化幅值不大的缘故。只有在少数情况下，例如当流速变化很大时，才会引起我们所关心的压力大幅度的变化。

如前所述，不稳定流可以分为两类，其依据是看要求精确描述流动状态的分析类别如何。通常并不清楚究竟用哪一种分析为好，因为在这两种应用之间没有一条明确的界线。另一方面，有时又会明显地看出应用哪种类型为好。例如，有一个直径为50英尺、高为75英尺的大型贮罐通过一条直径为6英寸、长为1000英尺的管线排放。按照传统的水击分析应用弹性理论会觉得十分可笑。然而，如果在排放期间可以把排放阀突然地关掉，那么很厉害的水击就会发生，这就应当应用弹性理论去分析。

2.3 不稳定流方程

由前边的讨论清楚地看出：每当管线内流速变化如此之慢，以致使弹性波在流速变化期间能有足够的时间在管道系统内传播多次，这就可以应用刚性水柱理论。当弹性效应被忽略后，实用方程的推导相对地讲要容易一些。所得的方程称为一维不稳定流