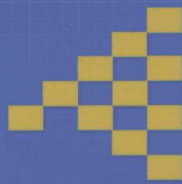
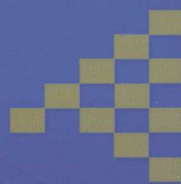


# 泵系统的 瞬变流特性



马素霞 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

---

---

# 泵系统的 瞬变流特性

---

---

马素霞 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书介绍了典型泵系统、长距离输水泵系统和电站复杂泵系统由于调节工况和非调节工况引起的瞬变流动计算方法及其特性。着重针对复杂泵系统,通过试验和数值计算两种方法研究了动力失灵和重载启动及连续失控工况下泵系统的瞬变特性以及影响瞬变的因素,分析了空穴对瞬变特性的影响,提出了一些控制瞬变的基本方法,这些研究结果为控制和减缓泵系统的瞬变提供理论依据。

本书可供从事流体动力工程的科技工作者、大专院校的师生们参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

泵系统的瞬变流特性 / 马素霞著. —北京: 中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978 - 7 - 5084 - 4927 - 2

I. 泵… II. 马… III. 泵—暂态特性 IV. TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 132783 号

|       |                                                                                                                                                                                                                           |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名   | 泵系统的瞬变流特性                                                                                                                                                                                                                 |
| 作 者   | 马素霞 著                                                                                                                                                                                                                     |
| 出版 发行 | 中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) |
| 经 售   | 北京科水图书销售中心 (零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                      |
| 排 版   | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                                                                                                           |
| 印 刷   | 北京市兴怀印刷厂                                                                                                                                                                                                                  |
| 规 格   | 850mm×1168mm 32 开本 5.25 印张 141 千字                                                                                                                                                                                         |
| 版 次   | 2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷                                                                                                                                                                                       |
| 印 数   | 0001—3000 册                                                                                                                                                                                                               |
| 定 价   | 16.00 元                                                                                                                                                                                                                   |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# *Qian Yan* 前言

泵作为一动力设备在国民经济各部门中具有重要的地位。泵在运行和调节过程中的非定常流动特性影响着泵及其系统的安全、稳定运行。本书着重介绍了典型泵系统、长距离输水泵系统和电站复杂泵系统，因动力失灵而引发的瞬变流动计算方法；对典型泵系统，主要研究了调节工况和非调节工况引起的动力失灵；对长距离输水泵系统，分别通过试验和数值计算两种方法研究了动力失灵和重载启动及连续失控工况下泵系统的瞬变特性，并分析了系统的容性特性、惯性特性、管长、初始流量和连续失控时间间隔等因素对瞬变特性的影响；针对某 300MW 电站，采用数值建模，研究了主给水泵系统由于动力失灵的瞬变特性，并给出了凝结水泵和循环水泵等系统由于动力失灵引发的瞬变流动计算方法；通过试验和数值计算研究了空穴对瞬变特性的影响；提出了一些控制瞬变的基本方法。这些研究结果为控制和减缓泵系统的瞬变提供了理论依据。

太原理工大学水利系阎庆绂教授在本书编著过程中给予了大力的支持，在此谨向阎庆绂教授表示深切的感谢。

由于作者的理论水平和实践经验有限，书中难免有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

作 者

2007年6月

# *Mu Lu* 目 录

## 前言

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 1 非定常流的基本性质 .....         | 1  |
| 1.1 泵及其系统的非定常流 .....      | 1  |
| 1.2 瞬变的起因 .....           | 2  |
| 1.3 瞬变流的研究方法 .....        | 3  |
| 1.4 电厂泵系统的瞬变特点 .....      | 4  |
| 2 瞬变流的基本微分方程及解法 .....     | 5  |
| 2.1 运动方程 .....            | 5  |
| 2.2 连续方程 .....            | 6  |
| 2.3 特征线方程 .....           | 7  |
| 2.4 有限差分方程 .....          | 9  |
| 2.5 泵系统的集中流容和集中惯性 .....   | 12 |
| 3 典型泵系统的瞬变特性 .....        | 15 |
| 3.1 典型的泵系统模型 .....        | 15 |
| 3.2 典型泵系统的瞬变流动 .....      | 16 |
| 3.3 瞬变流动计算方程组 .....       | 16 |
| 3.4 边界条件和初始条件 .....       | 17 |
| 3.5 典型泵系统的瞬变特性及分析 .....   | 21 |
| 3.6 数值计算的可靠性分析 .....      | 26 |
| 3.7 瞬变流对设备运行的影响 .....     | 28 |
| 4 泵系统非调节工况瞬变特性的试验研究 ..... | 29 |
| 4.1 模拟试验系统 .....          | 29 |
| 4.2 非调节工况试验模拟方法 .....     | 31 |

|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 4.3 | 连续非调节工况下系统的瞬变特性 .....   | 32  |
| 4.4 | 连续失控时间间隔与瞬变特性 .....     | 45  |
| 4.5 | 管长和初始流量对瞬变特性的影响 .....   | 47  |
| 4.6 | 瞬变强度系数 .....            | 50  |
| 4.7 | 阀特性对系统瞬变特性的影响 .....     | 53  |
| 5   | 泵系统非调节工况瞬变特性的数值计算 ..... | 58  |
| 5.1 | 计算系统图 .....             | 58  |
| 5.2 | 计算方程组和边界条件 .....        | 58  |
| 5.3 | 数值模拟工况及初始条件 .....       | 65  |
| 5.4 | 单一动力失灵工况瞬变特性及分析 .....   | 66  |
| 5.5 | 单一重载启动工况瞬变特性及分析 .....   | 69  |
| 5.6 | 连续失控工况瞬变特性及分析 .....     | 73  |
|     | 附录 连续失控工况的程序 .....      | 77  |
| 6   | 电厂复杂泵系统的瞬变特性 .....      | 101 |
| 6.1 | 主给水泵系统的瞬变特性 .....       | 101 |
| 6.2 | 主凝结水泵系统的瞬变 .....        | 110 |
| 6.3 | 循环水泵系统的瞬变 .....         | 114 |
|     | 附录 给水泵动力失灵程序 .....      | 117 |
| 7   | 空穴对泵系统瞬变特性的影响 .....     | 128 |
| 7.1 | 空穴的概念和研究内容 .....        | 128 |
| 7.2 | 空穴特性和对系统的影响 .....       | 129 |
| 7.3 | 空穴特性的试验研究 .....         | 132 |
| 7.4 | 空穴的数值计算 .....           | 144 |
| 7.5 | 计算的影响因素 .....           | 155 |
| 8   | 控制泵系统瞬变的基本方法 .....      | 157 |
| 8.1 | 控制泵系统瞬变的基本方法 .....      | 157 |
| 8.2 | 电厂泵系统瞬变的控制 .....        | 158 |
|     | 参考文献 .....              | 161 |

# 1 非定常流的基本性质

流体的非定常流动特性一直以来是许多研究者的研究课题之一，其定义为流动参数随时间而变化。非定常流是流体流动的基本形式，定常流是非定常流的特例。

因系统本身性质不同，非定常流特性也有较大差异，从大的分类来讲，系统可分为有压和无压两大类，并且这两类系统中参数随时间变化的快慢也不同，因此，非定常流可有四种组合：

- (1) 有压系统中，参数随时间急剧变化。
- (2) 有压系统中，参数随时间缓慢变化。
- (3) 无压系统中，参数随时间急剧变化。
- (4) 无压系统中，参数随时间缓慢变化。

如果参数随时间急剧变化，往往会在系统中出现瞬间的压力扰动，这种压力扰动将以波的速度在系统流体中传播，结果使系统中流动参数发生瞬时变化，称这种非定常流为瞬变流动，所以，瞬变流的实质是非定常流。

## 1.1 泵及其系统的非定常流

泵及其系统中的非定常流是属于有压系统中的非定常流。边界条件的变化、调节工况的出现及非调节工况的发生等都会使管系中的定常流变为瞬变流，其中单管中的阀门启闭引起的管路中的水锤就是典型的瞬变流：阀门调节产生的压力脉冲波以各管的波速在系统中传递，如果阀门调节的较慢就可以控制住瞬变压力的变化，但调节过程慢，系统的调节品质就差，不能满足工业的要求，调节过快，则引起系统的强瞬变，所以，通过研究系统的瞬变特性以期能够控制住瞬变，也就是在阀门

调节完成时，在系统中的各个地方，流动基本上处于新的定常状态。

流动中发生的许多瞬变都和泵的启动、停止以及与泵阀门的启闭有关，另外，非调节工况的出现也会引发泵系统的瞬变，比如突然停电和误操作造成的意外停泵、离心泵的重载启动、泵阀门的调节等，瞬变发生时，流动突然发生变化导致压力突变，形成压力波沿管道或容器壁传播，进而使系统受到瞬时高低压的冲击，瞬时高压将会产生振荡流动，而瞬时低压又有可能产生空穴，发生汽蚀，轻则会对泵系统的安全正常运行造成危险并影响设备的使用寿命，重则会造成运行中断，严重时还会发生重大事故，故泵系统瞬变特性的研究具有非常重要的意义。

## **1.2 瞬变的起因**

### **1.2.1 边界条件的变化**

(1) 管系中阀门的开启、关闭及阀门开度的调整使管系的边界条件发生变化，产生压力波向上游或下游传递，引起管系有阻尼的振荡流动。

(2) 上游水库（或水箱）水位的改变及水位的振荡都将造成下游管系的瞬变流动。

(3) 泵的启动和停止。

### **1.2.2 调节工况的出现**

根据工程的需要，泵系统或管系由一稳定工况过渡到另一稳定工况，过渡过程中的流动为非定常流动，比如电厂负荷发生变化时，给水泵、凝结水泵、循环水泵的流量都将从一定常值调节为另一一定常值，与此同时，给水泵和凝结水泵的吸水池液面上的压力也发生变化，故负荷调节过程将引起泵系统及其管系的瞬变流动。

### **1.2.3 非调节工况的发生**

除调节工况以外，由于设备的故障或误操作，会发生非调节工况，比如泵供电中断造成动力消失和系统失压、自动保护系统

故障造成的动力消失、重载启动、调节过程的失控、误操作造成的连续的非调节工况等。

电厂的给水泵和凝结水泵及循环水泵都工作在严格的环境中，尤其是给水泵和凝结水泵分别处于入口真空、出口高压的状态，非调节工况发生造成的瞬变流动不仅威胁泵系统及其管系的安全运行，而且危及整个电厂的安全运行，甚至造成重大事故，例如造成锅炉“干锅”重大事故的有：给水泵电机电气开关跳闸而其联动装置却不能自动启动备用给水泵；机组快速甩负荷时，除氧器压力急速下降造成给水泵汽蚀并出现断流工况等。

#### 1.2.4 其他因素

泵、风机、汽轮机中的叶轮或导叶的振动引发的系统的瞬变流动，旋涡引发的吸水管的不稳定及振动等。

### 1.3 瞬变流的研究方法

所有的管内非定常流的研究方法都是依据于流体的运动方程、连续方程或能量方程、状态方程和相关物理特性，从这些基本方程出发，加上一些限制性假设，根据给定的边界条件和初始条件进行求解，求解方法主要有算术法、图解法、特征线法、代数法、隐式法、线性分析法等，其中，特征线法被广泛地应用于管内瞬变流的求解。

特征线法把两个偏微分方程（运动方程和连续方程）变换成四个全微分方程，然后再将它们表示为有限差分的形式，用规定时间间隔的方法，编程借助计算机进行求解。

特征线法具有许多优点：①稳定性准则可以断然建立；②边界条件很容易编程；③较小项若希望保留可以保留；④可以处理非常复杂的系统；⑤在所有有限差分法中具有最好的精度；⑥因为定常状态满足所有的条件，故程序很容易调整，而且程序编排的误差可根据偏离定常状态的变化量显示出来。本书将采用特征线法求解泵系统的瞬变流。

## 1.4 电厂泵系统的瞬变特点

电厂的泵系统主要有给水泵系统、凝结水泵系统和循环水泵系统，由于这些系统在电厂的特定作用，故它们的瞬变起因和瞬变结果同常规泵系统的会有所不同，这些系统的特点主要有以下几个方面：

- (1) 流体的输送高度高，输送距离长。
- (2) 压水池液面压力高。
- (3) 泵入口为倒灌高度。
- (4) 泵系统全部为并联和串联泵组。
- (5) 泵容易发生汽蚀，管系中有气泡存在。

火电厂的凝结水系统和给水泵系统，处于最高水位的锅炉汽包和最低压力的凝汽器之间，中间还有其他设备，一旦某一泵系统发生意外情况下的失控工况，由于流体的输送高度高，压水池液面压力高，会引起泵倒转，泵进出口压力出现瞬时高低压，流动反向，并快速波及到上、下游，并造成整个系统的振荡流动，从而必然影响到凝汽器和锅炉的正常安全运行，进而引起电厂系统发生重大事故，所以作为子系统的电厂泵系统，其瞬变所引发的危险和破坏是全局的，关系到整个电厂的安全运行，必须给予足够的重视。本书通过试验模拟和数值计算研究给定泵系统的连续失控工况，并针对电厂的主给水系统、凝结水系统和循环水系统，给出边界条件，通过数值求解研究它们的瞬变特性，并分析减缓和控制瞬变的方法。

## 2 瞬变流的基本微分方程及解法

本章通过对微元体进行受力分析，给出瞬变流的运动偏微分方程和连续偏微分方程，并采用特征线法将偏微分方程变换为全微分方程，然后给出相应的有限差分方程，以便对管内非定常流进行数值求解。

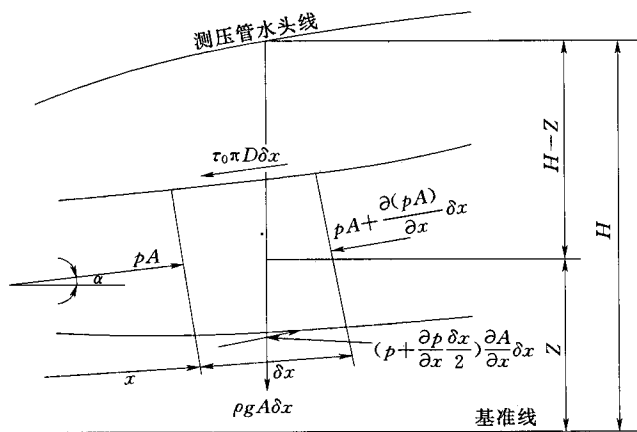


图 2.1 运动方程用微元控制体

### 2.1 运动方程

在管中取截面积为  $A$ 、厚度为  $\delta x$  的微元控制体（图 2.1 所示），图中， $p$  为微元体中心线处流体的压力， $H$  为测压管水头，管子与水平线成  $\alpha$  角，管径  $D$ ， $\tau_0$  为切应力，微元体所受的力有：横截面上的表面正压力、侧面上的切应力、压力分量和重力，根据牛顿定律，流体非定常流动的运动方程为

$$pA - \left[ pA + \frac{\partial(pA)}{\partial x} \delta x \right] + \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\delta x}{2} \right) \frac{\partial A}{\partial x} \delta x - \tau_0 \pi D \delta x - \rho g A \delta x \sin \alpha = \rho A \delta x \frac{DV}{Dt} \quad (2.1)$$

式中  $V$ ——流体平均速度。

舍去式 (2.1) 中的  $(\delta x)^2$  项, 方程简化为

$$\frac{\partial p}{\partial x} A + \tau_0 \pi D + \rho g A \sin \alpha + \rho A \frac{DV}{Dt} = 0 \quad (2.2)$$

式中 展开  $\frac{DV}{Dt} = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t}$ , 用测压管水头  $H$  替代  $p$ ,  $p = \rho g(H - z)$ , 并代入达西—威斯巴哈 (Darcy-Weisbach) 摩擦系数  $f$ , 即  $\tau_0 = \frac{\rho f V |V|}{8}$ , 则式 (2.2) 整理为

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (2.3)$$

式 (2.3) 即为瞬变流的运动偏微分方程。

## 2.2 连续方程

在管中取一段长度为  $\delta x$  的微元控制体 (见图 2.2), 根据质量守恒定律, 流入和流出控制体的流体质量差等于控制体内流体的质量变化, 即:

$$-\frac{\partial[\rho A(V-u)]}{\partial x} \delta x = \frac{D(\rho A \delta x)}{Dt} \quad (2.4)$$

式中  $\rho$ ——流体密度;

$u$ ——管壁速率。

根据流体体积弹性模数定义, 并引入波速, 有:

$$\frac{\dot{p}}{\rho} + a^2 V_x = 0 \quad (2.5)$$

并仍用测压管水头表示压力项, 可得连续偏微分方程:

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - V \sin \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

式 (2.6) 中, 以  $V$ 、 $H$  为因变量,  $x$ 、 $t$  为自变量, 而波速

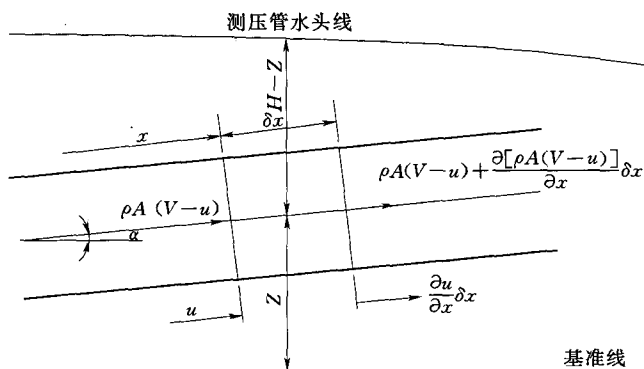


图 2.2 连续方程用微元控制体

$a$  包括了流体及管壁特性，因此该式适用于一切瞬变流动研究。对常用的金属管，用式 (2.7) 计算波速：

$$a = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1 + [(K/E)(D/e)]c_1}} \quad (2.7)$$

式中  $K$ ——流体的体积弹性模数；

$E$ ——弹性模量；

$D$ ——管径；

$e$ ——管壁厚度；

$\rho$ ——流体密度；

$c_1$ ——根据管子的支撑情况所确定的系数。

对于坚硬的管子，可用式 (2.8) 计算波速：

$$a = \sqrt{K/\rho} \quad (2.8)$$

## 2.3 特征线方程

特征线方法是瞬变流数值计算中常用的一种方法，它能够将偏微分方程变换为特殊的全微分方程，然后得出便于数值计算的有限差分方程。

令式 (2.3) 的左端为  $L_1$ ，式 (2.5) 的左端为  $L_2$ ，引入一个未知因子  $\lambda$ ，组合有：

$$L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left[ \frac{\partial H}{\partial x} \left( V + \frac{g}{\lambda} \right) + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left[ \frac{\partial V}{\partial x} \left( V + \frac{a^2}{g} \lambda \right) + \frac{\partial V}{\partial t} \right] - \lambda V \sin \alpha + \frac{fV |V|}{2D} = 0 \quad (2.9)$$

因为  $V$ 、 $H$  是  $x$ 、 $t$  的函数，如果让  $x$  为  $t$  的函数，有微分形式：

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.11)$$

观察式 (2.9) ~ 式 (2.11)，若令：

$$\frac{dx}{dt} = V + \frac{g}{\lambda} = V + \frac{a^2}{g} \lambda \quad (2.12)$$

则有常微分方程：

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} - \lambda V \sin \alpha + \frac{fV |V|}{2D} = 0 \quad (2.13)$$

此时：

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (2.14)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \pm a \quad (2.15)$$

式 (2.15) 将波的位置变化和时间变化与波的传播速度联系起来。

将式 (2.14)  $\lambda$  的值代入式 (2.13)，联立式 (2.14)，可得特征线方程组：

$$C^+ \quad \frac{dx}{dt} = V + a \quad (2.16)$$

$$\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} - \frac{g}{a} V \sin \alpha + \frac{fV |V|}{2D} = 0 \quad (2.17)$$

$$C^- \quad \frac{dx}{dt} = V - a \quad (2.18)$$

$$- \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{g}{a} V \sin \alpha + \frac{fV |V|}{2D} = 0 \quad (2.19)$$

式 (2.16)、式 (2.18) 为特征线方程，是  $xt$  平面上的两根直线，在这两根特征线上，偏微分运动方程和连续方程可变换为

全微分方程式 (2.17) 和式 (2.19), 也即式 (2.17) 和式 (2.19) 沿特征线成立, 称为相容性方程。

## 2.4 有限差分方程

对单管的  $xt$  网格 (见图 2.3), 沿  $C^+$  和  $C^-$  特征线将相容性方程式 (2.17) 和式 (2.19) 进行积分, 并采用一阶近似, 可得到有限差分形式:

$$H_P - H_R + \frac{a_R}{gA} (Q_P - Q_R) - \frac{Q_R(t_P - t_R)}{A} \sin \alpha + \frac{a_R f}{2gDA^2} Q_R |Q_R| (t_P - t_R) = 0 \quad (2.20)$$

$$x_P - x_R = (V_R + a_R)(t_P - t_R) \quad (2.21)$$

$$H_P - H_S - \frac{a_S}{gA} (Q_P - Q_S) - \frac{Q_S(t_P - t_S)}{A} \sin \alpha - \frac{a_S f}{2gDA^2} Q_S |Q_S| (t_P - t_S) = 0 \quad (2.22)$$

$$x_P - x_S = (V_S + a_S)(t_P - t_S) \quad (2.23)$$

在规定时间间隔法里, 如  $A$ 、 $B$ 、 $C$  点的参数已知, 可用线性插值来求  $R$ 、 $S$  的  $Q$  和  $H$ , 由图 2.3 可得:

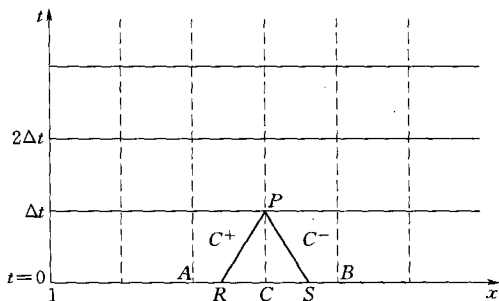


图 2.3 单管的  $x-t$  网格

$$\frac{x_C - x_R}{x_C - x_A} = \frac{Q_C - Q_R}{Q_C - Q_A} \quad (2.24)$$

根据式 (2.21), 由于  $x_P = x_C$ ,  $x_C - x_A = \Delta x$  得:

$$Q_R = \frac{Q_C - \xi_R(Q_C - Q_A)}{1 + \frac{\theta}{A}(Q_C - Q_A)} \quad (2.25)$$

同样, 根据式 (2.23) 可求出  $Q_S$ 、 $H_R$  和  $H_S$  的插入值:

$$Q_S = \frac{Q_C - \xi_S(Q_C - Q_B)}{1 + \frac{\theta}{A}(Q_C - Q_B)} \quad (2.26)$$

同理, 应用线性插值法有:

$$\frac{x_C - x_R}{x_C - x_A} = \frac{H_C - H_R}{H_C - H_A} \quad (2.27)$$

得到:

$$H_R = H_C - \left( \frac{Q_R \theta}{A} + \xi_R \right) (H_C - H_A) \quad (2.28)$$

$$H_S = H_C + \left( \frac{Q_S \theta}{A} - \xi_S \right) (H_C - H_B) \quad (2.29)$$

式 (2.28)、式 (2.29) 中,  $\theta$  为网格比:

$$\theta = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.30)$$

$$\xi = \frac{\Delta t}{\Delta x} a = \theta a \quad (2.31)$$

引入下列参数:

$$C_P = H_R + Q_R \left( B_R + \frac{\Delta t}{A} \sin \alpha - \frac{a_R f \Delta t}{2gDA^2} |Q_R| \right) \quad (2.32)$$

$$C_M = H_S - Q_S \left( B_S - \frac{\Delta t}{A} \sin \alpha - \frac{a_S f \Delta t}{2gDA^2} |Q_S| \right) \quad (2.33)$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad (2.34)$$

$$R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2} \quad (2.35)$$

即在特征线上有:

$$C^+ \quad H_P = C_P - BRQ_P \quad (2.36)$$

$$C^- \quad H_P = C_M + B_S Q_P \quad (2.37)$$

对于一根管子的任一内截面, 其测压管水头和流量可用式