

摘 要

随着城市建设的发展和人民生活水平的提高，长距离输水工程越来越多，伴之而来的输水安全引起人们的关注。而长距离大型区域重力流输水系统作为一种节能，高效的输水系统，其安全性也值得人们关注。本文主要通过对长距离大型区域重力流输水系统的水锤防护模拟计算，提出这类输水系统的有效水锤防护措施。

本文基于国内外发展概况，阐述了水锤数值计算理论方法，并给出长距离大型区域重力流输水系统的几种边界条件。在前人研究的基础上总结了气液两相流在输水管道中的各种流态，以及流态间的转化，并对管道中气囊运动的升压问题、危害以及管道排气最佳方式进行了探讨。对常用的水锤防护措施的结构原理、性能特点及选择的技术要点进行了说明，并提出了选择水锤防护措施时应注意的问题。根据水锤计算中常用的特征线法，结合各类边界条件建立了水锤计算的基本数学模型，应用计算机语言编制水锤防护计算的可视化程序，利用计算机进行模拟计算。

本文最后，以辽宁省大伙房水库输水工程为实例，对长距离大型区域重力流，有多个分支的输水系统，进行水锤防护模拟计算。根据水锤计算结果，对各种不同的水锤防护措施进行了比较，得出了长距离大型区域重力流输水系统的最佳水锤防护措施。望对于类似工程的水锤防护具有参考价值和借鉴意义。

关键词：长距离大型区域；重力流；水锤防护；排气阀；箱式双向调压塔

Abstract

With development of city constructions and the improvement of people's living level, more and more large long distance water transfer projects appear, the safety of water transportation attracts people's attention. As an energy saving and efficient water transportation pipeline system, the safety of long distance and large-scale regional water gravitational transportation pipeline system also attracts people's attention. The effective measures to long distance and large-scale regional water gravitational transportation pipeline system are proposed by simulation of this type's water hammer protection in the article.

In the paper, based on domestic and international developments ,the theory of numerical calculation of water hammer is shown, several boundary conditions of long distance and large-scale regional water gravitational transportation pipeline system are given. This paper outlines several of patterns of gas-liquid two-phase flow and pattern transformation on the basis of something studied from the forefathers in water pipeline and presser and harm of the water supply pipe clogged by gas. The best way of exhaust was studied. Structure principle, performance characteristic and technique essentials of common protective measures for water hammer is introduced, and points out some items requiring attention when choose protecting measures for water hammer. According to characteristic method in the hydraulic transients, building up the water hammer calculation mathematics model combined with all kinds of boundary conditions, wrote the visual program of water hammer calculation with the computer language, made use of the computer to carry on simulation calculation.

Finally, take Dahuofang Reservoir in Liaoning Province water transportation project as the example, simulation calculation of water hammer protection is shown in long distance and large-scale regional water gravitational transportation pipeline system which has multiple branch. Based on the result of calculation, the best protective measure of long distance and large-scale regional water gravitational transportation pipeline system is shown by comparing with various protective measures of water hammer. It is a valuable reference to protect water hammer for similar engineering.

Key words: long distance and large-scale region; gravity flow; water hammer protection; exhaust valves ;box type two-way surge tank

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名: 朱晓博、 2009 年 5 月 30 日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名: 朱晓博、 2009 年 5 月 30 日

导师签名: 杨军 2009 年 5 月 30 日

第一章 绪论

1.1 本课题研究的背景及意义

众所周知，我国是一个缺水严重的国家。虽然我国的淡水资源总量为 28000 亿立方米，占全球水资源的 6%，仅次于巴西、俄罗斯和加拿大，名列世界第四位。但是，我国的人均水资源量却只有 2300 立方米，仅为世界平均水平的 1/4，在世界排第 110 位，是全球人均水资源最贫乏的国家之一。

除了水资源的不足外，我国水资源还存在着十分严重的分布不均匀性。水资源分布的趋势是东南多西北少，相差十分悬殊。南方长江流域、珠江流域、浙闽台诸河片和西南诸河四个流域片的耕地面积只占全国耕地面积的 36.59%，但水资源占有量却占全国总量的 81%，人均水资源量约为全国平均值的 1.6 倍，平均每公顷耕地占有的水资源量则为全国平均值的 2.2 倍。而北方的辽河、海滦河、黄河、淮河四个流域片耕地很多，人口密度也不低，但水资源占有量仅为全国总量的 19%，人均水资源占有量约为全国平均值的 19%，平均每公顷耕地占有的水资源量则为全国平均值的 15%。因此，我国北方不少地区和城市缺水现象十分严重。

另一方面，由于我国大部分地区的降雨主要受季风气候影响，降水量的年际、季际变化也很大，因而造成水旱灾害频繁。全国大部分地区在汛期四个月左右的径流量占据了全年降雨量的 60%-80%，集中程度超过欧美大陆，与印度相似。这就导致了年内的分布不均，甚至出现连续丰水年或连续枯水年的情形，使水资源供需矛盾十分突出，水的短缺问题更加严重。

但是与之相对的却是供水管网的老化、水体污染等引起的供水量的严重不足。由于人民的生产、生活和社会活动等原因对城市附近水源和河流的污染，地下水的存量不足以满足人们的生产生活需要，为避免过度开采引起的地面沉降，使得人们不得不从距城市较远的水源地去取水。调查显示，我国大部分城市和地区均处于缺水状态，有十五个省人均用水量低于严重缺水线，其中天津、上海、北京、宁夏、河北、河南、山东、山西、江苏、辽宁等十个省市区人均水量低于生存起码线^[1]。

“水荒”已经成为了制约我国经济和社会发展的头号大敌。为解决这一问题，国家和地方相继投入了大量的人力、物力，进行长距离引水工程的建设。如近年来天津引滦工程、大连引碧工程、上海黄浦江上游引水工程、内蒙古引黄工程、引黄济青工程、引黄入晋工程、西安黑河引水工程、南水北调工程等，还有众多为解决各城市生产生活用

水而兴建的各种长距离输水工程。在这类长距离输水工程中，最常见而又最突出的问题就是输水管线的安全防护问题。一旦出现水锤，它会以迅雷不及掩耳之势破坏生产设备，淹没农田并殃及周围人员，给生产部门带来重大损失，甚至很多工程因此而长期搁浅，运行调试工程一直无法完成。因此，输水管线的安全运行问题必须引起高度重视，长距离输水管线的安全防护有着很重要的现实应用意义。

重力管道输水方式因其具有可随一定地形条件铺设、对地质条件要求不高，渗漏损失小，能保证输水水质，施工方便，造价较低，管理方便等优点，常作为设计者优先考虑的方案，故长距离、重力流供水工程也逐年增多，然而长距离重力流供水工程中对于大型区域的长距离重力流输水系统的管路安全问题尤其成了供水工程安全运行的难题。因此长距离大型区域重力流输水系统的水力过渡过程的研究，不仅为供水工程的设计提供科学依据，而且对指导供水工程的安全运行也具有十分重要的意义。因此，本文选择以长距离大型区域重力流输水系统水锤防护作为研究方向，主要通过辽宁省大伙房水库输水工程鞍山加压泵站上游段管道运行中水锤防护计算为例，探讨长距离大型区域重力流输水系统的水锤防护问题，望对类似工程的水锤防护提供借鉴意义。

1.2 水锤现象综述

1.2.1 水锤的成因及分类

在压力管道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。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^[2]。外部的边界条件，如阀门或水泵的特点、管路布置特点和管材、水池中水位高低及变化等等，均通过水流的物理性质而对水锤现象其作用的。

水锤发生的物理原因主要是液体具有惯性和压缩性。液体惯性维持原有运动状态，流速突然改变导致液体压缩或膨胀而使得压强急剧变化；反之，液体两侧受力变化也可导致流速改变。一般来说，输水管道系统中过渡过程的起因大体有：启泵和停泵，机组转速发生变化或运行不稳定、动力故障，空气进入泵或管道系统，泵内发生回流，阀门启闭，线路分流、集流等。

从不同的角度划分，水锤可分为以下四种：

1. 按关阀历时 T_s 与水锤相 μ 的关系，分为直接水锤和间接水锤

在水泵站中所发生的水锤通常是间接水锤，其过程十分复杂，或者先是间接水锤，随后发生直接水锤。

2. 按水锤成因的外部条件，可分为启泵水锤、关阀水锤和停泵水锤三种

启泵水锤常在管道首次或检修放空等管道中含有大量的气体的情况下充水，阀门开启过快或管路排气不畅时发生；关阀水锤是关闭阀门过程中发生的水锤现象。通常，按照正常的关阀程序操作，不会引起很大的水锤压力变化；停泵水锤是由于水泵机组突然断电而造成开阀停车时，泵站及管路系统中所发生的水锤现象。

3. 按水锤水力特性，分为刚性水锤和弹性水锤理论

前者计算比较简单，计算结果偏大；后者计算虽复杂但结果比较符合实际，对于长距离管路系统进行水锤计算时，应采用弹性水柱理论，以得到较为准确的结果。

4. 按水锤波动的现象，分为水柱连续的水锤现象（无水柱分离）和伴有水柱分离的水锤现象（断流空腔再弥合水锤）。

1.2.2 水锤的危害

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；有时造成泵站淹没，泵船沉没，路面被毁，人身伤亡等^[2]。

在有压管道泵站水力过渡（水锤）过程中，管道出现负压或压力降到饱和蒸汽压以下而导致水柱分离，并在该处形成空气腔，它将连续的水柱截成两段，当分离开的两水柱再重新弥合即空腔溃灭时，由于两股水柱间的剧烈碰撞会产生具有直接水锤特征的压力很高的“断流弥合水锤”。弥合水锤升压很大，根据有关理论计算，排气不畅引起气爆压力最高可达 20~40 个大气压，其破坏力相当于静压 40~80 个大气压，足以破坏任何供水管道。它是供水系统中最具有危害性一种水锤撞击波动，比常见的传统水锤危害要严重的多。据原武汉水利电力学院的水锤专家们提供：生产实践中的长输水管路中所出现的管路破裂，70%~80%与水柱分离有关^[3]。可见，断流弥合水锤的危害是很大的，管线防护的重点将是断流水锤防护。

1.3 国内外水锤防护研究综述

1.3.1 国外研究综述及现状

水锤的研究历史最早可以追溯到 19 世纪关于波的传播理论的探讨。水力过渡过程研究最早是从探讨声波在空气中的传播和波在浅水中的传播以及血液在动脉中的流动

开始的，但是直到弹性理论、微积分学以及解偏微分方程的方法建立以前，这些问题都未能精确地获得解决^[4]。

牛顿(Newton)和拉格朗日(Lagrange)对声波在空气中的波速作了理论分析以及实验测试。牛顿推导出了一个不正确的渠道中的水波波速公式，拉格朗日则推导出了明渠中波速的正确公式，其形式为 $a = \sqrt{gd}$ ，其中 d 为渠道水深。欧拉(Euler)建立了更为详细的弹性波传播理论并导出波传播的偏微分方程。1789 年，蒙吉(Monge)提出了偏微分方程的图解法，并提出了特征线法^[5]。

赫尔姆合尔茨(Helmholtz)首先正确指出，水在管道中的压力波速较其在无围限的水中高是由于管壁有弹性引起的。Marey 为确定在水中和水银中的压力波速进行了广泛试验，得出的波速结论是：压力波的速度与振幅无关；在水银中比在水中要大三倍；与管路的弹性成正比。韦伯(Weber)研究了弹性管中的不可压缩流体的流动并做了决定压力波速度的试验，他建立了压力波的运动方程和连续方程，这些方程是我们研究水锤的基础。1808 年拉塞尔(Resal)发展了连续方程和运动方程，提出了二阶波动方程^[6]。

首先对水锤问题进行研究的是意大利工程师门那布勒(Menabrea)。他在 1858 年所发表的文章中，不同于前人只注意波速，而把着眼点放在由波的传播所引起的压力变化上面。他利用能量原理，考虑了管壁和流体的弹性，导出了波速公式，说明了水击的基本理论，从此奠定了弹性水击的理论基础^[7,8]。锤的基本理论，从此奠定了弹性水锤的理论基础。

同一时期，美国、俄国和意大利的学者分别发表了比较全面系统的水锤理论的著作。1898 年，美国工程师弗里泽尔(Frizell)在美国土木工程师协会会报上发表了论文“管道中流速变化所产生的压力”。文中弗里泽尔导出了水锤波速和由于流速突然变化所产生的水锤压力的公式，并且指出如果管壁弹性模量是无限大，水锤波速与声波在不封闭的水中的速度相等。文中还讨论了分岔管、波的反射以及连续波对速度的影响等问题^[9]。

1897 年，俄国空气动力学家儒科夫斯基(Joukowski)在莫斯科用不同的管道对水锤现象做了大量的实验。在理论和实验的基础上，他于 1898 年发表了题为“管道中的水锤”的著名论文。文中建立了速度减小与压力升高的关系式，即著名的儒科夫斯基公式：讨论了压力波沿管道的传播和压力波在出流端点的反射；对调压室、安全阀以及阀门关闭速率等对水锤的影响也进行了研究；并且指出：当关闭时间 $T < 2L/a$ 时（ L 表示管长， a 表示波速），水锤压力升高达到最大值^[10]。

意大利工程师阿列维(Allievi)稍后于儒科夫斯基，于 1902 年发表了关于水锤理论的

论文。儒科夫斯基的研究只解决了直接水锤的问题，阿列维则在理论分析的基础上，解决了间接水锤的问题。他介绍了两个无因次参数，即 Allievi 常数和阀门关闭特性，他在计算公式中引进了迄今仍在使用的水锤常数。对于线性启闭规律条件下的阀门端的水锤压力，他提供了一套图表，便于实际应用^[11]。阿列维还研究了阀门有节奏的动作并证明了压力不会超过了两倍静水头。儒科夫斯基和阿维列的理论在 20 世纪 20 年代以前获得了广泛应用。

从 19 世纪初至 20 世纪 50 年代末，伍德(Wood)、洛威(Lowy)等人提出了图解法，Schnyder 在分析连有离心泵的管道水锤压力中，计入了全水泵特性，他第一个在图解分析中计入阻力损失。伯格龙(Bergeron)、帕马京(Parmakian)等对图解法做了全面系统的发展。1938 年 Angus 提出了对于复杂管道和分岔管道的水锤压力和液柱分离计算^[12]。其他提出流体分离的学者还有 Lupton, Richard 等。

1933 年，ASCE 和 ASME 联合发起在芝加哥召开了一次水锤专题讨论会，本次会议提出了若干关于压力水管和排水管道中水锤分析的论文。另一次关于水锤的讨论会是在 1937 年召开的 ASME 年会上进行的。这次会议提出了关于空气室和阀门的分析，包含全水泵特性以及计算值与量测值的比较等方面论文。在管道水击分析中，Wood 通过限性化阻力项，使用了 Heaviside 的微积分运算，在这之后 Rich 使用了拉普拉斯变换来分析管道中的水击。

Ruus 第一个提出确定阀门关闭顺序的方法，这个关闭规律称为阀门的最优关闭，它使最大压力保持在规定限制范围内。其后，Cabelka、Franc 和 Streeter 各自提出了这个概念，随后把它推广到复杂管道系统并用计算机来计算。

20 世纪 60 年代初期，美国著名流体力学专家斯特里特 V L(Streeter V. L.)教授连续发表几篇论文^[13,14]，1978 年怀利 E B(Wylie E. B.)和斯特里特 V L(Streeter V. L.)合著 *Fluid Transient*^[15]—书，书中主要讨论了瞬变流的发生、发展的机理以及如何减少和防止由于瞬变流动造成的不利影响，并给出了用 FORTRAN 语言计算瞬变流的方法和程序以及控制瞬变流的工程措施。书中涉及了涡轮泵、调速水轮机、阀调节、往复泵、明渠、石油和天然气输送等系统中的工程实际问题，并系统地介绍了他们运用电子计算机进行水锤计算的研究成果。该书于 1983 年由清华大学译成中文版《瞬变流》。1979 年，加拿大的 M. H. Chaudhry 博士发表专著 *Applied Hydraulic Transients*，书中系统地介绍了水力过渡过程的基本原理、数学模型与工程实用计算方法，以及水电站、核电站、水泵站、输油管道系统中的水力过渡过程计算方法、控制过渡过程的实例、电算程序，也涉及压力管

道中的水柱分离与共振等问题。日本秋元德三教授^[16]于 1972 年出版了《水击与压力脉动》一书，1981 年我国出版了其中文版。

随着管道水锤研究工作的发展，在英国皇家学会流体工程分会的组织下，国际上每隔几年召开一次国际压力涌波会议(International Pressure Surge Conference)，总结和交流这方面的研究工作。我国从第四届（1983 年）开始才有学者参加这项国际会议^[17]。

国际水力研究协会(IAHR)于 1978 年还专门成立了断流水锤研究组，并于 2000 年出版了名为《伴有水柱分离的水力过渡过程》(*Hydraulic Transients With Water Column Separation*)的综合报告书^[18]。该书中详细论述该研究组近年来对断流水锤的研究成果。

近年来，计算机技术迅猛发展，管道水锤的计算机模拟也日趋完善，水锤防护技术也将进入一个崭新的阶段。

1.3.2 国内研究综述及现状

国内对水锤的研究起步较晚，目前对水击基本理论的系统论述的资料较少。国内对水锤的研究始于 20 世纪 60 年代，王守仁和龙期泰等人做了大量试验，对后期水锤计算和防护奠定了基础，特别是对下开式水锤消除器的研究，为其 70 年代的普及使用起到了很好的指导作用。但这一时期专著较少。

80 年代开始，有关水锤的专著才逐渐问世。1981 年，清华大学王树人主编的《水击理论与水击计算》较系统阐述了水击的基本理论和基本方程式的推导，并给出了简单的电算程序^[19]。其后，随着《瞬变流》(*Fluid Transients*)^[20]和《实用水力过渡过程》(*Applied Hydraulic transients*)^[21]两本书的中译版的出版，我国关注水锤的科研人员日趋增多。金锥等人在水柱分离方面进行了多年研究，建立了水柱分离的计算模型，总结了停泵水锤防护的理论，并将停泵水锤的电算方法发扬光大，并将其成果收于《停泵水锤及其防护》^[22]一书中。刘竹溪、刘光临等人将计算机技术用于国内的泵站水锤计算中，对水泵的全特性曲线及单向调压塔进行了深入的研究，并发表多篇论文^[22,23,24,25]，其专著《泵站水锤及其防护》也是较早的水锤论著。索丽生等^[26,27]对水锤进行了理论研究，开展了许多方面的水锤分析；在水电站压力引水系统水力过渡过程研究方面做了大量工作，为调压室在工程中的应用提供了理论基础。王学芳等人主要从事工业管道的水锤防护，涉及输油、电厂、核电等多个领域的水力瞬变研究，并出版了《工业管道中的水锤》^[28]一书。

清华大学在第五届(1986 年)学术会议上发表了两篇论文，水利水电工程系王树人教授和工程力学系王学芳教授等将水电站调压塔的防水锤研究及旋启式止回阀水锤性能

研究成果公布于世，引起了国内外的高度重视。奕鸿儒等人在泵站水锤的试验和计算方面做了大量的工作，发表的论文对国内常用的两阶段关闭蝶阀、逆止阀和微阻缓闭止回阀等在工程中的正确应用起到了指导作用，在系统总结前人成果基础上，对进一步进行瞬变流的研究起到了积极的作用。液控缓闭蝶阀^[29]是我国科技人员 80 年代开发的一种新型水锤防护设备，通过调节阀门的关闭时间和角度(可分为快关和慢关)，来有效预防水锤的发生。杨玉思经过多年苦心研究，1998 年成功研制出一款气缸式排气阀^[30]，极大改进了之前浮球式排气阀的缺点，气缸式排气阀真正解决了长距离输水管道的排气问题，消除了管道中存气带来的起泵水锤和运行水锤的隐患。

近年来，国内学者对有压输水管道系统伴有空穴流、液柱分离两相瞬变流现象的研究也取得了较大进展，于必录^[31]等对有压输水管道系统发生液柱分离现象进行理论研究，认为在有压输水管道系统中，液柱分离是当泵系统的瞬态压力降低到汽化压力时发生在管道系统中的一种局部现象，它涉及诸如气体释放液体气化、水锤压力波速变化以及气液相之间质量与动量交换等复杂的物理现象。蒋劲等提出了用矢通量分解法求解气液两相瞬变流的方法^[32]。杨开林等对输水管道气泡动力特性进行了研究^[33]。郑源等人对于管道负压条件下的气体释放进行了深入研究^[34]，孙兰凤对于管道中采用空气阀消除断流弥合水锤进行了数值模拟^[35]。金锥^[36,37,38]及杨玉思^[39,40,41,42]等人对断流水锤的实验研究、数值模拟、以及气液两相流都有较深入的研究。杨玉思经过多年研究，认为城市管网爆管主要是因为管道排气不畅引发气爆，选择性能优良的排气阀可以减少气爆水锤的发生^[43]。

我国近年来由于大型输水工程的增多，管道的安全运行问题日益引起人们关注，从事这方面研究的学者也逐渐增多。水锤的理论研究以及实际工程的防护都取得了一定的发展，甚至个别领域已达世界先进水平。但随着科技的进一步发展，水锤的研究也将更加深入和完善。

1.4 本文研究的主要内容

本文主要针对长距离大型区域重力流输水系统水力过渡的特点，在学习、总结前人研究成果的基础上进行大量的分析、实验与计算，主要内容如下：

1. 系统地介绍了输水系统水力过渡过程计算的基本原理和方法，简要阐述水锤基本方程式，并给计算中常用的水池、管路中有分支、注排气阀、减压恒压阀、超压泄压阀、调压塔等的边界条件和计算机求解公式。

2. 在前人研究成果的基础上, 根据气体在输水管道中的运行规律, 对气、液两相流的流态产生以及转化过程进行总结, 并根据气、液两相流的特点, 简要阐述输水管道中气囊的运动规律及升压机理, 并对管道排气最佳方式进行探讨。着重对重力流进行分类, 并根据重力流的特点, 总结了长距离大型区域重力流管道中的压力特点, 对重力流输水管道中防水锤技术进行了分析。
3. 对长距离大型区域重力流输水系统的水锤防护措施进行分析, 根据断流弥合水锤空腔介质的不同, 对断流弥合水锤进行分类。并对常用的各种水锤防护设备的结构原理、性能特点及选择的技术要点进行分析说明, 提出选择防护措施时应注意的问题。
4. 根据水锤计算中常用的特征线法, 结合各类边界条件建立了水锤计算的基本数学模型, 应用计算机语言编制水锤防护计算程序, 进行水锤计算。对辽宁省大伙房水库输水工程鞍山加压泵站上游段进行实际计算。通过计算对于断流水锤的不同防护措施进行比较, 在计算中验证不同水锤防护措施对管道水锤防护的影响。最终通过多方面分析给出了长距离大型区域重力流输水系统的最佳水锤防护措施。

第二章 水锤防护计算理论方法及边界条件方程

2.1 水锤防护计算理论方法

2.1.1 水锤波的波速

根据著名的儒科夫斯基公式：

$$\Delta H = \frac{aV_0}{g} \quad (2.1)$$

式中 ΔH ——水锤升压值 (m);

V_0 ——管道流速 (m/s)。

公式 (2.1) 是弹性水柱 (锤) 理论方面最基本的公式。利用该公式进行水锤升压值 ΔH 的具体计算时，必须首先确定 a 值。管道中由于流速的骤变而引起的压力变化的传播为水锤波的传播，其传播速度简称为水锤波速并以符号 a 表示。

水锤波速 a 与液体的压缩性及管壁的弹性有关， $\frac{d\rho}{\rho}$ 反映水体的可压缩性， $\frac{dA}{A}$ 反映管壁的弹性。可以从水锤动量方程并根据水的连续性及质量守恒定律导出：

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right)}} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{KD}{Ee}}} \quad (2.2)$$

式中： a ——水锤波速， m/s;

K ——水的体积弹性模量， N/m²;

ρ ——水的密度， N·s²/m⁴;

D ——管径， m;

E ——管壁材料的弹性模量， N/m²;

e ——管壁厚度， m。

公式(2.2)适用于一般的净化水，均不考虑水中含气的问题。当水中掺入空气后，其体积弹性模量 K 值将减小。当微小气泡均匀的分布于薄壁水管中时， a 值可按式(2.3)计算：

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma - (\gamma - \gamma') \frac{W'}{W}}{g} \left[\frac{1 + \left(\frac{K}{K'} - 1 \right) \frac{W'}{W}}{K} + \frac{D}{Ee} \right]}} \quad (2.3)$$

式中: γ ——水的容重, N/m³;

γ' ——空气的容重, N/m³;

$\frac{W'}{W}$ ——空气的容积掺入率, %

W ——混合液的体积, m³;

W' ——混合液中气泡的体积, m³;

K ——水的体积弹性模量, N/m²;

K' ——空气的体积弹性模量, N/m²。

2.1.2 水锤特征线方程及其解法简述

特征线法的基础是水锤基本微分方程式, 由水锤过程中的运动方程和连续方程两部分组成, 它是全面表达有压管流中恒定流动规律的数学表达式, 是一维波动方程的一种形式。

按弹性水柱理论, 可分两个方程式表述如下:

运动方程式:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{f}{D} \frac{V|V|}{2g} = 0 \quad (2.4)$$

连续性方程式:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \sin \alpha \right) + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

式中: H ——产生水锤时管路中的测压管水头;

V ——产生水锤时管路中的流速 (m/s);

f 、 D 、 g ——分别为管道摩阻系数、管径、重力加速度;

a 、 α ——分别为水锤波的传播速度 (m/s)、管路与水平面间夹角;

x 、 t ——分别为水锤波传播的距离、时间。

运用特征线法求解水锤问题的步骤为: 第一步, 将不能直接求解的流动暂态偏微分

方程式转化为特定形式的全微分方程组，称为特征线方程；第二步，对全微分方程组进行积分，产生近似的代数积分式——有限差分方程；有限差分方程对管路划分为多个步段 Δx ，对时间划分为多个时段 Δt ，逐次地进行求解，分段愈细密，其解与原积分愈近似，不过计算工作量也愈大；第三步，根据有限差分方程和管路系统的边界条件方程编制源程序上机运算^[1]。

当流速比波速小的很多时($V \ll a$)，从上述两式中略去影响小的流速项，同时若不计高差引起的压强变化，则上两式的简化式为：

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{D} \frac{V|V|}{2g} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.7)$$

对式(2.4)和式(2.5)两个偏微分方程分别用 L_1 和 L_2 标志：

$$L_1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad (2.8)$$

$$L_2 = V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \sin \alpha = 0 \quad (2.9)$$

将式(2.8)乘以待定系数 λ 后，再和式(2.9)相加，其和仍应等于零：

$$\lambda L_1 + L_2 = \left[\frac{\partial H}{\partial x} (V + \lambda g) + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \lambda \left[\frac{\partial V}{\partial x} \left(V + \frac{a^2}{g} \right) + \frac{\partial V}{\partial t} \right] + V \sin \alpha + \frac{\lambda}{2D} V|V| = 0 \quad (2.10)$$

根据复合函数的微分运算规则，若令

$$\frac{dx}{dt} = V + \lambda g \quad (2.11)$$

则式(2.10)中右侧的第一个方括号内的各项将成为全微分 $\frac{dH}{dt}$ ，若令

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

则式(2.10)中右侧的第二个方括号内的各项将成为全微分 $\frac{dV}{dt}$ 。若想使整个式(2.10)

成为全微分，则应为

$$V + \lambda g = V + \frac{a^2}{\lambda g}$$

$$\text{即 } \lambda = \pm \frac{a}{g} \quad (2.13)$$

这样，就获得了两个特殊 λ 值。这两个 λ 值代入式(2.11)和式(2.12)中，可得

$$\frac{dx}{dt} = V \pm a \quad (2.14)$$

将这两个 λ 值代入式 (2.10)，可得到与式 (2.8) 和式 (2.9) 等价的两个常微分方程组为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dv}{dt} + V \sin \alpha + \frac{af}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{aligned} \right\} C^+ \quad (2.15)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dv}{dt} + V \sin \alpha - \frac{af}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V - a \end{aligned} \right\} C^- \quad (2.16)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dv}{dt} + V \sin \alpha - \frac{af}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V - a \end{aligned} \right\} C^- \quad (2.17)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dv}{dt} + V \sin \alpha + \frac{af}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{aligned} \right\} C^+ \quad (2.18)$$

以上就是管内流动暂态的特征线方程，它们的意义可利用图 2.1 进行说明。

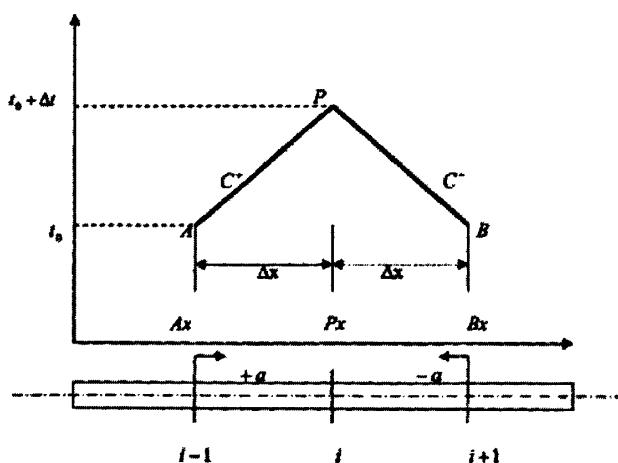


图 2.1 特征线方程的意义

如图 2.1 所示， Δx 表示 Δt 时段内水锤波以波速 a 沿管路移动的距离，例如，在 t_0 时刻，管路 A 处传出一正水锤波 $+a$ ，在 $t_0 + \Delta t$ 时移动了 Δx 距离而到达 P 点（即对应 $+a$ 线上的 P 点），同理在管路 B 点传出一反向水锤波 $-a$ ，在 $t_0 + \Delta t$ 时移动了 Δx 距离而到达 P

点(即对应 $-a$ 线上的P点)。所以把斜率为 $\pm a$ 的直线分别称为正负水锤特征线。

A 和 B 点代表地点 x 和 t 时刻已给定的两个点,它们的 H 和 V 是已知的。通过 A 点曲线相当于式(2.16),沿着 C^+ 曲线可以应用式(2.15),通过 B 点曲线相当于式(2.18),沿着 C^- 曲线可以应用式(2.17),因此,联立式(2.15)和(2.17)解出的 H 和 V 值,就是两条曲线交汇点 P 上的参数 H_p 和 V_p 。曲线 C^+ 和 C^- 称为特征线,式(2.15)和(2.17)称为相容性方程,相容性方程的解就是原始基本微分方程(2.4)和(2.5)的解。由于求解过程是沿着特征线 C^+ 和 C^- 进行的,故只能得到特征线交点上的参数值。

由于大多数工程管道为刚性壁面材料制成,波速 a 比流速 V 大的很多,故式管内(2.16)和(2.18)中的流速项可以忽略不计,再忽略相容性方程中相当次要的 $V \sin \alpha$ 项,则管内流动暂态的特征线方程可以简化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{af}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = a \end{aligned} \right\} C^+ \quad (2.19)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dv}{dt} - \frac{af}{2gD} V|V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{aligned} \right\} C^- \quad (2.21)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} = -a \end{aligned} \right\} C^- \quad (2.22)$$

有限差分方程式的推导(2.19)、(2.21)两式分别从 A 、 B 点沿 C^+ 、 C^- 积分到 P 点,式中流速 V 用流量 $Q = VA$ 代替,则点的 A 由 H_A 变为 H_p , Q 由 Q_A 变为 Q_p , B 点的 H 由 H_B 变为 H_p , Q 由 Q_B 变为 Q_p ,可得近似简化积分式为:

$$H_p - H_A + \frac{a}{gA} (Q_p - Q_A) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_A |Q_A| = 0 \quad (2.23)$$

$$H_p - H_B - \frac{a}{gA} (Q_p - Q_B) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_B |Q_B| = 0 \quad (2.24)$$

式中 $\Delta x = a\Delta t$ 。特征线为斜率固定不变的直线,利用有限差分方程进行运算的过程可以用 $x-t$ 坐标图中的矩形网格来描述。如图2.2所示,将管路划分为 N 个间距均为 Δx 的步段,断面排列序号用 i 表示,管路始端断面 $i=1$,终端断面 $i=N+1$,计算时段应

为 $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$ 。

在以 Δx 和 Δt 为单元组成的矩形网格中，所有的对角线均为特征线。 C^+ 为正坡对角线（如 AP 线）， C^- 为负坡对角线（如 BP 线）。从 $t=0$ 的已知初始状态（即暂态发生前的恒定流动状态）开始进行运算。在第一个计算时段 ($t=0$ 至 Δt)，A 和 B 点的参数已知，用相容性方程简化式(2.23)和(2.24)可算得 P 点的参数。在第一个计算时段结束时，矩形网格 $t=\Delta t$ 那一层上所有结点 P 的参数都将求得（出边界结点外）。于是可进入第二个计算时段 ($t=\Delta t$ 至 $2\Delta t$) 的运算，依次类推，直到矩形网格中全部结点的参数均算得为止。

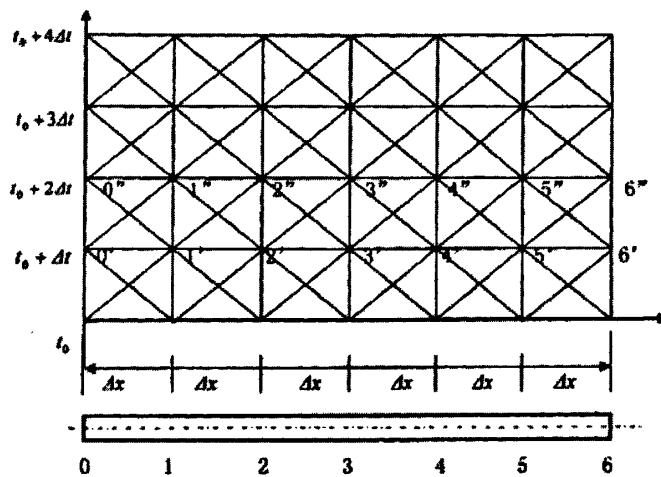


图 2.2 简化差分公式的矩形网格

为了用计算机有次序地计算全部网格节点上的参数，有限差分方程中的角标 A、B 分别用序号角标“ $i-1$ 、 $i+1$ ”代替，角标 P 则用序号角标“ P_i ”代替。凡是代求的时段终止参数均采用双重角标，即用 Q_{P_i} 和 H_{P_i} 代表时段终了参数，以与时段初始已知参数 Q_i 和 H_i 相区别。角标变动后式 (2.23) 和 (2.24) 可改写为

$$H_{P_i} - H_{i-1} + \frac{a}{gA} (Q_{P_i} - Q_{i-1}) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_{i-1} |Q_{i-1}| = 0 \quad (2.23')$$

$$H_{P_i} - H_{i+1} - \frac{a}{gA} (Q_{P_i} - Q_{i+1}) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_{i+1} |Q_{i+1}| = 0 \quad (2.24')$$

式中 B、R——计算常数。

$$B = \frac{a}{gA}, \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad (2.25)$$

$$C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \quad (2.26)$$

$$C_m = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (2.27)$$

将式(2.25)至(2.27)代入(2.23')和(2.24')得

$$C^+: \quad H_{pi} = C_p - BQ_{pi} \quad (2.28)$$

$$C^-: \quad H_{pi} = C_m + BQ_{pi} \quad (2.29)$$

$$\text{或} \quad H_{pi} = \frac{C_p + C_m}{2} \quad (2.30)$$

$$Q_{pi} = \frac{C_p - C_m}{2B} \quad (2.31)$$

从式(2.25)至式(2.31)便是适宜于编入计算机程序的相容性方程。

应当指出，特征线方程 C^+ 和 C^- 的交点，只包括图2.2中的矩形网格内的节点，两端断面上的参数，则还必须通过各个瞬时的边界条件才能确定。另外，为了防止水锤，在管线上还要装设相应的水锤防护设备，在这些装设水锤防护设备的点上的参数，必须通过它们的边界条件来确定。

2.2 边界条件方程式

单一管路的两个端部结点，都只有一个相容性方程可以利用，为要确定边界上的两个控制参数 H_p 和 Q_p 值，以及对于某些特殊边界点，例如，两端断面点、管线上装设水锤防护设备的点等，还需要其它的边界条件方程。

2.2.1 首端水池的边界条件

对于大水池，在短促的暂态期间，水位可认为是恒定的。设水池水位为 H_R ，则管路上游端节点1的水头 $H_{p1} = H_R$ 。

当水面以某种规律变化时，如按正弦波振荡的情况，则

$$H_{p1} = H_R + \Delta H \sin \omega t \quad (2.32)$$

式中： ΔH ——波动幅度；

ωt ——相位。

H_{p1} 确定后，可用相容性方程式(2.29)计算节点流量

$$Q_{p1} = \frac{H_{p1} - C_m}{B} \quad (2.33)$$

2.2.2 末端水池的边界条件

管道与末端水池的连接。末端水池面积一般较管道面积大的多，设水池水位为 H_m ，则管路末端节点 NS 的水头 $H_{pNS} = H_m$ ，再与式（2.28）联立求解 Q_{NS} 即可。

2.2.3 枝状管网的连接点（管路中有分支）

以图 2.3 中的四支管连接点为例进行讨论。连接条件有

1. 连续条件：

$$\sum Q_p = Q_{P1,NS} + Q_{P2,NS} - Q_{P3,1} - Q_{P4,1} = 0 \quad (2.34)$$

2. 水头条件：

$$H_p = H_{P1,NS} = H_{P2,NS} = H_{P3,1} = H_{P4,1} \quad (2.35)$$

对支管 1 和 2 写最后步段的相容性方程式（2.28），可得

$$Q_{P1,NS} = \frac{C_{P1} - H_p}{B_1}, Q_{P2,NS} = \frac{C_{P2} - H_p}{B_2} \quad (2.36)$$

对支管 3 和 4 写最前步段的相容性方程式（2.29），可得

$$Q_{P3,1} = \frac{H_p - C_{M3}}{B_3}, Q_{P4,1} = \frac{H_p - C_{M4}}{B_4} \quad (2.37)$$

将以上两式中的流量表示式代入式（2.34），则

$$\sum Q_p = -H_p \sum \frac{1}{B} + \frac{C_{P1}}{B_1} + \frac{C_{P2}}{B_2} + \frac{C_{M3}}{B_3} + \frac{C_{M4}}{B_4} = 0$$

$$\text{即 } H_p = \frac{C_{P1}/B_1 + C_{P2}/B_2 + C_{M3}/B_3 + C_{M4}/B_4}{\sum 1/B} \quad (2.38)$$

在 H_p 算得后，再按式（2.36）和（2.37）计算各支管在连接点处的流量。

复杂管路系统中的任何连接点，都是一种枝状连接点，可应用以上公式计算各支管的流量 Q_p 和连接点水头 H_p 。

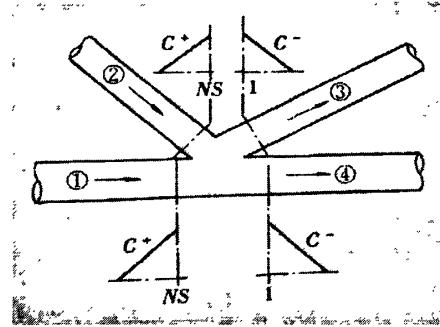


图 2.3 枝状管网的连接点

2.2.4 管路内部阀门的边界条件

若通过阀门的流量为 Q , 阀门引起的水头损失为 ΔH , 则两者关系可表示为

$$\Delta H = \zeta \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.39)$$

$$Q = C \sqrt{2g\Delta H} \quad (2.40)$$

式中: ΔH ——阀门处的水头损失, m;

Q ——通过阀门的流量, m^3/s ;

A ——阀门过流断面积, m^2 ;

ζ ——阀门处的阻力系数;

C ——阀口开启面积乘以流量系数。

ζ 、 C ——两者之间的关系为

$$\zeta = \frac{A^2}{C^2} \quad (2.41)$$

将式(2.39)或(2.40)和阀门上、下游两侧的相容性方程式(2.28)和(2.29)联立, 可解出三个未知数: 流量 Q_p 和阀门上、下游两侧的两个 H_p 值。

2.2.5 串联管路的连接点的边界条件

若系统中有直径不同的支管 1 和 2 相串联(见图 2.4), 在连接点应联立管 1 中第 N 步段的 C^+ 方程和管 2 中第 1 步段的 C^- 方程求解, 连接条件有

1. 连续条件:

$$Q_{p1,NS} = Q_{p2,1} \quad (2.42)$$

2. 水头条件(不计连接点处的动能和水头损失):

$$H_{P1,NS} = H_{P2,1} \quad (2.43)$$

式中角标 NS 代表结点序号 $N+1$, 双重角标的前一个代表支管序号, 后一个代表支管内的断面序号。

将相容性方程式 (2.28) 和 (2.29) 代入以上两式, 可得

$$Q_p = \frac{C_{p1} - C_{M2}}{B_1 + B_2} \quad (2.44)$$

$$\text{和 } H_p = \frac{B_2 C_{p1} + B_1 C_{M2}}{B_1 + B_2} \quad (2.45)$$

式中 B_1 、 C_{p1} ———为管 1 中的参数;

B_2 、 C_{M2} ———为管 2 中的参数;

串联主要指管路直径发生变化的情况, 但计算原则同样适用与壁面材料、粗糙度等特性发生变化的场合, 因为这时各段的 B 、 C_p 、 C_M 值也会有变化。

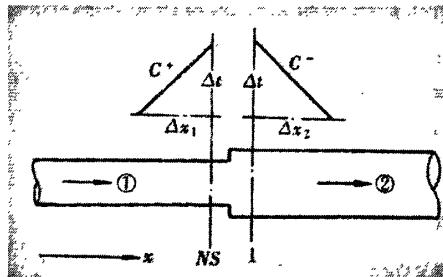


图 2.4 串联管路的连接点

2.2.6 注排气阀边界条件

(1) 注排气阀的通用边界公式

注排气阀的边界条件是相当复杂的, 对于空气从排气阀中流进流出可以采用空气动力学中拉瓦尔喷管公式^[20,44,45,46]。在使用该公式前首先有如下假定:

1. 空气等熵的流入流出阀门;

2. 管内的空气质量遵守等温规律, 这是由于管内空气质量通常很小而管道面积和水体表面积很大, 这就提供了一个大热容, 使气体温度接近水体温度;

3. 进入管内的空气留在它可以排出的阀附近;

4. 水体表面高度基本上保持不变, 而空气的体积与管道内水的体积相比很小。

通过排气阀流进流出的空气质量流量取决于管外大气的绝对压力 P_0 、绝对温度 T_0 以及管内的绝对压力 P 和绝对温度 T 。

以亚音速流入空气:

$$\dot{m}_{in} = C_{in} A_{in} P_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_0} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \quad (P_0 > P > 0.53P_0) \quad (2.46)$$

以临界速度流入空气:

$$\dot{m}_{in} = C_{in} A_{in} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0}} \quad (P < 0.53P_0) \quad (2.47)$$

以亚音速流出空气:

$$\dot{m}_{out} = -C_{out} A_{out} P \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT} \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \quad (P_0 < P < 1.887P_0) \quad (2.48)$$

以临界速度流出:

$$\dot{m}_{out} = -C_{out} A_{out} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} P \sqrt{\frac{k}{RT}} \quad (P > 1.887P_0) \quad (2.49)$$

式中: \dot{m}_{in} ——流入空气的质量流量;

\dot{m}_{out} ——流出空气的质量流量;

C_{in}, C_{out} ——阀的流量系数;

A_{in}, A_{out} ——阀的开启面积;

k ——绝热指数, 对于空气 $k=1.2$;

R ——气体常数, $287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

(2) 注排气阀理论边界条件

当不存在空气且水头高于大气压时, 两端接头处的的边界条件就是一般内截面解。

当水头降到管线高度以下时, 空气阀打开, 流入空气, 在空气排出之前, 在计算的每个增量末端都满足恒内温的一般的气体规律。

$$P\forall = mRT \quad (2.50)$$

从图 2.5 中可见

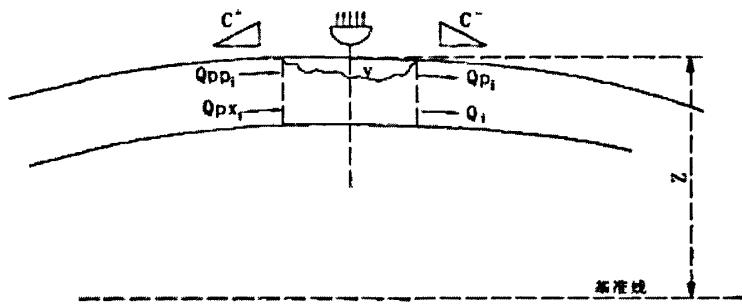


图 2.5 排气阀流动的符号法

$$P[\nabla_i + 0.5\Delta t(Q_i - Q_{pxi} - Q_{ppi} + Q_{pi})] = [m_0 + 0.5\Delta t(\dot{m}_0 + \dot{m})]RT \quad (2.51)$$

式中: ∇_i ——时间增量开始时的空穴体积;

Q_i ——空穴的起始流出流量;

Q_{pi} ——空穴的末了流出流量;

Q_{pxi} ——空穴的起始流入流量;

Q_{ppi} ——空穴的末了流入流量;

m_0 ——空穴中空气的起始质量;

\dot{m}_0 ——空气流入或流出空穴的起始质量流量;

\dot{m} ——空气流入或流出空穴的末了质量流量。

C^+ 和 C^- 方程取简单形式为:

$$C^+ : H_{pi} = C_p - BQ_{ppi} \quad C^- : H_{pi} = C_M + BQ_{pi} \quad (2.52)$$

H_p 和 P 之间的关系为:

$$\gamma(H_p - z + \bar{H}) = P \quad (2.53)$$

式中: \bar{H} ——气压计压头, m;

γ ——液体的重度;

z ——排气阀高出 H_p 基准的高度, m。

将公式 (2.52) 和 (2.53) 代入 (2.51) 得

$$P \left\{ \nabla_i + 0.5dt \left[Q_i - Q_{pxi} - \frac{C_M + C_p}{B} + \frac{2}{B} \left(\frac{P}{\gamma} + z - \bar{H} \right) \right] \right\} = [m_0 + 0.5dt(m_0 + \dot{m})]RT \quad (2.54)$$

方程 (2.54) 即为注排气阀的通用计算公式, 与式相容性方程式 (2.28) 和式 (2.29)

联立, 即可求解。

方程(2.54)为注排气阀边界的通用方程式,未考虑不同排气阀的排气性能,对于不同的排气阀应增加相应的限定条件。

①真空破坏阀

根据真空破坏阀只进气不排气的特点,其限定条件为:当 $P > P_0$ 时, $m_{out} = 0$ 。

②浮球式排气阀

虽然浮球式排气阀性能差异较大,但是都有一个共同特点:在一定压力下会突然起球。所不同的是,不同的排气阀起球压力不同而已。所以,浮球式排气阀的限定条件为:当 $P > P_q$ 时,中止排气,即, $m_{out} = 0$, P_q 为排气阀的起球压力。

③具有恒速缓冲功能的排气阀

具有恒速缓冲功能的排气阀比其它浮球式排气阀增加了缓冲装置,对气流起到一定的限制作用,排气速度为定值,一般设定排气速度为0.3m/s,相当于主管道流速。

2.2.7 减压恒压阀的边界条件

适用于大型输配水重力流管线的减压恒压阀,能够既减动压又减静,无论进口压力和流量如何变化,该阀出口压力都保持恒定不变。根据减压恒压阀工作原理,减压阀出口压力 H_{p1} 的值恒等于管道此处正常运行时的压力值。则节点流量 $Q_{p1} = \frac{(H_{p1} - C_M)}{B}$ 。

2.2.8 超压泄压阀的边界条件

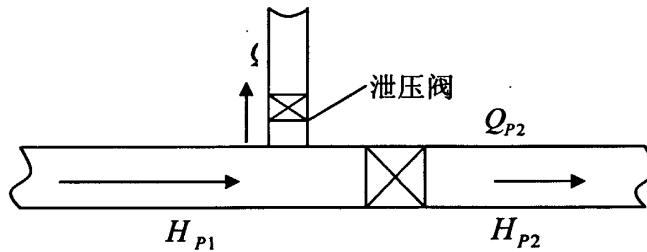


图 2.6 泄压阀安装结构简图

超压泄压阀在与管道连接点处有:

$$H_{p1} = H_{p2} = H_{p3} \quad (2.55)$$

$$Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{p3} = 0 \quad (2.56)$$

式中: Q_{p1} 、 Q_{p2} 、 Q_{p3} ——超压泄压阀上、下游及阀处的流量, m^3/s ;

H_{p1} 、 H_{p2} 、 H_{p3} ——超压泄压阀上、下游及阀处的压力, m 。

当管道压力 H_p 小于超压泄压阀启动压力 H_x 时, $Q_{p3} = 0$, 当管道压力超过泄压阀启动压力时, 泄压阀进出口处有:

$$Q_{p3} = C_d A_G \sqrt{2g(H_{p3} - H_0)} \quad (2.57)$$

式中: C_d ——流量系数;

A_G ——开口面积, m^2 ;

H_0 ——管道外部压力, m 。

根据超压泄压阀工作原理, 超压泄压阀的泄压值 H_x , 一般采用安装超压泄压阀处的最大正常使用压力 H_n 加 $0.15\sim0.20\text{MPa}$ 。当瞬时压力 H 超过泄压值时, 开始泄压。即, $H \geq H_n + (15\sim20)$ 时, 开始泄压。

$$H \geq H_n + (15\sim20) \text{ 时}, \quad H = H_n + (15\sim20) \quad (2.58)$$

将式 (2.55) 至式 (2.56) 与式 (2.28)、(2.29) 联立, 即可求解。

2.2.9 调压塔的边界条件

对于流入调压塔的正向流有

$$Q_{p1} = \sqrt{2g(H_p - H_t)} \quad (2.59)$$

流出调压塔的逆向流有

$$Q_{p2} = -\sqrt{2g(H_t - H_p)} \quad (2.60)$$

式中: Q_{p1} 、 Q_{p2} ——流入、流出调压塔内的流量;

H_p ——调压塔内泄流或注水后的水深;

H_t ——调压塔内原来水深。

(1) 单向调压塔

根据单向调压塔工作原理, $Q_{p1} = 0$ 。当安装单向调压塔处开始出现负压时开始注水, 即, $H < h$ 时, 开始注水, $H = h$ 。

$$H < h \text{ 时}, \quad H = h \quad (2.61)$$

将式 (2.59)、式 (2.61) 与相容性方程式 (2.28) 和式 (2.29) 联立, 即可求解。

(2) 双向调压塔

根据双向调压塔工作原理, 调压塔的泄压值 H_x 为安装双向调压塔处的最大正常使

用压力 H_n , 当瞬时压力 H 超过泄压值时开始泄水, 即, $H > H_n$ 时, 开始泄水降压; 当压力降低时开始注水, 即, $H < H_n$ 时, 开始注水。

$$H > H_n \text{ 时,} \quad H = H_n \quad (2.62)$$

$$H < H_n \text{ 时,} \quad H = H_n \quad (2.63)$$

将式(2.59)、式(2.60)、式(2.62)、式(2.63)与相容性方程式(2.28)和式(2.29)联立, 即可求解。

(3) 箱式双向调压塔

根据箱式双向调压塔工作原理, 箱式双向调压塔的泄压值 H_x 为安装箱式双向调压塔处的最大使用压力 H_n 加塔内水深 h 。当该点瞬时压力 H 超过泄压值时开始泄压, 即, $H > H_n + h$, 开始泄水降压, $H = H_n$; 当该点开始出现负压时开始注水, 即, $H < h$ 时, 开始注水, $H = h$ 。

$$H > H_n + h \text{ 时,} \quad H = H_n + h \quad (2.64)$$

$$H < h \text{ 时,} \quad H = h \quad (2.65)$$

将式(2.59)、式(2.60)、式(2.64)、式(2.65)与相容性方程式(2.28)和式(2.29)联立, 即可求解。

式中: H ——管路水头, m;

H_n ——最大使用压力(稳态时正常压力), m;

h ——塔内水深, m。

第三章 输水管道中气液两相流特点及排气方式

3.1 输水管道中气液两相流的六种基本流态及转化

在输配水工程中，管道起伏不大，可视为水平管道，由于设计流速一般不大，管道中的气体多以气囊形式存在于管子上部。在多起伏的管道中，气囊多存在于管道的凸起点；而在坡度小，较平坦管道中，气体则以众多相互独立的大气囊形式分散存在。据美国马丁教授的研究理论，较平坦的供水管路呈现六种气液两相流状态^[40,41,42]，如图 3.1 所示。

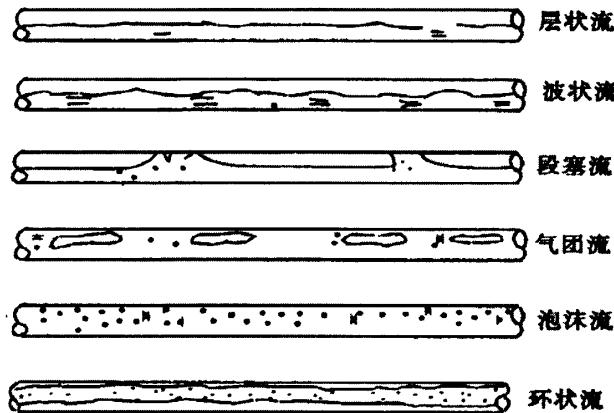


图 3.1 输配水管道中气液两相流的六种流态

(1) 输水管道中常见的六种流态

①层状流（管道充水前期）

在管道充水初期，管中液相比例较小，气相和液相的流速都不大，这时气相和液相分别在管道的上层和下层流动，气、液间具有平滑的界面。

②波状流（管道充水中期）

随着液相流量的增大，液相比例加大，气相比例减小，液相流速较小，气相流速较大，则下层液体在上层气流的扰动作用下，呈现波浪状的界面，即为波状流。

③段塞流（管道充水后期）

随着液相流量的进一步增大，液相比例继续加大，气相比例继续减小，管中形成液相和气相互间断的段塞状流动，称为段塞流。气团与管壁间有一层液膜，液段中则夹杂着许多小气泡。

④气团流（管道充水后期）

气团流多发生在管道充水后期和运行阶段，管道中基本为液相充满，在局部有气团

形成，此时液相流速较大，气相流速较小，气相形成长条形的气团，聚集在水平管上部，随液相流一起流动。

⑤泡沫流(瞬间出现并迅速转化)

液相在强烈的扰动下与气相混合或气相从液相迅速析出时会形成泡沫流。但是泡沫流并不稳定，瞬间即转化为其他流态。由于泡沫流转化速度较快、形成条件复杂，所以，很难观察到。

⑥环状流（瞬间出现并迅速转化成波状流或段塞流）

气相流速很大，液相被气相吹铺成沿管壁周边的环状液膜，气相在环膜中间高速运动，此时即是环状流。环状流同泡沫流一样不稳定并且形成条件复杂。环状流的环状液膜会在重力作用下迅速破坏，转化成波状流或段塞流。

(2) 六种流态的产生阶段

①层状流主要产生于通水开始阶段，管中水量较小，气液两相流速都较低。

②随着管中水量的增加，管中气体压缩，液相流速变化不大，气相流速变大，此时产生波状流。

③当管中已充入大量的水，气相形成长条形的气团，聚集在水平管上部，形成段塞流。

④进一步开大阀门，液相流速变大，产生气团流。

⑤当管中液相发生剧烈扰动时，气液发生混合或出现负压气体从水中析出时，产生泡沫流。

⑥环状流仅在气液两相非稳定流动的某些特殊情况下出现。

(3) 六种流态间的相互转化

由前文中六种流态的产生条件及阶段可以看出，充水过程中气、液两相流的六种流态主要取决于两相的速度、物理特性（温度、密度、粘滞性等）和水流充满度等。随着影响因素的改变，六种流态间也将进行相互转化根据各种流态的产生条件及阶段以及充水进展，六种流态间的转化关系如图 3.2 所示。由图中可以看出，管道在正常充水过程中将经历层状流、波状流、气团流及段塞流，在特殊情况及部位有时会产生泡沫流和环状流，但最终的流态都将是段塞流。即管道下部被水充满管顶存在很多不连续的条状气囊的状态。

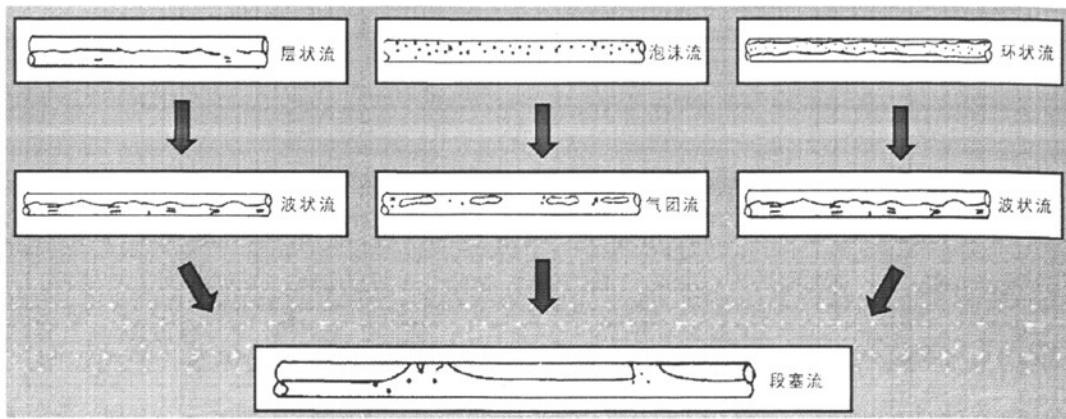


图 3.2 六种流态间的相互转化

①层状流→段塞流

层状流向段塞流的转化是管道充水过程最常见的，随着管道中液相的增加、气相的减少，层状流首先转化为波状流，进而转化为段塞流。

②环状流→段塞流

环状流是一种不稳定流态，环状液膜在重力作用下会被破坏。当管道液相充满度不大时，液膜破坏环状流将先转化为波状流，波状流进而转化为段塞流；当管道液相充满度较大时，液膜破坏环状流将直接转化为段塞流。

③波状流→段塞流

波状流通常是充水过程中的一个中间状态，随着液相的增加转化为段塞流。

④气团流→段塞流

气团流是充水末期一种较稳定的过渡流态。充水末期，管道上壁会聚集一些小型气团，当液相流速不大时，气团附着在管壁上，当液相流速增大时，小型气团会随液相一起运动，在管道凸起部或阻力较大处发生聚集，形成段塞流。

⑤泡沫流→段塞流

泡沫流的产生条件比较复杂，所以转化也较快，泡沫流多发生在充水后期的某些特殊工况点，所以泡沫流产生后首先小泡沫聚集，迅速转化为气团流，进而气团流转化为段塞流。

由以上六种流态的转化分析可以发现，在长距离输水管路中，段塞流是气液两相流的最终转化形式。因此在长距离输水管路上选择某些水锤防护设备时必须考虑到长距离输水管路中水的流态形式。

3.2 输水管道中气囊运动及其升压问题

3.2.1 管道中的气体来源

- (1) 新管道首次送水;
- (2) 事故抢修放空;
- (3) 管道出现负压, 排气阀注气;
- (4) 水在流动中的气体释放;
- (5) 在水泵吸水管和叶轮内, 因运行负压产生的气体释放。

3.2.2 气囊形成的部位

(1) 管径变化处

由于给水管道的连接方式均为中心线连接, 而气体主要存在于管道上部, 当管径由大变小时, 气体有时会卡于连接口处, 无法被水流带走, 形成气囊。

(2) 管道坡顶

气体在水中受到浮力, 一般都是上行的, 所以, 对于有坡管道, 气体很容易在坡顶发生聚集, 产生气囊, 有时甚至堵塞管道中断水流。

(3) 管道交叉处

在管道交叉处, 水流从大管径流向小管径, 由于管道的连接方式, 气体有时会卡于连接口处无法被水流带走。

(4) 平坦管路

有时平坦管路也会形成气囊。在平坦管路气体运动到管顶后受到管壁摩擦力会附着在管壁, 大量气体附着就会形成气囊。

(5) 逆坡管路

在逆坡管路水流向下流而气泡向上运动, 当浮力不足以克服水流推力时, 气体便聚集在管壁处, 形成气囊。

(6) 坡度变化处

由于坡度变化使水流出现波动, 出现波状流, 进而转变为段塞流。

(7) 各类阀门内部及安装处

当水流通过阀门时, 流速和方向都将发生变化, 流态紊乱, 有产生气体析出可能, 同时, 由于阀门构造上的原因, 各类阀门如旋启式止回阀、减压阀、水位控制阀等处, 气体不易排出, 均可能产生气体聚积, 形成气囊。

3.2.3 气囊运动升压机理及特点

大量的工程实践表明，管道中的气囊随水流时由于受管坡、管壁粗糙度变化以及弯管、变径各类管道配件的影响，时而分散时而聚合，极易造成气囊两端压差改变，这种微小压差变化对于不可压缩的水来说不会有影响，但对空气来说影响是极大的。

如前所述，输水管道在充水和运行中可能有六种流态，但其中层状流，波状流仅在管道充水的初始阶段存在，泡沫流，气团流以及环状流都存在时间较短，或称之为过渡流态，故一般情况下管道存气多呈段塞流形态或其特例——独立的大气囊形态。

管道气囊运动或断流水锤升压主要有三种工况^[42]：

(1) 气囊在管内运动工况

有压管道内气囊运动产生的压力升高往往类似于断流弥合水锤，其升压值与气囊所占管道过水断面的大小及气囊两端压差有关。假定某管道中存有的气囊突然聚集，横断面积为管道断面的 $1/4$ ，聚集后气囊两端压差 H 为 0.01m ，该管段局部阻力系数之和为 1 ，刚该气囊从静止突然启动，其运动速度 V 可达 12.8m/s ，由气囊运动引起的主管道水流突然变化 ΔV 为 $12.8/4=3.2\text{m/s}$ 。特别值得注意的是，气囊引起的断流弥合水锤升压极快，往往在不到 1s 就迅速升压到最大值，假定此管段波速为 1000m/s ，由直接水锤公式可得流速变化引起的水锤压力升降为 320m 水柱。足以对管道造成严重破坏。

(2) 气囊通过管道中连通阀门，管道出口等工况

著名美国水锤专家 V.L.Streeter 在其所著《瞬变流》(Hydraulic Transients)一书中介绍了一个算例：一条由水池接出的直径为 1m 、长度为 61m 的单一管道，水池水位为 30m ，距管道末端 12m 一段存有空气，管首端阀门在 0.95s 内打开，该管段开始时绝对压力为 102kPa ，在接近 2.5s 时猛增至绝对压力 2331 kPa (约 223m 水柱)，由此可见气囊运动所引起管道压力振荡的严重程度。

(3) 断流弥合的水柱撞击工况

当管道流量调节过快或突然停泵等造成局部压力骤降，并出现断流空腔时，空腔两端的水柱会在压力波反射后迅速回冲，弥合断流空腔，并引起较大的水柱撞击升压，称之为断流弥合水锤。断流弥合水锤升压大小与其空腔内含气量及排出方式等有关，最大升压可按直接水锤计算公式，即，

$$\Delta H = \frac{\alpha}{2g} \Delta V \quad (3.1)$$

式中： ΔH ——断流弥合升压， m ；

ΔV ——两股水柱碰撞时的流速差, m/s;

a ——波速, 一般为 800~1300m/s;

g ——重力加速度, 9.81m/s²。

3.3 有压输水管道气囊的危害

3.3.1 显性危害

(1) 排气不畅造成通水困难

在水气相间时, 浮球式排气阀的大排气口的作用几乎为零, 仅靠微孔排气, 造成了严重“气堵”, 空气排不出, 水流不畅, 通水期间需进行人工压球辅助排气, 还经常造成管道的其他故障, 通水短则数月, 长则数年才能完成。典型的是我国华北某大城市重力流输水管, 采用的是日本进口排气阀, 通水时每个阀门井派 6 个人 3 班倒进行人工辅助排气。

(2) 排气不畅造成水阻增大, 流量达不到设计值甚至接近于零

我国南方某沿海城市, 供水管道长 11km, 使用浮球式排气阀只能微量排气, 造成管道气阻, 运行一段时间, 流量降低 18%, 后将其中 7 台排气阀更换成气缸式, 才通水顺畅。西南某市, 管径 DN1600, 管长约 15km, 沿线装 21 台浮球式排气阀, 试通水耗时 2 年多, 输水量达不到设计要求, 且运行不稳定, 最后更换了 11 台能大量排气的气缸式排气阀, 才通过验收。西北某大城市, 因管道气堵, 水厂供水必须每天进行人工排气, 后选用法国、德国的排气阀仍无法解决问题。华北某大城市和电厂也都出现过类似的现象, 后来通过采用气缸式排气阀解决了问题^[51]。

(3) 排气不畅造成通水及运行期间爆管, 供水系统无法正常运行

管道因排气阀只能微量排气而造成爆管的现象很多, 根据有关理论计算, 排气不畅引起的气爆压力最高可达 20~40 个大气压, 其破坏力相当于静压 40~80 个大气压, 足以破坏任何供水管道, 工程上最强的球墨铸铁管被破坏都屡见不鲜, 各类管道爆管事例更是不胜枚举, 典型的有, 东北某市, 输水管长 91Km, 几年运行爆管达 108 次, 沈阳建工学院的专家经分析后结论为气爆。南方某市输水管仅长 860m, 管径 DN1200, 运行一年爆管达 6 次之多; 西北某市, 管长 10.2km, 管径 DN1200 运行两个月爆管 3 次。结论是因排气阀只能是微量排气引起的气爆破坏。后将排气阀更换成能保证大量排气的气缸式排气阀, 解决了爆管问题。

我国中原某市水源地由 33 口水源井及 37km 管道构成。管道直径 DN300~DN1200,

试通水时由两口井向整个系统注水，其余井用阀门关闭，运行工况类似于树状给水管网。设计运行压力 $0.2\sim0.3 \text{ MPa}$ ，分段试验压力 0.75 MPa ，合格后全线连通试通水 7 次，历时近三年，管道爆裂达 115 处，工程主管和设计方曾多次到北京、上海、武汉、郑州等地找了几十位知名专家，没得到明确的答复，后经长安大学进一步实验，才认识到爆管的真正原因是管道排气不畅。最后使该管道上的排气阀在性能上满足水气相间时高速缓冲排气的要求。再次通水压力达 0.42 MPa 时，管道安全运行，顺利通过了验收。由此可见，因管道排气不畅造成的“气爆”破坏，不仅严重，还非常难以被人们甚至是专家所认识。

3.3.2 隐性危害

- (1) 有可能使管道压力不稳，流量调节失准，管道自动控制失稳；
- (2) 管道漏水量增加；
- (3) 管道故障增多，长期不断的压力震荡造成管道接头及管壁疲劳，引起使用寿命降低等问题；
- (4) 造成管道故障较多，增加了维护管理费用及意外赔偿损失；被迫采用加强管道，增加工程造价。

3.4 各工况压力波动分析和最佳排气方式

3.4.1 管道初次充水

充水时管道内水力条件复杂，随着管道复杂程度的不同，气囊会在不同的位置聚集和分散。尤其在逆坡处，气囊有可能随水流运动，也有可能静止在某一处或逆水流。

管道充水的流速控制相当重要，一般新建管道充水，国内控制流速为 $0.3\sim0.5 \text{ m/s}$ ，国外为 $1\sim2$ 英尺。当充水速度过快，排气速度不能满足充水要求时，将形成气堵，严重时将发生气爆。如果充水速度过慢，管道中存气将不能被水流带走，造成管道中存气过多，为以后管道安全运行埋下隐患。

充水初期管道中的流态为层状流、波状流，充水后期管道中流态主要为段塞流。这就要求排气装置在这三种流态下都能高速排气。

由于气囊运动极易使管道产生压力波动，排气阀性能除了必须满足在各流态下的排气要求之外，它的关闭也关系到有压管道的稳定，排气阀快速关闭可引起压力振荡，严重时将会威胁到管道安全。所以排气阀除必须具有任何流态下均可高速排气的功能外还

必须具有缓冲关闭的功能^[41]。

3.4.2 运行阶段

压力管道或管网正常运行时，管道内气囊主要是以段塞流形式存在。在非稳定情况下有可能出现泡沫流或气团流。这两种流态下气体无法直接排出。并且这两种态为非稳定状态，可很快会转化为段塞流。

由于管网中气囊随水流运行，较平坦管道中气囊运行速度大体与水流同速。当气囊运动到排气口时要求排气阀能够快速打开高速排气。否则气囊将会运行到别处。不难理解，管道中气囊排出的越早，运动的距离越短，对管道越安全。因此在这种工况下，排气阀具有水气相间条件下大量排气功能是必须的，又由于正常运行的管道压力一般都大于 0.2MPa，排气阀在大量高速排气结束时，还应缓冲关闭，才能保证安全。

3.4.3 关阀（或停泵）

突然关阀（或停泵）在其压水管路上可能产生两种断流空腔，即真空型或空气型，真空型断流空腔产生的条件是断流发生处负压值接近水的饱和蒸气压，一般约-10 m 水柱，且该处管道密封良好，无进气装置，这种空腔弥合时水柱撞击常为直接水锤，其计算公式为 $\Delta H = \frac{\alpha}{2g} \Delta V$ 。

因撞击升压很高，且管道过大的负压也会造成饮用水的污染问题，城市供水系统一般都不允这种工况的存在。

有压供水管道出现空气型断流空腔时，可因其注排气装置性能的不同分为三种工况：

（1）断流处仅装真空破坏阀（或性能差的浮球式排气阀）

此种情况相当于仅注气不排气，断流空腔相当于空气缸，其缓冲能力的大小与气囊的大小，即注气量有关，其断流弥合升压的大小可用空气罐体积公式计算，即：

$$W = \frac{\gamma A L V^2 (n-1)}{2g P_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]} \quad (3.2)$$

式中： γ ——水的密度，采用 $\gamma=0.001\text{kgf/cm}^3$ 或 9.81kN/m^3 ；

g ——重力加速度，采用 $g=981\text{cm/s}^2$ ；

V ——管中水流速度, cm/s^2 ;

A ——水管断面面积, cm^2 ;

n ——气体膨胀多变指数, 空气采用 1.2;

W ——空气体积, cm^2 ;

P_1, P_2 ——断流弥合时水柱撞击前后压力值, 单位为: 98.1kPa, 或 0.1MPa。

由上式可得:

$$P_2 = P_1 \left[\frac{0.1\gamma LAV^2}{gP_1 W} + 1 \right]^6 \quad (3.3)$$

把 $\gamma=0.001\text{kgf/cm}^3$, $g=981\text{cm/s}^2$ 代入 (3.3) 式中得:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{1.02 \times 10^{-7} ALV^2}{P_1 W} + 1 \right)^6 \quad (3.4)$$

(3.4) 式中 AL 为管道的体积, W 为注入空气的体积, 取 $V=100\text{cm/s}$, $P_1=1.0\text{M}$ 代入 (3.4) 式得:

$$P_2 = P_1 \left(\frac{1.02 \times 10^{-4} AL}{W} + 1 \right)^6 \quad (3.5)$$

当空气囊的体积 W 是管道的体积 AL 的 $1/1000$ 时, 代入(3.5)式得管道升压约为 1.8 倍 (即: $P_2=1.8 P_1$), 基本上已经超过了管道最大允许水锤压力。当空气囊的体积 W 是管道的体积 AL 的 $1/100$ 时, 代入(3.4)式得管道升压约为 1.06 倍 (即: $P_2=1.06 P_1$)。由此可见, 只有空气囊的体积很大时 (大于管道体积的 $1/1000$ 左右), 其升压才较小, 缓冲作用才较为明显。因此, 当注入空气较少时, 特别是大管径的管路, 几乎没有缓冲作用, 故这种水锤防护措施在实际应用中存在着很大的局限性。故这种工况断流水锤升压应通过计算再下结论, 否则很难预测。

(2) 断流处安装在一定压力下起球的浮球式排气阀

目前, 工程中对浮球式排气阀起球压力 (浮球被空气冲起, 堵住排气口, 终止排气的压力) 的要求大体上有三种, 即 0.06MPa 、 0.1MPa 和 0.4MPa , 当断流空腔压力达到其起球压力时, 浮球将突然堵住排气口, 引起较高升压, 而剩余空气量也少于前一种工况, 故缓冲作用进一步降低, 其断流弥合升压可能更大, 尤其是当断流处有水气相间的段塞流态时其效果可能更坏。

(3) 断流处安装水气相间条件下可大量并缓冲排气的气缸式排气阀

这种排气装置的特点是在断流弥合时，无论空腔内压强如何，均可使空腔内气体匀速排出，逐步缓冲水柱撞击升压。只要有未排净气体就不起球终止排气，故可满足任何复杂管路及工况的排气。该阀还设有特殊缓闭装置，以保证排气结束时，排气终止，排气阀关闭时排气速度不致变化过快。实践证明，其缓冲消除断流弥合水锤效果最好。

3.4.4 开阀（或启泵）

开阀应参考管道初次充水工况，这里主要讲的是突然关阀后短时间内（数小时）再次开阀。这种情况管道中可能存在一定量的气囊，故控制启动充水速度，匀速排出管道内气体仍是重要的。由于这种情况下的气体在管道平坦时，多是水气相间的段塞流形态，故要求排气装置应满足在水气相间条件下自动快速排气并缓冲关闭的要求。

根据以上四种工况分析，我们不难看出，管道水气两相流存在形式以段塞流为主，而要排出管道存气，并消减断流弥合水锤及气囊运动升压，排气装置就必须具有在水气相间即段塞流条件下高速排气并缓冲关闭的功能，所有工况都是如此。

3.5 有压输水管路对排气技术的要求

如前所述，由于供水管道存在6种气水两相流态，排气阀应该具有如下三种排气功能。

大量排气——主要满足层状流，波状流排气要求；

水气相间排气——主要满足段塞流，气团流排气要求；

微量排气——满足可能产生的少量气体的排出。

其中大量排气一般是在管道低压力时，技术要求不高，易于实现。水气相间排气可能发生在任何低、中、高压力条件下，技术要求高，也非常重要，排气阀做不到这一点，就可能使大量气体滞留管内，不断产生气囊聚集分散，引起管道断流水锤频发，过水断面减小，气阻摩阻大增，产生压力振荡和通水困难，甚至爆管危害。

因此，衡量排气阀性能的最重要指标，就是看它是否完全具有三种排气功能。只有完全具有三种排气功能的排气阀才是能够满足工程需要的合格产品，否则，对于工程需要而言，就是不合格产品，这些不合格产品给工程造成的危害是大小不等的，管道长度越大，管道越复杂，管径越大，其危害就越大，由此造成的经济损失及责任事故越无法准确预测。

总之，衡量排气阀是不是满足工程需要的合格产品，就看它是否具有三种排气功能，又由于大量和微量排气易于实现，因此排气阀是否合格就主要取决于它能否在水气相间

条件下自动大量排气。并且，这个性能易于实测检验，作为排气阀性能判断和产品验收条件也是经济可行的^[60,61]另外，除以上排气阀必须满足的最基本的三个要求之外，若要考虑断流弥合水锤升压的防护，排气阀还必须具有恒速缓冲排气功能。

第四章 长距离大型区域重力流输水系统的水锤防护措施

4.1 长距离重力流输水管道中的压力特点分析

4.1.1 重力流输水的分类

给水工程中采用的重力流输水，从水力学的角度上分为两大类。一类是无压流输水，即为明渠或暗涵；另一类是承压流输水，一般为暗管(涵)。无压流输水，在流态上与天然河流无异。水顺地势，或缓或急地向下游流去，没有压力，地形坡度有多大，水流的坡度也就有多大。这种无压给水渠道的末端往往与水池、水库或吸水井等构筑物相连。承压重力流输水不同于天然河水的流动，也不同于用水泵加压的压力输送。水在涵管里流动时，由无压水变成有压力，其压力随着输送水的距离增加而增大。承压输水管的末端既有动水压力，也有静水压。在水力坡降等于地形坡降时，动水压力为零；在停止输水，输水管内又充满水的时候，管末端的静水压最大，其值等于地形高差。这种承压重力流输送的水，在具有一定动水压力时，可直接进入供水管网或水厂内的水处理构筑物^[65]。

4.1.2 重力流输水的特点

重力流输水是一种比较理想的供水方式，它具有省电、节能、投资省、成本低、运行管理简单、方便等优点。但是，重力流输水有它的特殊性，采用重力流输水要具备一定的特殊条件。而选用重力流输水的基本条件就是要有一定的地形高差，这个地形高差要满足水厂各处理构筑物的水头损失需要，如果是直接进入城市供水管网，其重力流输水管的末端还需要一定的自由水头，这时的地形高差还要求大一些，即地形坡降要等于或大于输水水力坡降。

不管是无压流还是承压流，作为重力流输水，它们都是借助地形高差来完成输送水的任务。它与用水泵加压输水相比，有以下特点：①重力流输水受地形的约束比较大，只有在具有一定的地形高差，地貌情况也比较好的时候，才能考虑采用重力流输水；②采用重力流输水要同时考虑地形坡降和水力坡降，而用水泵加压输水的管道则可以不考虑地形坡降；③承压重力流输水管的末端存在静水压，如果静水压过大，超过管子能承受的压力，会引起爆管，直接影响供水管网的安全；④重力流输水时，流量和水压力的调节幅度比较小，这是因为水位高差是重力流输送水的动力来源，在取水口位置、厂址、工艺流程、输水管径、长度等确定之后，相对的水位差也就基本固定下来，就是有变化，其变化幅度也比较小。因此，输送水的流量、压力的调节幅度也比较小；⑤重力流输水

管道与泵加压的输水管道(或供水管网)相连接时,存在着水压力匹配问题,只有在双方动水压力相同时,管道输水才能正常进行^[65]。

4.1.3 长距离大型区域重力流输水管道的压力特点分析

大型管道输水工程,常常利用天然地形落差靠重力流输水,正常运行时测压管水头小于静水头,但是,当管路上的闸、阀关闭后,管中最大静水头即为地形最大落差,落差越大,管道承受的压力越高,当闸、阀发生非正常关闭时,将容易产生较大的水击压力,造成管道爆管事故。对于特殊的多起伏重力流管路,常常在管路高点、转折点发生断流空腔,容易造成断流弥合水锤,其后果之严重令人结舌。对于长距离输水管道,水击问题显得更为突出。例如^[33],山西省万家寨引黄工程连接段 PCCP 输水工程,设计输水流量 $20.5\text{m}^3/\text{s}$,线路总长 58.15km,地形总落差 250m,其中管道总长度 43.5km,地形落差达 210m,采用内径为 3m 的预应力钢筒混凝土管(缩写 PCCP)。如此长的管线,如此大的落差,如果不减压,则管线末端仅静水头就达 200m,加上水锤压力将超过 3MPa。有资料显示,长 24km,管径 2.4m 的混凝土管,输水流量 $10.25\text{m}^3/\text{s}$,线路末端闸、阀关闭时间为 5min 时,包括水击压力的总水头为静水头的 2.5 倍。因水击问题就增加了这样高的水压力,提高了管道耐压等级,加大了工程造价,因此,必须采取工程措施,降低管道工作压力,并预防断流弥合水锤的发生,是承压重力流系统的关键问题所在。

在长距离大型区域输水工程中应充分认识到水柱弥合水锤的危害^[66]。在长距离大型区域输水管道中,流速变化是经常出现的,管道中水流速度变化时,会导致管道中水压力的升高或降低,在压力低于水的气化压力时,水柱就被拉断,出现断流空腔,在空腔处的水流再弥合时将产生强烈的撞击,管道中的水升压高,就会形成断流弥合水锤,弥合水锤升值很大,在试验装置观测到竟达到工作压力的 2~4 倍,对输水安全的危害很大。水在输水管道运行时,实际上是气水两相流。因此在长距离大型区域输水管道设计时,应依据输水管道的纵向布置,分析研究计算可能出现的不同工况下水的流动状态,选择合适的位置(一般在驼峰处)布置一定数量的排气阀。在管线的水平段,排气的问题更突出,因此在设计时一般人为地把管线布置成一个高点,设置排气阀,根据经验水平段一般在 500~1000m 设置一处。另外排气阀的选择也很重要,因为运行时,水在管道中的状态很复杂。由于水流流态的复杂性,也就产生了排气的困难,因此除了确定排气阀的合理数量、合适位置,对排气阀种类与性能也应充分重视。近年来为保证输水安全,特别是防止水柱弥合水锤过压产生的危害,在输水管道中适当地设置超压泄压阀(也称为压力波

动预止阀)效果较好。

4.2 长距离大型区域重力流输水系统的防水锤技术分析

4.2.1 消能减压防护技术分析

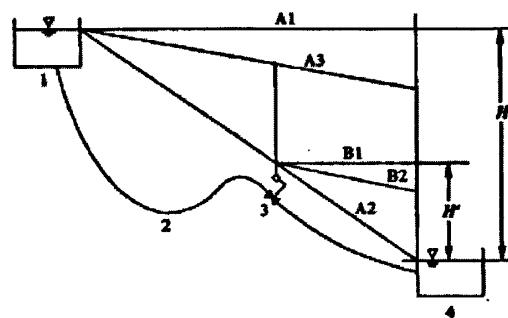
1、减压消能原理

静水中是具有压力的，作用在单位面积上的静水压力为静水压强，它随水的深度增加而增加。静水压强的大小，是相对于大气压而言的。输水管道内作用在管道内壁的静水压力，在与大气相接触时，即在瞬间，静压能量以其他方式转化消耗，此时视管道内液体与大气接触面的相对压强为零，即消能构筑物必须有跟大气相连接的装置，并且要达到简单和保证饮用水供水安全的目的^[67]。

输水管道内除去只与水深有关的静水压强外，还存在动水压强，它不仅与该点的空间位置有关，还与水的流动有关。例如青海省西宁市第六水源工程中，在供水量达到设计水量 15 万立方米/日时，管道内流速为 2.21 米/秒，在供水量未达到设计要求，在 7 万立方米/日时，管道为最不利状态，压力高。在事故或停水过程中，管道非满流，流速较高，动能大。

2、减压阀减压消能分析

重力输水管管径按充分利用作用水头选取，故在设计流量工况下运行时无剩余能量，在流量低于设计流量下运行时，水头损失减少，重力流输水管路就有了富余能量。在安装减压阀的系统中富余能量的大部分由减压阀自动消除，使管路末端压力减轻，其原理如图 4.1 所示。



1. 高位水池 2. 输水管 3. 减压恒压阀 4. 低位水池

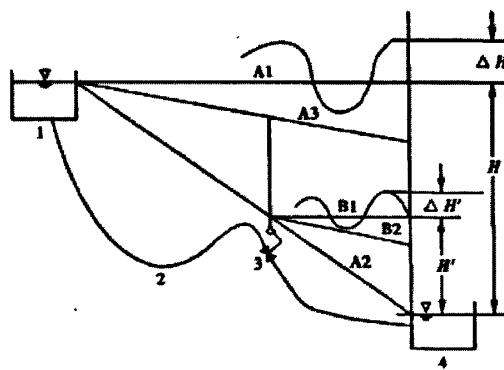
图 4.1 安装减压阀前后输水管压力线示意图

图 4.1 中 A1 为不安装减压阀时的静水压线, A2 为不安装减压阀流量最大时的测压管水头线, 如果管道上安装的是减压恒压阀, 其出口压力调节与不装减压阀时的水头线重合, 则 A2 也是安装减压阀后最大流量时的测压管水头线, 即减压阀在此流量时不减压, 亦不耗能。A3 为较小流量时不安装减压阀时的管道压力线, 可见末端管路此时压力较大。B2 是安装减压阀后且流量较小时末端(即减压阀下游)管道压力线(可见压力不大), B1 是安装减压阀后的静压线, 可见它远小于不装减压阀时的静压线 A1, 故安装减压阀可减少管道漏失水量, 也有利于管道安全运行和降低维修成本^[37]。根据《城镇供水长距离输水管（渠）道工程技术规范》提及：减压阀的种类很多，但作用于重力输水管上的主要是减压恒压阀，无论减压阀进口端流量和压力如何变化，出口端保持恒压值不变，并且出口恒压值可方便的进行调节。减压阀出口恒压值根据最大设计水量水压线调整出口压力值，可实现在最大设计流量时不减压消能，而仅消减小流量运行产生的富余能量。

4.2.2 关阀水锤防护分析

1、减压阀恒压阀防护

重力流输水管道因阀件及管道接头等漏水、管道爆裂、下游系统正常保养等原因需停运时，是应关闭管道上游进水阀门还是最下游出水阀门，目前仍颇有争议。前者优点是有利于防止水锤破坏，缺点是管道完全放空，再次启动充水也极困难和危险，且费时很长；后者保持管道满管水流，再次运行开阀即可，极为方便，但易产生关阀水锤。实际运行时是绝大多数采用关下游出口阀门的方法。结合图 4.2 说明关阀过程中减压阀的水锤防护作用^[37]。



1. 高位水池 2. 输水管 3. 减压恒压阀 4. 低位水池

图 4.2 输水管有无减压阀时关阀压力振荡曲线示意图

由图 4.2 可见，不安装减压阀的静水压线为 H ，而压力振荡值为 ΔH ，而安装减压

阀后的管路末端静水压力线为 H' ，压力振荡值为 $\Delta H'$ 。

对于重力流输水管，关阀过程中的流量变化公式如下：

$$Q = \sqrt{\frac{H}{1.1AL + \frac{8}{g\pi^2 d^4} \zeta}} \quad (4.1)$$

式中： H ——重力流输水管道总作用水头；

Q ——重力流输水管道内流量；

A ——管道比阻；

L ——管道长度；

d ——管径；

ζ ——末端阀阻力系数。

设关阀前阻力为 ζ_0 ，最大设计流量为 Q_0 ，则在关阀过程中流量为：

$$Q = \sqrt{\frac{1.1AL + \frac{8}{g\pi^2 d^4} \zeta_0}{1.1AL + \frac{8}{g\pi^2 d^4} \zeta} Q_0} \quad (4.2)$$

由于阀门阻力系数在匀速关阀过程中不是均匀增加的（一般是在关阀的前 $60^\circ \sim 70^\circ$ 增大不多，对流量 Q 减少也不大，但在以后的 $20^\circ \sim 30^\circ$ 则突然增加），故极易造成很大的关阀水锤。由式（4.2）可见，管道长度 L 越大， ζ 值对流量的影响越小，越易造成最后突然关阀时的 ΔH 最大。而加装减压阀后 L 值仅为减压阀后的管段，故 L 值变小， $\Delta H'$ 值亦减小。由此可见，重力流输水管安装减压阀对水锤防护作用极大。例如：我国西北某电厂补给水管的压差 $H=1050\text{kPa}$ ，管径为 800mm ，加装减压阀前计算关阀水锤升压达 3400kPa ，采用减压阀后计算最大水锤升压仅为 790kPa ，可见作用显著。

2、缓闭蝶阀防护

关阀水锤防护最简单有效的手段是延长阀门关闭的时间。

就某一种管道安装情况来说，应考虑几种可能的解决办法，从中找出可提供最大保护作用而花费最小的一种方法。这些方法包括：在阀门处布置旁通管；对阀门最后 $15\%-20\%$ 开度提供缓冲保护；采用双速（两段式启闭）阀门；在某些情况下，可以考虑安装进气阀或液压气室。延长阀门关闭（或打开）时间，可以将水锤压力控制在一定范围内。这对大型阀门来说可能是简单易行的。

但是，对于长管线来说，按照控制水锤压力反算的阀门关闭（开启）时间往往较长，

达到 5-10 分钟甚至更多，同调度运用灵活性要求构成了矛盾。因此，对长管道的水锤危害问题应进行专门研究，综合采用多种手段，也许可能开发出某些特种阀类产品。

4.2.3 缓冲排气技术分析

在首次充水或需要排空时，管道系统要排出或吸入大量空气。而在管道系统运行中，水体中残存的气体会不断逸出，聚集在系统高处，轻则降低运行效率，重则引发爆管事故，因此，应当及时地将这些气体排出。工程实践中均采用自动进排气阀。

但是，当分析进、排气过程时会发现一个矛盾现象：管道首次冲水或需要排空时，排除（或吸入）的空气比较集中，而且不需要过高的压力；而系统运行中只需要排除少量的气体，并且这些气体大都处于较高的压力环境之下。所以，为满足排气量并保证安全，根据^[38]国外相关技术资料和国内近年来的工程实验，输水管道上排气阀的布置方式为管道坡度小于 1% 时，每隔 0.5-1.0km 设一个，一般情况下约 1.0km 设一处，每个排气阀都设在该管段的最高点，当管道起伏较多时，可根据其起伏高度分析是否需要增加，必要时进行相应的水力计算。

如果要选用比较经济合理、经久耐用的 PCCP 管，就目前的生产水平来说尚难以满足要求。经研究认为，在适当位置设减压阀和排气阀以及适当延长关阀时间是行之有效的管道降压措施。

4.3 长距离大型区域重力流输水系统的管线防护

由于突然关阀水锤发生后，在重力流管线首端首先产生负压波，负压波向管线末端传递，当某一点处管道的压力低于水的汽化压力时，连续的水就会在此处发生拉断；负压波在管线末端以正压波反传，在断流处两水柱将发生撞击弥合。因此，管线防护的重点将是断流弥合水锤防护。

随着人们对水锤研究的深入，水柱分离与断流空腔再弥合水锤问题，越来越受到人们的重视，并将其定为近代水力过渡过程研究中复杂的难题。由于断流弥合水锤在发生机理上与传统的关阀水锤和停泵水锤有所区别，而且其发生定点也难于事先断定，因此，设置于管线首端用以防止传统停泵水锤和关阀水锤危害的技术措施和设备（如各种停泵水锤消除器、各种形式的缓闭止回阀以及阀门控制技术等）均收效甚微，甚至无效。由于事故突然停泵和突然快速启闭阀门都可能在泵站管路系统中引发水柱分离和断流空腔再弥合水锤危害，故在进行水锤分析及危害预测时，必须首先判别能否发生水柱分离现象^[2]。

由此可见，断流弥合水锤研究在水锤研究中属于重中之重。研究断流弥合水锤首先应研究清楚断流弥合水锤的分类、各类弥合水锤的产生原因及升压特点。

4.3.1 断流弥合水锤的分类

对于断流弥合水锤的分类，目前各家之间所说不一，按照不同的方式，分类也各不相同。按照空腔内所含介质的种类，可以分为蒸汽腔和空气腔。

(1) 蒸汽腔

由于系统突然停泵或者迅速开关阀门，使管路产生负压波，当管道中某点压力小于蒸汽压时，液态水就会在该点处汽化，管道中水流的连续性遭到破坏，造成水柱分离，并在该处形成“水蒸汽空腔”，它将连续的水柱截成两段，腔内压力约为 $-0.07\text{ MPa} \sim -0.10\text{ MPa}$ 。当分离开的两水柱再重新弥合即空腔溃灭时，由于两股水柱间的剧烈碰撞会产生具有直接水锤特征的压力很高的断流空腔再弥合水锤，当空管段消失即两水柱重新弥合时，空腔内的水蒸汽迅速凝结，于是两股水柱互相猛烈撞击，从而造成升压很高的断流弥合水锤。

(2) 空气腔

在管线的一定位置处装设某种目的的空气阀（如注气阀、真空破坏阀、排气阀等）时，当管路一旦出现真空，经空气阀将有相当数量的空气吸入管内并形成充满空气的“空气腔”，它同样能将连续的水流（水柱）截断造成水柱分离现象。这种水柱分离现象成为空气型，在空气腔发育扩大时期，腔内的压力约为 0 MPa ，即保持为一个大气压。在空气腔消失的时刻，也会形成断流弥合水锤。其升压的大小主要取决于空气腔的弥合方式。

①无阻力自由弥合

无阻力自由弥合在工程中并不常见，它主要是在管道中安装排气立管，而不采用排气阀。管道压力高于大气压时，气体从排气立管中自由排出，在管道内不产生压缩或者滞留。由于该种弥合方式对水流不加限制，所以水柱撞击速度较快，升压危害也较大。但是排气立管高度与正常水压线齐平，所以排气立管可以起到一定的双向调压塔作用。

②前期无阻力弥合

前期无阻力弥合即在弥合前期管道压力不高，排气阀正常排气，当管道压力逐渐升高时，排气阀突然起球，停止排气，管道内剩余空气压缩，起到部分缓冲作用。对应于此类弥合方式的排气阀主要为浮球式排气阀。

③恒速缓冲弥合

恒速缓冲弥合即排气阀排气时始终按照一定速度排气，管道内气体的排出速度小于水柱弥合速度，此时空气腔一部分气体排出同时另一部分压缩，弥合时管道内空气刚好排出，既及时排除了气体，又限制了弥合速度。对应于此类弥合方式的排气阀主要为具有快速注气、恒速缓冲排气功能的排气阀。

④压缩弥合

压缩弥合即水柱弥合时气体不排出或微量排出，空气腔产生压缩，可以起到缓冲作用，但空气腔存在于管道中，对于管道的运行带来危害。对应于此类弥合方式的排气阀主要为真空破坏阀。

4.3.2 断流弥合水锤的升压分析

设有两股互相隔离开的水柱（流），一股具有较大的流速 V_1 ，水头为 H_1 ；另一股具有较小的流速 V_2 ，水头为 H_2 ；两股水柱（流）碰撞后具有共同的流速 V （ V 与 V_1 方向相同），而水头为 H ，则

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} + \frac{g}{2a}(H_1 - H_2) \quad (4.3)$$

$$H = \frac{H_1 + H_2}{2} + \frac{a}{2g}(V_1 - V_2) \quad (4.4)$$

当发生水柱分离时，两分离开的水柱间的空间，如果仅仅被水蒸气所充满（或无空气缓冲），则当此空间再度被水充满时，要产生两水柱间的剧烈碰撞——断流弥合水锤。由于水柱间碰撞而产生的压力增值 ΔH 为

$$\Delta H = \frac{a}{2g}(V_1 - V_2) \quad (4.5)$$

有上式可以看出水柱弥合升压大小主要取决于两水柱的弥合速度。如何有效的控制水柱弥合速度是消减断流弥合水锤的关键。

4.4 长距离大型区域重力流输水系统的水锤防护措施

4.4.1 液控蝶阀

液控蝶阀是供水管路中应用越来越广泛的一种阀门型式，特别是中型和大型两阶段关闭蝶阀，是国内外近 20 余年来研制出的一种比较新的特殊出水阀门。新型液控蝶阀不但被广泛应用于泵系统水锤防护方面，在有压重力流供水管道中的水锤防护方面，也

应用普遍。管路末端设置可控两阶段关闭蝶阀，对输水系统的启动运行和维修管理十分有利。缓闭末端阀，既可以切断水流，防止管中水体放空，又可有效控制水锤的发生。从阀的结构上看，目前国内主要生产两种两阶段关闭的蝶阀：重锤蓄能式液控两阶段关闭缓闭蝶阀和蓄能罐式液控缓闭止回蝶阀。下面重点以上海保一阀门制造有限公司生产的蓄能罐式液控缓闭止回蝶阀为例介绍其构造和工作原理。

1、蓄能罐式液控缓闭止回蝶阀的特点^[64]

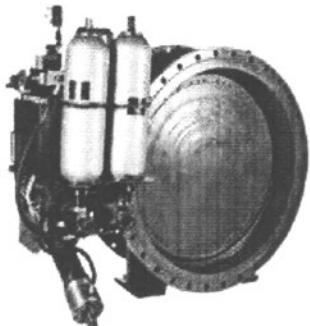


图4.3 蓄能罐式液控缓闭止回蝶

该阀的外形图如 4.3 所示。蓄能罐式液控缓闭止回阀主要将重锤势能改变为流体蓄能，节省了长期运行支承重锤所耗的能量，改善了液压系统的保压性能。阀门能按预先调定好的程序分两阶段(先快关一定角度,再慢速闭剩余角度)，有效消除管路破坏性水锤，实现管路的可靠截止，保证管线系统安全运行。

该阀具有以下特点：

①能按程序启闭；在正常供电和突然断电情况下均能自动按预定的时间和角度分快、慢二阶段关闭；调节范围大、适应性强。

②可消除破坏性水锤、防止水泵和水轮机发生飞逸事故，有效地降低了管网系统的压力波动，保障设备的安全可靠运行。

③该阀可取代水泵出口原电动闸阀和止回阀的功能，减少占地面积及基建投资。同时其流阻系数为 0.24~0.6，远小于止回阀的流阻系数(1.7~2.6)，节能效果明显。

④该类型的液控止回蝶阀产品均以不同方式解决了国内产品在运行过程中动作滞后的缺点，大大增强了系统的可靠性和安全性。同时，该公司还可根据用户的特殊要求单独进行设计，多方位满足广大用户对该类产品的需要。

2、二阶段关闭液控蝶阀的防护原理

末端阀宜选择为可控制的两阶段关闭蝶阀。该阀门先较快地关闭至某一角度（快关阶段），关闭行程的大部分，虽然关阀过程产生了管道升压，但由于蝶阀在大开度范围内，其开度系数的变化率很小，升压并不明显。第二阶段以非常缓慢的速度关闭剩余的行程（慢关阶段），由于压力的升高与流速的变化成正比，慢关过程导致流速变化的增量减小，可把出水管道的压力升高限制在允许的范围之内。

4.4.2 注排气阀

长距离输水管路的高点处或膝部，由于很多原因常常会聚集大量气体，引起管道气堵，甚至水流中断；或者发生水柱分离水锤，形成液体局部汽化空腔（蒸汽腔）。为了保护管路，沿管路必要处可以设置注排气阀。注排气阀的作用是当阀门处管内压力降低到低于大气压(或预先规定的最小压力)时，阀门打开让空气进入；当管内水压增加到大气压以上时，阀门允许空气逐渐流出。在一般情况下，这种阀门不允许液体漏入大气，在排除管道中的空气时具有自动关闭的功能。下面重点以西安济源水用设备技术开发有限责任公司生产的恒速缓冲双口排气阀为例介绍其构造和工作原理。

1、进排气阀的结构和工作原理^[68]

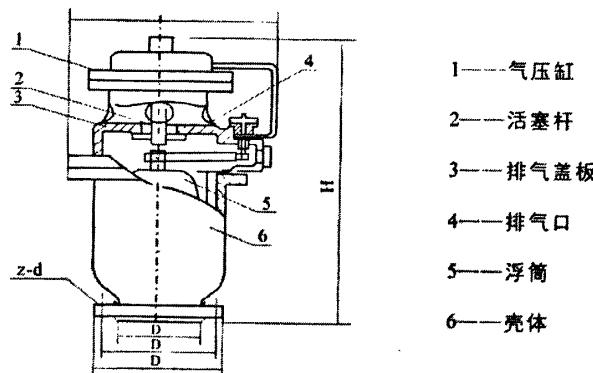


图 4.4 进排气阀的结构图

由上图可知该进排气阀主要由壳体、浮筒、排气盖板、进气盖板、液压缸等部件组成，当阀体内存在气体时，浮筒下降，带动小盖板动作上升堵住阀帽上的通气孔，同时打开小阀座，使阀体内有压气体进入气缸，因气缸内气动膜片面积远远大于大排气口面积，故大排气口开启排气，管道存气即可高速排出；当气体排净后，浮筒上升，控制膜片的导管与大气连通，盖板受阀内压力作用复位，封住排气口。当管内出现负压时，进气口盖板打开进气，以防产生水锤。

2、进排气阀的特点：

- ①在水气相间即一段水一段气时，能够自动打开大排气口连续大量排气，在排气能上超过所有国外进口产品；
- ②具有大量恒速排气功能。此气缸式排气阀在水气相间大量排气的过程中，排气口开度随管道内排气压力大小而改变，压力大、开度减小；压力小、开度增大，从而保证主管道因排气引起的流速变化不超过 0.3m/s、断流弥合水锤升压小于 0.2MPa（如上节

所述，不加以控制断流弥合水锤升压为 0.2~0.4MPa（即 200~400m 水柱）；

③浮筒不顶在排气口上，不存在卡球的问题；

④具有缓冲关闭功能。在排气结束时，大排气口可缓慢延时关闭，从而更有利与防止断流弥合水锤；

⑤快开缓闭，排气彻底，可提高管道过水断面利用率，减阻节能安全供水；

⑥排气口密封先进合理，克服了普通排气阀时常大量跑水的技术缺陷。

3、工作过程具体如下：

①充水过程中，阀体内未充水，阀体内的浮球因自重而下落，气孔处于敞开状态；随着管道逐渐充水，浮球浮起，管道中的空气排出；

②管道及阀体内空气全部排除，阀体内充满水；若管道中压力高于大气压，浮球在管中压力的作用下阻塞排气孔，管中水不会排出阀体外；

③输水管道在运行过程中，若溶于水的空气离析出来，积蓄在进排气阀附近，则浮球因失去浮力而下落。若空气量较少，则小孔的浮球下落排气，若空气量较多，则大孔的浮球下落排气。排气完毕，浮球恢复到关闭排气孔的位置；

④当输水管路发生断流时，管中压力降低形成负压时，尽管阀体内充满水，但由于阀内压力低于大气压，在大气压高于管中压力下，浮球下落，进行补气。补气过程中，大孔的浮球先下落，当压力降低较大时，随即小孔的浮球下落。由于两个浮球的下落时间不同，缓冲了管道中的压力波动；

⑤当事故关阀，管中的起伏位置出现汽化空腔时，浮球浮起，进行排气，直至进排气阀内充满水，关闭排气孔。关闭过程中，由于大小排气孔的压力作用不同，大孔的浮球先顶起关闭，然后再关闭小孔，延缓关闭过程，缓和水柱再弥合时的压力上升。

由于进排气阀采用补气的方法来防止管道中因负压而造成的断流弥合水锤事故，因此具有构造简单、造价低、安装方便、不受安装条件限制等优点；但是，由于进气和排气的两相流过渡过程的影响因素复杂，管道中排完空气时，可能出现水柱弥合，尽管这种水柱弥合与管道中因压力降低汽化压力而引起的水柱分离及其再弥合有所不同，但由此引起的压力升高也应给予足够的重视并加以分析研究。

4、排气阀选用技术要点

①在管道内多段水柱气柱或存有多个不连续气囊条件下不仅能够快速地排出第一个气囊。即在一定压力条件下，排气阀必须做到阀体内充满空气就开启大小排气口排气，水进入阀体，阀门就关闭而不排水。

②满足上述要求的排气阀，其大排气口直径不得小于公称口径的 70%.小排气口直径不小于 8mm。

③上述排气阀性能要求是管道（尤其是大型管道）排净气体，防止管道气爆必须满足的基本条件，排气阀都必须通过检验合格，其实验合格条件是在不小于 0.1MPa, 的恒压条件下，交替向排气阀内冲水和充气，排气阀大小排气口均可做到冲水关闭不漏水；充气开启，高速排气，无气堵现象。反复实验动作无误三次以上，即为合格。

4.4.3 减压恒压阀

减压阀适用于大型输配水重力流管线，能够既减动压又减静压，无论进口压力和流量如何变化，该阀出口压力都保持恒定不变，并且出口恒压值可方便的进行调节。下面以西安济源水用设备技术开发有限责任公司生产的膜片式减压恒压阀为例介绍其构造和工作原理^[69]。

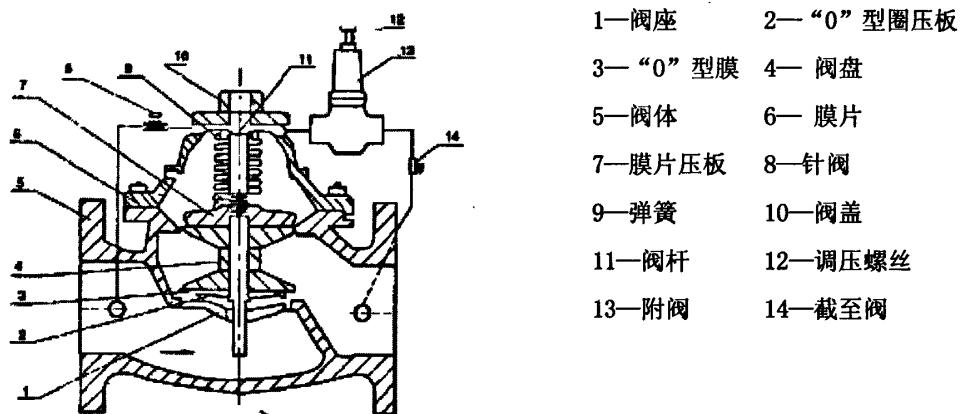


图 4.5 膜片式减压恒压阀结构图

1、工作原理

此阀由主阀和附阀组成，主阀为减压过流通道，附阀起控制减压效果及恒压作用。通过旋拧阀上的调节螺栓可控制及调整主阀出口压力值。

2、性能特点

- ①由主阀、导阀、调节阀、过滤器、压力表等组成。
- ②结构型式为膜片式
- ③减压稳压阀，既能减动压，又能减静压，无论进口压力和流量如何变化，稳压效果均良好，出口压力 0.1~0.8MPa (可调)。
- ④高灵敏度，最低动作压力为 0.02Mpa (即 2 米水柱) 时可灵活开启关闭。
- ⑤膜片强度 ≥ 1.6Mpa。

⑥阀门对于支管流量的汇入流出具有自动的流量调节作用。

3、减压恒压阀选用技术要点

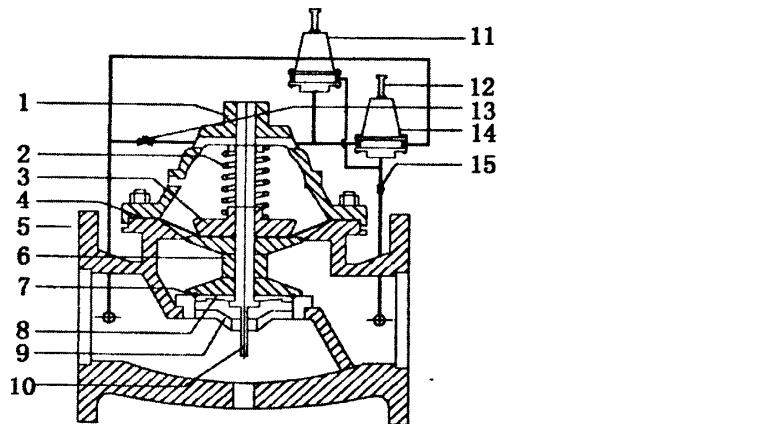
①膜片式减压恒压阀适用压力 $PN \leq 1.6MPa$, 活塞式减压恒压阀可用压力大于 $1.6MPa$ 。

②膜片式减压恒压阀灵活可靠，水头损失小，无卡阻现象，运行平稳，关键技术是大型高强度膜片制造技术和阀心防振颤技术要求高。目前，国内最大可生产规格 DN2000. 活塞式减压恒压阀动作灵敏及可靠性均较差，易卡阻，在压力大于 $PN1.6MPa$ 以上时使用才具有技术优势。

4.4.4 超压泄压阀

(1) 超压泄压阀结构及工作原理

① 先导式超压泄压阀



1-阀盖 2-弹簧 3-膜片压板 4-膜片 5-阀体 6-阀盖 7-“O”型圈 8-“O”型圈压板 9-阀座 10-阀杆 11-附阀 2 12-调压螺栓 13-针阀 14-附阀 1 15-截止阀

图 4.6 先导式超压泄压阀结构示意图

弹簧力大于介质作用于阀芯的正常压力（事先选定的压力值），阀芯处于关闭状态，当罐内介质压力超过允许压力时，弹簧受到压缩，使阀芯离开阀座，阀门自动开启，介质从中泄出、减压；当压力回到正常值时，弹簧压力又将阀芯推向阀座，阀门自动关闭。

超压泄压阀的主要作用是当管道中发生水力瞬变流时，当某点的压力过高时，在此点的超压泄压阀自动打开，泄流掉一定流量，维持管道在此点的压力，保持管道在此点的压力，当压力降到安全值后，泄压阀再自动关闭。

②直动式超压泄压阀

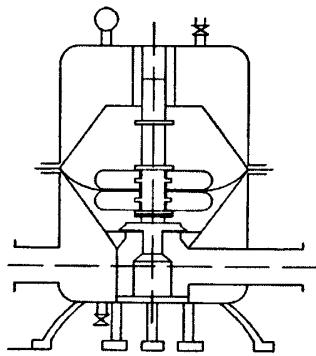


图 4.7 直动式超压泄压阀结构示意图

直动式超压泄压阀的主体为一气压缸，其上部充满了有压气体，中部为气动膜片及活塞杆等，下部为进水管盖板，泄压口等，正常运行时，该阀上部有压气体的压力约等于或略高于管道最大设计使用压力，当管道出现少量压力波动时，有压气体被压缩起到缓冲稳压作用，吸纳压力波并防止管道出现负压，当出现异常大的压力升高时，气动膜片和活塞被压至上止点，并带动泄压口盖板开启，使超压水流声速排出管外，释放超高压，当压力释放后，管道压力恢复正常时，气动膜片及活塞复位，并使泄压口盖板关闭，但盖板关闭速度受泄压口外的缓冲器控制，实现缓闭，防止速闭产生的二次水锤。

(2) 超压泄压阀的性能评价

①先导式超压泄压阀主要优点是变弹簧直接作用为导阀间接作用，提高了动作的灵敏度，而且主阀采用套筒活塞式，双重密封阀座结构，动作精度高、重复性好、回座快、不泄漏、能带高背压排放、工作等命长、工作稳定可靠，它还可在线调校，反复启跳排放后，仍然能自动回座，关闭严密，操作维护方便。

②直动式超压泄压阀通过吸纳压力波而有效地防止管道产生局部负压，稳压作用良好。当管道因停泵，关阀以及水柱中断产生断流弥合水锤等异常快速升压时，该阀可直接迅速打开泄压口释放压力，保护管道免遭破坏。

(3) 超压泄压阀选用的技术要点

①超压泄压阀应设在泵站出口总管起端、重力输水管道末端的关闭阀上游。输水管道中间是否需要设置超压泄压阀，须经分析计算后确定。

②在实际应用中超压泄压阀的公称直径常按主管道直径的 $1/5 \sim 1/4$ 选取，但当压力较大时，泄流量可能过大，故在这种情况下，应经计算确定超压泄压阀的规格。

③目前工程中常用的超压泄压阀均为先导式，即用先导辅阀控制主阀启闭泄压，泄压动作滞后，在水锤升压过快时，往往失去泄压作用，因此，在选用泄压阀时要注意所

要防护的水锤类型。

④超压泄压阀释放压力应等于或大于最大正常使用压力加 $0.15\text{MPa} \sim 0.2\text{MPa}$ 。

⑤先导式超压泄压阀有滞动作现象，仅适用于水锤升压速度较缓慢的情况，对于升压特快的管道含气型断流水锤，经验表明，几乎无泻压作用。

⑥先导式超压泄压阀有拒动作可能，故应特别注重分析和测试技术，以确保消除拒动作的可能。

4.4.5 单向调压塔

(1) 单向调压塔结构及工作原理

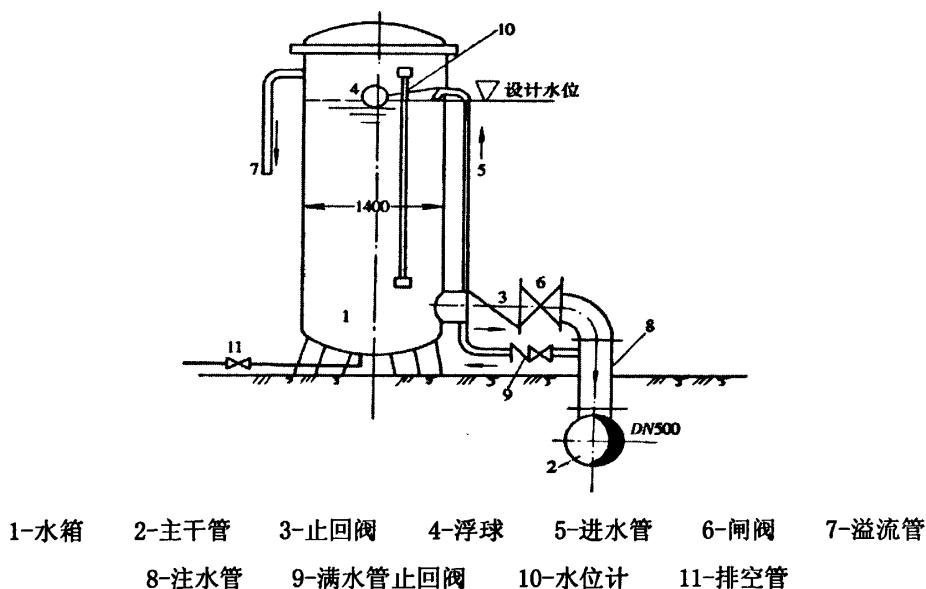


图 4.8 单向调压塔结构原理图

单向调压塔是防止产生负压(水柱分离)和消减断流弥合水锤过高升压的经济有效、稳妥可靠的水锤防护措施和设备。它主要有体积不很大的水箱或容器、带有普通止回阀的向主干管中注水的注水管以及向调压塔容器中充水的满水管。

管道正常运行时，注水管上的止回阀处于关闭状态。如果调压塔水箱不满或全空，则通过满水管(这时图 4.8 中的止回阀 9 开启)向水箱充水；当箱中水位达设计标高时，满水管出口的浮球阀关闭，并自动保持箱内设计正常水位。当主干管中的水压降到事先设定的数值时，止回阀 3 迅速开启，利用势能差通过水管将足够流量的水及时地注入主干管中，从而防止了发生负压并控制住管道系统中的水锤压力振荡与危害。

(2) 单向调压塔的性能特点

①单向调压塔箱中设计水位不需要达到管道正常工作时的水力坡度线，与双向调压塔相比，其水箱的安装高度可以大大降低，水箱容积也不是很大，在经济上时节省的。

②在管道产生负压时向管道内注水，防止水柱拉断保持水的连续性。但是当管道升压时不允许水流流入塔内。

(3) 单向调压塔选用的技术要点

①单向调压塔的装设位置、座数、容积、注水流速、水位标高、注水管主要尺寸以及防护效果等，都必须应用计算机动态模拟经过方案比较后确定。一般设置于输水干线上容易产生负压和水柱分离的主要特异点处，如主要峰点、膝部折点、驼峰以及鱼背点等。

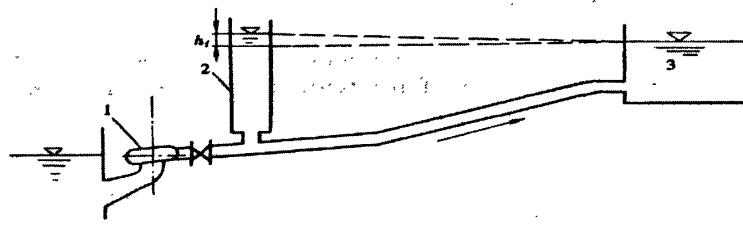
②由于单向调压塔在设计上主要考虑如何消除水锤发生时产生的断流空腔，所以当正压波来临后，安装单向调压塔点仍会产生升压，因此单向调压塔应于超压泄压阀相配合使用，来达到防止断流以及防止管道升压的目的。

③注水管上的止回阀只允许塔中水流（注）入主干管中，它是本设备的核心部件，其准确而及时的启闭必须切实得到保证。

④在北方冬季要注意防止冰冻损坏，为此，在水箱底部设置排空管将水箱排空或采取其他防冻措施；在南方要注意防水锤变坏问题。

4.4.6 普通双向调压塔

(1) 双向调压塔的结构及工作原理



1-水泵 2-双向调压塔 3-高位水池

图 4.9 双向调压塔的应用

双向调压塔是一种兼有注水与泄水缓冲式的水锤防护设备，其构造为一开口的水池——大水柱，其主要设置目的是：防止压力输水干管中产生负压，一旦管道中压力降低，调压塔迅速向管道补水。当管道中水锤压力升高时，它允许高压水流入调压塔中，从而起到缓冲水锤生压的作用。双向调压塔结构简单，工作安全可靠，维护工作少，防护效

果好。

(2) 双向调压塔的性能特点

①具有防止压力输水干管中产生负压的功能

一旦管道中压力降低，双向调压塔迅速向管道补水，防止水柱分离，可有效地消减断流弥合水锤升压。

②具有缓冲水锤升压的功能

当管道中水锤压力升高时，它允许高压水流入调压塔中，从而起到缓冲水锤升压的作用。

③双向调压塔结构简单，工作安全可靠，防护效果好。但是高度大、造价高、水质易受污染以及防冻等问题阻碍了双向调压塔的使用。

(3) 双向调压塔选用的技术要点

①双向调压塔修建在泵站附近或输水干管上易于发生水柱分离的高点或折点处。

②双向调压塔箱中设计水位需要达到管道正常工作时的水力坡度线。

③双向调压塔应有足够的高度，在调压过程不会产生溢流。

④在调压过程中，为防止空气进入主干管内，调压塔应有足够的容量，确保在给水系统补水过程中塔内仍保持有一定的水量。

4.4.7 箱式双向调压塔

(1) 箱式双向调压塔结构及工作原理

箱式双向调压塔主要由下阀体、上阀体、活塞、膜片、单向板、泄水口、溢流环等组成，其结构图见图 4.10。

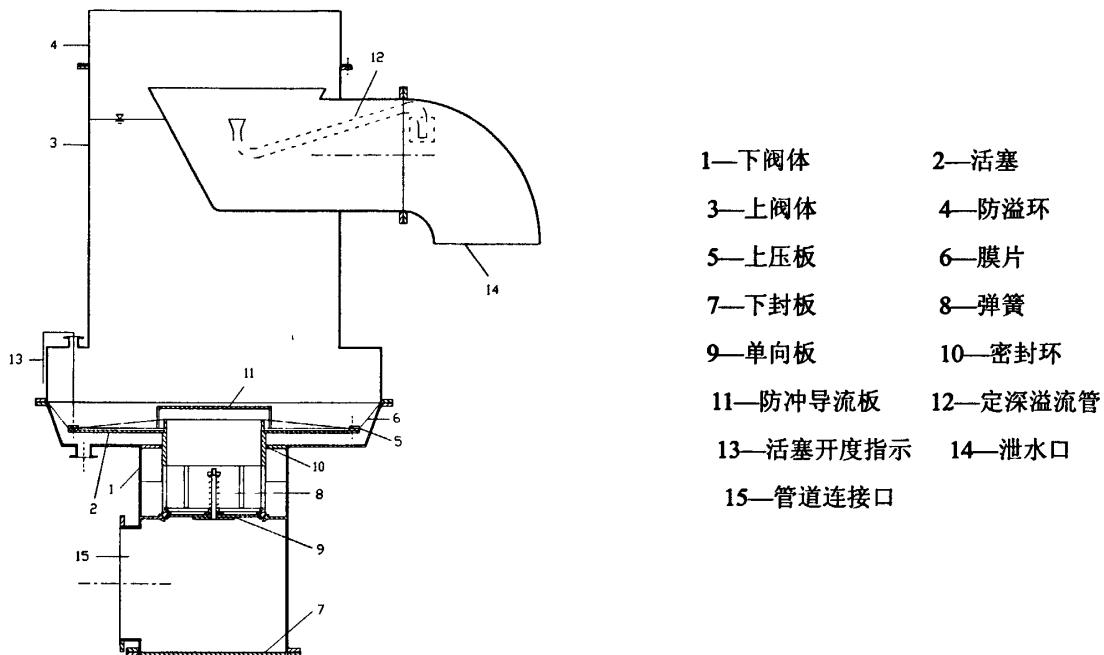


图 4.10 箱式双向调压塔正常关闭状态结构图

箱式双向调压塔的调压方式是在其活塞上部承受箱内水深的压力，活塞下部承受管道压力，活塞上部面积大，下部面积小，且其面积的比值根据箱式调压塔的水深即高度要求和管道内压的大小决定。在正常运行时，管道内压等于或小于其最大设计水压，活塞上部总压力大于或等于管道对活塞下部的总压力，活塞静止不动，被压在阀座上，并保持活塞与阀座间的密封。

当管道内产生水锤时，管道内压大于最大正常运行设计压力，管道对活塞下部的内水总压力大于水箱内水对活塞上部的总压力，从而使活塞向上运行，管道内水从活塞上的导流孔流进水箱，并从水箱溢流管流出，从而起到泄压的作用；当管道压力恢复正常，即等于或小于最大正常运行水压时，活塞下移复位，重新封住阀座不使管内水外流；当管道内出现负压时，活塞下部的单向密封板开启，使箱式调压塔内的水注入管道，消除可能出现的断流空腔，以预防和消除断流弥合水锤。

箱式双向调压塔之所以能把普通双向调压塔的高度降低，而功能保持不变，关键采用了上下不等面积活塞增压的原理。虽然箱式双向调压塔内的压强远小于管道内的压强，但由于 $F = PS$ ，而活塞的上部面积远大于下部面积，活塞受力依然可以达到平衡。这样 $P_1 \times S_1$ 与 $P_2 \times S_2$ 两个值的大小决定箱式调压塔的动作状态，箱式双向调压塔的有效

高度就决定于活塞上下面积的比值。

- ①当 $P_1 \times S_1 \leq P_2 \times S_2$ 时，活塞处于正常关闭状态；（见图 4.10）
- ②当 $P_1 \times S_1 > P_2 \times S_2$ 时，活塞整体向上运动，处于管道高压开启状态，箱式双向调压塔开始泄水降压；
- ③当 $P_1 < P_2$ 的时候，调压塔的单向板向下打开，活塞处于管道低压注水状态，箱式双向调压塔开始注水补压。

上面各符号意义： F ——力，N；

P ——压强，Pa；

S ——面积， m^2

P_1 ——管道内压，m；

P_2 ——箱式双向调压塔内的水压，m；

S_1 ——活塞下部小面积， m^2 ；

S_2 ——活塞上部大面积 m^2 。

（2）箱式双向调压塔性能特点

①防水锤泄压溢流性能高度安全可靠。由于在结构上该调压活塞为直接动作形式，无外导管先导阀等，故克服了超压泄压阀存在的拒动作和滞动作等问题，使管道泄压迅速及时，安全程度大幅度提高。

②泄压动作回位误差小。一般超压泄压阀除泄压动作滞后外，还必须保证 2~3kg/cm²（即 0.2~0.3MPa）动作回位误差压力。本箱式调压塔及动作误差仅 0.2~0.3kg/cm²（即 0.02~0.03MPa）使水锤防护效果进一步提高。

③动作灵敏，反应迅速，对任何水锤都有良好的防护效果。在水锤防护过程中，最可怕的也是最难防护的水锤类型是快速升压型，即在 1~2s 甚至不到 1s 的时间内水锤压力就升到极限。如含气型断流弥合水锤、气囊振荡水锤、气动阀门速闭和水轮机甩负荷关闭导叶等，都接近或属于快速升压型水锤，这种情况下普通先导式超压泄压阀几乎完全失去作用，而采用箱式调压塔则效果良好。

④当管道内出现负压时，该调压塔可迅速向管道内补水，以防止水柱拉断，产生断流弥合水锤。

(3) 箱式双向调压塔选用的技术要点

①箱式双向调压塔装设于泵站汇水总管处或输水干管上易于发生水柱分离的高点或折点处。

②箱式调压塔的高度一般为2~5米，当需要时，也可大于5米。

③箱式双向调压塔的选用在有条件时最好结合系统水锤防护计算进行，以使箱式调压塔的水锤防护效果达到最佳。

④当管道断流空腔很长需较大注水量时，可附设特别注水箱。

⑤箱式双向调压塔一般应安装在管道一侧的阀口井内，大多可能高出地面，高出地面部分应设塔室。

⑥箱式双向调压塔公称直径一般为主管道直径的 $1/2\sim1/3$ ，理论上，调压塔直径越大，水锤防护效果越好，但也带来成本越高问题，因而应通过技术经济比较后确定。

第五章 长距离大型区域重力流输水系统水锤计算数值模拟

在具体的技术条件下，如何进行水锤分析，如何判断水锤危害，采用何种防护措施来消除其危害，以及如何估评防护措施的技术经济效果等，都要以相应的水锤计算为基础。

进行水锤计算数值模拟主要是为了求得：

1. 在管道发生水锤的暂态过程中，管路中流量 Q 、水头 H 等基本参数随时间 t 而变化的规律以及它们的极值。换言之，就是求出沿全管线的最低和最高水头包络线以及各主要点（如水柱分离）的停泵水锤暂态过程线。
2. 在输水管路中开始产生水柱分离的地点和时刻、断流空腔（大空腔）的大小、两分离水柱相互碰撞的时刻以及断流弥合水锤的升压值。
3. 为进行水锤分析所需要的其它资料与数据，如水锤波传播和反射等规律等。
4. 水锤危害预测结果以及可能采用的水锤防护措施及其技术经济效果。
5. 处于水锤危害暂态条件下，对管路以及管路中主要设备的机械强度校核与评价。
6. 找出经济合理的水锤防护措施，以保证泵站、管道运行安全。

由此可见，进行水锤计算不仅仅是为了取得几个数据，而是要求得到为正确进行水锤分析与防护所需的资料、规律与数据。

5.1 模拟计算软件的开发利用

5.1.1 水锤防护计算机模拟的意义

在当今的技术条件下，水利工程建设中已经不再仅仅凭借工作经验进行施工而是越来越多依靠先进的技术和手段对工程中可能出现的情况进行模拟，其中用计算机来对水力机械及水工建筑中的水流状态进行模拟是当前发展起来的新方法，它可以通过大量快速计算在短时间内得出大量的较为准确的数据，为工程的设计和施工提供科学的理论依据。通过对供水工程水力过渡过程的计算机数值模拟，分析供水工程中水锤的发生与发展，科学地估计它可能带来的危害，及时有效地采取措施，避免或减少水锤带来的损失，对于保证供水工程的安全运行，制定科学的运行规程都具有重要的意义。

5.1.2 开发语言选择

Windows xp² 是如今操作系统的主流，所以选用它作为系统软件的运行平台。如今

流行的专业软件多是选择 VC, VB 或 C、C++ 等设计语言结合商业数据库来开发, 本模拟计算系统软件选用 Visual C++ 6.0 作为开发语言, 其具有以下特点:

1. 面向对象的可视化编程, 是开发人员只需编写很少量的程序代码, 就可以快速开发出标准的 Windows 应用程序, 极大的提高了程序设计效率。
2. 事件驱动的编程机制。这样在 VC 中程序员只需对各种用户动作编写相应的处理代码, 程序即简介又易于维护。
3. 易于调用其它相关软件进行数据处理。

从软件系统的可靠性、适用性和开发周期的角度考虑, 选用 Visual C++ 6.0 作为开发语言完全可满足要求。

5.1.3 系统功能分析

模拟计算软件需要实现的主要功能:

1. 工程技术参数的输入

由于技术参数较多, 需要将管路的高程, 首端和末端水池水位, 水锤波速, 管路的管长、管径、摩阻系数, 液控蝶阀的关闭规律, 以及计算时间和管道分段数等编入程序中。

2. 模拟计算内容

采用特征线法结合边界结点和各类水锤防护设施处的边界条件, 编制计算机程序。通过模拟计算求出各个 Δt 时刻管路中不同位置的流量、压力变化过程值; 求出管线正常工作时的稳态压力线、最大水头包络线和最小水头包络线。

该系统在水锤防护措施不同、压力管路的材料不同、关阀时间不同条件下, 研究探讨水锤的防护机理、建立其复杂边界条件的水锤计算数学模型。

3. 模拟计算结果的输出

在 C++ 语言程序里面, 我们将计算数据结果以.txt 文件格式输出, 通过 Excel 绘制出各个时刻某一点的流量、压力过程线; 末端阀在关闭的不同时间里流量、压力曲线; 并绘出整个出水管道的压力分布状况, 即管线正常工作时的稳态压力线、最大水头包络线及最低水头包络线。

5.2 水锤综合防护的计算机数值模拟

在复杂泵站管路系统(如长距离大型区域重力流输水系统)的水锤积极防护过程中,

对诸多影响因素的作用进行同步的现场实测（或模拟实验），困难很大，几乎不太可能。这时，就要求助于近代计算机技术——计算机动态模拟了。

先编制计算机框图，见图 5.1。建立计算机框图对于分析已有的计算机程序或是编创新的程序都有指导作用，然后根据计算机框图编制源程序。

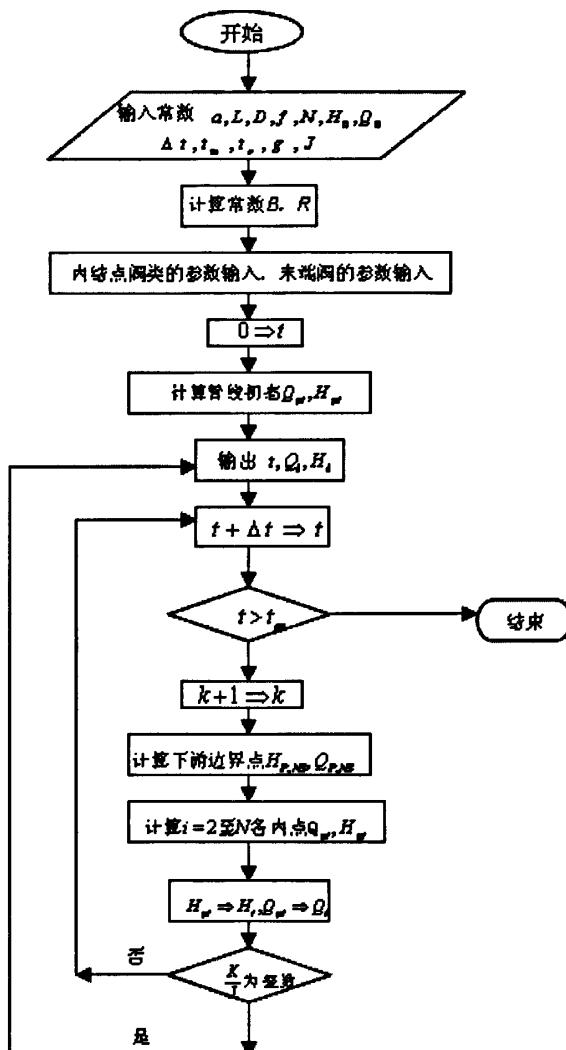


图 5.1 计算程序流程图

5.2.1 蒸汽型断流混合水锤的计算

压缩波的到达产生升压效应，负压波到达产生降压效应，当负压波使管路中的绝对压强降低到液体的汽化压强 P_v 时，液体将立即汽化为水蒸气。这种低压蒸汽在管路中集聚成穴时，连续流动中的液体就被蒸汽大空腔所隔开，从而形成水锤过程中的水柱分离。

(汽) 现象。随着压缩波的再次到来, 已经扩展形成的蒸汽穴将缩小; 当蒸汽穴溃灭时, 两股液体柱彼此相撞, 又将产生很高的瞬时升压, 这种水锤即为断流弥合水锤。

设管路断面位置高程为 Z , 测管水头 (以相对压强计) 为 H , 大气压强 H_a , 液体的汽化压强为 $H_v = \frac{P_v}{\gamma}$, 则当 $(H + H_a) - Z \leq H_v$ 时, 该处将产生蒸汽穴 (大空腔)。断流弥合水锤是一个相当复杂的问题, 一个是从宏观的角度分析; 另一个是以微观气泡动力学原理为基础分析, 两者迄今均未完善。本文以宏观角度分析, 从一种连续液体加固定蒸气穴的模型出发来分析断流弥合水锤。

对于可能发生完全为断流型的固定断面, 如图 5.2 中的断面 i , 在没有发生断流时, 可作为一个内结点, 在发生断流时, 则可看作为一个内部边界点, 对此补充断流结点的边界条件

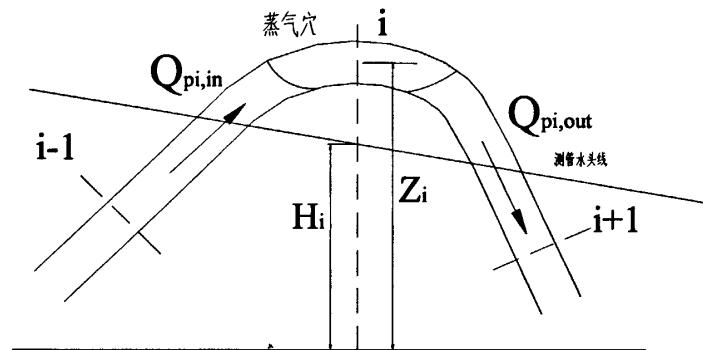


图 5.2 断流弥合水锤分析

如果在分时段计算的过程中 $(H_i + H_a) - Z_i > H_v$, 则断面 i 处不发生蒸汽穴, 可按通常的水锤计算公式继续运算。如果 $H_i \leq Z_i - H_a + H_v$, 则另 $H_i = Z_i - H_a + H_v$ (即断面 i 处保持为汽化压强; 在 H_i 确定后, 利用相邻步段的相容性方程计算本时段末断面 i 上游的进入流量 $Q_{pi,in}$ 和下游侧的流出流量 $Q_{pi,out}$)

$$Q_{pi,in} = \frac{C_p - H_{pi}}{B} \quad (5.1)$$

$$Q_{pi,out} = \frac{H_{pi} - C_M}{B} \quad (5.2)$$

(5.1) 和 (5.2) 式中的 C_p 和 C_M 即为特征线法中所介绍的公式确定。该计算时

段中蒸汽空腔体积增量为 $(Q_{P_i,out} - Q_{P_i,in})$ ，因此，蒸汽空腔发生的时该起，蒸汽空腔累计体积为

$$VL = \sum(Q_{i,out} - Q_{i,in})\Delta t \quad (5.3)$$

随着时段的推移，蒸气空腔先是扩大，然后缩小，一旦 $VL \leq 0$ ，说明蒸气空腔消失，两连续液柱又重新接合，这时应指令 $VL = 0$ ，并按通常水锤计算程序计算 Q_{Pi} 和 H_{Pi} 。

对于断流点，可在内节点计算部分的程序中增补以下的断流分析计算框图。见图5.3。

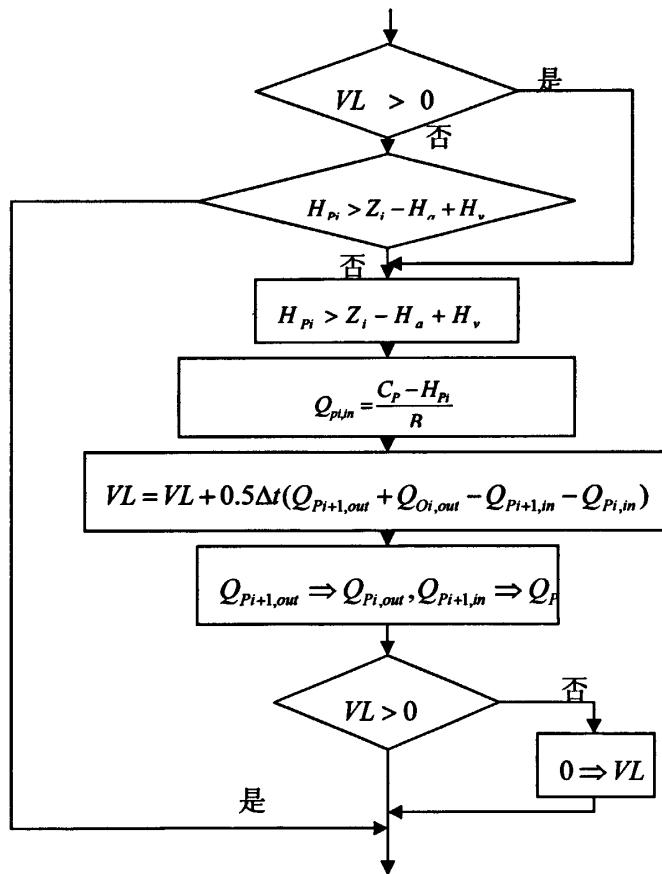


图 5.3 断流弥合水锤（蒸汽腔）计算编程流程图

5.2.2 空气阀处空气型空腔断流弥合水锤的计算

由于蒸汽型空腔断流弥合水锤升压极高，对管道安全造成极大的危害，为防止负压

出现，在管道防负压方面有多种措施可供选择，比如，双向调压塔，单向调压塔，注排气阀和等，其中排气阀或真空破坏阀在防管道出现负压方面应用最多。

在装设进排气阀的管段中，当某处开始出现真空时，因空气被吸入能产生水柱分离现象；空气腔内压强保持为某一固定不变的较低的真空值，甚至接近于零，即 $H_z \approx 0$ 。

(1) 安装单向进气阀处断流空腔的计算

在水锤发生过程中，当管路上某特异点，如驼峰、膝部或峰顶等处的压强低于当地大气压时，为防止负压的出现或空气阀进气量的不足时，大气中的空气通过进气阀吸入管路内，从而防止了真空的进一步增高。当回冲水流及升压波返回时，即空腔体积开始缩小时，阀门自动关死，腔中的空气受到一定的压缩并使回冲流速 V 减小——起到空气垫的作用，从而对断流空腔弥合水锤升压起到缓冲作用。

在输水管线上安装注气阀来防止管道出现负压，具有构造简单、造价低、安装方便等优点，尤其在需要注入相当大水量的场合，更显出了其优越性，但注入的空气若不能及时排出，就可能使大量气体滞留管内，不断产生气囊聚集分散，引起管道断流水锤频发，过水断面减小，气阻摩阻大增，产生压力振荡和通水困难，甚至爆管危害。

注气阀的运作设计做以下假设：当进气阀设置断面处的压强小于大气压时，开始自动进气，并维持该处为大气压；当管内空气长度达最大长度 LM （压缩波动来之前时段空腔长度），空腔长度 DL 开始出现负值，即空腔开始缩短时，则进气阀自动关闭，让已进入管内的空气，按气体状态方程进行压缩。

在空腔长度 L 达到 LM 后，出现 $DL < 0$ 。当空气被压缩时， L 与绝对压强 P 成反比例关系变化

$$\text{因为: } P = [(H + 10) - H_z] \gamma \quad (5.4)$$

$$\text{又 } \frac{1}{\gamma} \frac{P}{10} = \frac{LM}{L}$$

$$\text{故 } H = H_z + \left(\frac{LM}{L} - 1 \right) \times 10 \quad (5.5)$$

由上式可知注气阀处升压 H 和气囊长度 L 的变化关系，而 $L = LM - \sum DL$ ，各时段的 $DL = 0.5 \times DT \times (Q_{pi,out} + Q_{i,out} - Q_{pi,in} - Q_{i,in}) \times 4 / (\pi \times D \times D)$ 。通过与特征线方程联立，即可计算。

(2) 安装注排气阀处空气型断流空腔的计算

注排气阀因其性能不同，对管道防护所起的作用大小也不同，安装排气阀部分的断流空腔应根据排气阀的性能，具体问题具体分析，按通常水锤计算程序计算 Q_{pi} 和 H_{pi} ，在安装排气阀处，根据相容性方程式（2.28）和式（2.29）并结合 2.2.6 排气阀边界条件进行计算。

5.2.3 安装其它水锤防护措施处的水锤计算

为了管线安全稳定的运行，一般还要在管线上安装箱式双向调压塔、超压泄压阀等水锤防护措施。按通常水锤计算程序计算 Q_{pi} 和 H_{pi} ，在安装箱式双向调压塔、超压泄压阀等处，根据相容性方程式（2.28）和式（2.29）并结合 2.2.8 超压泄压阀边界条件和 2.2.9 调压塔边界条件进行计算。

5.2.4 水锤综合防护计算

(1) 水锤综合防护总目标

实际工程中的长距离大型区域重力流输水系统是很复杂的，水锤的主要危害表现在因管线上多处出现高真空或空气腔而引起的多处水柱分离及随后的断流弥合水锤，进行合理的综合水锤防护。

水锤综合防护系统总体防护效果最佳的标准是：

- ①技术上安全可靠，即在水锤过程中，
 - a.管线上的最大压强小于 1.3~1.5 倍的管路设计工作压力；
 - b.沿全管线不出现真空和具有危害的断流弥合水锤；
- ②经济上合理；
- ③管理上比较方便。

(2) 长距离大型区域重力流输水系统的防护计算步骤

根据前文论述，对于长距离大型区域重力流输水系统的水锤计算应遵循以下步骤：

- ①阀门优化和蒸汽腔计算

对于长距离大型区域重力流输水系统，在没有任何防护措施的情况下发生关阀水锤断流概率是非常大的。因此第一步计算首先略去管线中的所有水锤防护措施进行初步计算。

本计算主要有两个目的：a.通过计算调试选择一个合理的阀门关闭程序，使管道压

力变化尽可能小。b.通过计算了解管线发生断流的时间、位置以及管道的最大升压和降压值，以便进一步采取防护措施。

②空气腔的计算

在实际工程中，由于正常运行及维修管理等各种原因，必须在管线的一定位置处装设某种目的的阀门（如注气阀、真空破坏阀及排气阀等），所以下面要考虑关阀时在管线加装注排气阀对管道的影响。空气腔的计算即是在上一步的基础上增加管道排气阀的边界条件进行计算。通常空气腔的计算都是做为水锤防护方案比选时的一种方案。对于长距离输水管道，排气阀是必不可少的水力自动阀门，而且排气阀无论性能如何在管道产生负压时均会动作。因此，排气阀应作为一种基本的管道设施考虑，而不是单独的作为一种防护方案。在空气腔的计算过程中，应首先了解各种排气阀的工作性能（已在第四章详细阐述），推导出不同排气阀的边界条件（已在第二章给出）。

③其它防护方案的比选

对于长距离大型区域重力流输水系统仅靠排气阀防护是不够的。因此，应在管道选择好排气阀的基础上，进行其它防护措施的比选。例如在管线加装超压泄压阀、调压塔（包括单向调压塔、普通双向调压塔和箱式双向调压塔）等。

综上所述，长距离大型区域重力流输水系统的水锤防护应重点做好管线的断流水锤防护以及关阀程序的考虑。在进行断流水锤防护时，排气阀应作为基本防护措施进行计算，然后再辅以箱式双向调压塔等其它措施。

第六章 长距离大型区域重力流输水系统工程实例

辽宁省大伙房输水（二期）工程输水系统全长约 253km，属大流量、超长距离输水工程。干线上有取水头部、抚顺配水站、沈阳配水站 1、沈阳配水站 2、辽阳配水站、鞍山加压站（含配水站）、营盘配水站及 7 座稳压塔，分别为支线上抚顺净水厂、沈阳 1 净水厂、沈阳 2 净水厂、辽阳净水厂、鞍山净水厂、营口净水厂、盘锦净水厂等七个净水厂提供水源，由于整个供水系统范围大，各支线长度不同、取水规模不同，在运行过程中，不可避免的会出现各支线净水厂分别停水的工况，由于各干线配水站前没有调蓄水池，在支线净水厂关阀时水力过渡过程所产生过大的动水压力，不仅可能会造成支路管线的破坏，也可能会影响到干线供水。基于此，本章特对各支线净水厂进行关阀水力过渡过程分析；另外，虽然所有输水管路均为有压输送，但鞍山加压站前为重力流输水，鞍山加压站后水流通过加压泵站输送，故可将整个管路分两部分研究。

本章节主要研究鞍山加压泵站上游段关阀水锤，对主干管上不安装任何防水锤设备，只安装普通排气阀，只安装恒速缓冲排气阀，安装普通排气阀和超压泄压阀，安装普通排气阀和普通调压塔，安装普通排气阀和箱式调压塔，安装恒速缓冲排气阀和超压泄压阀，安装恒速缓冲排气阀和普通调压塔，安装恒速缓冲排气阀和箱式调压塔等九种措施进行分析。

6.1 长距离大型区域重力流输水系统工程概况

6.1.1 工程概况

辽宁省大伙房输水（二期）工程输水系统属大流量、超长距离输水工程。干线上有取水头部、抚顺配水站、沈阳配水站 1、沈阳配水站 2、辽阳配水站、鞍山加压站（含配水站）、营盘配水站及 7 座稳压塔，分别为支线上抚顺净水厂、沈阳 1 净水厂、沈阳 2 净水厂、辽阳净水厂、鞍山净水厂、营口净水厂、盘锦净水厂等七个净水厂提供水源，整个输水系统属于压力密闭系统。

输水系统全长约为 253km，隧洞一次建成，直径 6m，其余部分分一二步两期建设。鞍山加压站上游为有压重力流输水，输水管线沿途设有 6 个配水站，抚顺配水站、沈阳配水站 1、沈阳配水站 2、辽阳配水站、鞍山加压站（含配水站）、营盘配水站，向各市配水，管线沿途流量逐渐减少。管道系统示意图及高程图（见图 6.1 和图 6.2）。

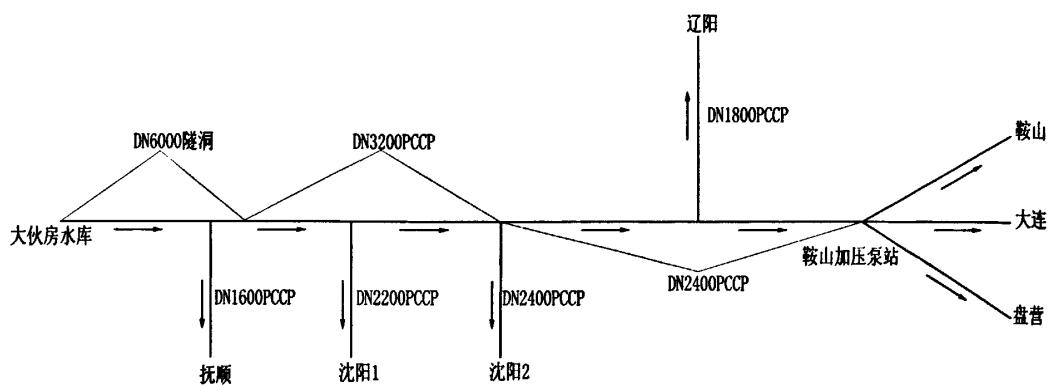


图 6.1 辽宁省大伙房水库输水工程鞍山加压泵站上游段管道示意图

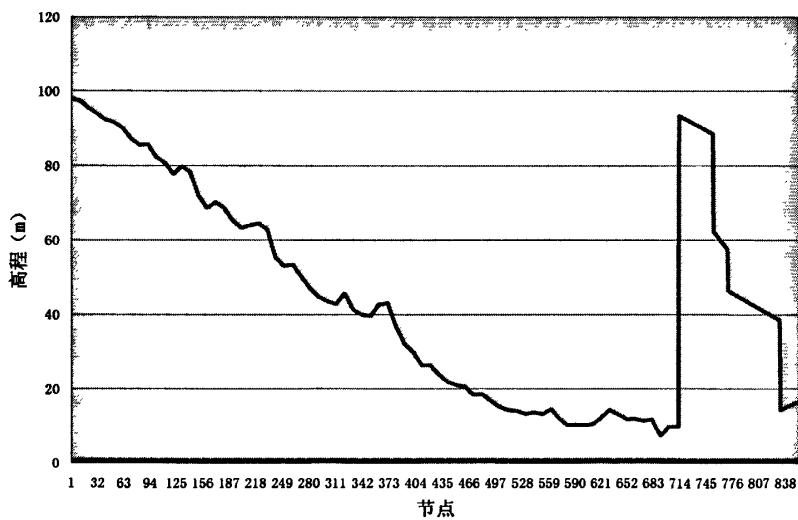


图 6.2 辽宁省大伙房水库输水工程鞍山加压泵站上游段管道高程示意图

图 6.2 中节点 1 到节点 713 代表的是从大伙房水库到鞍山加压泵站主管道，节点 713 到节点 753 代表抚顺支线，节点 754 到节点 770 代表沈阳 1 支线，节点 771 到节点 831 代表沈阳 2 支线，节点 832 到节点 853 代表辽阳支线。节点和节点之间距离为 200m。

6.1.2 工程数据资料

1. 大伙房水库特征水位：

校核洪水位：139.32m 正常高水位：131.5m 正常蓄水位：124.66m

工程设计水位：120.0m 死水位：108.0m

净水厂特征水位：

抚顺净水厂：97.0m 沈阳净水厂 1：66.0m 沈阳净水厂 2：47.0m

辽阳净水长：24.0m 鞍山净水厂：36.0m

2. 各种与运行工况参数

正常运行工况：水库水位 120m，流量位平均流量。

表 6.1 各市平均日水量

城市	一步平均输水量 × $10^4 \text{m}^3/\text{d}$	二步平均输水量 × $10^4 \text{m}^3/\text{d}$	备注
抚顺	26	45	
沈阳 1	88	114	
沈阳 2	87	113	
辽阳	37	62	
鞍山	38	57	
盘锦	17	56	
营口	34	57	
合计	327	504	

(1) 最不利工况

所谓最不利工况是指水库水位比较低而 6 市用水量相对比较大的工况，通过对 6 市逐日用水量和水库对应水位分析，找出 7 月 1 日和 2 月 4 日位输水系统最不利工况，具体数据见下表：

表 6.2 不利工况校核流量表

工况	一步校核工况		二步校核工况		
	日期	7 月 1 日	2 月 4 日	7 月 1 日	2 月 4 日
水库水位 (m)					
抚顺净水厂	115.07	26	28	45	49
沈阳净水厂 1		96	110	123	138
沈阳净水厂 2		95	103	124	138
辽阳净水厂		41	38	69	64
鞍山净水厂		43	46	64	69
盘锦净水厂		17	18	57	57
营口净水厂		41	37	66	60
各城市流量					
头部-抚顺配水站	359	380	548	575	
抚顺配水站-洞出口	333	352	503	526	
洞出口-沈配 1	333	352	503	526	
沈配 1-沈配 2	237	242	380	388	
沈配 2-辽阳	142	139	256	250	
辽阳-鞍山	101	101	187	186	
鞍山-营盘配水站	58	55	123	117	
管段流量					

3.有关参数的设计控制条件

大伙房输水（二期）工程由于管线长，沿线采用了有压钢筋混凝土隧洞、PCCP 管（预应力钢筒混凝土管）及玻璃钢管三种输水管材，相应的设计工作压力与校核工作分别为：

- (1) 节点 1 至节点 146 之间为：有压钢筋混凝土隧洞输水隧洞设计内水压力 0.5MPa，校核内水压力为 0.75MPa。
- (2) 在鞍山加压站前的 PCCP 管设计内水压力 0.6 MPa，校核内水压力 0.9 MPa；在鞍山加压站后 PCCP 管设计内水压力 0.8 MPa，校核内水压力 1.2 MPa。
- (3) 营盘配水站后的玻璃钢管设计内水压力 0.8 MPa，校核内水压力 1.2 MPa。

6.2 长距离大型区域重力流输水系统水锤计算分析

根据不利工况校核流量表，分析可知 2 月 4 日为最不利工况，故程序以 2 月 4 日最不利工况为计算依据，此工况下正常运行的管线稳态水压线见图 6.3 至 6.7。由于由于管线较长，各节点挨得太近，故分段表示。

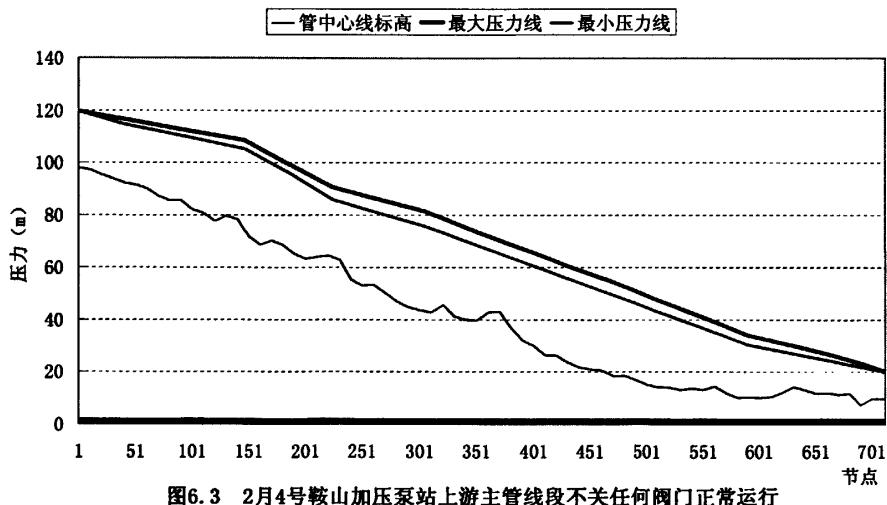


图 6.3 2 月 4 号鞍山加压泵站上游主管线段不关任何阀门正常运行

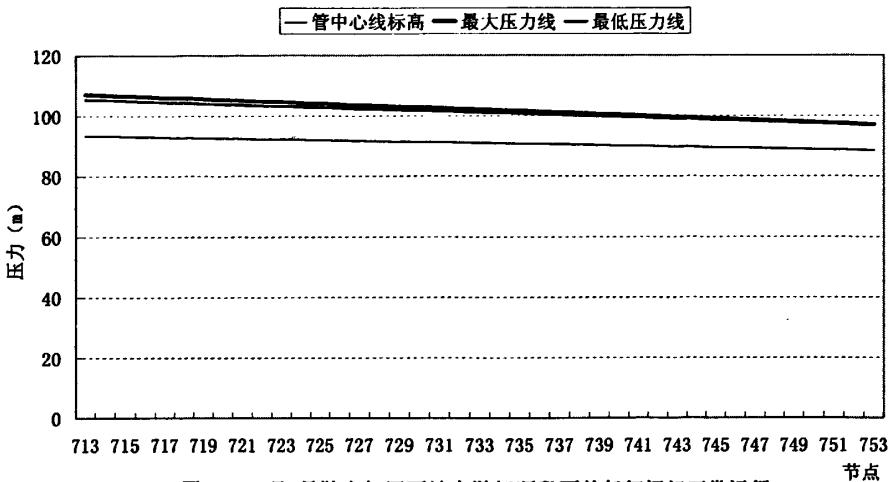


图6.4 2月4号鞍山加压泵站上游抚顺段不关任何阀门正常运行

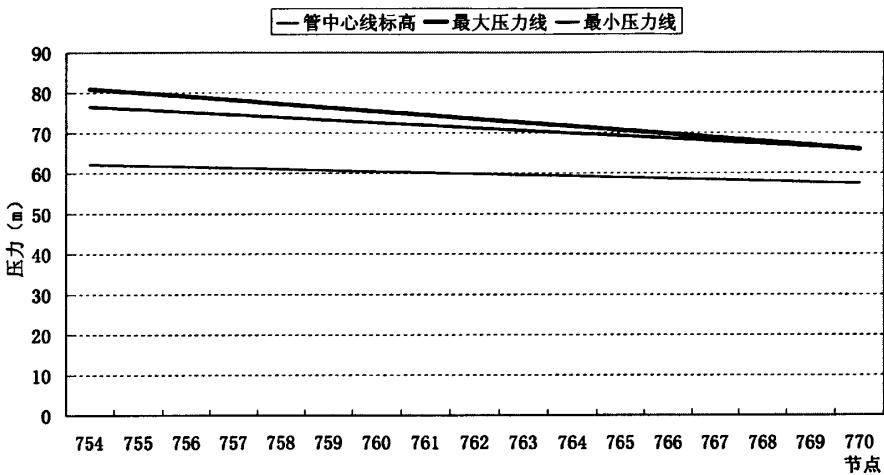


图6.5 2月4号鞍山加压泵站上游沈阳1支线段不关任何阀门正常运行

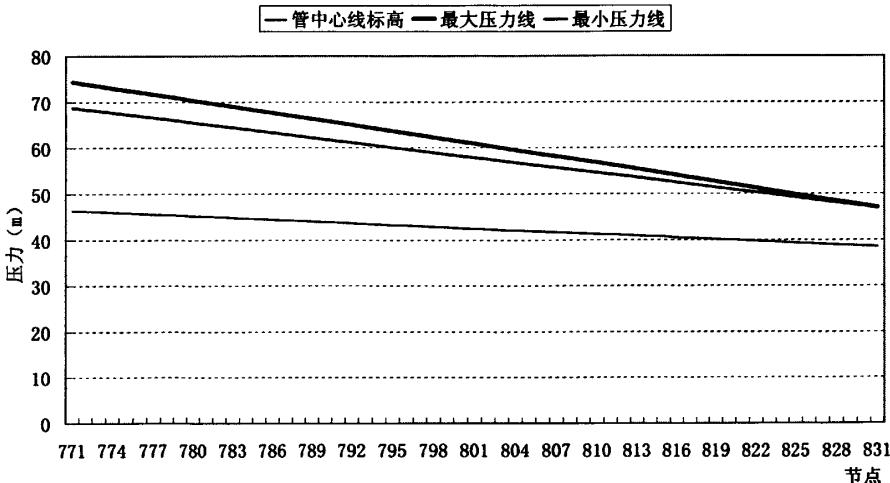


图6.6 2月4号鞍山加压泵站上游沈阳2支线段不关任何阀门正常运行

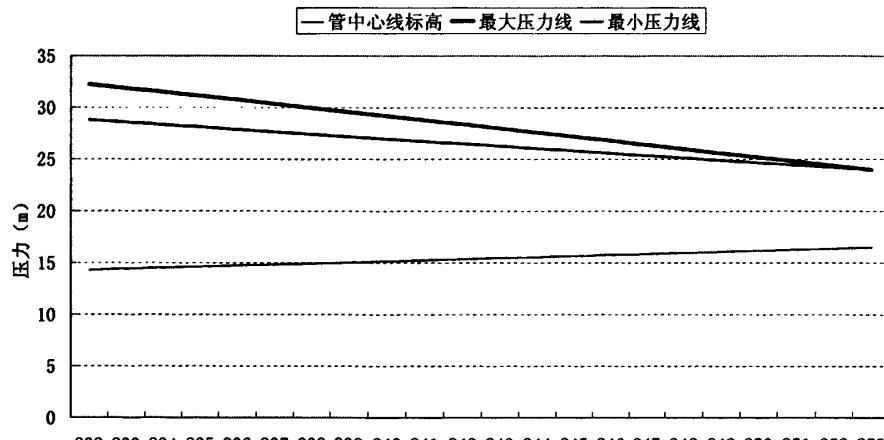


图6.7 2月4号鞍山加压泵站上游辽阳支线段不关任何阀门正常运行

6.2.1 鞍山加压站上游沈阳1支线及沈阳2支线净水厂同时关阀水锤分析

由于关阀水锤受流量、管线长度、关阀时间影响较大，故按照供水流量及管线长度大小设计最不利工况为在2月4日沈阳1支线及沈阳2支线净水厂同时关阀（关阀历时为300s），并分析其水力过渡过程。

步长取200m，即 $DL=200\text{m}$ ，整个管线分成852段，即 $N=853$ ，相应的计算时段为 $DT=DL/a=200/1000=0.2\text{s}$ ，相应的计算节点数 $NS=853$ ，计算总历时为1000s。

1. 沈阳1支线及沈阳2支线净水厂同时关阀且全管线上不安装任何防水锤设备（关阀历时为300s）

沈阳1及沈阳2净水厂支线长度分别为3436.08m和12243.50m，引用流量在2月4日分别达到 $12.731\text{m}^3/\text{s}$ 和 $11.921\text{m}^3/\text{s}$ ，如果该日该两支线同时关阀停水，则在该两支线及主干管上产生的关阀水锤较正常日供水大。计算结果见图6.8至图6.12。

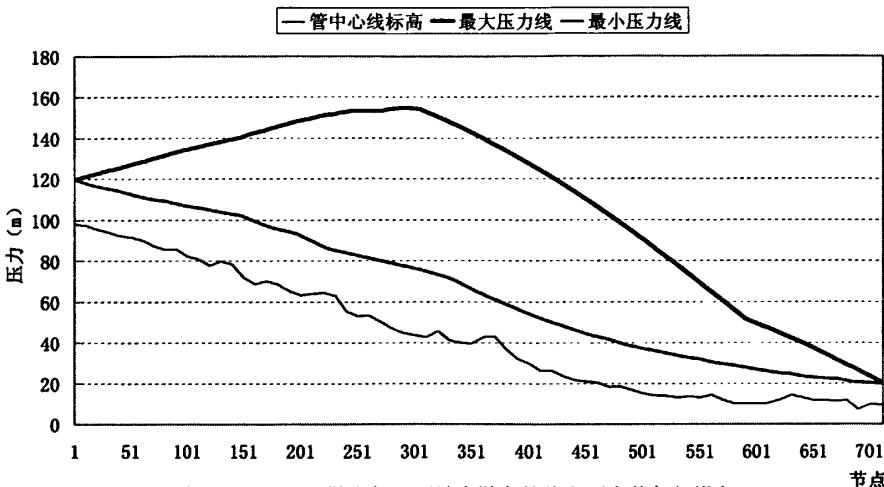


图6.8 2月4号鞍山加压泵站上游主管线段不安装任何设备

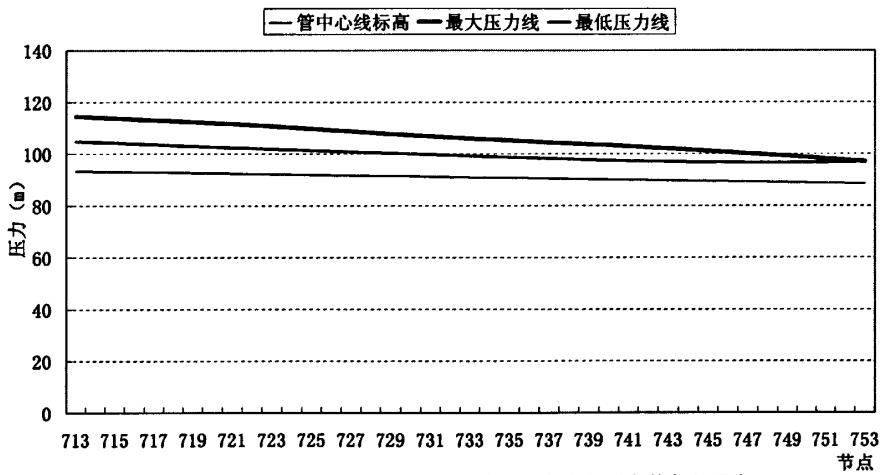


图6.9 2月4号鞍山加压泵站上游抚顺支线段不安装任何设备

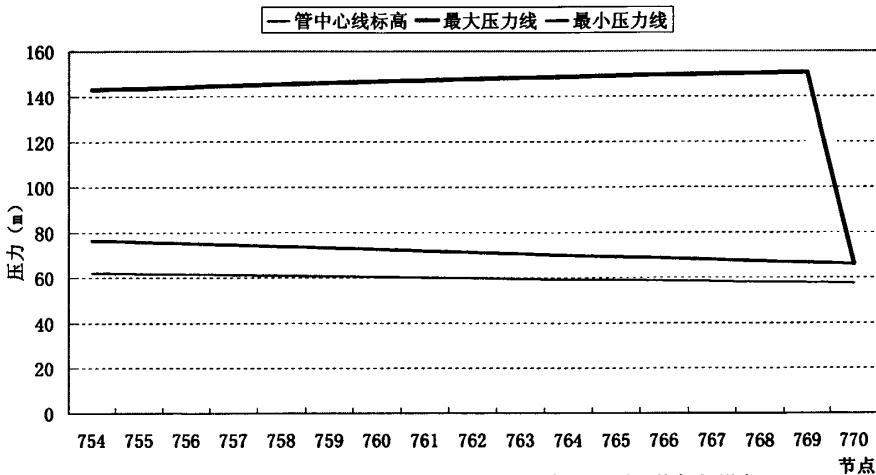


图6.10 2月4号鞍山加压泵站上游沈阳1支线段不安装任何设备

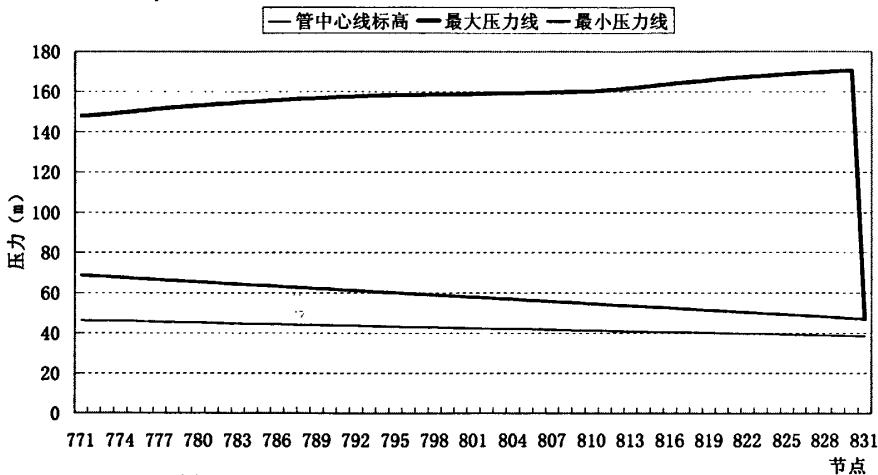


图6.11 2月4号鞍山加压泵站上游沈阳2支线段不安装任何设备

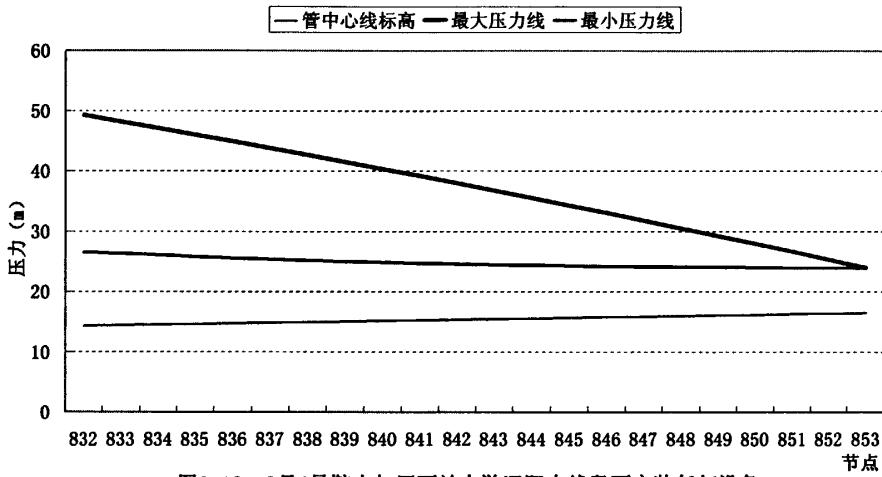


图6.12 2月4号鞍山加压泵站上游辽阳支线段不安装任何设备

由图 6.8 至 6.12 可知：当管路上不安装任何防水锤设备，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭时，主干管及沈阳 1 和沈阳 2 支线压力明显升高，在离水库 13.8km 至 54km 处主干管压力超过管路设计内水压力，在离水库 23.3km 至 44.7km 处主干管压力超过管路校核内水压力，沈阳 1 和沈阳 2 支线压力均超过管路校核内水压力，管道安全不能保证。抚顺支线和辽阳支线受关阀水锤影响不大，压力略微升高。从图上可知，管道压力虽有较大的上升，但全线并没有发生断流。综上所述，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂停水，在管路不安装任何防水锤设备的情况下，管路安全不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

2. 沈阳 1 支线及沈阳 2 支线净水厂同时关阀且全管线上只安装普通排气阀（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个普通排气阀，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭，计算结果见图 6.13 至 6.17。

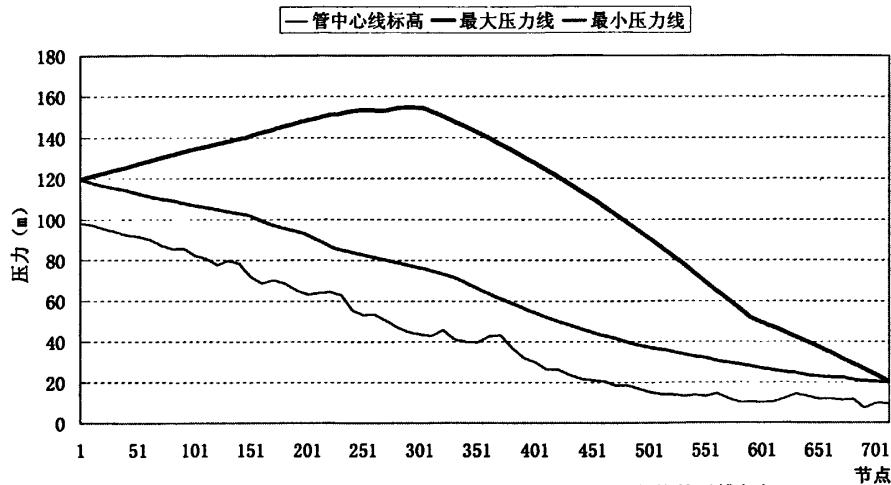


图6.13 2月4号鞍山加压泵站上游主管线段只安装普通排气阀

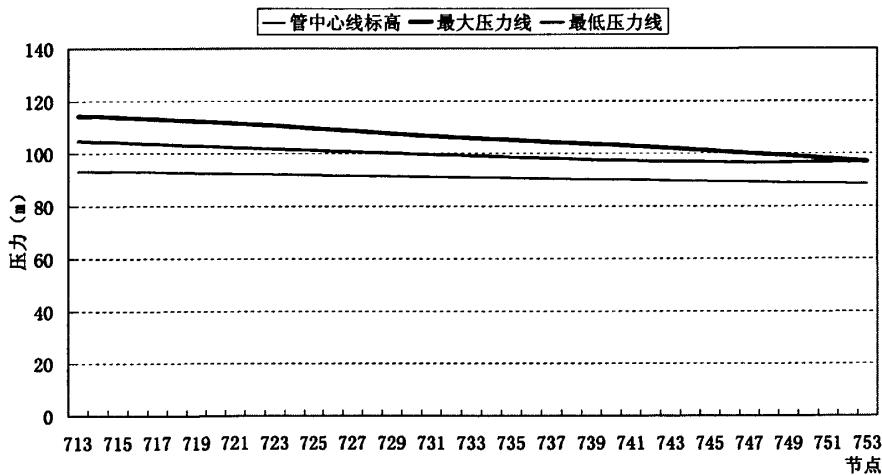


图6.14 2月4号鞍山加压泵站上游抚顺支线段只安装普通排气阀

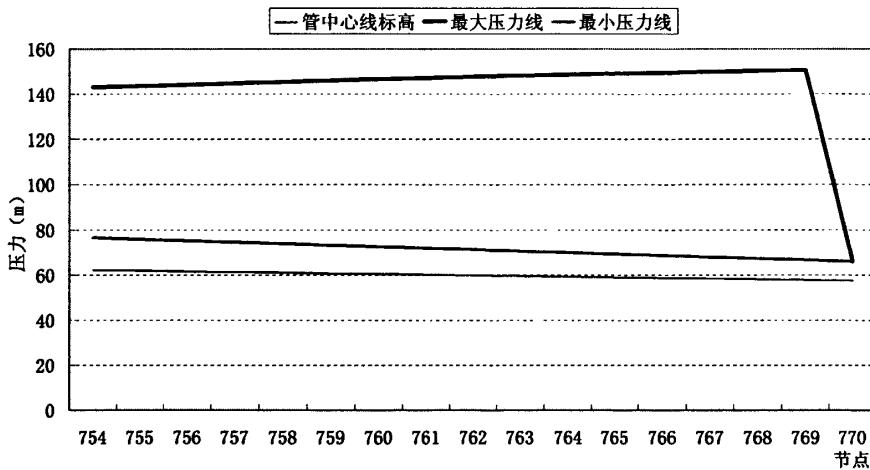


图6.15 2月4号鞍山加压泵站上游沈阳1支线段只安装普通排气阀

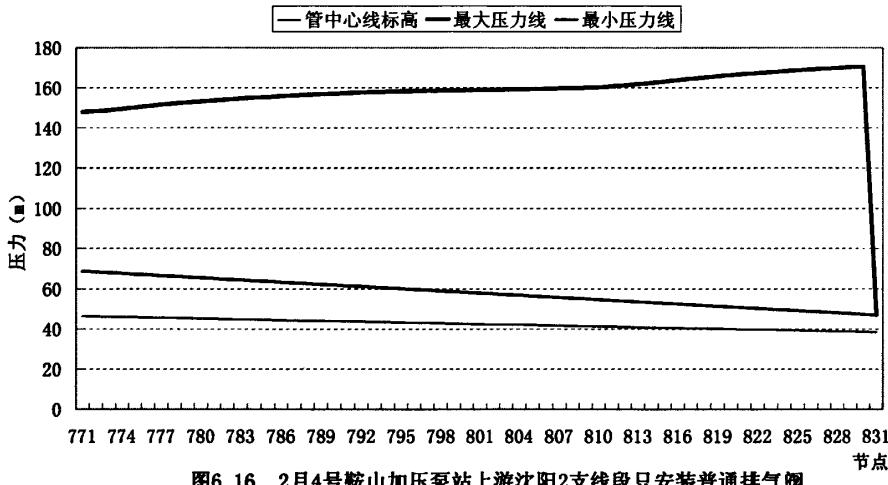


图6.16 2月4号鞍山加压泵站上游沈阳2支线段只安装普通排气阀

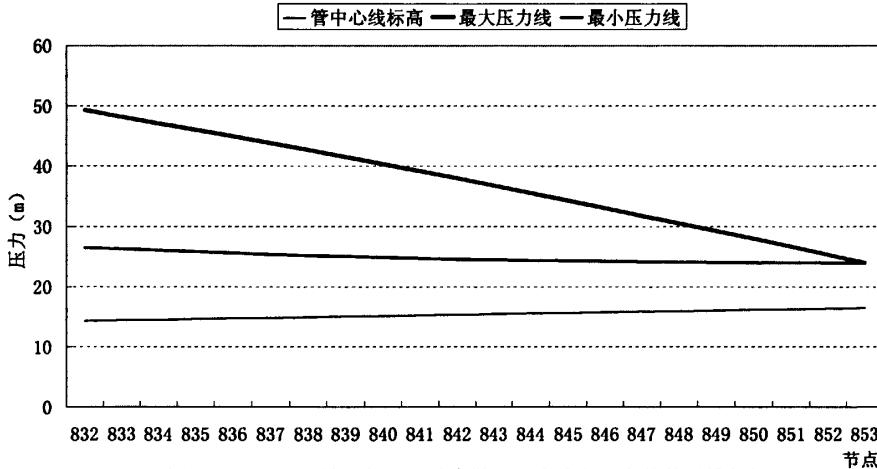


图6.17 2月4号鞍山加压泵站上游辽阳支线段只安装普通排气阀

由图 6.13 至 6.17 可知：当管道上只安装普通排气阀，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭时，由于管道内未发生断流，故主干管及沈阳 1 和沈阳 2 支线压力升高情况和管线上不安装任何防水锤设备的情况一致。综上所述，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂停水，在管路只安装普通排气阀的情况下，管路安全也不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

3. 沈阳 1 支线及沈阳 2 支线净水厂同时关阀且全管线上只安装恒速缓冲排气阀（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭，计算结果见图 6.18 至 6.22。

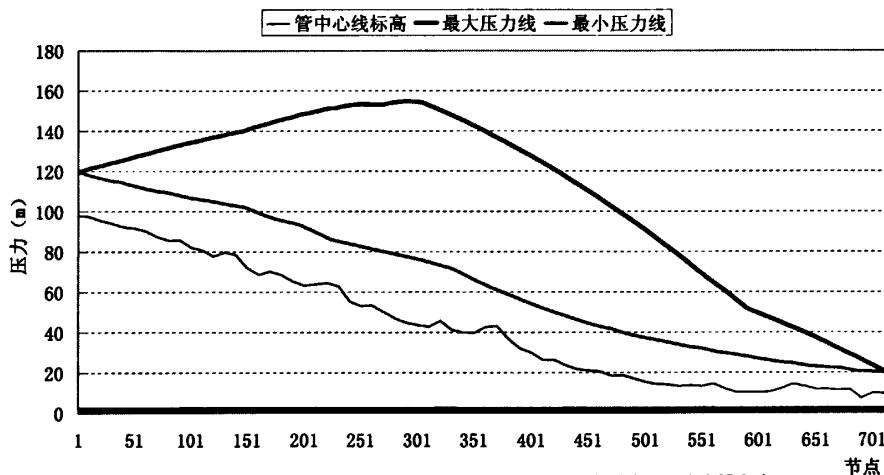


图 6.18 2月4号鞍山加压泵站上游主管线段只安装恒速缓冲排气阀

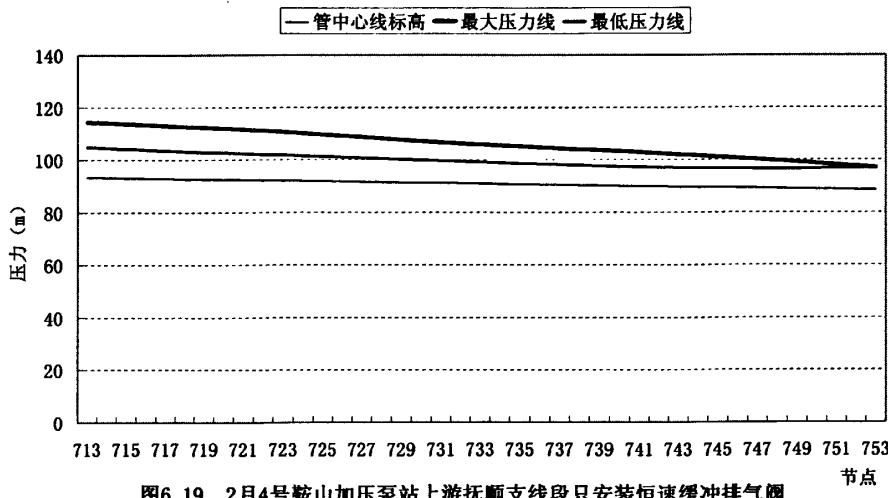


图 6.19 2月4号鞍山加压泵站上游抚顺支线段只安装恒速缓冲排气阀

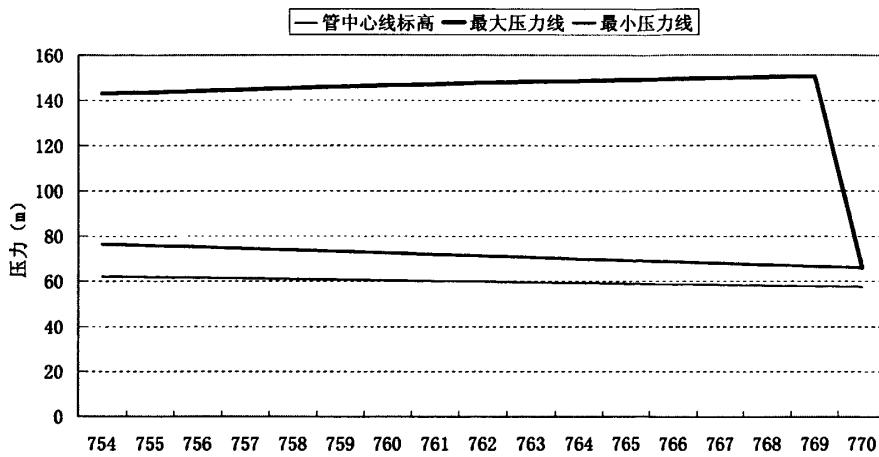


图6.20 2月4号鞍山加压泵站上游沈阳1支线段只安装恒速缓冲排气阀

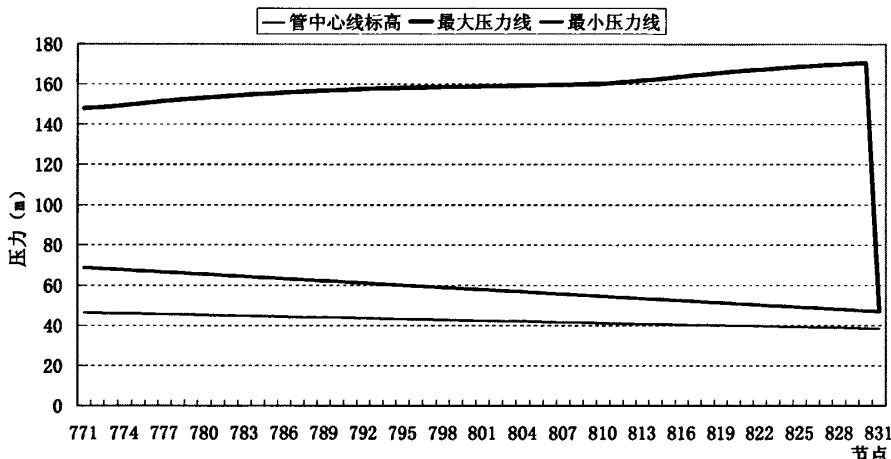


图6.21 2月4号鞍山加压泵站上游沈阳2支线段只安装恒速缓冲排气阀

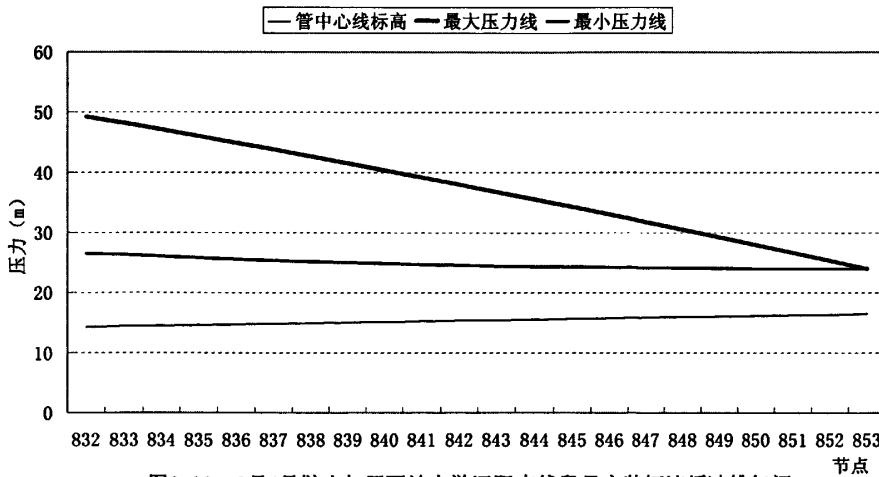


图6.22 2月4号鞍山加压泵站上游辽阳支线段只安装恒速缓冲排气阀

由图 6.18 至 6.22 可知：当管道上只安装恒速缓冲排气阀，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭时，由于管道内未发生断流，故主干管及沈阳 1 和沈阳 2 支线压力升高情况和管线上只安装恒速缓冲排气阀的情况一致。综上所述，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂停水，在管路只安装恒速缓冲排气阀的情况下，管路安全也不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

4. 沈阳 1 支线及沈阳 2 支线净水厂同时关阀且全管线上安装恒速缓冲排气阀+超压泄压阀（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀，且在桩号 6+300, 45+550, 77+960, 100+496, 140+000 处各安装了一个超压泄压阀，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭，计算结果见图 6.23 至 6.27。

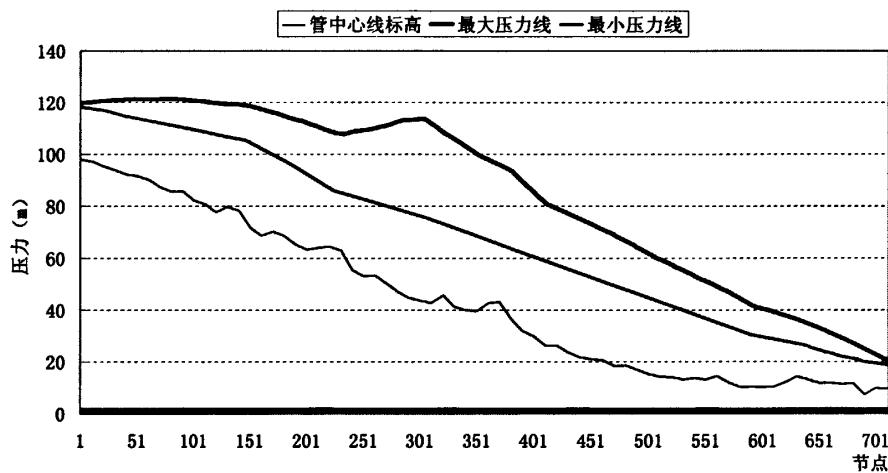


图 6.23 2月4号鞍山加压泵站上游主管线段恒速缓冲排气阀+超压泄压阀

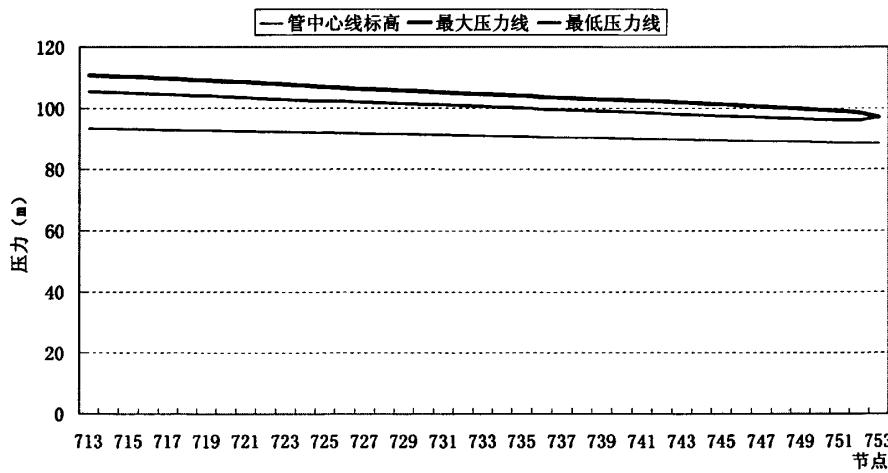


图 6.24 2月4号鞍山加压泵站上游抚顺支线段恒速缓冲排气阀+超压泄压阀

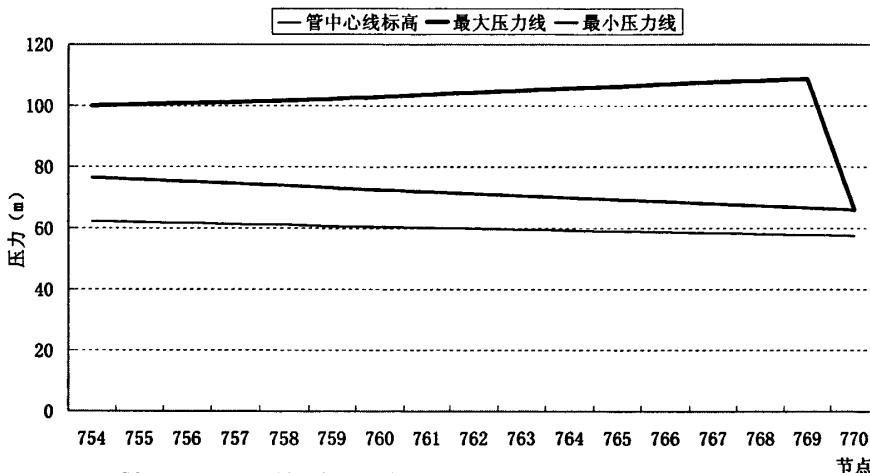


图6.25 2月4号鞍山加压站上游沈阳1支线恒速缓冲排气阀+超压泄压阀

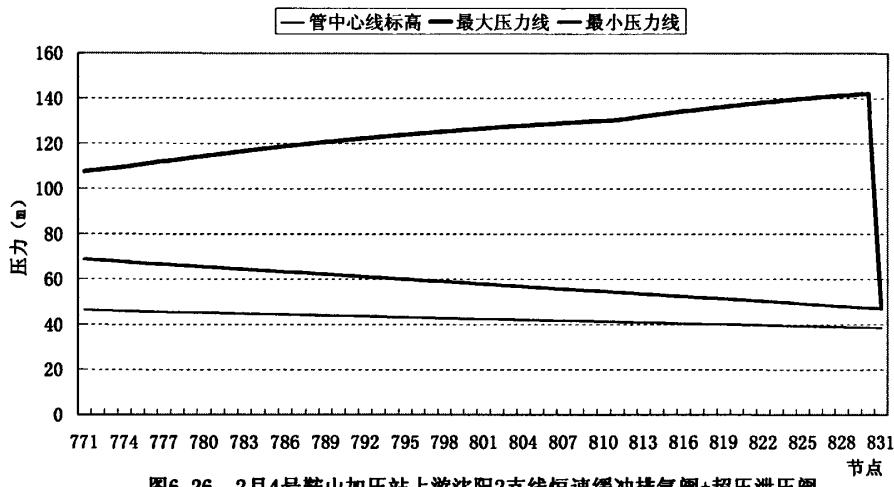


图6.26 2月4号鞍山加压站上游沈阳2支线恒速缓冲排气阀+超压泄压阀

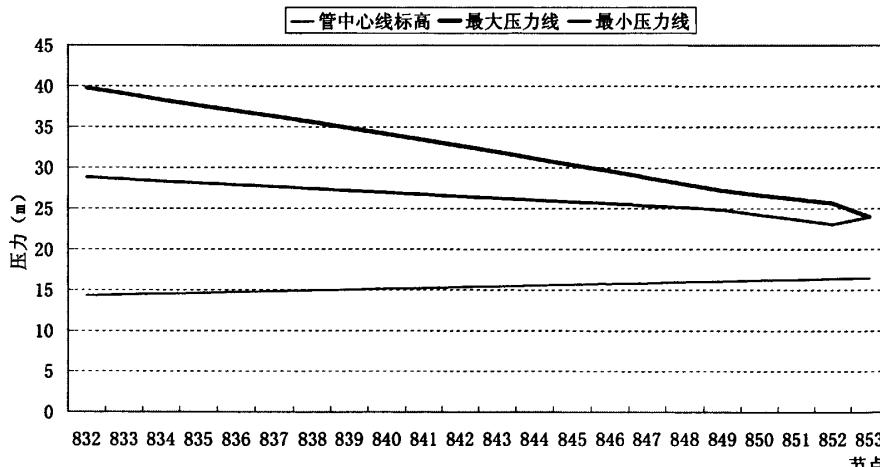


图6.27 2月4号鞍山加压站上游辽阳支线恒速缓冲排气阀+超压泄压阀

由图 6.23 至 6.27 可知：当管道上安装恒速缓冲排气阀和超压泄压阀，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭时，主干管及沈阳 1 和沈阳 2 支线压力均升高，在离水库 27km 至 35.1km 处主干管压力超过管路设计内水压力，但未超过管路校核内水压力，沈阳 1 支线压力未超过管路设计内水压力，沈阳 2 支线压力超过管路校核内水压力，故沈阳 2 支线管道安全不能保证，沈阳 2 支线将发生爆管。抚顺支线和辽阳支线受关阀水锤影响不大，压力略微升高。综上所述，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂停水，在管路安装恒速缓冲排气阀和超压泄压阀的情况下，管路安全不能保证，管道可能发生爆管，对下游供水造成影响。

5. 沈阳 1 支线及沈阳 2 支线净水厂同时关阀且全管线上安装恒速缓冲排气阀+普通调压塔（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀，且在桩号 6+300, 45+550, 77+960, 100+496, 140+000 处各安装了一个普通调压塔，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭，计算结果见图 6.28 至 6.32。

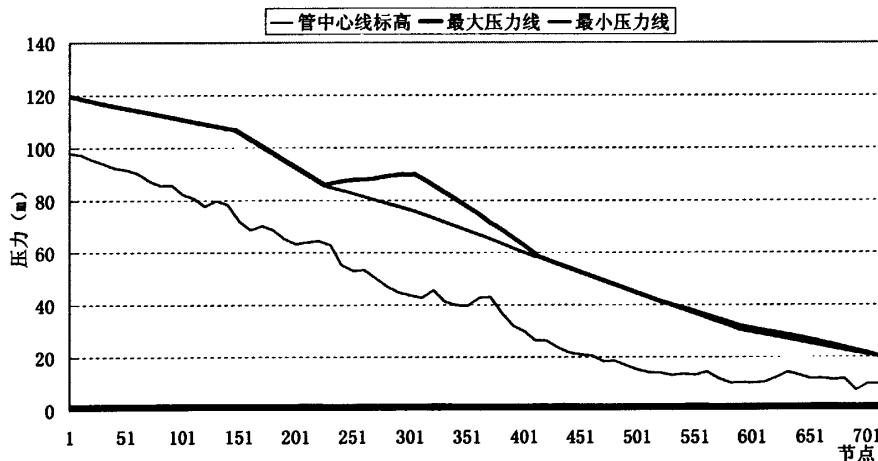


图6.28 2月4号鞍山加压站上游主管线恒速缓冲排气阀+普通调压塔

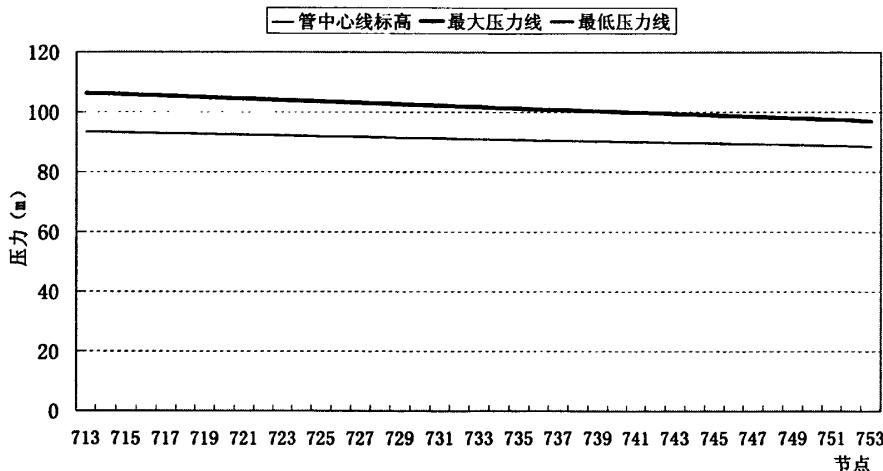


图6.29 2月4号鞍山加压站上游抚顺支线恒速缓冲排气阀+普通调压塔

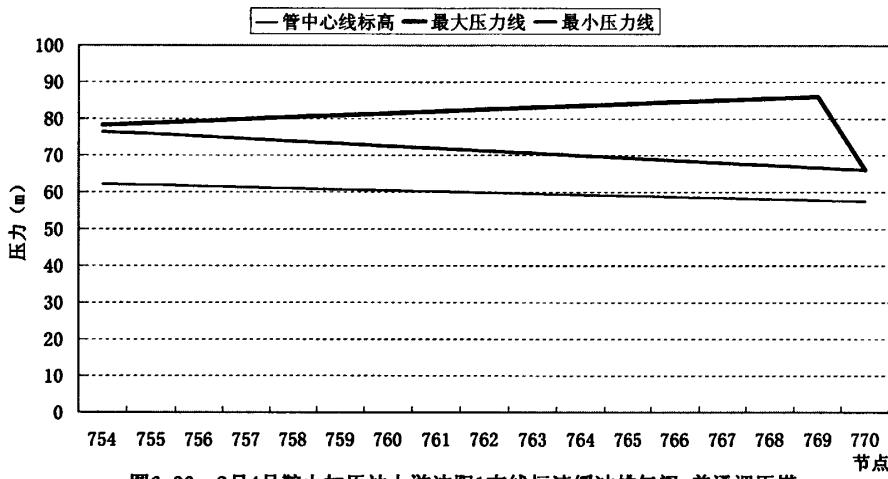


图6.30 2月4号鞍山加压站上游沈阳1支线恒速缓冲排气阀+普通调压塔

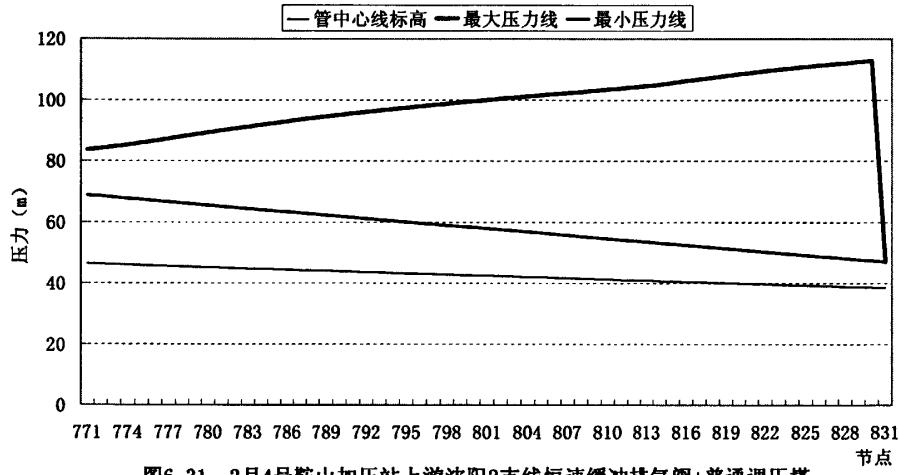


图6.31 2月4号鞍山加压站上游沈阳2支线恒速缓冲排气阀+普通调压塔

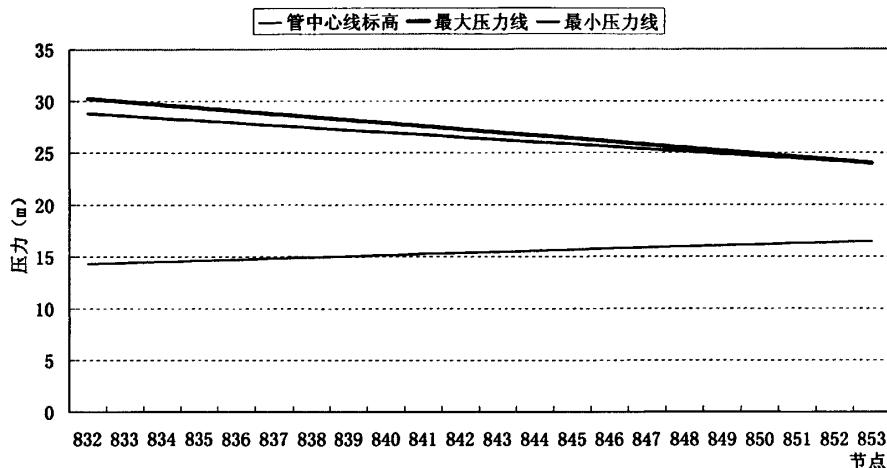


图6.32 2月4号鞍山加压站上游辽阳支线恒速缓冲排气阀+普通调压塔

由图 6.28 至 6.32 可知：当管道上安装恒速缓冲排气阀和普通调压塔，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭时，主干管及沈阳 1 和沈阳 2 支线压力均升高，主干管压力未超过管路设计内水压力，沈阳 1 支线压力未超过管路设计内水压力，沈阳 2 支线压力略微超过管路校核内水压力。抚顺支线和辽阳支线受关阀水锤影响不大，压力略微升高。综上所述，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂停水，在管路安装恒速缓冲排气阀和普通调压塔的情况下，管路安全能保证，对下游供水不造成影响。

6.沈阳 1 支线及沈阳 2 支线净水厂同时关阀且全管线上安装恒速缓冲排气阀+箱式调压塔（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀，且在桩号 6+300, 45+550, 77+960, 100+496, 140+000 处各安装了一个箱式调压塔，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭，计算结果见图 6.33 至 6.37。

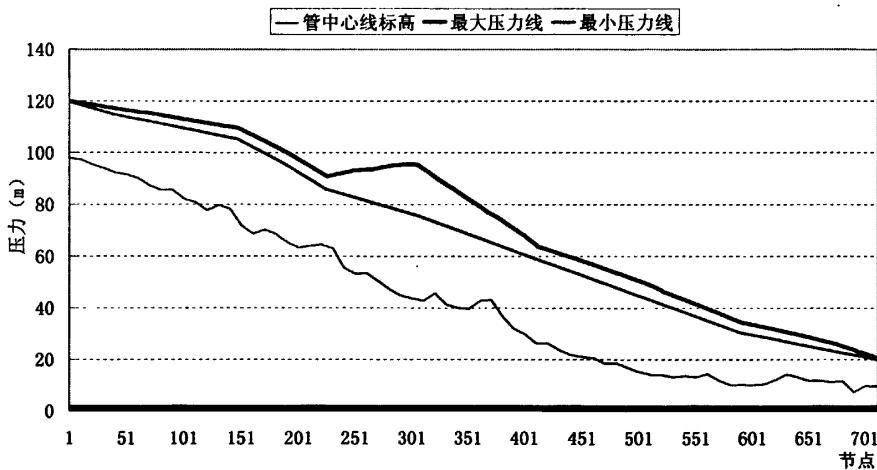


图6.33 2月4号鞍山加压站上游主管线恒速缓冲排气阀+箱式调压塔

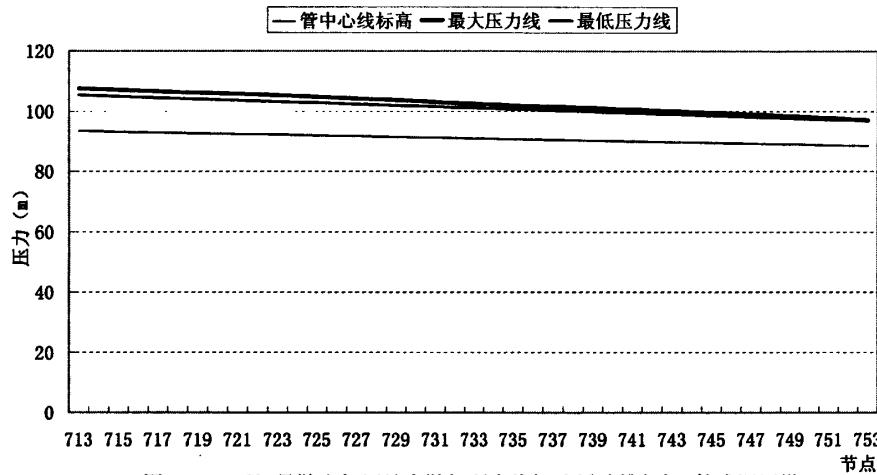


图6.34 2月4号鞍山加压站上游抚顺支线恒速缓冲排气阀+箱式调压塔

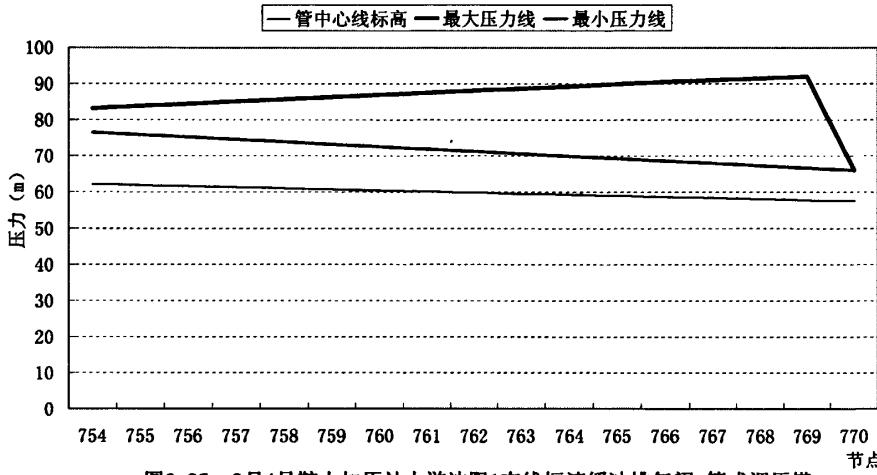


图6.35 2月4号鞍山加压站上游沈阳1支线恒速缓冲排气阀+箱式调压塔

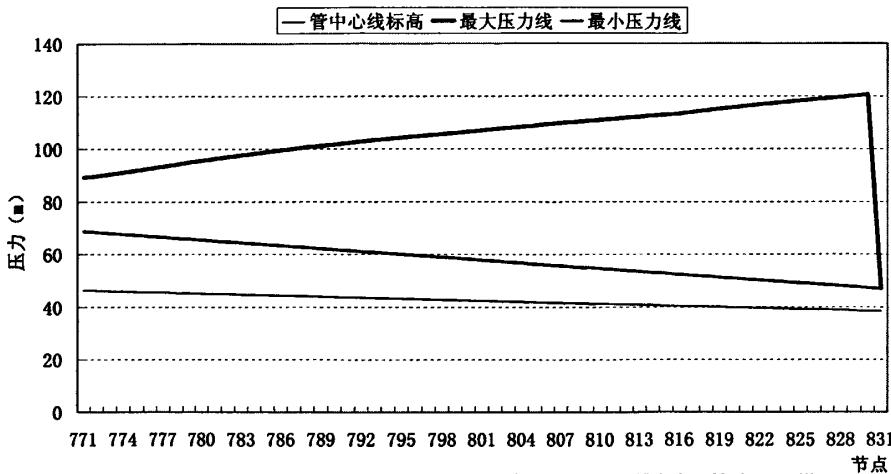


图6.36 2月4号鞍山加压站上游沈阳2支线恒速缓冲排气阀+箱式调压塔

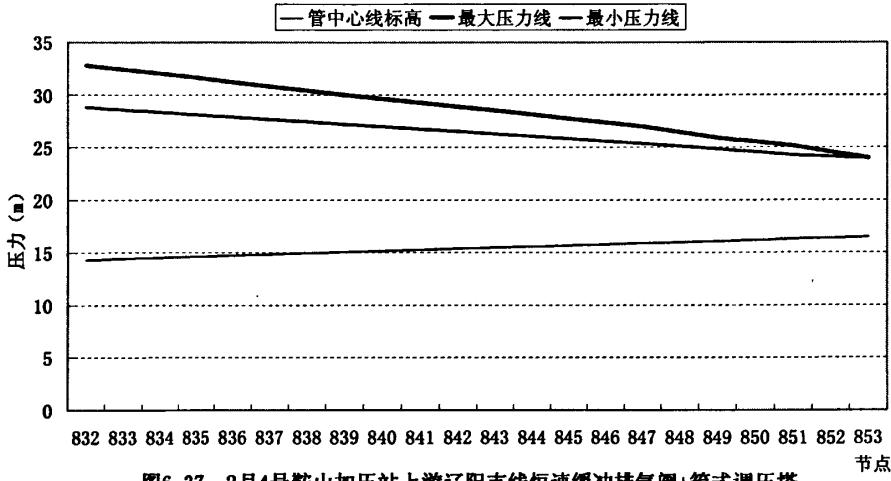


图6.37 2月4号鞍山加压站上游辽阳支线恒速缓冲排气阀+箱式调压塔

由图 6.33 至 6.37 可知：当管道上安装恒速缓冲排气阀和箱式调压塔，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂处阀门同时以 300s 关闭时，主干管及沈阳 1 和沈阳 2 支线压力均升高，压力升高情况和管道上安装恒速缓冲排气阀和普通调压塔基本相同。综上所述，沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂停水，在管路安装恒速缓冲排气阀和箱式调压塔的情况下，管路安全能保证，对下游供水不造成影响。

6.2.2 小结

综上所述在 2 月 4 日沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂同时关阀（关阀历时为 300s）时，管路压力升高，但不发生断流，在不安装任何防水锤设备的情况下，管道将发生爆管。为防止供水系统在其他意外的情况下发生断流和放空检修后冲水排气的需要，在输水管

道的适当位置设置恒速缓冲排气阀是保证输水管线安全、经济运行的一种有效方法。鞍山加压泵站上游段每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀。在综合比较了几种方案后，管道上安装恒速缓冲排气阀+普通调压塔和安装恒速缓冲排气阀+箱式调压塔的方案对管道安全最有利，但由于该工程位于东北地区，气候寒冷，普通调压塔太高，保温工作不好做，在不动作的时候塔内水可能被冻住，当压力变化时，起不到作用。箱式调压塔在高度上比普通调压塔低，保温工作比较普通调压塔容易实行，在管路安全方面起到的作用和普通调压塔一样，故在 2 月 4 日沈阳 1 和沈阳 2 支线净水厂同时关阀（关阀历时为 300s）的工况下，在管路上安装恒速缓冲排气阀+箱式调压塔的方案对管道安全最有利。

6.2.3 模拟鞍山加压站突然停泵对鞍山加压站上游段的关阀水锤分析

本节研究对鞍山加压泵站突然停泵进行模拟，即设计为在鞍山加压泵站前设置一个阀门，突然停泵相当于在 300s 内关闭该阀门。

1. 鞍山加压泵站前关阀且全管线上不安装任何防水锤设备（关阀历时为 300s）

鞍山加压泵站在一期时只对鞍山支线和盘锦及营口加压供水。在 2 月 4 日流量最大，流量为 $11.69\text{m}^3/\text{s}$ ，按照供水流量设计最不利工况为在 2 月 4 日突然停泵，即鞍山加压泵站前 300s 关阀。在此工况下，鞍山加压站上游段不安装任何防水锤设备，水锤计算结果见图 6.38 至图 6.42。

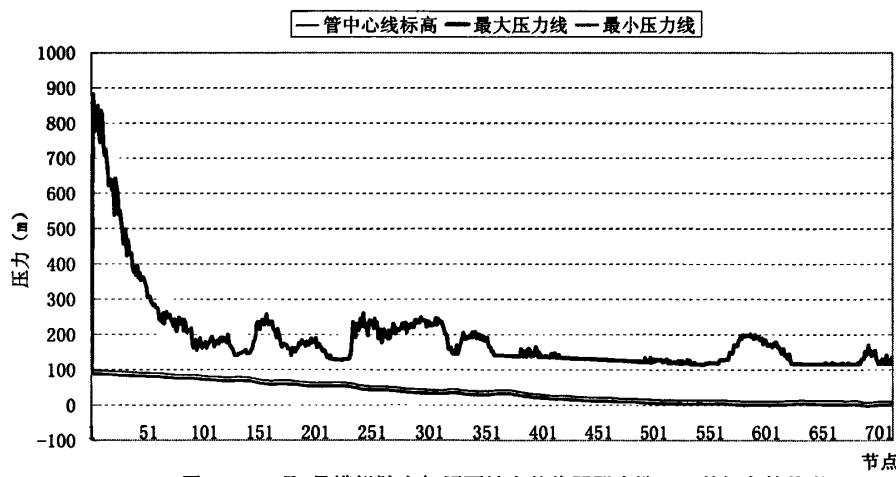


图6.38 2月4号模拟鞍山加压泵站突然停泵即末端300s关阀主管线段

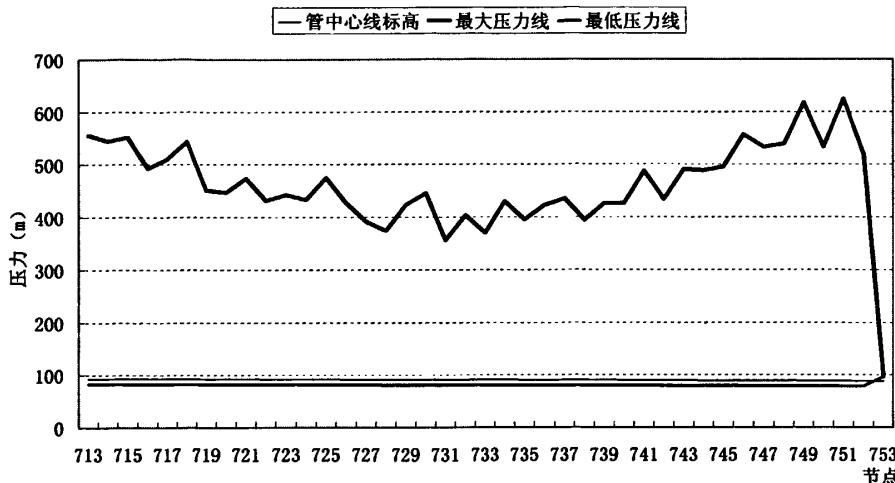


图6.39 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵即末端300s关阀抚顺支线段

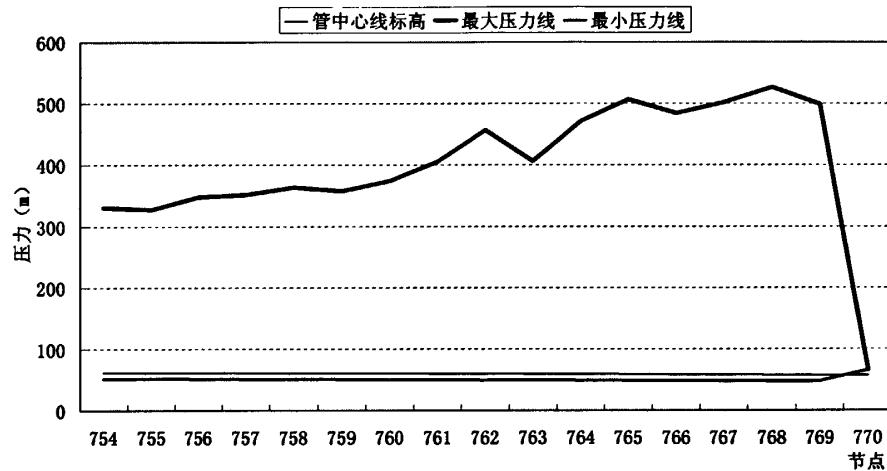


图6.40 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵即末端300s关阀沈阳1支线

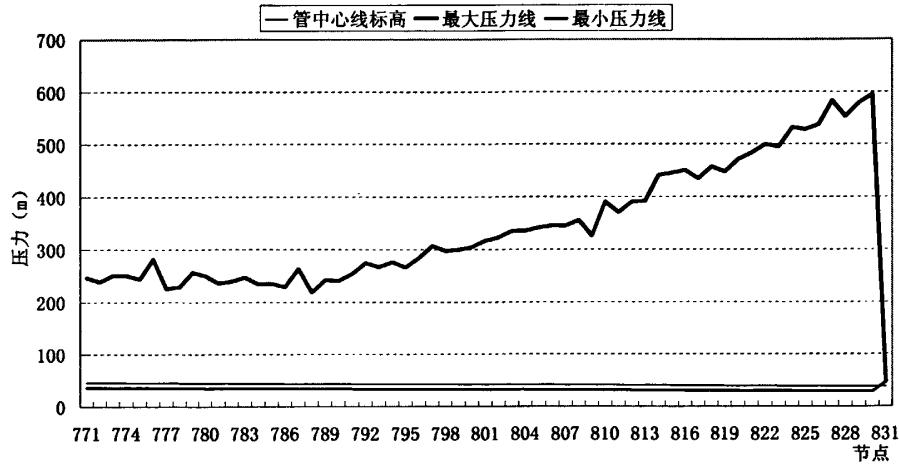


图6.41 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵即末端300s关阀沈阳2支线段

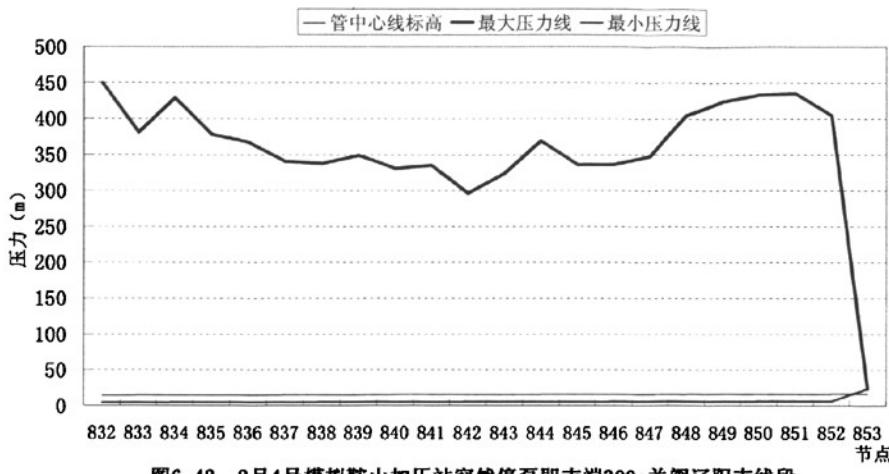


图6.42 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵即末端300s关阀辽阳支线段

由图 6.38 至 6.42 可知：当管路上不安装任何防水锤设备，鞍山加压泵站前 300s 关阀时，全线发生断流，主干管及各支线压力显著升高，全线压力均超过管路校核内水压力，全线发生爆管。综上所述，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路不安装任何防水锤设备的情况下，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

2.鞍山加压泵站前关阀且全管线上只安装普通排气阀（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个普通排气阀，鞍山加压泵站前 300s 关阀，计算结果见图 6.43 至 6.47。

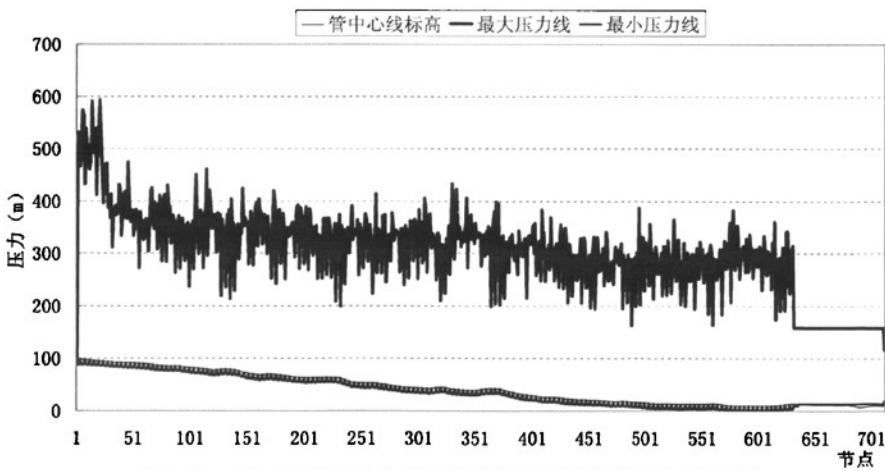


图6.43 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵只安装普通排气阀主管线

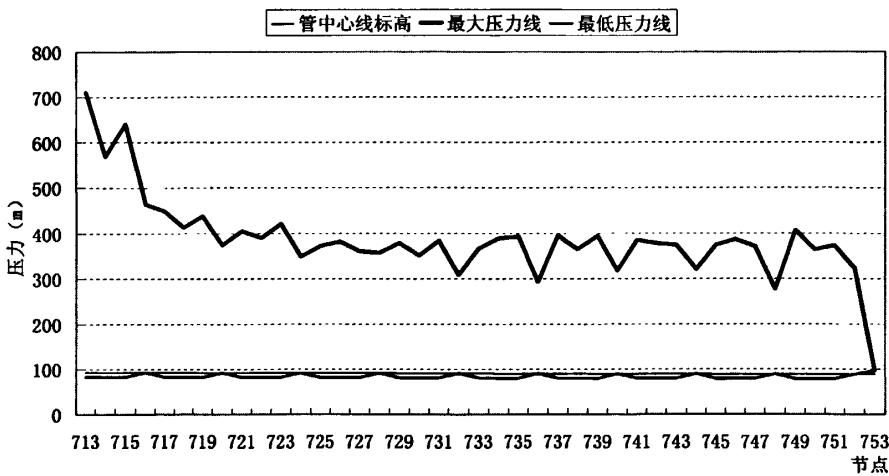


图6.44 2月4号模拟鞍山加压泵站突然停泵只安装普通排气阀抚顺支线

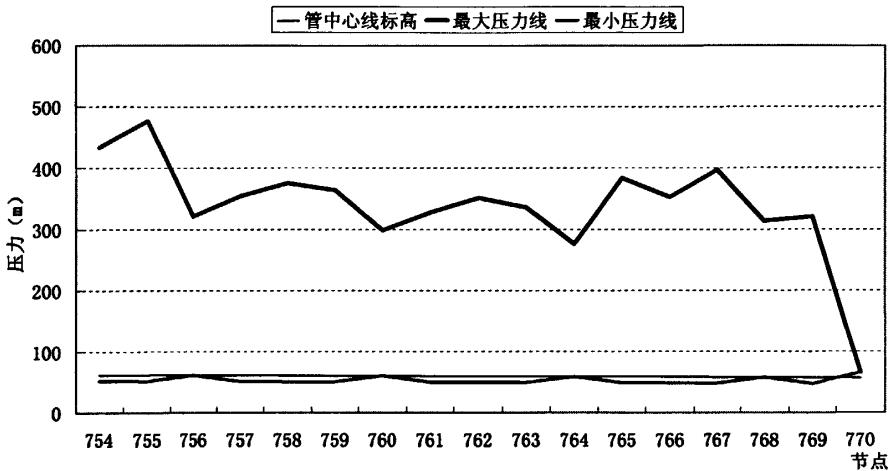


图6.45 2月4号模拟鞍山加压泵站突然停泵只安装普通排气阀沈阳1支线

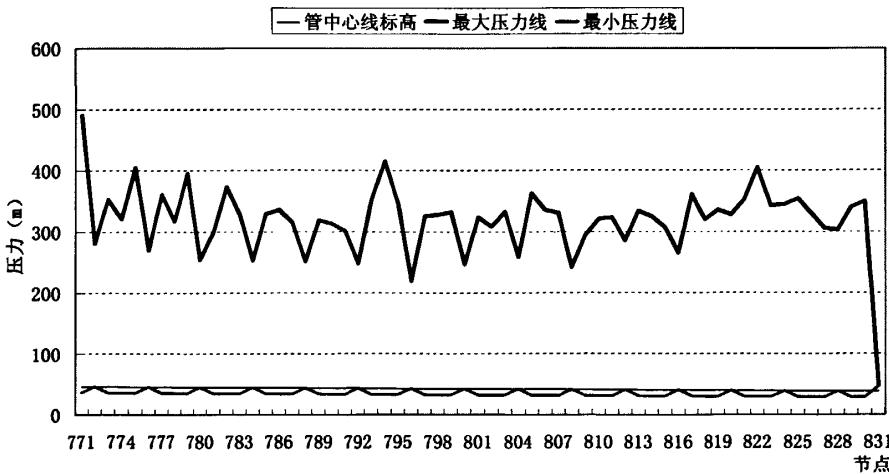


图6.46 2月4号模拟鞍山加压泵站突然停泵只安装普通排气阀沈阳2支线

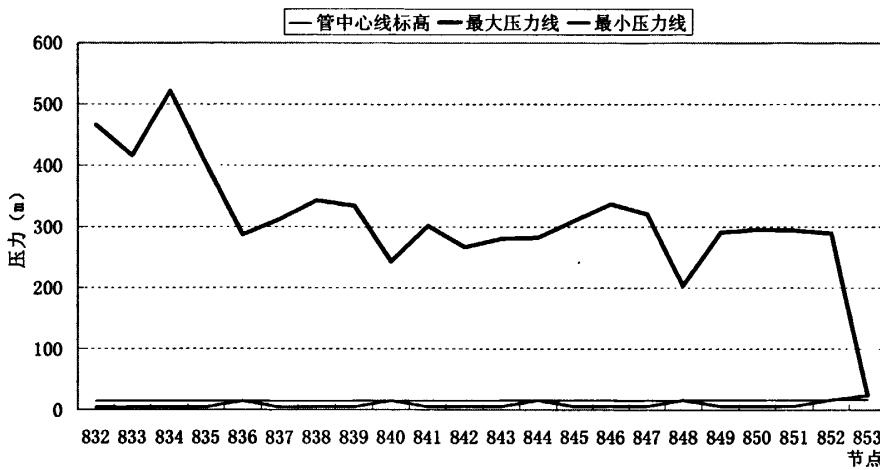


图6.47 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵只安装普通排气阀辽阳支线

由图 6.43 至 6.47 可知：当管道上只安装普通排气阀，鞍山加压泵站前 300s 关阀，全线发生断流，主干管及各支线压力显著升高，与管道上不安装任何防水锤设备的情况相比，压力有所下降，但全线压力还是超过管路校核内水压力，全线也发生爆管。综上所述，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路只安装普通排气阀的情况下，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

3.鞍山加压泵站前关阀且全管线上安装恒速缓冲排气阀（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀，鞍山加压泵站前 300s 关阀，计算结果见图 6.48 至 6.52。

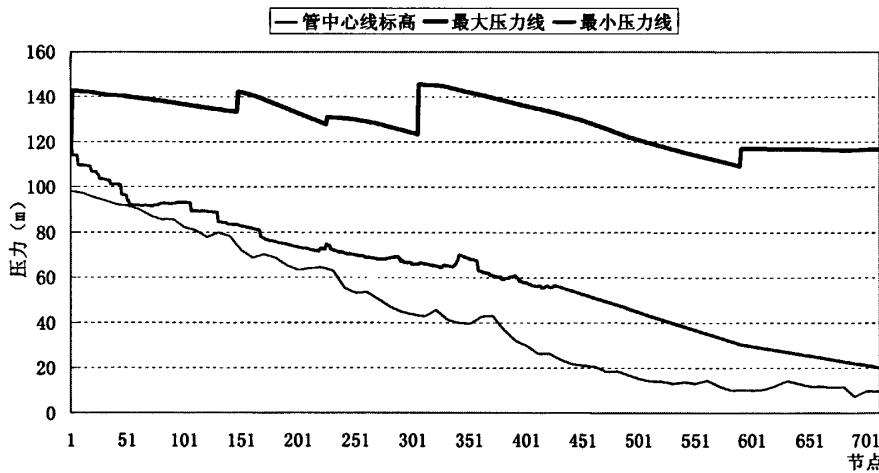


图6.48 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵安装恒速缓冲排气阀主管线

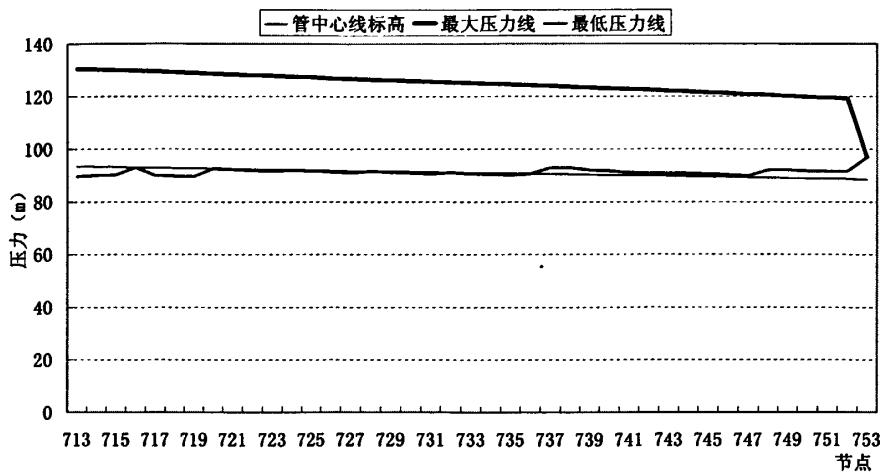


图6.49 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵安装恒速缓冲排气阀抚顺支线

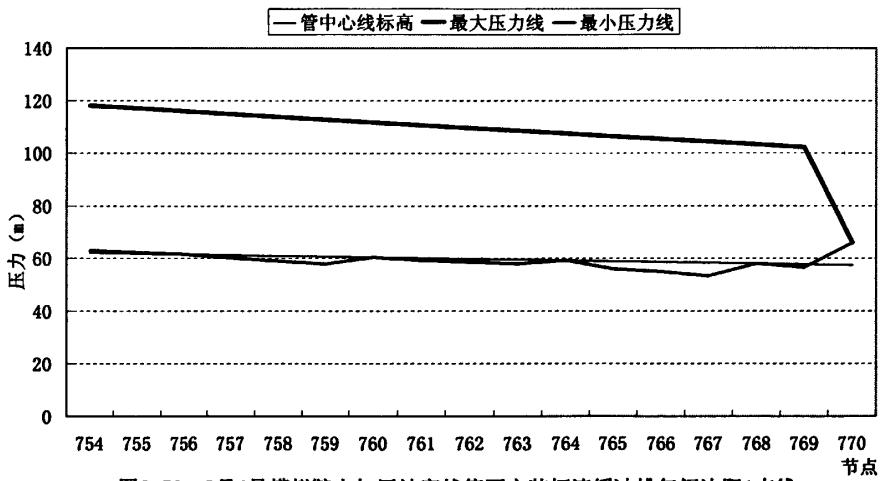


图6.50 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵安装恒速缓冲排气阀沈阳1支线

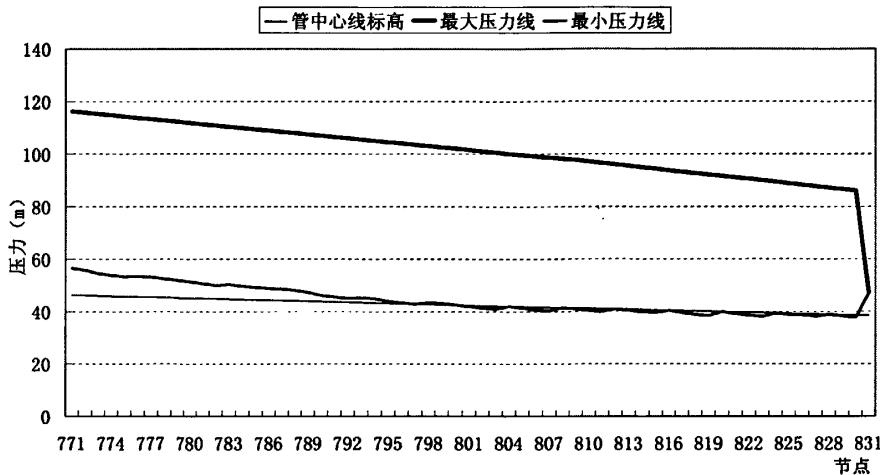


图6.51 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵安装恒速缓冲排气阀沈阳2支线

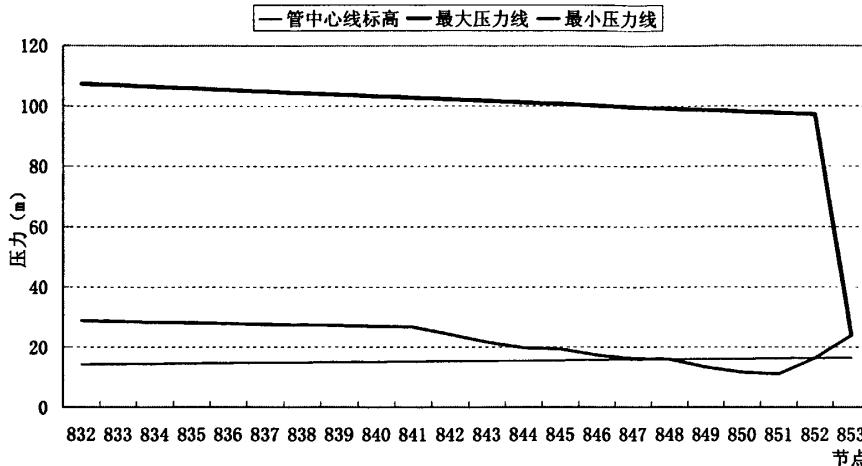


图6.52 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵安装恒速缓冲排气阀辽阳支线

由图 6.48 至 6.52 可知：当管道上只安装恒速缓冲排气阀，鞍山加压泵站前 300s 关阀，全线未发生断流，主干管及各支线压力较只安装普通排气阀显著下降，在离水库 14.8km 至 30.6km 处主干管压力超过管路设计内水压力，在离水库 30.6km 至鞍山加压泵站前阀门处的主干管上压力超过管路校核内水压力，此段管线将发生爆管。抚顺支线和沈阳 1 支线压力均上升，但未超过管路设计内水压力，沈阳 2 支线和辽阳支线压力上升且均超过管路校核内水压力。综上所述，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路只安装缓冲排气阀的情况下，管道安全不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

4. 鞍山加压泵站前关阀且全管线上安装普通排气阀+超压泄压阀（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个普通排气阀，且在桩号 6+300, 45+550, 77+960, 100+496, 140+000 处各安装了一个超压泄压阀，鞍山加压泵站前 300s 关阀，计算结果见图 6.53 至 6.57。

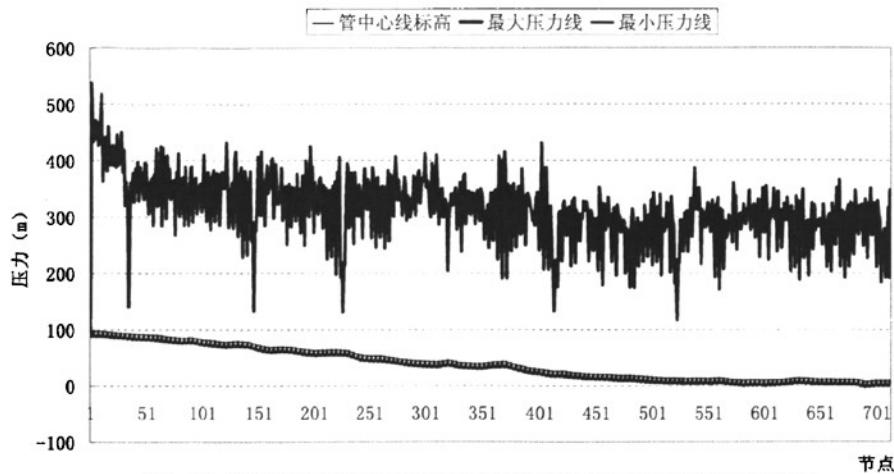


图6.53 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+超压泄压阀主管线

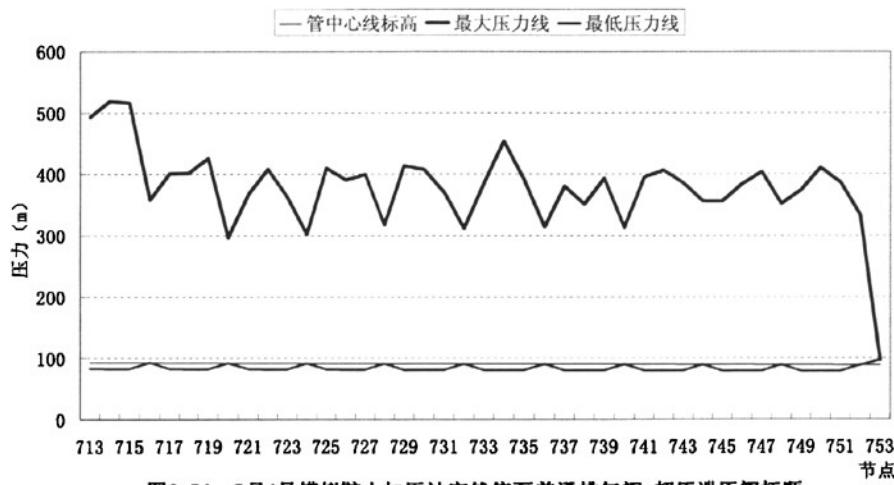


图6.54 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+超压泄压阀抚顺

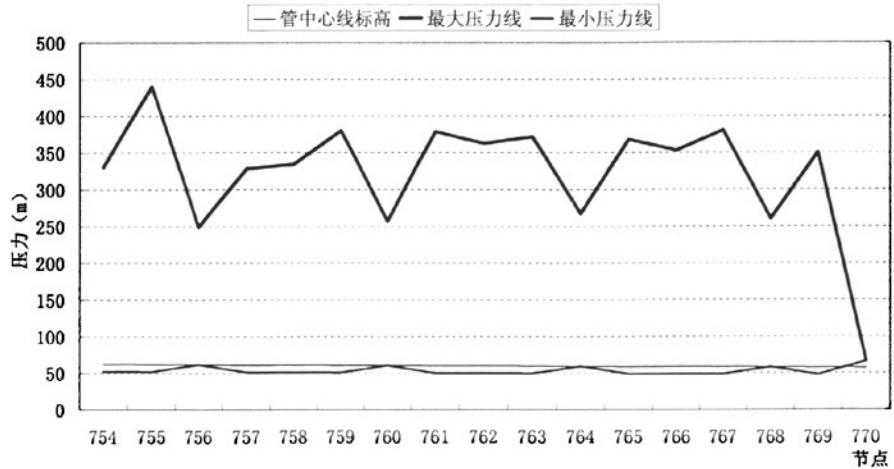


图6.55 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+超压泄压阀沈阳1

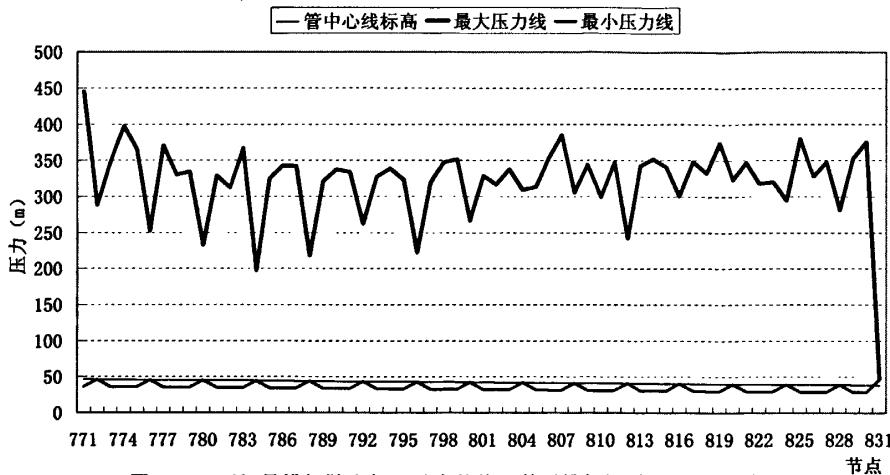


图6.56 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+超压泄压阀沈阳2

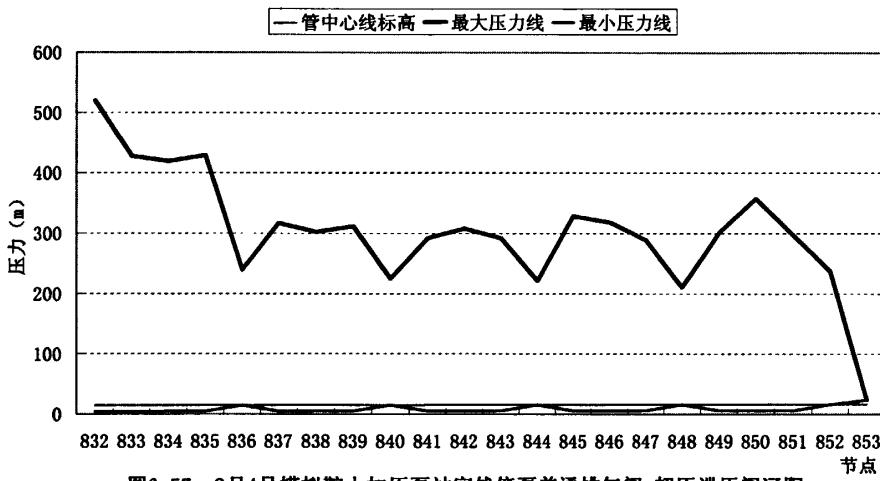


图6.57 2月4号模拟鞍山加压泵站突然停泵普通排气阀+超压泄压阀辽阳

由图 6.53 至 6.57 可知：当管道上安装普通排气阀和超压泄压阀，鞍山加压泵站前 300s 关阀时，全线发生断流，超压泄压阀只能将该点的压力降到安全值，主干管及各支线压力升高且均超过管路校核内水压力，全线将爆管。综上所述，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路安装普通排气阀和超压泄压阀的情况下，管路安全不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

5.鞍山加压泵站前关阀且全管线上安装恒速缓冲排气阀+超压泄压阀（关阀历时为300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀，且在桩号 6+300, 45+550, 77+960, 100+496, 140+000 处各安装了一个超压泄压阀，鞍山加压泵站前 300s 关阀，计算结果见图 6.58 至 6.62。

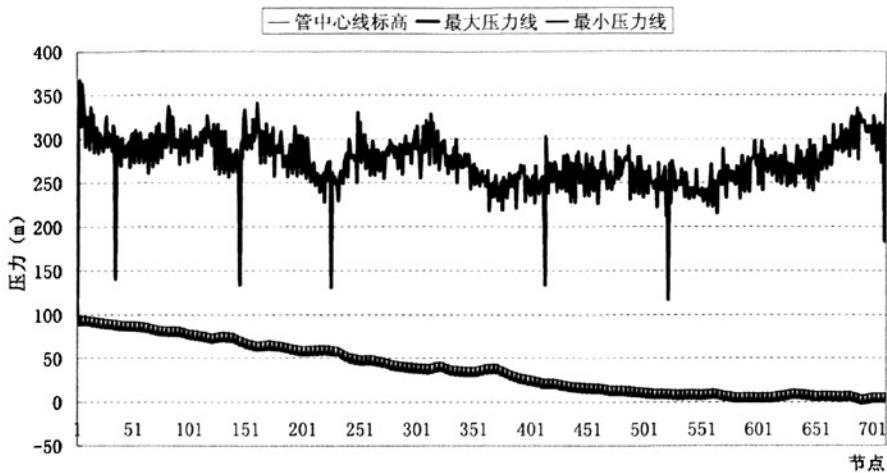


图6.58 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+超压泄压阀主管线

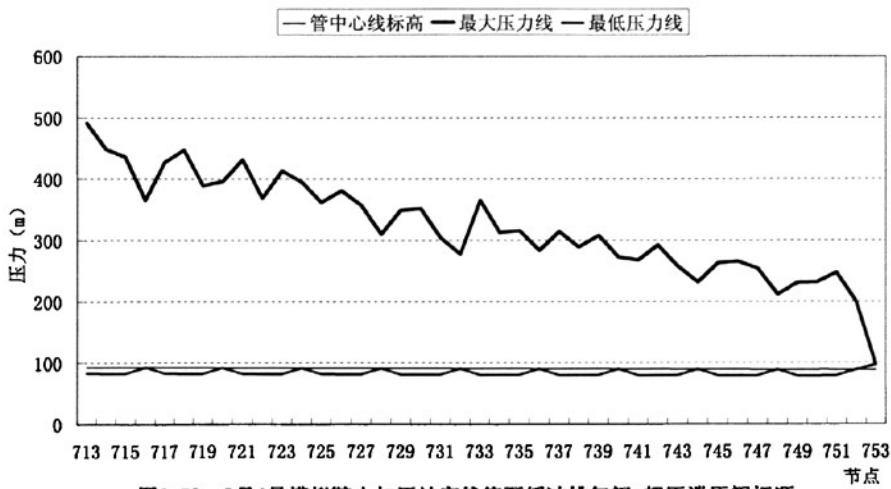


图6.59 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+超压泄压阀抚顺

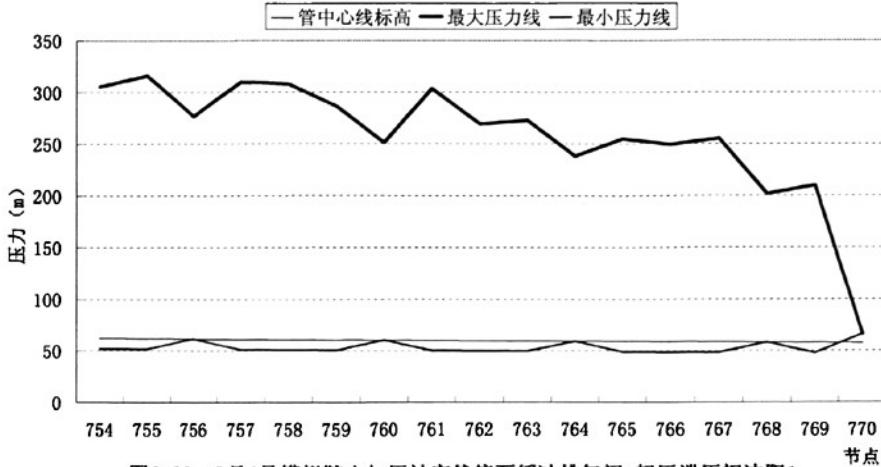


图6.60 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+超压泄压阀沈阳1

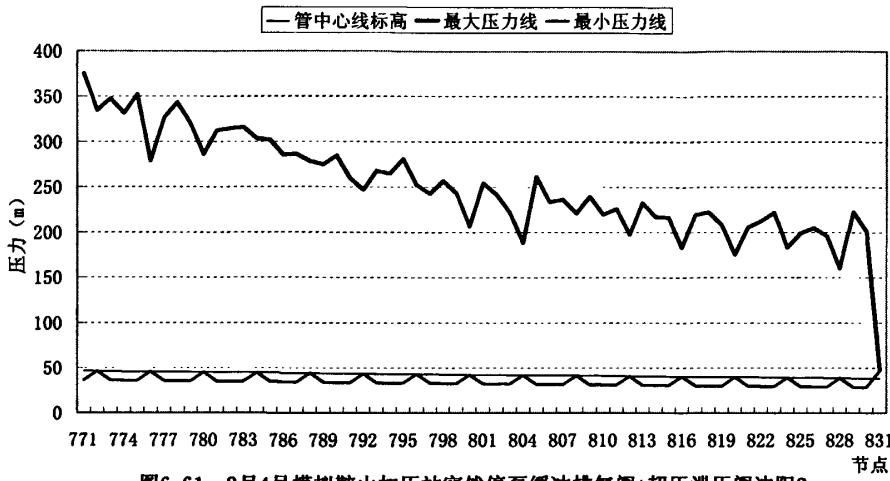


图6.61 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+超压泄压阀沈阳2

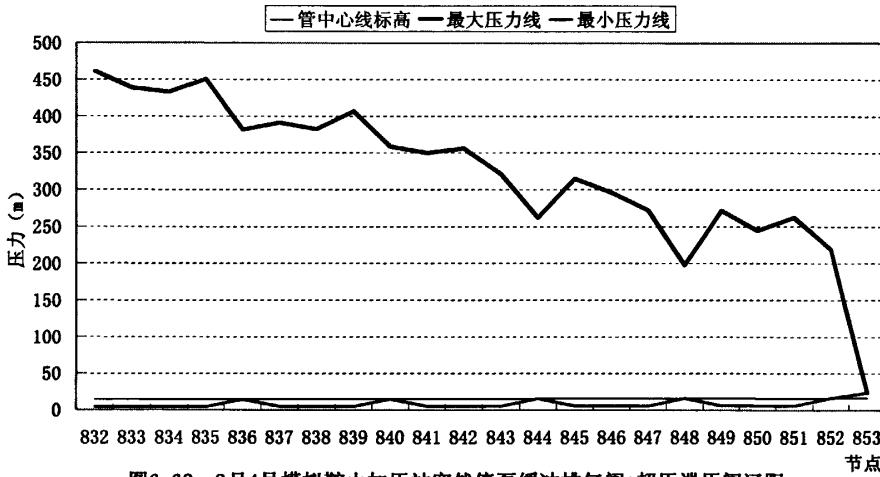


图6.62 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+超压泄压阀辽阳

由图 6.58 至 6.62 可知：当管道上安装恒速缓冲排气阀和超压泄压阀，鞍山加压泵站前 300s 关阀时，压力上升情况和安装普通排气阀+超压泄压阀相似，只是压力值相对低，但超过了管路校核内水压力，故管道也将发生爆管。综上所述鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路安装恒速缓冲排气阀和超压泄压阀的情况下，管路安全不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

6.鞍山加压泵站前关阀且全管线上安装普通排气阀+普通调压塔（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个普通排气阀，且在桩号 6+300, 45+550, 77+960, 100+496, 140+000 处各安装了一个普通调压塔，鞍山加压泵站前 300s 关阀，计算结果见图 6.63 至 6.67。

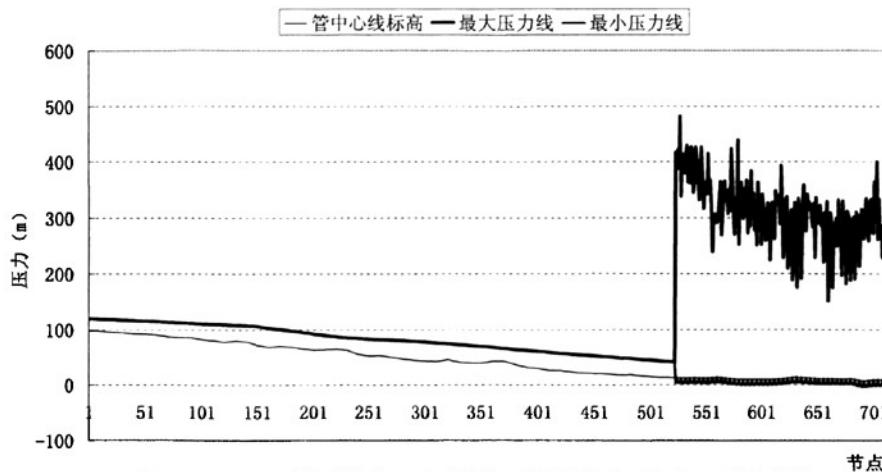


图6.63 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+普通调压塔主管线

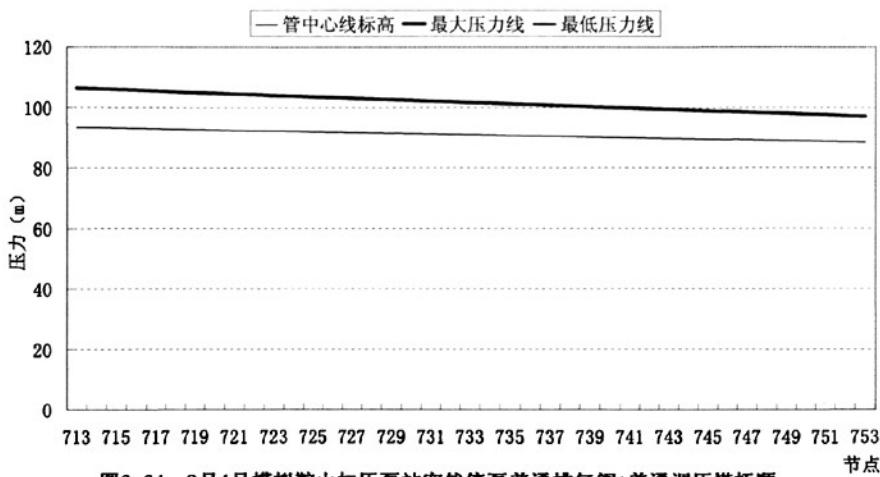


图6.64 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+普通调压塔抚顺

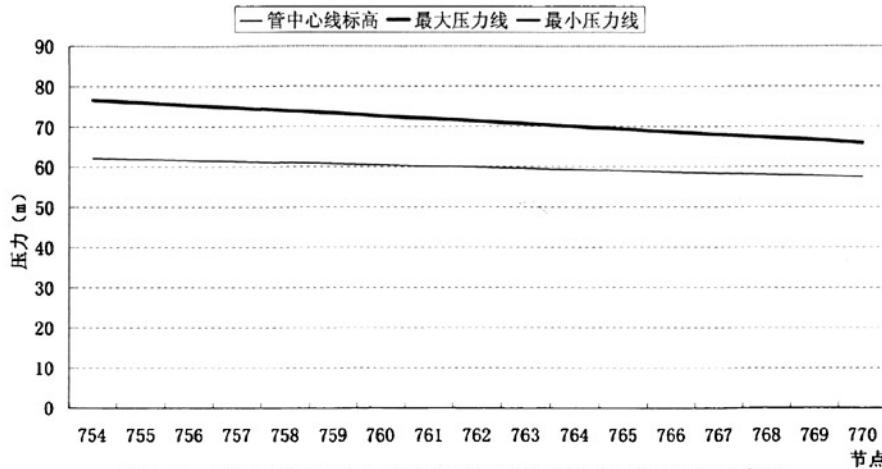


图6.65 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+普通调压塔沈阳1

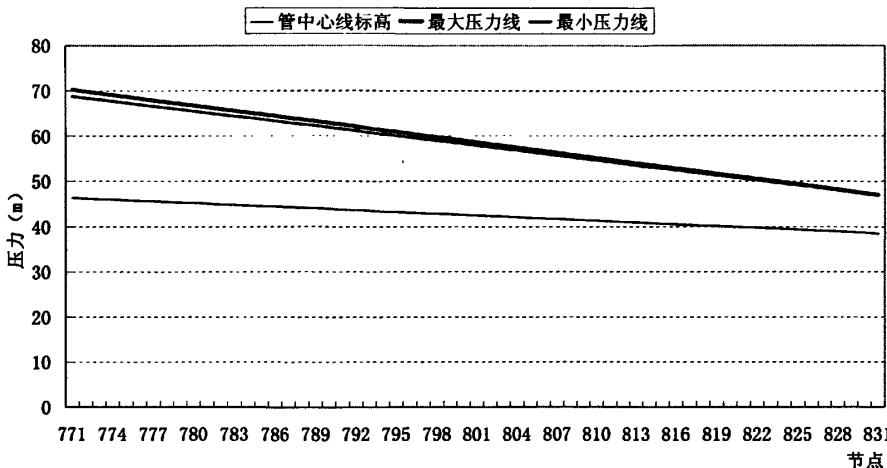


图6.66 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+普通调压塔沈阳2

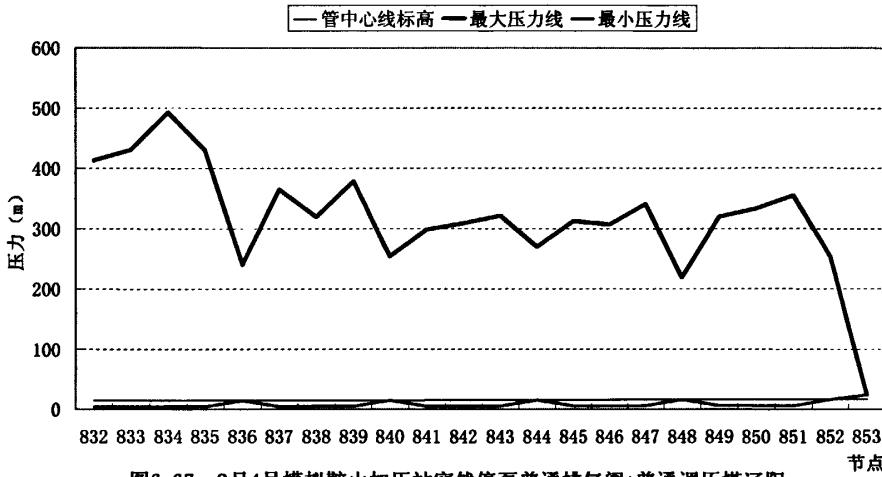


图6.67 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+普通调压塔辽阳

由图 6.63 至 6.67 可知：当管道上安装普通排气阀和普通调压塔，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在 5#普通调压塔之前主干管压力均未超过管路设计内水压力，且还有富余，但在 5#普通调压塔之后主干管超过管路校核内水压力，且发生断流，管路将发生爆管。抚顺支线，沈阳 1 支线和沈阳 2 支线压力变化不大，管道内压力均未超过管路设计内水压力，且还有富余。由于 5#普通调压塔安装在辽阳支线之前，所以辽阳支线压力上升明显，且发生断流，管道内压力超过管路校核内水压力，管道将发生爆管。综上所述，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路安装普通排气阀和普通调压塔的情况下，管路安全不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

7.鞍山加压泵站前关阀且全管线上安装恒速缓冲排气阀+普通调压塔（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀，且在桩号 6+300, 45+550, 77+960, 100+496, 140+000 处各安装了一个普通调压塔，鞍山加压泵站前 300s 关阀，计算结果见图 6.68 至 6.72。

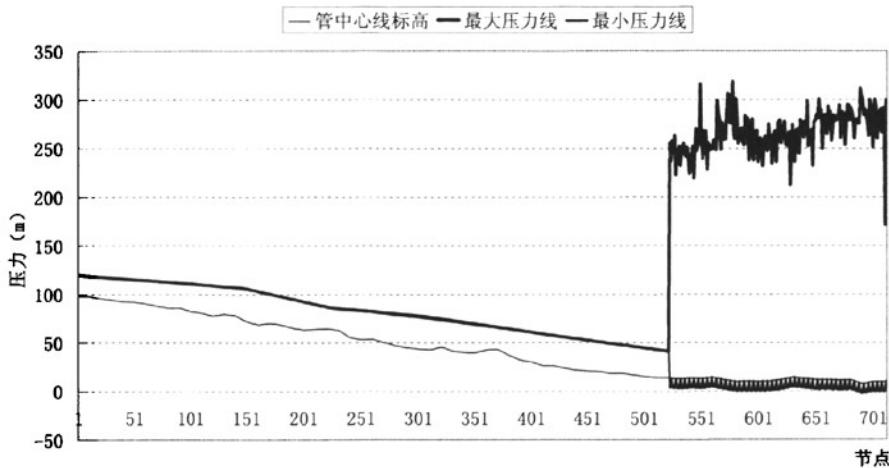


图6.68 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔主管线

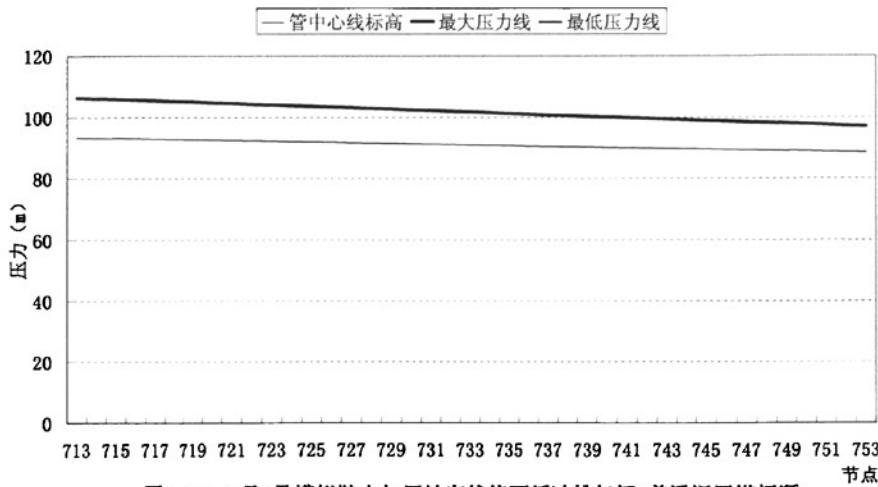


图6.69 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔抚顺

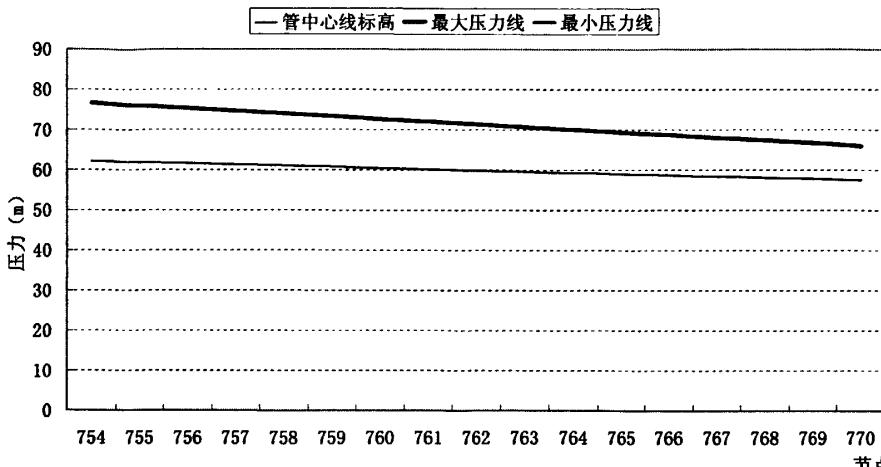


图6.70 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔沈阳1

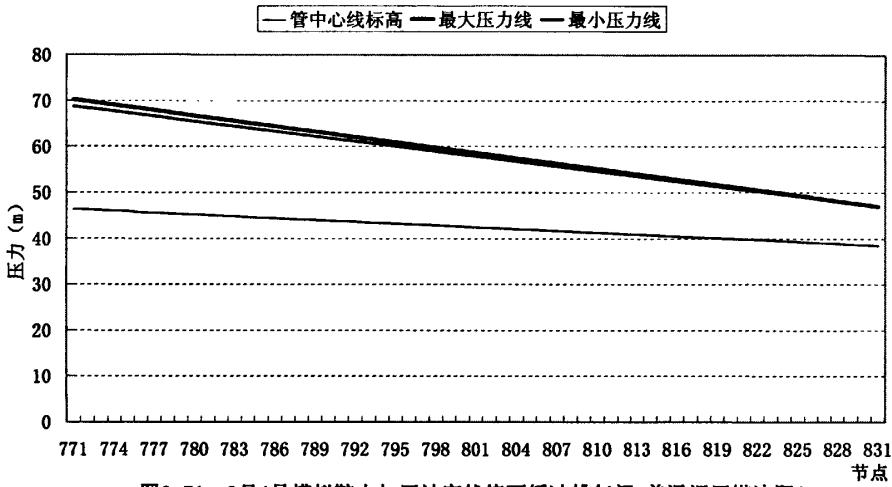


图6.71 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔沈阳2

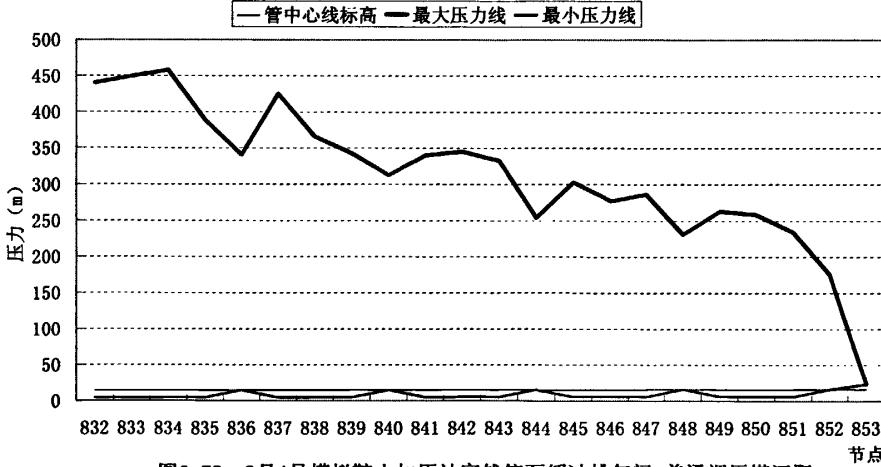


图6.72 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔辽阳

由图 6.68 至 6.72 可知：当管道上安装恒速缓冲排气阀和普通调压塔，鞍山加压泵站前 300s 关阀，管道压力上升情况和安装普通排气阀和普通调压塔相似，只是最大压力值相对低，但超过了管路校核内水压力，故管道也将发生爆管。综上所述，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路安装恒速缓冲排气阀和普通调压塔的情况下，管路安全不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

如果在鞍山加压泵站前多设一座普通调压塔（计算结果见图 6.73 至 6.77），那么主管和各支管压力均降低到管路设计内水压力，且有相当的富余。所以在保持原来普通调压塔的位置不变的情况下，在鞍山加压泵站前多设一座普通调压塔就可以保证管路安全。

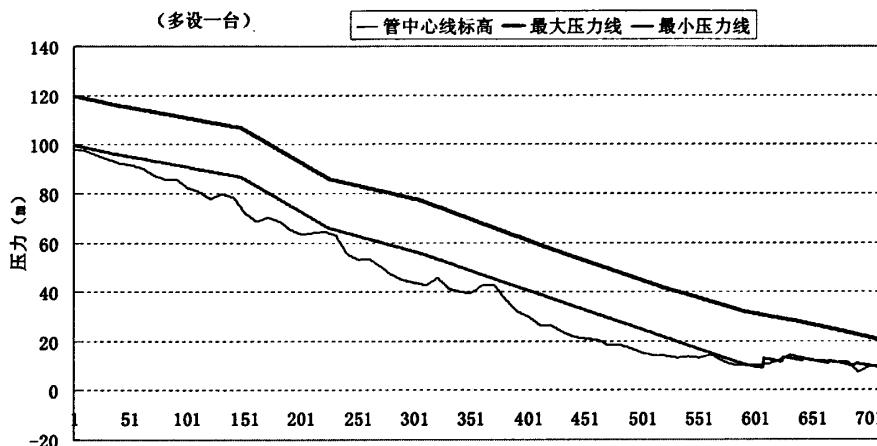


图6.73 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔主管线

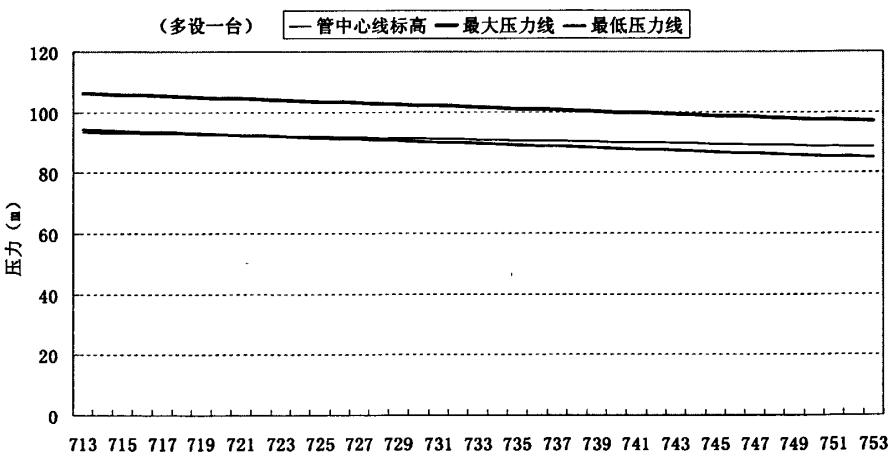


图6.74 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔抚顺

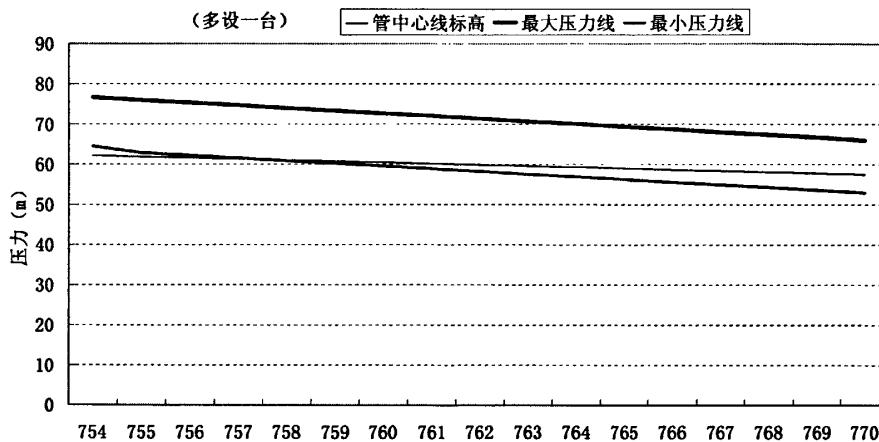


图6.75 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔沈阳1

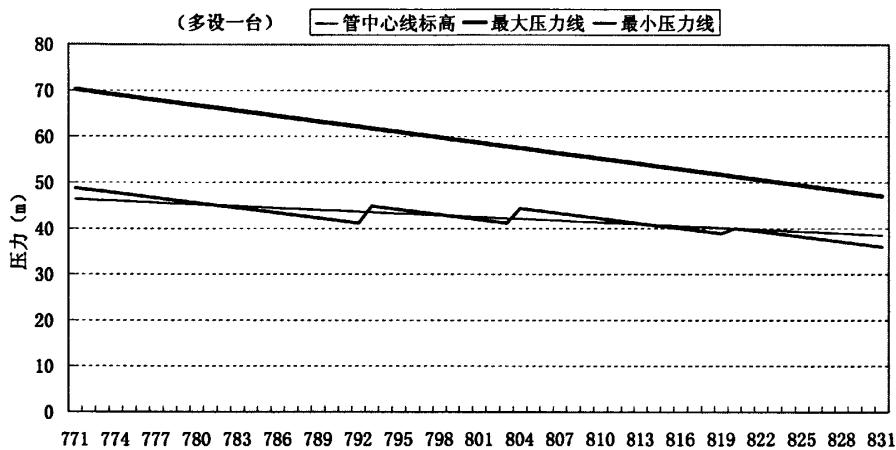


图6.76 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔沈阳2

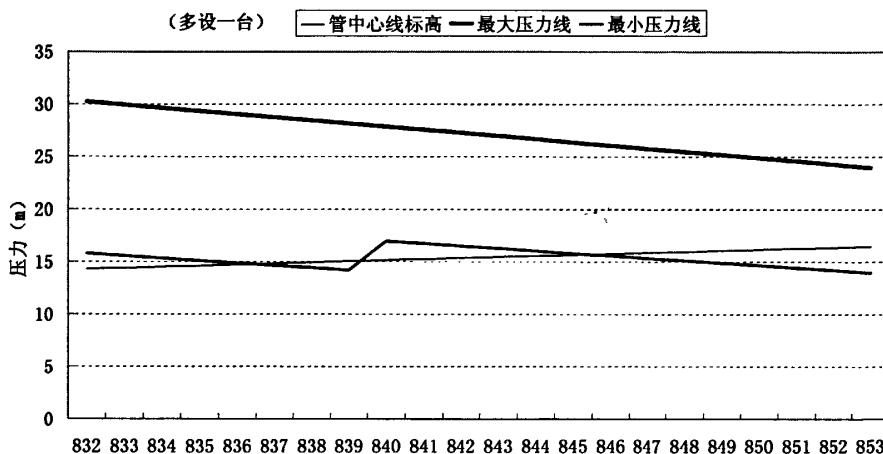


图6.77 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+普通调压塔辽阳

8.鞍山加压泵站前关阀且全管线上安装普通排气阀+箱式调压塔（关阀历时为300s）
在鞍山加压泵站上游段管线上每隔800m安装一个普通排气阀，且在桩号6+300，
45+550，77+960，100+496，140+000处各安装了一个箱式调压塔，鞍山加压泵站前300s
关阀，计算结果见图6.78至6.82。

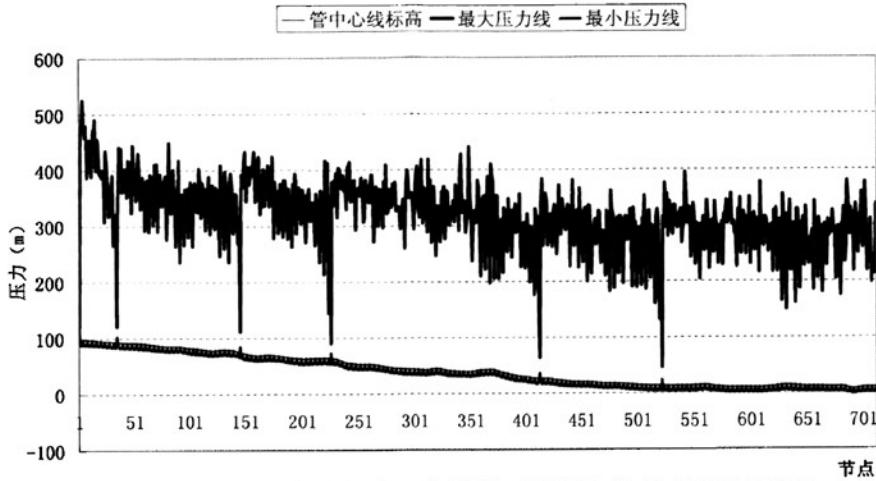


图6.78 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+箱式调压塔主管线

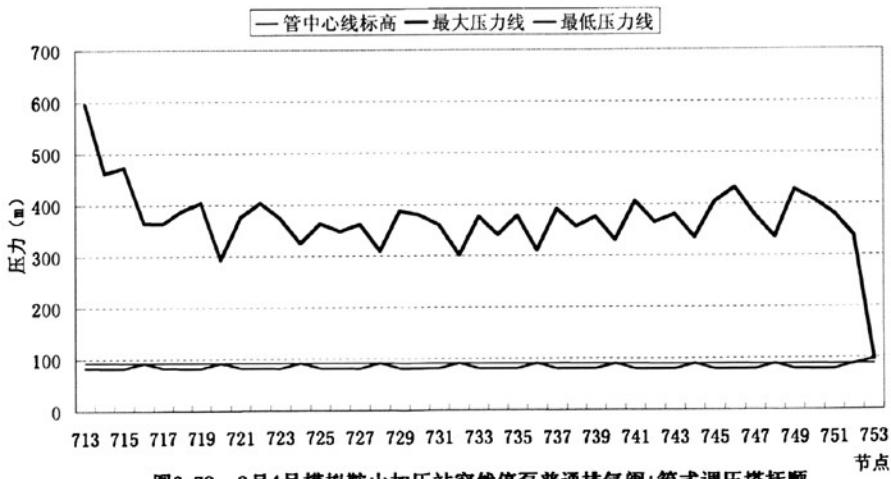


图6.79 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+箱式调压塔抚顺

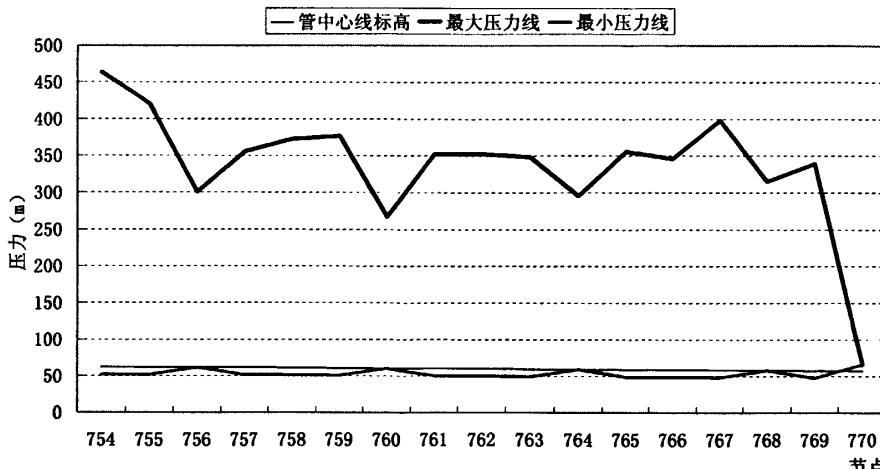


图6.80 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+箱式调压塔沈阳1

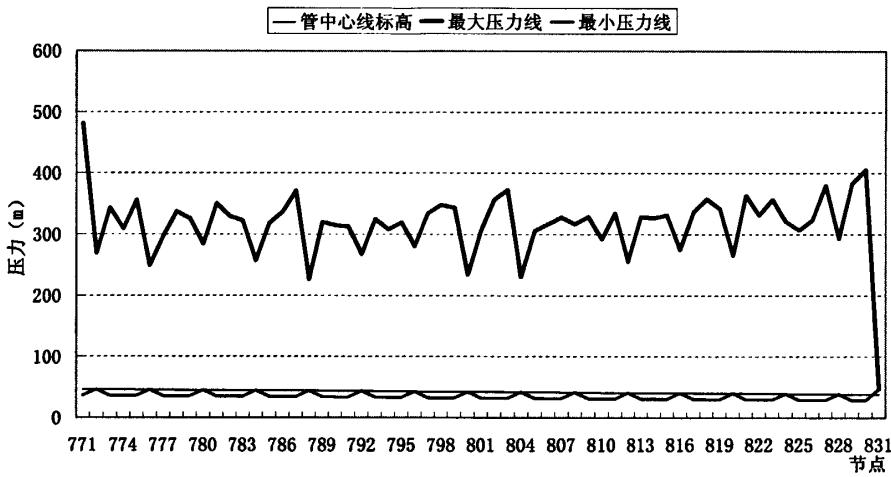


图6.81 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+箱式调压塔沈阳2

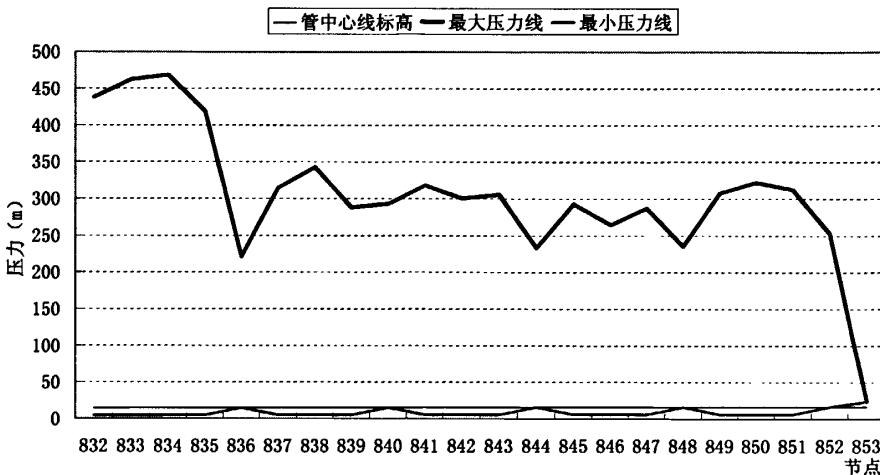


图6.82 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵普通排气阀+箱式调压塔辽阳

由图 6.78 至 6.82 可知：当管道上安装普通排气阀和箱式调压塔，鞍山加压泵站前 300s 关阀，全线将发生断流，压力上升显著，全线将发生爆管。综上所述，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路安装普通排气阀和箱式调压塔的情况下，管路安全不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

9.鞍山加压泵站前关阀且全管线上安装恒速缓冲排气阀+箱式调压塔（关阀历时为 300s）

在鞍山加压泵站上游段管线上每隔 800m 安装一个恒速缓冲排气阀，且在桩号 6+300, 45+550, 77+960, 100+496, 140+000 处各安装了一个箱式调压塔，鞍山加压泵站前 300s 关阀，计算结果见图 6.83 至 6.87。

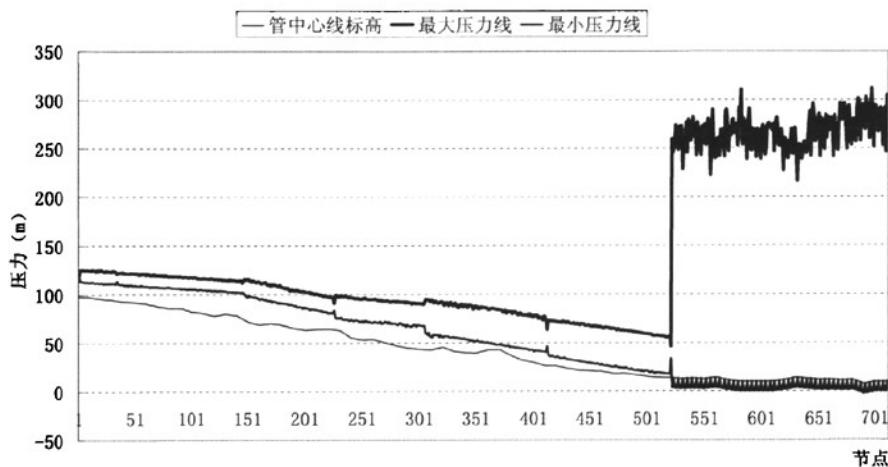


图6.83 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔主管线

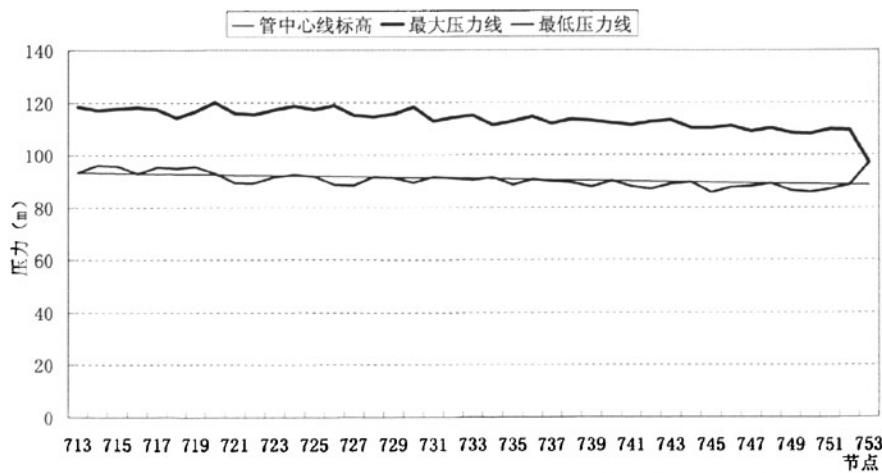


图6.84 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔抚顺

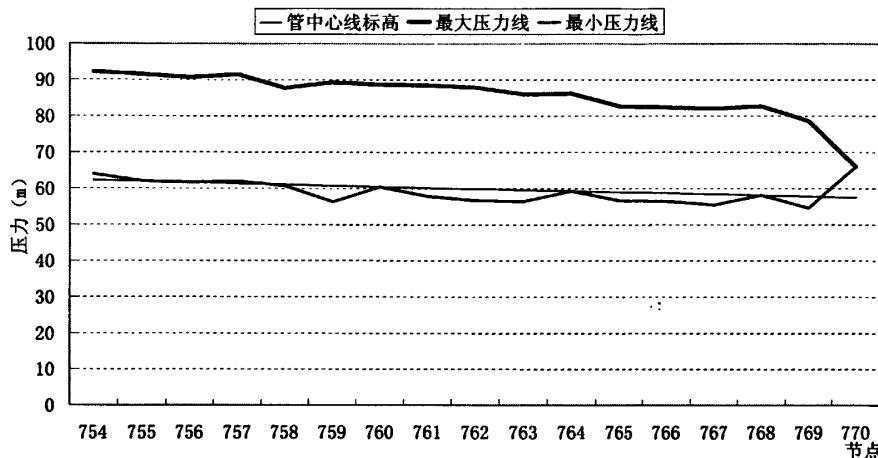


图6.85 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔沈阳1

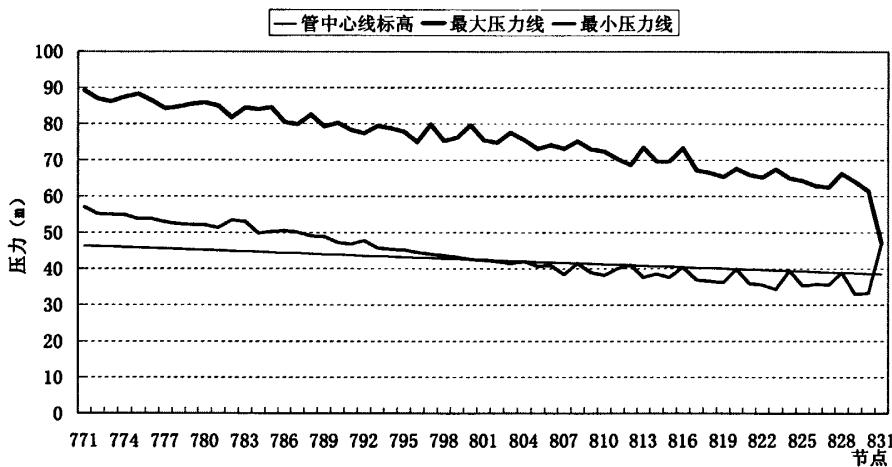


图6.86 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔沈阳2

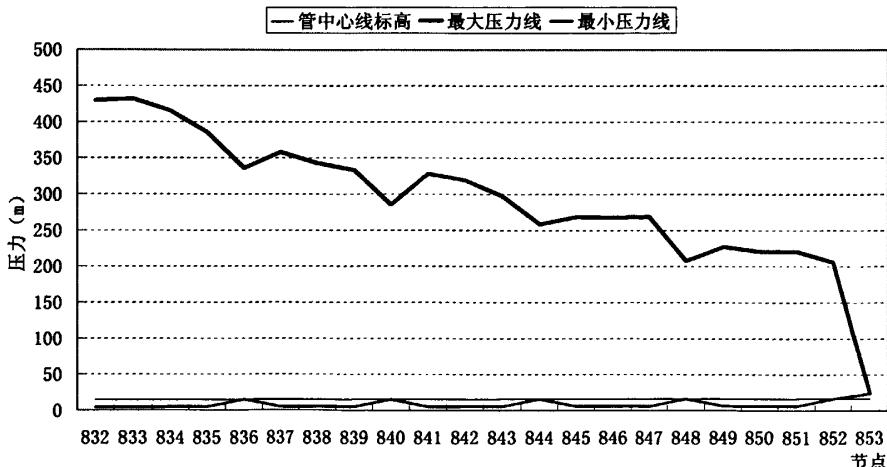


图6.87 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔辽阳

由图 6.83 至 6.87 可知：当管道上安装恒速缓冲排气阀和箱式调压塔，鞍山加压泵站前 300s 关阀，管道内压力上升情况和安装恒速缓冲排气阀和普通调压塔情况相似，管路内压力超过管路校核内水压力，管道将发生爆管。综上所述，鞍山加压泵站前 300s 关阀，在管路安装恒速缓冲排气阀和箱式调压塔的情况下，管路安全不能保证，管道将发生爆管，对下游供水造成较大影响。

如果在鞍山加压泵站前多设一座箱式调压塔（计算结果见图 6.88 至 6.92），那么主管和各支管压力均降低到管路设计内水压力，且有相当的富余。所以在保持原来箱式调压塔位置不变的情况下，在鞍山加压泵站前多设一座箱式调压塔就可以保证管路安全。

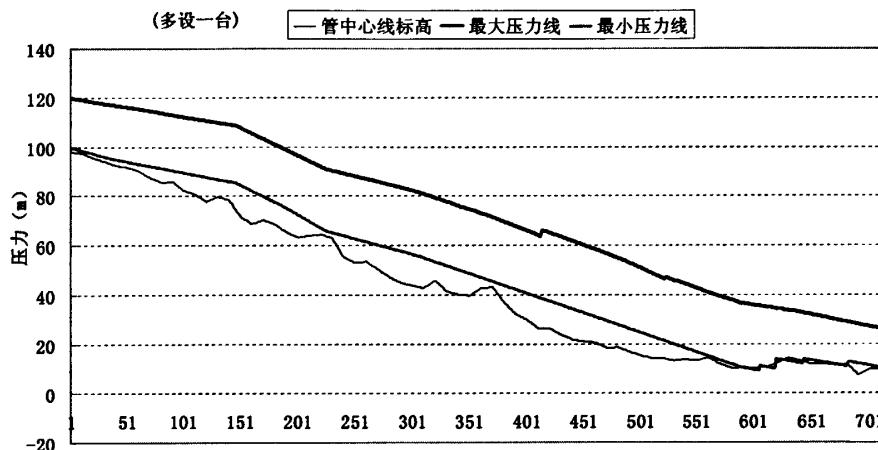


图6.88 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔主管线

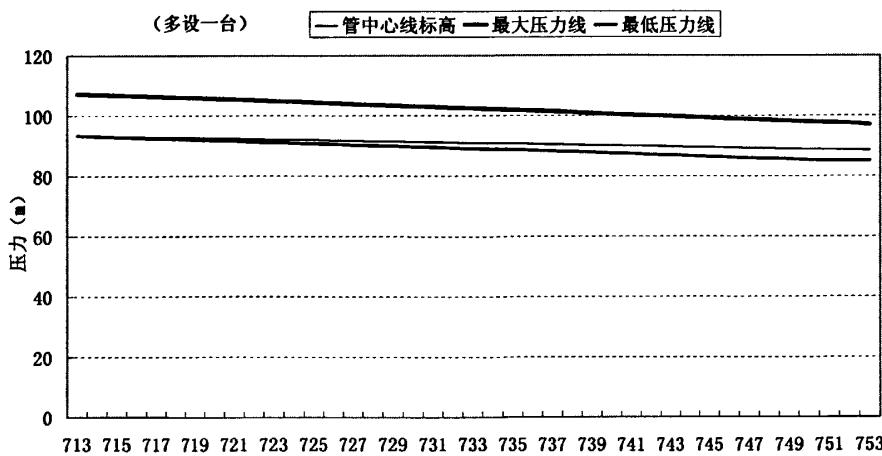


图6.89 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔抚顺

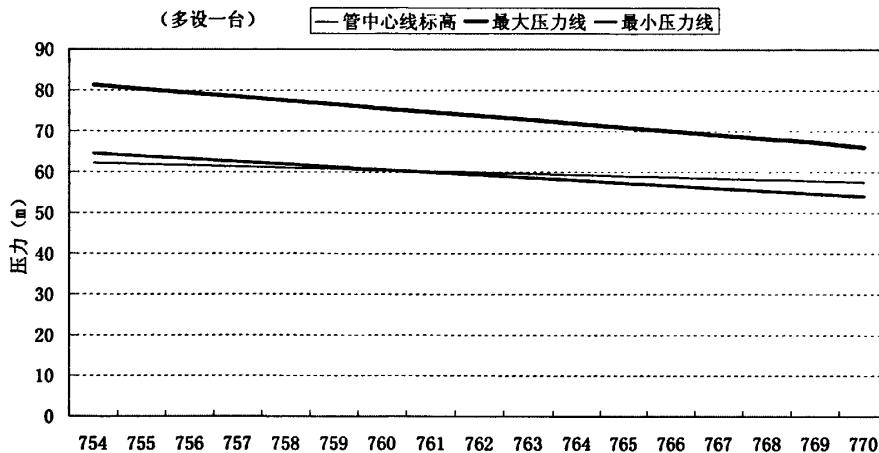


图6.90 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔沈阳1

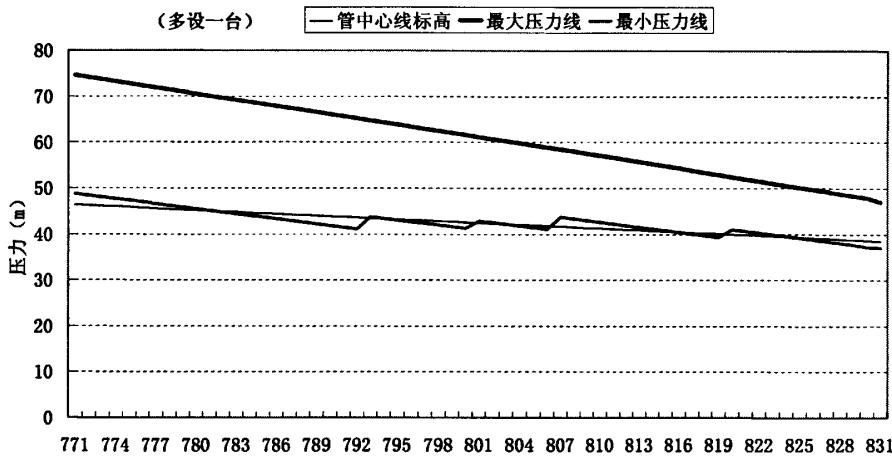


图6.91 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔沈阳2

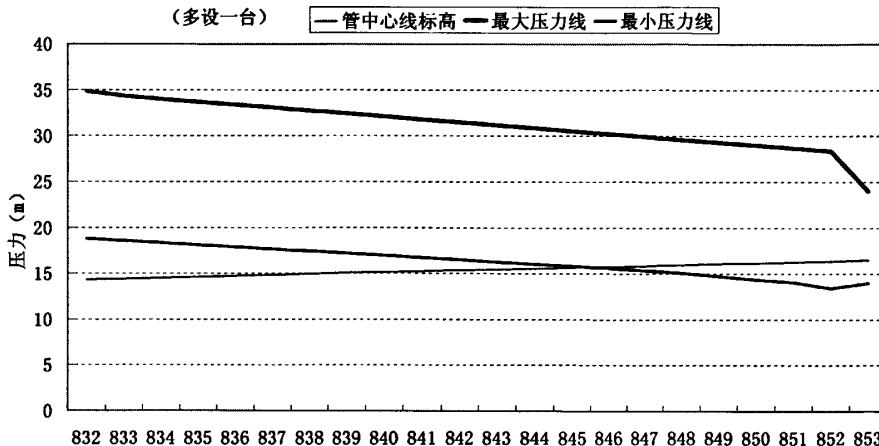


图6.92 2月4号模拟鞍山加压站突然停泵缓冲排气阀+箱式调压塔辽阳

6.2.4 小结

综上所述在模拟鞍山加压泵站突然停泵的情况下时，管路压力升高，且发生断流，在不安装任何防水锤设备的情况下，管道将发生爆管。为防止供水系统在其他意外的情况下发生断流和放空检修后冲水排气的需要，在输水管道的适当位置设置恒速缓冲排气阀是保证输水管线安全、经济运行的一种有效方法。在比较了鞍山加压泵站上游段每隔800m 安装一个普通排气阀和安装恒速缓冲排气阀的情况下，安装恒速缓冲排气阀的情况要优于安装普通排气阀。另外在综合比较了几种方案后，在原有的箱式调压塔位置不变的情况下，在鞍山加压泵站前多设一个箱式调压塔，且管道上安装恒速缓冲排气阀的方案和在原有的普通调压塔位置不变的情况下，在鞍山加压泵站前多设一个普通调压塔，且管道上安装恒速缓冲排气阀的方案对管道安全最有利，但由于该工程位于东北地区，气候寒冷，普通调压塔太高，保温工作不好做，在不动作的时候塔内水可能被冻住，当压力变化时，起不到作用。箱式调压塔在高度上比普通调压塔低，保温工作比较普通调压塔容易实行，在管路安全方面起到的作用和普通调压塔一样，故在模拟鞍山加压泵站突然停泵的工况下，在原有的箱式调压塔位置不变的情况下，在鞍山加压泵站前多设一个箱式调压塔，且管道上安装恒速缓冲排气阀的方案对管道安全最有利。

结论与建议

长距离大型区域重力流输水系统中水锤防护的研究成果

本文根据水锤防护的基本理论以及辽宁省大伙房水库输水工程的管道特点，进行模拟计算，经过结果分析，总结出长距离重力流输水工程水锤防护的主要措施有恒速缓冲排气阀、箱式调压塔，并推荐将这类防护措施综合运用到长距离大型区域重力流输水系统中，可以达到很好的防水锤效果。

1. 长距离大型区域重力流输水系统存在气、水两相间的六种流态，而且六种流态最终转化为段塞流。且通过实例证明了管道中含气对管道水锤防护具有重大影响，水锤防护的重点是预防多处断流弥合水锤。

2. 仅多处用真空破坏阀即快速注气不排气缓冲的方式防护断流弥合水锤效果是不理想的。

3. 普通浮球式排气阀无论是在正常运行时还是在发生水锤时都是不适用的。在通水和正常运行时，由于浮球式排气阀的结构缺陷，无法满足管道顺畅排气的要求；发生水锤时，虽可以大量进气，但水柱弥合时，排气阀突然起球会引发二次水锤。

4. 采用快速注气恒速缓冲排气的方式消减多处断流弥合水锤效果显著，再结合其它先进的防护措施，既有效又经济。由于排气阀是长距离输水管道工程的必选设备，提出了应将具有快速注气、恒速缓冲排气功能的排气阀作为管道断流弥合水锤的基本防护措施。

5. 箱式双向调压塔在水锤防护性能上几乎完全等同于普通双向调压塔，对长距离大型区域重力流输水系统具有很好的水锤防护效果，并且其高度大幅度降低，克服了普通双向调压塔建造难、维护难和造价高等缺点，提高了其使用范围，具有很好的实际应用意义并带来很大的经济效益。

6. 通过计算分析得出，仅采用单一的水锤防护措施是很难奏效的，必须同时采取多种水锤防护措施对管道进行综合防护。选择合理有效的水锤防护措施，对管道的安全稳定运行至关重要，实际工程需要通过制电算程序，水锤计算数值模拟来选择水锤综合防护措施。

建议

由于当今计算机技术的不断发展，利用计算机来对水力过渡过程及水工建筑物中的

水流状态进行模拟是当前发展起来的新方法，它可以通过大量快速计算在短时间内得出大量的较为准确的数据，为工程的设计和施工提供科学的理论依据；对供水工程进行水力过渡过程的计算机数值模拟，不但缩短了工程设计的时间周期，优化了重力输水管道运行的方案，大大降低了用于试验的经费，而且还可为供水工程的安全运行和经济运行提供技术依据，但在模拟计算中经常遇见一些难以跨越的技术难题，还有如何更有效地提高计算精度，还需要进行许多艰苦的工作。

1. 目前，重力流研究的大量工作都侧重于理论研究，而缺乏实际工程实践。对于实际工程中阀门在非恒定流的阻力系数、末端阀门的实际操作过程缺乏实测数据，这些都有待进一步研究。

2. 长距离输水研究的工程规模一般比较大，模拟实验难度较大，如果条件可能的话，小比例的实际工程模拟实验有待实现。

3. 在实际工程中，因排气阀排气不净是造成管道升压爆管的一个重要原因，本文在气囊运动气升压方面也做出了一些探讨，但气囊在管道中的运动模式、升压机理还有模型的建立这些方面目前研究还很少，尤其可解决工程气爆问题方面的论述更少。需要在这方面做更深入的研究。

4. 目前在长距离输水工程中进行水锤分析，多运用特征线法进行水力过渡分析，但在特征线法研究时做了一些简化，不考虑管线坡度等影响，运动方程中的阻力损失系数采用的是恒定流的阻力系数，这与实际是不符合的。有关试验表明，非恒定流的阻力损失与流动状态的变化速率(或频率)有关。目前这方面的研究工作还正在进行，今后可以尝试采用告诫摩阻法或者其它更合理、更符合实际的方法进行。

5. 各种设备计算机模型建立的合理性和精确性是计算机模拟基础条件之一，而由于水力设备的多样性使得模型的建立具有很大难度，而设备的水模型的建立除了在研究上提出更合理的假设外，还必须以实验加以验证，而目前国内在此方面发表的论人及研究相对较少，存在着很多不足，但这却是长距离水力过渡过程分析能否做到准确的必要条件之一。

6. 目前运用计算机进行水锤计算时，阀门边界条件都进行了相关假设，这就需要研究人员对不同阀门的参数，计算公式进行推导，使编程计算的结果更精确，更符合实际工况。

参考文献

- [1] 刘静. 观察与思考[EB/OL],
http://www.zj.xinhuanet.com/magazine/2007-08/17/content_10892070.htm,
2007-08-17/2009-03-02
- [2] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华等. 停泵水锤及防护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004年11月第二版, 1, 66-70
- [3] 邓华. 管路中水柱分离[D]. 武汉: 原武汉水力学院, 1988
- [4] 徐军, 梯级电站引水系统水力过渡过程研究[D], 北京, 国家图书馆, 2002.4
- [5] M. Hanif Chaudhry. Applied Hydraulic Transients[J]. British Columbia Hydroand Power Authority Vancouver. British Columbia, Canada, 1979
- [6] Resal H. Note sur les petits mouvements d'un fluide incompressible dans un tuyau élastique[J]. Journal de Mathématiques Pures et Appliquées, 1876, rd Series, 2: 342-344
- [7] Menabrea L F. Note sur les effets de choc de l'eau dans les conduits[J]. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Academie des Sciences, France, 1858, 47: 221-224
- [8] 丁浩. 水电站压力引水系统非恒定流[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986
- [9] Frizell J P. Pressure Resulting from Changes of Velocity of Water in Pipes[J]. Trans. Amer. Soc. Civil Engrs., 1898, 39: 1-18
- [10] Joukowski N E. Mem. Imperial Academy Soc. of St. Petersburg, 1898, 9(5)(in Russian translated by O. Simin, Proc. Amer. Water works Assoc. 1904, 24:341-342)
- [11] Allievi L. Teoria general del moto perturbato dell'acqua nei tubi in pressione. [J] Ann. Soc. Ing. Arch. Italiana, 1903
- [12] Augus R W. Waterhammer Pressure in Compound and Branched Pipes[J]. Proc. Amer. Soc. Mech. Engrs., 1938. 340-401
- [13] Streeter V. L. Transient Cavitating Pipe Flow[J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(HY11): 1408-1423
- [14] Streeter V. L. Water hammer Analysis[J]. ASCE Journal of the Hydraulics Division, 1969, 95(HY6): 1959-1972
- [15] E. B. Wylie, V. L. Streeter. Fluid Transients[M]. McGraw-Hill International Book Company, 1978
- [16] [日]秋元德三著. 水击与压力波动[M]. 支陪法等译. 北京: 电力工业出版社, 1981
- [17] 曹广学. 高扬程泵站压力管路安全防护的计算机数值模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2005
- [18] 《伴有水柱分离的水力过渡过程》(*Hydraulic Transients With Water Column Separation*) 的综合报告书[R]. 国际水力工程研究协会 IAHR 下设的工作组 (1971—1991) 的综合报告, 2000 年 4 月 12 日出版, 马德里, 西班牙
- [19] 王树人, 刘天雄, 彭天玫. 水击理论与水击计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981, 1
- [20] [美]E.B.Wylie, V.L.Streeter 著. 瞬变流[M]. 清华大学流体传动与控制教研组译. 北京: 水利电力出版社, 1983

- [21] [加]M.H.Chaudhry 著. 实用水力过渡过程[M]. 陈家远, 孙诗杰, 张治滨译. 成都: 四川水力发电工程学会, 1985
- [22] 刘竹溪, 刘光临. 泵站水锤及其防护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988
- [23] 刘光临, 蒋劲等. 泵站水锤阀调节防护试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1991.12
- [24] 刘光临, 刘志勇, 王听全等. 单向调压塔水锤防护特性的研究[J]. 给水排水, 2002, 28(2), 82-85
- [25] 刘光临, 刘梅清, 冯卫民等. 采用单向调压塔防止长输水管道水柱分离的研究[J]. 北京: 水力学报, 2002, 9, 44-48
- [26] Wylie E B , Streeter V L , Suo Lisheng . Fluid transients in system [M] . Engle Wood Cliffs. Prentice-HallInc , 1993
- [27] 索丽生, 刘宇敏, 张建. 气垫调压室的体型优化计算[J]. 河海大学学报. 1998, No.11: 26~28
- [28] 王学芳, 叶宏开, 汤荣铭等. 工业管道中的水锤[M]. 北京: 科学出版社, 1995
- [29] 李明. 高扬程抽水站水锤防护措施—液控缓闭蝶阀选型[J]. 山西: 科技情报开发与经济, 1999.4: 30-31
- [30] 杨玉思. 全压高速排气阀[P]. 中国专利: 98113073, 2000-05-31
- [31] 于必录, 刘超, 杨晓东. 泵系统过渡过程分析与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993: 93-120
- [32] 蒋劲, 梁柱. 管路系统气液两相流瞬变流的矢通量分裂法[J]. 华中理工大学学报, 1997.3 :79-81
- [33] 杨开林, 董兴林. 水电站长输水管道气泡动力特性研究[J]. 水力学报, 1998.11 :11-14.
- [34] 郑源, 刘德有, 张健等. 有压输水管道系统气液两相流研究综述[J]. 河海大学学报(自然科 学版) , 2002.11
- [35] 孙兰凤. 空气阀在长管道供水系统水锤防护中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005
- [36] 金锥, 杨玉思. 两处水柱分离与断流空腔弥合水锤的研究[A]. 第三届中日流体机械国际学术会议. 大阪: 1990
- [37] 熊水应, 关兴旺, 金锥. 多处水柱分离与断流弥合水锤综合防护问题及设计实例(上)[J]. 给水排水, 2003, 29 (7), 1-5
- [38] 熊水应, 关兴旺, 金锥. 多处水柱分离与断流弥合水锤综合防护问题及设计实例(下)[J]. 给水排水, 2003, 29 (8), 1-6
- [39] 杨玉思, 金锥. 两处断流水锤的判断及升压计算方法[J]. 西北建筑工程学院学报, 1996, 4, 25-30
- [40] 杨玉思, 张世昌, 付林. 有压供水管道中气囊运动的危害与防护[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9), 32-33
- [41] 杨玉思, 美巨智, 王栋. 有压供水管道气水两相流流态及排气方式[J]. 中国给水排水, 2005, 21(12), 62-64

- [42] 杨玉思, 闫明. 消减断流弥合水锤及气囊运动升压的最佳方式[J]. 中国给水排水, 2006, 22(4), 44-47
- [43] 杨玉思, 辛亚娟. 管网爆管的水力因素分析及防爆技术探讨[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21), 61-63
- [44] 王其君等. 城市供水行业2010年技术进步发展规划及2020年远景目标[M]. 北京: 中国建工出版社. 2005.10, 611-612
- [45] 刘梅清, 孙兰凤, 周龙才等. 长管道泵系统中空气阀的水锤防护特性模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(5), 23-27
- [46] 杨晓东, 朱满林, 李郁侠. 装有进排气阀的长距离压力输水系统水锤计算研究[J]. 水利学报, 1998, 增刊, 60-64
- [47] 孔珑. 两相流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [48] 陈之航, 曹柏林, 赵在三. 企业两相流动和传热[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983
- [49] 周强泰. 两相流动和热交换[M]. 北京: 税利电力出版社, 1990
- [50] [美]柏实义.施宁光, 严家祥, 夏玉顺译. 二相流动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [51] Wallis G B. One-Dimensional two-phase flow[M]. New York: McGraw-Hill, 1969
- [52] Baker O. Simulations flow of oil as gas[J]. Oil and Gas, 1954, 53, 185-190
- [53] 徐济望. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京: 原子能出版社, 2001
- [54] 钟兴福, 张新宏, 李全红等. 气水两相流滑动比的实验研究[J]. 测井技术, 1998, 22(3), 156-158
- [55] 王文琪. 两相流动[M]. 北京: 水利电力出版, 1989
- [56] 连桂森. 多相流动基础[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989
- [57] Lockhart R W, Martinelli R C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes[J]. Chem Engng Progress, 1949, 45, 39-48
- [58] Martinelli R C, Nelson D B. Predication of pressure drop during forced circulation of water[J]. Trans ASME, 1948, 70, 695-702
- [59] Weisman J, Kang S Y. Flow pattern transitions in vertical and upward inclined pipes[J]. Int J Multiphase Flow, 1981, 7, 271-291
- [60] CECS 193:2005. 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006
- [61] 钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004
- [62] 胡或, 闫宏印. VB程序设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [63] 陈俊源. Visual Basic 6.x 程序设计(SQL Server应用集成篇), 北京: 中国铁道出版社, 2001
- [64] 上海保一阀门制造有限公司, DXTK41H 蓄能罐式液控缓闭蝶阀产品使用说明书, 上海
- [65] 杨福记, 冯庆昌. 重力流输水在陆川县西山供水工程中的应用[J]. 广西水利水电, 2003(1):76-79
- [66] 陈涌城, 张洪岩. 长距离输水工程有关技术问题的探讨[J]. 城市给排水, 2002, 28(2)

- [67] 肖文渊.长距离大口径输水管道综合式消能井结构技术研究[D].2003:12
- [68] 西安济源水用设备公司, QSP10 (16、25)全压高速排气阀产品使用说明书, 西安
- [69] 惠春莉, 段军孝, 高稳生等.减压恒压阀及水锤预防阀在供水工程中的应用, 地下水, 2002,
24 (4): 228-229

攻读学位期间取得的研究成果

攻读硕士学位期间参与的课题与实践

1. 参加的科研与实验项目

- (1) 参与专利产品箱式调压塔的设备运行测试，准备鉴定材料编写水锤防护程序等；（结合辽宁大伙房水库长距离输水工程）
- (2) 参与一体化净水装置的研发测试；（已成功运行）

2. 完成的长距离输水工程水力分析计算项目

- (1) 辽宁大伙房水库长距离输水工程鞍山加压站上游段水力分析计算；
- (2) 咸阳市石头河水库输水管道优化计算；
- (3) 唐山曹妃甸工业区长距离输水管水锤防护方案的计算分析；

致 谢

首先衷心感谢我的导师杨玉思老师，在他悉心指导和严格要求下我完成了这篇论文。在选题、工作计划和研究大纲制定以及全部研究工作中，无不倾注了导师的心血。他的谆谆教导和循循善诱让我接触到了水锤这个前沿领域，并且产生了浓厚的兴趣；他对科学事业的执着追求，勇于创新和献身精神，鼓励着我不断前行，激励着我在水锤研究的道路上克服困难；他的宽容大度，幽默豪爽为我树立了为人处事的榜样。非常感谢导师给我创造的学习锻炼机会，使我度过了丰富多彩的研究生三年时光。

特别感谢长安大学给排水系全体老师在三年时间里对我的培养和教导。感谢师兄师姐提供了宝贵的长距离输水工程水锤防护的资料及经验，感谢同门的支持和帮助。三年的学习使我与我的同门师弟妹之间建立了深厚的友谊，这段美好的经历将永远留在我的记忆。

还有许多给予我帮助和支持而没有在本文中提及的人，在此一并予以感谢！

研究生的三年期间，是我人生中最为重要的一个阶段。在这三年之中，我认识了许多令我尊敬的、博学多才的老师以及意气相投的同学。从他们身上学到的知识以及优点，令我得到了提高和充实。在此论文完成之际，我深深地感谢他们给予我的无私帮助和中肯建议。

感谢我的母校长安大学这些年对我的教育和培养，衷心地祝愿她在新的世纪与时俱进，绽放出新的青春和活力，祝各位老师工作顺利。

朱 晓 璟

2009年5月于西安