

长距离供水系统水力振动特性和减振措施研究综述

贾俊杰¹, 周建旭¹, 韩玉文²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 惠州市华禹水利水电工程勘测设计有限公司, 广东 惠州 516001)

摘要: 为保证长距离供水系统的稳定运行, 分别针对新型分段低压供水系统和常用的泵站加压供水系统, 归纳总结已有的理论分析、试验研究和数值模拟研究成果, 分析了长距离供水系统的水力振动特性, 并探讨了相应的减振措施。认为在长距离供水系统的布置设计和运行控制中, 应充分考虑有压供水系统内水体的高阶振动特性, 结合动态系统分析理论, 开展必要的水力振动特性及减振措施分析, 以保证供水的可靠性。

关键词: 长距离供水系统; 水力振动特性; 减振措施; 线弹性模型; 非线性振动

中图分类号: TV698.1⁺62

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2013)03-0089-06

Reviews on hydraulic vibration characteristics and vibration reduction measures of long-distance water supply system//JIA Junjie¹, ZHOU Jianxu¹, HAN Yuwen²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Huizhou Huayu Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Co., Ltd., Huizhou 516001, China)

Abstract: To ensure stable operation of the long-distance water supply system, the existing theoretical discussions, experimental researches and numerical simulations of the stepped low-pressure water supply system and the commonly used water-pumping system are summarized. The hydraulic vibration characteristics and methods of the long-distance water supply system are comprehensively analyzed, and the relevant vibration reduction measures are discussed. The results indicate that, for the layout, design and operation of the long-distance water supply system, high-order vibration characteristics of flows in the pressurized water supply system should be fully considered. The analysis of hydraulic vibration characteristics and vibration reduction measures should be carried out by means of the analytical theories of dynamic system, so as to guarantee the reliable operation of the long-distance water supply system.

Key words: long-distance water supply system; hydraulic vibration characteristic; vibration reduction measure; linear elastic model; nonlinear vibration

建设跨地区、跨流域的长距离供(调)水工程是缓解水资源紧张局面、解决水资源时空分布不均问题最直接和最有效的方式。近年来我国一些地区发生的旱情和随之产生的缺水问题进一步说明了水资源合理调配的紧迫性和建设大型供(调)水工程的必要性。20世纪以来,世界上许多国家都建设了多座大规模供(调)水工程,我国也先后修建了包括南水北调工程在内的多座大型供(调)水工程。从大型供(调)水工程供水系统的布置和运行方式来看,主要包括分段低压供水系统、泵站加压供水系统和明渠无压供水系统3种形式。

当前,包括供水系统在内的系统水力振动特性和减振措施是工程界和科技界普遍关注的问题,也

是有待深入研究和急需解决的重要课题之一。系统可能的水力振动主要包括强迫振动引起的水力共振与自激振动两大类,前者是扰动源的扰动频率等于或接近系统的某一阶固有频率时产生的持续水力振荡现象;后者则是因为系统本身的不稳定性,任何压力或流量的微小扰动都将发展成持续的等幅振荡,即发生自激振动^[1]。近年来,国内外学者主要结合水力瞬变数值仿真模拟和系统优化布置,对长距离供水系统的水力特性开展了深入的研究,也初步探讨了系统中可能存在的水力振动问题以及相应的减振措施^[2-4]。对于分段低压供水系统而言,其水力振动特性涉及有压管流、不同流态的堰流和自由水面振荡等;对于泵站加压供水系统而言,其水力振动特

性还与水力机械中水体的流动及过流特性密切相关,因而其水力振动问题更为复杂^[5]。实践表明,在长距离供水系统中发生的持续不稳定水力振荡可能包括频率较高的振荡模式,因此需要充分考虑有压供水系统内水体的高阶振动特性。为了确保长距离供水系统的稳定运行,应重点分析和解决包括供水系统高阶水力振动特性和减振措施等问题在内的关键技术难题,以提高供水的可靠性。本文分别针对分段低压供水系统和泵站加压供水系统,总结归纳了已有的研究成果,提出应考虑有压供水系统内水体的高阶振动特性,结合动态系统分析理论,进一步开展相应的水力振动特性及减振措施研究。

1 分段低压供水系统

分段低压供水系统是一种不同于无压明渠供水和泵站加压供水的新型供水方式^[6],一般由若干供水单元组成,每个供水单元的水力元件主要包括保水堰井和有压箱涵或管道,各供水单元之间通过保水堰井衔接,见图1和图2。

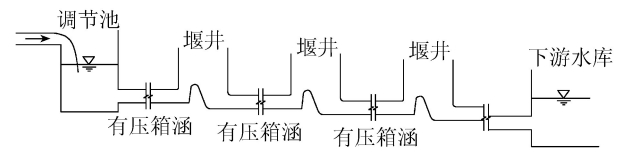


图1 分段低压供水系统

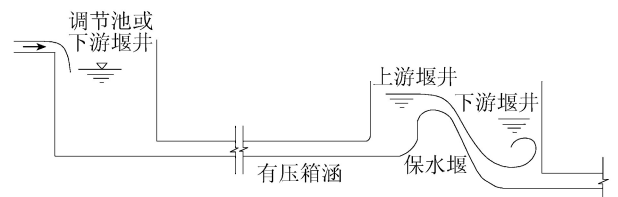


图2 典型供水单元

分段低压供水系统在全线自流的条件下,有效利用水体的势能并分段消除多余的水能,逐级降压,能够满足适时、适量供水和保护水质的要求。分段低压供水系统作为一种新型供水方式,国内已开展了较为系统的研究,而国外的研究很少。

1.1 系统水力振动特性

分段低压供水系统的水力振动特性直接影响系统的稳定运行和供水的可靠性。与系统水力振动特性密切相关的水力振荡是分段低压供水系统中普遍存在的现象,扰动源主要是上游或下游水库(水池)水位的波动、无压明渠水流的波动、闸门的振动以及保水堰堰后水跃等^[7]。上下库水位或无压明渠水流的波动作为扰动源可能引起系统发生强迫振动,甚至会产生危害较大的水力共振,伴随严重的压力和流量的振荡;同时,闸门作为在水力振动分析过程中一个可变的边界,闸门边缘的涡流和从上游传来

的压力振荡,使闸门的振动成为系统水力振动可能的扰动源;在不同类型的保水堰堰流流态下,堰后产生水跃,且伴随明显的水面波动等复杂流态,也可能引起系统的水力共振。

长距离分段低压供水系统中发生的水力振荡,除低频振荡外还可能包含频率较高的振荡,因此应充分考虑有压输水箱涵内水体的高阶振动特性。对于有压输水箱涵内水体而言,需选择合理的水力振动分析的最小阶数,以充分考虑不同频率扰动源的影响,从而全面了解系统的水力振动特性。考虑分段低压供水系统中主要扰动源即调节池等自由水面水位的波动,其扰动频率量级为 $10^{-1} \sim 10^0 \text{ Hz}$ ^[8],拟定扰动频率为 0.3 Hz,则有压输水管涵内水体的分析模型需涵盖该高阶频率特性,当有压箱涵长度接近 1000 m 时,其水体至少应采用 1 阶弹性模型,而当有压箱涵长度接近 4000 m 时,其水体应至少采用 3 阶弹性模型,有压箱涵长度越大,水体所需的弹性模型阶数越高。考虑有压箱涵内水体波速不确定性等原因,随着阶数的增加,模型的精度会降低,分析表明,在长距离分段低压供水系统中,有压箱涵内水体采用 3 阶弹性模型较为适宜^[7]。

目前国内外对于分段低压供水系统振荡特性的研究不够完善,主要集中在国内开展的一些具体的数值仿真模拟和试验研究上。研究未能深入考虑串联的相邻供水单元以及多个存在水力联系的串联供水单元之间的相互影响,也未涉及长距离有压箱涵内水体的高阶振动特性。练继建等^[2-4]建立了分段低压供水系统供水单元的水流振荡方程和保水堰自由水面的固有振荡频率计算公式,同时考虑连通孔的影响,建立了多孔并联分段低压供水系统数学模型,验证了水力共振是由相邻供水单元固有振荡频率相近所致的观点。分析供水系统水力振荡特性的方法主要包括特征线法^[9]、Preissman 四点隐格式差分方法^[10]、U 形管模型法^[4]、精确模型法^[11]、基于水力振动理论的线弹性模型法^[11]以及人工神经网络模型法^[12]等,其中传统的特征线法和 Preissman 四点隐格式差分方法主要用于系统水力振荡的时域分析;U 形管模型法只考虑了水体的刚性模型,未能模拟水体的高阶振动特性;有压箱涵内水体的精确模型只适用于系统的频域分析;而有压箱涵内水体采用基于水力振动理论的线弹性模型是一种崭新的水力振荡特性分析方法,可同时实现时域分析和频域分析,而且能够较准确地反映水体的高阶振动特性^[13]。考虑某一有压供水单元(图2),有压箱涵始端和末端的水位和流量均采用相对变化值表示,以状态方程描述的有压箱涵内水体的 m 阶弹性模型为

$$\frac{dT_i}{dt} = q_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$\frac{dq_i}{dt} = -\frac{fQ_0}{DA}q_i - \frac{c^2(i\pi)^2}{l^2}T_i + \frac{2gA}{l}[Z_{u0}z_u - Z_{d0}z_d(-1)^i] \quad (2)$$

$$\frac{dq_u}{dt} = -\frac{fQ_0}{DA}q_u - \frac{1}{Q_0} \sum_{i=1}^m \frac{(i\pi c)^2}{l^2}T_i + \frac{gAZ_{u0}}{lQ_0}(2m+1)z_u - \frac{gAZ_{d0}}{lQ_0}[1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i]z_d \quad (3)$$

$$\frac{dq_d}{dt} = -\frac{fQ_0}{DA}q_d - \frac{1}{Q_0} \sum_{i=1}^m \frac{(i\pi c)^2}{l^2}(-1)^iT_i + \frac{gAZ_{u0}}{lQ_0}[1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i]z_u - \frac{gAZ_{d0}}{lQ_0}(2m+1)z_d \quad (4)$$

式中： T_i 、 q_i 分别为中间变量和各阶振荡流量； l 、 A 、 D 、 f 和 c 分别为有压箱涵的长度、当量面积、当量直径、摩阻系数和水击波速； Q_0 、 Z_{u0} 和 Z_{d0} 分别为有压箱涵内的初始流量、有压箱涵上游侧和下游侧初始水位； q_u 和 z_u 分别为有压箱涵上游侧流量和水位变化相对值； q_d 和 z_d 分别为有压箱涵下游侧流量和水位变化相对值。

在分析单个供水单元水力振荡特性的基础上，结合保水堰和调节池的水力特性，建立整个供水系统的动态分析模型，并可以结合物理模型试验分析系统的水力振荡特性及可行的减振措施。

1.2 系统减振措施

1.2.1 改变或错开各供水单元的固有频率

在分段低压供水系统中，水力共振主要分为两类：一是系统各有压供水单元的固有频率相互接近

而引起的水力共振；二是扰动源的扰动频率与系统固有频率接近甚至一致所产生的水力共振。练继建等^[2-4]提出了错开相邻供水单元的频率来控制水力振荡的结构优化方法，如调整个别保水堰面积或在维持保水堰面积不变的前提下增大堰后与堰前的面积比。穆祥鹏等^[3]比较分析了在检修闸门和下游箱涵之间设置调压柜或明渠段的减振效果，结果表明设置明渠段优于设置调压柜。韩玉文^[7]采用基于水力振动理论的三阶线弹性模型模拟有压箱涵内水体的动态特性，结果表明各供水单元的特征频率相近或引入的扰动频率与系统的特征频率相近时会发生剧烈的水力振荡，而调整部分供水单元之间的保水堰井长度后，对应的水位波动幅度明显较小。综上分析，在设计分段低压供水系统时应合理调整相关设计参数以错开相邻单元的频率，同时避开常见的扰动频率，从而改善系统的水力振荡特性。

1.2.2 削减水位波动的幅度

作为分段低压供水系统的首部建筑物，因上游侧明渠水流或水跃等流态的影响，调节池内会发生不同幅度的水面波动，也会影响下游侧分段低压供水系统的水力振荡特性，甚至引起共振，因此，在工程中需要采取相应的工程措施，如设置导流板。考虑调节池进口斜坡段水跃发生位置和影响范围的不确定性，在不同位置设置导流板（图3），重点观察和比较分析导流板后调节池水位波动幅度的变化，水位波动幅度均定义为半波幅，见表1。

由表1可知，在斜坡段末端设置导流板1后，导流板上游水位波动幅度较大，水面存在明显的振荡现象，导流板下游调节池水位较稳定，波动幅度明显减小，波动幅度的大小主要与调节池流量、调节池水深、水跃发生位置等多方面因素有关；设置导流板1

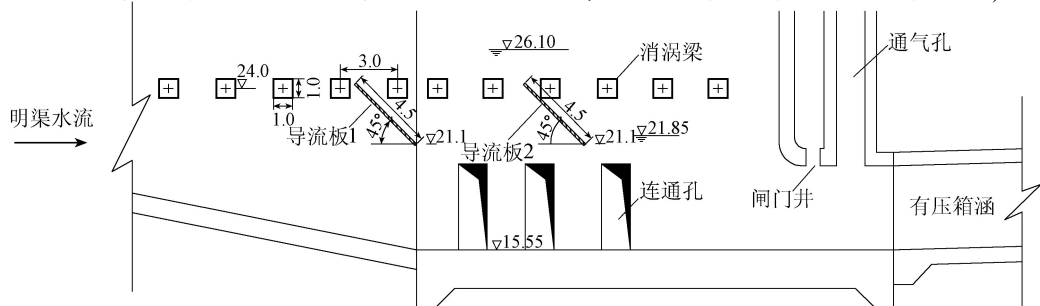


图3 调节池中导流板的布置(单位:m)

表1 调节池水位波动幅度

cm

方 案	全部通道输水工况					部分通道输水工况	
	$Q=60\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=50\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=40\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=30\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=20\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=40\text{ m}^3/\text{s}$	$Q=20\text{ m}^3/\text{s}$
无导流板	15.0	30.0	22.5	15.0	15.0	37.5	22.5
设导流板1	7.5	9.0	10.5	8.0	6.0	11.5	7.5
设导流板1和2	5.2	5.7	5.2	6.4	4.4	9.5	6.4

和2后,调节池中水面波动幅度较仅设置导流板1时进一步减小,水面趋于平稳。导流板的作用及其布置可基于紊流模型理论采用水工水力学紊流数值模拟技术开展进一步的验证分析。

另外,在调节池和保水堰井内合理位置设置消涡梁,在防止危害性吸气漩涡的同时,对抑制水位波动也有一定的作用,可达到改善水力振荡的效果^[14]。为了尽可能削减保水堰下游堰井的水位波动,可以考虑在保水堰下游堰井内不同的高程设置消涡梁,比较分析下游堰井中水位波动幅度的变化规律,确定消涡梁的最佳设置位置。

2 泵站加压供水系统

泵站加压供水系统是常用的供水方式,供水系统沿线布置较复杂,水力元件众多,任一水力元件过流特性的变化,包括泵站的启停机以及工况的切换,都将在整个供水系统中产生复杂的过渡过程,涉及水力瞬变流、气液两相流和热力学等诸多领域,同时,系统的水力振动特性也较复杂^[15]。

2.1 系统水力振动特性

泵站加压供水系统中振动特性复杂,扰动源种类很广。除了常见的与水力系统密切相关的扰动源以外,运行中的泵本身就是一个重要的振动源,可能发生水力振动、机械振动、电磁振动等^[5]。机械振动和电磁振动一般是可以消除或减弱的,而引起水力振动的原因错综复杂,一旦水流脉动压力频率与水泵装置的某些部件(包括进、出水管)或者水力系统的固有频率接近或相等时,就会引起共振。在泵站加压供水系统中,因系统中部分水力元件本身的水力性能不稳定而产生的自激振动是较常见的一种形式,而且危害较大。特别是当水泵的扬程曲线有局部驼峰形时,水泵在小流量区运行,如在排出管路中存在气罐、水箱或有空气积存时可能发生自激振动,即通常所说的“喘振”,自激振动频率较低,若此频率与输水管路及水体的固有频率相等,则将引起管路的共振,从而产生较严重的局部破坏或事故^[5]。Pejovic等^[16]综述了泵站加压供水系统中因水力振动引起的多起事故,激振源主要来自运行中的水泵本体或阀门,由此引起水力系统强烈的水力共振,甚至引起管桥的坍塌破坏。Misra等^[17]结合一个由水泵、上游管道、控制阀和下游管道组成的供水系统,考虑管道系统的水力特性和自动控制阀结构特性的耦合,分析了管道系统自激振动的机理。Karney等^[18]结合理论分析、数值仿真和现场观测全面分析了泵站加压供水系统等水利工程中发生的水力振动问题,指出了水力共振的危害性,以及系统水

力振动特性分析的重要性。Guo等^[19]结合某一大容量轴流泵站的水力-机械振动以及引水隧洞中复杂的压力振荡现象,系统分析了不同泵叶片角度和运行转速下,引水隧洞中的压力振荡频率、泵轴的横向和扭曲振动等,指出叶片端的漩涡脱落是系统水力共振的扰动源。

以往对泵站加压供水系统振动特性的研究往往局限于对机械和电气部分动态特性的分析,而忽视了系统与压力管道内水体的耦合关系,以及各水力元件的影响,并且对自激振动的研究甚少。实际上,在泵站加压供水系统中,因水泵的局部“S”形特性产生的自激振动与水力-机械振动密切相关,同时涉及气罐、空气阀或单向调压室等水力元件以及滞留气体等的动态特性,机理较为复杂,应深入分析系统自激振动的可能性及相应的幅频特性,为避免发生自激振动或设计减振措施提供理论依据。Parrondo等^[20]结合简单的水泵供水系统管路,基于线性化的一维非恒定流基本方程,建立了管道中含有截留气体的系统动态特性分析模型,分析了系统动态不稳定的临界条件,指出发生不稳定水力振动的可能性,进一步结合数值仿真和模型试验分析了水泵在特定工况下运行时供水系统的水力振动特性和动态响应。基于上述研究,Parrondo等^[21]采用传统的瞬变流分析特征线法,分析了管道中含有截留气体的水泵供水系统的水力振动特性,以及管路中不同截留气体体积对系统水力振动特性的影响。对于泵站加压供水系统中可能的自激振动问题,可结合相关集中水力元件节点水流的连续性方程和有压管道内水流的动力方程,分别采用相应的状态方程用以描述,建立系统的动态分析模型:

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \varepsilon \frac{dx}{dt} (1 + \sigma x + \delta x^2) + \omega_0^2 x = 0 \quad (5)$$

式中: ε 、 σ 和 δ 均为较小的常数; ε 为正数; δ 为负数; x 为供水系统特征变量的相对变化量。式(5)即为系统在一定条件下自激振动的数学方程,若考虑 $\sigma=0$,则式(5)为典型的范德波尔方程,工程中许多实际的自激振动问题均可以用范德波尔方程描述。

2.2 系统减振措施

泵站加压供水系统减振措施通常为设置“主动型”水力元件和“被动型”水力元件,其中“被动型”水力元件能够对系统局部的流量特性进行调节,空气罐和单向调压室等均为“被动型”水力元件。研究表明,“被动型”水力元件运行较为可靠,设置位置合适能有效削减系统的水力振动。

由于诸如漏水阀门等水力元件本身的不稳定特性可能会引起泵站加压供水系统较大的水力振动,

而合理设计和设置空气罐等水力元件可以有效抑制这种水力振动。Gardner 等^[22]结合某一漏水阀门、气室、压力管道和水库系统,分析了气室减振的机理,证明水力系统中设置尺寸合理的阻抗式气室能有效降低可能的压力振荡;Shinichi 等^[23]指出,因水力元件本身不稳定导致的流量脉动是水力控制系统中最常见的扰动源之一,可以通过设置蓄能器等“被动型”水力元件有效降低,但不易有效降低高频脉动,因此提出了一种新型的“主动型”蓄能器,可以产生反相流以有效降低和消除水力系统中产生的高频流量脉动;周建旭等^[24]应用有压输水系统水力振动理论,比较分析了阻抗式调压室和气垫式调压室的减振效果,指出气垫式调压室的减振效果优于阻抗式调压室;高松竹等^[25]结合脉动型水力扰动系统,详细分析了不同位置和不同容积空气罐对压力脉动控制效果的影响,结果表明通过优化空气罐容积和安装位置,可以提高空气罐控制压力脉动的效果。另外,类似于水电站输水系统和其他形式的供水系统,分别从泵站加压供水系统的水力、机械和电气角度入手,消除可能导致水力振动的扰动源也是一种有效的减振措施。

在以往研究中,针对不同的泵站加压供水系统,通常基于简化的数学模型分析某一水力元件的减振效果和减振机理,或者仅从数值分析的角度研究各类减振措施,今后可结合气体动力学方程和振动分析理论对空气罐等水力元件的减振特性和机理进行深入的理论分析,探索此类水力元件在各类供水系统中的布置原则和影响因素,以有效抑制系统的水力振动。

3 结 语

对于分段低压供水系统,其水力振动特性主要表现为自由水面的水位波动和系统的水力振荡,甚至是共振。除了采用导流板或消涡梁在一定程度上削减水面波动的幅度以外,还可以在消除可能扰动源的基础上,通过合理调整保水堰井等结构的相关设计参数,以错开各供水单元的固有频率,同时避开常见的扰动频率,从而改善系统的水力振荡特性。

对于泵站加压供水系统,其水力振动特性较为复杂,扰动源种类也很多,因水泵局部的不稳定特性可能会引起危害较大的自激振动。为此,首先应从系统的水力、机械和电气角度开展可能的扰动源分析,消除可能导致水力振动的振源,同时,在供水管路中合理设计和设置空气罐、单向调压室等“被动型”水力元件,以有效削减系统的水力振动。

参考文献:

[1] WYLIE E B, STREETER V L, SUO Lisheng. Fluid

transients in systems [M]. Englewood, New Jersey: Prentice Hall,1993.

[2] 练继建,郑政,李琳,等. 多孔并联分段低压输水系统的水力特性和控制[J]. 水利学报,2006,37(8):950-957. (LIAN Jijian, ZHENG Zheng, LI Lin, et al. Hydraulic characteristics and control approach of stepped low-pressurized water diversion system with parallel multi-holes in regulation tanks [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(8):950-957. (in Chinese))

[3] 穆祥鹏,练继建,李琳. 基于水力控制的分段低压输水系统优化研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2008,40(1):58-63. (MU Xiangpeng, LIAN Jijian, LI Lin. Optimization on the stepped low-pressurized water diversion system based on hydraulic control[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2008,40(1):58-63. (in Chinese))

[4] 万五一,练继建,崔广涛. 分段低压输水管系的水力振荡特性[J]. 水利学报,2003,34(12):34-39. (WAN Wuyi, LIAN Jijian, CUI Guangtao. Oscillation characteristics of stepped low-pressurized piping systems [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(12):34-39. (in Chinese))

[5] 淮慧梅,朱晓辉. 水泵振动原因及对策[J]. 机械工程与自动化,2004(1):59-61. (HUAI Huimei, ZHU Xiaohui. Vibration reason and preventive measure of the pump[J]. Mechanical Engineering & Automation,2004(1):59-61. (in Chinese))

[6] 郑政. 多孔并联分段低压输水系统的水力特性和控制研究[D]. 天津:天津大学,2005.

[7] 韩玉文. 分段低压输水系统的水力振荡特性分析[D]. 南京:河海大学,2012.

[8] 索丽生,周建旭,刘德有. 水电站有压输水系统的水力共振[J]. 水利水电科技进展,1998,18(4):12-14. (SUO Lisheng, ZHOU Jianxu, LIU Deyou. Hydraulic resonance in pressurized piping systems of hydropower plants[J]. Advance in Science and Technology of Water Resources,1998,18(4):12-14. (in Chinese))

[9] 万五一. 长距离输水系统的非恒定流特性研究[D]. 天津:天津大学,2004.

[10] 穆祥鹏. 复杂输水系统的水力仿真与控制研究[D]. 天津:天津大学,2008.

[11] ZHOU Jianxu, CAI Fulin, WANG Yuan. New elastic model of pipe flow for stability analysis of the governor-turbine-hydraulic system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,2011,137(10):1238-1247.

[12] 秦亮,练继建,万五一. 长距离输水系统的神经网络模型研究[J]. 水利水电技术,2003,34(9):1-4. (QIN Liang, LIAN Jijian, WAN Wuyi. Study on artificial neural network models of long-distance water supply system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2003,34(9):1-4. (in Chinese))

[13] 韩玉文,周建旭,徐进超. 分段低压输水系统水力振荡特性分析方法探讨[J]. 水利水电技术,2011,42(10):

- 58-61. (HAN Yuwen, ZHOU Jianxu, XU Jinchao. Discussion on analysis methods for hydraulic oscillation characteristics of stepped low-pressure water conveyance system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42 (10) : 58-61. (in Chinese))
- [14] 赵海, 吴换营, 蔡付林, 等. 分段低压自流输水系统中无压连接段水力特性三维数值模拟[J]. 水电能源科学, 2010, 28 (9) : 73-75. (ZHAO Hai, WU Huanying, CAI Fulin, et al. 3D numerical simulation of hydraulic characteristics of non-pressure connection part in stepped low-pressure artesian water supply system [J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (9) : 73-75. (in Chinese))
- [15] 成立, 刘超. 大型泵站水力稳定性探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7 (2) : 75-77. (CHENG Li, LIU Chao. Discussion on hydraulic stability of large scale pumping station [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7 (2) : 75-77. (in Chinese))
- [16] PEJOVIC S, BOLDY A P. Guidelines to hydraulic transient analysis of pumping systems [M]. Belgrade, Coventry: P&B Press, 1992.
- [17] MISRA A, BEHDINANB K, CLEGHORN W L. Self-excited vibration of a control valve fluid-structure interaction[J]. Journal of Fluids and Structures, 2002, 16 (5) : 649-665.
- [18] KARNEY B W, GAJIC A, PEJOVIC S. Case studies; our experience in hydraulic transients and vibrations[C]//IAHR Proceedings of the International Conference on Case Studies in Hydraulic Systems. Belgrade, Serbia; [s. n.], 2003.
- [19] GUO S J, MARUTA Y, OKAMOTO H, et al. Complex pressure fluctuations and vibrations in a pump-water tunnel system [C]//Proceedings of ASME 2003: Joint Fluids Engineering Conference. Honolulu, Hawaii: ASME, 2003.
- [20] PARRONDO J, ANTUNA J, GONZALEZ J, et al. A study on the unstable coupling between pumps and hydraulic circuits with entrapped gas pockets [C]//Proceeding of ASME 2002: Fluids Engineering Division Summer Meeting. Honolulu, Hawaii: ASME, 2002.
- [21] PARRONDO J, ANTUNA J, PRIETO J I. Computation of the unstable behavior of a hydraulic circuit with a centrifugal pump coupled to an air pocket [C]//Proceeding of ASME 2002: Fluids Engineering Division Summer Meeting. Honolulu, Hawaii: ASME, 2005.
- [22] GARDNER P E J, GUMMER J H. The use of air chambers to suppress hydraulic resonance [J]. Water Power, 1973 (3) : 102-105.
- [23] SHINICHI Y, HISASHI S, HIROTUGU Y. Study on an active accumulator (active control of high-frequency pulsation of flow rate in hydraulic systems) [J]. JSME International Journal; Series B, 1996, 39 (1) : 119-124.
- [24] 周建旭, 张健. 有压输水系统减振措施分析[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24 (6) : 10-12. (ZHOU Jianxu, ZHANG Jian. Analysis of damping measures for pressurized conveyance system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24 (6) : 10-12. (in Chinese))
- [25] 高松竹, 许萍, 蒲家宁. 吸收振动抑或引发共振: 空气罐在水力扰动系统中作用的模拟研究[J]. 天然气与石油, 2007, 25 (3) : 1-3. (GAO Songzhu, XU Ping, PU Jianing. Absorption oscillation or cause resonance: simulation research on effect of air tank to hydraulic disturbance system [J]. Natural Gas and Oil, 2007, 25 (3) : 1-3. (in Chinese))

(收稿日期: 2012 - 08 - 02 编辑: 骆超)

(上接第 83 页)

- [44] 王兰生, 李天斌, 徐进, 等. 二郎山公路隧道岩爆及岩爆烈度分级 [J]. 西南公路, 1998 (4) : 22-26. (WANG Lansheng, LI Tianbin, XU Jin. In Erlang mountain highway tunnel rock burst and rockburst intensity [J]. Southwest Highway, 1998 (4) : 22-26. (in Chinese))
- [45] 任守广. 地下厂房系统岩爆预测及其对支护结构稳定性的影响 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2006.
- [46] 唐检军, 夏松林. 岩爆预测方法研究 [J]. 中国水运, 2010, 10 (2) : 128-129. (TANG Jianjun, XIA Songlin. Prediction method of rock burst [J]. Chinese Water Transport, 2010, 10 (2) : 128-129. (in Chinese))
- [47] 潘长良, 谢学斌, 曹平, 等. 岩爆预测预报方法 [J]. 有色矿冶, 1997 (6) : 3-5. (PAN Changliang, XIE Xuebin, CAO Ping, et al. Prediction and forecasting method of rock burst [J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 1997 (6) : 3-5. (in Chinese))
- [48] 汪洋, 王继敏, 尹健民, 等. 基于快速应力释放的深埋隧洞岩爆防治对策研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (2) : 547-553. (WANG Yang, WANG Jimin, YIN Jianmin, et al. Research on prevention measures of rock burst based on rapid stress release in deep tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (2) : 547-553. (in Chinese))
- [49] 邱道宏, 张乐文, 薛翊国, 等. 地下洞室分步开挖围岩应力变化特征及岩爆预测 [J]. 岩土力学, 2011, 32 : 430-436. (QIU Daohong, ZHANG Lewen, XUE Yiguo, et al. Studies of surrounding rock stress change character and rockburst prediction of underground cavern during stepped excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 : 430-436. (in Chinese))
- [50] 杨宝忠. 浅谈隧道施工中岩爆发生的机理及预防措施 [J]. 铁道工程学报, 1999 (4) : 62-65. (YANG Baozhong. Rock burst mechanism and prevention measures under tunneling [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999 (4) : 62-65. (in Chinese))

(收稿日期: 2012 - 06 - 28 编辑: 骆超)