

文章编号:1001-5485(2009)12-0054-04

长距离有压输水管道充水过程的研究

曹命凯¹, 郑源¹, 严继松², 舒依娜¹

(1. 河海大学 水利水电工程学院, 南京 210098; 2. 南方电网调峰调频发电公司 清远抽蓄建管局, 广东 清远 511853)

摘要:为研究长距离有压管道充水过程并保证其运行中的安全, 针对长距离有压管道的特点, 对其充水过程, 采取分段处理、依次充水的策略。对于每一段管道, 闸门处采用宽顶堰型闸孔出流形式, 结合空气阀的排气性质, 运用气体状态方程, 按小流量充水原则建立数学模型。在不同充水流量和不同空气阀间距下, 计算管道内各特征点气体压强变化。计算表明充水流量越大, 空气阀间距越长, 特征点的气体压强越大, 管道越危险。计算结果可为长距离输水管道充水过程的安全评估提供科学依据。

关键词:长距离; 有压管道; 充水过程; 闸孔出流; 气体状态方程

中图分类号:TV134 **文献标识码:**A

水是生命之源, 水资源是人类赖以生存和社会发展的不可替代的资源。近十几年来, 水资源的供需矛盾已经严重地制约着经济的发展、社会的进步。跨流域长距离输(调)水工程是解决水资源供需矛盾的一项行之有效的工程措施。因此, 世界各地已建和在建许多跨流域调水工程, 如国外的有美国中央河谷工程、以色列北水南调工程、巴基斯坦西水东调工程等^[1-4], 国内有引滦入津、引黄济青、引黄入晋以及正在建设中的南水北调工程等^[5]。有压输水方式在提高输水规模和保证水质方面有无可比拟的优势, 但其水力控制引起的非恒定流非常复杂, 特别是在频繁检修时进行的充水^[6]操作中, 复杂的水力过渡现象还未被人们所认知。杨敏等基于明渠非恒定流的运动方程和连续方程, 采用 Preissmann 四点隐式差分格式, 结合虚拟流量法, 对有压管道充水过程进行了数值仿真模拟^[7]。本文基于小流量充水原则, 研究有压管道内气体压强的变化, 认识有压管道的充水过程。

1 数学模型的建立及其求解过程

1.1 水体体积与水深关系函数的建立

在充水过程中, 水流按一定的流量不断地流进管道内, 要想知道某一时刻管道每一断面水体的水深, 必须先建立圆形管道内水体体积与水深的关系函数。圆形管道内水体面积 A 与管内水深 H 的关系如图 1(a) 所示, 由图可知

$$A = R^2 \arccos\left(\frac{R-H}{R}\right) - \frac{R^2}{2} \sin\left(2\arccos\left(\frac{R-H}{R}\right)\right), \quad (1)$$

式中: R 为管道半径。

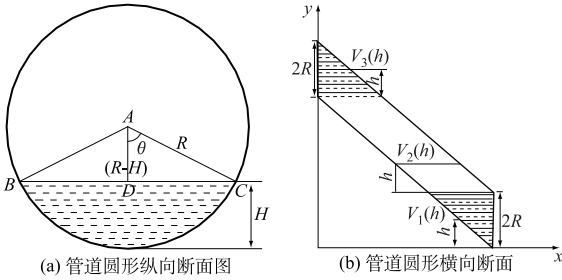


图1 管道圆形纵向和横向断面图
Fig. 1 Longitudinal section and transversal section of a pipeline

如图 1(b) 所示, 按充水的先后顺序和管道的坡度可知, 管道内水体体积与水深的关系函数是一个分段函数, 见式(2)。

$$V(h) = \begin{cases} V_1(h) = \frac{R^3}{i} \left[\sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{R}\right)^2} - \left(1 - \frac{h}{R}\right) \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) \right] - \frac{R^3}{3i} \left[\left(1 - \left(1 - \frac{h}{R}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}} \right], \\ V_2(h) = \pi abh = \frac{\pi R^2 h}{\sin\theta} = \frac{\pi R^2 h}{\sin(\arctan i)}, \\ V_3(h) = f_3(h) = V_1(2R) - V_1(2R - h). \end{cases} \quad (2)$$

式中 i 为管道的坡度。

收稿日期:2008-12-15; 修回日期:2009-02-27

作者简介:曹命凯(1983-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事水力过渡过程计算及仿真、流体机械研究, (电话)025-83781119(电子邮箱) caomingkai_102@163.com。

1.2 空气阀工作原理

空气阀在长输水管道中起着重要的防护作用,可以有效地控制输水系统中产生的负压。通过在管路中合理布置空气阀,既可以排出管路中的有害气体,又能在管路出现负压时及时补气,消除液柱分离现象,避免事故的发生。在长距离输水管道中,排气阀沿管道纵向的设置数量和布置方式应根据沿线地形合理确定^[8]。一般人为的每隔一定距离布置成一个高点。在驼峰处布置空气阀,不仅在充水时有利于空气排出,在放水时也利于空气的及时补充,而且还可以防止管道的气蚀和振动,从而确保管道输水安全。本文以 200 mm 8″D-060HF 空气阀为例,其特性曲线如图 2 所示。

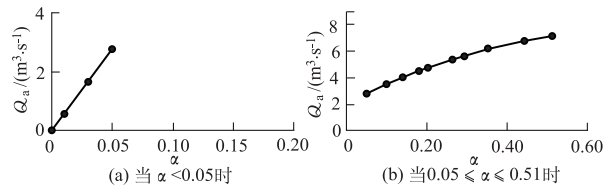


图2 空气阀排气量与相对压差的关系曲线
Fig.2 The curves showing relation between displacement and relative pressure difference of an air valve

根据空气阀的特性曲线,利用最小二乘法拟合得到以下的曲线方程:

$$Q_a = \begin{cases} 54.91\alpha & (\alpha < 0.05) \\ -10.51\alpha^2 + 15.68\alpha + 2.27 & (0.05 \leq \alpha \leq 0.51) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\alpha = (p - p_a)/p_a$ 为空气阀内外相对压差。

为了避免爆管现象,保证管道能够顺利充水和正常输水,最大相对压差不能超过0.51。空气阀是靠水流压缩管内空气,管道内外空气产生一个压力差,进而使球阀自动启闭。有压管道中内外压力差越大,球阀的排气量也越多。输水管道内气体的压缩过程可以认为是空气动力学中的等温过程。在时间步长 Δt 极小的情况下,可以忽略空气阀排气量,认为管道内的气体满足理想气体的状态方程。

1.3 设置闸门进口边界条件

在水利工程中,闸门形式一般为平面闸门或弧形闸门。本文充水管道的取水头部通过平面闸门与水库相连。通常情况下,水库水位较高,闸孔水头 H 比较大,而闸门开度 e 最大值为取水头部管道直径,即满足: $e/H \leq 0.65$ 。所以水库取水口处边界条件近似可看做宽顶堰上闸孔出流^[9-11]。

闸孔出流受水跃位置的影响可分为自由出流和淹没出流两种。判别自由出流与淹没出流的具体方法是:先求出收缩断面水深 h_{c0} ,然后用试算法求解

水跃函数,得到收缩断面的共轭水深 h'_{c0} ,若下游水深 $h_t < h'_{c0}$ 水跃发生在收缩断面处,或收缩断面下游,这时下游水深不影响闸孔出流,属于闸孔自由出流;若下游水深 $h_t > h'_{c0}$,则发生淹没水跃,属于淹没出流。

1.3.1 宽顶堰型闸孔自由出流

对于圆形管道,其闸后收缩断面的面积为

$$A_c = R^2 \arccos\left(\frac{R - h_{c0}}{R}\right) - \frac{R^2}{2} \sin\left(2 \arccos\left(\frac{R - h_{c0}}{R}\right)\right) \quad (4)$$

$$h_{c0} = \varepsilon e$$

式中: ε 为垂直收缩系数; e 为闸门开度。

闸孔自由出流的流量公式为

$$Q = \mu_0 A_c \sqrt{2gH_0}, \quad (5)$$

式中 μ_0 为宽顶堰型闸孔自由出流的流量系数。

由于有压管道上游端与水库相连,可以不用考虑闸前水流行进速度,也就是说闸孔全水头 H_0 可以直接取 H ,则流量式(5)变为

$$Q = \mu_0 A_c \sqrt{2gH}. \quad (6)$$

1.3.2 宽顶堰型闸孔淹没出流

闸孔被淹没后,闸后收缩断面的实际水深增大,故而实际作用水头减小。因此,闸孔淹没后其流量小于自由出流的流量。但是 h 位于旋滚区不易测量,故实际计算时,是将计算闸孔自由出流的式(6)右端乘上一个淹没系数,而求得淹没闸孔出流的流量,即

$$Q = \sigma_s \mu_0 A_c \sqrt{2gH}, \quad (7)$$

式中: σ_s 为淹没系数; μ_0 为闸孔自由出流的流量系数。

1.3.3 系数的确定

垂直收缩系数 ε ,儒科夫斯基曾用理论分析的方法得到 ε 与相对开度的关系,在计算过程中可以按线性插值的方法求解^[9]。

闸孔自由出流的流量系数 μ_0 可按南京水利科学研究所的经验公式计算^[10]:

$$\mu_0 = 0.60 - 0.176 \frac{e}{H}. \quad (8)$$

闸孔淹没出流的淹没系数 σ_s ,由实验资料知^[11]

$$\sigma_s = 0.95 \sqrt{\frac{\ln(H/h)}{\ln(H/h'_{c0})}}, \quad (9)$$

式中: h 为闸后水深; h'_{c0} 为收缩断面的共轭水深。

1.4 小流量充水原则

采用较小的流量对即将投入运行的管道充水是一项重要的原则和主要手段,它不仅可以避免管路水

击,而且也是减小排、进气设施规模的重要条件之一。国外文献^[12]指出:“如果管道以等于0.3倍的正常流量或者更小的速度充水,将不会发生由水击造成的管道破坏”,并强调“为了尽量减少管内剩余气体和避免发生水击,任何情况下充水速度不应超过0.6 m/s”。因此,在进、排气设计时,应当尽可能地将充水时的满管平均流速规定为0.3 m/s,最大不超过0.6 m/s。

1.5 模型建立及求解过程

假定水库水位 Z_0 在整个充水过程中保持不变,即闸孔全水头 H 保持不变,设时间步长为 Δt ,第 i 时刻,管道内空气体积为 V_i ,密度为 ρ_i ,则空气的总质量 $m_i = V_i \rho_i$ 。经过时间步长 Δt 后,到第 $i + 1$ 时刻,取水端闸门处的流量为 Q_{i+1} ,管道内水增加的体积,空气减少的体积 ΔV_i 为: $\Delta V_i = Q_{i+1} \Delta t$ 。第 $i + 1$ 时刻管道内空气的体积为 $V_{i+1} = V_i - \Delta V_i$ 。

从第 i 时刻到第 $i + 1$ 时刻, Δt 时段内,管道内的气体变化可以看作是等温变化过程,满足气体状态方程

$$P_{i+1} V_{i+1} = P_i V_i \quad (10)$$

从而求出第 $i + 1$ 时刻管道内空气的压强 p_{i+1} ,此时管道内外的相对压差是 α_i ,根据空气阀的排气特性,可以求出第 $i + 1$ 时刻的排气量 Q_{ai} , Δt 时段内排出气体的质量为

$$\Delta m_i = \rho_i Q_{ai} \Delta t \quad (11)$$

根据气体质量守恒,可以得到第 $i + 1$ 时刻,管道内气体的质量为

$$m_{i+1} = m_i - \Delta m_i = \rho_{i+1} V_{i+1} \quad (12)$$

初始时刻,即 $i = 0$ 时刻,取水端闸门没有打开,管道内只有空气。管道内的气体通过空气阀与大气相通,即管道内的气体压强为大气压强,密度与管道外的气体相同。在计算过程中要保证管道内外相对压差不得超过0.51,否则有爆管的危险。

2 模型应用

我国东北某输水工程采用管道和隧洞形式,全程有压,是目前国内管道输水距离最长、输水量最大、供水方式最复杂的工程。由于管线比较长,需要

分段充水,分段后每段长度为 30 ~ 80 km。以第一段中的部分单元作为研究对象,在不同的充水流量和不同的空气阀布置间距下,计算和分析输水管道内水力特性的变化情况。管道分段情况及分析节点如图 3 所示。

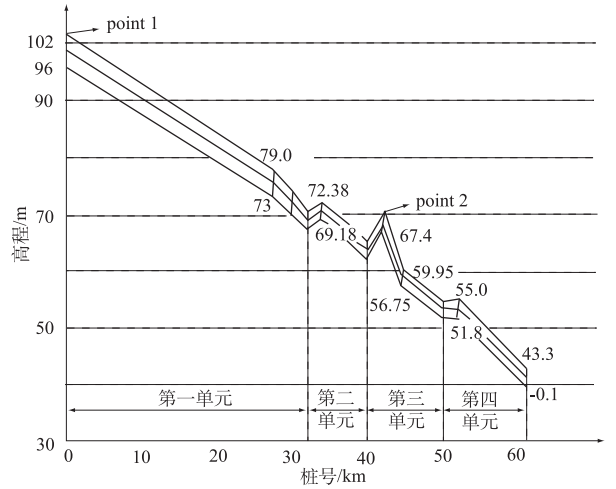


图 3 第一段管线分段情况及分析节点图

Fig. 3 The graphic node and segmentation of the first pipeline

鉴于小流量设计原则,选择适当的充水流量,确保管道在充水过程中的水流满管流速满足工程设计要求,即 $0.3 \text{ m/s} < v < 0.6 \text{ m/s}$ 。假设满管流速满足此限制条件,计算充水流量。表 1 给出了几种不同充水流量下对应的不同管径管道中的水流流速,由表可以看出,管道的充水流量不应该大于 $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。但是为了较广泛地研究充水过程中各特征参数的变化情况,选择管道的充水流量分别 $4.4, 4.8, 5.0, 5.4, 5.8, 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2. 1 不同流量下计算结果分析

对第一段管道,依据选择的不同流量分别进行计算,得到特征点 point1, point2 的气体压力与时间的对应关系,如图 4、图 5 所示。

由以上各图可知,在不同充水流量下,各特征点的特征量随时间变化的趋势是一致的,通过图 4 和图 5 可知,随充水流量的增大,point1, point2 点处气体压力到达最大值所用的时间越短,压力增值上升

表 1 充水流量与对应满管流速

Table 1 Filling discharges and velocities at full pipe

管道直径/ m	管道面积/ m ²	满管流速/(m · s ⁻¹)								
		充水流量 4.4 m ³ /s	充水流量 4.6 m ³ /s	充水流量 4.8 m ³ /s	充水流量 5.0 m ³ /s	充水流量 5.2 m ³ /s	充水流量 5.4 m ³ /s	充水流量 5.5 m ³ /s	充水流量 5.8 m ³ /s	充水流量 6.0 m ³ /s
6.0	28.27	0.156	0.163	0.170	0.177	0.184	0.191	0.195	0.205	0.212
3.2	8.042	0.274	0.286	0.298	0.311	0.323	0.336	0.342	0.361	0.373
2.4	4.524	0.486	0.508	0.531	0.553	0.575	0.597	0.608	0.641	0.663

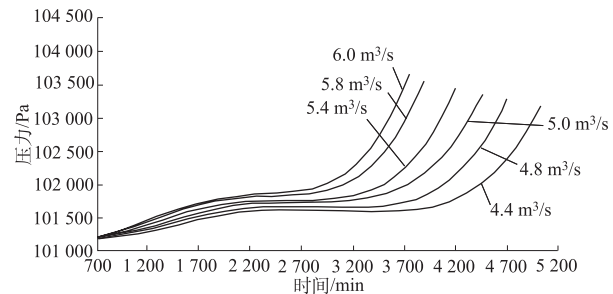


图 4 不同流量下 point1 气体压力随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of gas pressure change with time under various flow rates at point 1

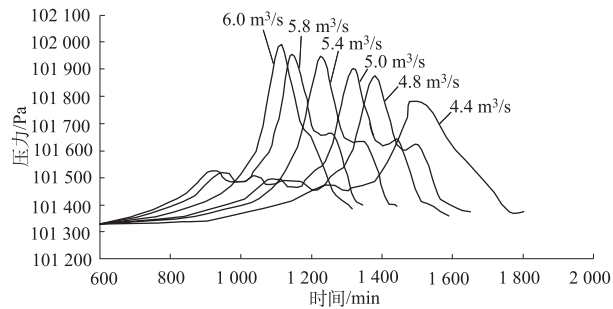


图 5 不同流量下 point2 气体压力随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of gas pressure change with time under various flow rates at point 2

得越快,整体充水时间越少。因此,在不改变空气阀布置的情况下,为了保证管道不出现严重的气体压力的现象,管道的充水流量不宜过大。

2. 2 不同空气阀布置间距下计算结果与分析

为了便于分析计算结果,能够较显著地表现出不同空气阀布置间距下气体压力的变化趋势,研究对象上空气阀的数量应尽量多一些,故选择间距较远的第一、三单元(见图 3)作为研究对象,空气阀布置间距分别为 600,650,700,750,800 m 5 种情况,在恒定流量 $Q = 4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 的工况下计算 point1 与 point2 处的气体压力值。

不同空气阀布置间距下,point 1,point 2 气体压力随时间变化曲线如图 6 和图 7 所示。由图可知:

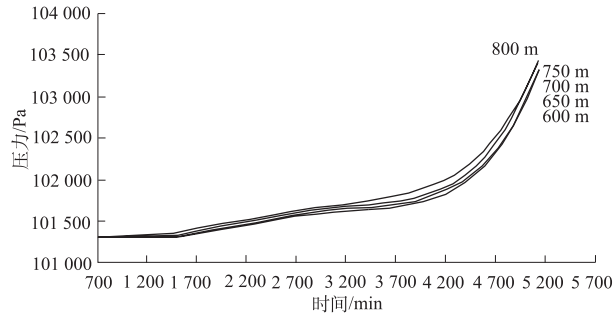


图 6 不同空气阀布置间距下 point 1 气体压力随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of gas pressure change with time under different arrangement spacings at point 1

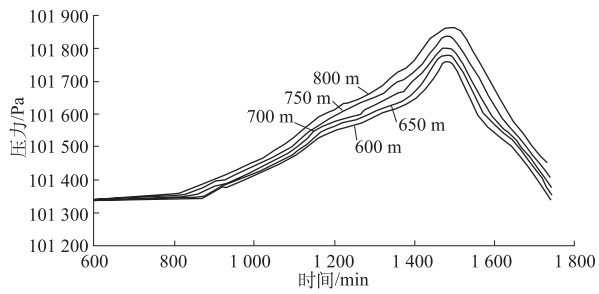


图 7 不同空气阀布置间距下 point 2 气体压力随时间变化曲线

Fig. 7 Curves of gas pressure change with time under different arrangement spacings at point 2

随着空气阀布置间距的增大,即空气阀数量的减少,气体压力呈上升趋势,空气阀布置间距每增加 50 m,point 1,point 2 处气体最高压力相对值分别平均上升 0.007 759%,0.024 35% 左右,但由于充水流量不变,气体压力变化较小,气体压强对充水流量的影响很微小,管道充满所需时间基本保持不变。

3 结 语

在跨流域调水过程中,长距离有压输水管道可以减少水力损失、保证水质,但是在首次充水或管道放空检修后充水过程中,管道内存在大量的空气,是否能及时安全地排出是一个非常值得关注的问题。本文研究长距离有压输水管道的充水过程,采取分段处理、依次充水的策略,注重分析不同充水流量和空气阀不同间距下管道内特征点的气体压力变化。计算表明,充水流量越大,空气阀间距越长,管道内特征点的气体压强的最大值越大,管道越危险。因此,在实际充水过程中,为了保证管道安全,选择合理充水流量和空气阀间距是十分有必要的。

在长距离有压管道充水过程的研究中,以下问题值得进一步深入研究:①空气阀的排气特性。文中运用归纳拟合的方法得到空气阀的特性曲线。在实际中,空气阀的排气特性十分复杂。②充水过程中,管道排气过程,因与外界大气相通,难以满足气体状态方程的条件。

参考文献:

[1] 魏昌林. 国外调水工程美国的调水工程[J]. 科技信息,2003,(9):15-16.

[2] 史亚飞. 世界各国调水工程扫描[J]. 建设机械技术与管理,2003,16(10):26-27.

[3] 蒋国富. 国外跨流域调水经验对我国南水北调中线工程的启示[J]. 世界地理研究,2006,15(4):35-40.