

用水气两相流数学模型计算明流长隧洞通气量

于永海, 俞国青

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 结合工程实例, 利用水气两相流数学模型计算明流长隧洞的通气量. 计算结果表明: 该模型具有良好的模拟能力, 能适应不同的工程布置和运用条件, 运用该模型计算通气量具有较高的精度. 通过数值计算揭示了通气量随隧洞运行条件的变化规律, 为工程设计、施工提供有关的参考依据.
关键词 明流隧洞; 通气量; 水气两相流; 数学模型

中图分类号: TV134 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2000)04-0036-04

明流隧洞广泛应用于水利水电工程, 在跨流域调水工程中单条隧洞洞身长度可达几十公里. 如果洞内通气量不足或洞顶净空余幅不够, 隧洞运行过程中将可能出现明满流交替, 引起压强和流速的剧烈变化, 使洞身结构处于不利的受力状态, 危及工程安全. 明流隧洞设计的重要问题之一是设置合宜的洞顶净空余幅和必要的通气设施. 通气量的大小决定了通气设施的布置和尺寸, 因此对隧洞通气量的研究关系到工程运行的安全性和灵活性, 具有重要的意义.

对明流隧洞的通气量, 国内外学者进行过许多研究. 他们通过模型试验或现场观测总结了一些经验公式^[1,2,10]. 研究表明, 明流隧洞的需气量与洞长、水流量、水流流速、洞内水流流态、洞内气压、洞壁糙率等多种因素有关, 问题甚为复杂. 但根据各家经验公式计算的通气量彼此相差很大, 使设计人员难以适从. 究其原因主要是: 根据模型试验资料总结的公式, 受模型比尺和所模拟的工况范围及试验条件的影响, 难以适应不同的工程条件; 而据原型观测资料总结的公式, 不但受工程布置、观测条件和观测精度影响, 而且受资料整编相关方式的影响, 通常点据散乱, 由此所得的经验公式精度较低.

为了适应不同的工程布置和运用条件, 本文首次应用水气两相流数学模型计算明流长隧洞的通气量, 克服了模型试验和现场观测的局限性.

1 水气两相流数学模型

1.1 水工明流隧洞水气两相流的基本流型

水气两相流的流型可按两相介质的空间分布分类. 对于低速明流水工隧洞(如用于发电、灌溉、供水的引水隧洞), 常见的流型有光滑分层流、波状分层流以及在某些条件下出现的间歇流(团状流或塞状流). 在间歇流的情况下, 气相的连续性被破坏, 洞内出现明满流交替; 对于高速明流水工隧洞(如高水头泄洪隧洞), 由于高速水流紊动掺气和水滴跃迁进入气相, 在两相界面附近出现一个水气两相混合流区, 按弥散相的分布状况和弥散程度, 可分为液滴流、气泡流和充分混合流. 本文研究低速明流水工隧洞(洞内水流断面平均流速小于 $7 \sim 8 \text{ m/s}$) 的通气量问题. 此时水气两相均为连续相, 水气界面清晰, 洞内的气流由运动水体表面的拖曳引起, 并受洞段两端气压差的影响.

已有的试验研究和现场观测表明, 即使对于分层流这种相对简单的流型, 两相流中气相速度分布也呈复杂的三元结构. 当水流流速很高时, 断面上洞中气流流速的垂向分布偏离对数关系. 在某些情况下, 邻近洞出口的一定范围内接近洞顶有局部的反向气流流动. 因此如需探索两相流的详细流动结构, 则必须使用三维流体动力学模型. 考虑到给定水流量条件下的隧洞通气量或气流量乃是气相的总体平均性质, 根据不可压缩流体连续性条件, 从通气孔进入洞内的空气必将全部经洞出口流出, 加之目前可资利用的有关水气两相流的各种计算参数均是通过试验确定的基于各相断面总体平均意义上的值, 因此, 本文采用一维两相流模型.

收稿日期: 1999-03-18
作者简介: 于永海(1968—), 男, 江苏扬中人, 博士研究生, 水利水电工程专业, 主要从事明渠非恒定流和有压瞬变流研究.
① 高又生. 明渠管道通气量分析. 水科院科学研究论文集(第 3 集), 1963.

1.2 水气两相流基本方程组

1.2.1 基本假定

(a)等温过程 (b)气相不可压缩,因为当气相流速小于 100 m/s 时,气体密度的相对变化甚小 (c)水相不可压缩,水相断面上的压强服从静压分布.

1.2.2 基本方程组

在气相上的作用力有重力、纵向压强梯度、洞壁摩阻以及气水界面摩阻,而作用在水相上的力包括重力、纵向压强梯度、洞壁摩阻以及气水界面摩阻.对水相和气相,气水界面摩阻力大小相等、方向相反.

水相连续性方程
$$\frac{\partial h_L}{\partial t} + \frac{1}{B_L} \frac{\partial Q_L}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

水相运动方程
$$\frac{\partial Q_L}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_L^2}{A_L} \right) = -gA_L \frac{\partial h_L}{\partial x} + gA_L i - \frac{A_L}{\rho_L} \frac{\partial p_g}{\partial x} + \frac{B_L}{\rho_L} \tau_i - gA_L \frac{Q_L^2}{K_L^2} \tag{2}$$

气相连续性方程
$$-\frac{\partial h_L}{\partial t} + \frac{1}{B_L} \frac{\partial Q_g}{\partial x} = 0 \tag{3}$$

气相运动方程
$$\frac{\partial Q_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_g^2}{A_g} \right) = gA_g i - \frac{A_g}{\rho_g} \frac{\partial p_g}{\partial x} - \frac{B_L}{\rho_g} \tau_i - \frac{\chi_g}{\rho_g} \tau_g \tag{4}$$

方程(1)~(4)中:下标 g, L ——气相、水相; h_L, A_L, Q_L ——断面水深、断面上水相所占面积、水相流量; i ——隧洞纵向底坡; ρ_L ——水的密度; g ——重力加速度; K_L ——水相流量模数, $K_L = A_L C \sqrt{R_L}$; C ——谢才系数, $C = \frac{1}{n} R_L^{1/6}$; R_L ——水相水力半径; n ——洞壁糙率; B_L ——水面宽度; A_g, χ_g, Q_g ——断面上气相所占面积、气相湿周、气相流量; ρ_g ——气相密度; p_g ——断面上气相压强.

方程(2)中水相壁面摩阻用谢才公式计算,方程(4)中气相单位面积上壁面摩阻力 τ_g 按下式计算:

$$\tau_g = \frac{1}{2} \rho_g u_g^2 f_g = \frac{1}{2} \rho_g \frac{Q_g^2 f_g}{A_g^2} \tag{5}$$

式中: u_g ——气相断面平均流速; f_g ——气相壁面摩阻系数.

按照前人的研究结果^[3~6],当气相是紊流时,

$$f_g = 0.046 R_{eg}^{-0.2} \quad R_{eg} = \frac{4 A_g}{\chi_g + B_L} \frac{u_g}{\nu_g} \tag{6}$$

式中: ν_g ——气相运动粘滞系数.

公式(2)和(4)中气水界面单位面积上的摩阻力 τ_i 按下式计算:

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_g (u_g - u_L) |u_g - u_L| = \frac{1}{2} f_i \rho_g \left(\frac{Q_g}{A_g} - \frac{Q_L}{A_L} \right) \left| \frac{Q_g}{A_g} - \frac{Q_L}{A_L} \right| \tag{7}$$

式中: u_L ——水相断面平均流速; f_i ——水气界面摩阻系数.

本文采用 Cohen & Hanratty^[7]从低气速时明渠流资料分析所得结果 $f_i = 0.0142$.

1.2.3 边界条件

隧洞进口气相边界条件为
$$p_A - p_g = \frac{1}{2} \left(1 + \zeta \frac{A_g^2}{F^2} \right) \rho_g u_g^2 \tag{8}$$

式中: p_A ——大气压强; ζ ——进口前通气设施上的阻力系数; F ——通气管面积.

隧洞出口气相边界条件为给定出口气压,隧洞进口水相边界条件为给定的水流量,隧洞出口水相边界条件为给定水位流量关系.

1.3 数值求解

方程(1)~(4)构成了以水深 h_L 、水流量 Q_L 、气流量 Q_g 和气相压强 p_g 为基本未知量的偏微分方程组.采用有限差分法,用 Preissmann 隐式格式对方程进行离散.该格式计算稳定性好,流量水位在同一点计算,精度不受空间步长 Δx 大小的影响,水位流量关系及其它类似的关系式可在同一位置引入而无特殊困难.将方程(1)~(4)离散后得到

$$A_{1j} \Delta Q_{Lj} + B_{1j} \Delta h_{Lj} + C_{1j} \Delta Q_{Lj+1} + D_{1j} \Delta h_{Lj+1} = K_{1j} \tag{9}$$

$$A_{2j}\Delta Q_{Lj} + B_{2j}\Delta h_{Lj} + C_{2j}\Delta Q_{Lj+1} + D_{2j}\Delta h_{Lj+1} + E_{2j}\Delta Q_{gj} + F_{2j}\Delta p_{gj} + G_{2j}\Delta Q_{gj+1} + H_{2j}\Delta p_{gj+1} = K_{2j} \quad (10)$$

$$B_{3j}\Delta h_{Lj} + D_{3j}\Delta h_{Lj+1} + E_{3j}\Delta Q_{gj} + G_{3j}\Delta Q_{gj+1} = K_{3j} \quad (11)$$

$$A_{4j}\Delta Q_{Lj} + B_{4j}\Delta h_{Lj} + C_{4j}\Delta Q_{Lj+1} + D_{4j}\Delta h_{Lj+1} + E_{4j}\Delta Q_{gj} + F_{4j}\Delta p_{gj} + G_{4j}\Delta Q_{gj+1} + H_{4j}\Delta p_{gj+1} = K_{4j} \quad (12)$$

式中： $A_{ij} \sim H_{ij}$ ——根据初始条件或前一时刻的值算得的系数（ $i = 1 \sim 4$ ； j 为计算断面编号）； ΔQ_{Lj} 、 Δh_{Lj} 、 ΔQ_{gj} 、 Δp_{gj} —— $j\Delta x$ 断面上从时刻 $n\Delta t$ 到 $(n+1)\Delta t$ 的水流量、水深、气流量和气压的增量； K_{ij} ——根据初始条件或前一时刻的值计算得到的自由项。

方程（9）~（12）和计算区域上下游各两个边界条件构成了以 ΔQ_{Lj} 、 Δh_{Lj} 、 ΔQ_{gj} 、 Δp_{gj} 为基本未知量的代数方程组。采用全选主元高斯消元法或 Householder 镜像映射法求解该代数方程组，可得到 $(n+1)\Delta t$ 时刻各断面的水流量、水深、气流量和气压强。计算中加权系数 θ 取为 0.8。

2 算例及分析

2.1 算例

2.1.1 工程基本资料

某工程三条隧洞的基本资料如表 1 所示。它们均为圆形断面。其中 2 号隧洞总长 26449.400 m，有 A、B 两段组成。

表 1 隧洞基本资料

Table 1 Basic data of the tunnels

洞号	长度/m	纵向底坡	洞径/m	设计流量/(m³·s⁻¹)
1	12176.623	1/1472.2	5.46	48.0
2	A	15266.901	1/1410.0	4.30
	B	11182.499	1/1250.0	4.20
3	42675.000	1/1250.0	4.20	25.8

2.1.2 隧洞通气量计算

对每条隧洞就三种不同的洞壁糙率 n 分别为 0.013、0.014、0.015 及不同的过水流量，分别计算了相应的气流量（本工程通气设施气流程短，体型简单，从偏于安全考虑取 $\zeta = 0$ ）。为了分析隧洞长度对于通气量的影响，通过改变隧洞长度进行相应的计算。计算结果列于表 2，为节省篇幅，表中只列出了 1 号隧洞在不同糙率、不同水流量下的计算结果，其它隧洞仅列出糙率 n 为 0.014 时通过设计流量的计算结果。

表 2 通气量计算结果

Table 2 Computation results of air demands

洞号	洞长/m	洞径/m	糙率	水流量/(m³·s⁻¹)	水深/m	气流量/(m³·s⁻¹)	断面平均水速/(m·s⁻¹)	断面平均气速/(m·s⁻¹)	气流量①/(m³·s⁻¹)
1	12176.623	5.46	0.013	42.0	3.46	17.05	2.69	2.19	18.50
				48.0	3.80	12.81	2.76	2.13	14.93
				55.9	4.33	7.13	2.81	2.02	9.12
			0.014	42.0	3.64	14.16	2.54	2.07	15.49
				48.0	4.03	9.69	2.59	1.98	11.51
				51.9	4.32	6.75	2.61	1.91	8.52
			0.015	42.0	3.83	11.47	2.39	1.95	12.63
				48.0	4.29	6.77	2.44	1.83	8.26
				48.4	4.32	6.45	2.44	1.82	7.97
1A	5176.623	5.46	0.014	48.0	4.03	9.68	2.59	1.98	10.97
2	26449.400	4.3~4.2	0.014	25.8	3.16~3.09	5.34	2.26~2.36	1.73~1.83	6.55
2A	15266.901	4.3	0.014	25.8	3.16	5.32	2.26	1.73	6.44
2B	11182.499	4.2	0.014	25.8	3.09	5.30	2.36	1.81	6.34
3	42675.000	4.2	0.014	25.8	3.09	5.30	2.36	1.82	6.61
3A	12939.576	4.2	0.014	25.8	3.09	5.26	2.36	1.79	6.38
3B	23382.860	4.2	0.014	25.8	3.09	5.28	2.36	1.80	6.51
3C	32411.705	4.2	0.014	25.8	3.09	5.29	2.36	1.81	6.57

① 高又生. 明渠管道通气量分析. 水利院科学研究论文集(第 3 集), 1963.

2.2 通气量计算结果的分析

低速明流隧洞内运动水流拖曳洞内水面以上空间的空气，使水流产生附加的水头损失。这部分水流损失的能量作为气相运动的动力。在隧洞与通气设施的连接处，由于空气的流动，连接处的气压低于通气设施口外的大气压，在这一气压差的作用下，空气经通气设施进入隧洞。

表 2 中的计算结果表明,对同一条隧洞,通气量随水流量的增加而减小,随水深的增加而减小,也随洞壁糙率的增加而减小.对于相同的洞壁糙率和洞内水流量,隧洞长度对于洞内通气量影响很小.

高又生^①用半理论半经验的方法对明流拖曳情况下的通气量进行了研究,并根据模型试验和原型观测资料提出了一个计算通气量的公式.该公式适用于长管道内水流为明流射流、缓变流,管道全长无水跃发生的情况.以此公式,按数模计算时设定的相同的通气条件计算上述隧洞的通气量,计算结果列于表 2.其结果的变化规律与本文利用两相流模型计算所得结果趋势相同,但数值比本文计算的大,其中部分原因是经验公式中忽略了洞壁对气流的摩阻力.切尔西^[1]对明流隧洞的通气量曾有一个粗糙的估计,认为明流隧洞内平均气速不会大于平均水速.如认为洞内平均气速等于平均水速,则得到的最大可能气流量随洞壁糙率和洞内水流量的变化规律与本文利用两相流模型得到的通气量变化规律一致.

3 结 论

本文运用水气两相流数学模型计算明流长隧洞的通气量克服了模型试验的局限性.通过分析比较,说明本模型具有良好的模拟能力,可考虑较多的影响因素,能适应不同的工程布置和运用条件,具有较高的精度.

在不同的工程布置和运用条件下进行数值试验和计算研究,揭示了通气量随隧洞运行条件的变化规律,即对于低速明流圆形断面长隧洞,若隧洞运用过程中水深均大于隧洞半径,则通气量随水流量的增加而减小,随水深的增加而减小,也随洞壁糙率的增加而减小,而隧洞长度对于洞内通气量影响很小.这些结论能够为工程设计、施工提供有关的参考依据.

明流隧洞的通气是复杂的水气两相流问题.本文研究了低速明流水工隧洞的通气量计算.对于高速明流隧洞发生水流掺气条件下的数值模拟和通气量计算将是进一步研究的方向.

参考文献：

[1] Falvey H T 著.水工建筑物中的掺气水流[M].王显焕译.北京:水利电力出版社,1984.30 ~ 68.
[2] 罗惠远.泄水管道进气问题的研究[J].水利学报,1984(8) :64 ~ 70.
[3] Taitel Y, Dukler A E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow[J]. AICHE Journal , 1976, 22(1) :47 ~ 55.
[4] Andritsos N , Hanratty T J. Influence of interfacial waves in stratified gas-liquid flow[J]. AICHE Journal ,1987, 33(3) :444 ~ 454.
[5] Taitel Y , Barnea D , Brill J P. Stratified three phase flow in pipes[J]. Int J Multiphase Flow ,1995, 21(1) :53 ~ 60.
[6] Andreussi P , Persen L N. Stratified gas-liquid flow in downwardly inclined pipes[J]. Int J Multiphase Flow ,1987, 13(4) :565 ~ 575.
[7] Cohen S L , Hanratty T J. Effect of waves at a gas-liquid interface on a turbulent air Flow[J]. J Fluid Mech ,1968, 31 :467 ~ 476.

Study of Air Demands of Long Tunnels Based on Air-Water Two-Phase Flow Model

YU Yong-hai , YU Guo-qing

(College of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract :An air-water two-phase flow model for air demand computation for tunnels is developed in this paper. Based on this model, air demands of long tunnels are studied and computed for a practical project. The computation results show that the present model works well for different engineering layouts and operation conditions, as compared with the results from empirical formulation or estimation. The effects of various factors such as water flow rate, wall roughness and tunnel length on the air demand are studied. The model and conclusion drawn from this study can be used to design and construction of hydraulic tunnels.

Key words :tunnel ;air demand ;air-water two-phase flow ;mathematical model

① 高又生.明渠管道通气量分析.水科院科学研究论文集(第3集),1963.