

重力有压流长距离输水可靠性模拟

李翠梅^{1,2,3}, 郜 阔², 王 浩³, 陈 骥¹

(1. 香港大学 土木工程系, 香港 999077; 2. 苏州科技学院 环境科学与工程学院, 苏州 215011;
3. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100433)

摘要: 以重力有压流长距离输水系统为研究对象, 采用水厂需水量满足程度作为系统可靠性的量化指标, 建立输水系统可靠性模型, 模拟分析了连通管间距对输水系统可靠性的影响。算例结果表明, 随着连通管数目的增加, 系统可靠度趋于稳定; 同一连通管间距下, 输水距离越大, 系统可靠度越低; 随连通管间距的减小, 输水距离导致的可靠度差距逐渐减小。在保证输水系统可靠度要求的前提下, 定量测算了不同输水距离下连通管间距的参考值, 为科学设计长距离重力有压流输水系统, 提高系统可靠性提供依据和参考。

关键词: 重力有压流; 长距离输水; 连通管; 可靠性; 模拟
中图分类号: TU991.1 **文献标志码:** A

Simulation for Reliability of Pressured Gravity Water Transportation in Long Distance

LI Cuimei^{1,2,3}, GAO Kuo², WANG Hao³, CHEN Ji¹

(1. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: By studying the pressured gravity water transportation in long distance, a reliability model was proposed with the fulfillment of water demand (the ratio between water delivered and water demand) as the reliability (R_c) quantitative index. A case study was made of the model in simulating the system reliability variety in different connection pipe distance (CPD) during failure states due to the unavailability of a pipe by taking into account the probability of the failure events. The result shows as the number of the connection pipes goes on, the system reliability begins to stabilize; with the same connection pipe distance, a longer transportation distance results in a lower system reliability and the reliability difference caused by transportation distance

reduces with the decreasing of the connection pipe distance. Based on the above, the connection pipe distance was quantitatively calculated under the required reliability of the long distance pressured gravity water transfer system, then, the reference value of the connection pipe distance was proposed during different transportation distances, which provides the basis for improving the long distance water transportation.

Key words: gravity pressure flow; long distance water transferring; connection pipe; reliability; modeling

长距离输水是输水工程中的重点和难点, 输水距离少则十几公里, 多则上百公里, 沿线地形复杂, 一旦发生事故, 将影响整个城市的供水安全, 甚至大面积停水。因此按照工程规模的大小, 长距离输水管一般敷设成至少两条以上的并行管线, 并在中间适当分段连通, 以便一条输水管发生故障时, 可由另一条并行输水管段高负荷输水, 降低事故对输水的影响。

目前有关连通管设置对输水系统可靠性影响的定量研究并不多见, CHEN 等^[1] 根据工程实际经验提出了双管输水系统的连通管间距约为 3.0~5.0 km。大部分的可靠性研究均假定系统运行时某一时刻最多只有一根管段发生故障, 在此基础上, 赵洪宾提出了不同输水管数目下, 连通管数目对事故时水量的影响; 未碧贵推导出满足事故时输水量要求的多管道并联输水系统的连通管最大间距^[2]。

随着城市化进程的加快, 城市周边水源微污染状况越来越严重, 饮用水水源地越来越远离城市, 原水输水管线距离呈日益增大的趋势。结合国内大部分输水工程来看, 平均输水距离至少几十公里, 大规

收稿日期: 2013-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(51109153)

第一作者: 李翠梅(1974—), 女, 副教授, 博士后, 香港大学访问学者, 主要研究方向为城市水资源与给水排水工程设计运行最优化。

E-mail: cuimeili@163.com

通讯作者: 陈 骥(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水文与水资源。E-mail: jichen@hku.hk

模输水距离甚至达到几百公里.随着输水距离的增加,输水系统的可靠性和安全性在降低,主要表现为:发生事故的管段数量可能增加、不同管段同时发生事故的可能性在增加、发生事故的类型也可能在增加.如何将因输水距离增加带来安全性的降低,并考虑到输水管连通管间距(CPD,以 C_{PD} 表示)的设置中,进而通过科学设置 C_{PD} 降低长距离输水的风险,提高安全性和可靠性是本文研究的重点.本文通过建立不同管段事故的概率模型,计算了管段同时发生故障的概率,以实际输水量与水厂需水量之比($R_e = Q/Q_r$)作为量化评价输水可靠性的指标可靠度(R_e),分析了长距离重力有压流双管输水系统 C_{PD} 对系统可靠性的影响,在此基础上计算了不同输水距离下 C_{PD} 对应的可靠度 R_e .

1 重力有压流输水可靠性分析计算

1.1 可靠性指标确定

Alperovits 与 Shamir^[3]最早提出输配水管网系统优化设计目标函数中应加入可靠性因素.随后许多学者就输配水系统的可靠性问题,展开了广泛而深入的研究.配水管网由若干个水源点、用水节点与之间相连管段组成, Tung^[4]将管网可靠性定义为系统将水从任一水源点输送到任一节点的能力. Wagner 等^[5]使用可达性与可连接性评估配水管网的可靠性,其中可达性指需水节点与某一水源点连通的概率,可连接性指所有需水节点与某一水源点连通的概率.而 Shamsi^[6]研究了节点对可靠度,节点对可靠度定义为特定节点与指定水源点的连通概率.上述研究均假定节点只要与水源点连通,那么节点的需水量、水压、水质等就可以得到保障,这个假定是不符合实际情况的. Fujiwara 和 Tung^[7]提出将输配水管网系统可靠度定义为实际供水量与总需水量之比,用其评估管网的输水可靠性. Mays^[8]将管网可靠度定义为配水管网以要求水压提供所需水量的能力,分为机械可靠度和水力可靠度.机械可靠度是管网组件无需维修更换长期运行的能力,水力可靠度是管网的服务性能表征. Ostfeld 等^[9]将可靠度分解为三个量化指标:输水量、输送需求比与优质供水量,基于 Epanet 水力模型采用蒙特卡罗法分别计算了 Epanet 算例中的单一和复合供水系统的可靠度. Tabesh 等^[10]基于大量观测数据利用人工神经网络与模糊神经网络预测管段故障率.与以往采用回归方程拟合的故障率相比,管道可靠度计算的准确

性有了较大的提高. Ciaponi 等^[11]采用实际供水量与用户需水量之比作为评价指标,加入节点与时间因素影响,以各工况出现概率为权重,采用蒙特卡罗法模拟计算了配水系统的可靠度.

综上所述,输配水系统的可靠性可以定义为:在设计寿命期内不同工况下,输配水系统满足用户需水量的能力.可靠度作为可靠性的量化指标,指设计寿命期内,输配水系统在不同工况下保证用户需水量的满足程度.

目前对于配水系统可靠性的研究多假定同一时刻仅有一根管段出现故障,忽略了多管段故障^[11-13].与配水系统相比,输水系统输水距离长,安全性脆弱,多管段同时故障的可能性高,研究的必要性日益加强.

输水管道系统的组件有:输水管,连通管与阀门.在分析重力有压流输水系统可靠性之前作如下假设:①在输水系统的所有组件中,只考虑管段发生故障对系统可靠性的影响;②输水管道输水的水质与水压满足水厂需求;③正常工作时,输水管道系统输水量满足水厂需求;④设计寿命期内,输水系统的工作状态用 k 表示($k=1,2,\dots,N$).则根据以上假设,本文采用需水量的满足程度表示 k 工况下系统的可靠度 $R_{e,k}$ ^[11-12]:

$$R_{e,k} = \frac{Q_k}{Q_r} \quad (1)$$

式中: Q_k 为 k 工况下输水量, $m^3 \cdot s^{-1}$; Q_r 为水厂需水量, $m^3 \cdot s^{-1}$.

引入 k 工况的相应概率 P_k ,以设计寿命期内不同工况下输水系统可靠度的加权平均值表示系统可靠度 R_e :

$$R_e = \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{Q_r} P_k \quad (2)$$

鉴于目前国内外长距离输水系统仍以两条输水管线为主,因此本研究中输水管由两条长 L 、管径、管材相同的输水管组成,其间设置 n 条连通管,输水地形高差为 H .

1.2 水量与水头关系

1.2.1 正常工作时

如图 1 所示,有 2 条平行输水干管,输水量为 Q_r ,摩阻均为 S , $n(n \geq 1)$ 条连通管将其等距划分为 $n+1$ 段.输水系统水头损失 h_r 为

$$h_r = S_d Q_r^2 \quad (3)$$

式中: S_d 为系统当量摩阻, $S_d = S/4$; h_r 为系统水头损失.

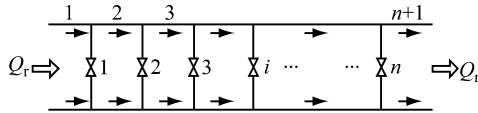


图 1 输水系统示意图(正常工作时)

Fig. 1 A sketch of water transmission system (normal)

1.2.2 事故时(一条事故管段,设管段 i 故障)时

如图 2 所示,事故时阀门 i 打开,水经连通管越过事故管段.此时输水系统水头损失 h_a 表示如下:

$$h_a = S'_d Q_a^2 \quad (4)$$

式中: S'_d 为事故时系统当量摩阻, $S'_d = (n-1)S_d / (n+1) + S / (n+1)$; Q_a 为事故时输水量.

重力输水系统水头损失由地形高差 H 克服,地形高差不变,则有:

$$h_a = H = h \quad (5)$$

可得:

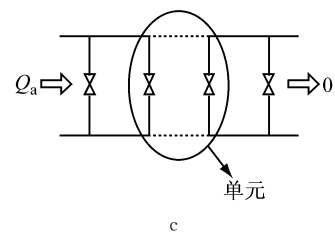
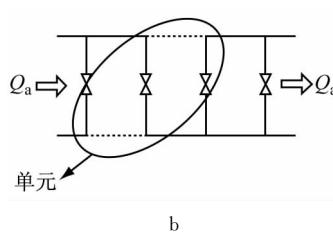
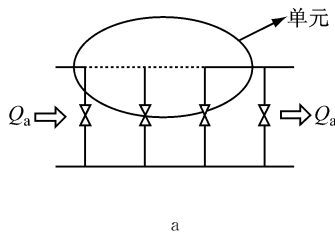


图 3 输水系统工况示意图

Fig. 3 A sketch of water transmission system working condition

输水系统水头损失

$$h_a = S'_d Q_a^2 \quad (7)$$

式中: $S'_d = (n+1-j)S_d / (n+1) + jS / (n+1)$, 其中 j 为事故管段数, $j = 0, 1, 2, \dots, n+1$.

重力输水系统事故时水头损失同样等于位置水头,则:

$$h_a = H = h$$

联立式(1)和(4),可得:

$$\frac{Q_a}{Q_r} = \sqrt{\frac{n+1}{n+1+3j}} \quad (8)$$

1.3 长距离输水系统可靠性模型

1.3.1 管段可靠度的确定

以往对长距离输水管间连通管的研究大多集中于假定某一管段出现故障,求解相应可靠度下所需连通管的数目.并未考虑随着输水距离的增加,管段可靠度的变化.本研究中鉴于管段经维修后可再次投入正常使用属于可维修组件,其可靠度用组件可用度 A 表示.为此引入输水管组件可用度 A ,建立长距离输水系统可靠性模型.

组件在规定条件下,在任意时刻能够完成规定

$$\frac{Q_a}{Q_r} = \sqrt{\frac{n+1}{n+4}} \quad (6)$$

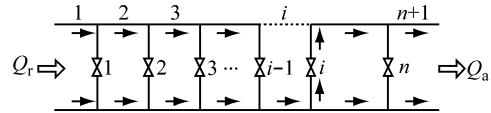


图 2 输水系统示意图(事故时)

Fig. 2 A sketch of water transmission system (accident)

1.2.3 事故时,有 $j(j > 1)$ 条事故管段时

事故管段数 $j > 1$ 时可分为三种情况:(1)事故管段全部出现在一条输水管(图 3a);(2)两条输水管中均有事故管段,但不存在对置事故管段(图 3b);(3)存在对置事故管段(图 3c).其中图 3c 所示情况下,输水系统完全丧失输水能力, $Q_a / Q_r = 0$;其余两种情况, Q_a / Q_r 计算如下:

功能的概率称为组件瞬时可用度 $A(t)$;相对应的是瞬时不可用度 $U(t)$,表示组件在规定条件下任意时刻出现故障的概率,则有 $U(t) = 1 - A(t)$.

组件瞬时可用度为

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda l + \mu} + \frac{\lambda l}{\lambda l + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (9)$$

式中: λ 为管段故障率,次·年⁻¹; μ 为管段修复率,次·年⁻¹; l 为管段长度,km.

将组件可用度 A 定义为管段设计寿命期 T 内的平均可用度,即:

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt = \frac{\mu}{\lambda l + \mu} + \frac{1}{T} \frac{\lambda l}{(\lambda l + \mu)^2} (1 - e^{-(\lambda + \mu)T}) \quad (10)$$

式中: T 为输水系统设计寿命期,相应的不可用度即: $U = 1 - A$.

Kleiner 和 Rajani^[14]提出了管段故障历史数据的统计模型,研究了管段的故障模式,指出管段故障率随时间的变化一般分为三个阶段:老练期、可用期与耗损期,分别对应了递减函数(DFR)模式、常数函数(CFR)模式与递增函数(IFR)模式.管段的故障率

与很多因素有关,如腐蚀程度、覆土厚度、管材的质量、检修人员的业务水平等.这些因素具有很强的不确定性,很难用统一的数学模型描述.本文中管段故障率指可用期管段的故障率,即故障率为常数.

目前确定管段故障率的方法主要有两种:

(1) 通过整理与统计供水公司的管段维修台账获得.故障率 λ ,单位时间内单位长度管道发生故障的次数,其数学表达式如下:

$$\lambda = \frac{m}{LT} \quad (11)$$

式中: m 为维修记录周期内同一类型管段发生故障的次数; L 为同一类型管段总长; T 为维修记录周期总时长.

(2) Su 和 Mays^[15]根据 St. Louis 市维修数据拟合了单位时间单位长度的管道计算公式,转换为国际单位后为:

$$\lambda_i = \frac{41.9377}{D_i^{3.26}} + \frac{0.3057}{D_i^{1.3131}} + \frac{474.9528}{D_i^{3.5792}} + 6.7592 \times 10^{-5} \quad (12)$$

式中: λ_i 为管段 i 的故障率,次·年⁻¹·m⁻¹; D_i 为管段 i 的直径,mm.

管段修复率 μ 即单位时间内的修复次数,次·年⁻¹.与管段故障率类似,有两种确定方法,其中一种为通过整理与统计供水公司的管段维修台账获得.

$$\mu = \frac{1}{t_{MTR}} \quad (13)$$

式中: t_{MTR} 为平均故障前时间,d.

Culinane 等^[16]根据文献^[13]中的数据,拟合了平均故障前时间 t_{MTR} 与管径的计算公式:

$$t_{MTR,i} = 0.001873D_i^{1.462131} \quad (14)$$

式中: D_i 为管段 i 的直径,mm.

拟合公式(14)仅考虑了管径变化对于管段故障率与修复率的影响,忽略了地质条件、管材与腐蚀程度等不确定因素,可在管道维修数据不足的情况下使用^[11].

1.3.2 输水系统工况概率的确定

假定事故管段数 j 服从二项分布,即 $J \sim B(n+1, A)$,不存在对置事故管段的相应工况概率为

$$P\{J = j\} = 2^j C_{n+1}^j U^j A^{2(n+1)-j} \quad (15)$$

式中: j 为事故管段数, $j=0,1,2,\dots,n+1$; n 为连通管数目, $n \geq 0$; C_{n+1}^j 为 $n+1$ 根管段中可以选择事故管段数 j 的组合数, $C_{n+1}^j = (n+1)n \cdots (n-j+1)$.

综上所述,重力有压流输水可靠性模型为

$$R_e = \sum_{k=1}^N \frac{Q_k}{Q_r} P_k = \sum_{j=0}^{n+1} \frac{Q_n}{Q_r} P\{J = j\} =$$

$$\sum_{j=0}^{n+1} \sqrt{\frac{n+1}{n+1+3j}} \cdot 2^j C_{n+1}^j A^{2(n+1)-j} U^j \quad (16)$$

式中: R_e 为输水系统可靠度; A 为输水管段可用度,

$A = \frac{\mu}{\lambda C_{PD} + \mu} + \frac{1}{T} \frac{\lambda C_{PD}}{(\lambda C_{PD} + \mu)^2} (1 - e^{-(\lambda C_{PD} + \mu)T})$; N 为系统工况总数, $N = n + 2$; n 为连通管数目, $n = L / C_{PD} - 1$.

模型以不同工况下输水系统可靠度的加权平均值作为系统可靠性评价指标 R_e ,针对不同连通管设置间距(C_{PD})得出相应的系统可靠度(R_e).

2 算例分析

假设输水距离假定分别为 40、60、80、100 km,设计寿命期为 $T=50$ 年,故障率与修复率分别为 $\lambda=0.1028$ 次·年⁻¹·km⁻¹, $\mu=8$ 次·年⁻¹,代入式(16)进行模拟计算,结果见表 1.

由表 1 可以看出,未设置连通管时,重力有压流输水距离为 40 km 时,系统可靠度为 0.661,即仅有两条输水管输水,其安全性不高,不能满足我国规范供水安全可靠度要大于 0.70 的要求;随着输水距离的增加, R_e 从 0.661 逐渐下降为 0.438,这表明,随着输水距离的增加,输水系统的可靠度呈下降的趋势,由此验证了长距离输水系统设置连通管的必要性.

表 1 同时清楚表明,当连通管数量为 2 时,输水距离大于 60 km 后,其可靠度即不能满足我国规范的要求($R_e \geq 0.70$).表明,为保证输水的安全性和可靠性,随着输水距离的增加,应增加连通管的数量.

由表 1 模拟结果可知:当连通管数量 $n \geq 9$ 时,即输水管分段数大于 10,输水距离 100 km 以内,其可靠度均能满足($R_e \geq 0.70$)的要求;当连通管数量 $n \geq 18$ 时,输水距离 100 km 以内,输水可靠度 $R_e \geq 0.80$;当连通管数量 $n \geq 27$ 时,输水距离 100 km 以内,输水可靠度 $R_e \geq 0.85$.

当输水距离一定时,输水系统可靠度随着连通管数量的增加而增大,输水距离为 40 km 时,连通管为 1 根时,即可满足 $R_e \geq 0.70$ 的要求;当连通管数量从 1 增加到 30 时, R_e 从 0.714 增加到 0.950,即:假设每 1.29 km 设置一根连通管,其输水可靠度可达到 95%.

将表 1 中的数据绘制成图 4,可看出:相同连通管数目下,输水系统可靠性随输水距离的增加逐渐降低;相同的输水距离下,随着连通管数目的增加,输水系统可靠性逐渐增加,最终趋于稳定,表明增加

连通管数量可以增强可靠性,但实际工程中并不能保证为 100%。结合经济效益考虑,连通管设置数量并不是越多越好,在保证一定可靠度下,应科学设置连通管。

采用模型(16)计算输水距离为 20, 40, 60, ..., 200 km 时,相应的输水系统设计寿命期内输水距离 (L)、连通管间距(C_{PD})与系统可靠度(R_e)的关系如图 5 所示。

表 1 可靠度模拟计算结果

Tab. 1 Results of the reliability modeling

n	$L=40$ km		$L=60$ km		$L=80$ km		$L=100$ km	
	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e
0	40.00	0.661	60.00	0.565	80.00	0.493	100.00	0.438
1	20.00	0.714	30.00	0.617	40.00	0.538	50.00	0.474
2	13.33	0.755	20.00	0.663	26.67	0.585	33.33	0.518
3	10.00	0.786	15.00	0.700	20.00	0.625	25.00	0.558
4	8.00	0.810	12.00	0.730	16.00	0.657	20.00	0.592
5	6.67	0.829	10.00	0.754	13.33	0.685	16.67	0.621
6	5.71	0.844	8.57	0.774	11.43	0.708	14.29	0.647
7	5.00	0.857	7.50	0.791	10.00	0.728	12.50	0.669
8	4.44	0.868	6.67	0.805	8.89	0.746	11.11	0.689
9	4.00	0.877	6.00	0.818	8.00	0.761	10.00	0.706
10	3.64	0.885	5.45	0.829	7.27	0.774	9.09	0.721
11	3.33	0.892	5.00	0.839	6.67	0.786	8.33	0.735
12	3.08	0.898	4.62	0.848	6.15	0.797	7.69	0.748
13	2.86	0.904	4.29	0.855	5.71	0.807	7.14	0.759
14	2.67	0.909	4.00	0.862	5.33	0.816	6.67	0.769
15	2.50	0.913	3.75	0.869	5.00	0.824	6.25	0.779
16	2.35	0.917	3.53	0.874	4.71	0.831	5.88	0.788
17	2.22	0.921	3.33	0.880	4.44	0.838	5.56	0.796
18	2.11	0.924	3.16	0.885	4.21	0.844	5.26	0.803
19	2.00	0.927	3.00	0.889	4.00	0.850	5.00	0.810
20	1.90	0.930	2.86	0.893	3.81	0.855	4.76	0.816
21	1.82	0.933	2.73	0.897	3.64	0.860	4.55	0.822
22	1.74	0.935	2.61	0.901	3.48	0.865	4.35	0.828
23	1.67	0.938	2.50	0.904	3.33	0.869	4.17	0.833
24	1.60	0.940	2.40	0.907	3.20	0.873	4.00	0.838
25	1.54	0.942	2.31	0.910	3.08	0.877	3.85	0.843
26	1.48	0.943	2.22	0.913	2.96	0.881	3.70	0.847
27	1.43	0.945	2.14	0.915	2.86	0.884	3.57	0.852
28	1.38	0.947	2.07	0.918	2.76	0.887	3.45	0.856
29	1.33	0.948	2.00	0.920	2.67	0.890	3.33	0.859
30	1.29	0.950	1.94	0.922	2.58	0.893	3.23	0.863

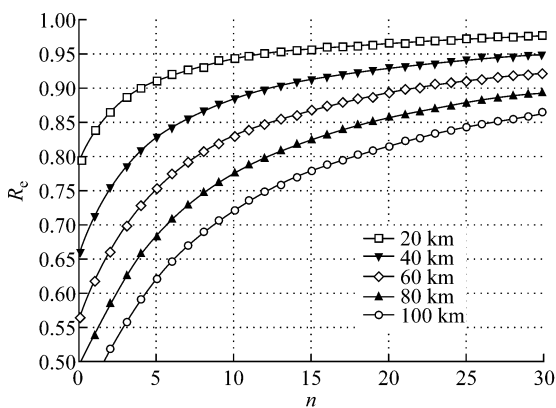


图 4 输水系统可靠度 R_e 与连通管数目 n 的关系图
Fig. 4 The diagram of reliability indicator R_e and the connection pipe number n

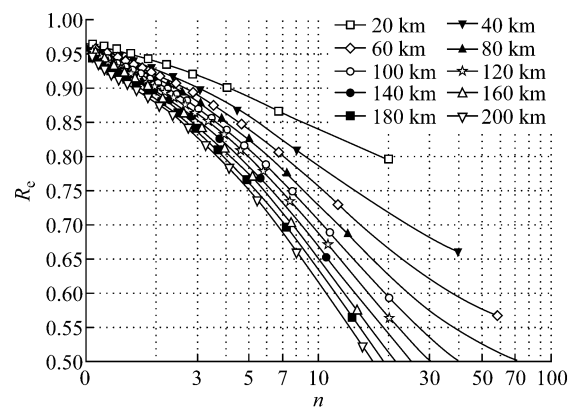


图 5 输水距离 L 、可靠度 R_e 与连通管间距 C_{PD} 关系图
Fig. 5 The diagram of transmission distance L , system reliability R_e and the internal of connection pipes C_{PD}

图 5 中横坐标轴采用对数坐标,清楚描述了不同输水距离下,系统可靠度 R_e 与 C_{PD} 的关系. 以输水距离为 120 km 为例,若保障输水可靠度 $R_e \geq 0.700$,则 C_{PD} 应满足 ($C_{PD} \leq 9.10$ km),即每隔 9.1 km 至少设置一个连通管,可以保障输水可靠度 $R_e \geq 0.700$.

图 5 同时表明:不同距离输水系统在设置相同 C_{PD} 时,其可靠度是不同的,即同样的 C_{PD} 并不能保证同样的可靠度. 以 $R_e = 0.70$ 为例,不同输水距离下连通管间距从大到小依次为, $C_{PD,20}$ 、 $C_{PD,40}$ 、 $C_{PD,60}$ 、

$C_{PD,80}$ 、 $C_{PD,100}$ 、 $C_{PD,120}$ 、 $C_{PD,140}$ 、 $C_{PD,160}$ 、 $C_{PD,180}$ 、 $C_{PD,200}$ ($C_{PD,20}$ 表示输水距离为 20 km 时连通管间距,以下类同),即不同输水距离下输水距离越大,达到相同可靠度所需的连通管间距越小;同样可得出同一连通管间距下,输水距离越小,系统可靠度越大;随连通管间距的减小,输水距离导致的可靠度差距逐渐减小.

综上所述,将表 1 及图 5 进行总结,可以得出表 2,输水系统 C_{PD} 与可靠度 R_e 直接的关系.

表 2 不同输水距离 L 下连通管间距 C_{PD} 与系统可靠度 R_e 建议值

Tab.2 The proposed values of C_{PD} and R_e with different L

$L=20$ km		$L=40$ km		$L=60$ km		$L=80$ km		$L=100$ km	
C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e
20.00	0.796	20.00	0.714	15.00	0.700	11.43	0.708	10.00	0.706
6.67	0.865	13.33	0.755	10.00	0.754	8.00	0.761	7.14	0.759
4.00	0.899	8.00	0.810	6.67	0.805	5.71	0.807	5.26	0.803
1.54	0.949	5.00	0.857	4.29	0.855	4.00	0.850	3.57	0.852
1.25	0.957	2.86	0.904	2.61	0.901	3.08	0.877	3.45	0.856
1.00	0.964	1.29	0.950	2.00	0.920	2.58	0.893	3.23	0.863
$L=120$ km		$L=140$ km		$L=160$ km		$L=180$ km		$L=200$ km	
C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e	C_{PD}/km	R_e
9.23	0.699	8.24	0.701	7.27	0.708	6.92	0.702	6.45	0.702
6.67	0.753	6.09	0.753	5.71	0.751	5.29	0.751	5.00	0.750
4.80	0.803	4.52	0.800	4.10	0.803	3.91	0.800	3.70	0.799
3.33	0.850	3.04	0.852	2.86	0.851	2.69	0.851	2.53	0.851
2.03	0.900	1.89	0.900	1.78	0.900	1.67	0.901	1.59	0.900
0.93	0.950	0.93	0.947	1.07	0.937	1.20	0.926	1.34	0.914

3 结论

输水管是连接水源与水厂的桥梁,是供水链上至关重要的一环,其可靠性研究对于保证供水安全,具有重要意义. 本文在国内外已有研究成果基础上,针对重力有压流长距离输水系统连通管设置间距与系统可靠度之间的关系,建立了可靠度数学模型;结合目前国内外长距离输水系统实际情况,模拟分析了不同输水规模连通管设置间距与可靠度之间的关系,研究表明:输水系统可靠性随着输水距离的增加而降低,随着连通管数量的增加、间距的减小而增加,最终接近平稳为某一极值 (≤ 1.00),即通过设置连通管可以提高系统的安全性,但不能达到 100%;输水距离不同时,达到相同可靠度其连通管设置间距是不同的;相同连通管间距在不同的输水系统中实际产生的可靠度是不同的.

采用所建立的数学模型计算并绘制了输水系统可靠度与连通管间距关系图,结果表明:不同输水距离下输水距离越大达到相同可靠度所需的连通管间

距越小;同一连通管间距下,输水距离越小,系统可靠度越大. 根据模拟计算,提出了不同输水距离下连通管间距设置的建议值.

参考文献:

[1] CHEN Yanbo, YU Taipin, LIU Junhua, et al. Study on the technology of supplying water safely by long-distance pipeline [J]. Journal of Northeast Agricultural University: English Edition, 2008, 15(3): 80.

[2] 未碧贵. 并联输水管道设计计算[J]. 供水技术, 2010, 4(6): 43.
WEI Bigui. Design and calculation for parallel delivery pipes [J]. Water Technology, 2010, 4(6): 43.

[3] Alperovits E, Shamir U. design of optimal water distribution systems[J]. Water Resource Research, 1977, 13(6):885.

[4] Tung Y K. Evaluation of water distribution network reliability [C]// Proceeding of the Specialty Conference of Hydraulic Division. Lake Buena Vista; ASCE, 1985;395-364.

[5] Wagner J, Shamir U, Marks D. Water distribution reliability: simulation methods[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(3): 276.

[6] Shamsi U. Computerized evaluation of water supply reliability [J]. IEEE Transaction on Reliability, 1990, 39(1): 35.

- [7] Fujiwara O, Tung H D. Reliability improvement for water distribution networks through increasing pipe size[J]. *Water Resources Research*, 1991, 27(7): 1395.
- [8] Mays L. Methodologies for reliability analysis of water distribution systems [C]// *Proceedings of reliability and Uncertainty Analysis in Hydraulic Design*. [S. l.]: American Society of Mechanical Engineers, 1993: 233-268.
- [9] Ostfeld A, Kogan D, Shamir U. Reliability simulation of water distribution systems—single and multiquality [J]. *Urban Water*, 2002, 4(1): 53.
- [10] Tabesh M, Soltani J, Farmani R, et al. Assessing pipe failure rate and mechanical reliability of water distribution networks using data-driven modeling[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2009, 11(1): 1.
- [11] Ciaponi C, Franchioli L, Papiri S. Simplified procedure for water distribution networks reliability assessment[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2011, 138(4): 368.
- [12] Gupta R, Bhawe P. Reliability analysis of water-distribution systems[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1994, 120(2): 447.
- [13] Bao Y, Mays L. Model for water distribution system reliability [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, 116(9): 1119.
- [14] Kleiner Y, Rajani B. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models [J]. *Urban Water*, 2001, 3(3): 131.
- [15] Su Y, Mays L, Duan N, et al. Reliability-based optimization model for water distribution systems[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1987, 113(12): 1539.
- [16] Cullinane M, Lansey K, Mays L. Optimization-availability-based design of water-distribution networks [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118(3): 420.

(上接第 886 页)

- [6] Assad A. Models for rail transportation [J]. *Transportation Research A*, 1980, 14: 205.
- [7] Szpigel B. Optimal train scheduling on a single track railway [J]. *Operational Research*, 1972, 72: 343.
- [8] Jovanovic D, Harker P. Tactical scheduling of rail operations: the SCAN I system [J]. *Transportation Science*, 1991, 25: 46.
- [9] Higgins A, Kozan E, Ferreira L. Optimal scheduling of trains on a single line track [J]. *Transportation Research B*, 1996, 30, 147.
- [10] 石先明. 对我国客运专线列车追踪间隔时分的研究[J]. *中国铁路*, 2005, 7(5): 32.
SHI Xianming. Research on the headway time of passenger train in China [J]. *China Railway*, 2005, 7(5): 32.
- [11] 杨浩. 铁路运输组织学[M]. 北京:中国铁道出版社, 2001.
YANG Hao. *Railway transport operation*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.
- [12] 张博, 钱伟. 自动闭塞区段通过信号机布置方法探讨[J]. *铁道通信信号*, 2009, 45(11): 1.
ZHANG Bo, QIAN Wei. Through signal layout method of automatic block sections [J]. *Railway Communication Signal*, 2009, 45(11): 1.
- [13] 孟学雷. 突发事件条件下列车运行组织理论与方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
MENG Xuelei. Theories and methods on train operating in emergency [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [14] 刘宝碇, 彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
LIU Baoding, PENG Jin. *A course in uncertainty theory*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] 王莉. 突发事件条件下铁路行车组织模糊随机优化方法[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
WANG Li. Fuzzy random optimization for train operation in emergency [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [16] Pardo J M, de la Fuente D. Fuzzy Markovian decision processes: application to queueing systems[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2010, 60(9): 2526.