

# 基于寿命分布理论的串联输水系统防洪风险研究

王仲珏, 詹水芬, 王绪亭

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

**摘要:** 根据连续型寿命分布理论, 充分利用历史数据, 给出了 Weibull 分布条件下串联水工建筑系统的可靠度计算模型。结合南水北调中线总干渠河北段进行了实际应用, 建立了南水北调中线河北段输水串联系统建筑物在不同使用期的防洪风险估算模型。结果表明: 水工建筑的防洪风险不仅与传统的设计标准有关, 还与使用时间有着密切的关系, 建立了动态水工建筑物防洪风险评价模型。

**关键词:** 连续型寿命分布; Weibull 分布; 串联系统; 防洪风险; 可靠度; 水工建筑物

中图分类号: TV672.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0078-03

## Research on flood risk of series water transfer project system based on theory of life distribution

WANG Zhongjue, ZHAN Shuifen, WANG Xuting

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** According to the theory of continuous life, the paper gave distribution flood risk assessment model of series linked hydraulic structures system in different serving periods on the condition of weibull distribution by the full use of history flood information. The model was applied in Hebei section of middle route main canal in south to north water transfer project. The paper set up the estimation model of flood risk of series linked water construction of the section in different serving periods. The results showed that flood risk of series linked water construction is closely related to not only the traditional design standard but also serving period. The paper established the evaluation model of flood risk of dynamic hydraulic structures.

**Key words:** continuous life distribution theory; Weibull distribution; series linked system; flood risk; reliability; hydraulic structure

## 1 研究背景

南水北调中线河北省段沿线水系众多, 因此需要修建大量的跨河交叉建筑物。中线河北省段左侧属于太行山东麓, 受地形抬升作用, 每年夏季是暴雨的集中区。在历史上多次造成巨大的洪水灾害。并且, 南水北调中线河北省段的走向几乎与所有交叉河流正交、斜交, 因而更容易受到洪水的冲击。如果南水北调中线河北省段遭遇超过设计标准的洪水, 冲毁其中任一座交叉建筑物, 不仅会影响整个输水工程的正常运行, 甚至会导致输水中断, 还会加剧洪水灾害, 直接威胁到京广铁路和城市的安全。由此可见, 南水北调中线整体的防洪风险问题值得深入研究。但是目前为止, 关于长距离输水系统的防洪风险模型还很不成熟。

在国内, 对于水工建筑物的风险分析方法种类繁多。贾超等<sup>[1]</sup>分析南水北调中线工程渡槽结构的风险。雷杰<sup>[2]</sup>基于响应面法分析了南水北调中线工程渡槽结构的可靠度。李正农, 刘华袁等<sup>[3]</sup>利用有限元分析了南水北调中线工程河北段的洛河渡槽的抗震性能。但他们都是从渡槽本身的力学性质分析结构的可靠度, 没有从防洪风险的角度探讨在洪水作用下整个南水北调中线工程河北段的水毁风险。冯平等<sup>[4]</sup>探讨水库提高汛限水位的可能性, 采用一阶自回归模型对入库洪水进行了模拟, 并考虑了泄洪能力的不确定性等不同典型洪水过程和历史特大洪水等因素的影响。王宏伟等<sup>[5]</sup>综合运用广义结构可靠性原理及模糊数学等多种相关学科理论, 提出了跨河桥梁工程的防洪风险评价理念, 对桥

梁在防洪风险中的模糊随机性风险因素发生的概率进行了理论模型计算。这些防洪风险分析方法都是对单个水工建筑物而言,而且没有考虑时间参数的作用。冯平等<sup>[6]</sup>提出了先建立二维复合事件风险组合模型,然后再进行两两组合,逐步给出串联引水工程防洪风险的估算方法。王仲珏等<sup>[7]</sup>从可靠度角度讨论了南水北调中线工程河北段的水毁风险。这些研究虽然各出了整个串联系统的防洪分线,但都忽略了时间参数对结构可靠度的影响。王仲珏等<sup>[8]</sup>从时变可靠度理论讨论了南水北调中线工程单个渡槽的时变水毁风险,但是没有给出整个串联系统的防洪风险。

在国外,防洪风险领域的研究方法也是多种多样,例如 Li Qiong 等<sup>[9]</sup>利用模糊变量集和信息流理论,分析了长江流域的防洪风险。Zou Qiang 等<sup>[10]</sup>利用 $\alpha$ 截集和内集-外集模型理论于广东三水的流域洪水风险分析。综上所述,所有这些研究都没有考虑时间因素对防洪风险的影响,本文即针对这个问题,提出了串联系统的时变防洪风险计算模型。

## 2 基于连续型寿命分布的串联系统防洪风险估算方法

瑞典工程师威布尔采用了“链式”模型来解释结构强度和寿命问题。这个模型假设一个结构是由若干小元件(设为 $n$ 个)串联而成,于是可以形象地将结构看成是由 $n$ 个环构成的一条链条,其强度(或寿命)取决于最薄弱环的强度(或寿命)。单个链的强度(或寿命)为一随机变量,设各环强度(或寿命)相互独立,分布相同,则求链强度(或寿命)的概率分布就变成求极小值分布问题,由此给出威布尔分布函数。由于串联水系统的防洪风险也应取决于其最薄弱环节的强度,也应能用威布尔分布描述。

由于威布尔分布是根据最薄弱环节模型或串联模型得到的,能充分反映结构缺陷和应力集中源对结构疲劳寿命的影响,而且具有递增的失效率,所以,将它作为串联系统的寿命分布模型是合适的。假设系统由 $n$ 个部件串联而成,任意部件失效就引起系统失效,如图1表示 $n$ 个部件串联系统的可靠性示意图。令第 $i$ 个部件的寿命为 $X_i$ ,可靠度为: $R_i(t) = P(X_i > t)$ , $i = 1, 2, \dots, n$ ,其中 $t$ 为时间,则第 $i$ 个部件的寿命分布函数为: $F_i(t) = P(X_i \leq t) = 1 - R_i(t)$ , $i = 1, 2, \dots, n$ ,其密度函数为 $f_i(t) = F_i'(t)$ , $i = 1, 2, \dots, n$ 。假定 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 相互独立。若初始时刻 $t = 0$ ,所有部件都是新的,且同时开始工作。

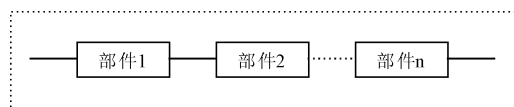


图1 串联系统示意图

显然上述串联系统的寿命是 $X = \min(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,故系统的可靠度为:

$$\begin{aligned} R(t) &= P\{\min(X_1, X_2, \dots, X_n) > t\} \\ &= P\{X_1 > t, X_2 > t, \dots, X_n > t\} \\ &= \prod_{i=1}^n P\{X_i > t\} = \prod_{i=1}^n R_i(t) \end{aligned} \quad (1)$$

定义第 $i$ 个部件的失效率函数为:

$$\begin{aligned} r_i(t) &= \frac{f_i(t)}{1 - F_i(t)} = -\frac{d \ln(1 - F_i(t))}{dt} \\ t &\in \{t: F(t) < 1\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$1 - F_i(t) = C \exp\left\{-\int_0^t r_i(u) du\right\} \quad (3)$$

如果 $F(0) = 0$ ,  $C = 1$ ,则:

$$R_i(t) = \exp\left\{-\int_0^t r_i(u) du\right\} \quad (4)$$

则串联系统的可靠度为:

$$\begin{aligned} R(t) &= \prod_{i=1}^n \exp\left\{-\int_0^t r_i(u) du\right\} \\ &= \exp\left\{-\int_0^t \sum_{i=1}^n r_i(u) du\right\} \end{aligned} \quad (5)$$

串联系统的失效率为:

$$r(t) = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \sum_{i=1}^n r_i(t) \quad (6)$$

因此,一个由独立部件组成的串联系统的失效概率不是系统中失效概率最大元件的失效概率,而是所有部件失效概率之和,因此系统的平均寿命:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \exp\left\{-\int_0^t r(u) du\right\} dt \quad (7)$$

当元件寿命的失效率函数 $r_i(t) = -\lambda_i \alpha_i (\lambda_i t)^{(\alpha_i-1)}$ , $i = 1, 2, \dots, n$ 时,即当第 $i$ 个部件的寿命遵从Weibull分布时,系统的可靠度为:

$$R(t) = \exp\left\{-\sum_{i=1}^n (\lambda_i t)^{\alpha_i}\right\} \quad (8)$$

式中: $\lambda_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 分别是Weibull分布的尺度参数和形状参数,可根据历史资料拟合。

## 3 实例分析

南水北调中线工程河北段长461 km,跨越河流上百条,主要与21条河流相交,其跨河建筑物的结

构形式为倒虹吸、渡槽。这 21 条河流上的交叉建筑物构成一个典型的串联系统。其中放水河、水北沟、漕河 3 条河流的跨河建筑物形式是渡槽。曲逆河、太平河、蒲阳河、磁河、北易水、南拒马河、滹沱河、沙河、孟良河、坟庄河、界河、漠道沟、瀑河、中易水、古运河、唐河、北拒马河南支、马头沟等 18 条河流的交叉建筑物形式为倒虹吸。他们属总干渠上的主要建筑物,工程设计标准为一等,建筑物级别为 1 级,防洪标准为 100 年一遇洪水设计,300 年一遇洪水校核。本文根据这个串联系统为例,研究南水北调中线工程河北段的水毁风险。

根据校核洪水的概念,可以认为串联系统中所有元件(渡槽或倒虹吸)遇到 300 年一遇的洪峰流量时元件失效。因此串联系统元件的寿命分布函数可以看作是其相应河流流量的分布函数,进而可以用连续型寿命分布理论计算这个串联系统的可靠度。我们根据历史径流数据资料分析,按照 weibull 分布拟合了 21 个元件所跨越的河流的洪峰流量。部分结果如下表 1。

| 表 1 古运河、太平河设计洪峰流量表 |      |     |     |     |     | a, m <sup>3</sup> /s |
|--------------------|------|-----|-----|-----|-----|----------------------|
| 重现期                | 300  | 100 | 50  | 20  | 10  | 5                    |
| 古运河                | 1156 | 755 | 538 | 309 | 179 | 91                   |
| 太平河                | 1466 | 966 | 690 | 397 | 230 | 116                  |

并根据 Weibull 分布函数,计算了 21 个元件的寿命分布函数参数,部分结果见表 2。

| 表 2 古运河、太平河元件寿命参数表 |          |             |             |        |             |             |
|--------------------|----------|-------------|-------------|--------|-------------|-------------|
| 河流                 | 1/λ      | 95%置<br>信下限 | 95%置<br>信上限 | α      | 95%置<br>信下限 | 95%置<br>信上限 |
| 古运河                | 707.4560 | 385.3       | 1298.8      | 1.3902 | 2.6         | 0.7         |
| 太平河                | 553.8352 | 300.6       | 1020.3      | 1.3827 | 2.6         | 0.7         |

最后根据式(8)计算了串联系统在 50 年、100 年、200 年、300 年使用期内的防洪风险。结果见表 3。从表 3 的结果可以看出:使用期越短,串联系统的防洪风险越小,最小的防洪风险为 28% 左右,是在使用期为 50 年。相反,使用期越长串联系统的防洪风险越大,这个计算结果是符合常理的。

| 表 3 不同使用期下串联系统的防洪风险 |     |     |     |     | a |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|---|
| 设计标准                | 50  | 100 | 200 | 300 |   |
| 300 年一遇             | 28% | 58% | 89% | 98% |   |

从表 3 中还可以看出:水工建筑物以往采用的防洪设计标准只表示长期运行情况下工程遭遇超标洪水的概率,是个静态的指标。随着使用时间的推

移,工程结构或多或少存在老化问题,工程的强度也逐渐减弱,因此传统的防洪风险无法表示工程在不同使用期内的防洪风险。例如表中建筑物的设计标准是 300 年一遇,但是工程的防洪风险随建筑物的使用期长短而发生变化。计算结果显示,在 50 年使用期内,在 300 年一遇设计标准下南水北调中线河北段串联系统的防洪风险为 28%,与 299/300 的防洪风险相差甚远。在 300 年使用期内,在 300 年一遇设计标准下建筑物的防洪风险为 98%,与 299/300 的防洪风险接近。

## 4 结 语

本文利用连续型寿命分布理论,首次建立了串联系统水工建筑物在任意使用期内的防洪风险分析模型。模型对水工建筑物的规划、设计、管理有一定的参考价值。需要指出的是以上推论是基于串联系统元件寿命是相互独立的假设。但实际上一场流域性洪水可能同时对流域内的多个元件寿命造成影响。因此,如何计算串联系统元件寿命的相关性对整体系统的防洪风险的影响程度是值得进一步探讨的问题。另外,串联系统元件寿命的分布形式,分布函数的尺度参数和形状参数,也有待进一步深入研究。

### 参考文献:

[1] 贾超,刘宁,陈进,等.南水北调中线工程渡槽结构风险分析[J].水力发电,2003,29(7):23-27.

[2] 雷杰.某预应力排水渡槽结构设计及可靠度分析研究[D].杭州:浙江大学,2003.

[3] 李正农,刘华,袁文阳,等.洛河渡槽抗震可靠度分析[J].中国农村水利水电,2000(11):29-31.

[4] 冯平,韩松.提高水库汛限水位的防洪风险分析[J].天津大学学报,2007,40(5):525-529.

[5] 王宏伟,余建星,谢忠伟.基于模糊随机理论的桥梁防洪风险概率分析[J].自然灾害学报,2009,18(3):60-64.

[6] 冯平,闫大鹏,耿六成,等.南水北调中线总干渠防洪风险评估方法的研究[J].水利学报,2003,34(4):40-45.

[7] 冯平,王仲珏,刘增明.长距离输水工程综合水毁风险的估算方法及其应用[J].水利学报,2007,38(11):1388-1392.

[8] 王仲珏,冯平.基于时变可靠度的水工建筑物防洪风险估算[J].天津大学学报,2008,41(11):1333-1336.

[9] Li Qiong, Zhou Jianzhong, Liu Donghan, et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion[J]. Safety Science, 2012,50(5):1275-1283.

[10] Zou Qiang, Zhou Jianzhong, Zhou Chao, et al. The practical research on flood risk analysis based on IIOSM and fuzzy α-cut technique[J]. Applied Mathematical Modelling 2012,36(7):3271-3282.