

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222399

# 参数分布类型对水工钢闸门可靠性影响分析

胡涛勇, 韩一峰, 石守津, 周以达

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 基于水工钢闸门在正常使用极限状态下相对变形破坏和承载能力极限状态下抗弯剪复合强度破坏两种破坏模式, 分别建立了相应的失效概率分析模型, 通过蒙特卡罗模拟, 探讨了不同参数分布类型对平板钢闸门中露顶门和潜孔门两种破坏模式失效概率的影响。结果表明, 在同一失效模式下, 当变量自身变异性保持不变时, 其不同分布类型得出的失效概率比较接近, 相较于露顶门, 潜孔门失效概率更大, 更容易失稳; 但参数分布类型对潜孔门失效概率影响较小, 对露顶门影响较大; 各参数变量服从对数正态分布时, 不论露顶门还是潜孔门均会出现相对于正态分布更大的失效概率, 若仅考虑变量的正态分布类型则容易引起对水工钢闸门可靠性过高的估计。

**关键词:** 水工钢闸门; 可靠性; 蒙特卡罗模拟; 参数分布类型; 失效概率

**中图分类号:** TV663<sup>+</sup>.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0216-04

## 1 引言

主梁稳定性是水工钢闸门安全运行的核心问题之一, 目前基于传统容许应力法分析其稳定性成果已比较丰富, 但是由于主梁结构材料参数及外部荷载等参数的不确定性<sup>[1]</sup>, 对钢闸门主梁进行传统的稳定性分析往往会忽略这些不确定性因素, 从而高估其稳定性。因此, 开展闸门结构的可靠性设计, 是降低其运行风险的一种有效手段。余向明等<sup>[2-3]</sup>利用JC法对闸门的可靠度进行了初步的安全评估; 吴帅兵等<sup>[4]</sup>采用自适应重要抽样方法分析了钢闸门系统可靠度。此外, 李典庆等<sup>[5]</sup>根据水工钢闸门强度极限承载能力, 确定了主梁受弯、受剪和弯剪复合破坏模式下的极限状态方程, 但由于水工钢闸门在正常使用中并非完全达到主梁的强度承载能力极限才定义为破坏, 因此有必要考虑正常使用极限状态下的可靠性。研究表明, 主梁外部荷载及材料参数等变量多服从均匀分布、正态分布、对数正态分布<sup>[6-7]</sup>等, 且以正态分布、对数正态分布最为常见, 但现有研究在计算钢闸门可靠性时均假设参数服从某一固定的分布形式<sup>[8-9]</sup>, 关于参数不同分布类型对钢闸门可靠性的影响研究较少。为此, 本文以露顶门和潜孔门为例, 分别从主梁正常使用极限状态和承载

能力极限状态出发, 建立了两种破坏模式下的概率模型, 重点研究了荷载参数与强度参数分布类型对可靠性结果的影响。

## 2 蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗模拟是一种相对精确的可靠性分析方法, 通过对影响可靠度的随机变量进行大量随机抽样, 并将其输入功能函数, 以功能函数值小于零为失效样本, 通过统计失效样本的数量来确定失效概率。当抽样次数达到一定值时, 得到的失效频率将接近于失效概率<sup>[10]</sup>。

对于水工钢闸门可靠度问题, 可根据结构受力状况和破坏模式建立相应的极限方程, 并以此得出功能函数  $g(x)$ , 再依据各参数随机变量分布类型、变异系数  $\delta$  及相关性等进行抽样, 将样本代入功能函数中, 便可得出相应的失效概率  $P_f$ , 计算式为:

$$g(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$P_f = \frac{1}{N_{MCS}} \sum_{i=1}^N g [F(x) < 0] \quad (2)$$

式中,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  分别为钢闸门外部受力荷载、弹性模量、主梁惯性矩等随机变量;  $N_{MCS}$  为蒙特卡罗抽样次数。

蒙特卡罗模拟分析流程见图 1。

收稿日期: 2022-11-14, 修回日期: 2022-12-19

作者简介: 胡涛勇(1977-), 男, 高级工程师, 研究方向为工程设计及项目管理, E-mail: yantijiegou@126.com

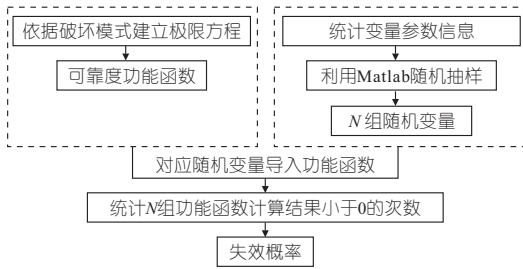


图 1 蒙特卡罗模拟流程图

Fig. 1 Flow chart of Monte Carlo simulation

### 3 两种失效模式下的概率模型

水工钢闸门类型较多,以平板钢闸门为例,从相对变形破坏模式和弯剪复合强度破坏模式出发,分别建立水工钢闸门相应正常使用极限状态和承载能力极限状态下的失效概率计算模型。钢闸门主梁通常可简化为受均布载荷的简支梁,截面为焊接工字钢,见图 2。图 2 中,  $b$  为上下翼缘宽度;  $h$  为焊接工字钢截面高度;  $t$  为翼缘及腹板厚度。

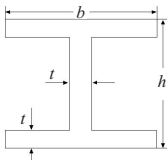


图 2 主梁工字钢截面

Fig. 2 Main beam I-beam cross-section

#### 3.1 正常使用极限状态相对变形破坏概率模型

当钢闸门主梁简化为简支梁时,其相对变形  $f$  为:

$$f = w/l = 5ql^3 / (384EI) \quad (3)$$

式中,  $w$  为挠度;  $l$  为主梁的跨长;  $q$  为静水压力荷载;  $E$  为主梁工字钢的弹性模量;  $I$  为主梁截面惯性矩。

根据水闸设计规范<sup>[11]</sup>,在正常使用极限状态主梁相对变形验算满足下式:

$$f \leq [f] \quad (4)$$

式中,  $f$  为规范规定的相对变形允许值。

由式(3)、(4)可建立水工钢闸门在正常使用极限状态下相对变形极限方程:

$$5ql^3 / (384EI) - [f] = 0 \quad (5)$$

相应的功能函数  $g_i$  为:

$$g_i = 5q_i l^3 / (384E_i I_i) - [f_i] \quad (6)$$

式中,  $E_i$ 、 $I_i$ 、 $q_i$ 、 $[f_i]$  分别为弹性模量、惯性矩、静水压力荷载、相对变形限值。

仅考虑闸门的正常运行工况,则外部荷载为静水压力荷载  $q_i$ ,该变量可服从正态分布和对数

正态分布;主梁材料参数中,将弹性模量  $E_i$ 、惯性矩  $I_i$  视为变量,也考虑正态分布和对数正态分布两种类型。

由于主梁的相对变形限值一般为模糊变量,需进行模糊可靠度分析<sup>[12]</sup>,但对水工钢闸门结构进行模糊刚度可靠度分析时,由于缺乏工程资料,无法通过模糊统计法等常见方法明确主梁相对变形模糊限值的隶属函数<sup>[12]</sup>,依据钢闸门主梁相对变形特点,选择降半梯形隶属函数<sup>[13]</sup>,其表达式为:

$$u(f) = \begin{cases} 0 & f \leq f_1 \\ (f - f_1) / (f_2 - f_1) & f_1 < f \leq f_2 \\ 1 & f \geq f_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $f_1$ 、 $f_2$  分别为相对变形允许值的模糊上下限值<sup>[13]</sup>,且露顶门  $f_2 = 1.1f_1$ 、 $f_1 = 1/600$ ,潜孔门  $f_2 = 1.05f_1$ 、 $f_1 = 1/750$ 。

在功能函数(式(6))中含有模糊随机变量  $[f_i]$ ,无法采用蒙特卡罗可靠度计算,故在考虑有模糊变量存在时,可利用当量随机法,将满足降半梯形隶属函数的模糊变量  $[f_i]$ ,用一个等效的随机变量进行代替<sup>[8-9]</sup>。模糊隶属函数当量随机化后所得变量将服从均匀分布,其范围为  $f_1 \sim f_2$ ,且均值  $m_f$  和方差  $\sigma_f$  分别为:

$$\begin{cases} m_f = (f_1 + f_2) / 2 \\ \sigma_f = (f_2 - f_1) / 2\sqrt{3} \end{cases} \quad (8)$$

#### 3.2 承载力极限状态弯剪复合强度破坏概率模型

水工钢闸门主梁存在受弯、受剪和弯剪复合破坏等强度破坏模式,以受弯剪复合破坏模式<sup>[6]</sup>建立极限方程。工字形截面梁的剪力主要由腹板来承受,而弯矩主要由翼缘承受,在弯剪复合破坏时验算断面一般选取在主梁变高度处,其位置一般为距支座  $(1/4 \sim 1/6)L$  处,强度验算点取在主梁腹板高度改变处的截面内下翼缘与腹板相交点。故截面验算点处剪切应力  $\tau$  和弯曲正应力  $\sigma$  分别为:

$$\begin{cases} \tau = F_q A / (It) \\ \sigma = M / W \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $F_q$ 、 $M$  分别为主梁腹板高度改变处由静水压力荷载计算的截面剪力、弯矩;  $A$  为面积矩;  $W$  为抗弯截面模量。

简支梁弯剪复合破坏时对应弯矩、剪力、抗弯截面模量及惯性矩<sup>[10]</sup>分别为:

$$\begin{cases} M = ql^2 / 4 \\ F_q = ql / 2 \\ W = I / (2b) \\ I = 40tb^3 / 3 \end{cases} \quad (10)$$

故剪切应力  $\tau$  和弯曲正应力  $\sigma$  可转化为:

$$\begin{cases} \tau = ql / [(2(b-t)t)] \\ \sigma = 3ql^2 / (20tb^2) \end{cases} \quad (11)$$

由第四强度理论得弯剪复合应力  $S$  为:

$$S = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (12)$$

根据主梁承载极限应力可建立强度破坏极限方程:

$$S - R = 0 \quad (13)$$

式中,  $R$  为主梁能抵抗的最大抗力。

故对应的可靠度功能函数  $g_i$  为:

$$g_i = \sqrt{\frac{9q_i^2 l^4}{400t_i^2 b_i^4} + \frac{3q_i^2 l^2}{4(b_i - t_i)^2 t_i^2}} - R_i \quad (14)$$

式中,  $b_i, t_i, q_i, R_i$  分别为翼缘宽度、翼缘厚度、静水压力荷载、抗力等随机变量。

## 4 两种失效模式下的水工钢闸门可靠性影响分析

### 4.1 正常使用极限状态下的可靠性影响分析

为研究参数分布类型对水工闸门正常使用极限状态下的可靠性影响,以平板钢闸门为例,采用所建立的相对变形破坏概率模型开展失效概率计算。计算中,参数不确定性均由随机变量标准值与标准差比值  $K$  和变异系数  $\delta$  来描述,参数具体取值参考文献[9],表 1 为正常使用极限状态下相对变形破坏失效概率模型对应露顶门与潜孔门各变量统计值[9]。

表 1 正常使用极限状态下参数随机变量统计表

Tab.1 Parameter statistics table in normal usage limit state

| 露顶门/潜孔门 | $K$       | $\delta$   | 分布类型    |
|---------|-----------|------------|---------|
| $E$     | 1.0       | 0.06       | 正态/对数正态 |
| $I$     | 1.0       | 0.023      | 正态/对数正态 |
| $q$     | 0.55/0.90 | 0.45/0.135 | 正态/对数正态 |
| $[f]$   |           |            | 均匀分布    |

#### 4.1.1 露顶门 $P_f$

由表 1 可知,露顶门主梁材料参数  $E$ 、惯性矩  $I$  均服从正态或对数正态分布,  $K_E = K_I = 1.0$ ,  $\delta_E = 0.06, \delta_I = 0.023$ ; 外部荷载静水压力参数也服从正态或对数正态分布,  $K_q = 0.55, \delta_q = 0.45$ ; 而相对变形允许值  $[f]$  服从  $[f_1, 1.1f_1]$  的均匀分布, 其中  $f_1 = 1/600$ 。结合式(6)的功能函数可知, 存在 4 个变量, 其中  $E, I, q$  均存在两种分布形式,  $[f]$  服从均匀分布, 3 种变量分布形式相互组合共有 8 种工况, 相应的失效概率计算结果见表 2。表 2 中, N 代表正态分布, LN 代表对数正态分布。

表 2 露顶门、潜孔门正常使用极限状态下失效概率

Tab.2 Probability of failure of outcrop gate and deep-hole gate under limit state of normal use

| 分布类型 |     |     | 露顶门      | 潜孔门      | 分布类型 |     |     | 露顶门      | 潜孔门      |
|------|-----|-----|----------|----------|------|-----|-----|----------|----------|
| $E$  | $I$ | $q$ | $P_f/\%$ | $P_f/\%$ | $E$  | $I$ | $q$ | $P_f/\%$ | $P_f/\%$ |
| N    | N   | N   | 2.4      | 17.9     | LN   | N   | N   | 3.1      | 18.2     |
| N    | N   | LN  | 3.1      | 18.5     | LN   | N   | LN  | 3.8      | 18.6     |
| N    | LN  | N   | 2.7      | 18.4     | LN   | LN  | N   | 3.2      | 18.1     |
| N    | LN  | LN  | 3.6      | 18.5     | LN   | LN  | LN  | 4.1      | 18.7     |

由表 2 可知, 当  $E, I, q$  变量均服从正态分布时, 有最小失效概率  $P_{fmin} = 0.024$ , 当  $E, I, q$  变量均服从对数正态分布时, 有最大失效概率  $P_{fmax} = 0.041$ , 可看出当参数随机变量服从对数正态分布时总体计算结果大于正态分布; 同时, 可看出静水荷载变量分布类型对闸门失效概率最为敏感, 弹性模量次之, 而惯性矩参数分布类型的影响相对较小。

#### 4.1.2 潜孔门 $P_f$

潜孔门计算中, 主梁弹性模量  $E$ 、惯性矩  $I$  参数变异性与分布类型均与露顶门一致, 静水压力荷载  $K_q = 0.90, \delta_q = 0.135$ , 分布类型也与露顶门相应一致。表 2 为各组合下的潜孔门失效概率计算结果。

由表 2 可知, 钢闸门在正常使用极限状态对应的相对变形破坏模式下, 潜孔门失效概率明显大于露顶门的失效概率, 可见外部静水压力荷载的不确定性对水工钢闸门失效概率影响较大。此外, 不同参数分布类型组合下, 露顶门的  $P_{fmax}$  约为  $P_{fmin}$  的 1.71 倍, 而潜孔门的  $P_{fmax}$  与  $P_{fmin}$  比较接近, 前者仅为后者 1.04 倍, 可见参数分布类型对露顶门失效概率影响明显大于对潜孔门的影响。整体而言, 对于两种闸门, 当参数分布服从对数正态分布时将会得出相对较大的失效概率。

### 4.2 承载能力极限状态下的可靠性影响分析

以平板钢闸门为例, 探讨参数分布类型对其承载力极限状态下的可靠性影响。表 3 为露顶门与潜孔门在承载能力极限状态下抗弯剪复合强度破坏失效概率模型对应各随机变量统计值[3,9]。

表 3 承载能力极限状态下参数随机变量统计表

Tab.3 Parameter statistics table in bearer capacity limit state

| 露顶门/潜孔门 | $K$       | $\delta$   | 分布类型    |
|---------|-----------|------------|---------|
| $t$     | 1.0       | 0.022 0    | 正态/对数正态 |
| $b$     | 1.0       | 0.002 2    | 正态/对数正态 |
| $q$     | 0.55/0.90 | 0.45/0.135 | 正态/对数正态 |
| $R$     | 1.05      | 0.129      | 正态/对数正态 |

#### 4.2.1 露顶门 $P_f$

依据表 3, 露顶门主梁材料参数  $t, b$  及外部荷载静水压力  $q$  和抗力  $R$  均可服从正态或对数

正态分布。由式(14)给出的功能函数可知,其存在 4 个变量,即  $t$ 、 $b$ 、 $q$ 、 $R$ ,均可服从正态分布和对数正态分布,共有 16 种计算工况,相应的失效概率计算结果见表 4。

表 4 露顶门、潜孔门承载能力极限状态下失效概率

Tab. 4 Probability of failure in limit state of bearing capacity of outcrop gate

| 分布类型 |     | 露顶门 |     | 潜孔门      |          | 分布类型 |     | 露顶门 |     | 潜孔门      |          |
|------|-----|-----|-----|----------|----------|------|-----|-----|-----|----------|----------|
| $t$  | $b$ | $q$ | $R$ | $P_f/\%$ | $P_f/\%$ | $t$  | $b$ | $q$ | $R$ | $P_f/\%$ | $P_f/\%$ |
| N    | N   | N   | N   | 0.6      | 12.5     | LN   | N   | N   | N   | 0.9      | 12.5     |
| N    | N   | N   | LN  | 0.7      | 12.6     | LN   | N   | N   | LN  | 1.2      | 12.7     |
| N    | N   | LN  | N   | 0.7      | 12.6     | LN   | N   | LN  | N   | 1.2      | 12.6     |
| N    | N   | LN  | LN  | 0.9      | 12.8     | LN   | N   | LN  | LN  | 1.3      | 12.9     |
| N    | LN  | N   | N   | 0.8      | 12.5     | LN   | LN  | N   | N   | 1.1      | 12.5     |
| N    | LN  | N   | LN  | 0.7      | 12.6     | LN   | LN  | N   | LN  | 1.4      | 12.8     |
| N    | LN  | LN  | N   | 0.8      | 12.6     | LN   | LN  | LN  | N   | 1.3      | 12.6     |
| N    | LN  | LN  | LN  | 1.1      | 12.9     | LN   | LN  | LN  | LN  | 1.6      | 13.1     |

结合表 2 与表 4 计算结果可知,露顶门在承载能力极限状态下失效概率远小于正常使用极限状态的失效概率,这与已有结论一致<sup>[3]</sup>,相对于承载能力极限状态破坏,钢闸门更易出现正常使用极限状态破坏情况。表 4 中,当变量均为正态分布时有  $P_{fmin}=0.006$ ,均服从对数正态分布时有  $P_{fmax}=0.016$ ,增幅接近于 2.7 倍,可见在承载能力强度破坏模式下,参数分布类型对露顶门失效概率影响依然较大。

#### 4.2.2 潜孔门 $P_f$

潜孔门计算中,主梁翼缘厚度  $t$ 、上下翼缘宽度  $b$ 、抗力  $R$  变异性与分布类型均与露顶门保持一致,静水压力荷载  $K_q=0.90$ 、 $\delta_q=0.135$ ,分布类型与其他参数相同,潜孔门失效概率计算结果见表 4。

对比表 2 与表 4 可知,潜孔门在正常使用极限状态下失效概率也明显大于承载能力极限状态下的结果,同时,对于潜孔门, $P_{fmin}=0.125$ ,最不利组合下的  $P_{fmax}=0.131$ ,增幅仅为 6%。相对于露顶门,在承载能力极限状态下,潜孔门主梁材料参数与外部荷载参数分布类型对失效概率影响较小,但参数变量服从对数正态分布时计算结果更大。

## 5 结论

a. 相应于正常使用极限状态和承载能力极限状态所建立的失效概率分析模型,当变量变异性保持相同时,不同分布类型组合下,水工钢闸门在变量服从对数正态分布时出现相对较大的失效概率,仅考虑变量的正态分布将出现对闸门结构可靠性的过高估计。

b. 在相同失效模式下,潜孔门比露顶门的失效概率更大,但参数随机变量分布类型对露顶闸门失效概率的影响又大于潜孔门,其中静水压力荷载参数较其他材料和几何参数对钢闸门失效概率更为敏感,工程设计中更应关注水荷载的统计特性。

c. 钢闸门在正常使用极限状态的失效概率明显大于其承载能力极限状态下的失效概率,因此开展钢闸门可靠性分析时,在考虑承载能力极限状态下的强度破坏时,更应关注正常使用状态下的相对变形破坏等问题。

## 参考文献:

- [1] 谢明志,杨永清,庄重,等. 结构不确定性对高速铁路矮塔斜拉桥概率地震需求的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(6):1475-1484.
- [2] 余向明,刘晓青,岳梦霞. 基于 JC 法的水工钢闸门可靠度分析[J]. 中国农村水利水电,2009(2):121-123,129.
- [3] 周建方,李典庆,李朝晖,等. 水工钢闸门结构正常使用极限状态可靠度分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003(3):310-313.
- [4] 吴帅兵,胡冉,李典庆. 钢闸门主梁可靠度敏感性分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2009,42(1):20-24.
- [5] 李典庆,吴帅兵. 水工平面钢闸门主梁多失效模式相关的系统可靠度分析[J]. 水利学报,2009,40(7):870-877.
- [6] 陈国兴,李继华. 钢构件材料强度及截面几何特性的统计参数[J]. 重庆建筑工程学院学报,1985(1):1-23.
- [7] 张云超,黄铭,姚亮. 基于检测资料的闸门安全状态模糊综合评判[J]. 水力发电,2019,45(3):85-89.
- [8] 郑鼎聪,冷伟,周建方. 水工钢闸门模糊刚度可靠度进一步研究[J]. 水力发电,2020,46(4):75-78,96.
- [9] 冷伟,郑鼎聪,周建方. 水工钢闸门主梁模糊失效概率计算方法研究[J]. 水利水电技术,2020,51(12):86-91.
- [10] 张丽波,郭将,刘晓. 响应面法与蒙特卡洛法边坡可靠性评价方法对比研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(5):779-786.
- [11] 中华人民共和国水利部. 水闸设计规范:SL265-2016[S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [12] 李剑斌,巫世晶,杨志泽,等. 基于层次分析法和模糊综合评价的水工钢闸门安全评估[J]. 水电能源科学,2016,34(6):195-198.
- [13] BC HYDRO. Site C clean energy project: Business case summary[R]. Vancouver: BC Hydro,2014.

该方法对不确定变量描述更加精确,可避免传统鲁棒优化过于保守的缺点。

b. 相比于确定性方案和传统鲁棒优化方案,基于 RSO 的两阶段配电网故障恢复策略能实现对分布式电源充分的利用,减少弃风率,最大程度地恢复重要负荷供电;同时能有效地抵消风电出力随机性和波动性对配电网故障恢复的影响,保证重要负荷供电的稳定性。

参考文献:

[1] 方嵩,彭嵩,赵晋泉,等. 分布式电源辅助电网黑启动研究综述[J]. 广东电力,2019,32(1):20-28.

[2] CHEN LEI, JIANG YUQI, DENG XINYI, et al. A novel fault recovery method of active distribution networks oriented to improving resilience[J]. Energy reports, 2022,8(S15):456-466.

[3] MOUSAVIZADEH S, HAGHIFAM MR, SHARI-ATKHAH MH. A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources

[J]. Applied energy 2018,211:443-460.

[4] 徐岩,张荟,马天祥,等. 含分布式电源的配电网故障紧急恢复与抢修协调优化策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(22):38-46.

[5] 闫涵,王建华,范须露,等. 基于用户停电损失评估的有源配电网灾后供电恢复模型[J]. 电力系统自动化,2022,46(5):31-42.

[6] 陈文兴,张沈习. 考虑孤岛划分与网络重构相配合的主动配电网故障恢复策略[J]. 水电能源科学,2022,40(1):200-205.

[7] TOMONOBU S, HITOSHI T, KATSUMI U, et al. One-Hour-Ahead load forecasting using neural networks[J]. IEEE transactions on power systems, 2002,17 (1):113-118.

[8] CHEN Z, SIM M, XIONG P. Robust stochastic optimization made easy with RSOME[J]. Management science,2020,66(8):3329-3339.

[9] LAVORATO M,FRANCO J F,RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. [J]. IEEE transactions on power systems,2012,27(1):172-180.

### A Service Restoration Method for Active Distribution Network Based on Robust Stochastic Optimization

HUANG Mu-tao<sup>1</sup>,ZHOU Hu-jun<sup>1</sup>,LU Ming<sup>2</sup>,LI Zhe<sup>2</sup>,LIU Shan-feng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** After a blackout occurs resulting from an extreme disaster, the active distribution network with distributed generation and energy storage equipment can perform service restoration by island partition and network reconfiguration. To solve the service restoration problem for the active distribution network with uncertain wind power output, this paper proposes a two-stage service restoration model based on robust stochastic optimization. In the first stage, the event-wise ambiguity set of wind power output is constructed based on the historical data and the model which minimizes the outage cost is solved by the robust stochastic optimization method. In the second stage, the energy storage and controllable loads in the distribution network are used to track the wind power output, so as to optimize the scheduling during the fault recovery of the distribution network, which minimizes the outage cost and the total power loss. Finally, the superiority of the proposed the model and strategy is verified by the simulations of a modified IEEE 33-bus distribution system case.

**Key words:** active distribution networks; failure recovery; robust stochastic optimization; island partition; network reconfiguration

\*\*\*\*\*  
(上接第 219 页)

### Influence of Parameter Distribution Type on Reliability of Hydraulic Steel Gate

HU Tao-yong, HAN Yi-feng, SHI Shou-jin, ZHOU Yi-da

(PowerChina Huadong Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Aiming at the two failure modes of hydraulic steel gates, the relative deformation failure under the normal service state and the bending shear composite strength failure under the limit state of bearing capacity, the corresponding failure probability analysis models were established respectively. The influence of different parameter distribution types on the failure probability of two failure modes of outcrop steel gates and deep-hole steel gates in hydraulic steel gates was explored through Monte Carlo simulations. The results show that under the same failure mode, when the coefficient of variation of the variable itself remains unchanged, the failure probabilities obtained by different distribution types are relatively close. Compared with the outcrop gate, the deep-hole gate has a higher failure probability and is more prone to instability. But the type of parameter distribution has little influence on the failure probability of deep-hole gate and has great influence on the outcrop gate. When the random variables of each parameter follow the logarithmic normal distribution, it will have a relatively maximum failure probability. It is easy to overestimate the reliability of hydraulic steel gates by considering only the normal distribution.

**Key words:** hydraulic steel gates; reliability; Monto-Carlo simulation; parameter distribution types; failure probability