

# 基于模糊影响图的输变电工程施工安全风险评价研究

徐晟宇

(国网南京供电公司, 江苏 南京 210029)

**摘 要:** 本文以输变电工程施工安全风险为研究对象, 根据输变电工程的施工特点, 全面对建设施工过程中安全风险开展了系统研究; 接着, 根据影响图原理, 探究了输变电工程各类施工安全事故的成因、各风险因素之间的影响关系, 形成风险影响图, 以模糊影响图的形式构建输变电工程施工安全风险评价模型; 最后, 以一输变电工程为例, 分析验证输变电工程施工安全风险评价模型的准确有效。

**关键词:** 输变电站; 安全风险; 模糊影响图; 评价方法

## 0 引言

近年来, 国家经济的飞速发展导致其对电网基础设施的需求越来越迫切, 致使国家电网公司对电网建设速度的要求和考核越来越严格, 这是目前电网建设中面临的最大问题。国家电网公司于 2011 年开创性提出合理工期的目标, 首次以公司发文的形式下发输变电工程工期与进度管理办法, 明确新建常规工程合理工期。然而公司目前输变电工程项目点多、线长、面广, 参建单位和人员数量大, 工程日益深入到我国西北、西南地区, 高山大岭、特殊地质条件比重越来越大, 深基坑开挖、高塔组立、线路跨越等高风险作业项目多, 对工程建设安全管理提出了更高要求。但是, 现实情况是为了满足快速、大量的输变电站的建设需求, 受限于种种客观不利条件, 不得不压缩工期, 其所引发的主要问题就是安全问题, 包括人身和财产的安全问题。然而不论哪类项目, 安全都是作为管理的重中之重, 即便安全管理的难度再大, 也要尽可能的避免这些风险的出现。

现有安全管理理论虽有一些较为成熟的研究和探讨, 并有一定实际经验的积累, 不过整个建设过程的管理模式和管理思维明显跟不上时代的发展形势, 尤其是在输变电工程的施工过程中, 重中之重的安全问题一直不能百分百的得到解决, 在安全管理方面的相对原始的理论早已不适用现实情况中一些大规模的建设项目。

本文以变电站的建设为研究对象, 结合国内外的一些研究成果以及理论方法, 研究施工项目的安全性问题, 探究出一套安全合理的管理体系, 并运

用到实际的工程管理中, 为整个项目的施工过程提供一个完整的安全预警体系, 并对指导今后输变电工程的现场施工管理, 提供理论和应用价值。

## 1 施工安全风险评价研究现状

### 1.1 施工安全风险相关理论研究现状

安全风险方面的探究最初源于欧美国家<sup>[1]</sup>, 上世纪五十年代之后, 众多行业都有了迅猛的发展, 如化学工业、石油工业、航天航空业等关系到国家经济命脉却又极易产生大量安全隐患的行业, 其工程施工作业现场的安全性问题日趋突出, 急需进行更深更全面的探讨。六十年代之后, 美国航空公司联合知名高校共同对这类工程的安全性问题进行了研究, 在对航空航天行业的安全设计和可靠性分析的过程中, 取得了一定成果并运用于新型武器和新式飞机的安全性评价<sup>[2]</sup>。同期的其他发达国家都在此方面取得了较好的研究成果: 欧洲的一些国家运用了数理统计的相关方法, 对整个系统的可靠性和安全性进行了评价; 日本的相关单位提出安全评价六阶段法, 并运用到实际工程中, 取得了较好的实践效果。

在现代工业高速发展的同时, 系统工程开始逐步兴起并诞生了系统工程理论, 其内容涵盖了工程的各个阶段包括策划、组织实施、交付运行和日常运维管理。安全风险评价在此基础上发展出了一个分支, 即安全系统工程, 众多的风险根源标识方法和安全风险评估的系统性方法也由此主要合并为两个分支, 即定性和定量两种分析方法。定性分析方法主要包括专家调查法、安全检查表法、德尔菲法、因果分析法。这些方法一直沿用至今并且在不断

断的发展。定量分析法主要包括事件树分析法、故障树分析法、风险评价矩阵法、LEC 评价法。这些方法起先仍局限在化学工业、石油工业、航天航空业等行业,随着数学的发展和各新兴行业的崛起,开始逐步运用于建筑工程的施工安全管理。

目前工程安全评价普遍采用风险识别和风险评估的方法,前者主要有故障树分析法、专家分析法、经验分析法等;后者主要是贝叶斯网络法、模糊层次分析法等。

## 2 输变电工程施工安全风险理论

电网输变电工程施工中,涉及不同地域、不同专业、不同管理水平的多个单位、部门,他们在不同施工阶段先后或同时开展不同施工项目的施工作业,相互交叉,相互影响,尤其是在建设过程中,存在很多难以预判的意外因素,导致工程建设极易发生安全事故,所以,对于输变电工程的施工安全风险评估工作就显得尤为重要。这里以输变电工程的安全风险评估为依据,建立一整套适用于输变电工程施工过程中的安全控制理论,确保工程安全可控。

### 2.1 输变电工程的施工特点

与常规的建筑工程相比,输变电站工程建设有以下几个特点:

(1) 专业交叉作业多,成品保护难:一般为确保工程进度,在土建施工后期装饰装修阶段,建设管理单位便会安排电气、通信、消防、电缆桥架、构支架等各专业施工人员进场,期间存在大量专业交叉以及电缆保护管敷设、孔洞预留等专业配合工作,以确保各专业工程同步投运。所以施工现场的协调工作尤为重要,在保证进度的情况下,还需要做好现场的成品保护。

(2) 工期紧张,季节影响较大:变电站施工周期较长,跨越四季。如苏南地区,空气湿度较大,还须做好防潮、防雨工作。冬季需做好防冻防寒工作,错开低温时段。雨雪天不宜进行室外设备安装,在主变和 HGIS (GIS) 等设备安装时更要注意天气因素,避免设备内部受潮。

(3) 电气设备供货商多,管理难度大:现在国家电网公司电网工程,电气设备和材料均采用统一招标,一般不会出现一个工程中一个供货商供应两种及以上设备的情况。而一个常规的 220 千伏及

以上的变电站工程光主要设备就多大 60 种以上,在电气安装后期的调试高峰阶段,仅参与集成调试的各供货商技术人员往往多达二、三十人,管理难度相当大。

(4) 构支架、建筑物散开分布在站区各处,施工机具、设备材料甚至工人在站区内的运输都是一大难题。

(5) 预埋、预留量大:变电土建工程中,各种预埋、预留几乎密布整个变电站,不仅有主变、GIS 等电气设备,还有通信、消防、视频监控以及照明动力等各种设备基础和管线,且预埋、预留位置多样,精度要求高,技术要求也不尽相同。

(6) 轴线和标高的精度要求高:室内外各种设备基础较多,相互之间的尺寸相对精度较高。设计把关不严,或者施工精度不够都会出现安全距离不足的问题。

(7) 设备安装难度大:变电站工程出线众多,均采用钢管结构,吊装时间长,安装质量要求高。高电压等级母线采用悬吊式管母,施工难度大。户外 HGIS (GIS) 成套设备安装,以及 10 千伏及以上的电缆终端制作对周围环境要求较高。

### 2.2 模糊影响图风险评价方法

影响图理论是本文主要研究的理论方法,是一种新型的为项目管理决策提供分析参考的理论方法。上世纪八十年代,由美国斯坦福大学的 Howard<sup>[3]</sup>教授率先提出。是随着越来越多的工程实例运用,人们逐步认识到影响图法在风险评估中的潜力。

影响图是由结点和有向弧组成的无环有向图。其中,结点代表风险的各个影响因素,有向弧表示变量间的各种影响关系。影响图可分解为关系层、函数层和数值层三个层次,这些层次可以理解为人对问题的熟悉程度。将影响图作为系统工程的模型,可以直观地表示影响风险的各个因素间的相互关系,帮助梳理系统信息架构。关系层主要用于对研究问题的定性分析。函数层在定性分析的基础上更进一步,对各风险元素进行概率分析,也可以通过函数关系、模糊关系等方式进行分析。根据影响图理论,图中的各类型结点拥有不同的数据结构,数值层则是通过解析风险因素的数值结构将研究问题进一步量化分析求解,为决策者提供更多的信息。

### 2.2.1 影响图的绘制

影响图的绘制主要采用以下两种方法。

#### 1) 目标定向构造方法

即采用逆顺序的构造方法来定向描述影响图函数。人的主观普遍更趋向于按照因果顺序进行建图，即正序构建，但易受主观影响造成一定程度的偏差。而目标定向构造法可以协助图形构造者将精力集中在信息丰富的区域，减少主观影响，也可以促使构造者对问题成因不断拓展延伸，加深对项目的理解和掌控。通常采用一个简单的思路：首先确认各个边缘结点是否可以直接估计，如不能，便增加前置结点，如此循环往复，当每个边缘结点都可以进行直接估计时，图形建立便完成了。

#### 2) 双向构造影响图

上述目标定向构造影响图的优势，并非否定正向推导的做法，只是逆向更易于图形的延伸。逆序建图也有缺点：容易遗漏部分变量。所以我们绘制影响图的时候往往需要通过正向构造进一步修正和完善各个结点。

建立模型的过程大致分为六个阶段，即拓展，简化，检验，求解，探究，判断。这六个阶段没有严格的先后次序，只要可以绘制出架构清晰，内容直观的模型，不必教条的执行这个流程。

在影响图建立的过程中，一方面需要通过不断的拓展和延伸来加强模型的可靠性和准确性；此外，大多数研究者都希望能够简化影响图构造，以方便评价中的运算。因此需要在各因素之间权衡重要性，适当丢弃一些相对次要的因素，同时确保简便与准确。

### 2.2.2 模糊影响图的评价算法

首先介绍下模糊集合的定义<sup>[4]</sup>。论域 $X$ 上“模

糊集合”定义为 $\tilde{A}$ ：

$$\tilde{A} = \{ \langle x, A(x) \rangle | x \in X \}$$

如果我们用模糊理论来描述人高与矮的状况，将这个状况从高到矮概括为：1，0.9，0.8，……，0.1，0。则矮个子这一语言变量可表示为：

$$\tilde{A} = \{ 0.4 | 0.1, 0.3 | 0.5, 0.2 | 0.7, 0.1 | 0.9, 0 | 1.0 \}$$

在模糊统计法中，通过调研咨询的方式来为隶

属函数赋值，随着调研数据的增加，隶属频率变量也会逐渐趋于稳定，这个稳定值即是某问题对模糊集合的隶属度。

模糊影响图是在影响图理论的基础上，运用模糊集合和模糊变换理论进行安全风险评估的方法。原理就是通过模糊合成传递模糊关系。如图1，若当两个未知变量 $X$ 、 $Y$ 之间是父子关系 $S$ 的时候， $X$ 、 $Z$ 之间关系就相当于兄弟关系 $R$ ， $Z$ 、 $Y$ 之间的合成关系 $R \cdot S$ 就是叔侄关系。

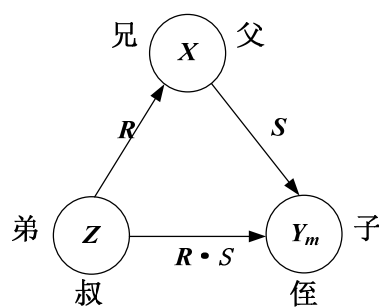


图1 模糊合成示意图

前结点的频率矩阵其实就是前结点的状态与频率的模糊关系。通过图形中的有向关系，从独立结点至非独立结点终于决策结点，顺序推导各价值结点的频率模糊集合，以状态矩阵表示。

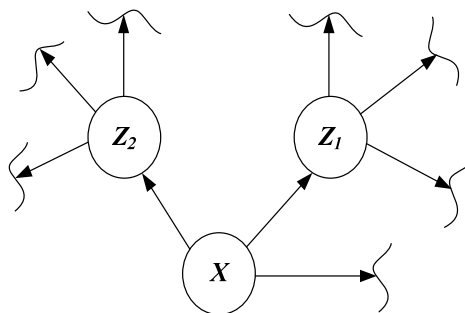


图2 独立结点示意图

当图形中的一个结点无前置结点（如图2），没有向前延伸的变量，这个结点即称为独立结点。假设某个结点 $X$ 为独立结点，则它的频率矩阵可表达成<sup>[5]</sup>：

$$F_x = (f_{x1} \times P_{x1}) \cup (f_{x2} \times P_{x2}) \cup \dots \cup (f_{xm} \times P_{xm})$$

其中 $P_x$ 为由语言词汇定义的结点 $X$ 的状态模糊集， $f_x$ 为独立结点 $X$ 的频率向量中每一可能状态对应出现的频率模糊集。

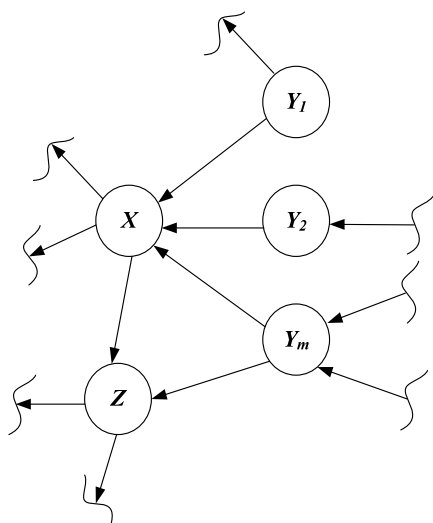


图 3 非独立结点示意图

X 为非独立结点的情况下 (如图 3), 设 X 是由  $m$  个随机结点  $Y_m$  为其前置结点的结点,  $F_{xp}$  表示 X 的所有前置结点频率矩阵的模糊合成关系。

$$F_{xp} = F_{Y1} \cup F_{Y2} \cup \dots \cup F_{Ym}$$

若定义  $R_{xp}$  表示从结点  $Y_m$  到结点 X 的模糊关系。

$$R_{XY1} = (P_{Y11} \times P_{Xi}) \cup (P_{Y12} \times P_{Xi}) \cup \dots \cup (P_{Y1n} \times P_{Xi})$$

则结点 X 的频率矩阵为:  $F_X = F_{XP} \bullet R_{XP}$

上述算法的核心思路是: 确定每个独立结点的状态量, 通过模糊关系合成算法, 得到其后置结点的频率矩阵, 如此循环往复直至获得图中所有结点的频率矩阵。将价值结点矩阵中每一行相加并与该行的频率相乘, 计算完成后取其中最大值作为随机结果的隶属度。每组随机结果的概率可表示为:

$$P(X_i) = \frac{\mu_{xi}}{\sum_{\Omega x} \mu_{xi}}$$

### 3 模糊影响图模型

#### 3.1 输变电工程施工安全风险影响图绘制

输变电工程的施工作业过程中存在多种施工环境恶劣, 或者工序复杂、技术要求高等可能造成人身伤害的高风险作业。在进行输变电工程施工中风险项目的识别需要注意的有两点: 首先是可靠性问题, 确保不会疏忽遗漏重大隐患。其次是成本问题, 避免无选择性的收集无价值的信息, 保证资源的最大化利用。

模糊影响图模型的建立主要包含以下步骤:

- (1) 确定价值结点
- (2) 模糊影响图关系层次的建立
- (3) 模糊影响图数值层次和函数层的建立
- (4) 模糊影响图的评价
- (5) 输变电建设项目施工安全风险估算

在构造图形时, 主要考虑的是重要变量, 因此需要不断的拓展延伸和简化, 并可根据实际情况适当忽略部分变量, 直到每个边界节点成为无法延伸的独立节点。

对于风险事故的重要因素影响关系确定后, 便可以将其整合, 形成一个完整的输变电工程施工安全风险影响图。图形初步构成后, 一定要认真推敲图中每一个结点, 合并同类项, 反复检查有无漏项, 以确保图形的完整和简洁。

通过向具备多年项目管理经验的工程师和项目经理咨询探讨价值结点, 分析输变电工程施工安全风险的主要影响因素, 确定输变电工程施工中最频发的典型安全风险, 绘制出图形。

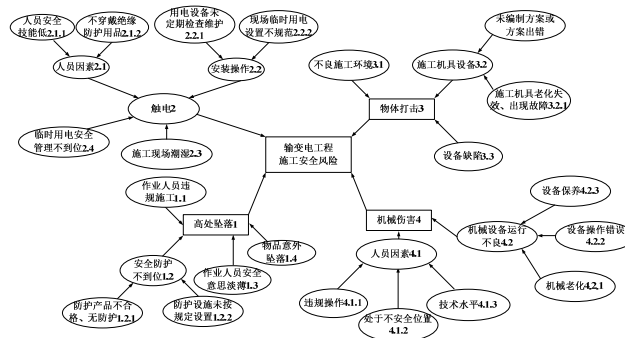


图 4 输变电工程施工安全风险影响图

#### 3.2 数值层以及函数层的建立

如前文所述, 图形关系层完成后, 需要用状态的模糊集合以及频率模糊集合构成影响图的数值层。这里主要涉及隶属度和模糊矩阵的建立。

##### (1) 频率模糊集的定义

我们将 0 到 1 进行分解, 隶属度和模糊集合可以按如下标识:

$$\text{高 (H)} = \{0.7|0.5, 0.8|0.7, 0.9|0.9, 1.0|1.0\},$$

其中“0.7|0.5”表示频率为 0.7 的隶属度为 0.5, 其他类似。

中 (M) = {0.3|0.2,0.4|0.8,0.5|1.0,0.6|0.8,0.7|0.2}

低 (L) = {0|1.0,0.1|0.9,0.2|0.7|0.3|0.5}

非常高 (VH) = (高)<sup>2</sup> = {0.7|0.25,0.8|0.49,0.9|0.81|1.0|1.0}

非常低 (VL) = (低)<sup>2</sup> = {0|1.0,0.1|0.81,0.2|0.49|0.3|0.25}

## (2) 状态模糊集的定义

根据输变电工程施工安全风险的特点，并咨询相关资深工程师以及项目经理，将输变电工程施工安全风险因素的状态模糊集进行表述：

好 (G) = {G|1.0, S|0, B|0}

中 (S) = {G|0, S|1.0, B|0}

差 (B) = {G|0, S|0, B|1.0}

增加很多 (HI) = {20%|0.2,30%|0.6,40%|0.9,50%|1.0}

增加较多 (MI) = {10%|0.4,20%|0.8,30%|1.0,40%|0.6}

增加较少 (LI) = {0%|1.0,10%|0.8,20%|0.4}

无显著变化 (NO) = {0%|1.0}

是 (Y) = {Y|1.0, N|0}

否 (N) = {Y|0, N|1.0}

结合历年工程经验，对图形中独立结点的状态模糊集合频率模糊集评估如下表 1 至 4。

表 1 “机械伤害”结点的状态与频率对应表

结点	是(Y)	否(N)	好(G)	中(S)	差(B)
4.1 人员因素	H	L			
4.1.1 违规操作	H	L			
4.1.2 处于不安全位置	H	L			
4.1.3 技术水平低			M	H	VL
4.2 机械设备运行不良			M	H	L
4.2.1 机械老化	H	L			
4.2.2 设备操作错误	H	L			
4.2.3 设备保养不到位	H	L			

表 2 “触电”结点的状态与频率对应表

结点	是(Y)	否(N)	好(G)	中(S)	差(B)
2.1 人为因素			M	H	VH
2.1.1 人员安全技能低	H	L			
2.1.2 不穿戴防护用品	L	H			
2.2 安装操作			M	H	VL
2.2.1 用电设备检修			H	M	L
2.2.2 临时用电设置不规范			H	H	VL
2.3 施工现场潮湿	H	L			
2.4 安全管理不到位	H	L			

表 3 “高处坠落”结点的状态与频率对应表

结点	是(Y)	否(N)	好(G)	中(S)	差(B)
1.1 违规作业	H	L			
1.2 安全防护不到位	H	L			

1.2.1 防护产品质量或防护差	H	L			
1.2.2 防护设施设置情况			L	M	H
1.3 物品高出坠落	H	L			
1.4 作业人员安全意识淡薄			M	H	L

表 4 “物体打击”结点的状态与频率对应表

结点	是(Y)	否(N)	好(G)	中(S)	差(B)
3.1 不良施工环境			M	H	L
3.2 运送施工方案			M	H	L
3.2.1 施工方案出错	H	L			
3.2.2 施工机具故障	H	L			
3.3 设备缺陷	H	L			

## 3.3 实例计算

本文采用南京某 220kV 输变电工程进行实例验证，以确认本文探讨出的输变电工程安全风险评价研究理论是否科学合理。

### (1) 计算独立结点的频率矩阵

现在就算独立结点 1.2.1、1.2.2 的频率矩阵，根据公式，得到结点 1.2.1 和 1.2.2 的频率矩阵为：

$$F_{D1.2.1} = (H \times Y) \cup (L \times N) =$$

$$\begin{bmatrix} Y & N \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.5 & 0 \\ 0.8 & 0.7 & 0 \\ 0.9 & 0.9 & 0 \\ 1.0 & 1.0 & 0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} Y & N \\ 0 & 0 & 1.0 \\ 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0.2 & 0 & 0.7 \\ 0.3 & 0 & 0.5 \\ 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y & N \\ 0 & 0 & 1.0 \\ 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0.2 & 0 & 0.7 \\ 0.3 & 0 & 0.5 \\ 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.5 & 0 \\ 0.8 & 0.7 & 0 \\ 0.9 & 0.9 & 0 \\ 1.0 & 1.0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{D1.2.2} = (L \times G) \cup (M \times S) \cup (H \times B) =$$

$$\begin{bmatrix} G & S & B \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} G & S & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.5 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} G & S & B \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.9 & 0 & 0 & 0.9 \\ 1.0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & S & B \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.5 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0.2 & 0.5 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.9 & 0 & 0 & 0.9 \\ 1.0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

计算上述结果的概率矩阵，为的是将该节点进行释放，在计算上面的节点之后，所有的独立节点都采用该方法进行计算。下面需要释放非独立节点，计算得到结点 1.2 的频率矩阵为：

$$F_{1,2P} = F_{D1,2,1} \cup F_{D1,2,2} =$$

$$\begin{bmatrix} & Y & N \\ 0 & 0 & 1.0 \\ 0.1 & 0 & 0.9 \\ 0.2 & 0 & 0.7 \\ 0.3 & 0 & 0.5 \\ 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.5 & 0 \\ 0.8 & 0.7 & 0 \\ 0.9 & 0.9 & 0 \\ 1.0 & 1.0 & 0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} & G & S & B \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.5 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0.2 & 0.5 \\ 0.8 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.9 & 0 & 0 & 0.9 \\ 1.0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & Y & N & G & S & B \\ 0 & 0 & 1.0 & 1.0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.9 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0.7 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & 1.0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 \\ 0.7 & 0.5 & 0 & 0 & 0.2 & 0.5 \\ 0.8 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.9 & 0.9 & 0 & 0 & 0 & 0.9 \\ 1.0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

对照表 3，计算非独立结点 1.2 的所有紧前结点（1，2）到结点 1.2 的模糊关系：

$$R_{1,2-1,2,1} = (Y \times HI) \cup (N \times NO) =$$

$$\begin{bmatrix} & 0\% & 10\% & 20\% & 30\% & 40\% & 50\% \\ Y & 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.9 & 1.0 \\ N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{1,2-1,2,2} = (G \times LI) \cup (S \times MI) \cup (B \times HI) =$$

$$\begin{bmatrix} & 0\% & 10\% & 20\% & 30\% & 40\% & 50\% \\ G & 1.0 & 0.8 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ S & 0 & 0.4 & 0.8 & 1.0 & 0.6 & 0 \\ B & 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.9 & 1.0 \end{bmatrix}$$

计算结点 1.2 的模糊关系矩阵的联合  $R_{1,2P}$

$$R_{1,2P} = R_{1,2-1,2,1} \cup R_{1,2-1,2,2} =$$

$$\begin{bmatrix} & 0\% & 10\% & 20\% & 30\% & 40\% & 50\% \\ Y & 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.9 & 1.0 \\ N & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G & 1.0 & 0.8 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ S & 0 & 0.4 & 0.8 & 1.0 & 0.6 & 0 \\ B & 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.9 & 1.0 \end{bmatrix}$$

同理可以计算出其他非独立结点的频率矩阵。现在对于结点 1.2 的直接紧后结点来说，结点 1.2 又称为独立风险因素结点，按照模糊传递的思想把风险的状态频率矩阵定向传递，直到算出价值结点的频率为止。受限于篇幅，这里只将节点 1 的状态用概率矩阵表示出来，结点 1 的状态频率矩阵为：

$$F_1 = \begin{bmatrix} & 0\% & 10\% & 20\% & 30\% & 40\% & 50\% \\ 0 & 0.5 & 0.4 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 1 \\ 0.1 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.9 & 0.9 & 0.8 \\ 0.2 & 0.7 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.8 \\ 0.5 & 1 & 0.8 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 0.5 \\ 0.6 & 0.8 & 0.8 & 0.5 & 0.4 & 0.8 & 0.5 \\ 0.7 & 0.6 & 0.8 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.6 \\ 0.8 & 0.2 & 0.4 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0.9 & 0.2 & 0.4 & 0.8 & 0.9 & 0.7 & 0.9 \\ 1.0 & 0.2 & 0.4 & 0.8 & 1 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix}$$

从价值结点的频率矩阵中选取本行的和与其对应的频率的乘积在所有行中最大的一行作为随机结果隶属度，根据式 2.16，则每一随机结果的概率为：

$$F_1 = \begin{bmatrix} & 0\% & 10\% & 20\% & 30\% & 40\% & 50\% & SUM \\ 0 & 0.5 & 0.4 & 0.8 & 0.7 & 0.6 & 1 & 4.0 \\ 0.1 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.9 & 0.9 & 0.8 & 4.2 \\ 0.2 & 0.7 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.7 & 3.4 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 2.9 \\ 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.6 & 0.6 & 0.4 & 0.8 & 3.1 \\ 0.5 & 1 & 0.8 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 0.5 & 4.1 \\ 0.6 & 0.8 & 0.8 & 0.5 & 0.4 & 0.8 & 0.5 & 3.8 \\ 0.7 & 0.6 & 0.8 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 3.5 \\ 0.8 & 0.2 & 0.4 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 3.6 \\ 0.9 & 0.2 & 0.4 & 0.8 & 0.9 & 0.7 & 0.9 & 3.9 \\ 1.0 & 0.2 & 0.4 & 0.8 & 1 & 0.7 & 0.5 & 3.6 \end{bmatrix}$$

价值结点 1 的频率矩阵中，选取本行的和与其对应的频率的乘积在所在行中最大的一行作为随机结果的隶属度。在模糊性理论中隶属度是表达属于模糊集合的程度，表达的是一种隶属关系，属于的程度。就信任角度来讲，应选择可信度大的，因此，本文按照最大隶属度进行计算。其中，3.6×1 最大，将 {0%|0.2, 10%|0.4, 20%|0.8, 30%|1.0, 40%|0.7, 50%|0.5} 作为随机结果的隶属度，计算各结点风险概率。结果如图 5，6。

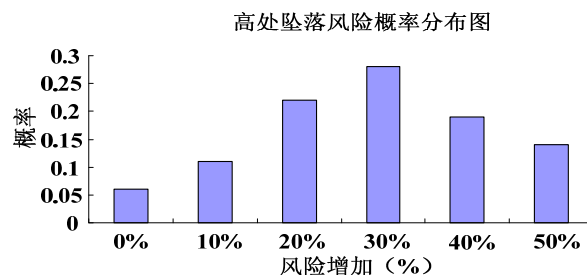


图 5 高处坠落风险概率分布图

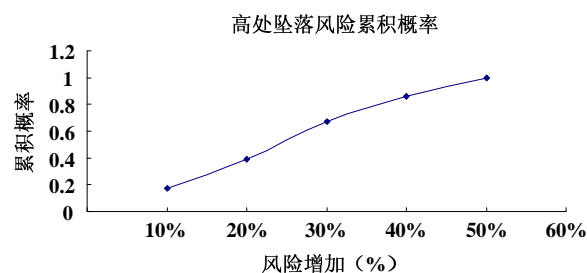


图 6 高处坠落风险累积概率图

由分布图来看，风险增加概率最高的 3 个值是 20%，30% 及 40%，3 者的累积概率为 69%。根据

理论分析,我们可以得出如下结论,在输变电工程施工中,整个项目的高处坠落的发生概率会有所上浮,增长区间在 20%~40%的可能性较高。据此我们可以评判该 220 千伏输变电工程的高处坠落风险等级为中高,这是基本吻合现场安全管理状态的。因此,我们要加强现场安全管理,重点针对高处坠落风险,利用风险影响图的反向分析法对高处坠落的风险安全问题做危险源点探索,针对这些影响因素对工程采取预防措施。

## 4 结论

根据调研以及历史经验,对特定的项目进行分析,得到模糊影响图的定性和定量关系,构造出风险评价模型,同时对工程进行评价,论证该方法的可行性。本文作者在本文的写作中,受自身知识水平和经验限制,有些论述不尽完美,仍有待进一步的修正和完善:如运用计算机编程进行评估运算,可以降低工作量;出于分析和计算的简便考虑,对图形的关系层和数值层尽量进行了简化,如采用计算机运算,可对图形进行进一步的完善,并细化数

据层;本文主要针对施工模式相对固定的变电站工程进行了分析,对线路工程涉及较少。如将该理论用于纯线路工程,需要对工程进行分类,进一步完善工程施工安全风险影响图模型。

### 参考文献:

- [1] 许程洁. 基于事故理论的建筑施工项目安全管理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008, 18-19.
- [2] HSE. The Cost of Accidents at work. HSE Books. 1997.
- [3] Howard R, Matheson J. Influence diagrams[J]. Readings on the Principles and Applications of Decision Analysis, 1981, pp:721~762.
- [4] 肖盛燮、王平义、吕恩琳. 模糊数学在土木与水利工程中的应用. 北京:人民交通出版社. 2004.7.
- [5] 程铁信, 王平等. 模糊影响图评价算法探讨[J]. 系统工程学报, 19 (2): 177-182.

### 作者简介:

徐晟宇(1985—), 男, 江苏南京人, 工程师, 从事电网基建项目管理工作。