

# 团 体 标 准

T/xxx xxxx—xxxx

## 山区电网设施地质灾害风险评价

Geological hazard risk assessment of power grid facilities in mountainous areas

2025-xx-xx发布

xxxx-xx-xx实施

中国能源研究会发布

## 目 次

前 言.....	II
引 言.....	III
山区电网设施地质灾害风险评价.....	4
1 适用范围.....	4
2 规范性引用文件.....	4
3 术语和定义.....	4
4 总则.....	6
4.1 目的.....	6
4.2 总体要求.....	6
5 评价指标体系.....	6
6 取值分级规则.....	6
6.1 通则.....	6
6.2 地质灾害危险性方法.....	6
6.3 地质灾害电网设施易损性评价.....	9
7 评价结果等级.....	11
7.1 地质灾害危险性评价结果.....	11
7.2 山区电网设施易损性评价结果.....	12
7.3 山区电网地质灾害风险性评价结果.....	13
7.4 山区电网地质灾害风险管控.....	13
附录 A （规范性） 地质灾害稳定性评价模型.....	16
附录 B （规范性） 滑坡或崩塌灾害运动距离关系经验公式.....	19
附录 C （规范性） 滑坡或崩塌破坏概率计算模型.....	20
附录 D （规范性） 泥石流冲击力、影响范围经验公式.....	22
附录 E （规范性） 泥石流危险性评价模型.....	23
附录 F （规范性） 地面塌陷沉降量计算.....	25
附录 G （规范性） 输电杆塔基础失效模式.....	28
附录 H （规范性） 输电杆塔倾斜度标准.....	29
附录 I （规范性） 输电设施易损性评价模型.....	30
附录 J （规范性） 不同电压等级变电站常见分级标准及造价.....	31

## 前 言

本文件按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由贵州电网有限责任公司电力科学研究院提出并归口。

本文件起草单位：贵州电网有限责任公司电力科学研究院、中国地质大学（武汉）、武汉大学、中国地质环境监测院、中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司、中国南方电网有限责任公司、广东电网有限责任公司电力科学研究院、南方电网数字电网科技（广东）有限公司、云南电网有限责任公司、中国电力科学研究院有限公司。

本文件主要起草人：刘卓娅、文屹、欧阳广泽、杨涛、张洋、张啟黎、赵超、代吉玉蕾、欧家祥、陈泽瑞、许超钤、张琦、张鸣之、冯振、张明、焦伟之、赵健、毛吉成、樊灵孟、鄂盛龙、陈远、王文溥、王一帆、邢亚。

# 引 言

地质灾害全面调查和科学评价是地质灾害防治工作的基础。山区电网设施往往跨越高山峡谷、环境条件恶劣、地形复杂等区域，频繁受到地质灾害的侵袭，对可持续发展构成了重大威胁。山区电力设施在地质灾害作用下的风险评价，尚未形成系统、全面、明确的规范和标准，使得电力部门给电网设施日常生产、风险管控与防治带来了极大困难与挑战。

鉴于山区电网设施沿线地质灾害的孕灾地质条件、诱发因素和发育规律的认知不足，输变配电力设施损伤特征及机理的认知不清晰，地质灾害危险性和风险评价模型存在一定的不足和不精准。因此，亟需在地质灾害风险评价工作的基础上，建立全面、综合的适用于山区电网设施的地质灾害风险评价体系，指导电力部门对山区输电设施（输电线、变电站、配网）开展地质灾害作用下防控工作，减少降低极端条件下地质灾害对山区电网设施的破坏，大幅提升电网设施安全运行能力。

本技术规范分为七个部分，包括：适用范围、规范性引用文件、术语和定义、总则、评价指标体系、取值分级规则、评价结果等级。

# 山区电网设施地质灾害风险评价

## 1 适用范围

本文件规定了山区电网地质灾害风险评价的目的任务、内容、评价模型、风险区划与风险管控等基本要求。

本文件适用于以崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷为致灾害体，输电线路、变电站、配网为受灾对象的山区电网设施地质灾害风险评价工作，其它山区电力设施的风险评价工作可参照执行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB50173—92 电气装置安装工程 35KV 及以下架空电力线路施工及验收规范
- GB/T 35697—2017 架空输电线路在线监测装置通用技术规范
- GB/T 40112—2021 地质灾害危险性评估规范
- GB/T 40862—2021 输变电设施运行可靠性评价指标导则
- GB/T 5007—2011 建筑地基基础设计规范
- GB/T 50297—2018 电力工程基本术语标准
- DL/T 5457—2012 变电站建筑结构设计技术规程
- DL/T 741—2019 架空输电线路运行规程
- DZ/T 0221—2006 滑坡、崩塌、泥石流监测规范
- DZ/T 0220—2006 泥石流灾害防治工程勘查规范
- DZ/T 0438—2023 地质灾害风险调查评价规范（1:50000）

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### **滑坡 landslide**

滑坡岩土体在重力作用或有其他因素参与影响下，沿地质弱面发生向下向外滑动，以向外滑动为主的变形破坏现象。

### 3.2

#### **崩塌 rockfall**

陡坡上的岩土体在重力作用或其他外力参与下，突然脱离母体，发生以竖向为主的运动，并堆积在坡脚的动力地质现象。

### 3.3

#### **泥石流 debris flow**

由降水（暴雨、冰川、积雪融化水等）诱发，在沟谷或山坡上形成的一种携带大量泥沙、石块和巨

砾等固体物质的特殊洪流。

### 3.4

#### **地面塌陷 ground collapse**

地表岩土体在自然或人为因素作用下，向下陷落，并在地面形成凹陷、坑洞的一种动力地质现象。

### 3.5

#### **输电设施 transmission facility**

电力系统的一部分，从发电厂向用电地区输送电能的装置，包括输电线、输电杆塔等，本规范中特指输电杆塔。

### 3.6

#### **变电设施 substation facilities**

电力系统的一部分，它集中在一个指定的地方，主要包括输电或配电线路的终端、开关及控制设备、建筑物和变压器。通常包括电力系统安全和控制所需的设施，本规范中特指变电站。

### 3.7

#### **配网设施 distribution network facility**

电力系统的一部分，直接向一个用电区域内向用户供给电能的电网，电压小于 35kv，本规范中特指配电混凝土杆件。

### 3.8

#### **地质灾害危险性 geological hazard risk**

在某种诱发因素作用下，在一定地区某一时间段发生特定规模和类型地质灾害的可能性。

### 3.9

#### **易损性 vulnerability**

地质灾害以一定的强度发生而对承灾体可能造成破坏的严重程度。易损性可以用 0~1 表示，0 表示没有损失，1 表示完全损失。对于财产，是损坏的价值与财产总值的比率；对于人员，在地质灾害影响范围内人员的死亡概率。

### 3.10

#### **地质灾害风险 geological hazard risk**

在一定区域和时期内，各类承灾体因地质灾害而遭受损失的可能性和严重程度，包括人员伤亡、经济损失和环境破坏等。

### 3.11

#### **地质灾害承灾体 geological hazard bearing body**

指某一地区内受地质灾害潜在影响的人口、建筑物、工程设施、经济活动、公共事业设备基础设施和环境等。承灾体可分为经济承灾体（建筑物、土地利用），社会承灾体（人口密度、人口年龄结构）两大类。

### 3.12

#### **杆塔倾斜度 inclination of the pole and tower**

监测点偏离中心线的位移值与监测点距最长接腿基础顶面高度之比，也称为综合倾斜度。

## 4 总则

### 4.1 目的

4.1.1 山区电网设施地质灾害的危险性评价。调查崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷地质灾害的形成发育特征及危害情况，分析地质灾害诱发因素、形成机理和成灾模式。开展崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷在不同诱发因素下的危险性分析，包括灾害稳定性风险、破坏概率、灾害范围影响等。

4.1.2 开展山区电网设施地质灾害易损性评价。评价地质灾害作用下输变配设施易损性，包括输电杆塔、线路、变电站的抗灾能力和受损程度。

4.1.3 开展山区电网设施地质灾害风险评价。分析地质灾害对输变配设施的可能影响，包括设施损坏、停电、供电中断等情况。综合考虑地质灾害的危险性和设施的易损性，对输变配设施的地质灾害风险进行评估，并划分风险等级。

4.1.4 针对不同风险等级，制定相应的山区电网地质灾害风险管控措施。

### 4.2 总体要求

4.2.1 收集、利用、调查山区输变配电力设施沿线及周边地质灾害、工程地质、水文地质、环境地质、岩土工程勘查等已有成果资料，初步分析总结地质灾害发育分布规律和成灾模式。

4.2.2 收集、利用、调查山区输变配设施类型、规模、价值等资料信息。

4.2.3 风险评价工作结束后输变配设施区域地质环境条件发生重大变化或电力建设方案变化大时，根据电力建设工程特点重新进行评价工作。

## 5 评价指标体系

5.1 山区电网地质灾害风险评价要素评价指标体系由地质灾害危险性评价、地质灾害承灾体易损性评价 2 个层级的评价指标构成。

5.2 地质灾害危险性反映了在某种诱发因素作用下，在一定地区某一段时间发生特定规模和类型地质灾害的可能性，地质灾害易损性反应了地质灾害以一定的强度发生而对承灾体可能造成破坏的严重程度。

5.3 二级评价指标是直接取值的指标，由能衡量一级评价指标的指标构成，具体取值规则见第 6 章。

## 6 取值分级规则

### 6.1 通则

6.1.1 取值分级规则这一要素用来规定评价指标取得指标值的规则。

6.1.2 开展山区电网滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷地质灾害风险评价时，应使分别按照以下方法取值。

### 6.2 地质灾害危险性方法

#### 6.2.1 滑坡危险性评价

##### 6.2.1.1 滑坡概率分析法

a) 滑坡概率分析方法一般包括历史记录分析法、遥感影像时序分析法、滑坡实例与触发事件的相关分析法、间接信息法等。

b) 概率一般包括以下 3 种类型：

1) 在给定时间段内（通常指每年，也可根据需要修改时间期限）滑坡发生的累积数量。

2)在给定时间段内，特定滑坡失稳或滑坡发生的概率。

3)根据特定量级触发因素，如临界降雨量或临界地震动峰值加速度等的年超越概率确定滑坡发生概率。

c)开展降雨引发滑坡危险性评价时，考虑区域多年平均降雨量以及20年、50年、100年一遇降雨量水平，根据滑坡现场调查情况建立二维或三维工程地质模型，采用数值计算或数值模拟，分析对应不同超越概率的降雨强度，并分别开展对应的滑坡失稳概率计算。常见破坏概率计算方法见附录C。

d)在开展地震引发滑坡危险性评价时，区域尺度上应参照《中国地震动参数区划图》(GB18306)，考虑常遇地震动(50年超越概率63%)、基本地震动(50年超越概率10%)、罕遇地震动(50年超越概率2%)条件下峰值加速度参数；单体尺度上应进一步考虑地震动传播受地形和覆盖层等因素影响的场地效应，对区域地震动参数进行经验性调整，并分别开展对应的滑坡失稳概率计算。

#### 6.2.1.2 滑坡强度分析法

a)对于区域滑坡危险评价，计算滑坡地质灾害的点密度、面密度、体密度作为表征滑坡强度的参数。

b)对于单体滑坡危险评价，计算滑坡的影响范围(面积)、体积(规模)，灾害体运动速度、动量及能量等表征强度参数；构建多参数评判矩阵，综合确定滑坡强度等级。

#### 6.2.1.3 动态监测指标分析法

a)滑坡危险性可由安装在滑坡体上的监测指标确定，常用监测项目及监测内容见表1。

表1 滑坡常见监测指标

监测项目	监测仪器
地表位移	GNSS 测量、三维激光测量
地表裂缝	地表裂缝计、简易监测
深部位移	钻孔测斜仪
降雨量	雨量计
土壤含水率	土壤含水率监测仪

b)对于地质灾害实时监测系统，数据采集频率为1~10Hz，如果存在较大变形或灾害迅速发展，频率可提高到20Hz或更高。

c)在强降雨或极端天气情况下，适当提高数据采集频率，以便捕捉降雨期间可能发生的灾害变形活动。

d)监测数据保存频率应根据灾害类型、监测目标、实时性需求以及硬件设施来决定。数据保存应使用标准化格式(如CSV、TXT、Excel、GeoJSON、RINEX等)。应对每日监测数据需进行数据质量控制，检查是否有缺失或异常数据，并对异常数据进行修正或标记。

### 6.2.2 崩塌危险性评价

#### 6.2.2.1 崩塌失稳概率分析法

崩塌失稳概率危险性评价方法与滑坡评价方法相似，见6.2.1.1节。

#### 6.2.2.2 崩塌强度分析法

a)对于区域崩塌风险评价，计算崩塌地质灾害的点密度、面密度、体密度作为表征强度的参数。

b)对于单体崩塌风险评价，计算崩塌的影响范围(面积)、体积(规模)，崩塌运动速度、动量及能量等表征强度参数；构建多参数评判矩阵，综合确定崩塌灾害强度等级。

#### 6.2.2.3 崩塌动态监测指标分析法

a)常用崩塌监测项目及监测内容见表2。

表2 崩塌常见监测指标

监测项目	监测仪器
地表位移	GNSS 法、三维激光扫描测量法

监测项目	监测仪器
裂缝错位	裂缝计法、简易测量法
岩土体重力加速	重力加速度计法
运动轨迹和运动参数	视频监控法
多形态监测	多形态崩塌智能监测法
降雨量	雨量计法

b)对于地质灾害实时监测系统,数据采集频率为 1~10 Hz,如果存在较大变形或灾害迅速发展,频率可提高到 20 Hz 或更高。

c)在强降雨或极端天气情况下,适当提高数据采集频率,以便捕捉降雨期间可能发生的灾害变形活动。

d)监测数据保存频率应根据灾害类型、监测目标、实时性需求以及硬件设施来决定。数据保存应使用标准化格式(如 CSV、TXT、Excel、GeoJSON、RINEX 等)。应对每日监测数据需进行数据质量控制,检查是否有缺失或异常数据,并对异常数据进行修正或标记。

### 6.2.3 泥石流危险性评价

6.2.3.1 泥石流失稳概率危险性评价方法与滑坡评价方法相似,见 6.2.1.1 节。

#### 6.2.3.2 泥石流强度分析法

a)对于区域泥石流风险评价,计算泥石流地质灾害的点密度、面密度、体密度作为表征泥石流强度的参数。

b)对于单体泥石流风险评价,计算泥石流的影响范围(面积)、体积(规模),泥石流运动速度、动量及能量等表征强度参数;构建多参数评判矩阵,综合确定泥石流灾害强度等级,详见附录 E。

#### 6.2.3.3 泥石流动态监测指标分析法

a)常用泥石流监测项目及监测内容见表 3。

表 3 泥石流常见监测指标

监测项目	监测仪器
降雨量	雨量计
次声	次声报警器
泥位	泥位计
流速	测速仪
粘度	粘度计
土壤含水率	土壤含水率监测仪

b)监测数据的收集、保存频率要求见 6.2.1.3 节。

### 6.2.4 地面塌陷危险性评价

6.2.4.1 地面塌陷失稳概率危险性评价方法与滑坡评价方法相似,见 6.2.1.1 节。

#### 6.2.4.2 地面塌陷强度分析法

a)对于区域地面塌陷风险评价,计算地面塌陷地质灾害的点密度、面密度、体密度作为表征强度的参数。

b)对于单体地面塌陷风险评价,计算地面塌陷的影响范围(面积)、体积(规模),地面塌陷运动速度、动量及能量等表征强度参数;构建多参数评判矩阵,综合确定地面塌陷灾害强度等级。

#### 6.2.4.3 运动监测指标分析法

a)常见地面塌陷监测数据包括地表下沉量、地表倾斜、地表水平变形、地形曲率、累计沉降量。

b)监测数据的收集、保存频率要求见 6.2.1.3 节。

### 6.3 地质灾害电网设施易损性评价

6.3.1 易损性分析应充分考虑地质灾害的强度、承灾体的抗灾能力，宜建立物理易损性函数。易损性分析内容见表 4。

表 4 地质灾害易损性分析内容

易损性	分析内容
财产易损性	a)地质灾害的强度（速度、规模、类型）；b)建筑物和其他构筑物性质、特点（结构类型、地基基础、新旧程度、维护情况)以及与地质灾害相对位置；c)承灾体的防护程度与避让能力；d)预警预报系统的有效性、应急水平等。
人口易损性	a)灾害强度；b)人口密集程度；c)人口年龄结构；d)居民的认识程度、防范风险的意识和观念；e)政府的宣传力度、投入防灾减灾工作的人力和物力等；f)预警预报体系的完善程度等。

#### 6.3.2 输电设施易损性

##### 6.3.2.1 监测指标分析方法

a)采用杆塔倾斜度、杆塔基础相对沉降量以及杆塔钢材应力 3 个指标评价输电杆塔易损性。

##### b)杆塔倾斜度

用于测量杆塔的倾斜角度，通常以度（°）表示。杆塔的倾斜度是评估其稳定性的重要参数。较大的倾斜角度可能指示杆塔的基础不稳定或地基沉降问题，从而影响杆塔的整体结构安全。

##### c)杆塔基础相对沉降量

用于测量杆塔基础相对于周围地面的沉降情况，单位为毫米（mm）或厘米（cm）。对位于地质灾害体变形范围内的输电设施而言，杆塔的变形与破坏均为由杆塔基础引起，基础沉降量的变化可以反映地基沉降的程度，对杆塔的稳定性和具有重要影响。

##### d)杆塔钢材应力

应力用于评估杆塔钢材在受力状态下的变形情况，通常以兆帕（MPa）表示。杆塔钢材的应力水平能够反映其在荷载作用下的承载能力和结构健康状态，过高的应力可能表明杆塔承载力不足或结构存在潜在缺陷。

##### 6.3.2.2 易性指标函数法

可采用正态分布、泊松分布等建立输电杆塔物理易损性函数，常用方法见附录 I。

#### 6.3.3 变电设施易损性

##### 6.3.3.1 变电站易损性评价组成

a)变电站易损性根据变电站电气设备组成开展评价。

b)变电站设备组成为变电站分为变压器（T）、其他室外高压电气设备（E）、构筑物结构（S）共三类设备设施。常见变电站本他电压等级类型及造价见附录 J。

6.3.3.2 根据地质灾害作用对变电站的作用方式，变电站受损可以分为受冲击掩埋破坏以及地质体变形诱发的变电站混凝土基础变形破坏，易损性评价基于两种模式展开。

##### 6.3.3.2 冲击掩埋破坏型变电站易损性

a)选取地质灾害对变电站掩埋范围作为指标来研究变电站冲击作用下易损性，常见灾害体运动范围计算方法可见附录 B、D、E、F。

##### b)易损性计算模型 1:

$$V = \frac{n_1 * M_T + j_1 * M_E + k_1 * M_S}{n * M_T + j * M_E + k * M_S} \quad (1)$$

式中：

V—变电站易损性值，取值 0~1；

- n—变电站范围内的变压器数量；  
 j—变电站范围内的其他室外高压电气设备数量；  
 k—变电站范围内的构筑物结构的数量；  
 n<sub>1</sub>—地质灾害影响范围内的变压器数量；  
 j<sub>1</sub>—地质灾害影响范围内的其他室外高压电气设备数量；  
 k<sub>1</sub>—及地质灾害影响范围内的构筑物结构的数量；  
 M<sub>T</sub>—变电站内变压器的经济价值；  
 M<sub>E</sub>—其他室外高压电气设备的经济价值；  
 M<sub>S</sub>—构筑物结构的经济价值。
- c) 易损性计算模型 2:

$$V = S_0/S \quad (2)$$

式中:

- V—变电站易损性值, 0~1;  
 S<sub>0</sub>—变电站受地质灾害影响面积;  
 S—变电站面积。

#### 6.3.3.3 基础变形破坏型变电站易损性

a) 基础变形的破坏直接导致变电站变压器 (T)、其他室外高压电气设备 (E)、构筑物结构 (S) 损坏, 根据三类设施分别划分易损性等级。

##### b) 变压器

变压器设施修建于变电站混凝土基础之上, 其受损失效均来自底部基础不均匀变形, 故以底部混凝土沉降表征变压器受损失效。

##### c) 室外高压电器设备

室外高压电气设备上部为电气设备, 下部为钢筋混凝土支撑柱。地质灾害引起的变形首先通过下部钢筋混凝土上传至上部电器设备从而引发变电站损坏。

##### d) 构筑物

构筑物是变电站的重要组成, 构筑物的损坏会对变电站的安全性、可靠性和运行效率产生严重影响, 以构筑物的损伤表征变电站易损性。

e) 以变电站内三大组成部件的占比为权重, 分别计算得到三大部件的相应易损性, 加权得到变电站总易损性值, 计算公式如下:

$$V = W_1 V_1 + W_2 V_2 + W_3 V_3 \quad (3)$$

式中:

- V—变电站易损性, 其值越大, 变电站易损性越高;  
 V<sub>1</sub>—变压器易损性;  
 V<sub>2</sub>—室外高压电器设备易损性;  
 V<sub>3</sub>—构筑物易损性;  
 W<sub>1</sub>—变压器占比;  
 W<sub>2</sub>—室外高压电器设备占比。  
 W<sub>3</sub>—构筑物占比。

#### 6.3.4 配网易损性

配电网包括配电线路和变压器等设备, 负责将电力分配到用户。配电网组成相对简单且造价较低, 可直接采取配网输电杆塔倾斜度表征易损性。

## 7 评价结果等级

### 7.1 地质灾害危险性评价结果

7.1.1 地质灾害危险性等级与危险概率对应关系按照表 5 划分。危险计算概率见附录 C。

表 5 基于失稳概率危险性分级标准

危险概率 $H_i$	$0 < H_i \leq 0.4$	$0.4 < H_i \leq 0.6$	$0.6 < H_i \leq 0.8$	$0.8 < H_i \leq 1$
地质灾害危险等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

#### 7.1.2 监测数据危险性评价结果

7.1.2.1 地质灾害危险性等级与地表运动速度对应关系按照表 6 划分。

表 6 基于地表运动速度危险性分级标准

地表运动速度	$V < 3\text{mm/d}$	$3 < V \leq 10\text{mm/d}$	$10 < V \leq 20\text{mm/d}$	$V > 20\text{mm/d}$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

7.1.2.2 地质灾害危险性等级与地表运动速度增量对应关系按照表 7 划分。

表 7 基于地表运动速度增量危险性分级标准

地表运动速度增量	$\Delta V < 0\text{mm/d}^2$	$\Delta \approx 0\text{mm/d}^2$	$0 < \Delta V < 2\text{mm/d}^2$	$\Delta V > 2\text{mm/d}^2$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

7.1.2.3 地质灾害危险性等级与地裂缝宽度对应关系按照表 8 划分。

表 8 基于裂缝宽度危险性分级标准

地裂缝宽度	$W \leq 5\text{mm}$	$5 < W \leq 15\text{mm}$	$15 < W \leq 25\text{mm}$	$W > 25\text{mm}$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

7.1.2.4 泥石流危险性等级与泥深对应关系按照表 9 划分。

表 9 泥石流危险性分级标准

泥深	$H \leq 0.5\text{m}$	$0.5 < H \leq 0.8\text{m}$	$0.8 < H \leq 1\text{m}$	$H > 1\text{m}$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

7.1.2.5 地面塌陷危险性等级与地表下沉量对应关系按照表 10 划分。

表 10 地面塌陷地表下沉量危险性分级表

地表下沉量	$S \leq 20\text{mm/a}$	$20 < S \leq 40\text{mm/a}$	$40 < S \leq 60\text{mm/a}$	$S > 60\text{mm/a}$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

7.1.2.6 地面塌陷危险性等级与地表倾斜对应关系按照表 11 划分。

表 11 地面塌陷地表倾斜危险性分级表

地表倾斜	$I \leq 3\text{mm/m}$	$3 < I \leq 4\text{mm/m}$	$4 < I \leq 6\text{mm/m}$	$I > 6\text{mm/m}$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

7.1.2.7 地面塌陷危险性等级与地表水平变形对应关系按照表 12 划分。

表 12 地面塌陷危险性分级表

地表水平变形	$S \leq 0.2\text{mm/m}$	$2 < S \leq 3\text{mm/m}$	$3 < S \leq 4\text{mm/m}$	$S > 4\text{mm/m}$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

7.1.2.8 地面塌陷危险性等级与地形曲率对应关系按照表 13 划分。

表 13 地面塌陷地形曲率危险性分级表

地形曲率	$C \leq 0.2\text{mm/m}^2$	$0.2 < C \leq 0.25\text{mm/m}^2$	$0.25 < C \leq 0.3\text{mm/m}^2$	$C > 0.3\text{mm/m}^2$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

7.1.2.9 地面塌陷危险性等级与地表累计沉降量对应关系按照表 14 划分。

表 14 地面塌陷地表累计沉降量危险性分级表

地表累计沉降量	$S \leq 300\text{mm}$	$300 < S \leq 500\text{mm}$	$500 < S \leq 800\text{mm}$	$S > 800\text{mm}$
危险性等级	低危险	中危险	高危险	极高危险

## 7.2 山区电网设施易损性评价结果

### 7.2.1 输电杆塔易损性分级

7.2.1.1 《架空输电线路运行规程》(DL/T741—2019)规定了各类型杆塔的最大允许倾斜标准,见附录 H。超出最大允许倾斜值后,即被视作杆塔失效,易损性为 1;而杆塔未发生倾斜时,易损性为 0,具体易损性分级见表 15。

表 15 杆塔倾斜度易损性分级

杆塔倾斜度	$I < 0.5\%$	$0.5\% < I < 1\%$	$1.25\% < I < 1\%$	$I > 1.5\%$
易损性	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	1

7.2.1.2 对位于地质灾害体变形范围内的输电设施,杆塔的变形与破坏均为由杆塔基础引起,常见杆塔基础的变形模式可见附录 N。杆塔基础未发生相对形变时,其易损性为 0。根据杆塔基础相对沉降量划分杆塔易损性,具体易损性分级见表 16。

表 16 基础相对沉降量杆塔易损性分级

基础相对沉降量	低易损	中易损	高易损	极高易损
单一基础沉降	$H < 18\text{mm}$	$18\text{mm} < H < 36\text{mm}$	$36\text{mm} < H < 54\text{mm}$	$H > 54\text{mm}$
双基础沉降	$H < 38\text{mm}$	$38\text{mm} < H < 76\text{mm}$	$76\text{mm} < H < 115\text{mm}$	$H > 115\text{mm}$
三基础沉降	$H < 26\text{mm}$	$26\text{mm} < H < 52\text{mm}$	$52\text{mm} < H < 77\text{mm}$	$H > 77\text{mm}$

7.2.1.3 杆塔在地质灾害作用下,内部钢杆件发生弯曲、扭转等形变,当其应力超过其屈服强度,即可视作杆件损坏。据此,选取杆塔钢材应力为易损性评价指标,当钢材应力超过其屈服强度,易损性为 1。杆塔常见钢材型号为 Q235、Q345,不同钢材具体易损性分级见表 17。

表 17 杆塔钢材应力易损性分级

Q235	应力值	$\sigma < 78\text{MPa}$	$78\text{MPa} < \sigma < 156\text{MPa}$	$156\text{MPa} < \sigma < 235\text{MPa}$	$\sigma > 235\text{MPa}$
	易损性	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	1
Q345	应力值	$\sigma < 115\text{MPa}$	$115\text{MPa} < \sigma < 230\text{MPa}$	$230\text{MPa} < \sigma < 345\text{MPa}$	$\sigma > 345\text{MPa}$
	易损性	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	1

### 7.2.2 变电站易损性分级

7.2.2.1 冲击掩埋型变电站选取地质灾害对变电站掩埋面积与变电站总面积的比值计算变电站冲击作用下易损性,占比值即是变电站易损性。当变电站未受到掩埋,易损性为 0,当变电站全部遭受掩埋,易损性为 1。

#### 7.2.2.2 基础变形破坏型变电站

a) 变电站变压器(T)易损性具体分级标准见表 18。

表 18 变电站变压器易损性分级标准

倾斜度 $\theta$	$\theta < 2/1000$	$2/10000 < \theta < 10/1000$	$10/10000 < \theta < 15/1000$	$\theta > 15/1000$
易损性	0	0~0.5	0.5~1	1

b) 其他室外高压电气设备 (E) 易损性具体分级标准见表 19。

表 19 高压电气设备易损性分级标准

倾斜度 $\theta$	$\theta < 2/1000$	$2/10000 < \theta < 10/1000$	$10/10000 < \theta < 15/1000$	$\theta > 15/1000$
易损性	0	0~0.5	0.5~1	1

c) 构筑物结构易损性具体分级标准见表 20。

表 20 配网设施易损性分级标准

倾斜度 $\theta$	$\theta < 2\text{‰}$	$2\text{‰} < \theta < 10\text{‰}$	$10\text{‰} < \theta < 30\text{‰}$	$\theta > 30\text{‰}$
易损性	0	0~0.5	0.5~1	1

d) 以变电站内变电站变压器 (T)、其他室外高压电气设备 (E)、构筑物结构 (S) 三大主要组成部分的占比为权重, 分别计算得到三大部件的相应易损性, 根据 6.3.3 节加权得到变电站总易损性值。

7.2.3 配网易损性分级具体易损性分级标准见表 21。

表 21 配网设施易损性分级标准

倾斜度 $\theta$	$\theta < 2/1000$	$2/1000 < \theta < 10/1000$	$10/10000 < \theta < 15/1000$	$\theta > 15/1000$
易损性	0	0~0.5	0.5~1	1

### 7.3 山区电网地质灾害风险性评价结果

7.3.1 应在地质灾害危险性、易损性评价的基础上, 采用矩阵式评价方法开展地质灾害风险评价。

7.3.2 地质灾害风险性应在危险性和易损性评价基础上, 将风险评价结果划分为极高、高、中、低四个等级。

7.3.3 地质灾害危险性、易损性的地质灾害矩阵式风险评价参照表 22。

表 22 山区电网地质灾害风险等级划分

易损性				危险性
极高	高	中	低	
极高风险	极高风险	高风险	中风险	极高
极高风险	高风险	中风险	中风险	高
高风险	高风险	中风险	低风险	中
高风险	中风险	低风险	低风险	低

### 7.4 山区电网地质灾害风险管控

7.4.1 根据风险评价结论, 结合山区输电设施防灾减灾工作的实际情况, 从降低灾害发生概率、提高点电网易损性、有效规避风险等角度提出避让搬迁、工程治理方案和监测预警等综合地质灾害风险管控和降低风险措施建议。

7.4.2 输电杆塔设施在不同地质灾害风险等级下管控措施具体见表 23。

表 23 输电设施风险管控措施

风险等级	管控措施
低	(1) 对输电线路和杆塔进行半年或每年一次的定期巡视和检查, 及时发现和处理潜在地质灾害。 (2) 对巡视人员进行地质灾害防范和应急处理的培训, 提高应对灾害的能力。 (3) 立警示牌、汛期加强巡视。

风险等级	管控措施
中	<p>(1) 群测群防为主，局部变形区布设专业监测设备，实时监测潜在地质灾害的发展趋势，包括地质体变形和上部的输变配设施变形，及时发布预警信息。</p> <p>(2) 对可能受到地质灾害影响的输电杆塔，检查频率每季度或每月/次，加强维护工作。</p> <p>(3) 对于已经发生细微变形的杆塔，加装地面拉线固定，在安全施工范围内焊接加固钢材。</p> <p>(4) 加强对周边居民和相关单位的地质灾害防范宣传和教育，提高其对地质灾害的认识和防范意识。</p>
高	<p>(1) 建立完善的地质灾害监测、输电杆塔系统，检查频率每月/次，对潜在的地质灾害进行实时监测和预警，并建立应急响应机制。</p> <p>(2) 根据灾害风险情况辅以工程治理，进行简单围挡并布设警告标志，提前设计治理工程，完善应急预案。</p> <p>(3) 加强对周边居民和相关单位的地质灾害防范宣传和教育，提高其对地质灾害的认识和防范意识。</p> <p>(4) 制定备用供电方案，制定电网恢复计划，明确在地质灾害发生后的紧急修复步骤，缩短电力中断时间。</p>
极高	<p>(1) 建立完善的地质灾害监测、输电杆塔系统，对潜在的地质灾害进行实时监测和预警，检查频率每周/次，并建立应急响应机制。</p> <p>(2) 划定灾害及其次生灾害影响范围，评价灾害发生时间，响应应急预案。</p> <p>(3) 受影响区域居民疏散和避险，封锁交通线路。</p> <p>(4) 开展应急治理:削方减载、堆载压脚、快速支挡、锚固、固体和排水等。</p> <p>(5) 输电设施停止供电，对于无法治理灾害，制定输电线路迁改方案，将风险威胁范围内的杆塔进行改建至附近安全地带。</p>

7.4.3 变电站设施在不同地质灾害风险等级下管控措施具体见表 24。

表 24 变电设施风险管控措施

风险等级	管控措施
低	<p>(1) 对变电站设备半年或每年一次的定期巡视和检查维护，及时发现和处理潜在问题。</p> <p>(2) 对变电站运维人员进行地质灾害防范和应急处理的培训，提高应对灾害的能力。</p> <p>(3) 建立简单的地质灾害监测系统，对可能发生的地质灾害进行监测和预警。</p>
中	<p>(1) 群测群防为主，对变电站易遭受地质灾害的区域与设施设专业监测设备，实时监测潜在地质灾害的发展趋势，检查频率每季度或每月/次，及时发布预警信息。</p> <p>(2) 针对潜在受地质灾害影响的变电站区域，采取加固和改造措施，提高变电站的抗灾能力。</p> <p>(3) 加强对周边居民和相关单位的地质灾害防范宣传和教育，提高其对地质灾害的认识和防范意识。</p>
高	<p>(1) 建立完善的地质灾害监测，对潜在的地质灾害进行实时监测和预警，检查频率每月/次，并建立应急响应机制。</p> <p>(2) 根据灾害风险情况辅以工程治理，进行简单围挡并布设警告标志，提前设计治理工程，完善应急预案。</p> <p>(3) 制定备用供电方案，制定电网恢复计划，明确在地质灾害发生后的紧急修复步骤，缩短电力中断时间。</p>
极高	<p>(1) 制定完善的地质灾害应急预案，明确各方责任和应对措施，并进行定期的应急演练和培训，检查频率每周/次。</p> <p>(2) 严格限制新建变电站设施的施工，并采取措施减少已建设变电站设施的风险。</p> <p>(3) 划定灾害及其次生灾害影响范围，评价灾害发生时间，响应应急预案。</p> <p>(4) 受影响区域居民疏散和避险，封锁交通线路。</p> <p>(5) 开展应急治理:削方减载、堆载压脚、快速支挡、锚固、固体和排水等。</p> <p>(6) 变电设施停止供电，制定备用供电方案，制定专项工程抢险措施。</p>

7.4.4 配网设施在不同地质灾害风险等级下管控措施具体见表 25。

表 25 配网设施风险管控措施

风险等级	管控措施
低	<p>(1) 配网半年或每年一次定期进行巡视、检查和维护，及时发现和处理潜在问题。</p> <p>(2) 对变电站运维人员进行地质灾害防范和应急处理的培训，提高应对灾害的能力。</p> <p>(3) 立警示牌、汛期加强巡视。</p>
中	<p>(1) 专业监测为主，局部变形区加密监测设备，关注监测数据，检查频率每季度或每月/次，及时发布预警信息。</p> <p>(2) 评价地质灾害及其次生灾害影响范围，响应应急预案。</p> <p>(3) 针对潜在受地质灾害影响的配电区域，采取加固和改造措施。</p>

	(4) 加强对周边居民和相关单位的地质灾害防范宣传和教育, 提高其对地质灾害的认识和防范意识。
高	<p>(1) 建立完善的地质灾害监测, 对潜在的地质灾害进行实时监测和预警, 检查频率每月/次, 并建立应急响应机制。</p> <p>(2) 划定灾害及其次生灾害影响范围, 响应应急预案;</p> <p>(3) 根据灾害风险情况辅以工程治理, 进行简单围挡并布设警告标志, 提前设计治理工程, 完善应急预案。</p> <p>(4) 制定备用供电方案, 制定电网恢复计划, 明确在地质灾害发生后的紧急修复步骤, 缩短电力中断时间。</p>
极高	<p>(1) 制定完善的地质灾害应急预案, 明确各方责任和应对措施, 并进行定期的应急演练和培训, 检查频率每周/次。</p> <p>(2) 划定滑坡及其次生灾害影响范围, 快速撤离滑坡及其次生灾害影响范围内人员与财产响应应急预案。</p> <p>(3) 开展应急治理: 削方减载、堆载压脚、快速支挡、锚固、固体和排水等。</p> <p>(4) 配电设施停止供电, 制定备用供电方案, 制定专项工程抢险措施。</p>

## 附录 A (规范性)

### 地质灾害稳定性评价模型

#### A.1 定性分析模型

定性分析模型是通过工程地质勘查,查明影响地质灾害稳定性的主要因素、可能的变形破坏方式及失稳的力学机制,分析已变形地质体的成因及其演化阶段,最终结合实践经验定性评价地质灾害稳定性状况及其可能发展趋势。其优点是能综合考虑影响地质灾害稳定性的多种因素,快速地对地质灾害的稳定状况及其发展趋势作出评价。缺点是类比条件因地、因时而异,经验性强,无数量界限。常用的模型主要有自然(成因)历史分析法、工程地质类比法、图解法等。

**A.1.1 自然(成因)历史分析法:**该模型主要根据地质灾害发育的地质环境,分析地质灾害发育历史中的各种变形破坏迹象及其基本规律和稳定性影响因素等,追溯地质灾害演变的全过程,对地质灾害体稳定性的总体状况、趋势和区域性特征作出评价和预测:然而对已发生地质灾害的地质灾害体,则须判断其能否复活或转化,从而确定天然地质灾害的稳定性。通过研究地质灾害形成的地质历史和所处的自然地理及地质环境、地质灾害的地貌和地质结构、发展演化阶段及变形破坏形迹,分析主要的和次要的影响因素,从而对地质灾害稳定性作出评价。通过追溯地质灾害发生、发展演化的全过程,进行地质灾害稳定性评价。

**A.1.2 工程地质类比法:**该法是将已有的天然地质灾害体经验,包括稳定的或破坏的,用于新研究地质灾害的稳定性分析,坡角或计算参数的取值等。此法具有经验性和地区性特点,应用时必需全面分析已有地质灾害体与新研究地质灾害体两者之间的地貌、地层岩性、结构、水文地质、自然环境、历史变形等主导因素及发育阶段等方面的相似性,同时还应考虑工程的规模、类型及其对地质灾害体的特殊要求等。工程类比法是根据拟建工程区的工程地质条件、岩体特性和动态观测资料,结合具有类似条件的已建工程,开展资料的综合分析和对比,从而判断工程区岩体的稳定性,取得相应的资料进行稳定分析。

**A.1.3 图解法:**图解法常用于岩质地质灾害体的稳定分析,是在岩体结构及其特性研究的基础上,考虑工程力作用方式,借助赤平投影、实体比例投影法或块体坐标投影法进行图解分析,这样可快速、直观地分辨出控制地质灾害体的主要和次要结构面,分析不连续面的组合关系和控制性边界条件,确定欠稳定块体的形状、规模及滑动方向,进而初步判定地质灾害体的稳定性,并为力学计算提供信息。

#### A.2 定量分析模型

##### A.2.1 极限平衡分析法

极限平衡理论的主要思想是将滑动土体进行条分,根据极限状态下土条受力和力矩的平衡来分析地质灾害的稳定性,极限平衡分析模型很多,如:Fellenius法、Bishop法、Jaubu法、Morgenstern Prince法、Hoek楔体极限平衡分析法、Sama法等(表A.1)。数值分析模型:数值分析模型是目前岩土力学计算中使用比较普遍的一类分析模型,主要有:有限元(FEM)法、边界元(BEM)法、离散元(DEM)法、快速Lagrangian分析法、块体理论(BT)与不连续变形分析(DDA)、无界元(DEM)法等(表A.2)。

表 A.1 部分极限平衡法的主要特点

分析模型	应用条件及步骤	力学分析	实用范围及特点
Fellenius 法	圆弧滑面,定转动中心,各块间作用合力平行于滑动面。	整体力矩平衡	(1) 圆弧滑面滑坡 (2) 垂直条分滑体 (3) 计算简单,稳定系数偏小 (4) 只适于简单均质土坡
Bishop 法	圆弧滑面,定转动中心,各块间作用合力平行于滑动面;非圆弧滑面,拟合圆弧与转	(1) 整体力矩平衡与静力平衡 (2) 条间垂向作用力为零	(1) 任意形状的滑面 (2) 垂直条分滑体 (3) 稳定系数略大

分析模型	应用条件及步骤	力学分析	实用范围及特点
	动中心, 各块间作用力水平, 条间切向力 $X$ 为零。		(4) 一般适用于土坡
Janbu 法	非圆弧滑面, 精确计算各条块滑动平衡条间力, 按推力线定法向力 $E$ 的作用点; 简化条间切向力 $X=0$ , 然后对稳定性系数进行修改。	(1) 分块力矩平衡 (2) 分块力平衡 (3) 考虑条间作用力	(1) 垂直条分滑体 (2) 用于复合滑坡 (3) 可适于非均质土坡
Spencer 法	圆弧滑面或拟合中心圆弧。 $X/E$ 为一个给定常数值。	(1) 分块力平衡 (2) 分块力矩平衡	(1) 任何形状滑面滑坡 (2) 垂直条分块体 (3) 岩质滑坡或土滑坡
Morgenstern-Spencer 法	圆弧或非圆弧滑动面, $X/E$ 与水平方向坐标存在着函数关系 $X/E=\lambda f(x)$	(1) 考虑分块力矩平衡 (2) 考虑分块切向力平衡与法向力平衡	(1) 垂直条分滑体 (2) 用于任何形状滑面滑坡 (3) 适于土坡
Hock 楔体分析法	楔形滑动面, 各滑面均为平面, 以各滑面总抗滑力与楔体总下滑力来确定稳定安全系数。	整体力平衡	适于岩质楔形滑坡或土滑坡
Sarma 法	认为除平面和圆弧面外, 滑动体必须先破裂成相互滑动的块体后才能滑动, 该模型根据块体处于极限平衡状态来确定稳定系数。	分块力平衡	(1) 可以任意条分块体 (2) 适于任何形状滑面滑坡 (3) 适于岩质滑坡或土质滑坡
不平衡推力法 (传递系数法)	圆弧或非圆弧滑动面。条块间合力方向与上一条块滑面平行, 即 $X_i/E_i=\tan\alpha_i$ 。	(1) 各分块力平衡 (2) 考虑了分条面上的剪力	(1) 任何形状滑面滑坡 (2) 垂直条分块体 (3) 岩质滑坡或土滑坡 (4) 滑动面倾角不宜过陡

### A.2.2 数值分析模型

数值分析模型是目前岩土力学计算中使用比较普遍的一类分析模型, 主要有: 有限元 (FEM) 法、边界元 (BEM) 法、离散元 (DEM) 法、快速 Lagrangian 分析法、块体理论 (BT) 与不连续变形分析 (DDA)、无界元 (DEM) 法等 (表 A2)。

表 A.2 部分数值分析模型的主要特点

分析模型	运行机制	使用特点	存在缺陷
有限元法 (FEM)	离散岩土介质为多个单元, 荷载移植至节点, 插值函数考虑连续条件, 采用矩阵位移法或力学求解岩土介质应力场和位移场。	可以用来求解弹性、弹塑性、粘弹性、粘塑性等问题; 部分地考虑了土体均质、不连续性, 可以给出岩土体应力、应变的大小与分布。	对大变形、小连续位移、无限域、应力集中等问题的求解不理想。
边界元法 (BEM)	将介质边界离散为边界单元, 把边界微分方程转换为线性代数方程组, 求解边界应力和位移解, 再由解析法计算域内任一点的解。	只对研究区的边界进行离散, 数据输入量较少, 对处理无界域、半无界域等问题较为理想。	要求事先知道控制微分方程的基本解, 在处理非线性、小均匀性、模拟分步开挖等方面不如有限元。
FLAC 法	有限差分原理	考虑岩土体小连续性、大变形特征, 求解速度较快。	计算边界、单元网格的划分具有很大随意性。
离散元法 (DEM)	将区域离散为单元, 但单元结点可以分离, 单元间的作用力可由力与位移的关系求出, 个别单元的运动由牛顿运动定理确定。	动态性, 考虑了岩体的非均质、不连续和大变形等特点, 允许块体间发生平动、转动甚至相互脱离, 可形象反映应力场、速度、位移等力学参量的全程变化。	只对块状、层状破裂或一般碎裂结构岩体比较适合。
无界元法	采用了一种特殊的形函数及位移插值函数, 能反映在无穷远处的边界条件, 近年来已比较广泛地应用非线性问题动力问题、不连续问题等的求解, 是有限元模型的推广。	适合于非线性、小连续和动力等问题求解, 能有效解决有限元的“边界效应”及人为确定边界的缺点, 在动力问题中尤为突出。	一般要与其他模型, 如有限元联合应用。
块体理论	几何学原理与解析模型	几何学特征, 利用拓扑学、群论原理, 适用于岩体稳定分析。	只考虑抗拉强度, 不计节理变形、力矩作用。

分析模型	运行机制	使用特点	存在缺陷
不连续变形分析 (DDA)	通过小连续曲面的相互约束建立整个系统的力学平衡条件, 引入了非连续接触和惯性力, 采用运动学原理解决非连续的动力与静力问题。	考虑了变形的小连续性, 引入了时间因素, 可以计算静力、动力问题, 可以计算岩体破坏前小变形及破坏后大位移问题。	网格的划分比较复杂。

## 附录 B

(规范性)

## 滑坡或崩塌灾害运动距离关系经验公式

## B.1 基于前后缘高程的经验公式模型

$$S=2(H_1-H_2) \quad (1)$$

式中:

S—滑距 (m);  $H_1$  崩塌后缘高程 (m);  $H_2$  崩塌前缘高程 (m)。

## B.2 基于崩塌体积的模型

$$\log(H/L)=-0.094\log(V)+0.1 \quad (2)$$

式中:

H—滑体垂直滑落高度 (崩塌前后缘高差) (m);

L—水平滑移距离 (m);

V—滑动体的体积 ( $m^3$ )。

## B.3 基于崩塌物理力学参数的模型

$$L=n \times \Delta H / (0.5 \tan \varphi) \quad (3)$$

式中:

L—崩塌体最大水平滑移距离 (m);

 $\Delta H$ —崩塌前、后缘高差(m);

n—崩塌滑出条件系数, 根据经验取 0.2;

 $\varphi$ —崩塌体的内摩擦角 ( $^\circ$ )。

## 附录 C

(规范性)

## 滑坡或崩塌破坏概率计算模型

## C.1 蒙特卡罗法破坏概率计算模型

Monte Carlo 模拟法是一种具有强大的计算功能的统计计算模型,该模型遵循的是统计抽样准则,计算流程图如下图所示。依据统计抽样理论,蒙特卡洛法研究的是通过计算机生成随机变量的数值计算模型,又被称为随机模拟法或统计试验法。

首先建立表示崩塌稳定状态的函数:

$$F_s = g(c, \varphi, \rho, h, u, \dots) \quad (1)$$

式中:  $c, \varphi, \rho, h, u$  中各项参数均是控制崩塌稳定性的随机变量,由崩塌的岩土体性质、变形机理等因素确定。一般认为这些参数均有一定的取值范围,在取值范围内则具有随机性。而导致这些随机性的原因包括地质体的不均匀性、外界环境因素变化、测量误差等。

$F_s$  表示崩塌的稳定性系数,认为  $F_s \leq 1$  时崩塌处于不稳定状态。在  $N$  组随机数中有  $M$  次  $F_s \leq 1$  的结果出现,当  $N$  足够大时,认为  $F_s \leq 1$  的频率近似于概率。崩塌的破坏概率表示如下:

$$P_f = P(F_s \leq 1) = \frac{M}{N} \quad (2)$$

当  $N$  足够大时,其均值  $\mu_F$  和标准差  $\sigma_F$  分别为:

$$\mu_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (3)$$

$$\sigma_F = \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (F_i - \mu_F)^2 \right)^{1/2} = \frac{M}{N} \quad (4)$$

测崩塌的破坏概率为:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (5)$$

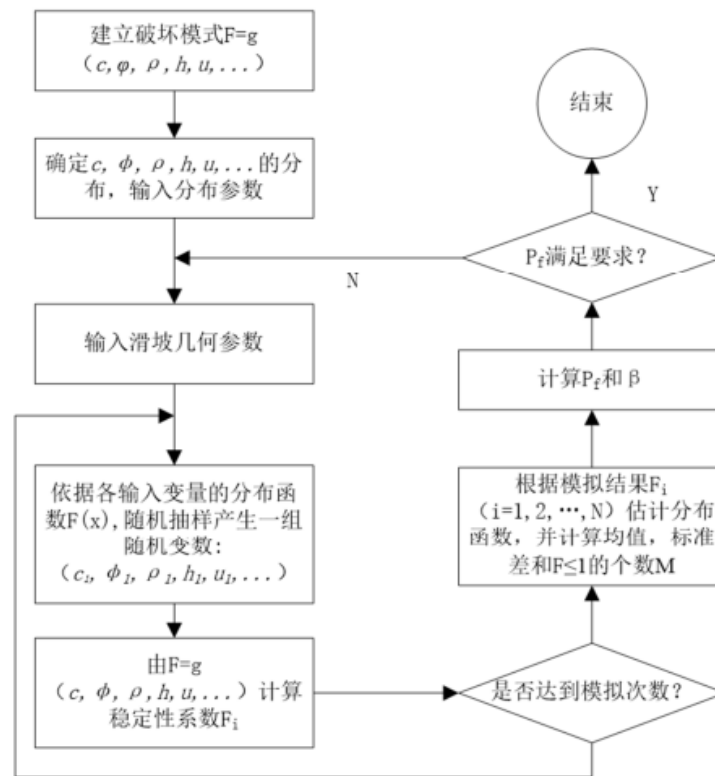


图 C.1 Monte Carlo 法计算滑坡或崩塌破坏概率模型流程图

## C.2 边坡稳定性分析的破坏概率确定模型

该模型首先根据不同降雨工况对边坡岩土体粘聚力  $C$  和内摩擦角  $\varphi$  进行强度折减, 即  $C'=C/F$  (折减系数  $F$  可根据不同降雨工况下岩土实验获得, 亦可通过数值模拟反演获得), 得到 4 组折减后的  $C$ 、 $\varphi$  值; 然后运用极限平衡法等模型, 对斜坡进行稳定性计算, 得到斜坡的稳定性系数  $F_s$ ; 最后根据《崩塌防治工程勘查规范》中, 稳定性系数  $F_s$  值与稳定性对应关系, 分段插值确定失稳概率  $P$ 。

表 C.2 边坡稳定性系数与失稳概率  $P_i$  对应表

稳定性系数 $F_s$	$F_s \leq 1$	$1 < F_s \leq 1.05$	$1.05 < F_s \leq 1.15$	$F_s \geq 1.15$
稳定性等级	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
失稳概率	$P_i=1$	$0.8 \leq P_i < 1$	$0.2 \leq P_i < 0.8$	$P_i=0.2$

## 附录 D

(规范性)

## 泥石流冲击力、影响范围经验公式

## D.1 泥石流冲击力经验计算公式

泥石流冲击力分为整体的冲击压力和单个大石块的冲击压力，根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZT0220-2006)提供的计算公式对两种冲击力进行计算。

a) 泥石流整体冲击压力计算公式

$$F = \lambda \gamma_D V_c^2 \frac{\sin \alpha}{g} \quad (1)$$

式中:

$F$ —泥石流整体冲击压力( $10^4\text{P}$ );

$\lambda$ —建筑物形状系数, 建筑物为圆形、矩形和方形时分别取 1.0, 1.33 和 1.47;

$g$  为重力加速度 (取  $9.8\text{m}^2/\text{s}$ );

$\gamma_D$ —泥石流容;

$V_c$ —泥石流流速 ( $\text{m/s}$ );

$\alpha$ —建筑物受力面与泥石流冲击力方向的夹角 (取  $90^\circ$ )。

b) 单个大块石冲击压力计算公式

$$F_s = K V_c \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (2)$$

式中:

$F_s$ —单个巨石的冲击力 (tf,  $1\text{tf} \approx 10^4\text{N}$ );

$K$ —折减系数 (正面撞击时, 取 0.3);

$V_c$ —泥石流流速 ( $\text{m/s}$ );

$\alpha$ —建筑物受力面与泥石流冲击力方向的夹角 (取  $90^\circ$ );

$C_1$ —巨石的弹性变形系数;

$C_2$ —建筑物的弹性变形系数, 取值  $C_1+C_2=0.005$ ;

$W$ —冲出巨石重量 (tf)。

## D.2 泥石流影响范围经验公式

泥石流危险区包括泥石流形成区、流通区和堆积区范围, 其中堆积区是危害成灾的主要部位。可通过对历史泥石流的回访和调查确定危险区, 也可由以下经验公式预测泥石流堆积区的最大危险范围  $S(\text{km}^2)$ :

$$s = 0.6667L \times B - \frac{0.0833B^2 \sin R}{1 - \cos R} \quad (3)$$

式中:

$L$ —泥石流最大堆积长度 (km),  $L=0.8061+0.0015A+0.000033W$ ;

$B$ —泥石流最大堆积宽度 (km),  $B=0.5452+0.0034D+0.000031W$ ;

$R$ —泥石流堆积幅角 ( $^\circ$ ),  $R=47.8296-1.3085D+8.8876H$ ;

$A$ —流域面积 ( $\text{km}^2$ );

$W$ —松散固体物质储量 ( $10\text{m}^3$ );

$D$ —主沟长度 (km);

$H$ —流域最大高差 (m)。

附录 E  
(规范性)  
泥石流危险性评价模型

E.1 泥石流危险性评价常见模型

表 E.1 泥石流危险性评价常见模型及其特点

评价模型	基本原理	基本特点
层次分析法	构造判断矩阵,计算每个指标的权重并进行一致性检验。	层次关系分明,主观性强。
聚类分析	主观不确定性,常用投影寻踪聚类、模糊均值聚类。	可不用训练数据,可避免确定指标权值或分类阈值的。
模糊综合评判法	根据隶属度函数得出隶属度矩阵,由权重向量与隶属度矩阵运算后得出最终隶属度,并得出评价结果。	适合模糊随机性及多指标综合评价问题,有一定的主观性确定隶属度较难。
灰色预测评价法	通过对少量已知数据确定有意义的信息,形成微分方程模型对不确定因素预测泥石流未来发生的可能性。	计算简便快捷,数据量要求小,间接评价,争议较大。
信息熵理论评价法	用信息熵的大小反映泥石流处于不同的发育阶段,从而对泥石流进行评价。	客观、计算简便;精度依赖数据量的多少,数据少时精度低。
数值模拟模型	通过计算机程序模拟泥石流的运动过程,计算得到泥石流的参数分布,对泥石流的危险范围和危害程度进行评价。	成本低,可重复性强,结果受模型参数选取影响较大。
人工神经网络法	根据观测样本选取神经网络结构,训练得出评价模型。	处理非线性问题能力强、容错能力强,对模糊信息的处理能力强;各因子间作用关系模糊、收敛速度慢。
支持向量机法	选择核函数将样本分成训练集和测试集,对训练集进行训练得到的模型用于测试集,得到最终的评价模型。	适合小样本、高维次、非线性分类模式的特点,但容易陷入局部极小值,泛化能力不强以及只能解决大样本数据。

E.2 信息熵模型

信息熵是信息不确定性的度量。一般来讲,信息熵值越大,信息的不确定性越大,其效用值越小;反之则越大。由于泥石流受到诸多因素的共同作用,这些因素错综复杂,因此可借助熵理论表达各因子的效用价值,求得各影响因素的权重,计算步骤如下。

(1) 评价指标标准化

原始数据 $x_{ij}$ ,通过式(1)进行标准化处理,得到无量纲矩阵 $r_{ij}$ 。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(j)}{\max(j) - \min(j)} \quad (1)$$

其中, $\max(j)$ , $\min(j)$ 为 $j$ 指标最大值、最小值。

(2) 熵值的建立

根据公式(2)建立信息熵,其中 $E_j$ 表示指标 $j$ 的信息熵值,且 $E_j \in [0, 1]$ ,其值越大,则该指标 $j$ 对泥石流灾害的孕育发生贡献率越小, $K=1/\ln m$ , $P_{ij}$ 表示第 $j$ 项指标下该实测值在第 $i$ 个单沟样本中的比率, $P_{ij} \in [0, 1]$ 。此外,对于 $r_{ij}=0$ ,定义 $P_{ij} \ln P_{ij}$ 。

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (2)$$

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}} \quad (3)$$

## (3) 评价指标权重计算

信息熵越小，指标越活跃，越容易触发泥石流灾害。公式(4)为第  $j$  项评价指标的权重计算公式。

$$W(j) = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^n (1-E_j)} \quad (4)$$

## (4) 泥石流危险性评价

计算出各个指标的权重值后，可根据式(5)来计算每个样本的危险性值  $F(i)$ ， $F(i)$  越大，则表明该地区发生泥石流灾害的可能性越大。

$$F(i) = \sum_{j=1}^n W_j r_{ij} \quad (5)$$

附录 F  
(规范性)  
地面塌陷沉降量计算

F.1 采空区塌陷计算公式

采空区塌陷的剖面线和概率密度分布在理论上是与正态分布基本一致，使用概率密度函数的积分公式来计算整体开采所引起采空区的沉降量。根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》（安监总煤装〔2017〕66号），可运用叠加位移来等效计算采空区地表移动变形，公式如下：

下沉量：

$$W(x, y) = W_{\max} \iint_D \frac{1}{r^2} \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt \quad (1)$$

倾斜：

$$I_x(x, y) = W_{\max} \iint_D \frac{2\pi(s-x)}{r^4} \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt \quad (2)$$

$$I_y(x, y) = W_{\max} \iint_D \frac{2\pi(t-y)}{r^4} \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt \quad (3)$$

曲率：

$$K_x(x, y) = W_{\max} \iint_D \frac{2\pi}{r^4} \left[ \frac{2\pi(s-x)^2}{r^2} - 1 \right] \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt \quad (4)$$

$$K_y(x, y) = W_{\max} \iint_D \frac{2\pi}{r^4} \left[ \frac{2\pi(t-y)^2}{r^2} - 1 \right] \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt \quad (5)$$

水平移动：

$$U_x(x, y) = U_{\max} \iint_D \frac{2\pi(s-x)}{r^3} \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt \quad (6)$$

$$U_y(x, y) = U_{\max} \iint_D \frac{2\pi(t-y)}{r^3} \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt + W(x, y) \cot \theta_0 \quad (7)$$

水平变形：

$$\varepsilon_x(x, y) = U_{\max} \iint_D \frac{2\pi}{r^3} \left[ \frac{2\pi(s-x)^2}{r^2} - 1 \right] \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt \quad (8)$$

$$\varepsilon_y(x, y) = U_{\max} \iint_D \frac{2\pi}{r^3} \left[ \frac{2\pi(t-y)^2}{r^2} - 1 \right] \exp\left[-\pi \frac{(s-x)^2 + (t-y)^2}{r^2}\right] dsdt + I_y(x, y) \cot \theta_0 \quad (9)$$

以上式中符号具体含义见表 F.1。

表 F.1 地表变形计算公式符号及其含义

符号	含义	单位
$W(x, y)$	地表任意点（坐标为 $x$ 和 $y$ ）的下沉值	mm
$I_x(x, y)$	坐标 $x$ 和 $y$ 的地表任意点在 $x$ 方向上的倾斜值	mm/m
$I_y(x, y)$	坐标 $x$ 和 $y$ 的地表任意点在 $y$ 方向上的倾斜值	mm/m
$K_x(x, y)$	坐标 $x$ 和 $y$ 的地表任意点在 $x$ 方向上的曲率值	$10^{-3}/m$
$K_y(x, y)$	坐标 $x$ 和 $y$ 的地表任意点在 $y$ 方向上的曲率值	$10^{-3}/m$
$U_x(x, y)$	坐标 $x$ 和 $y$ 的地表任意点在 $x$ 方向上的水平移动值	mm
$U_y(x, y)$	坐标 $x$ 和 $y$ 的地表任意点在 $y$ 方向上的水平移动值	mm
$\varepsilon_x(x, y)$	坐标 $x$ 和 $y$ 的地表任意点在 $x$ 方向上的水平变形值	mm/m
$\varepsilon_y(x, y)$	坐标 $x$ 和 $y$ 的地表任意点在 $y$ 方向上的水平变形值	mm/m
$W_{\max}$	地表充分采动时的最大下沉值	mm
$U_{\max}$	地表充分采动时的最大水平移动值	mm
D	工作面倾斜长度和走向长度确定的积分范围	m
$r$	主要影响半径	m
$\theta_0$	开采影响传播角	°
$s$	积分变量	/
$t$	积分变量	/
$q$	下沉系数	mm/m
$m$	煤层法向开采厚度	m
$\alpha$	煤层倾角	°
$b$	水平移动系数	/
$l$	走向主断面下沉值为 $0.16W_{\max}$ 和 $0.84W_{\max}$ 的点之间的距离	m
$\beta$	主要影响角： $x=\pm r$ 的地表点与采空区下边界相连与水平线形成的锐角	°
$\tan\beta$	主要影响角正切	/
$s$	拐点偏距：由顶板的悬臂作用引起的偏移距离	m
H	煤层开采深度	m
T	地表移动的延续时间	d
$H_0$	工作面平均采深	m
$H_{lf}$	采空区垮落断裂带的埋藏深度	m
$H_m$	垮落带高度	m
$H_{li}$	断裂带高度	m
$P_0$	建筑物基底压力	kN
Q	采动影响区顶板上的压力	kN
$G_m$	巷道单位长度顶板上岩层所受的总重力	kN/m
$B_m$	巷道宽度	m
$f$	巷道单位长度侧壁摩阻力	kN/m
$\gamma$	岩层的重度	kN/m

符号	含义	单位
$\phi$	顶板岩层的内摩擦角	°
$H_0$	荷载临界深度	m
$\sigma_z$	地基附加应力	kN
$\sigma_c$	地基自重应力	kN
m	基础长宽比	/
n	基础深宽比	/
$a_0$	矩形竖直均布荷载作用下中心点下方数值应力分布系数	/
P	均布荷载	kPa
b	矩形基础的宽度	m
l	矩形基础的长度	m
z	计算点深度	m
n	从天然地面到深度 z 处的土层数	/
$r_i$	第 i 层土的容重	kN/m <sup>3</sup>
$h_i$	第 i 层土的厚度	m
$\sum M$	累计开采厚度	m

附录 G  
(规范性)

输电杆塔基础失效模式

根据杆塔基础之间的相对变形，可将杆塔基础沉降方式分为 7 类，不同变形方式作用下杆塔破坏模式如表 G.1 所示。

表 G.1 常见杆塔基础变形与杆塔破坏方式

类型	基础相对变形参数	变形示意图	杆塔破坏模式
1	基础之间相对位移 0m		随着地面塌陷变形值的增大，导、地线将会有断线的危险，断线将会产生不平衡张力造成铁塔倒塌、塔头破坏、导线损坏等事故
2	单基础沉降		基础的不均匀沉降将导致铁塔上层部分产生附加应力，当铁塔构件的内力在附加应力的作用下超过材料的容许应力时，将导致杆塔结构的破坏
3	双基础沉降		
4	三基础沉降		
5	水平位移加单基础沉降		在水平变形主要是由于地表产生的拉伸或压缩变形。一般来说当地表水平拉伸变形相对较小时，塔身薄弱处可能会产生竖向的裂缝。当水平压缩变形较大时，对铁塔塔身的破坏就会比较严重，可能会使铁塔的基础被压碎，塔身产生较大碎裂。同时产生的不均匀沉降也将导致杆塔结构的破坏
6	水平位移加双基础沉降		在水平变形主要是由于地表产生的拉伸或压缩变形。一般来说当地表水平拉伸变形相对较小时，塔身薄弱处可能会产生竖向的裂缝。当水平压缩变形较大时，对铁塔塔身的破坏就会比较严重，可能会使铁塔的基础被压碎，塔身产生较大碎裂。同时产生的不均匀沉降也将导致杆塔结构的破坏
7	水平位移加三基础沉降		

附录 H  
(规范性)

输电杆塔倾斜度标准

《架空输电线路运行规程》(DL/T 741—2019)对不同类型输电杆塔最大允许倾斜范围做出了规定,具体见表 H.1。

表 H.1 《架空输电线路运行规程》(DL/T 741—2019)倾斜度标准

类别	钢筋混凝土电杆	钢管杆	角钢塔	钢管塔
直线杆塔倾斜度	1.5%	0.5%	1% (50m 及以上高度铁塔)	0.5%
直线转角杆最大扰度	/	0.7%	/	/
转角和终端杆 66kv 及以下最大扰度	/	1.5%	/	/
转角和终端杆 110Kv~220kv 及以下最大扰度	/	2%	/	/
杆塔横担歪斜度	1.0%		1.0%	0.5%

附录 I  
(规范性)

输电设施易损性评价模型

I.1 基于灾害强度与输电设施抗灾能力的易损性模型

$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2\frac{I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0.5 \\ 1.0 - 2\left(1 - \frac{I}{R}\right)^2 & 0.5 < \frac{I}{R} \leq 1.0 \\ 1.0 & \frac{I}{R} > 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

式中：

I—灾害强度：考虑杆塔基础与滑坡影响范围的关系、滑坡体积、滑坡速度等综合得出，取值 0~1；

R—抗灾能力：考虑杆塔及杆塔基础自身属性（如杆塔的电压等级、基础形式、结构特征、材料属性等）得到，取值 0~1。根据公式可以得到定量化程度很高的数值化的易损性结果，可以与同样取值为 0~1 之间的危险性结果之间结合。得到定量化的易损性后，通常根据易损性值将其分为不同等级，以便于等级结合。

I.2 基于威布尔分布的输电杆塔易损性评价

威布尔分布是一种广泛应用于可靠性分析的连续性概率分布。它可以利用概值较为简便的推断出相应的分布参数，被应用于各种寿命试验的数据处理。其概率密度为：

$$f(x; \lambda, k) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中，x 是随机变量，λ 是比例参数，k 是形状参数。其累积分布函数是扩展的指数分布函数。

$$F(x; \lambda, k) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

k<1 的值表示故障率随时间减小。k=1 的值表示故障率随时间是恒定的。k>1 的值表示故障率随时间增加。利用滑坡水平位移值作为滑坡强度，输电线路杆塔易损性和滑坡强度之间的关系通过使用威布尔分布来拟合。位移值为累计值，选用累计分布函数进行拟合计算输电线路杆塔易损性的修正威布尔分布定义如下：

$$V = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (4)$$

式中：

V—输电线路杆塔易损性。

X—滑坡地表水平位移，采用数值模拟得到。

λ、k—常数，通过拟合曲线确定。

附录 J  
(规范性)

不同电压等级变电站常见分级标准及造价

根据国家电网北京经济技术研究院调查数据，给出 35kV、66kV、110kV、220kV 四种电压等级变电站设备组成及造价，见表 J.1

表 J.1 不同电压等级变电站常见分级标准及造价

变电站电压等级	设备占比			
	高压电气设备	室内设备	构筑物结构	平均造价
35kV	0.564	0.21	0.226	353
66kV	0.605	0.211	0.184	978
110kV	0.648	0.216	0.136	1865
220kV	0.68	0.195	0.125	4829

注：表中所统计的数据均来自大量统计，由于各地区经济发展水平不均，平均造价仅供参考，具体可依据现场调查确定。