

宋慧娟, 吴琼, 李红云, 等. 气象灾害模型在电网运检业务中的应用研究[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 68–72. [SONG Huijuan, WU Qiong, LI Hongyun, et al. Research on the application of meteorological disaster model in power grid transportation inspection business[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(4): 68–72. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.013.]

气象灾害模型在电网运检业务中的应用研究*

宋慧娟¹, 吴琼², 李红云², 尹文阔³, 赵文彬³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122 2. 北京国网富达有限公司, 北京 100070 3. 上海电力学院, 上海 200090)

摘要: 为了探究气象灾害模型在电网运检业务中的应用, 从覆冰、污闪两种由气象等因素造成线路故障方面入手, 分别构建了覆冰预警模型和污闪预警模型。基于输电线路的覆冰预警模型和污闪预警模型对历史气象灾害数据进行了案例分析。结果表明, 输电线路的覆冰和污闪预警模型与实际情况吻合, 具有较高的预警准确性。

关键词: 气象灾害; 预警模型; 运行维护; ArcGIS; 电网

中图分类号: TM723; X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)04-0068-05
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.04.013

在电网中, 有大量的输变电设备都暴露在大环境中, 故对输变电设备的运检修作业是电网工作中的重中之重。在气候变化的大背景下, 输变电设备正经受着越来越严峻的气象灾害^[1-3]。因此, 气象灾害预警、风险防控相关理论及技术已成为电力系统输电设备运检作业的重要技术^[4-8]。国内外对电力系统运检作业中的气象灾害预警方面进行了大量的研究^[9-15], 薛丽芳等^[10]介绍了电网气象灾害监测预警系统建设所需的基础地理信息数据、气象信息数据、地质信息数据、电网系统结构设计数据以及电网应急预案数据等专业数据需求。李泽椿等^[11]介绍了用于电网调度运行的电网气象信息系统, 该系统具备气象数据采集处理与统计分析、气象灾害的监视追踪和预报预警功能。郑旭^[12]详细介绍了华东电网公司重点科技项目的总体设想、气象环境参数的获取、线路故障风险判断、系统开发、系统运行情况等方面情况。综上所述, 目前缺少较为准确的设备气象风险预警方法和数学模型, 仅能针对大尺度气象趋势采取一定的预案, 并未满足电力系统气象灾害的预警需求。

针对上述问题, 本文首先基于覆冰机理和覆冰模型, 建立了一种覆冰预警模型, 并使用案例进行了验证; 其次对污闪程度进行量化分析, 建立了可视化的污闪预警模型, 并结合华东污闪案例, 对模型的准确性进行了验证分析。两类气象灾害模型都可应用于输电线路运检业务中。

1 覆冰防护

覆冰成灾不只是因低温而导致的, 它是一个渐变、多因素作用的结果^[13]。当建立覆冰模型时,

主要考虑气象因素。即, 线路所处的气温范围作为出现覆冰的先决条件, 降雨量作为覆冰出现的最基本条件, 结合气温和风速作为判断覆冰类型, 但目前系统对于覆冰预警的流程是先结合预报气象因素确定覆冰类型, 再使用相应的覆冰预测模型进行预测。这种预测结果并不准确, 因为气象因素是多变, 覆冰类型也是多变, 使用单一模型对覆冰预测必然是不准确的。所以本文使用多种覆冰预测模型相结合, 实时预测覆冰类型, 建立覆冰预警新模型。

1.1 模型的建立

不同地区的气候特征不同, 地形环境不同, 往往覆冰类型有较大差异。不同类型的覆冰, 其增长速率不同, 结合力也不同, 影响线路结冰的增长的主要原因也不一样。因此, 想要掌握覆冰机理首先要了解覆冰的分类方法, 才能针对不同类型的覆冰类型, 深入研究其覆冰机理。划分覆冰有很多种, 一般是按照物理特性进行划分。我国采用的是《DL/T 5158-2012 电力工程气象勘测技术规程》^[14], 其中将覆冰划分为四个类型: 雨淞、雾淞、混合淞和湿雪。

对于覆冰增长模型, 《IEC 61774-1997 Overhead lines-Meteorological data for assessing climatic loads》^[15]中针对不同覆冰类型推荐了不同的覆冰增长模型, 例如针对雨淞采用了 Chaine 和 Skeates 的模型, 针对霜淞采用了 Makkonen 模型, 针对湿雪采用了 Sakamoto 模型, 各个模型只能代表其中的一种覆冰类型, 如果用这些公式去描述同一种导线结冰情况, 预测结果会有比较大的差异, 所以本文模型的重点就是实时判断覆冰类型, 根据覆冰类型切换不同覆冰增长模型, 使预测覆冰增长

* 收稿日期: 2019-04-17 修回日期: 2019-06-17

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(52090016010L)

第一作者简介: 宋慧娟(1986-), 女, 浙江余姚人, 工程师, 研究方向为信息化管理. E-mail: songhj@shineenergy.com

通讯作者: 赵文彬(1977-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为设备状态管理. E-mail: wenbinmax@163.com

更加准确。对于覆冰类型的判断主要是结合风速和气温,《IEC 60826-2017 Overhead transmission lines. Design criteria》^[16]中给了不同覆冰类型的判断依据(图1)。从图1中可以看出,在5 m/s风速下气温相差几度,覆冰类型就有可能变化。故在建模过程中需要每小时的气温数据,本文根据每天气温的变化,计算每小时的温度。选用计算每小时温度数据函数:

$$t = A \times \cos \frac{T}{24} + X. \quad (1)$$

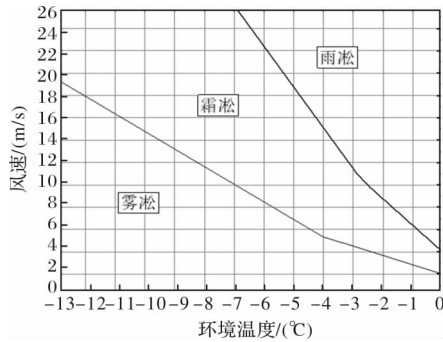


图1 不同覆冰类型分布图

式中: t 为每小时的温度值、 A 为每天的平均温度值、 T 为当天时间、 X 为调节系数。

根据每小时的气温数,再结合当地的大致风速,就能预测出每小时内线路覆冰的类型。下面简单介绍以下针对不同覆冰类型所取模型。

(1) 针对雨凇覆冰的特点选用了 Chaine 的模型^[18]。Chaine 模型主要分析导线截面随时间变化的关系,基本关系为:

$$S_i = \frac{\pi R_0}{2} \sqrt{H_g^2 + H_v^2}. \quad (2)$$

式中: $H_v = \frac{WV_i}{\rho w}$; S_i 为导线截面随时间的变化; R_0 为导线半径; H_g 为单位时间的降水量; H_v 为垂直表面上水层厚度的增长量; W 为空气中的含水量; V_i 为导线所受风速,是一个时变量; ρ_w 为水的密度。

(2) 针对霜凇覆冰的特点选用了 Makkonen 模型, Makkonen 模型给出了覆冰增长强度的概念,覆冰增长强度是单位面积上冰的增长率,单位是 $g \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$,基本关系为^[17-18]:

$$I = \frac{2}{\pi} Envw. \quad (3)$$

式中: E 为俘获率表示碰撞水滴质量与不反射情况下所有能够与导线碰撞水滴质量之比; n 为冻结因子,表示成冰的质量与碰撞水滴质量之比; v 为风速; w 为空气中液态水滴含量。

(3) Sakamoto 模型给出了对于湿雪的增长表达式,该表达式给出的覆冰增长量:

$$\frac{dM}{dt} = 2\sigma GUa(t). \quad (4)$$

式中: dM/dt 为湿雪单位长度导线上的增长率; σ 为增长因子; U 为风速; G 为空气中液态水的含量; $a(t)$ 为导线横截面积。

通过选定覆冰增长模型,可确定覆冰厚度,再结合国网覆冰预警系统,可准确地预报覆冰。

1.2 线路覆冰类型的分析

为了对本模型进行验证,本文特取 2008 年湖南冰灾数据,表 1 为长沙市 2008 年 1 月的气象数据。长沙当时线路覆冰严重,本文选取了 1 月份不断积雪的后半个月数据。

表 1 长沙市 2008 年 1 月天气情况

日期	平均气温/ ℃	平均湿度/ %	降雨量/ (mm/d)	风速/ (km/h)
1/13	-2.3	91	5.6	17
1/14	-3.6	91	2.4	10
1/15	-3.5	89	8.8	12
1/16	-3.1	87	0	9
1/17	-2.4	87	3.5	8
1/18	-0.5	94	7	7
1/19	-0.5	95	17.8	7
1/20	-2.3	92	6.8	12
1/21	-2.4	92	2.5	12
1/22	-3.7	90	2.3	11
1/23	-3.1	89	0.3	7
1/24	-3.7	89	1	11
1/25	-4.7	92	3.5	9
1/26	-5	90	3.1	8
1/27	-4.2	91	2.1	11
1/28	-4.1	93	25.2	9
1/29	-2.9	87	2.8	7
1/30	-2.2	87	0	8

为了分析长沙市 2008 年 1 月份的线路覆冰情况,基于 Chaine 模型、Makkonen 模型及 Sakamoto 模型,针对表 1 中的气象数据进行计算分析覆冰类型。即,根据每天气温的增长趋势,计算分析该天气下的覆冰类型,并得出 2008 年 1 月长沙市的覆冰类型分布图(图 2)。从图 2 中,可清楚看出,虽然大多数的天气为霜凇天气,但有 5 d 为雨凇天气,所以用单一的霜凇模型去预测并不准确,而本文将同时使用霜凇和雨凇两种模型预测线路覆冰情况,并与使用 Makkonen 模型分析的数据进行对比(图 3)。

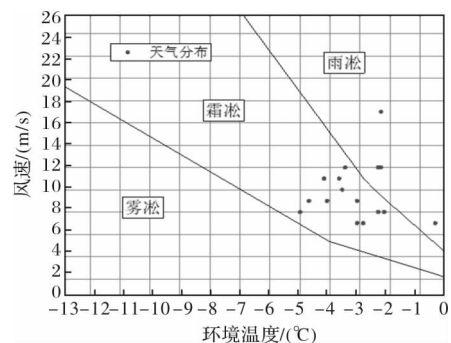


图2 长沙市 2008 年 1 月覆冰类型分布图

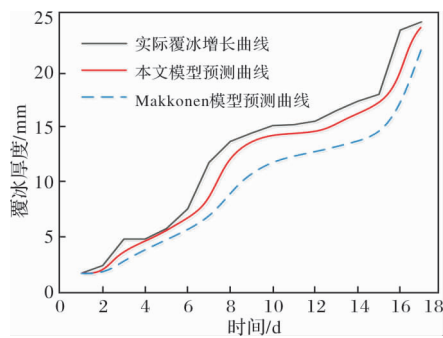


图3 模型预测与实际值对比图

从图3中可以看出,使用两种模型的预测增长曲线更贴近实际覆冰增长曲线,第7 d到第10 d是两条曲线开始相差越来越大。因为这4 d都是雨淞天气,雨淞附着力强,内聚力大,覆冰厚度增加速率快。如果只是用Makkonen模型去预测,预测结果会比实际覆冰厚度小很多,但此时用Chaine模型就能很好的预测这几天覆冰厚度的增长。故本文提出的模型比单一模型准确性高。

在本次案例中,线路出现了雨淞覆冰,雨淞是一个湿增长的过程,而且雨淞的粘附能力十分强,通常输电线路上的雨淞是很难自己脱落,需要借助外力进行脱落。在有风的情况下,导线会有一定程度上的晃动,重量变大的导线会使杆塔承受更大的张力,造成了绝缘子等其他金具的损坏,使设备的绝缘性能降低,可能会发生闪络等事故,影响电力系统的安全运行。因此,对覆冰厚度的准确预测是十分重要的。

2 污闪防护

污闪现象在华东地区频频发生。在每年入冬初春时期,华东各省市少雨多雾,这时,设备外绝缘表面的积污速率和积污量大大增加,使得绝缘子表面盐密达到年度周期的最大值。在此情况下,如果出现连续大雾天气,将容易发生外绝缘闪络,严重威胁架空线路的安全^[16]。故建立一个污闪预警模型是很有意义的,本文以有效积污天数为指标,建立了污闪风险预警模型,并通过案例进行了验证。

2.1 污闪风险预警模型

目前对于污闪的预警并没有系统的理论,本文经过研究对比发现,计算有效积污天数作为污闪的指标,用以判断污闪风险,是贴切可行的^[19]。

有效积污(干)日数是根据干旱季节期间出现的降雨量对绝缘子表面附盐密度清洗效果来确定天数^[19]。在雨天,绝缘子外层的上轮廓面比下轮廓面清洗效果更加明显,而在持续干燥日,其污秽堆积速率也比下轮廓面高得多。因此,本文重点研究上轮廓面积污变化。其表达式为:

$$D_{uji} = \sum_{i=1}^n D_i K_{uji} \quad (5)$$

式中: D_{uji} 为 j 期间有效积污(干)日数; D_i 为 j 期间第 i 连续零降水日数; K_{uji} 为 j 期间第 i 连续零降水日数出现的降水量造成绝缘子表层污秽脱盐偏

差调整值。经多次绝缘子挂片污秽堆积测试,从中获得降雨前后电导率及盐密度等的变化,得出绝缘子积污雨淋溶失系数的回归方程为:

$$K_{uji} = \frac{1}{1 + e^{-2.71 + 0.15R_i}} \quad (6)$$

式中: R_i 为连续日数的降水量,有两个边界条件: $R_i = 0$ mm 时 $K_{uji} = 1$,即如果不下雨则 K_{uji} 直接为1,不用上式计算; $R_i = 50$ mm 时, $K_{uji} = 0$,即降雨量超过50 mm,也不用上式计算, K_{uji} 直接为1。

2.2 污闪风险预警方法

根据气象台前一日雨量监测数据计算,无雨日溶失系数 k 取1,有效干日数加1 d;有雨日按公式计算溶失系数 k ,乘以以前1 d的有效积污(干)日数得到新的有效积污(干)日数;连续雨日每日依次按公式根据计至本日的连续雨日累计雨量计算溶失系数 k ,乘以连续雨日前1 d的有效积污(干)日数得到每日新的有效积污(干)日数;判断各地区连续雨日雨量是否达到50 mm,达到则有效积污(干)日数取为0;当某地区有效积污(干)日数达到各级报警值时,对该地区内线路发出相应报警信息。

2.3 污闪模型验证

污闪的发生不仅关系绝缘子表面积污程度,还与当地的气象条件,以及线路的电压,所以不同地区有效积污天数的承受能力是不一样的。因此,综合考虑华东四省一市地区的几个气象要素与输电线路污闪现象关系,结合运行经验、试验研究结果以及污闪发生实例,提出了发生污闪可能性的综合气象条件有效积污(干)日数指标为60 d。

本文对2010年11月至2011年1月华东区域的气象条件进行分析,对华东地区500 kV主网架空线路的防污闪能力进行评估,使用本文污闪风险预警模型,华东部分地区检测站的气象数据处理结果如表2所示。

表2 部分地区检测站信息数据处理结果

省份	站名	有效积污(干)日数/d
江苏	邳州	61
江苏	灌云	58
江苏	阜宁	58
江苏	南京	25
江苏	南通	42
安徽	六安	26
安徽	霍山	24
安徽	芜湖	26
上海	宝山	8
浙江	杭州	5
浙江	嵊泗	8
浙江	丽水	8
浙江	玉环	12
福建	邵武	8
福建	建阳	9
福建	寿宁	9
福建	宁化	0
福建	福州	4
福建	龙岩	32

为了更清楚观察污闪预警的分布, 本文基于 ArcGIS 软件绘制了 2011 年 2 月份华东地区局部架空线路污闪预警图(图 4)。图 4 中, 黑色曲线为有效积污(干)日数等势线, 红色地区则代表有效积污(干)日数 60 d 以上的地区, 从图 4 中可以看出苏北地区已经进入危险地区, 而且根据华东四省一市 2010-2011 年冬季的气象历史数据, 华东北部的苏北、淮北地区出现了干旱。由于这些地区前期降雨量偏少, 有效积污(干)日数已经较高, 所以苏北地区出现接近或超过 60d 的有效积污(干)日数, 而这些地区若遇持续大雾, 均有可能发生污闪。

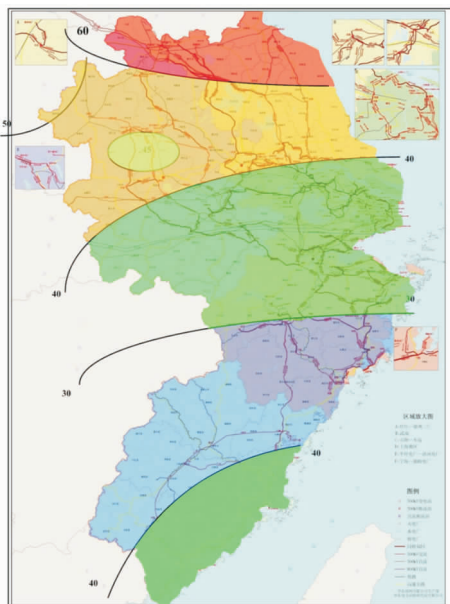


图 4 华东地区 2011 年 2 月污闪预警图

通过华东电网污闪事故资料调查: 2011 年 2 月 5 日-21 日, 华东电网苏北地区的 500 kV 堡双 5233 线, 500 kV 任上 5237 线, 500 kV 田都 5216 线发生相继发生污闪跳闸, 其中以 500 kV 田都 5216 线为例, 前后在三个时段共计发生 20 多次跳闸, 重合不成功 3 次, 强送不成功 1 次, 华东其他地区并未发生污闪。

可以看到使用污闪模型预测的污闪事故危险地区发生了污闪, 这证实本文提出的模型准确性高, 能够对线路运检业务提供新途径, 为提前预防或减少气象灾害有着重要的意义。

3 结论

本文构建了覆冰和污闪两种气象灾害模型, 并分别结合案例对两种模型进行了分析, 得到了以下结论:

(1) 对于覆冰预警模型而言, 最关键的是对覆冰增长的预测, 而本文结合实例证明了, 实时使用多模型预测比单一模型预测更准确。

(2) 对于污闪预警模型而言, 提出的有效积污

天数模型能对污闪危险程度进行量化评价, 并且通过该模型成功预测了 2011 年初华东电网污闪事故, 证实了该模型的准确性。

(3) 本文中提出的基于 ArcGIS 计算的污闪预警图, 可用于输电线路运检业务方面的数字化设计中, 可实现线路运检业务的可视化管理, 并为今后在线路运检业务上应用输变电工程数字化设计成果提供理论依据。

参考文献:

- [1] 方丽华, 熊小伏, 方嵩, 等. 基于电网故障与气象因果关联分析的系统风险控制决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 113-119.
- [2] 王建, 熊小伏, 李哲, 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 109-114.
- [3] 张星海, 贾志杰. 四川电网建设运维面临的挑战和解决措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1091-1099.
- [4] GUO J, GU S, FENG W, et al. Lightning warning method of transmission lines based on multi-information fusion: analysis of summer thunderstorms in Jiangsu[C]// 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), IEEE, 2014: 600-605.
- [5] LI Gengfeng, ZHANG Peng, Peter B. Luh, et al. Risk analysis for distribution systems in the northeast U. S. under wind storms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 889-898.
- [6] 金焱, 张惟, 于振, 等. 电力微气象灾害监测与预警技术研究[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(4): 11-15.
- [7] 王建, 熊小伏, 梁允, 等. 地理气象相关的输电线路风险差异评价方法及指标[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1252-1259.
- [8] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 20-29.
- [9] XING Liwei, HU Deyong, TANG Lili. Development of Typhoon disaster risk evaluation and early warning system integrating real-time rainfall data from the satellite[C]. 2011 19th International Conference on Geoinformatics, 2011: 1-5.
- [10] 薛丽芳, 王亦宁, 谢凯, 等. 基于防灾预警电网气象信息系统的设计与实现[J]. 水电自动化与大坝监测, 2013, 37(02): 5-9.
- [11] 李泽椿, 华宝贵, 金荣花, 等. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J]. 气象学报, 2014, 72(06): 1069-1078.
- [12] 郑旭, 赵文彬, 肖嵘, 等. 华东电网 500kV 输电线路气象环境风险预警研究及应用[J]. 华东电力, 2010, 38(8): 1220-1225.
- [13] Chaîné P M, Castonguay G. New approach to radial ice thickness concept applied to bundle-like conductors[J]. 1974.
- [14] DL/T 5158-2012 电力工程气象勘测技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [15] 国际电工委员会. IEC 61774-1997 Overhead lines-Meteorological data for assessing climatic loads[S]. IEC, 1997.
- [16] 国际电工委员会. IEC 60826-2017 Overhead transmission lines. Design criteria[s]. IEC, 2017.
- [17] Lasse Makkonen. Modeling power line icing in free-zing precipitation[J]. Atmospheric Research, 1998, 131-142.
- [18] Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires[J]. Journal of Applied Meteorology, 1984, 23(6): 929-939.
- [19] 钱之银, 张铭, 肖嵘. 华东电网 500kV 线路历年污闪事故分析及外绝缘配置优化研究[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 47-51.

Research on the Application of Meteorological Disaster Model in Power Grid Transportation Inspection Business

SONG Huijuan¹, WU Qiong², LI Hongyun², YIN Wenkuo³ and ZHAO Wenbin³

(1. *State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China;*

2. *Beijing FuDa Limited Company in State Grid Corporation of China, Beijing 100070, China;*

3. *Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)*

Abstract: In order to explore the consistency application of the meteorological disaster model based on the three-dimensional line system in the inspection and operation, the ice warning model and the pollution flashover warning model were constructed from the aspects of ice-covered and pollution flashover caused by meteorological factors. The using pollution flashover warning model of the transmission line and the ice warning model, combined with the historical weather disaster data to analyze the case. The results show that the data of icing early warning model and pollution flashover warning model are consistent with that of the actual situation, and have high accuracy and accuracy of early warning.

Key words: meteorological disaster; warning model; operation and maintenance; ArcGIS; power grid

(上接第 34 页)

Triaxial Strength Test of Weak Interlayer of Rainfall Landslide in Limestone Area

GAN Jianjun

(*Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)*

Abstract: National Highway 105 passes through the limestone area in Longnan County, Ganzhou, Jiangxi Province. Because of the poor stability of the slope due to the presence of soft interbeds along the slope, landslides are easily developed under the action of rainfall, which has a great impact on the construction and operation of the highway. In order to find out the influence of rainfall on the strength and deformation characteristics of soft interlayer of silty clay in limestone area, four groups of specimens under different matrix suction conditions and three groups under different net confining pressures were tested by GDS triaxial test system under standard stress path. The relationship curve between matrix suction and maximum shear stress, strain and deviation stress were obtained by analysis. The relationship curves of net confining pressure and deviating stress are analyzed by the strength theory of unsaturated soil with two stress variables. The results show that the stress-strain curves of sliding zone soils change from work-softening to work-hardening during the transition from low confining pressure to high confining pressure. Under the same confining pressure, the matrix suction changes from low to high, and the sliding zone soils show strain-softening under low suction and work-hardening under high suction. The total cohesive force is 22.7 kPa, 33.4 kPa, 43.8 kPa and 46.9 kPa respectively when the matrix suction is 0 kPa, 30 kPa, 60 kPa and 90 kPa, and the internal friction angle is 21.8 degree, 23.6 degree, 26.2 degree and 24.5 degree, respectively. Based on Lund unsaturated soil dual stress strength theory, a modified formula for shear strength of landslide sliding zone soil is proposed.

Key words: landslide; unsaturated soil; weak interlayer; strength theory; the matrix suction