

基于 GIS 的网格化雷电灾害风险评估模型及其应用

张烨方¹ 冯真祯¹ 王颖波¹ 刘冰¹ 杨超²

(1 福建省防雷中心, 福州 350001; 2 福建省厦门市防雷中心, 厦门 361012)

摘要 在分析雷电灾害风险评估技术发展现状以及大片区化工厂、建筑群雷电灾害风险特点的基础上, 提出了基于地理信息处理技术的网格化雷电灾害风险评估模型, 建立包含高势层及其梯度、土壤散流层及其梯度、雷击密度层、直击雷防护效率层、电气电子设备抗雷击风险值、雷击燃爆风险值、人员密集度等指标在内的多层网格化雷电灾害风险评估模型, 并以某化工厂的雷电灾害风险评估为例, 对模型的应用做了示例, 对模型在实践应用过程中可能遇到的问题、模型未来可能改进的方向做了讨论。

关键词 网格化; 雷电灾害; 风险评估; GIS

引言

雷电灾害风险评估是指根据雷电及其灾害特征进行分析, 对可能导致的人员伤亡、财产损失程度和危害范围等方面的综合风险计算, 为建设工程项目选择和功能分区布局、防雷类别与防雷措施确定等提出建设性意见的一种评价方法。近年来, 国内外各研究机构、防雷技术服务单位都对雷电灾害风险评估做了大量研究。例如国际电工委员会(IEC)在 1999 年发布的 IEC61662, 2006 年及 2010 年发布的 IEC62305-2: 2006、IEC62305-2: 2010, ITU 发布针对通信站的 ITU-T K39 等雷电灾害风险评估模型, 都为雷电灾害风险评估技术与业务的发展提供了强大的支持。国内多个研究机构、业务部门针对 IEC62305-2: 2006 的模型做了研究与应用, 如杨仲江、朱传林采用 Struts 和 Hibernate 开发了雷电灾害风险评估软件^[1]; 付国振等对 P_c 的选取方法做了研究^[2]; 植耀玲等对 L 损失因子进行了在多线路系统下的细化和改进^[3]; 程向阳等运用 IEC62305-2: 2006 模型对黄山名松进行了雷电灾害风险分析^[4]等。

在一些县城、农村地区, 存在着多户民居建构筑物连接在一起, 形成一个大片区建构筑物群; 以及在一些化工场所, 许多化工设备通过输送管道连接成

一个大整体设备群的情况。这些建构筑物、设备群无法单独隔离成独立的单体进行年预计雷击次数的计算及雷电灾害风险评估, 而将其当成一个大的对象进行年预计雷击次数计算或雷电灾害风险评估时, 因其整体面积较大, 可能得出高数值的年预计雷击次数和较高雷电灾害风险, 无法客观反映实际情况。这样的情况在我国其他地方也经常遇到, 因此国内有不少学者包括作者也认为, IEC62305-2: 2010 的雷电灾害风险评估仅适用于单一的评估对象, 并不适用于更大范围、非建筑物类(如桥梁、化工生产区域、大型娱乐场)雷击风险评估^[5], 且由于 IEC62305-2: 2010 所设定的参数、取值与国内防雷装置设计的情况有一定的差异, 例如 IEC62305-2: 2006 中将防雷装置等级划分为四级, 而我国建筑物防雷分为 3 类, 这 4 个等级与 3 类别在滚球半径、网格大小、雷电流幅值上没有对应、统一等等情况, 使得在实际的雷电灾害风险评估技术工作中, 常遇到被评估对象已按照国家标准进行防雷装置设计, 而计算出来的雷电灾害风险值却超过 IEC62305-2: 2010 所规定的容许值, 这种情况在一些爆炸和火灾危险场所的雷电灾害风险评估中最为常见。为此, 黄晓虹等提出了利用灾害学的评价体系, 建立区域雷电灾害风险评估的方法^[6]; 丁曼等引入模糊评价、层次分析法(AHP)的理论对区域雷电

灾害风险评估进行了改进和优化^[5]。但在进行区域雷电灾害风险评估计算时,不同技术人员所划分出来的区域无法取得一致^[7-8],存在较大的主观性,因而使得评估的结论不一致;一般情况下,各区域雷电活动、土壤类型、防雷措施等参数相差不大,区域雷击风险度的大小实际与区域内燃爆程度成正比关系,区域雷电灾害风险评估变成了区域燃爆风险评估,失去了其对实践的指导意义。

针对目前大片区对象雷电灾害风险评估在模型与方法上的研究现状及存在问题,结合大片区对象雷电灾害风险分布特点,本文提出了在地理信息技术的基础上,对大片区防雷对象进行网格化分割,结合单体年预计雷击次数的计算及其他可能影响雷电灾害风险的因素,建立网格化雷电灾害风险评估模型,从“点”到“面”计算、制作大片区防雷对象雷电灾害风险评估产品,具体模型及应用示例介绍如下。

1 模型设计

1.1 网格化区域

如图 1 所示,在平面上建立 n 列、 m 行的网格区域 Ω ,每个网格边长可根据区域大小稠密或网格尺寸调整,使得被评估项目所包含的区域能完整地该网格区域 Ω 所包含,定义集合 U 为网格区域 Ω 中所有包含或部分包含于被评估项目所在区域的网格集(图 1 中阴影部分的网格), $U(i,j)$ 为集合 U 中第 i 列、第 j 行的网格,针对集合 U 中的每个网格按下述指标进行风险计算,最终得到整个区域的雷电灾害风险分布图。

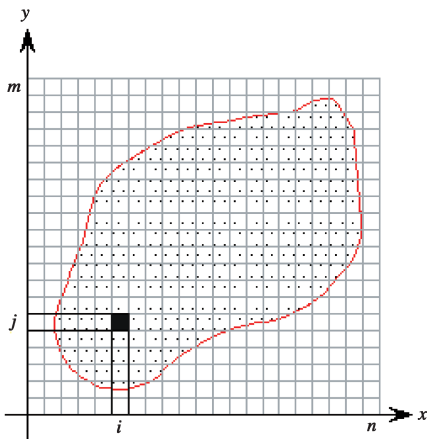


图 1 网格化模型示意图

1.2 影响网格雷击概率的指标

1.2.1 高势及其梯度场

高度和高度差是影响分析对象雷击概率的重要因子。建(构)筑物、设备本身的高度越高,与周围环境、建筑、设备的高度差越大(可理解为高势梯度的模越大),则发生雷击的概率就越高。模型从场、势的角度出发,引入高势、高势场模作为评判高度与高度差的指标,具体模型设计如下:

高势。针对所包含区域 U 中的 $U(i,j)$ 网格进行分析,通过现场勘查、图纸分析等方式,选取 $U(i,j)$ 网格内建(构)筑物、设备的最高高度(相对高度,下同)代表该网格数值,得到代表大区域的高势集合 H , $H(i,j)$ 表示第 i 列、第 j 行网格的最大高度。

高势场。被分析对象与四周的高度差是影响其遭受雷击概率的一个因子,通过对上文所建立的高势函数 H 取梯度计算,可得到高势分布场的矢量函数 ∇H ,以梯度的模 $|\nabla H|$ 来代表函数在该点的最大变化率(即最大的高度差),得到另一个标量散点集 ∇H , $\nabla H(i,j)$ 表示第 i 列、第 j 行网格的高势场变化率。

1.2.2 土壤散流及其梯度场

土壤电阻率及其变化率也是影响雷击概率的重要因子,土壤电阻率较小的地方,如有金属矿床的地区、河岸、地下水出口处,以及山坡、稻田和具有不同土壤电阻率的交界地段比较容易遭受雷击^[9]。因此在计算分析对象的雷电灾害风险时,特别是对一些涉及范围比较广,土壤电阻率变化范围大的项目,更应该将土壤电阻率作为分析雷电灾害风险的一个指标。

从上述的讨论中可以看出,与雷击概率有关的土壤电阻率参数主要包括土壤电阻率以及土壤电阻率变化率的大小,因此在我们引入网格土壤电阻率、土壤电阻率变化率作为评估雷击风险的另两个指标,参考高势层的处理方法,通过现场检测,得到每个网格土壤电阻率数值的集合 ρ , $\rho(i,j)$ 表示第 i 列、第 j 行网格的土壤电阻率值。同理与高势场的求解方法,对 $\rho(i,j)$ 取梯度模计算,得到土壤电阻率变化率函数 $\nabla \rho$,用 $\nabla \rho(i,j)$ 的模表示第 i 列、第 j 行网格土壤电阻率的最大变化率,用来反映该网格处土壤电阻率的突变情况。

1.2.3 雷击密度层

以项目所在区域闪电定位监测数据为基础,按

照网格区域 Ω 所定的坐标轴网格,统计出历史上每个网格所发生的雷电次数^[10-12],以此作为该网格的数值,用于表达该区域不同网格处雷电活动的频繁程度,记该网格层为 $N(i, j)$,进入后续计算。

1.2.4 直击雷防护效率层

防雷装置是减少或降低雷击风险概率的重要措施,在计算区域雷电灾害风险时,应当将防雷装置的保护范围、拦截效率等因素引入到雷电灾害风险的计算模型中,具体建模如下:

以项目区域内所有具有直击雷防护功能的建构物、金属设施或其他自然直击雷防护装置为基础,分别在平面图上绘制出这些建构物、金属设施的直击雷保护范围(在接闪装置没有合理的跨步和接触电压防护措施时,保护范围不包括接闪装置外推 3 m 内的区域),按照网格区域 Ω 所定的坐标轴网格,建立直击雷防护效率层 $P(i, j)$,对不在保护范围的网格,取 $P(i, j) = 1$,对在保护范围内的网格,还应按这些防雷装置设计的类别结合 IEC 62305-2. 2010 Lightning Protection, Part II: Risk Management, 附录 B 的 P_B (不同类别防雷装置拦截失效概率)取值,即此时的 $P(i, j) = P_B$ 。

1.3 承灾体雷击损失风险指标

承灾体(包括建构物、设备、电气系统、电子系统等被保护对象)在遭受雷击后所可能导致的社会、经济损失程度及其后果也是评估区域雷电灾害风险的指标之一,为了使建立的评估模型在参数取值上更具有说服力,我们借鉴与引用了 IEC62305-2. 2010 雷击风险评估模型中 L (损失率)项的部分指标及其取值表,用于评估区域网格内被评估对象遭受雷击后所可能导致的后果程度,承灾体具体包含的评估指标包括如下:

1.3.1 网格内承灾体电气电子系统雷击损失风险

当被评估网格内存在电气电子设备时,这些电气电子设备可能因直接雷击或雷电所产生的闪电电涌而造成损坏,电气电子设备的重要程度越大,造成的损失越严重,因此评估某个网格内电气电子设备因雷击所可能造成的损失风险,应包含造成这些电气电子设备损害的概率以及这些电气电子设备的重要程度两个方面,具体建模思路如下^[13]:

借鉴于 IEC62305-2. 2010 对电气电子设备风险的评价模型,遴选出可能影响电气电子设备雷击概率的参数,分别是电气电子系统依靠建筑物屏蔽、布

线及本身耐压能力所具有的防闪电电涌保护效率 P_{MS} 、线路—设备安装电涌保护器的防护效率 P_{SPD} 、电气电子系统因雷击中线路造成设备损坏的概率 P_{LD} 、电子系统因雷击中线路附近造成设备损坏的概率 P_{LI} ,这 4 个参数涵盖了屏蔽、等电位等基本防雷技术防护效率的内容(IEC62305-2. 2010 中给出了这 4 个参数的具体计算和取值方法,本文不做具体表述)。当发生雷电波侵入时,这 4 种防护手段同时在起作用,防护成功的概率应按这 4 个数值中最小的一个来衡量,因此实际计算网格内电气电子设备雷击损害概率的大小时,对这 4 个参数按取小函数计算。由于网格内可能存在着没有电气电子设备的情况,此时网格中不存在电气电子设备损害的风险,为了使后续与其他参数的风险乘积运算可以连接,我们令当网格内没有电气电子设备时,网格电气电子设备损害风险 r_{SYS} 为 1。这样就要求在设计网格内存在电气电子设备时必须有风险值 $r_{SYS} \geq 1$ 才合理,而上文引入的 4 个概率参数 P_{MS} 、 P_{SPD} 、 P_{LD} 、 P_{LI} 都小于等于 1,变成越有电气电子设备,网格内的 r_{SYS} 反而比没有电气电子设备的小。为了处理这个矛盾,我们对 4 个概率参数 P_{MS} 、 P_{SPD} 、 P_{LD} 、 P_{LI} 进行以 e 为底的幂计算,因为当自变量 $x \geq 0$ 时, $y = (e^x) \geq 1$,这样就保证了只要有电气电子设备在网格中,其 r_{SYS} 的计算结果一定大于等于没有电气电子设备的网格;同时对项目所有涉及的电气电子设备按重要程度 1~10 的标段分类,得出每个电气电子设备重要程度的评判因子 E , $E \geq 1$, E 数值越大,代表该电气电子设备越重要,因雷击导致其损坏时所产生的损失越严重;将 E 与上述 4 个防护概率参数的最小值进行相乘,即可得到某个电气电子设备发生雷击损害的风险程度;如某网格内同时存在多个电气电子设备的话,则对每个电气电子设备进行逐一计算,将计算结果进行和计算,即可得到网格内所有电气电子设备雷击损害的总风险值 $\sum r_{SYS}$ 。上述分析结果用函数表示为:

$$\sum r_{SYS} = \begin{cases} 1, & \text{当网格内没有电气电子设备时} \\ \sum_{i=1}^n E_i \min\{e^{P_{SPDi}}, e^{P_{MSi}}, e^{P_{LDi}}, e^{P_{LIi}}\}, & \text{当网格内有 } i \text{ 个电气电子设备时} \end{cases}$$

1.3.2 网格内承灾体人员密集程度

网格内人员越密集,雷击后可能导致的人身伤

亡风险也就越大,因此我们引入 IEC62305.2 中的 h_z 参数,用于评估网格内承灾体人员密集程度的风险,将其作为评估某个网格内雷击损害风险的另一参数, h_z 的具体取值与计算方法详见 IEC62305-2.2010,本文不做具体讨论和介绍。

1.3.3 网格内承灾体火灾风险程度

当被评估网格内存在燃爆物质时,雷击可能导致这些燃爆物质发生燃爆事故,因此评估网格内的雷击损失风险时也应该考虑该方面的内容。同理借鉴于 IEC62305-2.2010 对雷击燃爆风险的模型,引入了 IEC62305-2.2010 中的 r_f 、 r_p 参数,分别代表区域内存在的燃爆风险和区域内灭火装置措施,两者相乘来体现网格内的雷击燃爆风险。

1.4 综合风险计算模型

通过上述对各个网格雷击风险影响指标的分析,确定了包括 H 、 ∇H 、 ρ 、 $\nabla \rho$ 、 N 、 P_B 、 r_{SYS} 、 h_z 、 r_f 、 r_p 的 10 个指标,计算某网格综合雷击风险值:

$$R = H \nabla H \rho \nabla \rho N P_B r_{SYS} h_z r_f r_p$$

在对区域内每个网格“点”进行计算后,将这些数值在 GIS 图层上展示,就得到整个区域“面”的雷击风险概率分布图,结合区域内不同设备、建构筑物的位置,就可以对整个项目的雷击风险概率进行全面的评估与讨论。

2 模型应用

2.1 项目概述

以某某公司开发的年产 20×10^4 t 己内酰胺化工厂为例,该化工厂包含了反应原料运输、存放、反应、物流等多个生产流程,各个反应装置及设备通过物料运输管道连接成一个大的整体,我们采用了网格化的处理方式,以上文论述和建立的数学模型来对整个厂区的雷电灾害风险进行综合计算、评价。

2.2 网格划分

该厂区长、宽约为 1800 m、1400 m,为了计算有所盈余,我们选择了 $2000 \text{ m} \times 1600 \text{ m}$ 的区域作为评价对象,按 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 为一个评价网格(单元)对厂区进行网格划分。理论上,一个区域(面)的风险是由该区域内所有点的风险组成的,顺着极限的观点,当区域内的点数达到无穷大时,计算、绘制得到区域(面)的结果将等于风险的真实值,但实际工作中不可能取得到无穷多的点(网格)来计算风险

值,只能通过有限的网格数来逼近于实际的真实值。因此,进行网格化雷击概率风险评价时,应在工作量力所能及的范围内,适当地增加网格的数量(减少网格边长的大小),以得到更加科学的计算结果。

2.3 网格数据采集

通过设计图纸、现场勘查等方式对每个网格内的最大高度 H 进行数据采集;通过现场土壤电阻率检测或地勘报告等方式获取各个网格的土壤电阻率数值(由于设计网格数目较多,实际进行土壤电阻率检测时没有按 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 进行检测,而是按 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的布点方式去测试土壤电阻率,网格的土壤电阻率数值按临近测试值选取。当然我们也可以将一定量的样本数据采用合理的插值方法,按照设计的要求($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$)插值到各个网格中。这两种数据挖掘的处理方式同样也可能应用在 H 、 N 的分析过程中。);以区域历史闪电定位监测数据为基础,取 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的网格计算网格频次,落在某频次网格($500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$)内评价网格($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$)的年雷击密度值统一为该频次;根据厂区各设备、直击雷防护装置的安装位置与参数,结合厂区网格化平面图,对每个网格逐一进行是否在直接雷防护范围内的填值,按 IEC 62305-2.2010 Lightning Protection, Part II: Risk Management 附录 B 的 P_B (不同类别防雷装置拦截失效概率)取值;根据每个网格内是否包含电气电子设备以及相应的防护方式、燃爆特征、人员密集情况,按 IEC62305.2-2010 的取值规范选取相应的参数,计算得到网格的 r_{SYS} 、 h_z 、 r_f 、 r_p 数值。

2.4 风险计算

对每个网格按本文 1.4 所论述的风险计算方法计算得到最终各个网格的雷电灾害风险 $R(i, j)$,运用 Arcgis 绘制得到整个厂区各个雷击风险分量及最终雷电灾害风险 GIS 图。限于篇幅关系,本文仅展示 $H(i, j)$ 、 $\nabla H(i, j)$ 、 $R(i, j)$ 的 GIS 图(图 2~5),其余参数的 GIS 图效果差不多,没有一一做展示。其中图 2、图 3 色标一致,图 4、图 5 的综合风险度为无量纲数值,色标上数值的大小即代表其综合风险值的大小。最后,对每一数据集及最终雷电灾害风险的 GIS 分布图结合厂区功能设计特点进行分析与评价。

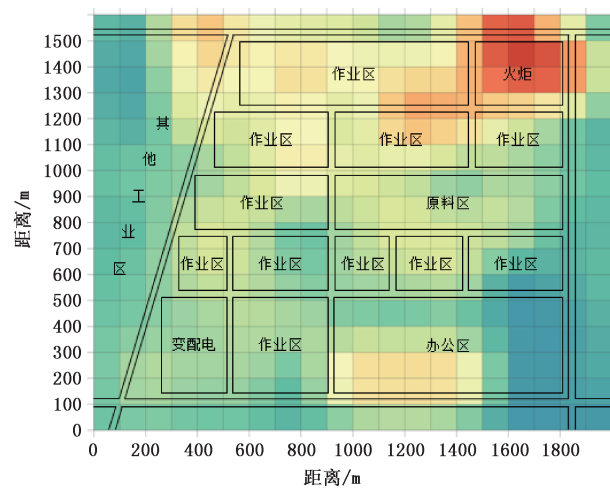


图 2 高势分布

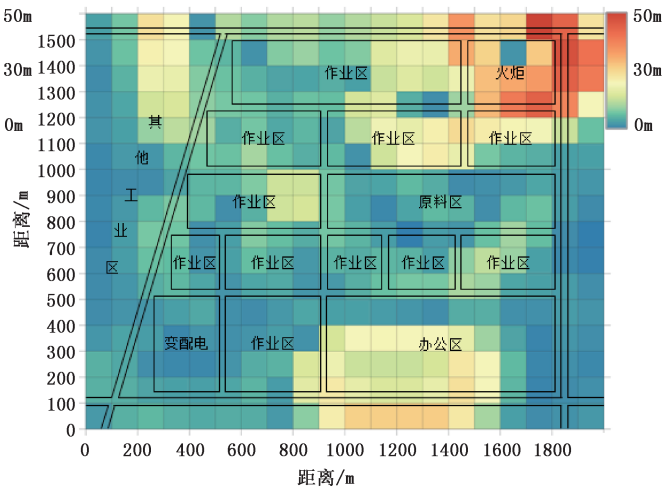


图 3 高势梯度分布

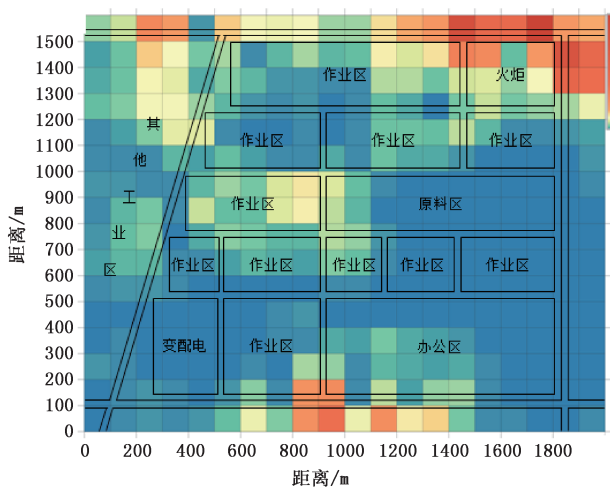


图 4 综合雷电灾害风险分布

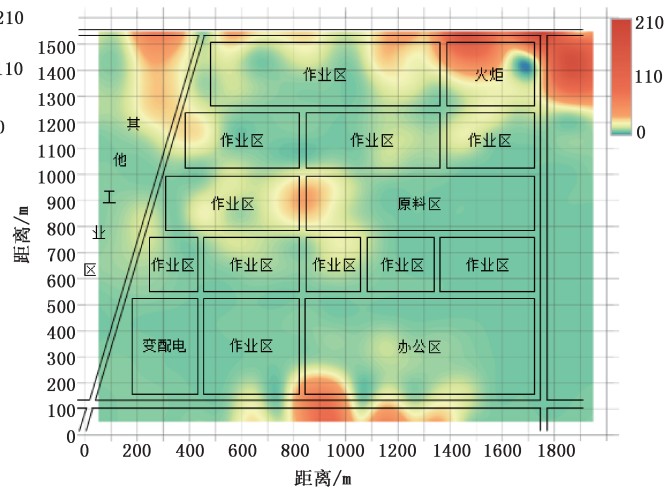


图 5 插值处理后的综合雷电灾害风险分布

3 结论与讨论

本文分析了大片区化工厂、建筑群与一般建(构)筑物单体雷电灾害风险的区别,就大片区化工厂、建筑群雷电灾害风险评估所存在的问题做了探讨,提出采用网格化技术处理大范围区域雷电灾害风险评估的方法,建立了相应的数学模型,并以实际工作中遇到的某项目做了示例计算,讨论如下:

(1)较之于 IEC62305-2. 2010 的风险模型,网格化风险评估方法较好地解决了 IEC62305-2. 2010 仅适用于独立单体建构筑物,而无法处理大片区对象雷击风险评估的不足,一定程度上提升了雷电灾害风险评估的应用范围,具有积极的实践意义。

(2)网格化风险评估的最大技术难点,在于如何

设计网格边长的大小,一般需要综合考虑区域的大小、所设计网格计算参数的数据采集方法、网格计算所需的工作量与人力资源的适应、涉及最小风险设备(或装置)的分辨率等等因素,还需要我们进一步深入研究。

(3)在网格雷击风险计算的模型上,更应该综合考虑地理、地址、土壤、气象环境以及被保护对象的特点,所选择的评估指标(参数)必须具有较强的可采集性,并对评估指标(参数)进行一定的数学处理(如本文对网格内承灾体电气电子系统雷击损失风险指标数值的设计上),以保证所得到的数值能够与实际情况相吻合,较常出现的就是对分母 0 底、乘数为 0 等导致计算值出现异常的情况。

(4)由于工作量的限制,实际进行大区域雷击概

率风险计算时所采用的网格大小不可能太小,因此最终得到区域各参数和综合雷击概率 GIS 分布图的分辨率不会太高,如本文图 2~4 的锯齿化较为明显,从美观的需求出发,必要时可以通过对计算后得到的网格数据进行插值、平滑处理,得到观感程度较优的 GIS 图(如图 5 即是在图 4 的基础上进行插值、平滑处理后得到的 GIS 分析图),当然应保证处理后的结果与实际情况的失真程度不能太大。

(5)尽管本文在网格化处理大区域雷电灾害风险评估的技术上取得了一定的成果,但网格化的处理方式也存在着不少的问题,诸如网格化计算工作量较为庞大,网格雷击风险计算模型的建模对技术人员的能力要求较高等,都是以后亟待研究与探索的问题,希望能在将来的工作实践中逐渐完善。

参考文献

[1] 杨仲江,朱传林. 基于 Struts 和 Hibernate 的雷电灾害风险评估软件开发[J]. 气象科技,2010,38(6):781-785.
[2] 付国振,冯鹤. 雷电灾害风险评估中 PC 因子选择方法[J]. 气象科技,2013,41(3):569-571.
[3] 植耀玲,冯民学,樊荣. 雷击风险评估中 L_0 损失因子在多线路

系统下的细化和改进[J]. 气象科学,2012,32(3): 298-303.
[4] 程向阳,王凯,杨仲江. 黄山名松雷电灾害风险分析[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2011,34(6):579-583.
[5] 甘文强,曹志建,邵莉丽,等. 模糊层次综合法在区域雷电灾害风险评估中的应用[J]. 成都信息工程学院学报,2011,26(5): 522-526.
[6] 黄晓虹,陈华晖. 区域雷击风险评估的探讨[C]//第 7 届中国国际防雷论坛论文, 2008: 212-214.
[7] 邓春林,季严飞,刘刚. 基于雷电定位数据的区域雷击灾害风险评估方法探讨[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2010,2(3): 230-235.
[8] 魏秀梅. 化工企业雷电灾害风险评估与应用[J]. 气象科技, 2014,42(2):352-358.
[9] 肖稳安,李霞. 防雷专业技术知识问答[M]. 北京:气象出版社, 2010. 6(1):30-30.
[10] 杨仲江,江珂,曹洪亮,等. 基于 inpolygon 的区域外闪电剔除方法研究[J]. 灾害学,2014,29(3):72-76.
[11] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2006.
[12] 李霞,汪庆森,巩晴霞,等. 苏州地区雷电分布规律分析[J]. 气象科学,2006,26(4):442-448.
[13] 沈斐敏. 安全系统工程理论与应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001:201-215.

GIS-Based Gridding Risk Assessment Model of Lightning Disasters and Its Application

Zhang Yefang¹ Feng Zhenzhen¹ Wang Yingbo¹ Liu Bing¹ Yang Chao²

(1 Fujian Lightning Protection Center, Fuzhou 350001; 2 Xiamei Lightning Protection Center, Fujian, Xiamei 361012)

Abstract: Based on the analysis of the development status of lightning risk assessment technology and the features of lightning risk assessment of large chemical factories and building groups, a girding lightning risk assessment model is established based on GIS technology, which contains height potential and its gradient, soil resistivity and its gradient, lightning density, lightning protection efficiency, electrical and electronic equipment lightning risk, lightning explosion risk, and population density factor. A chemical factory is taken as an example to show the application of the model.

Keywords: grid model; lightning disaster; risk assessment