

唐淋, 祁国亮. 地方测震台网布局优化软件的设计与实现[J]. 华南地震, 2023, 43(3): 31-38. [TANG Lin, QI Guoliang. Design and Implementation of the Layout Optimization Software for Local Seismic Network [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(3): 31-38]

地方测震台网布局优化软件的设计与实现

唐 淋¹, 祁国亮²

(1. 四川省地震局, 成都 610041; 2. 成都市应急管理局, 成都 610094)

摘要: 根据地方测震台网地震监测能力和台站建设投资效益两方面的需求, 基于 Visual Basic 6.0 平台, 使用 MatrixVB、Surfer 和 Grapher 等工具, 开发一套测震台网布局优化软件, 可用于台址遴选和台站布局的优化调整, 有利于提高台网布局的合理性和科学性。该软件应用于成都市测震台网, 给出了多种监测能力需求下的台网布局优化方案, 取得了良好的应用效果。

关键词: 测震台网; 台站布局; 最优化模型; 软件

中图分类号: P315.78

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)03-0031-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.04

Design and Implementation of the Layout Optimization Software for Local Seismic Network

TANG Lin¹, QI Guoliang²

(1. Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China; 2. Chengdu Emergency Management Bureau, Chengdu 610094, China)

Abstract: According to the requirements of seismic monitoring capacity and station investment benefit of local seismic network, based on Visual Basic 6.0 platform, a set of seismic network layout optimization software is developed by using MatrixVB, Surfer and Grapher. It can be used for site selection and optimization and adjustment of station layout, which is conducive to improving the economy, rationality and scientificity of network layout. The software is applied to Chengdu seismic network, gives the optimization and adjustment scheme of the network layout under the conditions of various monitoring capacity requirements, and has achieved good application results.

Keywords: Seismic network; Station layout; Optimization model; Software

0 引言

地震台站的几何布局是决定台网监测能力的

重要因素, 科学合理的台网布局是保证较高地震监测能力的基础。经过数十年努力, 我国已建成由国家、省和地方三级组成、技术水平较高、规模庞大的数字测震台网, 地震监测能力得到显著

收稿日期: 2022-12-01

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH19036YSX、XH21027)和四川省地震局紧急地震信息创新团队(201801)联合资助。

作者简介: 唐淋(1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要人事数字地震学研究。

通信作者: 祁国亮(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 现从事测震学研究和地震台网建设项目管理工作。

E-mail: qiguoliang2004@163.com

提升^[1-2]。但随着防震减灾工作的发展和地震科学研究的不断深入,当前对测震台网,尤其是地方测震台网的布局提出了更高的要求。一方面,需要通过合理的布局台站来更好地满足地震监测需求。如对于微震活动频繁的区域,需要提高台网密度,进一步降低能被监测到地震的震级下限,增强微震检测能力;对于强震发生可能性较大的区域,需要考虑地震记录限幅问题,保证一定的远台数量,提高能被监测到地震的震级上限,增强大震记录能力;对于水库蓄水、注水抽水、采矿等诱发地震多发的区域,需要增加近台数量、优化方位分布,提高地震定位精度,尤其是震源深度的定位精度。另一方面,需要通过科学的布局台站来更好地提高投资产出效益。市、县政府是地方测震台网的投资主体,其财政实力相对有限,对公共服务设施投资质量和效益要求更高,如何通过提高台站布局的科学性来节约投资是地方台网规划、设计和建设时自始至终必须考虑的问题。

因此,基于地震监测能力和台站投资效益两方面需求,开发测震台网布局优化软件,快速有效的开展台站站址勘选和优化调整,对提高台网布局的经济性、合理性和科学性具有重要作用。

1 需求分析与软件设计

1.1 需求分析

优化台网布局、提高地震监测能力需要增加台站数量,而台站的建设和后期运维又极度依赖人力、物力和财力,有限的资金投入与较高的地震监测能力需求之间存在必然的矛盾^[3-4]。该矛盾突出体现在以下几种场景中:①新建地方台网时,在政府财政拨款数额有限,可建台站数量确定的情况下,台站如何布局才能获得最佳的地震监测能力;②新建地方台网时,在地震监测能力需求已经明确的情况下,如何布局台站才能以最少的台站数量满足地震监测能力指标;③在现有台站布局条件下,拟新建一定数量的台站,如何选址才能保证地震监测能力提升效果最为明显;④在现有台网基础上,接入邻区一定数量的台站组建虚拟台网时,如何选取台站,使得较少的台站数量即可满足地震监测能力指标;⑤现有台网中的某些台站因各种原因需要迁址时,如何选址才能保证对原台网地震监测能力的不利影响最小。

1.2 功能设计

对应上述五种场景需求,软件须具备以下五项主要功能:①最佳监测能力设计:从符合条件的备选点位中,选择确定数量的台站,使台网的地震监测能力尽可能最好;②最少台站数量设计:从符合条件的备选点位中,选择最少的台站数量,使台网的地震监测能力满足设置的指标要求;③提升监测能力设计:从符合台站建设条件的备选区域中,新建一定数量的台站,使原有台网的地震监测能力提升幅度最大;④组建虚拟台网设计:从周边已建成的备选台站中,选择最少的台站数量,使组建的虚拟地震台网的地震监测能力满足设置的指标要求;⑤台站迁址设计:对已经在网的个别台站进行重新选址,使重新布局后的台网地震监测能力尽可能提高。

此外,软件还应具备台站分布图、地震监测能力图、迭代优化图等图件绘制功能,用于评价计算过程和输出计算成果。

1.3 开发环境

软件基于Windows系统,以Microsoft公司开发的可视化程序设计语言Visual Basic 6.0为开发平台,通过嵌入VB的Matlab矩阵函数库MatrixVB,实现快速求解最优化数学模型,同时调用Golden Software公司开发的Surfer和Grapher两款科学绘图软件的Automation接口,对计算过程和结果进行成图。

2 关键技术和算法

2.1 地震监测能力评估

通常,一个地震事件能被分布合理的至少4个台站记录并检测到,才能被测震台网有效监测和定位^[5],故将地震检测能力、地震记录能力和震源定位精度共同作为测震台网地震监测能力的组成部分。

2.1.1 地震检测能力

在确定的初动震相检测信噪比、峰值因数、S波优势频率前提下,基于台基环境噪声有效值 E_n (m/s)的台站地震检测能力定量评估公式^[5]:

$$M_L = \lg(E_n) + R(\Delta) + C \quad (1)$$

式(1)中, Δ 为震中距,单位为km; $R(\Delta)$ 为与震中距相关的近震震级量规函数,C为常数,可通过已运行台网可记录的地方微震统计数据来确定。当

已知台基环境噪声有效值和指定震中距时,即可由上式估算出台站所能检测的地震的最小震级。对于测震台网及其邻近区域,存在能够被检测到的微小地震的震级下限,大于该震级下限的地震,就能被台网中至少4个台站检测到,该震级下限就是测震台网在该区域的检测能力。

2.1.2 地震记录能力

基于面波震级计算方法,推算台站所能记录的最大震级(M)的计算公式为^[6]:

$$M = \lg \left(\frac{V_{\max}}{2\pi} \right) + 1.66 \lg \Delta + 3.5$$

(2)

式(2)中, Δ 为震中距($^{\circ}$), V_{\max} 为数据采集器所能记录的最大地震速度,单位为m/s,可根据数据采集器的动态范围和观测系统的灵敏度计算得到。当已知台站观测系统参数和指定震中距时,即可由上式估算出台站所能记录的地震的最大震级。同理,对于测震台网及其邻近区域,存在能够被记录的大地震的震级上限,小于该震级上限的地

震,就能被台网中至少4个台站有效记录到,该震级上限就是测震台网在该区域的记录能力。

2.1.3 震源定位精度

《DB/T 66-2016 地震编目规范》规定,依据台站分布方位均匀度、最大次空隙角、近台震中距、定位反演水平误差估计等参数,将地震定位精度划分为4类^[7]。其中,最大次空隙角、台站分布均匀度和近台震中距等决定于台站布局,较为合理的台站布局可保证较高的地震定位精度。

2.2 台网布局最优化模型构建

1.1节中的五种场景均可归结为在明确地震监测能力需求的前提下,从备选区域或点位中选择拟建台站位置,使得经济投入最小或台站数量最少,或是在经济投入或台站数量确定的前提下,从备选区域或点位中确定拟建台站位置,使得地震监测能力最好等两种基本的公共设施选址最优化问题。

表1 最优化数学模型详表
Table 1 Detailed table of optimization mathematical model

台网布局设计模块	模型		描述
	编号	名称	
最佳监测能力设计	①	地震检测能力模型	从符合条件的备选点位中,选择确定数量的台站(含已建和新建),使台网对需求区 m_i 级以上地震的检测能力尽可能好。
	②	震源定位精度模型	从符合条件的备选点位中,选择确定数量的台站(含已建和新建),使台网对需求点 m_i 级以上地震的定位精度尽可能高。
最少台站数量设计	③	地震检测能力模型	从符合条件的备选点位中,选择最少的台站数量(含已建和新建),使台网对需求点 m_i 级以上地震的检测能力满足设置的指标要求。
	④	地震记录能力模型	从符合条件的备选点位中,选择最少的台站数量(含已建和新建),使台网对需求点 m_a 级以下地震的记录能力满足设置的指标要求。
	⑤	震源定位精度模型	从符合条件的备选点位中,选择最少的台站数量(含已建和新建),使台网对需求点 m_i 级以上地震的定位精度达到相应要求。
提升监测能力设计	⑥	地震检测能力模型	从符合台站建设条件的备选区域中,新建一定数量的台站,使台网对需求点 m_i 级以上地震的检测能力提升幅度最大。
	⑦	震源定位精度模型	从符合台站建设条件的备选区域中,新建一定数量的台站,使台网对需求点 m_i 级以上地震的定位精度提升幅度最大。
组建虚拟台网设计	⑧	地震记录能力模型	从已建成的备选台站中,选择最少的台站数量,使组建的虚拟地震台网对需求点 m_a 级以下地震的记录能力满足设置的指标要求。
台站迁址设计	⑨	地震检测能力模型	对已经在网的个别台站进行重新选址,使重新布局后的台网对需求点 m_i 级以上地震的检测能力尽可能好。
	⑩	震源定位精度模型	对已经在网的个别台站进行重新选址,使重新布局后的台网对需求点 m_i 级以上地震的定位精度尽可能高。

将地震监测需求区内的网格点和地震监测台站分布区内的网格点分别作为最优化模型的需求点和监测点,基于以下六个方面的基本假设:①监测点与需求点均为离散的,且监测点和需求点位置有可能重叠;②监测点与需求点之间的距离为两者间的最短直线距离;③监测点集合中每个监测点的环境条件和观测仪器所能记录的最大地震动速度是已知的;④根据监测点的环境条件,可以确定每个监测点针对某一震级水平的有效检测半径,每个监测点可以检测到有效检测半径内所有需求点处发生的大于该震级水平的地震;⑤根据监测点观测仪器所能记录的最大地震动速度,可以确定每个监测点针对某一震级水平的有效记录半径,每个监测点可以完整记录有效记录半径外所有需求点处发生的小于该震级水平的地震;⑥当计算台网地震检测能力时,需求点应处于4个或4个以上监测点的有效检测半径内;当计算台网地震记录能力时,需求点应处于4个或4个以上监

测点的有效记录半径外。以地震监测能力(包括地震检测能力、地震记录能力和震源定位精度)最好或台站数量最少为优化目标,同时考虑地方测震台网不同建设阶段对地震监测能力需求的差异,分别建立了10个最优化数学模型,以期实现地震监测能力需求和经济投入之间的平衡。

2.3 关键参数结构化

软件涉及两个关键参数,分别是监测点和需求点。对于监测点,其坐标是计算震中距的必备要素,而台基环境噪声、数据采集器动态范围和观测系统的灵敏度则是计算地震检测能力和记录能力的基本参数;对于需求点,除坐标信息外,最小检测震级、最大记录震级、方位均匀度、最大次空隙角、定位精度、位置标识等信息都是判断计算结果是否符合目标的主要依据。为此,程序分别定义了监测点和需求点两个全局变量结构体。

*****定义监测点结构体*****

Public Type Info_Station

Xcoord As Double	'横坐标
Ycoord As Double	'纵坐标
Noise As Double	'台基环境噪声
Bits As Integer	'数据采集器AD转换位数
Sensitivity As Double	'系统灵敏度
Code As String * 3	'监测点代码
End Type	

*****定义需求点结构体*****

Public Type Info_Demand

Xcoord As Double	'横坐标
Ycoord As Double	'纵坐标
MagMinMax() As Single	'各监测点针对该需求点所能检测到的最小震级值或所能记录到的最大震级值
MagRes As Single	'测震台网针对该需求点可检测地震的震级下限或可记录地震的震级上限
AzimuthUniformity As Single	'测震台网针对该需求点可检测最小震级的方位均匀度
SecAzimuthGap As Single	'测震台网针对该需求点可检测最小震级的最大次空隙角
PositionAcuracyPar As Single	'测震台网针对该需求点可检测最小震级的震源定位精度
FlagInAll As Single	'需求点是否处于行政边内标志
FlagInKey As Single	'需求点是否处于重点监测区内标志
End Type	

2.4 模拟退火算法

台网布局优化问题属于 NP-hard 问题，其求解方法主要有完全算法和近似算法两类。由于它是从众多的备选监测点中选取若干监测点，可行解

数量庞大，完全算法难以适应，故软件使用近似算法中的模拟退火算法求解最优的台网布局方案（图 1）。该算法具有不依赖于初始解、渐近收敛性、求解效率高、能搜索到全局最优解等优点，在最优化问题中应用广泛^[8-10]。

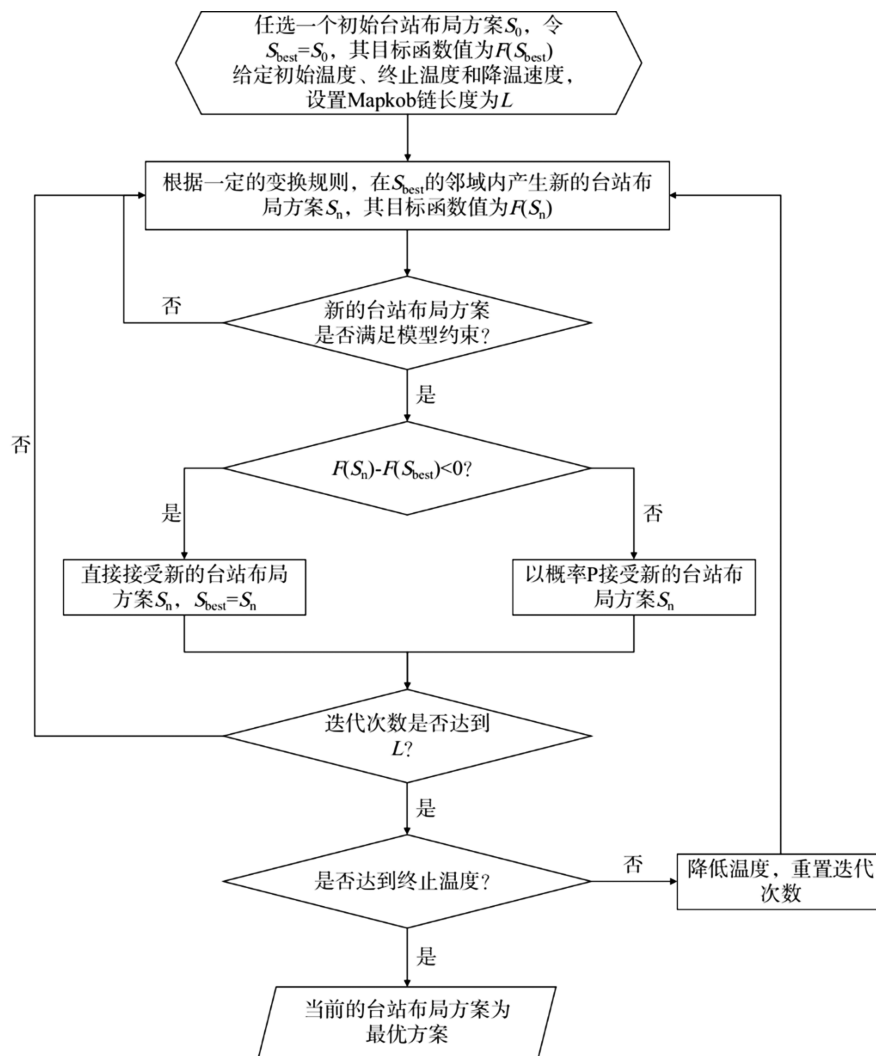


图 1 模拟退火算法求解流程图

Fig.1 Flow chart of simulated annealing algorithm

2.5 计算流程

首先，在软件主界面输入研究区(含行政区及其内部的地震监测重点区)边界和台网已包含的台站等基础信息；然后，根据实际需求，确定要调用的最优化数学模型，打开相应的功能模块界面，依次选择影响台站选址的研究区环境噪声水平、地形坡度及备选台站信息等数据文件，并输入地震监测能力指标(或新建台站数量指标)及环境噪声水平和地形坡度最大允许值等约束条件；再次，点击“××台站优化”按钮，软件会使用模拟退火

算法对模型进行求解，输出迭代过程目标函数差、当前解台站信息等过程数据及最优解台站信息等成果数据(图 2)；最后，调用图件绘制模块，绘制迭代优化图、台站分布图及地震监测能力图等图件，评估计算过程和优化结果。

3 成都市测震台网布局优化实例

成都市位于青藏高原东缘与四川盆地接壤地带，地处南北地震带中段，其西部和东部分别有龙门山断裂、龙泉山断裂等多条活动断裂带穿过。

历史上，成都市及邻近地区地震活动较为活跃，2008 年汶川 $M8.0$ 特大地震和 2013 年芦山 $M7.0$ 强震均波及成都，造成严重破坏。近年来，成都市及邻区的地震活动主要沿龙门山断裂分布，同时在龙泉山断裂中北段有中小地震活动。成都市测震台网由 17 个台站组成，包括 10 个市本级自建站、2 个下属县(市)自建站和 5 个四川省地震局共享站(图 3)。经评估，该台网当前的地震监测能力是：地震检测能力方面，能实现对全市绝大部分

地区 $M_L1.0$ 、局部地区 $M_L0.5$ 以上地震的有效检测(图 4)；记录能力方面，能实现对全市绝大部分区域 $M6.5$ 、近一半地区 $M7.0$ 以下地震的完整记录；定位精度方面，针对市域范围内发生的 $M_L1.0$ 以上地震，多为 3 类或 4 类定位精度，个别区域能达到 2 类精度，极个别区域为 1 类精度。针对当前成都市地震监测能力需求，作者调用本软件最优化模型，给出了相应的计算结果^[11]。本文在此基础上，以个别台站迁址为例，进一步展示软件的效果。

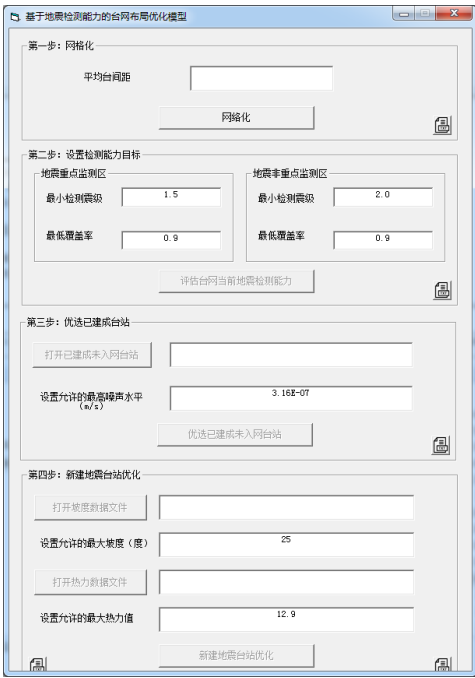


图 2 “最少台站数量设计—地震检测能力模型”计算界面

Fig.2 Calculation interface of "Minimum number of stations design—seismic detection capability model "

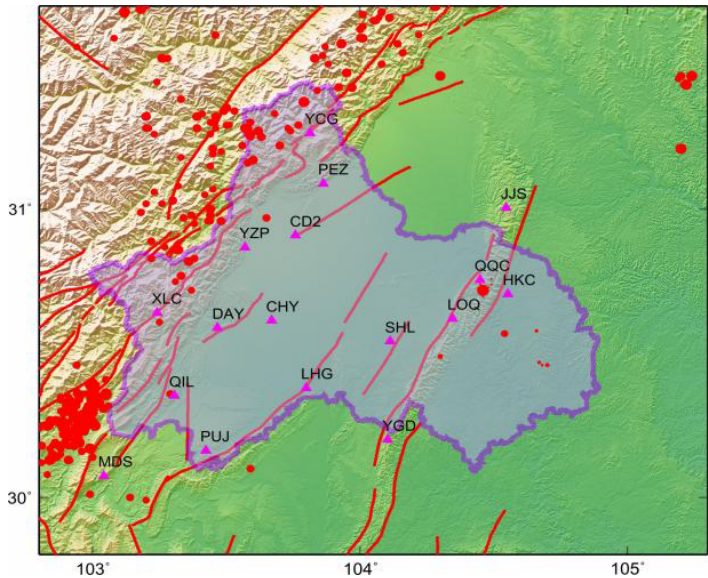


图 3 成都市活动断裂、地震震中及测震台站分布

Fig.3 Distribution of active faults, epicenters and seismic stations in Chengdu

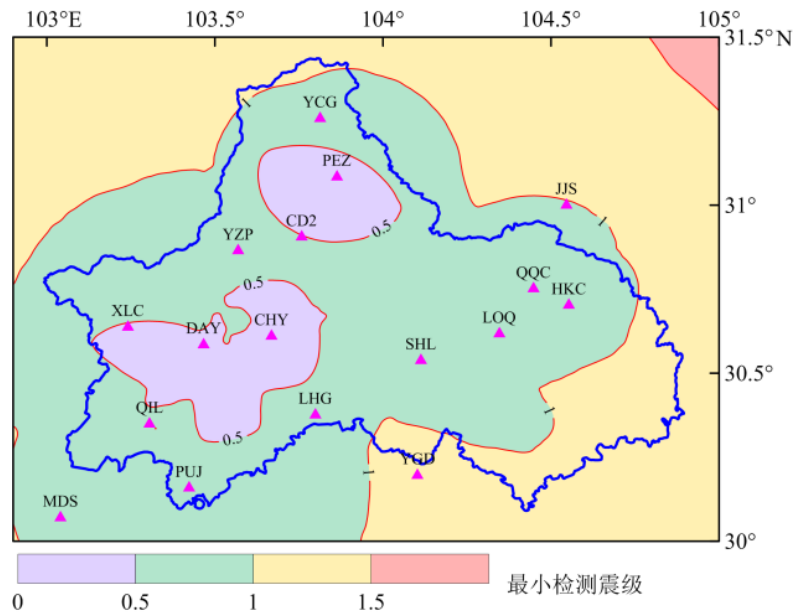


图4 成都市测震台网地震检测能力

Fig.4 Seismic detection ability of Chengdu seismic network

3.1 数据准备

SHL站和HKC站位于成都市中东部，建成于2004年，是成都市建成较早的一批台站。近年来，因台站所在区域规划调整和经济快速发展，附近的人为活动明显增加，环境噪声水平显著升高，2020—2021年两台的平均台基环境噪声有效值分别为 $5.84 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 和 $5.70 \times 10^{-6} \text{m/s}$ ，已远高于《GB/T 19531.1—2004 地震台站观测环境技术要求 第1部分：测震》中B类地区对短周期地震计环境噪声水

平的上限要求^[12]，不适宜继续观测，有必要另行迁址重建。

为使台站新址具备较好的建设条件并满足噪声水平要求，收集了成都市数字高程数据和热力值数据，通过处理将之转换为地形坡度和环境噪声有效值，排除其中地形坡度较大和环境噪声水平较高等不适宜建设测震台站的区域，将其它同时具备较好地形条件和较低环境噪声水平的区域作为台站新址的备选区域(图5)。

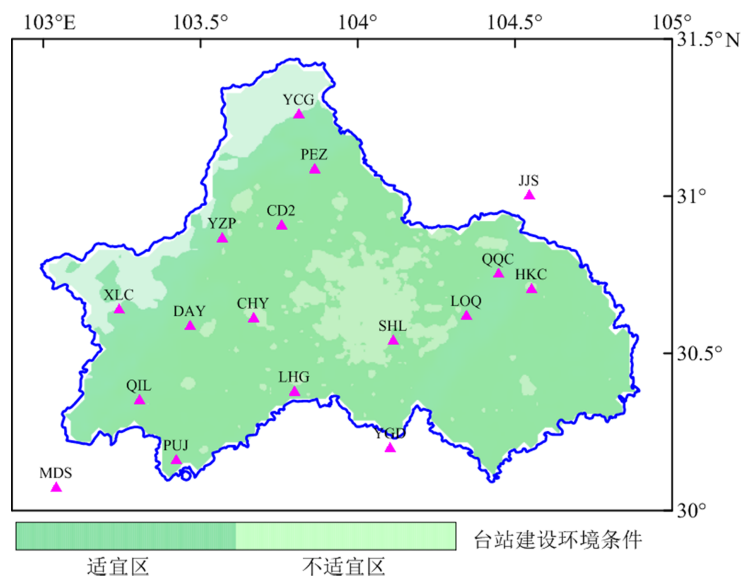


图5 成都市台站建设环境条件分布图

Fig.5 Distribution map of environmental condition of station construction in Chengdu

3.2 模型计算

本实例需要解决的台网布局优化问题对应表1中的最优化模型⑨, 设定的优化目标是: 对已经在网的SHL站和HKC站进行重新选址, 使新台网对成都市域范围内 M_L 1.0级以上地震的检测能力尽可

能好。通过求解, 当迭代次数为4020时模型收敛, 为SHL站和HKC站重新选址的位置最优, 在其它台站位置不变的情况下, 此时台网的地震检测能力最强, 可检测到 M_L 1.0级及以上地震的区域占全市总面积的比例由当前的86.69%提升至97.53%(图6)。

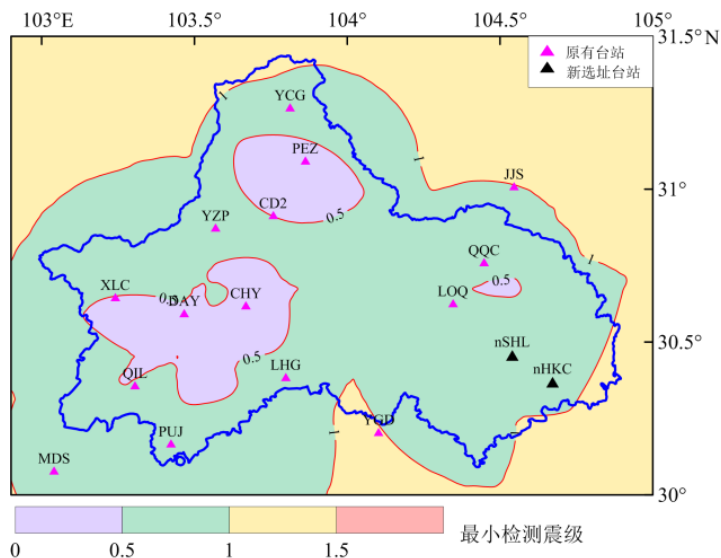


图6 优化后成都市测震台网地震检测能力

Fig.6 Seismic detection capability of Chengdu network seismic after optimization

4 讨论与结论

针对地方测震台网建设中常见的五种台站布局场景需求, 本文充分兼顾地震监测能力要求和台站建设投资效益, 构建十个最优化数学模型, 设计五大台网布局优化功能, 开发了地方测震台网布局优化软件, 以提高台网布局的经济性、合理性和科学性。成都市测震台网应用实例表明, 软件能快速、高效地产出满足规定监测能力指标的台网布局优化方案, 可为类似地区新建地震台网、扩建现有台网、组建虚拟台网、布设流动台站和迁建个别台站等工作提出有益建议。

因资料收集困难, 本软件目前仅以地形坡度和热力值转换的环境噪声水平作为确定备选区域的依据, 未能考虑地形、地貌、水系、城市规划等更多因素, 计算产出的建议点位是否利于台站建设可能与实际情况存在一定差异, 故推荐以软件计算结果为基础, 结合现场条件综合确定台站位置。

参考文献

- [1] 庄灿涛, 杨晓源. 我国地震台网发展回顾[C]//辉煌的历程——回顾中国地球物理学会60周年专刊. 北京: 中国地球

物理学会, 2007.

- [2] 刘瑞丰. 中国地震台网的建设与发展[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(04): 2+201.
- [3] 葛焕称. 区域地震台网的动态监测能力[J]. 地震地磁观测与研究, 1998, 19(04): 26-30.
- [4] 彼得·鲍曼. 新地震观测实践手册(第一卷)[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [5] 中国地震局监测预报司. 测震学原理与方法[M]. 北京: 地震出版社, 2017.
- [6] 刘栋. 福建省测震台网监测能力研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018.
- [7] 中国地震局. 地震编目规范: DB/T 66-2016[S]. 北京: 地震出版社, 2016.
- [8] Kirkpatrick S. Optimization by simulated annealing: quantitative studies[J]. J Stat Phys, 1984, 34(5): 975-986.
- [9] Aarts E, Korst J. Simulated annealing and boltzmann machines[M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1993.
- [10] 王强. 模拟退火算法的改进及其应用[J]. 应用数学, 1993, 6(4): 392-397.
- [11] 祁国亮, 袁川, 余苗, 等. 基于地震监测能力的地方测震台网布局优化[J]. 地震学报, 2022, 44(03): 1-14.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地震台站观测环境技术要求(第1部分: 测震): GB/T 19531.1-2004[S]. 北京: 地震出版社, 2004.