

邓砚, 孙孝波, 范熙伟, 等. 震后电力抢修力量快速优化调配决策模型研究 [J]. 华南地震, 2020, 40 (4): 110-118. [DENG Yan, SUN Xiaobo, FAN Xiwei, et al. Research on Decision-making Model of Optimal Allocation for Electrical Emergency Workers after the Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (4): 110-118]

震后电力抢修力量快速优化调配决策模型研究

邓砚¹, 孙孝波², 范熙伟¹, 齐文华¹

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 国网信息通信产业集团有限公司, 北京 102211)

摘要: 电力抢修力量的优化调配是电力系统辅助决策研究的关键内容之一, 震后应急处置中对这种辅助决策提出了更高的时效性要求。首先基于地震救灾案例统计分析和专家咨询给出了电力抢修人员的需求模型; 然后利用层次分析法, 建立了震后电力设施抢修优先度的快速评判模型; 进而利用运筹学中线性规划方法, 以应急抢修时间最短为目标构建了震后电力抢修力量快速优化调配决策模型; 最后给出了该模型的算例实现。

关键词: 震后; 电力系统; 抢修力量; 快速优化调配

中图分类号: TM75, P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 04-00110-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.04.015

Research on Decision-making Model of Optimal Allocation for Electrical Emergency Workers after the Earthquake

DENG Yan¹, SUN Xiaobo², FAN Xiwei¹, QI Wenhua¹

(1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

2. State Grid Information & Telecommunication Co., Ltd, Beijing 102211, China)

Abstract: The optimal allocation for electrical emergency workers is one of the key issues in the research of aid decision-making of electrical power system. According to the requirement of higher timeliness in post-earthquake emergency period, the technical ideas of optimal allocation for electrical emergency workers were put forward. Firstly, based on recent earthquake relief cases and expert consultation, the demand experience relationship of electrical emergency workers was given. Then an evaluation model for the priority of post-earthquake electric repair is established by the analytic hierarchy process. And then, the algorithm of transport problems in operational research was used to construct the model of optimal allocation of electrical emergency workers during the emergency repair time. Finally, an example was given to illustrate the process of implementation of this optimization model.

Keywords: Post-earthquake; Electrical power system; Emergency workers; Optimization model

收稿日期: 2020-04-02

基金项目: 国家重点研发计划课题“全时程灾情综合分析决策技术研究”项目(2018YFC1504503)和大中城市地震灾害情景构建重点专项(2016QJGJ15)

作者简介: 邓砚(1977-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事地震灾害和地震应急研究。

E-mail: dengy@ies.ac.cn

0 引言

在现代社会中，电力、通讯、交通、供水和燃气系统等维系着城市功能和区域社会经济功能的一系列基础性工程设施系统，被称为生命线系统^[1]。作为大型复杂生命线系统的重要组成部分之一，电力系统的安全性问题直接影响到国家的经济建设和人民的正常生活^[2]。电力系统的故障，除了日常设备运行故障、人为操作失误外，很大一部分是源于自然灾害^[3]。国内外发生的多次强烈地震都给灾区的电力系统造成了严重的破坏，这种破坏不仅会对人民生命和地区社会经济造成不良影响，而且也会给需要电力保障的一系列应急救灾工作带来阻碍，例如电力系统破坏可能导致通讯设备失去供电，通讯系统中断；夜间没有照明会加剧灾民恐慌心理等等。因此，必须根据震后电力设施受损情况，及时调派抢修队伍对受损设施进行高效地应急修复，以最大限度地减少损失^[4]。

2008年汶川地震后，践行“以人为本”、“科学救灾”的救灾模式已成为中国应急管理的主旋律。要实现“科学救灾”其中一个关键环节就是要实现救灾需求和救灾资源——“需”与“供”的匹配对接^[5]，只有这样才能避免在救灾过程中出现救援队伍过度集中或找不到救援对象、救灾物资供应不足或极度过剩的现象^[6-8]。以往电力应急演练或者应急预案编制过程中都存在着对应急队伍的调度问题，但很多核心环节，例如电力应急队伍派遣的优先级别，大多

依靠应急管理人員的直觉和经验来确定，主观性和随意性较强^[9-10]。为了提高电力应急队伍调度决策的科学性，吴文传等^[11]提出了电网安全预测预警与应急决策处理应急人员的调度；张晶伟等^[12]构建了电力网络中失效节点应急修复最优顺序确定的优化模型和模型求解的遗传算法；耿泽飞等^[13]提出了基于 Mamdani 型模糊推理的应急队伍需求分级方法；聂高众等^[14]根据震例统计提出了 80 多种救灾物资或救灾队伍的实际最小需求量计算模型；李茂^[15]依据力量调配的假设条件和原则，给出了在紧急救援状态和备选路线优先的情况下救援力量调配最优路线的选择思路和方法；袁媛等^[4]给出了生命线网络系统多节点失效的应急抢修队伍派遣优化模型。但是，目前针对地震应急期间如何快速确定电力抢修力量的需求和优化调配的研究比较少。

本文将以前震后电力抢修力量的快速优化调配为研究对象，给出其优化调配的技术思路和分析模型，以期震后电力抢修辅助决策提供一些科学依据。

1 震后电力抢修力量快速优化调配决策思路

震后电力抢修力量的快速优化调配决策主要从需求模型的构建、抢修优先度的快速评判、抢修点和资源点的最短距离和优化调配方法等 4 个环节，构成了完整的决策思路（见图 1）。

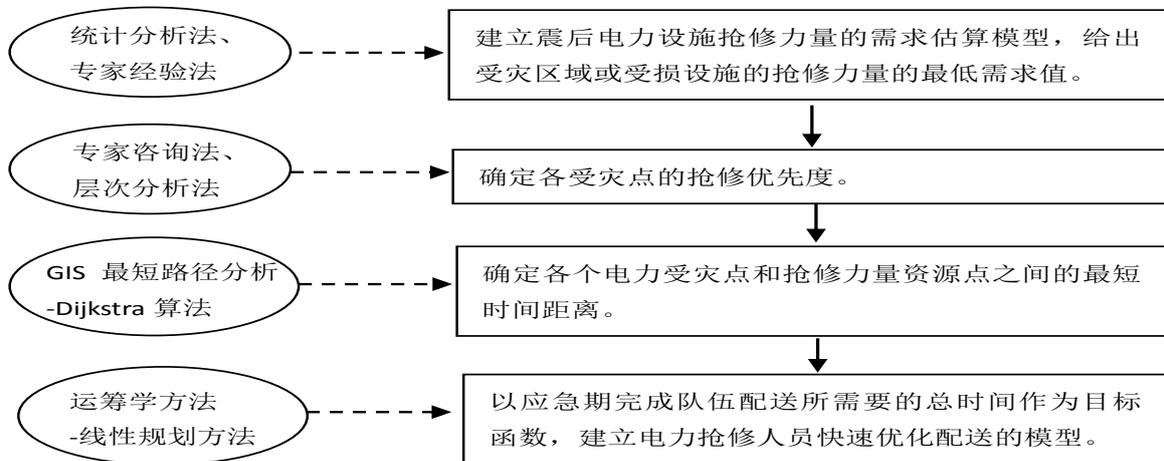


图 1 决策思路

Fig.1 Decision approach

2 模型的建立

2.1 震后电力设备抢修力量需求分析模型

本文的需求分析包括基于近期震例的震后电力抢修人员的总体需求和基于电力专家业务经验的不同变电站抢修人员需求的快速估算方法。

2.1.1 基于中国近期震例的震后电力抢修人员的总体需求估算方法

震后，决策者需要根据灾情对需要调配的电力抢修人员的规模进行大致的估计，以便于统筹安排本地和异地的救援力量。本文收集并整理了近年来的震例资料，发现震级小于5.9级且极震区烈度小于Ⅷ度的地震对电力系统造成的破坏较小，因此最终选取了2007年以来，震级>5.9级且震区最高烈度≥Ⅷ度的震例共13个（表1）。

表1 震后停电用户数和电力应急抢修力量统计表¹

Table 1 Statistical table on the number of power outage users and power emergency repair forces after the earthquakes

地震名称	发震时间 / (年-月-日)	发震地点		震级 / <i>M</i>	停电用户数 / 户	抢修人员数 / 人
		$\varphi_N / (^\circ)$	$\lambda_E / (^\circ)$			
皮山地震	2015-07-03	37.60	78.20	6.5	10 250	251
宁蒗—盐源地震	2012-06-24	27.70	100.70	5.7	3833	350
长宁地震	2019-06-17	28.34	104.90	6.0	38 000	860
鲁甸地震	2014-08-03	27.10	103.30	6.5	38 412	450
景谷地震	2014-10-07	23.40	100.50	6.6	14 514	500
普洱地震	2007-06-03	23.00	101.07	6.4	37 500	1200
芦山地震	2013-04-20	30.30	103.00	7.0	186 600	2100
九寨沟地震*	2017-08-08	33.20	103.82	7.0	1900	181
玉树地震	2010-04-14	33.10	96.60	7.1	92 091	559
盈江地震	2011-03-10	24.70	97.90	5.8	2111	200
康定地震	2014-11-22	30.20	101.70	6.3	600	54
定西地震	2013-07-22	34.50	104.20	6.6	17 590	336
汶川地震	2008-05-12	31.01	103.42	8.0	5 253 600	32 261

注：* 仅考虑有国家电网供电区域的停电和抢修力量

地震后电网公司在震后能快速获取一共有多少回线、多少变电站停电的信息，快速估算出有多少用户停电^①。本文对震后应急期间电力抢修人数与停电户数的关系进行拟合发现：两者之间存在明显的线性正相关（相关系数为0.999）。进一步，对两者取自然对数后，回归得到了震后应急期间抢修人员需求与停电用户

数量的统计关系（图2），见公式（1）和（2）。因此，可以根据震后停电用户数，通过上述公式，快速、大致给出中国现阶段震后电力抢修人员的总体需求规模。

震后应急期间电力抢修人数与停电户数的回归关系：

^①大中城市震后综合救灾对策研究课题组. 大中城市震后综合救灾对策研究调研报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2019.

$$\ln(y) = 0.619 \ln(x) + 0.172 \quad (1) \quad \text{式中：} y \text{ 为震后应急期电力抢修人员规模；} x \text{ 为停电用户数。}$$

$$y = \exp(0.619 \ln(x) + 0.172) \quad (2)$$

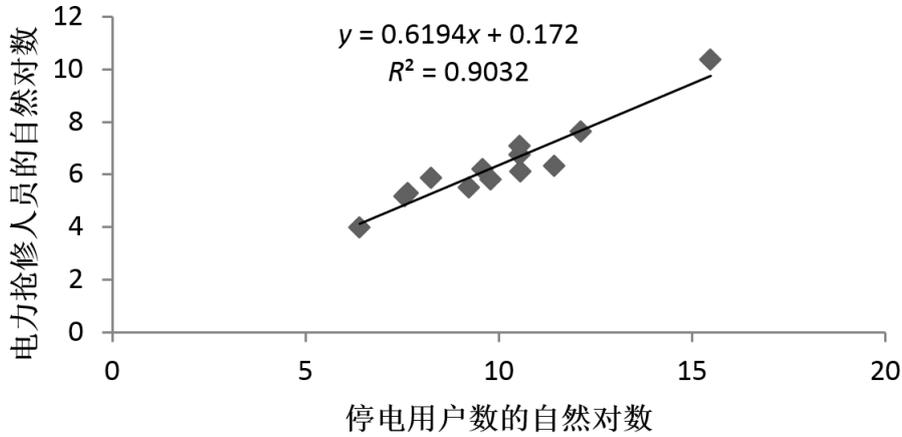


图2 震后电力抢修人员数量与停电用户数量的统计关系

Fig.2 The statistical relationship between the number of power emergency repair personnel and that of power outage users after the earthquakes

2.1.2 基于电力专家业务经验的抢修人员需求模型——以变电站抢修为例

国内外多次强烈地震都对灾区的电力系统造成了严重的破坏，其中电力系统中高压变电装置的破坏尤其突出。例如：1994年美国Northridge地震 230 kV 和 550 kV 的变电站严重破坏造成北美地区 110 万人中断用电；1995 年日本神户地震，一批 770 kV 和 275 kV 变电站受损，导致 260 万户停电；2004 年日本新泻地震，11 个变电所受损，滑坡造成输电塔破坏造成 28 万户停电；1996 年内蒙古包头地震，张家营变电站停止供电达 11 h，电力直接经济损失达 1 亿以上^[3]。2017 年九寨沟 7.0 级地震，110 kV 九寨沟变电站和 35 kV 黄龙变电站受损，造成九寨沟县县城和景区停电等等。因此，本文针对电力设备受损的需求评估将以变电站为例进行分析。

有研究表明：在我国位于震后 VIII~IX 度区

的变电站大多处于中等破坏，经抢修，在几天内可恢复供电；位于 VII 度及其以下烈度区的变电站基本完好或轻微破坏，一般由该变电站运维人员或少量外来抢修队伍进行抢修即可；位于 X 度及其以上烈度区的变电站大多严重破坏或毁坏，所需修复时间长，往往需要重建。因此震后 VIII~IX 度区内造成中等破坏的变电站是震后电力应急抢修的主体^[16]。根据电力部门专家意见，给出了震后 VIII~IX 度区变电站造成中度破坏情境下变电应急抢修队伍需求的经验性判定（表 2），与汶川 8.0 级地震、芦山 7.0 级地震、九寨沟 7.0 级地震等震例统计资料基本一致。此外，对于 VIII~IX 度区轻度破坏的变电站，至少派遣一支 10 人抢修队伍进行巡查和抢修^①。该经验判定原则可以适用于对 VIII~IX 度区受损变电站逐点抢修力量最小需求的快速确定。

表 2 震后造成中等破坏的不同类型变电站的抢修人员需求

Table 2 Emergency personnel requirements for the substations with moderate damage after the earthquake

变电站类型	抢修队伍 / (支)	抢修人数经验值 / (人)*	震例统计值 / (人)
500 kV	6	90	100 人左右
220 kV	3	45	20~40 人左右
110 kV	2	30	20~40 人左右
35 kV 及以下	1	15	十几人

注：* 按一支抢修队伍 15 人计算

2.2 震后电力设备抢修优先级判定模型

2.2.1 电力设备应急抢修优先级的判定依据

依据《国家电网公司处置地震灾害事件应急预案》^[17]的有关规定和在国家电网、陕西渭

南供电分公司、云南电网等部门的调研，这里将震后电力设备应急抢修的优先级判定依据总结为以下3方面（表3）。

表3 震后电力设备应急抢修的优先级判定依据

Table 3 The priority judgment of power equipment emergency repair after the earthquake

判定依据	内容
依据 1: 电力设备在电网中的重要性。	在电网恢复中, 优先保证重要电厂厂用电源和主干网架、重要输变电设备恢复 ^[17-18] 。
依据 2: 受影响用户在地震应急救援过程中的重要程度。	优先考虑对重点地区、重点城市、重要用户恢复供电。采取应急供电措施, 保证抗震救灾指挥部、抢险救灾现场、灾民安置点、医院及其他重要用户的应急供电, 最大限度地提供人民基本生活用电 ^[17-18] 。
依据 3: 抢修难度	在应急抢修中要考虑抢修难度, 遵循先易后难原则。造成这种难易差别主要是受到电力设备损害程度和道路通达程度的影响 ^[16] 。

2.2.2 变电站抢修的优先度判定模型

根据上述依据, 提出变电站抢修的优先级 (P_e) 判定原则可以表示为:

$$P_e = \alpha S_e + \beta L_e + \gamma D_e \quad (3)$$

(1) 设施等级 (S_e): 用于表示变电站的等级差别, 根据变电站在电力系统中的重要程度进行设施等级的赋值 (表4)。

表4 变电站的等级赋值表
Table 4 The assignment table of substation grade

变电站类型	赋值 S_e
500 kV	1
220 kV	0.8
110 kV	0.5
35 kV 及以下	0.3

(2) 受影响的电力用户的重要程度 (L_e): 表示不同用户在地震应急救援过程中的用电保障等级。从用户重要性上, 在知道负荷的情况下, 可以用停电区域电力用户重要性系数来度量。如果无法在震后快速获取负荷数据, 从区域上, 用停电地区的人口数量作为判定指标, 影响区域人口数量越高, 重要等级越高。表5中是电力专家对“国家抗震救灾指挥部基础数据库”中的重要用户分类重要性系数的0~1打分, 分

值越高说明这个用户在地震应急救援过程中的用电保障优先等级越高。

表5 各类重要负荷的抢修优先度取值

Table 5 Repair priority value of the important loads

重要用户*	重要性系数 L_e	重要用户*	重要性系数 L_e
党政机关	1	学校	0.6
医院	1	大型物资仓库	0.6
广播电台、电视台、	1	大型企业	0.6
电力枢纽	1	避难场所、大型场馆	0.2
通讯枢纽	1	金融、银行、金库	0.2
交通枢纽	1	文物保护单位	0.2
外国驻华机构	1		

注: *按照“国家抗震救灾指挥部基础数据库”中的重要用户分类。

(3) 抢修难度 (D_e): 表示抢修应当由易到难, 难易程度主要考虑受损害程度的影响。根据张美晶等^[16]在“电力设施震害及其危害性快速评估方法研究”中给出的提出的“变电站功能失效等级划分标准”, 定义了抢修系数 (表6)。

表 6 不同烈度区震害中变电站功能失效模式、恢复时间和抢修系数

Table 6 Substation failure mode, recovery time and emergency repair coefficient in different intensity areas

变电站功能失效程度	土建设施破坏情况	电气设备破坏情况	汶川地震中所处烈度	恢复时间	抢修系数
瘫痪	严重破坏或倒塌	受损设备 7 种以上，功能失效	$\geq X$	常常需要震后重建，短时间内无法全面恢复。	0
中等受损	基本处于中等破坏	受损设备 3~4 类	VIII~IX	经抢修，在几天内可恢复供电	0.4
轻微受损	轻微破坏，或基本完好。	受损设备 1~2 类	VI~VII	经抢修，在 1 d 以内基本恢复供电。	0.8
基本正常	基本完好	受损设备不多于 1 类	$\leq V$	一般无停电现象	1

(4) 指标权重的确定

利用层次分析法，计算式 (3) 中， α 、 β 、 γ 的权值。邀请电网公司有经验的专家和实际工作人员对上述 3 个指标进行重要程度的打分（表 7 和表 8），打分计算结果为： $\alpha=0.76$ 、 $\beta=0.18$ 、 $\gamma=0.06$ 。

表 7 三个因素对于电力应急抢修的优先度判断矩阵

Table 7 The priority judgment matrix of three factors for power emergency repair

	设施等级	用户重要程度	抢修难度
设施等级	1	9	9
用户重要程度	1/9	1	5
抢修难度	1/9	1/5	1

注：请专家判断表 4 中交叉对应的两个指标之间的重要性，权衡它们对于“电力应急抢修的优先度”的重要性。具体规则^[19]如下：

表 8 比较准则

Table 8 Comparison matrices

标度	含义
1	两个因素同样重要
3	一个因素相对于另一个因素稍微重要
5	一个因素相对于另一个因素明显重要
7	一个因素相对于另一个因素强烈重要
9	一个因素相对于另一个因素绝对重要
2, 4, 6, 8,	上述两相邻判断的中间值

最终评判模型表示为：

$$\begin{cases} P_e = 0.76S_e \times 0.18L_e \times 0.06D_e, 0 < D_e < 1; \\ P_e = 0, D_e = 0 \text{ or } 1. \end{cases} \quad (4)$$

式中： $D_e=0$ 是由于造成毁坏，无法在应急过程中抢修，需要调配利用应急发电车、发电机，或灾后重新建设； $D_e=1$ 是由于未受到破坏，无

需抢修。

2.3 震后电力抢修力量的快速优化配送模型

震后灾区存在着需要多受灾点统一进行资源（救援队伍或物资）配送的救灾场景，而对于应急机构而言，能够用于灾区分配的资源往往是不足的，特别是在震后应急期间，在这种情况下，要进行科学的抢险救灾，首要的前提就是要解决如何实现不同的资源点和受灾点之间的资源科学配送的问题^[20]。地震应急以抢修效率为第一要务，因此以完成队伍配送所需要的总时间作为目标函数，表示为：

$$\min z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

约束条件为：

$$s. t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad (i = 1, 2, \dots, m); \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad (j = 1, 2, \dots, n); \\ x_{ij} \geq 0. \end{cases} \quad (6)$$

式中： a_i 为各抢修资源点（资源点）能够提供的有效的抢修人员数量（已知）， b_j 为在当前拥有的总抢修人员数量下，各待抢修变电站（抢修点）可满足的抢修人员需求（可由 2.1 和 2.2 分析得出）。 c_{ij} 代表第 i 个抢修队伍的一名人员到第 j 个抢修点的最短的时间距离，利用 GIS 最优路径分析功能，依据时间成本最低原则，可以给出每个电力抢修人员所在地到每个受损电力设施之间的行进路径。令 x_{ij} 代表第 i 个抢修队伍为第 j 个抢修点提供的抢修人员数量，令 z 为完成队伍配送所需要的总时间。

3 震后应急期电力抢修力量的快速优化调配流程实现

3.1 优化调配基本流程

(1) 在电力系统受灾情况初步判定的基础上, 预估各变电站所需抢修人员的经验需求量(表 2); 同时通过抢修力量基础数据库等明确可供派遣的电力抢救队伍地点和人员数量的信息。

(2) 确定各个受灾点的抢修优先顺序(公式 4)。依据优先系数由高到低的顺序确定在当

前拥有的总抢修人员数量下, 各待抢修变电站(抢修点)可满足的抢修人员需求。

(3) 利用 GIS 最优路径分析功能, 依据时间成本最低原则, 给出每个资源点到每个抢修点之间的最短行进时间作为最优行进路径 c_{ij} 。

(4) 利用快速优化配送模型(公式 5), 基于各待抢修点的抢修优先系数由高到低, 采用“表上作业法”原理进行抢修人员的分配和派送(表 9), 将此模型中的 x_{ij} 解出, 即可得到最优的调配方案。

(5) 以此类推, 逐(优先)级完成。

表 9 抢修人员调配与需求关系表

Table 9 Relationship between emergency repair personnel and needs

资源点	抢修点				可调配人员数量
	B_1	B_2	B_n	
A_1	c_{11}	c_{12}		c_{1n}	a_1
A_2	c_{21}	c_{22}		c_{2n}	a_2
.....				
A_m	c_{m1}	c_{m2}		c_{mn}	a_m
可满足的抢修人员需求	b_1	b_2	b_n	

注: A, B 分别代表各抢修力量资源点和需抢修点。

3.2 算例分析

为了验证上述模型, 假定了一个地震发生后变电站受损和抢修情景。已知: 震后有 4 个需要抢修的变电站的基本情况(表 10); 每个受损变电站的抢修人员需求参照表 2 设定; 表

11 为受损变电站的抢修优先度判定结果; 表 12 为各个抢修队伍资源点与变电站抢修点之前的最短时间距离、各个资源点可以派出的抢修人员数量和各个抢修点的人员需求。

表 10 受损变电站的基本情况

Table 10 Information of damaged substations

变电站名称	变电站类别	服务对象	破坏等级
变电站 B_1	500 kV 变电站	整个区域	中等破坏
变电站 B_2	220 kV 变电站	服务多个场所	中等破坏
变电站 B_3	110 kV 变电站	1 个大型企业	中等破坏
变电站 B_4	35 kV 变电站	1 个文物保护单位	中等破坏

根据公式(4)计算了上述 4 个抢修点的优先度(表 11), 并利用 GIS 最短路径分析给出

了抢修点到资源点的最短时间距离(表 12)。

表 11 受损变电站的抢修优先度判定结果

Table 11 Priority of emergency repair of damaged substations

	设施等级	服务对象	破坏等级	优先度
抢修点 B_1	1	8	0.4	2.424
抢修点 B_2	0.8	4	0.4	1.332
抢修点 B_3	0.5	0.6	0.4	0.612
抢修点 B_4	0.3	0.2	0.4	0.348

注: B_1 和 B_2 是多个服务对象的分值的综合。

表 12 抢修点到资源点的最短时间距离

Table 12 The shortest time distance from the emergency repair points to the resource points

最短时间成本 /min	抢修点 B_1	抢修点 B_2	抢修点 B_3	抢修点 B_4	可调配人员数 / 队
资源点 A_1	60	30	20	90	3
资源点 A_2	40	40	15	60	5
资源点 A_3	30	80	60	20	5
资源点 A_4	60	80	40	60	1
资源点 A_5	80	60	100	40	3
可满足的抢修人员需求 / 队	6	3	2	1	

注：抢修点已经按照优先度排序由大到小排序。

根据公式 (5)，给出抢修人员优化调配的方案 (表 13)。 A_3 向 B_1 调配 5 队抢修人员， A_2 向 B_1 调配 1 队抢修人员， A_1 向 B_2 调配 3 队抢修

人员， A_2 向 B_3 调配 2 队抢修人员， A_5 向 B_4 调配 1 队抢修人员。

表 13 抢修人员优化调配方案

Table 13 Optimized deployment plan of emergency repair personnel

调配人员 / 人	抢修点 B_1	抢修点 B_2	抢修点 B_3	抢修点 B_4
	6	3	2	1
资源点 A_1	3	0	3	0
资源点 A_2	3	1	0	2
资源点 A_3	5	5	0	0
资源点 A_4	0	0	0	0
资源点 A_5	1	0	0	0

4 结论与讨论

本文根据目前地震应急期间对电力设施应急处置力量优化调配的实际需求，考虑到其高时效性和信息不完全的特点，从抢修人员需求分析、抢修优先级和优化配送等几个方面对地震灾区电力抢修力量优化调配问题进行了研究，给出了一套具有合理性和可操作性的技术思路。

(1) 基于震后电力设施受损情况的预评估，给出灾区总体或各个受损变电站的抢修人员需求，可以在震后应急期高时效性的要求和信息不完全的客观情况下为决策者提供一个的抢修人员的快速需求估算。

(2) 利用便于提取的优先度影响因素，利用层次分析法和专家经验，定量和定性相结合的方法在震后快速给出影响变电站抢修的优先顺序。

(3) 利用运筹学中的决策优化算法，以完成队伍配送所需要的总时间作为目标函数，可

以在震后为决策者做出快速电力抢修人员的优化调配提出辅助决策方案。

本文展示了该快速优化调配各环节所需模型的建立方法。目前的需求估算主要是通过震例和电力专家的经验，不同地区这种需求估算可能会发生变化，在利用的时候需要开展实地调研，动态的更新，优先度的评判在今后的研究中也不断地完善和深化。

本文提出的优化调配模型可以在震后应急期信息获取困难且不完全的情况下，为决策者提供一个能够实现快速处置决策的优化方案。这种需求不仅是在震后电力系统的抢修决策中存在，在通讯、供水、供气、消防灭火和受灾人员救援等不同的救援场景中都广泛存在，因此该模型的研究思路和方法，即需求评估 - 优先度判定 - 时间最优化决策的思路可适用于上述多种救灾场景的辅助决策分析中。

参考文献：

[1] 李杰. 生命线工程的研究进展与发展趋势 [J]. 土木工

- 程学报, 2006, 39(1):1-6.
- [2] 王抒祥. 电力应急指挥决策 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 谢强, 李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4):126-130.
- [4] 袁媛, 樊治平, 刘洋. 生命线网络系统多节点失效的应急抢修队伍派遣模型研究 [J]. 运筹与管理, 2012, 21(1):131-135.
- [5] 徐祖哲. 芦山地震启示录: 科学救灾, 供与需对接的艺术 [EB/OL]. (2013-04-24)[2019-12-05]. <http://roll.sohu.com/20130424/n373840063.shtml>.
- [6] 刘胜良, 金敏. 浅析加强救灾款物管理的对策——以汶川地震救灾款物管理为例 [J]. 会计之友, 2008(33):77-78.
- [7] 曾小波, 李雪峰. 4.20 芦山地震抗震救灾的得失思考 [J]. 行政管理改革, 2013(7):65-69.
- [8] 马旦珠. 青海玉树地震救灾工作的回顾与思考(一) [J]. 中国减灾, 2011, 9 上:46-47.
- [9] 田世明, 陈希, 朱朝阳, 等. 电力应急管理理论及技术对策 [J]. 电网技术, 2007, 31(24):22-24.
- [10] 田世明, 陈希, 朱朝阳, 等. 电力应急管理平台研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(1):26-28.
- [11] 吴文传, 张伯明, 曹福成, 等. 电网应急指挥技术支持系统设计与关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15):1-3.
- [12] 张晶伟, 张粒子, 黄弦超. 基于遗传拓扑混合算法的配电网多故障抢修策略 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22):32-35.
- [13] 耿泽飞, 薛丽蓉, 瑚跃进. 电力应急队伍调度决策研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(3):38-45.
- [14] 聂高众, 高建国, 苏桂武, 等. 地震应急救助需求的模型化处理——来自地震震例的经验分析 [J]. 资源科学, 2001, 23(1):69-76.
- [15] 李茂. 城市灾害事故应急救援力量调配模型研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
- [16] 张美晶. 电力设施震害及其危害性快速评估方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009.
- [17] 国家电网公司. 国家电网公司处置地震灾害事件应急预案 [EB/OL]. (2008-12-31)[2019-06-20]. <http://www.doc88.com/p-3794781211275.html>.
- [18] 中国南方电网. 云南电网有限责任公司地震灾害应急预案 [EB/OL]. (2015-7)[2019-06-20]. <http://jz.docin.com/p-1592346883.html>.
- [19] 张炳江. 层次分析法及其应用案例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [20] 钱颂迪. 运筹学(第4版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.