

设施拥堵状态下的层次性备用覆盖网络模型与改进遗传算法

滕辰妹¹, 宋 艳²

(1. 哈尔滨工程大学 经济管理学院, 哈尔滨 150001; 2. 上海外国语大学 国际工商管理学院, 上海 200083)

摘 要 经典的分层覆盖位置问题 (HCLP) 是在有限预算内找到设施位置以提供分层服务的问题. 这个过程中, 需求点的差异化服务需求可以来自层次型网络中不同服务可用性的设施. 我们设计了混合服务可用性的层次型网络, 通过讨论层次型设施数量为定量和变量的情况构建混合层次网络备用覆盖问题的整数规划模型, 并设计、改进元启发式算法来求解问题. 结果表明考虑变量的混合服务可用性的优化模型在一次覆盖中能更好的满足客户的需求, 而其备用覆盖能力和系统造价并非始终优于单类型层次网络; 建议的启发式算法在合理的计算时间内产生高质量的解.

关键词 层次型选址; 混合服务可用性; 备用覆盖; 改进遗传算法

Optimal decision model and improved genetic algorithm for disposition of hierarchical facilities under facility congestion

TENG Chenmei¹, SONG Yan²

(1. School of Economics and Management, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. School of Business and Management, Shanghai International Studies University, Shanghai 200083, China)

Abstract The classical hierarchical covering location problem (HCLP) is the problem to find locations within a limited budget to provide hierarchical services. In general, the ability of a hierarchical facility to export services to an affected area depends on its range of service radii and is not affected by service availability. Instead, this requirement can come from different facilities with different service availability in the hierarchical network. We designed a hierarchical network of hybrid service availability and constructed an integer-programming model for the hybrid hierarchical backup coverage location problem by discussing the number of hierarchical facilities as quantitative and variable, and developed the meta-heuristic algorithm. It is shown that the optimization model meets the needs better in coverage capability, while the backup coverage capability and system cost are not always better than the single-type hierarchical network; and the suggested heuristic yields high quality solution in a reasonable computation time.

Keywords hierarchical facility location; service availability; backup coverage; improved genetic algorithm

1 引言

随着突发事件的发展演变, 其破坏性与复杂性日益增大, 社会各领域对应急服务的需求愈加需要得到保证. 这种需求保证是受灾区域对高频次需求的一种应急服务保障, Hogan^[1] 将其描述为备用覆盖问题. 问题中定义应急服务系统中的设施具有“待命”和“服务”两种状态; 且其中正在“服务”的设施处于被占用状态,

收稿日期: 2018-10-11

作者简介: 滕辰妹 (1991–), 女, 汉, 山东日照人, 博士研究生, 研究方向: 选址决策、布局优化, E-mail: tcmtcz@163.com; 宋艳 (1974–), 女, 汉, 吉林榆树人, 教授, 博士, 研究方向: 管理信息系统、危机与灾害管理等, E-mail: tigersy@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (71771061); 中央高校基本科研业务费 (HEUCFW170903); 黑龙江省应用技术与开发计划项目 (GC16D104)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71771061); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (HEUCFW 170903); Applied Technology Research and Development Plan Project of Heilongjiang Province of China (GC16D104)

中文引用格式: 滕辰妹, 宋艳. 设施拥堵状态下的层次性备用覆盖网络模型与改进遗传算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(5): 1266–1277.

英文引用格式: Teng C M, Song Y. Optimal decision model and improved genetic algorithm for disposition of hierarchical facilities under facility congestion[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(5): 1266–1277.

无法为其他受灾点提供服务. 这种情况下需要处于“待命”状态的设施前往其他受灾点并向其输出服务以避免系统拥挤而产生需求覆盖失防. BACOP1 与 BACOP2 是结合了集覆盖 (SCLP)^[2] 和最大覆盖 (MCLP)^[3] 思想构建的两次覆盖需求最大化的备用覆盖模型. 后续很多备用覆盖研究以此为基础, 在应急响应系统设计, 零售设施选址, 计算机网络设计, 枢纽选址问题 (层次型设施选址分配)^[4] 等领域展开 (更多详细信息见综述 Farahani 等^[5] 和 Benabdouallah 等人^[6]).

当考虑设施繁忙或中断时, 设施由于无法满足所有同时的服务请求而产生系统拥挤. 此时网络中的需求可能会显著增加, 需要考虑与正常情况完全不同的需求模式^[7,8]. 一般来说, 突发事件的规模与性质作为一个模型据以建立的外部条件, 具有不确定性与多样性, 会导致受灾区域产生差异化的需求, 需要建立提供不同水平、等级服务的层次型设施网络^[9]. 因此, 为了获得更可靠的服务设施网络配置, 考虑到上述因素导致的层次性需求至关重要. 这种差异化需求的来源可能受层次型网络服务可用性类型的影响而不同. 经典的 K 级层次型网络^[10] 认为, 1 至 k 级代表由低到高的等级, 根据设施提供的服务是否包含下级设施所提供的服务将层次型网络划分为嵌套型和非嵌套型^[11] 两类服务可用性. 在嵌套型层次网络中, 高级设施提供其下级设施提供的所有服务, 而非嵌套网络中的设施仅提供自身等级服务. 例如在一个 $K = 3$ 的嵌套型医疗保健系统^[12] 中, 分级设施网络包括当地诊所、医院和医疗中心三个层次. 这种情况下, 最低级别的设施是为入院患者提供直接服务的当地诊所; 中层设施为医院向当地诊所提供服务, 进行门诊手术; 最高层次的医疗中心为医院提供服务, 并处理相应的住院病例. 大多数医疗卫生保健系统^[13-15] 都是按照分级系统组织的^[16], 也是文献中研究最多的系统之一. 这些研究将整个层次型设施系统定义为单类型服务可用性的设施网络, 认为整个层次型网络中的所有层次型设施都为嵌套型服务可用性或非嵌套服务可用性, 并将其覆盖方式根据覆盖目标划分为两种^[9]. 一种是根据设施的可用覆盖范围分别最大化每个需求类型的满意度, 另一种是最大化整体需求的满意度, 这种节点的整体满意需要满足其所有类型服务都在设施覆盖区域的假设. 层次型网络研究中更多地以第二种覆盖方式为条件, 最新的研究进展综述见 Şahin^[17], Farahani^[18].

大部分研究将层次型系统的服务可用性描述为嵌套型展开. Aliakbarian^[19] 等提出了层次型设施中断的问题, 认为作为领导者的决策者在每个级别的系统中保护一定数量的设施, 以尽量减少最具破坏性的攻击对无保护设施的影响; 另一方面, 攻击者作为跟随者, 拥有受保护设施的全面信息而作出拦截计划, 以最大限度地提高攻击给系统带来的损失. 对于设施可能存在中断风险的情况, Zarrinpoor^[20] 为卫生服务网络设计提出了一种可靠的分层位置分配模型. 为了表征相关健康网络的各个级别之间的关系, 在两级多流嵌套层次结构中考虑了患者等待时间概率最小的排队系统. Smith 等^[21] 构建医疗保健系统中一系列具有双重效率、公平目标的离散层次型选址模型, 用于定位分层系统中的设施位置以寻求公平而有效的分层服务. Teixeira 等^[22] 基于几个层次的需求和几种类型的服务提出一个公共设施规划的离散分层定位模型, 以期最大限度地提高用户对设施的可访问性. Dukkanci 等^[23] 结合枢纽位置及需求分配建立了三层级网络结构. Marianov^[24] 讨论了拥塞情况下的覆盖人口数量最大化和设施数量最小化的两类层次型设施的定位问题. Lee^[25] 结合多种覆盖思想对广义层次型设施选址问题 (G-HCLP) 设计禁忌搜索算法. 李春阳等^[26] 考虑患者择医行为的影响提出医疗设施层次选址模型. 袁文燕等^[27] 构建了事故风险与距离相结合的双层次选址模型. 陈志芬等^[28] 基于移动距离最短和建设成本最小两类选址目标建立了应急避难场所的三级层次选址模型. 此外, 另有一些研究基于非嵌套服务可用性设计层次型网络. Erdemir^[29] 利用备用覆盖模型的概念研究了三种覆盖方式下的层次型医疗设施的联合选址问题. Paul^[30] 基于现有区域资产分析了设施位置在国防部应对大规模紧急情况时的有效性. 这一过程以寻求最大化覆盖范围、最小化对现有结构的修改为目标, 制定了层次型网络的多目标扩展问题. 并且为了解决这个多目标问题, 使用 ϵ -约束方法开发了一组非劣解. 这些非劣效解决方案明确地展示了最大化覆盖范围和最小化成本之间的权衡, 为决策者提供了一套考虑实施的帕累托最优决策.

层次型设施选址问题是基于 MCLP 问题^[31] 的 NP 难问题, 除非 $P = NP$, 否则这类问题不可能在多项式时间内求得最优解. 精确求解方法^[10] 和近似、启发式^[32] 和元启发式算法是处理这类问题的重要方法. 近年来, 约有 30% 的研究将精确方法用于处理层次型设施选址问题, 而在同一时期使用近似、启发式和元启发式算法的比例是其两倍^[18]. 随着当今设施位置问题的规模和复杂性不断增加, 这种启发式算法的开

发变得更加有必要。禁忌搜索、模拟退火和遗传算法等启发式算法受待求解问题不同条件的影响在时间、效率、精度等性能方存在一些差异,虽然它们都可以求解设施选址问题,但对于大规模问题,遗传算法由于具有良好的收敛性、极高的鲁棒性和强大的适用性表现出较好的性能,在设施选址问题的求解中被广泛应用^[33]。因此,我们将遗传算法作为本文解决层次型设施选址问题的方法。

一般而言,层次型设施因所提供的服务不同需要付出的成本代价不同,需要决策者权衡系统的总成本与服务能力,或在有限的预算下根据设施成本设计网络。尽管一些层次型网络设计^[15,28,30],考虑了这些关系,但仅考虑了视设施服务可用性为同一类型的情况,且很多研究将设施数量设置为定量来构建层次型备用网络。我们知道,层次型设施是否有能力向受灾区域输出服务取决于其服务半径范围,不受服务可用性影响;那么,需求点的服务可以来自层次型网络中不同服务可用性的设施。根据层次型网络的覆盖定义和可用性类型,节点的整体需求在一个 k 级嵌套型设施网络中至少需要一个 k 级设施,非嵌套系统中则至少分别需要 1 至 k 级设施各一个。而现实生活中的建设生产费用不单取决于直接费用,同时也取决于建设过程中发生的租赁、机物料消耗等不可控费用的间接成本^[34]。这就使得满足一个节点整体覆盖的非嵌套型设施在异地建造过程中受运输成本、建设条件等间接成本较嵌套型设施的影响大。换言之,一个 K 级嵌套型设施的建设成本一定程度上低于 K 个分别提供 1 至 k 级服务的非嵌套型设施的总成本。

在设施网络设计中,系统受设施数量影响可以表现出不同的强健性与稳固性。但由于层次型设施造价受服务可用性类型、设施级别(后文统称为类别)影响有所差异,层次型网络中满足预算的各类别设施数量则可能存在多种组合的情况,不能视层次型设施定位问题中的设施数量为定量;因此有必要分析可变的设施数量对层次型网络备用覆盖能力的变化。鉴于此,针对层次型设施选址的备用覆盖网络研究现状中存在的欠缺方面本文主要进行以下几方面的补充。首先,我们在层次型网络结构设计中加入预算对变量设施数量的约束,以及变量设施数量对层次网络覆盖能力的影响分析。其次,通过扩展 Daskin 提出的分层最大覆盖区位置问题(HMCLP)模型构建层次型设施系统的备用覆盖选址模型,旨在探究设施数量为变量时层次型网络备用覆盖能力的变化。论文在第 2 部分基于总预算限制分析设施数量为变量的层次型网络覆盖性能的变化;第 3 部分构建层次型设施系统的备用覆盖优化模型;第 4 部分对于层次型设施选址问题的求解进行遗传算法的设计,并针对处理规模小和早熟的问题改进遗传算法以提升求解效能;第 5 部分拟通过一个随机案例对模型与算法进行仿真分析;最后在第 6 部分总结。

2 基于混合服务可用性的分层设施选址优化问题

在非嵌套型服务可用性的层次型设施网络中, k 等级服务仅能由相同级别设施提供,而在嵌套型服务可用性网络中则可以由 h ($h \geq k$) 级设施提供。我们知道客户的需求是服务,同一个客户可以由层次结构中不同的设施来提供,这些设施的级别与服务可用性可以是不同的。如果考虑混合服务可用性的系统网络结构,层次型网络则可以同时存在嵌套型和非嵌套型服务可用性的设施;那么, k 级服务的需求就可以由层次网络中相同水平的非嵌套型设施或者水平相同或更高的嵌套型设施提供。

本节基于总预算对设施数量的约束构建可变设施数量的层次性设施选址问题,首先作出如下假设: 1. 为降低问题复杂程度假设设施的服务容量无限制; 2. 基于间接成本的存在,假设一个 K 级嵌套型设施的建设成本 p_h^2 低于 K 个分别提供 1 至 K 级服务的非嵌套型设施的成本 p_h^1 之和,即设施造价参数满足条件 $p_h^2 \leq \sum_h p_h^1$ 。模型有关参数定义及决策变量如下:

i : 需求点索引, $1 \leq i \leq I$;

j, q : 应急设施点索引, $1 \leq j, q \leq J$;

h, k : 设施级别索引, $1 \leq h, k \leq H$;

a_i : 需求点 i 的人口数;

R_h : 应急设施的 h 级服务能力(覆盖半径);

d_{ij} : 需求点 i 到设施点 j 的最短距离(此处以欧式距离计算,实际通行距离以路网为准);

$N_{ih} \{j | d_{ij} \leq R_h\}$: 有能力覆盖需求点 i 的 h 级设施点的集合;

N_h : h 级设施数量;

P : 建立层次性设施点的总预算;

p_h^1 : 非嵌套网络中 h 级设施的造价;

p_h^2 : 嵌套网络中 h 级设施的造价;

x_{jh} : 0-1 变量, 建立 h 级设施点 j 时变量为 1, 否则为 0;

y_i : 0-1 变量, 需求点 i 受整体覆盖时变量为 1, 否则为 0;

y_{ih} : 0-1 变量, 需求点 i 受 h 级服务覆盖时变量为 1, 否则为 0;

在以往研究中, 单类型服务可用性 (嵌套型 / 非嵌套型) 的层次型设施选址问题用数学公式表述为:

$$\text{MAX } Z_1 = \sum_i a_i \cdot y_i \quad (1)$$

$$\text{s.t. } y_{ih} \leq \sum_{k \geq h} \sum_{j \in N_{ih}} x_{jk} \text{ or } y_{ih} \leq \sum_{j \in N_{ih}} x_{jh}, \forall i, h, \quad (2)$$

$$\sum_h x_{jh} = N_h, \forall h, \quad (3)$$

$$y_i \leq y_{ih}, \forall i, h, \quad (4)$$

$$\sum_h x_{jh} \leq 1, \forall j, \quad (5)$$

$$x_{jh}, y_i, y_{ih} \in \{0, 1\}, \forall i, j, h. \quad (6)$$

目标函数式 (1) 最大化需求节点的整体覆盖. 式 (2) 定义需求节点 i 的覆盖条件, 当且仅当建立对其有 h 级覆盖能力的嵌套型 / 非嵌套型设施时才认为需求点 i 受 h 级服务覆盖. 式 (3) 限定 h 级设施点个数. 式 (4) 定义需求节点 i 的整体覆盖. 式 (5) 表示一个备选点处至多仅能建立一个设施点. 式 (6) 定义 0, 1 整数变量. 当系统网络包括非嵌套型和嵌套型服务可用性的两种状态设施时, 需要增添变量 x_{jh}^1 与 x_{jh}^2 , 表示为对应状态的选址决策变量; 若建立相应服务可用性的 h 级 j 设施时变量取值为 1, 否则为 0. 此时以式 (7) 替代式 (2), 表示需求点 i 的 h 级服务可以由层次网络中非嵌套型和嵌套型设施共同提供. 系统中的各类别设施数量受预算约束限制, 对于式 (3) 构建函数表达式 (8). 由此, 将考虑变量设施数量的层次型优化模型表示为:

$$\text{MAX } Z_1 = \sum_i a_i \cdot y_i \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in N_{ih}} x_{jh}^1 + \sum_{k \geq h} \sum_{q \in N_{ih}} x_{qk}^2 - y_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (7)$$

$$\sum_j \sum_h (x_{jh}^1 \cdot p_h^1 + x_{jh}^2 \cdot p_h^2) - P \leq 0, \quad (8)$$

$$x_{jh}^1 + x_{jh}^2 \leq 1, \forall j, h, \quad (9)$$

$$y_{ih} - y_i \geq 0, \forall i, h, \quad (4)$$

$$x_{jh}^1, x_{jh}^2, y_i, y_{ih} \in \{0, 1\}, \forall i, j, h. \quad (10)$$

式 (9) 要求任意选建设施 j 仅能为一类设施的设施. 式 (10) 定义变量. 以附件 1 为例, 对一个 HCLP 案例通过改变预算约束观测三类服务可用性设施网络的最大覆盖能力.

通过表 1 和表 2 得到, 随着预算增加嵌套型、非嵌套型、混合型层次系统的最大覆盖能力均发生改变. 混合服务可用性网络与单类型服务可用性网络相比, 一方面, 在满足同等质量需求时可以降低整个系统的总造价; 另一方面, 预算约束相同情况下, 更大限度地提升系统整体覆盖效能. 显然, 当决策者进行多种选址方案比较时, 混合服务可用性的设施网络能更好的服务于客户的需求. 如果考虑系统的拥堵状态, 这三种服务可用性的层次型系统备用覆盖能力也会存在差异, 我们在下一节中进行建模分析.

3 层次型设施系统的备用覆盖选址优化模型

在混合型层次网络中, 非嵌套服务性设施因仅提供自身等级服务而具有单一覆盖半径, 嵌套型服务性设施则根据所提供服务的多个级别具有多重覆盖半径. 这些设施共同为其覆盖能力范围内的需求点提供相应

表 1 三种服务可用性案例的最大覆盖结果

<i>I</i>	<i>J</i>	服务可用性类型	<i>P</i>											
			45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
50	10	非嵌套	0	301	437.8	437.8	505.8	557.2	601.2	649.8	717.8	769.2	769.2	833.3
		嵌套	301	301	437.8	505.8	513	635.8	635.8	714.2	769.2	804.3	859.3	875.3
		混合	301	437.8	437.8	513	557.2	649.8	717.8	769.2	818.3	891.9	901.3	922.3
	30	非嵌套	0	312.8	486.8	486.8	659.2	784.3	815.3	815.3	909.2	1034.3	1034.3	1073.2
		嵌套	312.8	312.8	466.4	625.5	625.5	703.5	788.3	857.8	930.3	987.3	1068.3	1121.3
		混合	312.8	466.4	486.8	625.5	703.5	788.3	857.8	969.2	1034.3	1068.3	1100.2	1139.3
	50	非嵌套	0	345.8	561.8	561.8	728.3	869.3	869.3	869.3	909.3	1037.3	1037.3	1135.6
		嵌套	345.8	345.8	509.8	640.8	640.8	759.3	869.3	900.3	998.3	1037.3	1068.3	1121.3
		混合	345.8	509.8	561.8	640.8	749.3	869.3	900.3	1011.3	1037.3	1106.3	1142.2	1179.3
100	10	非嵌套	0	852.9	1093.6	1093.6	1276	1388	1432	1432	1532.3	1629	1629	1675.3
		嵌套	852.9	852.9	1093.6	1276	1276	1420.3	1432	1532.3	1629	1661.3	1773.3	1793.7
		混合	852.9	1093.6	1093.6	1276	1388	1432	1532.3	1629	1675.3	1781.7	1781.7	1817.7
	30	非嵌套	0	852.9	1154.4	1154.4	1612.2	1821.3	1852.3	1852.3	1904.9	2100.3	2100.3	2127.3
		嵌套	852.9	852.9	1147.6	1441.4	1441.4	1650.5	1821.3	1878.9	1981.9	2053.9	2119.9	2191.9
		混合	852.9	1147.6	1154.4	1441.4	1650.5	1821.3	1878.9	1981.9	2100.3	2119.9	2151.9	2220.9
	50	非嵌套	0	852.9	1277.8	1277.8	1618.2	1882.3	1941.1	1941.1	1950.9	2100.3	2100.3	2219.5
		嵌套	852.9	852.9	1209.8	1475.8	1475.8	1703.3	1922.1	1941.1	2047.3	2131.9	2131.9	2228.5
		混合	852.9	1209.8	1277.8	1475.8	1703.3	1922.1	1941.1	2047.3	2100.3	2146.3	2238.2	2265.9
200	10	非嵌套	0	957.1	1281.7	1281.7	1525.3	1650	1773	1782.3	1959	2085.4	2085.4	2259
		嵌套	957.1	957.1	1281.7	1525.3	1525.3	1779.3	1779.3	1959	2083.7	2213	2337.7	2433.6
		混合	957.1	1281.7	1281.7	1525.3	1650	1779.3	1959	2085.4	2259	2405.4	2405.4	2501.3
	30	非嵌套	0	957.1	1509.2	1509.2	2050.9	2419.9	2491.5	2491.5	2553.9	2922.9	2922.9	3099.8
		嵌套	957.1	957.1	1430.1	1845.3	1845.3	2186.6	2428.5	2491.5	2694.5	2825.7	2919.8	3065
		混合	957.1	1430.1	1509.2	1845.3	2186.6	2428.5	2491.5	2737.4	2869.6	2930.9	3039.4	3121
	50	非嵌套	0	957.1	1631	1631	2218.4	2475.5	2615.4	2615.4	2664.3	2980.5	2980.5	3163.5
		嵌套	957.1	957.1	1464.3	1908	1908	2311.1	2520.4	2622.8	2754.2	2942.4	2980.3	3178.6
		混合	957.1	1464.3	1631	1908	2311.1	2520.4	2615.4	2840.4	2942.5	3058.2	3197.6	3268.1

表 2 三种服务可用性案例的系统造价比较

<i>P</i>	非嵌套	非嵌套系统造价	嵌套	嵌套系统造价	Hybrid	混合系统造价
45	0	35	312.8	45	312.8	45
50	312.8	47	312.8	45	466.4	49
55	486.8	54	466.4	52	486.8	55
60	486.8	54	625.5	59	625.5	56
65	659.2	61	625.5	59	703.5	63
70	784.3	68	703.5	66	788.3	70
75	815.3	75	788.3	73	857.8	73
80	815.3	75	857.8	76	969.2	80
85	909.2	83	930.3	83	1034.3	85
90	1034.3	90	987.3	90	1068.3	90
95	1034.3	90	1068.3	93	1100.2	94
100	1073.2	97	1121.3	100	1139.3	97

等级服务, 当其处于繁忙状态时, 同一个等级的需求可以由有能力提供相应等级服务的其他类型、等级的设施满足.

基于层次型网络中变量设施数量的考量, 我们建立混合层次型备用覆盖网络模型 HHBCLP. 在模型中新增变量 u_{ih} , 我们定义为超额覆盖变量. 当需求点 i 有一次以上的 h 级服务覆盖, 即需求点 i 受 h 级服务至少两次覆盖时, 需求点 i 受超额覆盖, 此时变量取值为 1, 否则为 0.

$$\text{MAX } Z_1 = \sum_i a_i \cdot y_i$$

(1)

$$Z_2 = \sum_i \sum_h a_i \cdot u_{ih} \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N_{ih}} x_{jh}^1 + \sum_{k \geq h} \sum_{q \in N_{ih}} x_{qk}^2 - y_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N_{ih}} x_{jh}^1 + \sum_{k \geq h} \sum_{q \in N_{ih}} x_{qk}^2 - y_{ih} - u_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (12)$$

$$\sum_j \sum_h (x_{jh}^1 \cdot p_h^1 + x_{jh}^2 \cdot p_h^2) - P \leq 0, \quad (8)$$

$$x_{jh}^1 + x_{jh}^2 \leq 1, \forall j, h, \quad (9)$$

$$y_{ih} - y_i \geq 0, \forall i, h, \quad (4)$$

$$y_{ih} - u_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (13)$$

$$x_{jh}^1, x_{jh}^2, y_i, y_{ih}, u_{ih} \in \{0, 1\}, \forall i, j, h. \quad (14)$$

新增的目标函数式 (11) 致力于所有层级服务的超额覆盖, 是层次设施对所有层级需求进行的总的超额覆盖最大化. 式 (12) 表明需求点 i 的 h 级超额覆盖以其 h 级覆盖为条件, 在满足 h 级覆盖时才能进行 h 级服务的超额覆盖. 约束式 (13) 确保需求点 i 满足受 h 级备用覆盖发生在第一次覆盖后的这一强制性条件. 式 (14) 定义新增变量 u_{ih} .

针对区域的高备用覆盖需求, 可以以同样方式扩展建立多层次设施三次覆盖 (两次超额覆盖) 模型, 增加变量 w_{ih} , 变量为 1 表示需求点 i 受 h 级设施点至少三次覆盖, 反之为 0. 层次型网络三次覆盖模型为:

$$\text{MAX } Z_1 = \sum_i a_i \cdot y_i \quad (1)$$

$$Z_2 = \sum_i \sum_h a_i \cdot u_{ih} \quad (11)$$

$$Z_3 = \sum_i \sum_h a_i \cdot w_{ih} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N_{ih}} x_{jh}^1 + \sum_{k \geq h} \sum_{q \in N_{ih}} x_{qk}^2 - y_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N_{ih}} x_{jh}^1 + \sum_{k \geq h} \sum_{q \in N_{ih}} x_{qk}^2 - y_{ih} - u_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (12)$$

$$\sum_{j \in N_{ih}} x_{jh}^1 + \sum_{k \geq h} \sum_{q \in N_{ih}} x_{qk}^2 - y_{ih} - u_{ih} - w_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (16)$$

$$\sum_j \sum_h (x_{jh}^1 \cdot p_h^1 + x_{jh}^2 \cdot p_h^2) - P \leq 0, \quad (8)$$

$$x_{jh}^1 + x_{jh}^2 \leq 1, \forall j, h, \quad (9)$$

$$y_{ih} - y_i \geq 0, \forall i, h, \quad (4)$$

$$y_{ih} - u_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (13)$$

$$u_{ih} - w_{ih} \geq 0, \forall i, h, \quad (17)$$

$$x_{jh}^1, x_{jh}^2, y_i, y_{ih}, u_{ih}, w_{ih} \in \{0, 1\}, \forall i, j, h. \quad (18)$$

新增目标函数式 (15) 使设施点的所有 h 级服务第二次超额覆盖最大化. 约束式 (16) 表明需求点 i 的 h 级第二次超额覆盖以其 h 级第一次覆盖为条件, 在满足 h 级第一次超额覆盖时才能进行 h 级服务的第二次超额覆盖. 约束式 (17) 表示需求点 i 的 h 级服务第二次超额覆盖发生在第一次超额覆盖后. 式 (18) 再次定义决策变量.

4 H-HCLP 的求解算法设计

4.1 算法编码方式设计

遗传算法^[35]是通过模拟自然环境中优胜劣汰的进化过程进行全局性自适应概率搜索的一种启发式算法。遗传算法从代表问题可能潜在的解集所构成的种群开始,这个种群由经过基因编码的一定数目的个体组成,其中每个个体需要经过编码工作形成染色体。初代种群产生后逐代经过选择、交叉、变异遗传操作演化出越来越好的近似解。在解决选址决策问题时,遗传算法通常对染色体编码采用二进制编码方式^[36-39]。这种方式将染色体基因串上的编码看作为 0-1 决策变量。字符“1”代表在此备选位置建立设施点,字符“0”则不在此位置建立设施点,得到的可行解为选址决策方案。在离散型设施选址问题的求解过程中,可以通过增加染色体的二进制编码长度来提高运算求解精度。而对于层次性问题,二进制编码虽然简单直观,但明显地存在映射误差。若设置的染色体长度较短,可能达不到精度要求,若令个体编码长度较长则增加了解码的难度。如果群体规模大,那么误差将更加明显。这也是遗传算法在求解层次性设施问题中少有得到应用一个重要原因。因此,对遗传算法的染色体编码方式及相关的遗传操作步骤进行设计,并根据具体的模型改进优化,使之有效地求解层次型问题。

在遗传算法和改进遗传算法对层次型选址问题的求解过程中,我们设计设施数量函数与成本判别函数进行染色体的基因编码。首先,以二进制编码方式为基础进行遗传算法在层次性设施选址问题中的染色体编码。我们定义字符串 $R(1^{***}10100)$ 为构成染色体的选址决策方案,符号“*”表示此位置既可以是 1 也可以是 0。具体的可行方案根据设施数量函数和成本判别函数而得来。在这里,成本判别函数旨在实现预算的限制,设施数量函数的目的是在满足预算约束条件下判定可能存在的各类别设施数量。我们定义一种分段的符号编码方式,各染色体编码串的基因值取自集 $\{0, 1\}$,代表是否在此处建立设施。

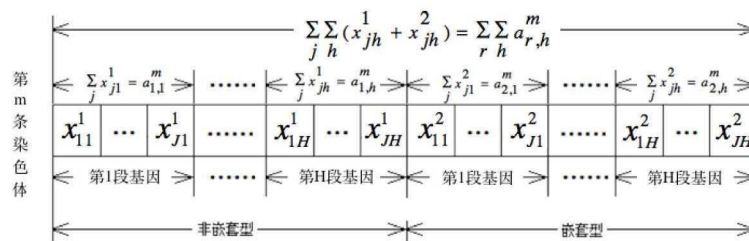


图 1 染色体的分段二进制编码方式

为了直观表达这种编码方式,我们以 r 来表示系统中的两类服务可用性状态,并且将染色体定义为 $r * h$ 段。每段染色体长度为总的备选设施点数,以 J 标记。每个基因位点的取值代表是否在其对应的类别建立相应位置的设施点,“1”表示建立设施,“0”表示不建立。我们设 A 代表满足预算约束的各 r 类 h 级设施数量组合的集合, M 为集合中组合的个数,即可行选址方案数量。如图 1 所示, $a_{r,h}^m \in A$ 为第 $(m \leq M)$ 个可行选址方案中 r 类 h 级设施建立的数量。在 $a_{r,h}^m$ 中遍历 r, h 得到的一组向量为第 m 种可行方案中各设施数量的组合。在选择、交叉遗传操作过程中通过成本判别函数保持染色体的编码匹配。

4.2 改进步骤

求解过程中我们随机生成 $m * n$ 条满足成本判别函数的染色体以形成初始群体,以维持群体的多样性。此时开始迭代,每次迭代采用轮盘赌策略将得到个体构成新一代种群。在每一次交叉操作中随机选择两条父代染色体 $P1$ 和 $P2$ 作为亲本,根据随机产生的交叉位置 $k, k \in \{1, 2, \dots, 2 * H * J - 1\}$ 执行交叉操作。我们生成了两个子代染色体,其中染色体 1 的前 k 个基因来自父代 1,后 $n - k$ 个基因来自父代 2,染色体 2 的前 k 个基因来自父代 2,后 $n - k$ 个基因来自父代 1。如果形成的染色体不满足成本判别函数,我们重新执行交叉操作。随后的变异过程中,随机选取染色体中不为“0”的基因值位点并将此基因突变为“0”,并随机选取此段染色体中其他基因值为“0”、且在其他 $2 * H - 1$ 段基因值也为“0”的位点,将其基因值突变为“1”(即此选址方案中的设施类型不变,仅设施点位置发生变化)。群体突变后中,我们选择适应度最高的 m 个子代来代替种群中适应度最低的 m 个染色体。更新种群,直至满足迭代条件。

从具体算法来看,传统二进制编码方式在每次计算适应值时都需要对编码进行时间复杂度为 O (群体规

模数量 $*R * H * J$) 的解码, 相比改进的分段符号编码方式时间复杂度为 $O(\text{群体规模} * \sum_r \sum_h a_{r,h}^m)$, 相差十分明显. 这种基于传统二进制编码的遗传算法计算复杂度随着层次型网络级别和设施备选数量的增加而增长, 导致计算机运算量急剧增加, 致使算法收敛速度因搜索空间的增大而大幅降低, 增加了遗传算法陷入局部最优的机率.

5 案例仿真分析

在 $600 * 800$ 的平面上随机产生一个案例, 进行一系列计算实验来测试优化模型和改进算法的效率. 详细信息如附件 1 所示, 我们生成多个 HHBCLP 实例, 来验证混合服务可用性设施的备用网络结构; 并通过遗传算法和改进遗传算法进行 100 次算法迭代来观测运行时间与求解效率.

计算过程中设 $|H| = 3$, 造价矩阵 $p = [7\ 7; 15\ 17; 25\ 45]$, 相应的覆盖半径 $R = [108\ 215\ 350]$. 1.6 GHz Inter Core i5 处理器, 4 GB 1600 MHz 内存的 OS X10.10.5 系统下, 我们将考虑设施拥堵的混合层次网络与单类型层次网络获得的最佳解决方案进行比较.

通过实验得到表 3~5 的总结. 我们进行了三种服务可利用性层次型网络 (嵌套型, 非嵌套型, 混合型) 的系统性能及算法效率分析. 固定的设施数量问题忽略了混合层次结构中服务可用性的属性配置, 因此仅对设施数量为变量的情况进行分析.

表 3 呈现了三种层次网络最大覆盖能力随预算约束变化的情况, 以及其备用覆盖能力和实际总建造成本的相对变化情况. 就一次覆盖能力而言, 当进行混合层次结构网络设计时, 需求节点同等级服务需求的来源范围发生变化, 由单类型设施变为多类型设施. 较单类型层次网络相比, 随着来源设施的服务可用性种类增多, 需求节点受整体覆盖的概率增加, 更多种选址方案可以进入网络设计选择.

当考虑设施的超额覆盖时, 一些在嵌套 (非嵌套) 网络中本没有受设施二次覆盖的需求节点可能会受到来自于混合网络中非嵌套 (嵌套) 设施的备用覆盖, 但此时提供服务的设施的级别在不同网络中可能存在不一致的情况. 如表 4 中预算为 50 的情况, 混合型层次网络中需求节点 21 的两次 1 级覆盖来自于一级非嵌套设施点 14 和二级嵌套设施点 6, 而在嵌套和非嵌套层次网络中仅受一次 1 级覆盖, 分别来自三级嵌套设施点 6 与一级非嵌套设施点 6. 此时, 需

要注意不同结构网络的选址方案不同, 会导致各网络中节点受设施覆盖、超额覆盖的情况不同. 如表 4 中 $I = 30, J = 20, B = 90$ 的情况, 嵌套网络中的节点 1 和非嵌套网络中节点 29 都未满足节点的整体覆盖. 而在混合服务型网络中, 由于选址方案的不同使得单类型层次网络中未达到整体覆盖的节点 1 和节点 9 得到满足, 如图 2 至图 4 所示, 得到直观三类服务可用性网络的一次覆盖和超额覆盖情况. 对于满足整体覆盖的节点而言, 其某个层次的超额覆盖概率不会因服务可用性种类的来源增多而增加. 以一级备用服务需求为例, 混合层次备用网络中通过一级非嵌套设施点 13 得到满足的节点 26, 不受一级超额覆; 而在单类型网络中, 其超额覆盖通过一级设施点 3 得到满足. 同理于节点 4、11、14, 其超额覆盖仅在嵌套层次备用网络中通过三级嵌套设施点 11 得以满足. 我们知道, 备用层次网络以需求的整体覆盖最大为第一目标进行设施点的

表 3 三类服务可用性设施网络的综合能力

<i>I</i>	<i>J</i>	<i>P</i>	能力	非嵌套	嵌套	混合
30	10	50	最大覆盖	172	172	258.8
			最大备用覆盖	0	0	22
			系统造价	47	45	49
	70		最大覆盖	340	426.8	426.8
			最大备用覆盖	20	22	22
			系统造价	69	69	66
	90		最大覆盖	458	565.9	632.9
			最大备用覆盖	0	192.4	22
			系统造价	90	86	90
20	50		最大覆盖	172	172	291.8
			最大备用覆盖	0	0	22
			系统造价	47	45	49
	70		最大覆盖	439.9	459.8	459.8
			最大备用覆盖	22	22	22
			系统造价	68	69	66
	90		最大覆盖	645.9	628.9	679.9
			最大备用覆盖	87	218.1	281.4
			系统造价	90	90	90
50	10	50	最大覆盖	301	301	437.8
			最大备用覆盖	0	0	80
			系统造价	47	45	49
	70		最大覆盖	527.2	635.8	649.8
			最大备用覆盖	34	232	80
			系统造价	68	69	66
	90		最大覆盖	681	804.3	891.9
			最大备用覆盖	0	467.4	166
			系统造价	90	86	90
	20	50	最大覆盖	301	301	455.8
			最大备用覆盖	0	0	34
			系统造价	47	45	49
	70		最大覆盖	743.3	674.5	766.3
			最大备用覆盖	34	60	223
			系统造价	68	66	70
	90		最大覆盖	962.3	968.3	1001.2
			最大备用覆盖	303	557.5	55
			系统造价	90	90	87

选址定位, 决策者为了促成权重较高节点的整体覆盖而放弃次优目标中节点部分层次的超额覆盖, 由此产生层次网络备用覆盖能力的差异. 混合层次型系统的备用覆盖能力并非始终大于单类型层次网络, 同时从表 3 可以得到, 同一预算约束条件下的系统造价也未必低于单类型层次网络. 面对这种情况, 需要决策者在层次网络设计中权衡系统最优的覆盖能力与造价. 试想, 若预算约束足够大, 变量的设施数量组合则会存在不计其数的情况, 不同类型网络的各类型设施数量将不尽相同. 这种情况在问题求解的过程中需要倍加注意.

表 4 三类服务可用性网络的选址方案及覆盖与超额覆盖情况 ($I = 30, J = 20$)

预算		一级	二级	三级
混合	50	设施 14 4, 6, 8, 11, 12, 14, 16, 18, 21(2), 22, 23, 24 4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 21, 22, 23, 24, 30	嵌套设施 6 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30	非嵌套设施 4
	70	设施 14 1, 3, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 14, 16, 18, 19, 21(2), 22, 23, 24, 26	嵌套设施 3, 6 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 30	非嵌套设施 4 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30
	90	设施 6, 13 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 21(2), 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30	嵌套设施 14, 19, 20 1, 2(2), 3, 4(2), 5, 6, 8, 10, 11(2), 12, 13(2), 14(2), 15, 16, 17, 18, 19, 20(2), 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27(2), 28, 29, 30(2)	非嵌套设施 4 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30
嵌套	50	4, 6, 18, 21, 22, 23, 24	4, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 21, 22, 23, 24, 30	设施 6 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30
	70	设施 14 1, 3, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 14, 16, 18, 19, 21(2), 22, 23, 24, 26	设施 3 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 30	设施 6 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30
	90	设施 3, 6, 10, 14 1, 2, 3, 4(2), 5, 6, 8, 10, 11(2), 12, 13, 14(2), 16, 18, 19, 20, 21(2), 22, 23, 24, 26(2), 27, 28, 29, 30	设施 13 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10(2), 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19, 20(2), 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28(2), 29, 30(2)	设施 11 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30
非嵌套	50	设施 6 4, 6, 18, 21, 22, 23, 24	设施 11 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 30	设施 4 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30
	70	设施 6, 10, 13, 14 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 21(2), 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30	设施 11 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 30	设施 4 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30
	90	设施 3, 6, 10, 13, 14 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 21(2), 22, 23, 24, 26(2), 27, 28, 29, 30	设施 11, 19 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23(2), 24(2), 26, 27, 28, 30	设施 4 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

表 5 算法运行结果

<i>I</i>	<i>J</i>	<i>P</i>	分支定界法		遗传算法		改进遗传算法		误差	
			最大覆盖	时间 (s)	最大覆盖	时间 (s)	最大覆盖	时间 (s)	遗传算法	改进遗传算法 (%)
50	10	50	437.8	15.27	423.88	8.61	437.8	9.13	3.18	0.00
		70	649.8	29.54	635.8	66.55	635.8	63.23	2.15	2.15
		90	891.9	3.69	886.3	299.17	891.9	313.36	0.63	0.00
	30	50	466.4	8.02	415.8	10.85	454.8	9.28	10.85	2.49
		70	788.3	9.43	745.5	93.5	784.3	78.25	5.43	0.51
		90	1068.3	7.33	1068.3	450.53	1068.3	387.94	0.00	0.00
	50	50	509.8	10.45	474	13.17	509.8	11.82	7.02	0.00
		70	869.3	15.87	869.3	117.32	869.3	100.26	0.00	0.00
		90	1106.3	7.44	1037.3	623.91	1068.3	528.1	6.24	3.43
100	10	50	1093.6	4.95	1093.6	8.64	1093.6	8.22	0.00	0.00
		70	1432	5.31	1432	73.26	1432	64.51	0.00	0.00
		90	1781.7	3.89	1773.3	321.28	1773.3	318.88	0.47	0.47
	30	50	1147.6	12.86	1025.7	12.01	1147.6	11.19	10.62	0.00
		70	1821.3	8.17	1821.3	106.18	1821.3	97.32	0.00	0.00
		90	2119.9	8.59	2049.3	508.34	2082.9	461.54	3.33	1.75
	50	50	1209.8	297.9	1091.3	15.14	1157.1	13.87	9.80	4.36
		70	1922.1	8.42	1852.3	136.42	1922.1	122.33	3.63	0.00
		90	2146.3	34.91	2131.9	744.57	2146.3	433.71	0.67	0.00
200	10	50	1281.7	5.05	1281.7	9.85	1281.7	9.12	0.00	0.00
		70	1779.3	22.13	1779.3	79.06	1761.4	73.9	0.00	1.01
		90	2405.4	3.2	2405.4	372.73	2405.4	320.8	0.00	0.00
	30	50	1430.1	638.19	1412.1	14.92	1430.1	14.5	1.26	0.00
		70	2428.5	202.81	2428.5	128.41	2419.9	123.01	0.00	0.35
		90	2930.9	24.82	2825.7	615.32	2729.1	545.44	3.59	6.89
	50	50	1464.3	163.36	1452.6	18.69	1438.1	17.26	0.80	1.79
		70	2520.4	32.86	2352.7	179.44	2486.7	153.09	6.65	1.34
		90	3058.2	154.9	2894.9	871.93	2941.2	635.06	5.34	3.83

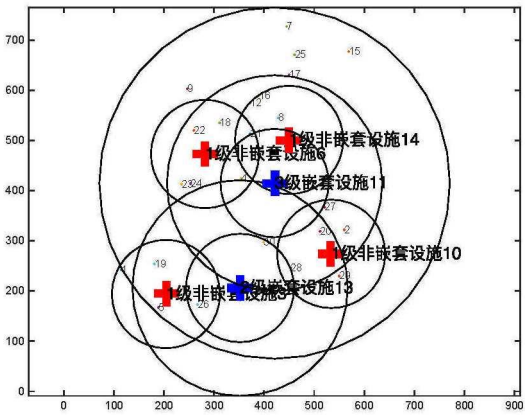


图 2 嵌套网络覆盖情况

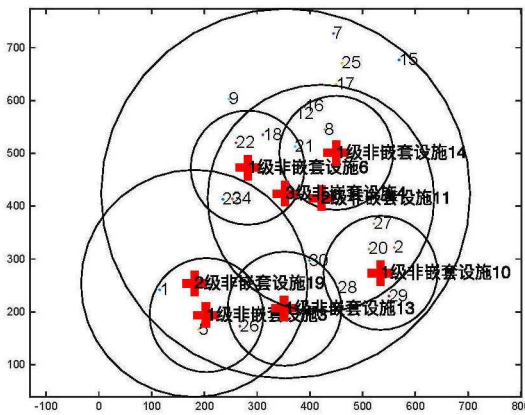


图 3 非嵌套网络覆盖情况

分支定界法是一个已经证明了的能够解决小到中等规模问题的经典精确求解方法, 虽然这样的精确求解方法无法解决大规模现实的层次型问题, 但它们仍可用于评估先进启发式方法的有效性. 表 5 显示的数据为分支定界法和遗传算法与改进遗传算法对层次性设施选址问题在处理时间与求解效率上的结果, 旨在证明改进算法的求解精度与处理效率. 在对这 27 个案例的求解中, 改进遗传算法所有运行的最大百分比误差为 6.89%, 平均求解误差 1.25%, 大多数情况下, 在解决方案中的误差都在 5% 以内; 而传统遗传算法的运行最大百分比误差为 10.62%, 平均求解误差 3.44%, 求解误差波动程度大, 且处理同一问题的时间始终低于传统

遗传算法. 我们发现当备选设施数量达到 100 时, 分支定界法求解时间增至 50 小时以上, 遗传算法经过 1782.48 秒得到结果, 改进算法则可以在 943.07 秒求得结果 (没有在表格中列出). 通过对比得到, 随着问题规模的增加分支定界法难以在多项式时间内有效解决问题, 改进遗传算法则随着问题规模的增加在问题处理时间上体现出的优势愈加明显, 相较于传统遗传算法表现出较高的鲁棒性, 在处理速度和运算精度方面得到提升.

6 总结与讨论

本文基于服务可用性的类型分析了层次型设施的选址问题. 我们通过构建混合服务水平层级关系的层次性设施选址优化模型, 讨论了层次型设施数量为定量和变量的情况. 由于固定数量的设施选址问题忽略了层次结构中设施的混合服务可用性的属性配置, 我们提出了变量数量的混合层次网络的备用覆盖问题; 并设计解决层次性问题的改进遗传算法. 结果表明混合服务可用性的优化模型较单类型服务可用性模型能更好的满足客户的需求; 面对同一预算约束, 混合层次网络的覆盖能力优于单类型服务可用性系统, 其备用覆盖能力和系统造价并非始终优于单类型层次网络. 此外, 改进的遗传算法可以在合理的计算机时间内求解问题, 尤其是预算和设施备选范围增加时, 具有可观的效率.

考虑到个体特征, 混合层次型备用网络对医院、学校和配送中心的选址分配可能为决策者提供资源调配战略. 未来的改善研究可以通过考虑各类别设施容量能力以及各层级设施主体间的协作关系对设施进行设施资源的分配.

参考文献

- [1] Hogan K, Reville C. Concepts and applications of backup coverage[J]. Management Science, 1986, 32(11): 1434–1444.
- [2] Toregas C, Swain R, Reville C, et al. The location of emergency service facilities[J]. Operations Research, 1971, 19(6): 1363–1373.
- [3] Church R, Velle C R. The maximal covering location problem[J]. Papers in Regional Science, 1974, 32(1): 101–118.
- [4] Torkestani S S, Seyedhosseini S M, Makui A, et al. The reliable design of a hierarchical multi-modes transportation hub location problems (HMMTHLP) under dynamic network disruption (DND)[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 122: 39–86.
- [5] Farahani R Z, Asgari N, Heidari N, et al. Covering problems in facility location: A review[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(1): 368–407.
- [6] Benabdouallah M, Bojji C. A review on coverage models applied to emergency location[J]. International Journal of Emergency Management, 2018, 14(2): 180–199.
- [7] An Y, Zeng B, Zhang Y, et al. Reliable p -median facility location problem: Two-stage robust models and algorithms[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 64(1): 54–72.
- [8] Ergun O, Karakus G, Keskinocak P, et al. Operations research to improve disaster supply chain management[M]// Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science. John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [9] Daskin M S. Network and discrete location: Models, algorithms, and applications[M]. Wiley, 1997.
- [10] Moore G C, Reville C. The hierarchical service location problem[J]. Management Science, 1982, 28(7): 775–780.
- [11] Narula S C. Hierarchical location-allocation problems: A classification scheme[J]. European Journal of Operational Research, 1984, 15(1): 93–99.
- [12] Daskin M S, Network and discrete location: Models, algorithms, and applications[M]. New York: Wiley Interscience, 1995.
- [13] Mestre A M, Oliveira M D, Barbosa-Póvoa A. Organizing hospitals into networks: A hierarchical and multiservice model to define location, supply and referrals in planned hospital systems[J]. OR Spectrum, 2012, 34(2): 319–348.

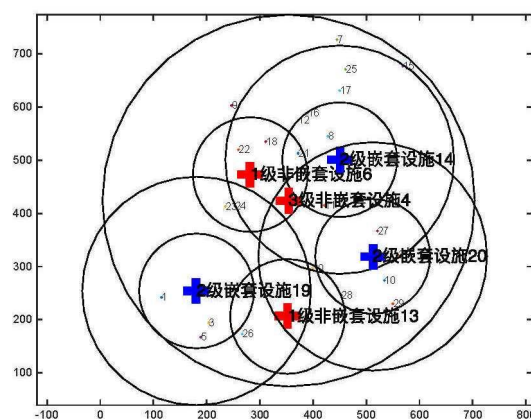


图 4 混合网络覆盖情况

- [14] Baray J, Cliquet G. Optimizing locations through a maximum covering/ p -median hierarchical model: Maternity hospitals in France[J]. *Journal of Business Research*, 2013, 66(1): 127–132.
- [15] Mestre A M, Oliveira M D, Barbosa-Póvoa A P. Location-allocation approaches for hospital network planning under uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 240(3): 791–806.
- [16] Rahman S U, Smith D K. Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 123(3): 437–452.
- [17] Şahin G, Süral H, Meral S. Locational analysis for regionalization of Turkish Red Crescent blood services[J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(3): 692–704.
- [18] Farahani R Z, Hekmatfar M, Fahimnia B, et al. Survey: Hierarchical facility location problem: Models, classifications, techniques, and applications[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 68(1): 104–117.
- [19] Aliakbarian N, Dehghanian F, Salari M. A bi-level programming model for protection of hierarchical facilities under imminent attacks[M]. Elsevier Science Ltd, 2015.
- [20] Zarrinpoor N, Fallahnezhad M S, Pishvaei M S. Design of a reliable hierarchical location-allocation model under disruptions for health service networks: A two-stage robust approach[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 109.
- [21] Smith H K, Potts C N. Bicriteria efficiency/equity hierarchical location models for public service application[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2013, 64(4): 500–512.
- [22] Teixeira J C. A hierarchical location model for public facility planning[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(1): 92–104.
- [23] Dukkanci O, Kara B Y. Routing and scheduling decisions in the hierarchical hub location problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 85: 45–57.
- [24] Marianov V, Serra D. Hierarchical location-allocation models for congested systems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 135(1): 195–208.
- [25] Lee J M, Lee Y H. Tabu based heuristics for the generalized hierarchical covering location problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 58(4): 638–645.
- [26] 李春阳, 赵林度. 考虑择医行为的医疗设施层次选址问题研究 [J]. *物流技术*, 2015, 34(11): 106–111.
Li C Y, Zhao L D. Study on hierarchical location problem of medical facilities with patient discretion consideration[J]. *Logistics Technology*, 2015, 34(11): 106–111.
- [27] 袁文燕, 彭云, 杨丰梅. 基于危险化学品事故的双层次应急中心选址模型 [J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(3): 728–735.
Yuan W Y, Peng Y, Yang F M. Study on hierarchical location problem of medical facilities with patient discretion consideration[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(3): 728–735.
- [28] 陈志芬, 李强, 陈晋. 城市应急避难场所层次布局研究 —— 三级层次选址模型 [J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(5): 13–19.
Chen Z F, Li Q, Chen J. Study on hierarchical location of urban emergency shelters (II): Three-hierarchical location models[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(5): 13–19.
- [29] Erdemir E T, Batta R, Rogerson P A, et al. Joint ground and air emergency medical services coverage models: A greedy heuristic solution approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(2): 736–749.
- [30] Paul N R, Lunday B J, Nurre S G. A multiobjective, maximal conditional covering location problem applied to the relocation of hierarchical emergency response facilities[J]. *Omega*, 2017, 66: 147–158.
- [31] Megiddo N. The maximum coverage location problem[J]. *Discussion Papers*, 1981, 4(2): 253–261.
- [32] Narula S C, Ogbu U I. An hierarchal location-allocation problem[J]. *Omega*, 1979, 7(2): 137–143.
- [33] Hillier F S. Introduction to operations research[M]. 10 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [34] 陆雄文. 管理学大辞典 [M]. 上海: 上海辞书出版社, 2013.
- [35] Holland J. Adaptation in nature and artificial system[M]. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [36] Syarif A, Yun Y, Gen M. Study on multi-stage logistic chain network: A spanning tree-based genetic algorithm approach[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2002, 43(1–2): 299–315.
- [37] Zhou C, Andrew D, Yang J Y. Locational determinants of Japanese foreign direct investment in China[J]. *Asia Pacific Journal of Management*, 2002, 19(1): 63–87.
- [38] Chaudry S S, He S, Chaudry P E. Solving a class of facility location problems using genetic algorithms[J]. *Expert Systems*, 2003, 20(2): 86–91.
- [39] Kung L C, Liao W H. An approximation algorithm for a competitive facility location problem with network effects[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 267(1): 176–186.