

# Research on Maintenance Site Location Algorithm Based on Voronoi Theory

Jing Zhao<sup>1,2\*</sup>, Yu Chen<sup>3</sup>, Jianqi Liu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Electronics and Communications, Guangdong Mechanical & Electrical College, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Division of Industrial and System Engineering, Taiyuan University of Science of Technology, Taiyuan Shanxi

<sup>3</sup>Guangdong Branch, China Eastern Airlines, Guangzhou Guangdong

<sup>4</sup>School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

Email: [zhaojing740609@163.com](mailto:zhaojing740609@163.com)

Received: Jun. 20<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jul. 5<sup>th</sup>, 2018; published: Jul. 13<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The site selection problem is important in many areas. In intelligent maintenance management, the cost for after-sales maintenance increases gradually. For large enterprises, it is necessary to establish some maintenance stations in a city to carry out after-sale maintenance more effectively. Scientifically choosing the address of a maintenance site helps businesses reduce maintenance costs. Voronoi theory is often applied to the study of covering problems. In order to solve the selection problem for the maintenance site, this paper presents a site selection algorithm based on Voronoi diagram. The algorithm can obtain the predetermined service quality with minimum maintenance stations. It minimizes the number of maintenance sites under the constraint of service quality and it reduces the maintenance cost. Simulation results show that the algorithm is effective.

## Keywords

Site Selection Problem, Maintenance Stations, Voronoi Diagram, Maintenance, Intelligent Maintenance Management

---

# 基于Voronoi理论的维修站点选址算法研究

赵 静<sup>1,2\*</sup>, 陈 昱<sup>3</sup>, 刘建圻<sup>4</sup>

<sup>1</sup>广东机电职业技术学院 电子与通信学院, 广东 广州

<sup>2</sup>太原科技大学 工业与系统工程研究所, 山西 太原

<sup>3</sup>东方航空公司广东分公司, 广东 广州

<sup>4</sup>广东工业大学自动化学院, 广东 广州

\*通讯作者。

Email: zhaojing740609@163.com

收稿日期: 2018年6月20日; 录用日期: 2018年7月5日; 发布日期: 2018年7月13日

## 摘要

选址问题涉及各行各业, 在智能维修管理过程中, 企业花费在产品售后维修的成本比例越来越高。对于大型的企业, 需要在某城市建立维修站来更有效地进行售后维修。维修站点的科学选址有助于企业减少维修成本。Voronoi理论经常被应用于覆盖问题的研究。本文针对维修站点的地址选择问题, 将Voronoi理论引入到站点选址问题研究中, 提出一种基于Voronoi图的维修站点选址算法, 以建立最少的维修站来获得预定的服务质量, 从而在服务质量的约束下最小化维修站点个数, 减少了维修成本。仿真证明了算法的有效性。

## 关键词

选址问题, 维修站点, Voronoi图, 维修, 智能维修管理

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着设备复杂程度的增加, 现代化企业越来越重视智能维修管理在企业运营中的作用[1]。智能维修管理包含: 维修成本模型定义与管理、维修任务的确定、维修策略评估、备件库存管理、售后服务模型建立与管理等[1]。现代化企业也越来越认识到高额的维修费用是影响企业效益增长的主要问题之一[2], 从而需要智能化的维修管理策略来最小化维修消耗。智能维修策略已经在许多领域中得到深远地发展, 如医疗[3][4][5]、工业[6][7][8]、民航[9]、农业、交通等等。

选址问题研究涉及各行各业, 为了最小化成本, 取得最大的效益, 科学的选址策略是必不可少的。设施选址问题, 即合理地布置设施, 一方面建立尽可能少的设施以节约成本, 另一方面充分利用设施实现期望的目标, 提高任务完成效率。选址问题的研究涉及各个行业, 如针对设施选址问题的研究: 钟慧玲等[10]对危险品道路运输过程中, 应急设施选址问题进行了研究。利用场景方法, 提出一个目标分层的 $\sigma$ ——鲁棒的弧段覆盖模型, 该算法需进行场景假设, 具有不确定性。李彤等[11]以模拟植物生长算法为工具, 提出了一种解决设施选址问题的智能优化算法。针对不确定环境下的城市配送中心选址问题的研究: 赵娜等[12]采用 AHP 法和模糊算法相结合提出了一种配送中心选址算法, 文中将层次分析法的定量性和客观性的优点与模糊综合评价法的包容性有机融合。郭文昌等在文中[13]提出了一种改进的蚁群算法, 首先通过遗传算法求得问题的较优解, 然后再将此较优解转换为改进蚁群算法的初始信息进行优化求值而得到最优解。网络基站选址优化问题研究中, 马宝罗等[14]和李道国等[15]提出了基于免疫算法的基站选址算法研究; 韩江洪等[16]则提出一种动态规划方法进行基站选址问题的研究。针对风电场选址问题研究中: 仲炜等[17]针对由于地形对风速影响而造成的常用风电场选址设计软件评估结果的不准确性, 提出一种基于 GIS 空间分析的风电场选址算法。许昌等在专利[18]公开了一种基于 CFD 和改进 PSO 的复

杂地形风电场微观选址方法。

以上各种选址问题的研究,多使用遗传算法、蚁群算法和模拟退火算法等智能优化算法,将 Voronoi 算法用于维修站点选址问题的研究,是售后智能管理的一次探索和尝试。

Voronoi 图是计算几何的重要研究对象之一[19]。它按照对象集合中元素的邻近属性将空间划分成许多互不重叠单元区域,即 Voronoi 区域[20],根据对象的 Voronoi 区域是否邻接,可以清晰地识别对象间的邻接关系。Voronoi 图包含全部的空间邻近信息。广泛被应用在定性空间推理研究[21]、机械工程、虚拟现实、机器人、图形图像处理[22] [23]、CAD 等领域,也是解决距离计算、碰撞检测、路径规划、无线传感器网络覆盖与定位研究[24]、产品供应链、配电网供电分析[25]等的重要方法之一。

在产品售后服务管理中,维修站点的选址会直接影响到维修人员的服务效率和维修费用。产品售出后,企业需负责产品的售后维修,当售出产品数量较多时,需要选择合适的位置来建立维修站,多年来,维修站点的选址是人工进行,站点选址不科学,从而造成成本的浪费。针对这种问题,本文提出一种基于 Voronoi 图的维修站点选址算法,在算法中,根据售出产品的密集程度,采用 Voronoi 图方法,选择最优的位置建立维修站点,使得建立最少的站点获取最大的产品覆盖率。

## 2. 定义与定理证明

### 2.1. 定义

在  $500 \times 500$  的正方形区域中部署了边界点和初始点,其相应的 Voronoi 图如图 1,图中各元素的定义[26]如下:

- 维修人员服务区域

假设维修人员需要上门维修,但是由于时间和交通的限制,维修人员的服务范围限制在某个圆形区域内。

- 点的 Voronoi 区域

图 1 中 A、B、C、D、E、F、G 是已有的维修站点,深色区域中的任意点到节点 A 的距离小于到邻近节点的距离,深色区域称作 A 节点的 Voronoi 区域。

- Voronoi 边

两个相邻节点的 Voronoi 区域相交于一个线段,该线段称之为 Voronoi 边。节点 A 和 F 之间的 Voronoi 边被称作 AF 的 Voronoi 边。

- 邻近节点

两个节点的 Voronoi 区域相邻,且区域之间存在一条公共 voronoi 边,这两个点称为邻近节点,如图 1 中节点 B、C、D、E、F 是节点 A 的邻近节点,从而 A 节点的 Voronoi 区域有 5 个边。

- Voronoi 图交点

Voronoi 图中邻近节点的 voronoi 边相交的点称为 Voronoi 交点,一个 Voronoi 交点连接至少两个 Voronoi 边。

### 2.2. 定理与证明

图 2 中, A 和 F 是两个邻近节点,线段 MN 是 AF 的 Voronoi 边,节点 M 和 N 是线段 MN 的两个端点,被标记为菱形的 X 点是线段 MN 上的任意一点。

- 定理 1:

Voronoi 边上的任意一点 X 到相邻两个节 A 和 F 的距离相等[27]。

- 定理 2:

线段 MN 与节点 A 和 F 的连线 AF 相垂直,且垂直平分线段 AF。

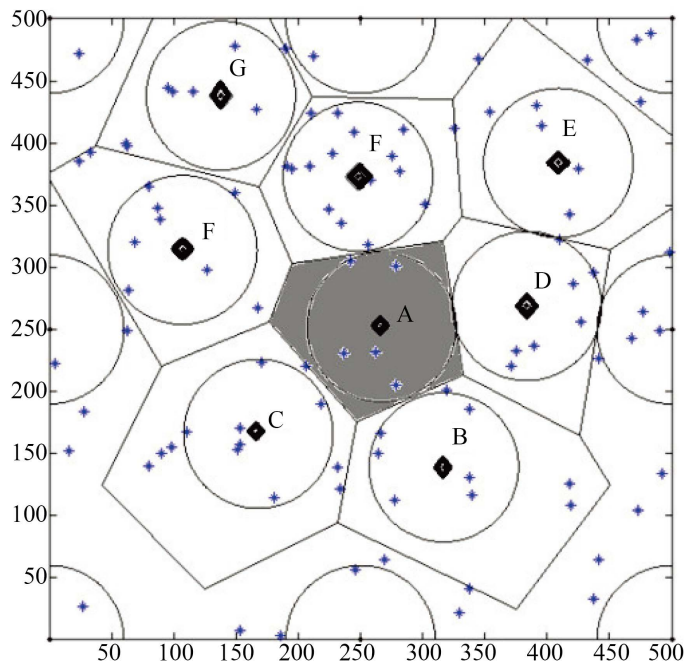


Figure 1. Voronoi map

图 1. Voronoi 图

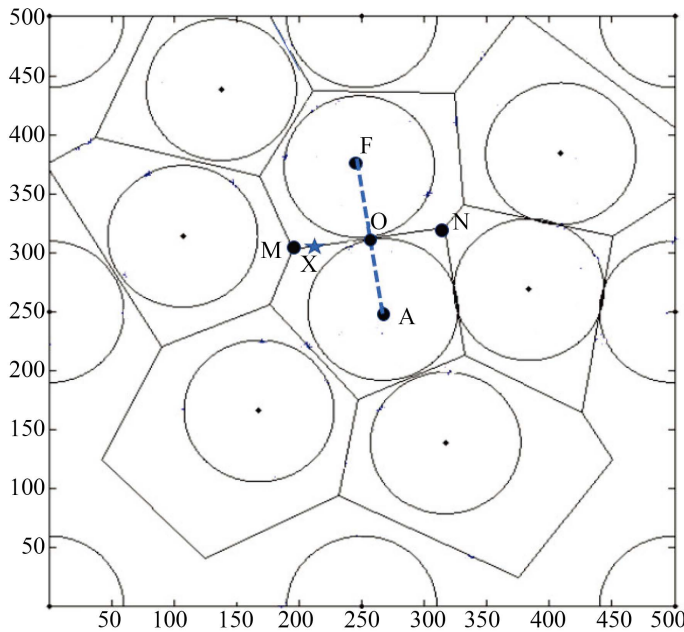


Figure 2. Theorem proof

图 2. 定理证明

由定理 1, 可知:

$$MA = MF \tag{1}$$

$$OA = OF \tag{2}$$

所以可推出:

$$\triangle MAO \cong \triangle MFO \quad (3)$$

从而得到

$$\angle MOA = \angle MOF = 90^\circ \quad (4)$$

- 定理 3:

在线段  $MN$  上, 到节点  $A$  或  $F$  的距离最近的点是  $O$  点; 最远的点是线段  $MN$  的两个端点, 即  $M$  点或  $N$  点。

已知相同的两个圆的中心点越远, 两个圆重叠的面积越小。又知图 2 中  $M$  点分别是线段  $MN$ 、 $MC$ 、 $MD$  的端点。从而由定理 3 可推出: 在  $M$  点建立新的圆(即维修站点), 与邻近的圆(站点)的覆盖重叠面积最小, 也就是增加的覆盖面积最大。

### 3. 选址算法

假设  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  区域为目标区域。某产品在该区域进行销售, 由于销售产品数量的增加, 需要建立维修站点来对用户所买产品进行上门维修。

- 初始点的确定

首先为了避免 voronoi 图的发散, 给出一些边界点进行预先部署。接下来在目标区域中进行随机地循环搜索, 选出与已有节点没有覆盖重叠的位置, 分别计算这些位置对已售出的产品增加的覆盖率, 选择出增加覆盖率最大的位置作为新的维修站点。循环  $n$  次, 完成初始点的部署。

- 初始点 voronoi 图的构造

初始点被确定后, 构造基于初始点和边界点的 voronoi 图。记录 voronoi 图各种信息。

- 新站点的确定

将图中的各 voronoi 边的端点提取出来存放至待选集合中, 分别计算包含销售产品的个数(产品地址到该节点的距离), 计算该节点增加产品覆盖个数, 选择增加个数最多的点作为新的站点地址。

- 重复增加节点

重复上一个步骤, 直到产品覆盖率达到预定目标。从而达到了建立最少的维修站点获取了预定覆盖率目标。

### 4. 仿真

假设产品数量为 100, 产品用户覆盖率目标为 85%, 维修人员服务区域半径为 60 m, 进行算法的仿真, 仿真结果如图 3~图 13。

图 3 显示了售出产品的地址, 算法目标则是建立最少的维修站点达到对产品的覆盖率目标为 85%。

由于初始选址中, 只要依次选则最大覆盖率、且没有覆盖重叠的节点就能获得以最少的节点达到最大的产品覆盖率的目标, 如图 4 显示。图 4 中是最初的完全没有覆盖重叠的初始点的选址情况, 并建立了相应的 Voronoi 图。

如图 4 显示, 由定理 2、3 证明可知, 在图中某个 Voronoi 交点处部署新站点和其他邻近站点的覆盖重叠最小, 依照算法, 从所有 Voronoi 交点中选择能最大增加覆盖率的 Voronoi 交点最为新的站点, 也就是所有 Voronoi 交点中能覆盖新的产品节点个数最多的交点作为新站点。如图 5。

依次重复上述选址方法, 图 6~图 13 依次显示了算法执行步骤 2 至步骤 9 地址选择情况:

经过 9 步, 产品覆盖率就达到了产品用户覆盖率目标 85%。算法执行简单, 效率高, 达到了建立最少站点获得要求覆盖率的目标。

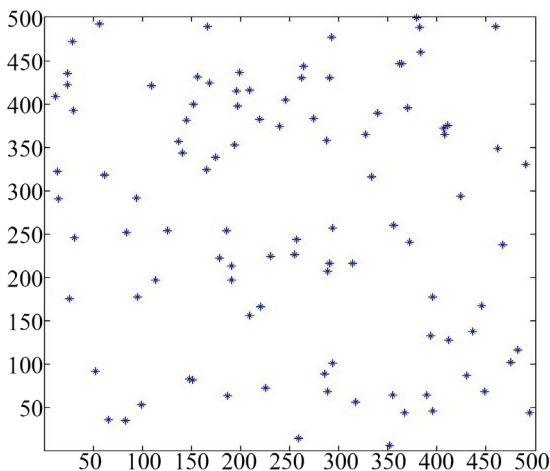


Figure 3. User random distribution

图 3. 产品用户随机分布

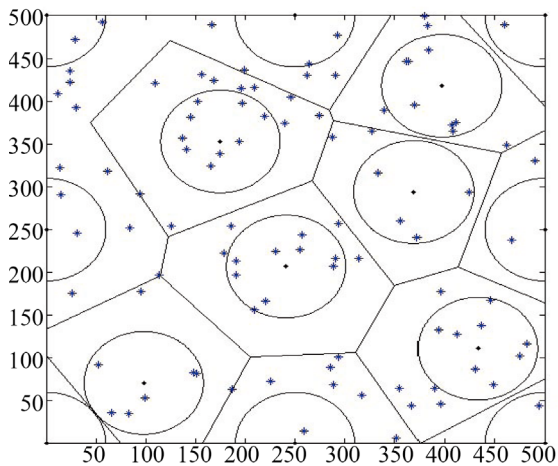


Figure 4. Initial deployment, coverage is 52%

图 4. 初始点部署, 产品覆盖率为 52%

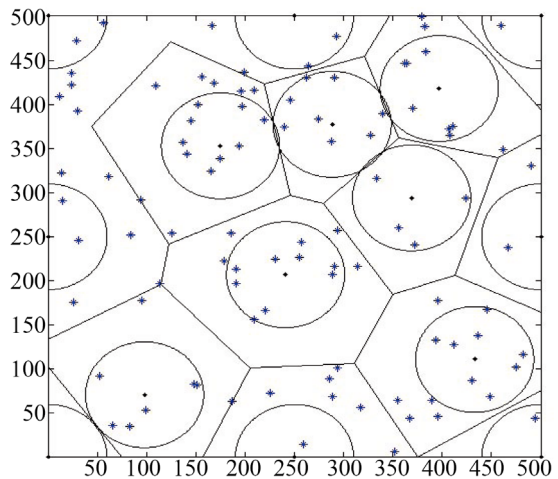


Figure 5. The 1th step, the coverage is 60%

图 5. 第 1 步, 产品覆盖率为 60%

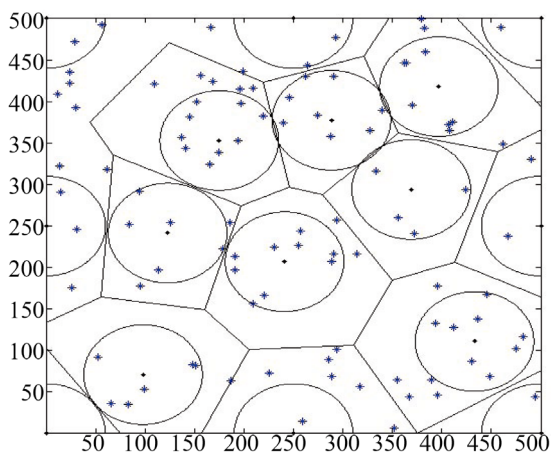


Figure 6. The 2th step, the coverage is 65%

图 6. 第 2 步, 产品覆盖率为 65%

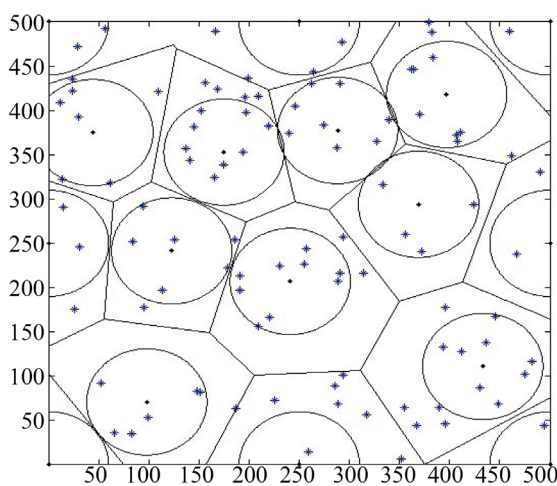


Figure 7. The 3th step, the coverage is 69%

图 7. 第 3 步, 产品覆盖率为 69%

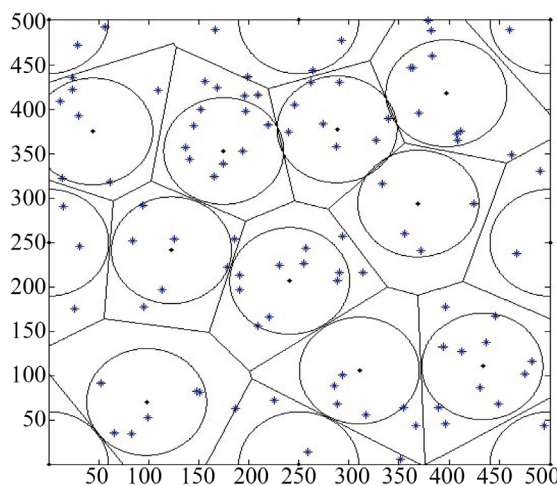
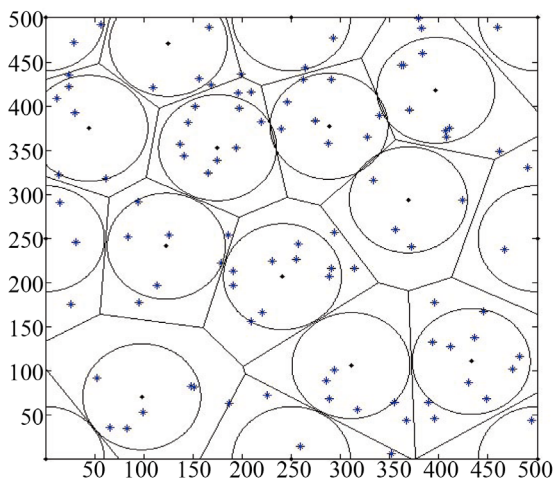
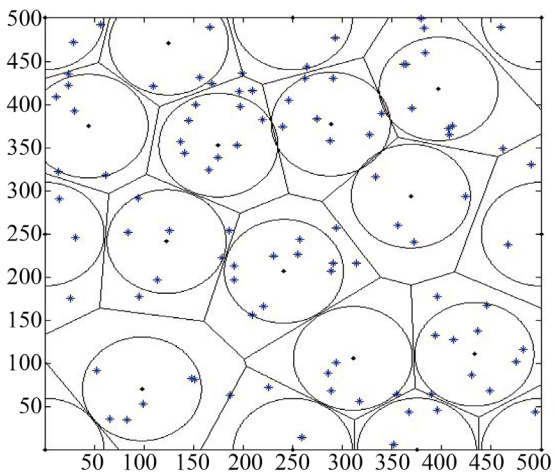


Figure 8. The 4th step, the coverage is 73%

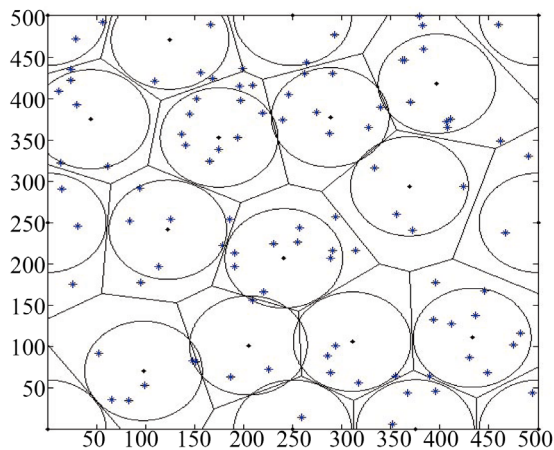
图 8. 第 4 步, 产品覆盖率为 73%



**Figure 9.** The 5th step, the coverage is 76%  
**图 9.** 第 5 步, 产品覆盖率为 76%

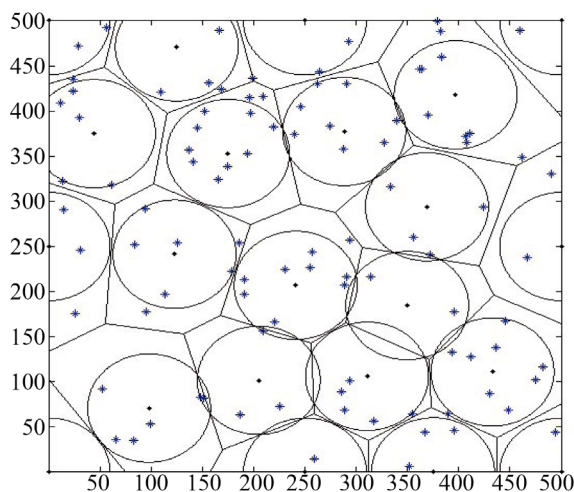


**Figure 10.** The 6th step, the coverage is 79%  
**图 10.** 第 6 步, 产品覆盖率为 79%



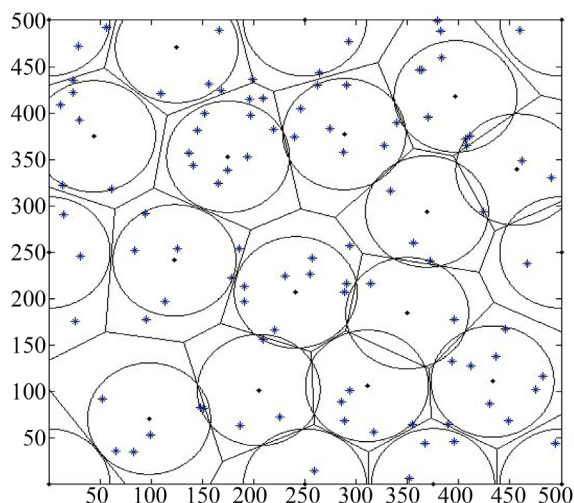
**Figure 11.** The 7th step, the coverage is 82%  
**图 11.** 第 7 步, 产品覆盖率为 82%





**Figure 12.** The 8th step, the coverage is 84%

**图 12.** 第 8 步, 产品覆盖率为 84%



**Figure 13.** The 9th step, the coverage is 86%

**图 13.** 第 9 步, 产品覆盖率为 86%

## 5. 结束语

在文中, 作者提出一种基于 Voronoi 图的维修站点选址算法, 算法中循环找出最大覆盖率增长点来确定新维修站点, 以达到建立最少的维修点获得最大的产品覆盖率的目的。

## 基金项目

校博士后启动基金(20142023); 国家自然科学基金(61701122); 中国广东自然科学基金(2016A030313734); 广州市科技项目(201804010238); 广东省应用重点工程(201604020016)。

## 参考文献

- [1] 涂忆柳, 李晓东. 维修工程管理研究与发展综述[J]. 工业工程与管理, 2004, 9(4): 7-12.
- [2] Tu, P.Y.L., Yam, R., Tse, P., *et al.* (2001) An Integrated Maintenance Management System for an Advanced Manufacturing Company. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, 692-703.

<https://doi.org/10.1007/s001700170135>

- [3] 徐峰. 浅析医院医疗器械维修中存在的问题及维修管理对策[J]. 科学技术创新, 2014(21): 56-56.
- [4] 童斌. 医疗设备维修管理的几点问题与对策[J]. 医疗卫生装备, 2010, 31(1): 91-92.
- [5] 李巍, 徐雷. 精细化医疗设备维修管理系统的设计[J]. 中国医学装备, 2016, 13(6): 37-40.
- [6] Hoeijmakers, J.H. (2001) Genome Maintenance Mechanisms for Preventing Cancer. *Nature*, **411**, 366-374. <https://doi.org/10.1038/35077232>
- [7] Cassady, C.R., Pohl, E.A. and Murdock, W.P. (2001) Selective Maintenance Modeling for Industrial Systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **7**, 104-117. <https://doi.org/10.1108/13552510110397412>
- [8] 邓超, 段超群, 吴军, 等. 基于设备可靠度的分阶段顺序维修经济优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(2): 568-575.
- [9] 蔡景, 李鑫, 肖罗椿. 民用飞机成组维修方案优化模型研究[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(3): 306-311.
- [10] 钟慧玲, 庄楠, 张冠湘, 等.  $\alpha$ -鲁棒的危险品道路运输应急设施选址问题[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(5): 1262-1268.
- [11] 李彤, 王众托. 模拟植物生长算法在设施选址问题中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(12): 107-115.
- [12] 赵娜, 李晓丹. 基于 AHP 模糊综合评价法的宁波城市共同配送中心选址研究[J]. 物流工程与管理, 2015(5): 89-92.
- [13] 郭文昌, 张惠珍. 应用混合算法求解冷链配送中心选址问题[J]. 改革与开放, 2017(8): 82-84.
- [14] 马宝罗, 贾振红, 覃锡忠, 等. 改进免疫算法在无线网络基站选址优化中的应用[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(5): 154-157.
- [15] 李道国, 李连杰. 基于混合免疫算法的 TD-LTE 网络基站选址研究[J]. 杭州电子科技大学学报: 自然科学版, 2016, 36(5): 57-61.
- [16] 韩江洪, 段章领, 卫星, 等. 基于动态规划的矿井无线再编程最优基站选址算法[J]. 通信学报, 2017, 38(3): 7-15.
- [17] 仲炜, 葛莹, 张杰, 等. 基于 GIS 的高海拔山区风电场智能微观选址研究[J]. 地理信息世界, 2018(1).
- [18] 许昌, 杨建川, 李辰奇, 等. 基于 CFD 和改进 PSO 的复杂地形风电场微观选址方法, CN 103996074 B[P]. 2017.
- [19] 王晓东, 廖士中. 基于 Voronoi 图的定性路径推理[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 25(5): 417-424.
- [20] Yang, C., Qi, M., Wang, J., et al. (2007) Shortest Path Queries in a Simple Polygon for 3D Virtual Museum. *Lecture Notes in Computer Science*, **4705**, 110-121. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74472-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74472-6_9)
- [21] 龚咏喜, 刘瑜, 邬伦, 等. 基于带权 Voronoi 图与地标的空间位置描述[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(4): 21-26.
- [22] 方杰, 刘仁金. 衍射层析成像的 Voronoi 图密度补偿算法的研究[J]. 电子学报, 2014, 42(7): 1268-1272.
- [23] 赵泉华, 李玉, 何晓军, 等. 基于 Voronoi 几何划分和层次化建模的纹理影像分割[J]. 通信学报, 2014, 35(6): 82-91.
- [24] 夏娜, 倪成春, 徐朝农, 等. 逆向捕获时间差的 Voronoi 声源定位机制[J]. 通信学报, 2013(11): 140-152.
- [25] 唐小波, 刘笠, 张娟. 基于自适应权重 Voronoi 图的配电网供电分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 83-88.
- [26] Fortune, S. (1992) Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations. In: Du, D.-Z. and Hwang, F., Eds., *Computing in Euclidean Geometry*, World Scientific, Singapore, 193-234.
- [27] Okabe, A., Boots, B. and Sugihara, K. (1992) Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-6753，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[jisp@hanspub.org](mailto:jisp@hanspub.org)