

# Optimal Allocation of Carbon Nanotube Sensor Networks Based on Immune Algorithm

Xin Ma<sup>1</sup>, Yulin Wang<sup>1</sup>, Hongwei Liu<sup>1</sup>, Xin Dang<sup>1</sup>, Jianling Niu<sup>2</sup>, Zuoyi Liu<sup>3</sup>, Xiaona Cao<sup>4</sup>, Tianyou Liu<sup>5</sup>

<sup>1</sup>School of Computer Science and Software Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin

<sup>2</sup>Tianjin Jitafangzhou Information Technology Engineering Co. Ltd., Tianjin

<sup>3</sup>Tianjin Iron and Steel Group Co., Ltd., Tianjin

<sup>4</sup>Tianjin Medical University, Tianjin

<sup>5</sup>School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing  
Email: hellowangyulin@163.com

Received: Aug. 7<sup>th</sup>, 2017; accepted: Aug. 21<sup>st</sup>, 2017; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

According to the optimization allocation of three-dimensional braided composite material of carbon nano pipeline sensor in the sensors network to monitor material structure and keep structure health, in consideration of the principle of coverage maximum and sensor number minimum, an immune optimization algorithm was proposed. It designed individual antibody coding and the process of the immune algorithm. Finally, simulation results show that the immune algorithm can effectively obtain the best solution.

## Keywords

Structure Monitoring, Immune Algorithm, Sensor Optimization

---

# 基于免疫算法的碳纳米管线传感器网络优化配置

马欣<sup>1</sup>, 王玉林<sup>1</sup>, 刘宏伟<sup>1</sup>, 党鑫<sup>1</sup>, 牛建伶<sup>2</sup>, 刘作一<sup>3</sup>, 曹晓娜<sup>4</sup>, 刘天佑<sup>5</sup>

<sup>1</sup>天津工业大学计算机科学与软件学院, 天津

<sup>2</sup>天津市吉泰方洲信息技术工程有限公司, 天津

<sup>3</sup>天津钢铁集团有限公司, 天津

<sup>4</sup>天津医科大学, 天津

<sup>5</sup>中国人民大学环境学院, 北京  
Email: hellowangyulin@163.com

收稿日期: 2017年8月7日; 录用日期: 2017年8月21日; 发布日期: 2017年8月28日

## 摘 要

针对三维编织复合材料结构健康监测中碳纳米管线传感器网络的优化配置问题, 根据检测覆盖范围最大且传感器数量最小的原则, 提出了一种基于免疫算法的求解方案。该方案将要求解的传感器位置作为抗体, 设计了抗体编码方式以及免疫算法的过程。仿真实验结果表明, 免疫算法能够有效地求得最佳解决方案。

## 关键词

结构监测, 免疫算法, 传感器优化配置

Copyright © 2017 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

在大型三维编织复合材料结构的健康监测中, 碳纳米管线传感器作为一种检测传感器以及传感器的数量和位置的优化配置研究已经受到许多学者的关注[1]。在某种程度上, 碳纳米管线传感器在材料检测应用上使用的数量越多, 对材料结构检测的范围就越广, 所检测的性能也越好。但是随着传感器数量的增多, 必然会增加传感器自身成本以及采集处理设备的代价, 造成一定的经济浪费。故此, 在确保获取三维编织复合材料结构可靠且全面的监测信息的基础上, 如何尽可能少的使用碳纳米管线传感器, 是目前一个重要的研究问题。另一方面, 还需考虑三维编织复合材料结构特点和运行状态对传感器嵌入位置的限制。

目前, 国内外的研究中常见的求解方法有: 序列法、非线性优化规划方法、推断算法等, 但这些算法对目标函数的数学性要求较高, 也易于陷入局部最优。例如用数学方法将传感器的数量和位置进行建模成二次方程类的数学问题, 然后进行求解。但是存在着求解困难, 参数人为设置等主观因素的影响。而像遗传算法这样的全局优化算法虽可避免陷入局部寻优, 但存在着参数设置较多, 实现操作复杂的缺点。对于大型三维编织复合材料结构的健康监测网络中, 碳纳米管线传感器的优化配置更适合用智能化的算法来进行配置。人工免疫算法是一种有效的智能化算法, 在很多领域中展现出优良的性能[2] [3]。故此, 本文在碳纳米管线传感器建模的基础上, 采用基于免疫算法对碳纳米管线传感器进行优化配置, 利用免疫算法的原理, 将要求解的问题看作是抗原, 把求解的解看作是抗体, 设计抗体编码方式, 通过免疫算法的流程, 最终提供一个有效的结果。

## 2. 碳纳米管线传感器的优化配置模型

在碳纳米管线嵌入到大型三维编织复合材料结构构件中, 对材料的结构进行实时的检测[4]。我们可

以采用传感器优化配置技术设计多个碳纳米管线传感器的最优布置, 即是指尽可能地使用最少数量的传感器, 来获取覆盖范围最广最有效的传感信息。一般来说, 含两方面的内容: 一是传感器数量的优化, 二是传感器位置的优化。

在三维编织复合材料结构健康监测系统中, 应力信号以应力波形式在结构材料上进行传播, 对性能造成一定的影响, 因此研究碳纳米线传感器网络监测的目的就是通过检测应力波信号, 来实现对结构的健康检测[5] [6]。

在半径为  $R_1$  的圆范围内, 传感器可以完全检测到信号信息, 故此, 检测的覆盖率为 1; 在半径为  $R_2$  圆范围之外, 传感器无法检测到信号, 故此, 检测的覆盖率为 0; 在半径小于  $R_2$  且大于  $R_1$  的范围内, 传感器检测的覆盖率服从一定的概率分布, 因此, 碳纳米线传感器的覆盖率是应力源和传感器间距离的二次函数, 即:

$$P(x, y, x_0, y_0) = \begin{cases} 1; & D \leq R_1 \\ \left( \frac{R_2 - D}{R_2 - R_1} \right)^2; & R_1 < D < R_2 \\ 0; & R_2 \leq D \end{cases}$$

该式中,  $(x, y)$  为应力源位置坐标,  $(x_0, y_0)$  是传感器位置坐标,  $D$  表示的是二者之间的距离。设有  $N$  个碳纳米线传感器, 它们对某一个固定位置信号源的覆盖率分别为  $P_i (i = 1, 2, \dots, N)$ , 则传感网络对该信号源的覆盖率为:

$$P(s) = \bigcup_i P_i = 1 - \prod_i (1 - P_i)$$

若该网络共有  $M$  个应力源, 且每个源的归一化率为  $\omega_i (i = 1, 2, \dots, M)$ , 则网络优化配置就是要使

$$\sum P = 1 - \sum_{i=1}^M \omega_i P_i(s)$$

最小化, 这就是三维编织复合材料结构健康监测中碳纳米线传感器网络优化配置准则。

### 3. 算法实现

#### 3.1. 免疫算法

免疫算法是一种智能群体算法[7], 源于模仿自然界中的人类免疫系统。人体免疫系统是一个功能强大, 运行高效, 动态平衡的复杂系统。它能够抵御系统外界入侵的抗原, 当外界有病毒细菌等异物入侵时, 系统会自动识别出抗原, 然后淋巴细胞产生相应的抗体, 最后通过免疫反应, 消灭掉抗原, 最终保证整个系统的生理功能得到正常运转。免疫系统具有较强模式分类能力, 尤其对多模态问题的分析、处理和求解表现出较高的智能性和鲁棒性[8] [9]。

#### 3.2. 算法原理

免疫算法模拟生物免疫系统功能实现智能计算, 通过学习人体的免疫机制, 最终能够提供分布式学习, 具有自组织, 记忆等特点, 有良好的收敛速度。把待解决的问题看作抗原, 那么相应的可行解作为抗体, 亲和度函数作为抗原-抗体之间的强度。在免疫进行过程中, 首先通过识别机制识别出抗原类型, 然后抗体种群特异性地进行免疫, 通过亲和力函数计算, 亲和力强的解集作为得到一个可行解种群, 种群中的抗体个体作为优势个体和一定的记忆细胞被保留下来, 通过比例克隆和变异得到一个新的种群, 当种群满足终止条件的时候停止; 否则, 问题的最佳解决方案是获得最佳的解决方案的问题, 这是最合

适的问题，为更好的解决方案的发展方向。

实现三维复合材料结构传感信息监测的碳纳米管传感器优化配置是典型的优化问题，在进行碳纳米管传感器嵌入到材料结构中，进行传感器分布优化配置的时候，运用免疫算法，把待解决的传感器优化问题看作抗原，相应的可行化的传感器位置作为抗体，亲和度函数作为抗原-抗体之间的亲和度，最终快速有效地解决问题。

### 3.3. 抗体编码

抗体编码方式是利用免疫算法求解问题的一个关键技术[10]。在材料结构中碳纳米管传感器的优化配置中，实数编码在解决优化问题时，具有抗体空间中的结构与其表现型空间中的结构一致的优点，直观简洁地可以看出具体的解的情况。鉴于此，本文采用实数编码。 $M$  个应力点作为抗原， $n$  个传感器作为抗体，由此组成抗体种群抗体编码矩阵如下：

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$$

### 3.4. 算法实现过程

碳纳米管传感器优化配置中，免疫优化算法的具体步骤如下：

步骤 1 设置终止条件，种群的最大迭代次数为  $t_{max}$ ；然后初始化产生种群  $A(0)$ ，令种群的迭代次数为  $t$ ，而此时的  $t = 0$ ，也就是初始化的种群。

步骤 2 对抗体种群  $A(t)$  的个体逐个进行亲和度计算，即用优化配置准则作为亲和度函数，然后对抗体种群中的每一个抗体都进行亲和度计算。

步骤 3 对抗体种群  $A(t)$  中的个体实施克隆、交叉、变异操作，通过这些操作后，可以得到新的抗体种群  $B(t)$ 。

步骤 4 对抗体种群  $B(t)$  实施免疫选择，即从此抗体种群中选中  $top-N$  个优秀的抗体；把  $n$  个优秀抗体组成新的抗体种群，作为下一代候选种群  $A(t)$ 。

步骤 5 当满足终止条件时结束；否则， $t = t + 1$ ，进入步骤 2。

## 4. 仿真实验

以最为常见的材料结构平面作为仿真实验的配置对象，如图 1 所示，将平面结构的范围等距离地划分为 110 个节点，由此形成一个网格化的平面，而仿真优化配置目的是将碳纳米管传感器配置合理地分配到不同的节点位置上，在节点上对不同的位置进行监测，实验最终达到传感器数量最少，覆盖范围最广的效果。

免疫算法的参数设置为：设半径  $R_1$  和  $R_2$  分别为 1 和 3 个网格单位；种群的最大迭代次数  $t_{max}$  设为 500；适应值小于 0.01 时满足要求停止搜索。值得说明的是，在实验中传感器配置位置坐标取整数即网

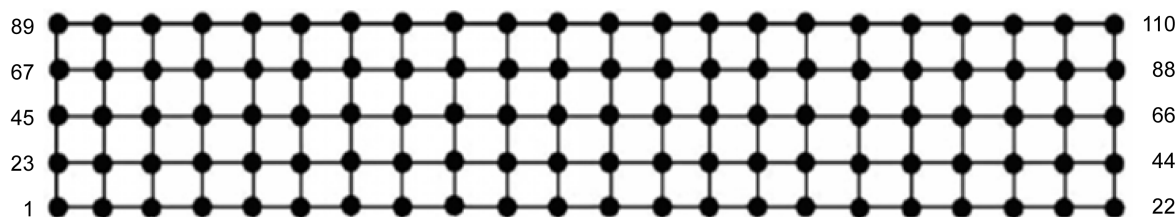
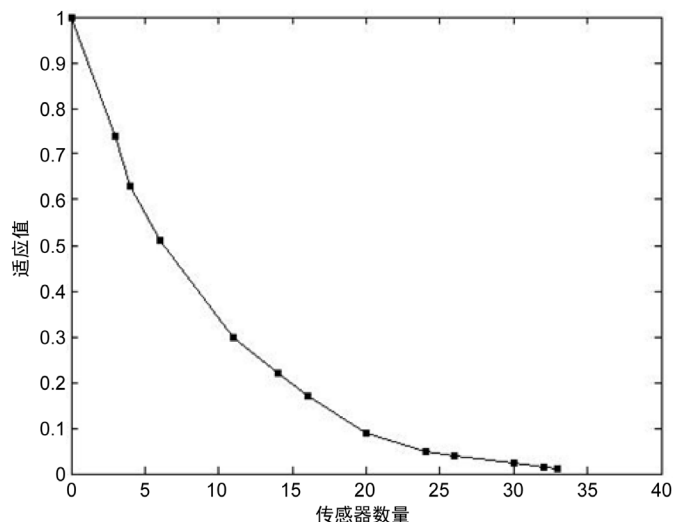


Figure 1. A structured mesh for optimizing the configuration of the sensor

图 1. 优化配置传感器的平面结构网格



**Figure 2.** The relationship between the number of sensors and adaptive values  
**图 2.** 传感器数量与适应值的关系

格节点数。

仿真结果如图 2 所示，可以清楚地看出，随着传感器数量的增加，适应值相应地在减小，说明接近满意的结果；当传感器数量为 33 时，适应值为 0.0089，小于 0.01。但在大于 20 后，适应值的贡献奖越来越小。考虑到实际的经济成本和检测性能，可合理选择传感器的数量为 21。

## 5. 结束语

本文利用免疫算法对三维编织复合材料结构中碳纳米管线传感器网络的优化配置问题进行了优化。通过仿真实验，结果表明了算法能够提供良好的方案。随着材料空间结构的复杂化，将面临新的挑战，这是下一步继续研究的内容。

## 基金项目

本篇论文依托两个项目分别为：国家自然科学基金青年项目(基金号 11404239)；天津市应用基础与前沿技术研究计划一般项目(项目编号 14JCYBJC42400)，特此声明。

## 参考文献 (References)

- [1] Ma, X., Dong, Y. and Wang, Y. (2016) Matrix Algorithm for Braiding Simulation of Three-Dimensional Four-Step Braided Composites. *Mathematical Problems in Engineering*, **2016**, 1-9.
- [2] 莫宏伟. 人工免疫系统[M]. 科学出版社, 2003.
- [3] 焦李成. 多目标优化免疫算法、理论和应用[M]. 科学出版社, 2010.
- [4] 杨智春, 于哲峰. 结构健康监测中的损伤检测技术研究进展[J]. 力学进展, 2005, 34(5): 215-233.
- [5] 李静东, 李嘉禄, 万振凯. 基于碳纳米管的三维编织复合材料健康监测技术[J]. 材料导报, 2012, 26(8): 109-113.
- [6] 万振凯, 贡丽英. 三维编织复合材料健康监测数据异常诊断研究[J]. 材料导报, 2013, 27(10): 74-77.
- [7] Gong, M., Jiao, L., Du, H., et al. (2009) Multiobjective Immune Algorithm with Nondominated Neighbor-Based Selection. *Evolutionary Computation*, **17**, 131-134. <https://doi.org/10.1162/evco.2009.17.1.131>
- [8] 柴争义, 李亚伦. 计算机免疫系统及其应用[M]. 科学出版社, 2016.
- [9] 王震, 陈云芳. 基于人工免疫的多目标优化研究综述[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(7): 2422-2426.
- [10] 公茂果, 焦李成, 杨咚咚, 等. 进化多目标优化算法研究[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 271-289.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

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

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