

人工免疫优化的汽车散热器功能设计^①

徐佳¹, 张卫², 尹学松³, 陆国栋⁴

¹(浙江广播电视大学 信息与工程学院(临海学院), 杭州 300042)

²(华东师范大学 信息科学技术学院, 上海 200241)

³(浙江广播电视大学 信息与工程学院, 杭州 300042)

⁴(银轮股份 技术中心, 台州 317200)

摘要: 应用公理设计原理设计车用散热器时, 耦合功能的存在是一个普遍问题. 国内外学者提出使用人工免疫方法求解耦合功能集. 针对这些算法在度量抗体优异性时存在的不足, 提出了新的度量指标: 耦合功能集聚度, 并给出相应公式, 同时在抗体生成算法中引入基因优选的方法. 经在银轮股份进行车用机油散热器设计仿真实验, 表明新的算法具有较高的效率.

关键词: 人工免疫; 基因显性度; 抗体生成; 公理设计

Design of the Auto's Radiator Based on Artificial Immune System Optimization

XU Jia¹, ZHANG Wei², YIN Xue-Shong³, LU Guo-Dong⁴

¹(School of Information and Engineering(Linhai School), Zhejiang Radio and TV University, Hangzhou 300042, China)

²(School of Information Science Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

³(School of Information and Engineering, Zhejiang Radio and TV University, Hangzhou 300042, China)

⁴(Technology Center, Yinlun Co. Ltd, Taizhou 317200, China)

Abstract: When the car radiator is designed by axiomatic design, the existence of the coupling function is widespread. Scholars put forward using artificial immune system to solve the coupled function sets. Based on the shortcomings of these algorithms in measuring antibody, this article puts forward the new measures: coupling function centralize degree, and gives the appropriate formula. At the same time, the gene optimization method is introduced to antibody generation algorithm. The experiments of auto engine oil radiator in Yinlun CO., LTD show that the new algorithm has higher efficiency.

Key words: artificial immune; gene dominant degree; anti-body generates; Axiomatic design

汽车散热器是汽车动力系统的重要部件, 是动力系统正常高效运作的保障. 车用散热器的在研发时首先要进行功能设计, 功能设计的方法有很多, 一些企业采用了公理设计 AD(Axiomatic Design)^[1]为基础进行设计工作. 公理设计将设计过程看成是一个自顶向下的过程, 可以从设计抽象概念的高层次到详细细节的低层次逐步展开并进行设计问题的求解, 其中的独立公理要求通过选择恰当的设计参数保持功能间的独立, 而信息公理为设计者提供了一个可量化的设计质量评估准则^[2]. 独立公理作为公理设计的核心为设计者的决策能否达到满意效果提供了一个评判准则. 按

照独立公理的规定, 当要同时满足多个功能要求时, 必须设法得到无耦合设计或者准耦合设计, 然而在实际产品设计过程中, 尤其对于复杂产品系统而言, 由于设计对象的复杂性以及技术、成本等其他条件的限制, 要想得到无耦合设计或者准耦合设计往往比较困难, 耦合设计经常会不可避免地出现. 然而, 现有的公理设计的前提是功能独立, 也就是说, 现在有公理设计是建立在满足独立公理要求的基础上的, 尚未提供分析和处理耦合设计的方法^[3]. 这对公理设计的应用是个挑战. 国内厂家设计实务对于这个问题一般是采用经验去人工设定系数, 辅以计算机模拟或者样品

① 基金项目:浙江省自然科学基金(Y1100349);浙江省教育厅科研项目(Y201224233);台州市科技局科技项目(1202ky18)

收稿时间:2014-01-27;收到修改稿时间:2014-03-12

模品模拟来验证。当设计人员经验丰富时，可能设计效率较高，当经验欠缺时，可能需要较多的时间，设计过程存在欠科学及时间的不确定性。国内外学者对此提出了众多的解决方案，其中文献[3]提出了以免疫聚类学习的方法克服现有公理设计在处理耦合设计方面存在的不足。本文在文献[3]提出的方法的基础上，对算法流程进行改进、提出新的抗体评价标准入相应的计算公式，并在克隆选择算法中引入基因优选的概念。经过在银轮股份进行了车用板式机油散热器功能设计仿真实验，新算法较大程度地提高了人工免疫系统解决该领域问题时的运算效率。

1. 车用机油散热器功能设计

依据公理设计原理，先将散热器功能分域列出，并逐域分解细化，形成如表 1 所示的功能域，功能域表示“要做什么”。建立结构域，在功能域与结构域间逐层进行“Z”字形映射，结构域表示“如何做”，结构域如表 2 所示。

表 1 功能域分解表

| 功能域 | | 编号 | |
|-----|---------|----------|----|
| 结构 | 框架刚度 | 1 | |
| | 防变形 | 整体抗扭性 | 2 |
| | | 管程防变形 | 3 |
| | | 散热板防变形 | 4 |
| | | 较轻质量 | 5 |
| 密封 | 管程防腐蚀 | 6 | |
| | 连接防漏 | 7 | |
| | 连接防腐蚀 | 8 | |
| | 连接足够坚固 | 9 | |
| | 管壁足够厚度 | 10 | |
| 热传导 | 管程热传导 | 管壁防垢 | 11 |
| | | 材料低热阻 | 12 |
| | | 内壁足够接触面积 | 13 |
| | | 管程足够长度 | 14 |
| | | 保持传热介质流速 | 15 |
| | 减少连接热阻 | 16 | |
| | 足够连接接触面 | 17 | |
| | 散热板热传导 | 散热板低热阻 | 18 |
| | | 足够面积 | 19 |
| | | 气流充分性 | 20 |
| | | 表面散热性 | 21 |
| | | 表面防垢 | 22 |

表 2 设计域分解表

| 设计域 | | 编号 | |
|---------|------------|--------|----|
| 结构 | 框架材料 | 1 | |
| | 整体结构 | 框架材料 | 2 |
| | | 管道壁厚度 | 3 |
| | | 散热板厚度 | 4 |
| | | 材料使用量 | 5 |
| D2: 密封 | 管道材料 | 6 | |
| | 连接头结构 | 7 | |
| | 连接头材料 | 8 | |
| | 连接焊接工艺 | 9 | |
| | 管道壁厚度 | 10 | |
| D3: 热传导 | 管程结构 | 内壁处理工艺 | 11 |
| | | 材料参数 | 12 |
| | | 内壁形状 | 13 |
| | | 长度参数 | 14 |
| | | 管道管径参数 | 15 |
| | 管道与散热板焊接工艺 | 16 | |
| | 管道与散热板焊点设计 | 17 | |
| | 散热板结构 | 材料参数 | 18 |
| | | 形状 | 19 |
| | | 散热片间隔 | 20 |
| 表面形状 | | 21 | |
| 表面工艺 | | 22 | |

公理设计用设计矩阵表示不同域之间的映射关系，如图 1 所示，矩阵中，横坐标表示功能域中的功能要求元素，纵坐标表示结构域中的设计参数元素，矩阵表示它们之间的映射关系，如有映射关系，则用 1 表示。根据公理设计中独立公理的要求，保持功能要素独立，即在功能域中最终分解得到的功能要素集合中的元素只与设计域中的相应元素有映射关系，即矩阵中的 1 形成一条对角线，这称之为无耦合设计。但对设计矩阵的观察发现，一些功能元素对应的设计参数元素并不止一个，如功能元素 11：管程的防垢要求，与设计元素 11：管道内壁处理工艺有映射关系，但它同时与设计元素 13：内壁形状同样相关，如果据此设计设计元素 13，则会影响到功能元素 13：管道内壁接触面积的功能设计。为了防垢，要求管道内壁越平滑越好，然而平滑的内壁与导热介质机油的接触面积与相对较小，这就与内壁足够接触面积的设计功能要求相冲突，设计元素 11 与设计元素 13 称之为耦合功能。耦合功能违反了公理设计中的独立公理，简单耦合尚可以对设计元素的设计顺序做出人工判断与取舍，以

决定功能优先顺序, 而存在众多的耦合使下一步设计无从开展, 而功能的耦合又是大多数工业设计中无法避免的情况.

为了解决功能耦合问题, 可以对功能域及结构域的元素重新排列, 使设计矩阵中的耦合形成一个相对集中的矩形区域, 如图 4 所示, 称之为功能耦合区域, 再对耦合功能域进行耦合功能量度和解耦、割裂操作, 以便确定耦合功能域中功能的先后顺序, 从而带动整个功能域的设计. 如何形成耦合功能域是解决功能耦合问题的关键. 而使用人工免疫系统的方法能够实现该目的.

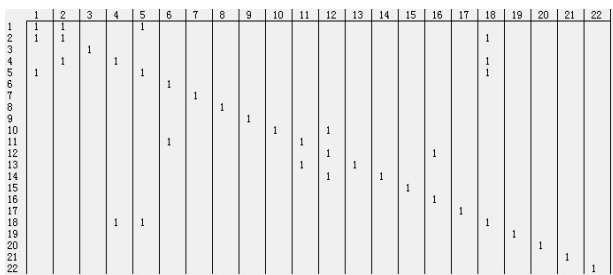


图 1 仿真系统上的功能域-设计域映射矩阵截图

2 人工免疫聚类学习算法的耦合功能集聚

从计算的角度来看, 生物免疫系统是一个高度并行、分布、自适应和自组织的系统, 具有很强的学习、识别、记忆和特征提取能力. 人们据此开发了面向应用的免疫系统计算模型: 人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS), 用于解决工程实际问题. 目前, AIS 已发展成为计算智能研究的一个崭新的分支^[4]. 生物体的免疫系统通过产生抗体来吞噬和杀来称之为抗原的入侵者. 免疫系统产生大量的抗体前体, 前体需要通过检测才能成熟为正常的抗体, 成熟过程主要检测抗体是否与自体存在匹配, 只有没有匹配的前体才能成为抗体. 抗体如果与入侵抗原匹配, 即会成为记忆抗体, 下次再遇到同样的抗原, 抗体会立即大量复制以杀灭抗原. 经过一定时间没有匹配的抗体会淘汰死亡.

利用人工免疫系统的原理, 可以将抗体群体定义为问题的解, 抗体即功能域与结构域的排列, 以排列的耦合功能集聚度代替抗体抗原的亲和力作为抗体优劣的衡量标准. 首先产生初始抗体群体, 对应问题的一组随机解. 对集体进行克隆选择繁殖, 具有较高繁殖期望的抗体优先得到繁殖, 繁殖期望与耦合功能集

聚度正相关, 与类似抗体浓度负相关, 以抑制浓度过高的抗体, 以避免产生局部最优, 同时淘汰低耦合功能集聚度的抗体. 为追求最优解, 需要使抗体具有多样性, 抗体在克隆时产生局部变异, 更优的抗体得到促进, 非优化的抗体被淘汰. 评估新产生的抗体群体, 如果满足条件的, 即产生最优解, 如不满足条件, 则继续克隆选择, 生成新的抗体群体, 直至产生最优解. 算法的基本框架如图 2 所示.

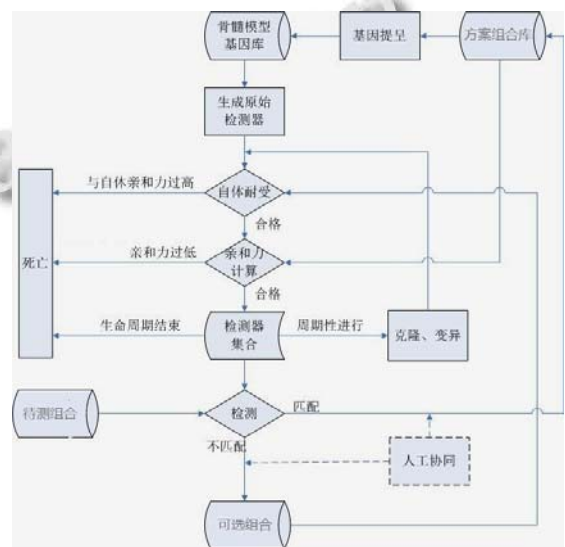


图 2 算法流程图

2.1 抗体的表示

每一个功能域或参数域元素作为一种基因, 赋予每个基因一个固定的编号, 所有基因的一种排列即为一个抗体, 记为 $Ag_n = \{G_1, G_2, G_3, \dots, G_{22}\}$

2.2 初始抗体集合的形成

采用随机排序的方式, 生成抗体, 组成初始抗体库, 以备筛选, 规模应远大于抗体库数量, 并使用公式 1 计算后选择最优的部分进入抗体库.

2.3 抗体的优异性计算

当一个抗体将尽可能多的耦合功能集聚到一个尽可能小的矩形区域内时, 这个抗体被认为是最优的, 此前一些文献提出的衡量抗体优异程度的公式存在一些欠缺, 主要衡量耦合功能向对角线的集聚度以及耦合功能向对角线一侧的集聚程度, 虽然也可能出现较优的结果, 但不能很好地反映耦合功能在任意一个矩形区域的集聚程度, 为此提出新的耦合功能集聚度公式:

$$AgA_t = \text{Max} \left(\frac{\sum_{i=n}^{n-S+1} \sum_{j=n}^{n-S+1} r_{ij}}{S^2 / Ng^2} / Nf \right) \quad (1)$$

$$n = \{1, 2, 3, \dots, Ng - S + 1\}$$

该公式表示抗体 t 的耦合功能集聚度，其中 Nf 表示功能域与设计域中存在映射关系的总数量，Ng 表示抗体所包含基因的数量，即功能域的元素数量，Rij, 表示图 1 矩阵中第 i 个设计元素与第 j 个功能元素的映射关系，如果存在映射关系，则为 1，不存在映射关系，则为 0，n 为抗体中的基因位置值，当取得最大值时，n 为最大值耦合功能集聚区域在抗体中的开始位置值。S 表示耦合功能区的大小，以包含在区内的基因个数为单位。S 的取值与具体的应用有关，基因数量大的，需要较大的取值，反之较小，此外与耦合功能的密集程度也有很大关系，在不同应用中的情况有很大差别，难以做出统一规定，不论何种情况，在下面范围内是比较合适的：

$$S \subset \left[\sqrt{(Nf - Ng) * 0.5}, \sqrt{Ng} \right] \quad (2)$$

即至少要求免疫聚类后形成的耦合功能区域至少包含除一一映射关系外映射数的一半。在本应用中，根据计算该值可取 5 或 6。

2.4 抗体的克隆选择及抗体库更新

在生物体免疫系统中，识别抗原的细胞进行克隆扩增，以产生大量抗体。在克隆过程中，免疫细胞会发生变异现象。变异对维护和完善检测器的多样性我保持检测器的高亲和力具有重要的作用。为此引入克隆与变异机制。免疫系统克隆选择过程所使用的算法为克隆选择算法^[6]。初始集体生成后，需要对抗体进化克隆选择，以产生更优的抗体，淘汰劣质抗体。选择哪个抗体进行繁殖，除了依据抗体的集聚度外，为避免陷入局部最优，还要抑制类似抗体大量繁殖，抗体的相似性用抗体间的 Hamming 距离来衡量，抗体亲和力公式：

$$Af(t, k) = \sum_{i=1}^{Ng} w_i, w_i = \begin{cases} 1, & t_i = k_i \\ 0, & t_i \neq k_i \end{cases} \quad (3)$$

该式表示抗体 t、k 的亲和力，ti 和 ji 分别表示 t、k 两抗体的第 i 个基因。对于给定常数 v，如有 Ag(t, k) < v，则认为抗体 t、k 是相似抗体，所有的抗体中与 t 相似的抗体的个数称之为抗体 t 的浓度，记作 ct。设置抗体

繁殖期望 et:

$$e_t = \frac{AgA_t}{c_t} \quad (4)$$

在抗体集合中选择繁殖期望最高的抗体进行克隆变异操作。引入克隆变异操作可加强算法寻求局部最优解的能力，加快算法的收敛。

克隆变异操作通行的方法是选择抗体基因上的随机点，进行变异，对应本应用中为随机选择图 3 中两个基因位进行交叉换位。此种变异未考虑基因对亲和力的贡献不同，对亲和力贡献大的基因(本应用为基因片段)因此可能会遗失，造成克隆变异效率不佳，影响收敛速度。文献[7]提出了在抗体生成中引入基因显性度的概念，对亲和力贡献高的基因在克隆时被优先采用，有效地提高了抗体生成效率。在此，可提出高显性度基因片段的概念，在同样 S 值条件下具有较高繁殖期望的抗体，其经过公式 1 计算的耦合功能区域所在的基因片段即为高显性基因片段，即经过公式 1 计算后当取最大值时，n 的值作为开始，到 n-S+1 结束的这一段基因片段。在克隆变异时，对于这段高显性基因片段，保持其基因稳定，对其它的位置的基因进行随机交叉变异。

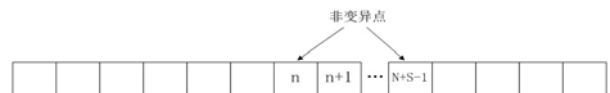


图 3 引入高显性度基因片段的克隆变异示例

经分析，引入根据基因显性度进行基因优选的克隆变异并不会增加算法复杂度，因为 n 值的获取是由公式(1)得到，而每个抗体均经过公式(1)的计算，只需每个抗体保留计算结果的 n 值。而 S 值是预先选定的。克隆产生的新抗体计算其功能集聚度，集聚度高于原抗体的，替代原存活，否则变异抗体被淘汰，并更新抗体库。下一轮的变异由抗体库与 1: 1 比例随机产生的新抗体按繁殖期望值选择 1/2 再进行克隆变异，加入随机新抗体的目的是为了防止出现局部最优现象，保证每一轮克隆前都有新鲜“血液”补充。如此循环，直至算法收敛。

2.5 实验结果

在银轮股份的板式汽车用机油散热器功能设计中应用上述算法。根据图 1，共有映射关系数 Nf=37，抗

体基因数 $N_g=22$, 耦合功能区大小 S 设置为 5, 抗体库大小为 200, 初始随机生成 1000 个抗体, 首轮计算时, 取 S 值为 3, 使用公式 3 进行计算后选择最优的 200 个抗体进入抗体库, 作为初始抗体. 每轮克隆变异时, 选择抗体库中的抗体和等数量的随机抗体组成抗体集合, 使用公式 3 计算后, 根据繁殖期望选择 200 个抗体更新抗体库. 在克隆变异时, 分别使用随机变异和引入基因优选的克隆变异两种算法, 结果如图 5 所示, 可知使用引入基因优选的克隆变异算法, 在第 86 代时趋于收敛, 而采用抗体随机克隆变异时, 第 177 代时趋于收敛, 收敛时间明显缩短.

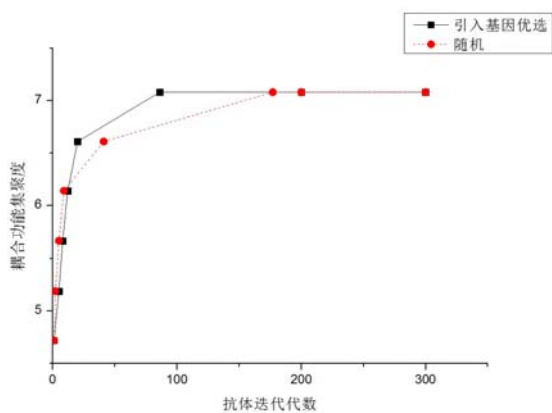


图 4 新旧算法效率比较

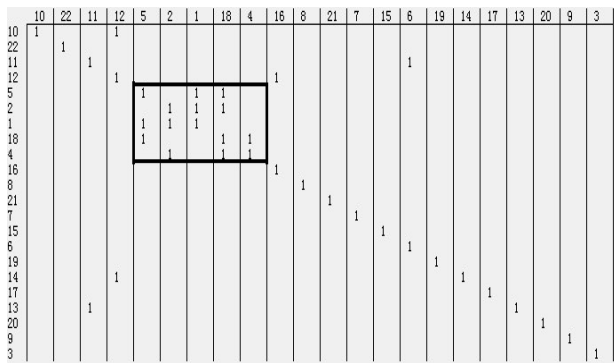


图 5 一个最优抗体矩阵截图

图 5 为在最终抗体库中选取的一个高耦合功能集

聚度的抗体, 矩形框所示为耦合功能集聚区, 此后可使用双向比较、基于三角模糊数互补判断矩阵的量化方法对耦合功能集聚区内的功能耦合程度进行量化, 并进行解耦及割裂操作, 得出各功能的设计先后顺序^[3]. 剩余零星耦合功能可人工判断解决. 此后步骤超出了本文讨论范围, 在此不再赘述.

3 总结

实验结果表明, 改进优化后的人工免疫算法应用于基于公理设计的散热器功能设计时, 具有更高的系统效率. 应用该算法可将设计建立在科学方法而非人类经验的基础上, 为汽车冷却模块产品设计提供科学方法和原理指导, 最大限度消除人为因素对设计的影响, 较大程度减少设计所需时间, 有效缩短新产品型号的开发时间和成本, 提高设计质量.

参考文献

- 1 Suh NP. The Principles of Design. New York: Oxford University Press, 1990.
- 2 Suh NP. Axiomatic Design: Advances and Applications. New York: Oxford University Press, 2001.
- 3 肖人彬, 曹鹏彬, 刘勇. 工程免疫计算. 北京: 科学出版社, 2007.
- 4 Dasgupta D, Atttoh-Okine N. Immunity based systems: A survey. Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Orlando, Florida, 1997. 369-374.
- 5 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
- 6 de Castro LN, Von Zuben FJ. Learning and optimization using the clonal selection principle. IEEE Trans. on Evolutionary Computation Special Issue on Artificial Immune Systems, 2002, 6(3): 239-251.
- 7 徐佳, 张卫. 人工免疫中一种新的抗体生成与匹配算法. 计算机工程, 2010, 9(36): 181-183.