

工程免疫计算:基本概念与研究框架

肖人彬^{1,2}, 曹鹏彬^{2,3}, 刘 勇⁴

(1. 华中科技大学 系统工程研究所, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 CAD 中心, 湖北 武汉 430074; 3. 武汉工程大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430073; 4. 三峡大学 电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:人工免疫系统 (artificial immune system, AIS) 是目前人工智能领域的研究前沿之一. 分析了 AIS 所要解决的各种工程实际问题的共性特点和聚类特征, 将工程领域中的各种 AIS 应用问题聚类归纳为若干类别的典型工程问题, 在此基础上提炼形成了工程免疫计算 (engineering immune computing, EIC) 的概念. 给出了 EIC 的定义, 对其概念内涵进行了阐释, 说明了 EIC 和 AIS 之间的关系; 构建提出了 EIC 的研究框架, 包括基本原理、实现技术、工程应用以及理论分析和实现方法等 5 个部分, 并对这些组成部分进行了详细阐述. 从面向问题求解的免疫设计和面向产品演化的免疫设计 2 个方面对基于 EIC 的产品设计方法进行了阐述, 以产品设计为例, 对基于 EIC 的工程应用展开了进一步说明. 结合 AIS 在工程领域中的应用现状及其存在的问题, 展望了 EIC 的发展方向, 着重论述了其在产品设计领域中的应用前景. EIC 概念的提出充实和发展了 AIS 的研究范畴, 可为更好地利用 AIS 解决工程实际中的诸多复杂问题提供有效的方法指导.

关键词:人工免疫系统; 工程免疫计算; 工程问题; 产品设计

中图分类号: TP18; TB21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2007)06-0027-11

Engineering immune computing : fundamentals and a research frame work

XIAO Ren-bin^{1,2}, CAO Peng-bin^{2,3}, LIU Yong⁴

(1. Institute of Systems Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. CAD Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Mechatronics Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China; 4. School of Electrical Engineering and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract :Artificial immune system(AIS) are at the forefront of artificial intelligence research. This paper begins by analyzing commonness and clustering features in solving practical engineering problems with AIS. The application problems related to AIS in different engineering fields were then classified into several typical categories of engineering problems. On that basis, the concept of engineering immune computing (EIC) was abstracted and formed. After this definition of EIC was presented, the conceptual meaning of EIC and the relationship between EIC and AIS were explained. A research framework for EIC was constructed, and its constituents were discussed in detail. From two aspects namely immune design for problem solving and immune design for product evolution, the method of product design based on EIC was addressed to take product design as an example to further state the engineering application based on EIC. Referring to the present application status of AIS in engineering fields and the existing problems, perspectives in the application of EIC were discussed. In particular, developmental directions of the application of EIC in the field of product design were prospected. The presentation of the concept of EIC expands the research scope of AIS and can provide efficient methodological guidance for applying AIS to solve complex problems in engineering practice.

收稿日期: 2007-04-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50575083); 高等学校博士点基金资助项目 (20030487054).

Keywords :artificial immune system ; engineering immune computing ; engineering problem ; product design

目前,受生物免疫系统启发而产生的人工免疫系统正在兴起,它作为计算智能研究的新领域,提供了一种强大的信息处理和问题求解范式^[1-2]。人工免疫系统(artificial immune system, AIS)之所以引起人们的极大兴趣,是因为人们希望从生物免疫系统的运行机制中获得启发,借助免疫机理和免疫学原理建立和发展一种新颖、有效的计算智能方法,并用于解决工程实际中的复杂问题。De Castro 指出, AIS 是一种解决工程实际中各种复杂问题的有效手段,并提出了“免疫工程”^[3]的概念,旨在促进 AIS 在工程中的应用。文献[4]也指出免疫系统所隐含的丰富资源给予工程人员很多灵感,开发、研究和建立适用于工程应用的人工免疫系统,已经成为工程界关注的焦点,并已在国内外形成活跃的研究氛围。

1 工程免疫计算的提出

从工程应用角度来看,免疫系统的行为特性及运行机制与工程领域中许多研究方向有着紧密的联系。实际上, AIS 已经在很多工程领域获得了广泛应用。利用免疫系统的阴性选择原理构建“计算机免疫系统”^[5]成为 AIS 在工程中最直接的一种应用,信息安全也成为 AIS 较早的应用领域之一。除了信息安全外, AIS 还被成功用于故障诊断、机器人技术、自动控制、数据处理、图像处理、产品设计与制造等领域^[1-18],为许多复杂问题的有效解决提供了新的思路和方法。尽管这些工程应用涉及到的具体对象各不相同,下面的分析力图说明 AIS 在求解工程实际问题时表现出明显的共性特点和聚类特征。

1) AIS 在解决工程领域中的应用问题时,通常先根据待求解问题的基本特征将其抽象为某一种典型问题,进而结合 AIS 的有关原理和技术进行求解。例如,文献[13]将轨迹综合问题视作模式匹配问题,综合运用 AINE 无监督学习模型^[14]、AIRS 有监督学习模型^[15]和阴性选择算法改进模型,提出了一种基于免疫计算的机构轨迹间接综合的新方法。

2) 对于直接求解难度较大的应用问题,往往先进行问题转换,然后再用免疫方法进行求解。例如,文献[16]为了解决机构同构判定问题,首先将其转换为可降次的旅行商问题——典型的组合优化问题,进而用免疫方法对其求解。

3) 每一个 AIS 应用领域中的各种应用问题通过抽象或转换可以归结为若干类别的典型问题,这意味着 AIS 在某个领域中的各种应用实际上可以

归结为对若干种类的典型问题的求解。以产品设计领域为例,虽然产品设计的具体问题各种各样,其要求和目标也各不相同,但是产品设计中潜在的可用 AIS 进行求解的各种应用问题经过抽象或转换,可以概括归纳为优化(如优化设计和布局设计等)、识别(设计方案如机构轨迹图谱的识别等)、学习(如产品族设计中核心平台的聚类分析等)、决策(如设计方案的评价、决策等)、协同(如复杂产品协同设计等)和控制(如汽车空调控制系统的设计)等典型问题,也就是说, AIS 在产品设计中的各种应用基本上可以归结为对上述几大类问题的求解。

4) 不同 AIS 应用领域中的某些应用问题可以抽象或转换为同一类问题进行处理,这意味着不同领域中的某些问题由于具有某些共性特征,适于采用同一类免疫算法进行求解。例如,产品设计中的布局设计和制造领域中的车间调度都可以抽象为优化问题,进而用免疫优化算法进行求解,又如产品设计中的设计方案识别和图像处理中的文字、符号识别都可以抽象为识别问题进而用免疫识别算法进行求解。

上述分析表明,各个工程领域中潜在的可用 AIS 进行求解的诸多应用问题通过抽象或转换,可以归结为若干类别的典型工程问题(本文将由各工程领域中的具体应用问题通过抽象或转换得到的待求解问题定义为工程问题),并结合 AIS 的有关原理和技术进行求解。基于这些关于 AIS 求解工程实际问题所具有的聚类特征的分析说明,本文通过抽象和提炼,概括提出工程免疫计算(engineering immune computing, EIC)的概念,旨在为更好地利用 AIS 解决工程实际中的诸多复杂问题提供有效的方法指导,从而提高 AIS 解决工程实际问题的能力,促进 AIS 在工程中广泛而深入的应用。

2 工程免疫计算的基本概念

2.1 工程免疫计算的定义与内涵

定义1 工程问题是指对工程领域中的具体应用问题通过抽象或转换得到的具有工程应用背景的待求解问题。

工程问题可以分为若干类,而每一类工程问题在问题特征和求解方法上具有共性特点。

定义2 工程免疫计算由面向工程应用的 AIS 原理、技术、理论和方法组成,它以工程实际中的应用问题为导向,通过抽取应用问题的本质特征将其

抽象或转换得到工程问题,再结合该工程问题的求解技术并利用 AIS 进行求解.

关于 EIC 的内涵,可以从以下 3 个方面进行理解.

1) EIC 的基本要素及其之间的关系

EIC 由 3 个基本要素构成,即“工程”、“免疫”和“计算”.其中,“工程”表明 EIC 是面向工程应用的,它以工程实际中的应用问题为导向;“免疫”说明 EIC 是受生物免疫系统及其运行机制启发而来的、生物免疫系统为 EIC 提供了灵感源泉;“计算”则是指 EIC 通过模拟免疫系统的概念、功能、机理、特征和原理并将其映射为免疫算法,从而实现对各种问题的求解,同时也暗含 EIC 具有很强的计算能力.需要说明的是,“计算”的含义已经被拓展和深化,它不是指一般意义上的数值计算,而是泛指在解空间上进行的搜索过程.由 EIC 的基本构成要素可知,EIC 解决工程实际中各种复杂问题的能力来源于生物免疫系统提供的隐喻机制,并且通过“计算”的途径获得.因此,可以按照以下 2 种方式理解 EIC:第一,“计算”是联系“工程”和“免疫”的桥梁,EIC 由“工程”、“免疫”和“计算”这三者共同作用构成,即有 $EIC = 免疫 + 工程 + 计算$,如图 1(a) 所示;第二,“免疫”和“计算”结合起来构成“免疫计算”,即基于免疫策略的计算或受免疫策略启发的计算,而 EIC 是免疫计算与工程应用相结合的产物,即有 $EIC = 免疫计算 + 工程$,如图 1(b) 所示.

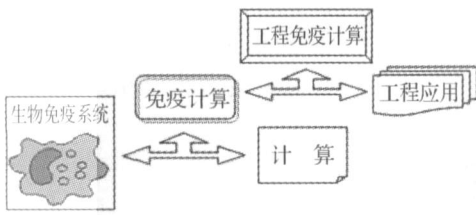
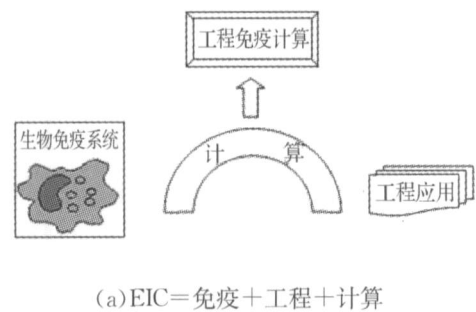


图 1 EIC 的基本要素及其之间的关系
Fig 1 Elements of EIC and their relations

2) EIC 的求解途径

EIC 的研究对象是工程实际中的各种复杂应用问题.然而,EIC 不是直接对应用问题进行求解,而是先进行问题分析,根据问题的基本特征将具体的应用问题抽象或转换为某种工程问题,如识别、学习、优化等,然后结合 AIS 的相关原理和技术进行求解.因此,EIC 对工程应用问题的处理采取间接途径,其好处在于:问题的抽象或转换有利于把握待求解问题的本质特征并降低问题的复杂性,从而简化问题的处理;同时也有利于结合识别、学习、优化等工程问题本身的求解技术更好地解决问题.

需要说明的是,EIC 将具体的应用问题抽象或转换为识别、学习、优化等工程问题进行处理,但 EIC 求解的不是单纯的识别、学习、优化等问题,而是具有工程应用背景的识别、学习、优化等问题.

EIC 的求解途径如图 2 所示.

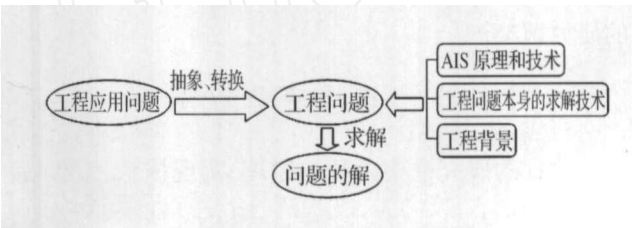


图 2 EIC 的求解途径
Fig 2 Solving approach to EIC

3) EIC 的研究范畴

EIC 通过揭示免疫计算的一般性原理和探讨面向工程实际问题求解的免疫计算的一般方法,旨在为工程应用提供可靠的理论支撑和有效的方法工具.因此,EIC 的研究范畴主要包括 2 个方面,一方面是免疫计算的一般性原理,即 EIC 的基本原理和实现技术等,另一方面是 EIC 的应用,即探讨 EIC 在各种工程领域中的应用及其求解方法.具体来讲,EIC 的研究主要有以下几个方面内容: EIC 仿生机理的研究; 在免疫学基本原理基础上启发得到的 EIC 基本求解算法的研究; 面向典型工程问题求解的 EIC 应用算法的研究; 各种混合免疫算法的研究; EIC 工程应用的研究; EIC 理论分析方面的研究; EIC 实施方法的研究.

2.2 工程免疫计算与人工免疫系统的关系

概括地讲,EIC 与 AIS 之间既存在着相互联系,又有各自不同的侧重点.

首先,EIC 和 AIS 之间存在着相互联系.一方面,AIS 是 EIC 的前提和基础;另一方面,EIC 是 AIS 的延伸和发展,因为 EIC 是在总结 AIS 解决各

种工程应用问题所具有的共性特点的基础上提出的,其核心是将各种工程应用问题通过抽象或转换归结为若干类别的典型工程问题并结合 AIS 的有关原理和技术进行求解。

其次,EIC 和 AIS 各自的侧重点不同。AIS 以生物原型为导向,强调的是从生物免疫系统的隐喻中启发映射得到计算模型,也就是说,AIS 的研究主要采用的是自上而下的途径;而 EIC 则以工程应用为导向,强调基于生物免疫系统的概念、功能、机理、特征和原理解决工程实际问题,主要采用的是自下而上的思路。

总之,EIC 的基础是 AIS,它以工程应用为导向,研究面向复杂工程实际问题求解的免疫计算方法,将各种工程应用问题通过抽象或转换归结为若干类别的典型工程问题并结合 AIS 的原理和技术进行求解。因此,EIC 概念的提出充实和发展了 AIS 的研究范畴。

3 工程免疫计算的研究框架

EIC 的研究框架由基本原理、实现技术、工程应

用、理论分析和实现方法 5 个部分构成,如图 3 所示。其中,基本原理包括免疫学基本概念、EIC 的生物原型和 EIC 的特性及仿生机理,它对应于 EIC 组成要素中的“免疫”;实现技术包括抗体的表示和评估方法、由 EIC 仿生机理映射得到的 EIC 求解算法以及免疫计算的系统集成技术,它对应于 EIC 组成要素中的“计算”;工程应用则包括 3 个部分,即 EIC 的应用领域、EIC 的应用问题和工程问题,它对应于 EIC 组成要素中的“工程”。本文根据 AIS 目前的应用状况,将工程领域中的各种应用问题聚类归纳为 6 大类典型的工程问题,即识别、优化、学习、控制、决策和协同。工程问题具有可扩展性,因为随着 EIC 的深入发展,EIC 的应用领域和应用问题将会被不断拓展,由此通过抽象或转换可以归结得到更多种类的典型工程问题。此外,EIC 的研究框架还包括理论分析和实现方法 2 个部分,前者对 EIC 的各种算法进行数学上的分析,后者则构成 EIC 的方法学,它们分别为 EIC 提供理论支持和方法指导。下面分别就 EIC 研究框架中的各个组成部分进行阐述。

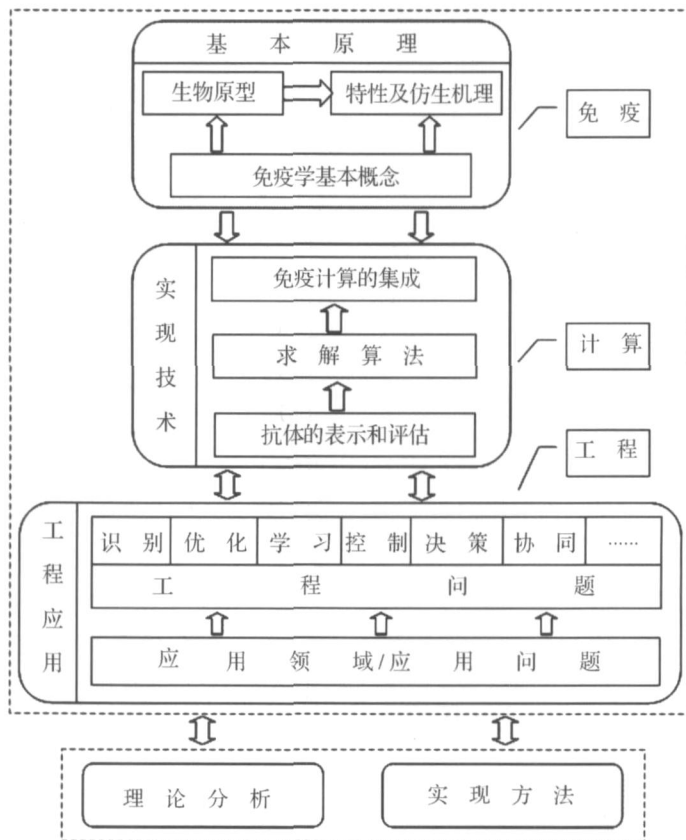


图 3 EIC 的研究框架

Fig 3 Research framework of EIC

3.1 工程免疫计算的基本原理

如前所述,EIC 的基本原理包括免疫学基本概念、EIC 的生物原型和 EIC 的特性及仿生机理.免疫学基本概念指抗原、抗体、免疫和免疫应答等有关术语及其含义;EIC 的生物原型是生物免疫系统,涉及免疫系统组成结构、免疫机制、免疫学原理和免疫系统特性等.图 4、图 5 分别罗列显示了主要的 EIC 特性和典型的 EIC 仿生机理. EIC 所具有的诸多优良特性是通过 EIC 丰富的仿生机理得到体现的,从而具有强大的信息处理和问题求解能力;而 EIC 的仿生机理则从信息处理的角度认识和剖析免疫系统并抽取免疫机制和免疫系统特性的工作机理,是 EIC 隐喻机制的不竭之源,因此深入认识免疫系统并挖掘潜在的 EIC 仿生机理是开发有效的 EIC 求解算法并用于工程实际的前提和基础.



图 4 EIC 特性

Fig. 4 Characteristics of EIC

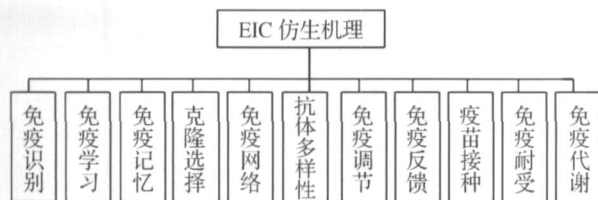


图 5 典型的 EIC 仿生机理

Fig. 5 Typical bionic principles of EIC

3.2 工程免疫计算的实现技术

3.2.1 抗体的表示和评估

形态空间被用于对抗体进行形式化表达,通常采用的空间有 3 种,即欧氏形态空间(抗体表示为实数向量)、海明形态空间(抗体用有限字符集上的字符串表示)和整数形态空间(抗体用整数表示,是海明形态空间的一种特殊形式).抗体的评估包括抗体和抗原之间结合(匹配)程度的评估以及抗体之间相似程度的评估 2 个方面,一般用亲合度(affinity)表示,而亲合度的度量通常采用 4 种方法,即 R 连续位法、海明距离法、欧氏距离法或信息熵度量法.

3.2.2 EIC 求解算法

基于 EIC 仿生机理开发的 EIC 求解算法如图 6 所示,主要包括 3 种类型:模仿免疫系统抗体和抗原识别、结合以及抗体产生过程(借用 GA 的交叉和变异算子),并利用免疫系统多样性机理抽象得到的一般免疫算法,这也是一种最简单的 EIC 算法;基于免疫学基本原理抽象得到的算法,主要有阴性选择算法、克隆选择算法和免疫网络算法;面向工程问题求解的各种算法,包括免疫识别算法、免疫优化算法、免疫学习算法、免疫控制算法和免疫决策算法等.在这 3 种算法中,前 2 种是 EIC 的基本求解算法,最后一种则是为完成特定工程问题而设计的应用型算法.

3.2.3 免疫计算的综合集成

免疫计算的综合集成是指基于 AIS 的有关原理对其他智能计算方法进行改进和加强或将 AIS 与其他智能计算方法进行融合从而得到各种混合免疫算法.目前研究较多的混合免疫算法有免疫进化算法、免疫神经网络、免疫-多智能主体算法、免疫模糊算法等.此外,AIS 也属于涌现计算范畴^[7],因此免疫计算与群集计算的融合可望产生新的涌现计算方法.

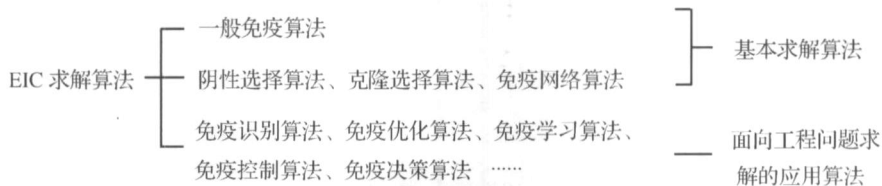


图 6 EIC 求解算法

Fig. 6 Solving algorithms for EIC

智能计算方法的融合能够综合不同方法各自的特点、各取所长,从而为问题求解提供更加有效的手段.目前虽然已经有一些将免疫计算和其他智能计算方法进行混合的研究与应用,但是大都局限于低层次的简单混合,停留在简单地其他方法中通过

嵌入免疫操作利用免疫机理(主要是抗体多样性机理)改进已有算法,尤其是对遗传算法进行改进.混合免疫计算有待向深层次发展,即通过将免疫计算的主要特点和思想引入其他智能计算方法,或将其他方法的主要特点和思想引入免疫计算,从而实现

免疫计算和其他智能计算方法的真正融合.例如,可以考虑将粒子群算法中邻域的有关思想引入免疫计算,从而实现个体之间的信息共享和利用;也可以考虑在免疫计算中利用蚁群算法中信息素的有关思想为解的搜索提供线索和暗示.

3.3 工程免疫计算的工程应用

如前所述,EIC 在解决工程领域中的实际问题时,首先将待求解的具体应用问题抽象或转换为典型的工程问题,然后再结合 AIS 的相关原理和技术对得到的工程问题进行求解.因此,EIC 的工程应用包括 3 个部分,即 EIC 的应用领域、EIC 的应用问题和工程问题.

3.3.1 EIC 的应用领域和应用问题

自从 Farmer^[19]等首次将免疫机理和人工智能方法结合从而为基于免疫策略解决工程实际问题做出开拓性工作以来,免疫系统的许多机理和特性已经在工程中获得了广泛应用,涉及诸多应用领域和应用问题.EIC 应用领域从工程的角度提供了 EIC 应用的范围,而 EIC 应用问题则是指各个应用领域中潜在的可用 EIC 求解的具体问题.根据目前发展情况来看,EIC 的应用领域主要有信息安全、故障诊断、机器人技术、自动控制、数据处理、图像处理、产品设计与制造等,表 1 简单列举了以上各领域中 EIC 的典型应用问题.

表 1 EIC 的应用领域及其典型应用问题
Table 1 Application fields and typical application problems of EIC

应用领域	应用问题
信息安全	网络入侵检测、病毒检测
故障诊断	传感器故障诊断、在线设备故障诊断
机器人技术	路径规划、多机器人群体控制
自动控制	马达移动控制、噪声抑制
数据处理	数据压缩、数据挖掘
图像处理	符号和文字的识别、图像分割
产品设计	形状优化、布局设计
产品制造	车间调度、加工路径规划

3.3.2 工程问题

如前所述,本文根据 EIC 目前的应用状况,将 EIC 工程领域中的各种应用问题聚类归纳为六大类典型的工程问题,即识别、优化、学习、控制、决策和协同.表 2 简单列举了各类工程问题所对应的典型应用问题.

表 2 EIC 各类工程问题对应的典型应用问题
Table 2 Kinds of engineering problems of EIC and their typical application problems

工程问题	应用问题
识别	病毒检测、传感器故障诊断
优化	形状优化、加工路径规划
学习	数据聚类、图像分割
控制	马达移动控制、噪声抑制
决策	机器人路径规划、设计方案决策
协同	多机器人群体控制、协同设计

工程问题的求解是基于由 EIC 仿生机理映射得到的各种免疫算法实现的,而 EIC 仿生机理在问题求解过程中直接或者间接地起作用.识别是免疫系统在工程中最直接的应用,它主要利用的 EIC 仿生机理是免疫识别,识别或匹配是该仿生机理直接作用的结果.与识别不同,优化、学习、控制、决策和协同等工程问题则一般利用多种 EIC 仿生机理综合作用表现出的某种能力对问题进行求解,仿生机理所起的作用是间接的.例如,复杂优化问题的求解通常借助免疫记忆、克隆选择、免疫网络、抗体多样性和疫苗接种等多种 EIC 仿生机理^[4,9,11-12,18-23],免疫优化算法所具有的强大寻优能力正是各种仿生机理综合、间接作用的结果.

3.4 工程免疫计算的理论分析和实现方法

EIC 的理论分析是指对 EIC 的各种算法进行数学上的分析,包括对算法进行的收敛性、收敛速度、稳定性、计算复杂度和鲁棒性等方面的分析,有关工作不仅能够为 EIC 奠定理论基础,同时还可以为各种算法的评价和改进提供理论依据.EIC 的实现方法构成 EIC 的方法学,它讨论如何设计和开发一个面向工程实际问题求解的免疫算法,涉及的主要内容包括 EIC 算法设计应该遵循的原则、EIC 算法的组成要素及其确定方法、EIC 的基本实现步骤以及每一步骤中应该考虑的问题等.EIC 的理论分析和实现方法分别为 EIC 提供理论支持和方法指导.

4 基于工程免疫计算的产品设计

EIC 具有丰富的仿生机理,如免疫识别、免疫学习、免疫记忆、克隆选择、免疫网络、抗体多样性、免疫调节、免疫反馈、分布式、疫苗接种、免疫耐受和免疫代谢等,从而一方面使得 EIC 具有很强的学习、识别、记忆及特征提取等能力,提供了一种强大的信息处理和问题求解范式;另一方面也使得 EIC 也具有分布式、并行性、自学习、自适应、自组织、全局优化性、鲁棒性和涌现性等诸多优良特性.由于 EIC

所具有的信息处理和问题求解能力以及优良特性,一方面与产品设计的许多方面有着紧密联系,另一方面也十分符合产品设计这一智能活动的特点和要求,因此 EIC 和产品设计两者的结合,即基于 EIC 进行产品设计是 EIC 的一个重要发展方向。

前文采取自下而上的思路,根据 AIS 解决各种工程实际问题所具有的共性特点和聚类特征提炼形成了 EIC 的概念,本节则将采用自上而下的思路,以产品设计这一 EIC 典型应用领域为例,对基于 EIC 的工程应用作进一步说明。虽然本节以产品设计为例进行讨论,但有关思想和方法也可为 EIC 的其他各种工程应用提供一定借鉴和参考。

设计过程的本质是对设计问题进行求解的过程,此外在设计过程中,设计对象——产品经历的是一个演化过程。作为问题求解和信息处理的新范式,EIC 不仅可以为产品设计过程中各种复杂设计问题的求解提供有力支持,还可以为产品的演化机制提供灵感和借鉴,从而支持设计过程中产品的逐步演化。由于基于 EIC 的产品设计借鉴了生物免疫系统运行机制中所蕴涵的信息处理模式和计算模式,从而为产品设计提供智能支持,因此基于 EIC 的产品设计可简单称之为免疫设计。下面分别从面向问题求解的免疫设计和面向产品演化的免疫设计 2 个方面对免疫设计方法进行阐述。

4.1 面向问题求解的免疫设计

设计过程的本质就是对设计问题进行求解的过程。传统的设计过程问题求解方法有试错法、枚举法、解析法、分治法和启发式方法等,它们都有各自的局限性。随着仿生计算等新一代人工智能技术的兴起和发展,基于仿生计算技术的设计问题求解已经成为当前设计过程问题求解的一种重要途径。

EIC 致力于研究和探索面向复杂工程实际问题求解的免疫计算方法,其核心是将各种工程应用问题通过抽象或转换归结为典型的工程问题,然后结合 AIS 的原理与技术进行求解。本文第 3 节根据目前 AIS 的应用状况,将工程实际中的各种应用问题进行聚类归纳得到识别、优化、学习、控制、决策和协同 6 大类典型工程问题。实际上,在产品设计领域中,虽然产品设计的具体问题各种各样,其要求和目标也各不相同,但是产品设计中潜在的适于用 EIC 进行求解的各种应用问题经过抽象或转换,也可以概括归纳为上述 6 大类工程问题。因此,面向设计问题求解的免疫设计就是指基于 EIC 方法对产品设计中经过抽象或转换得到的识别、优化、学习、控制、决策和协同等 6 大类典型工程问题进行求解,下面将分别进行简要分析与说明。

1) 优化问题在产品设计领域中普遍存在,而组合优化、多峰函数优化、动态多目标优化、复杂约束

优化和非线性优化等问题至今仍没有较好的求解方法。EIC 的诸多仿生机理,如免疫记忆、克隆选择、免疫网络、抗体多样性和疫苗接种等都具有寻优的特征或者有利于实现寻优,从而使得 EIC 具有强大的寻优能力,能够为优化问题尤其是复杂优化问题的求解提供新的途径和方法。

2) 识别是指对事物或现象进行辨识,其过程主要包括特征提取、训练和匹配等环节,EIC 的免疫识别、免疫网络和克隆选择等仿生机理以及各种免疫识别算法^[3,24]可为设计方案和产品实例等的识别提供有效方法。

3) 学习包含由低到高的 3 个层次,首先是常规学习,它又可进一步分为聚类学习和分类学习;其次是基于免疫记忆机制的联想学习;第 3 个层次是实现创新式学习,这是实现起来难度颇大的一种学习方式。以免疫学习为代表的 EIC 仿生机理及各种免疫学习算法^[14-15,25-27]使 EIC 可以为各种学习方式提供参考范例,可为产品族设计中客户需求以及核心平台的聚类分析以及设计方案和产品实例的联想记忆等提供支持。

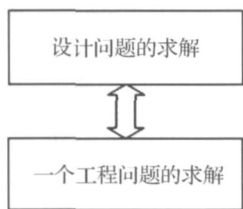
4) 决策问题在产品设计中也广泛存在,如设计方案的评价和决策等。简单来讲,决策就是依据一定标准,从若干备选方案中选择一个最优方案。基于免疫策略的决策算法^[28-29]为决策问题的有效解决提供了新的思路和方法,适合于用 EIC 求解的决策问题包括群体决策和多目标决策等。

5) 免疫系统通过各种免疫细胞之间的协同效应完成免疫应答任务,其中蕴涵和体现了分工协作的思想,并被成功用于解决机器人技术领域中的协同问题,如多机器人系统群体控制^[29-30]等。协同设计体现了并行工程的思想,是现代产品设计的重要方法之一。借助免疫网络和分布式等 EIC 仿生机理以及免疫系统的自组织、自适应和群体突现等特性进行基于免疫策略的协同设计是一项值得探讨和富有意义的研究工作。例如,可以考虑将 EIC 和分布式人工智能的研究成果——多智能主体系统相结合,构造免疫-多智能主体系统进行协同设计中设计方案的协同决策。具体地,可以将协同设计小组中的各个设计专家分别对应于一个智能主体,然后利用免疫机理构造单个智能主体的行为规则以及各智能主体之间的通信、协调和协作策略,并利用抗原(对应于设计要求和设计目标)和抗体(对应于专家的设计方案)之间的相互作用以及抗体之间的促进和抑制作用,实现协同设计小组中各设计专家的设计方案的协同决策。

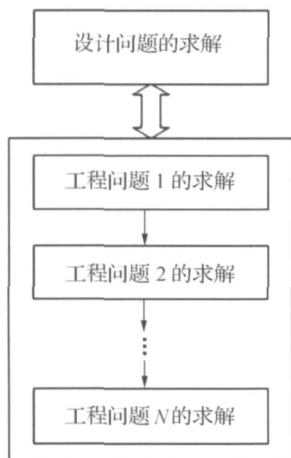
6) 控制可以分为多种类型,如经典的反馈控制以及现代控制理论中的自适应控制、最优控制、分布式控制和神经控制等。除此之外,系统辨识也是控制

问题的一项重要研究内容. EIC 的免疫反馈、克隆选择、免疫耐受以及免疫调节等仿生机理都已经成功用于控制理论中^[6-8,31],因而可为产品设计中广泛存在的控制问题,如高精度数控机床伺服进给系统的控制设计、汽车空调控制系统的设计等提供启发和参考.

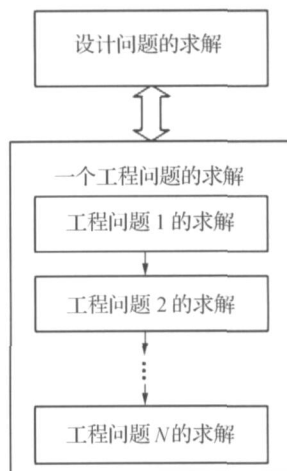
图7给出了设计问题的求解框架.在实际产品设计中,设计问题(也就是EIC的工程应用问题,它在产品设计领域中按习惯仍然称为设计问题)经过抽象和转换,可能得到一种典型工程问题,也可能得到的是若干种典型工程问题的组合.对于前一种情况,设计问题的求解框架由对这一个工程问题的求解过程构成,见图7(a);而对于后一种情况,设计问题的求解框架可以采用2种不同的结构形式.具体来说,如果经问题分析得到的几个工程问题相互之间存在平行并列关系,即这几个工程问题都构成原问题的子问题而且对于原问题的求解处于平等地位,则采用叠加式结构,见图7(b),也就是依次对所得到的各个工程问题进行求解;如果经问题分析得到的几个工程问题相互之间存在主次关系,即原问题主要对应于某一个工程问题,而其他几个工程问题对于原问题的求解只是起到辅助作用、处于次要地位,这时则采用嵌入式结构,见图7(c),即以某一个工程问题的求解为主线,而将对其他工程问题的求解穿插和嵌入到对该工程问题的求解过程之中.



(a)对一种典型工程问题的求解过程



(b)叠加式结构



(c)嵌入式结构

图7 设计问题的求解框架

Fig. 7 Solving framework of design problems

对于面向问题求解的免疫设计, EIC 只在设计问题求解层次提供设计支持, 因此 EIC 为产品设计提供的是一种较低层次的辅助性支持.

4.2 面向产品演化的免疫设计

在设计过程中, 作为设计对象的产品经历的是一个演化过程. 在这个过程中, 一方面, 产品通过由粗到细的逐步求精过程, 其功能和结构等不断被细化, 使得产品逐步变得清晰、明确; 另一方面, 产品经历了一种类似生物进化的过程, 表现在产品的初始解不断得到改善, 从而逐步进化得到满足设计要求和设计约束的优化可行解. 在产品演化过程中, 产品演化机制起着关键作用, 它决定了产品演化的机理和方式, 而生物进化机制如遗传进化机制、共进化机制、竞争机制、学习机制以及各种免疫机制等自然演化机制都是产品演化机制的灵感源泉, 可以为之提供丰富的借鉴.

面向产品演化的免疫设计是指直接基于免疫系统的概念、功能、机制、原理和特征进行产品设计. 在免疫设计中, 抗原对应于设计的目标、要求和约束, 抗体则对应于设计结果即产品, 并且产品的演化将按照免疫系统的运行机制进行, 产品是免疫设计的突现结果.

对于面向产品演化的免疫设计, EIC 为产品的演化提供了动力机制, 因此 EIC 为产品设计提供的是一种较高层次的直接支持.

5 工程免疫计算展望

EIC 是以工程应用为导向的免疫计算方法, 旨在为解决工程实际中的各种复杂问题提供有力支持, 具有广阔的应用前景. 以下结合 AIS 在工程领

域中的应用现状^[1-2,6-8]及其存在的问题,就 EIC 工程应用的发展方向进行展望分析。

1) 免疫系统复杂而灵活多样,可以为解决工程实际中的各种复杂问题提供丰富的仿生隐喻机制,然而目前大多数面向工程应用的算法和模型只是抽取了免疫系统的部分机理,或只对一些机理简单地加以利用(实际上,免疫应答任务的完成是各种免疫机制综合、协同作用的结果),这在很大程度使 EIC 解决工程实际问题的能力受到限制;另一方面,由于免疫系统自身的复杂性,免疫系统动态机制的模拟以及各种机制的组合应用具有很强的灵活性,使得开发合理、有效的免疫算法具有一定难度。为了解决上述问题,应根据工程实际问题的特点和要求,充分挖掘和利用免疫系统的仿生隐喻机制,努力寻找“免疫”和“工程”的结合点,尝试从多个方面实现免疫思想和工程实际的结合,开发既能合理体现免疫系统运行机制和应答过程又能有效解决工程实际问题的免疫算法。

2) 免疫计算虽然已经在许多工程领域中得到了应用,但是在有些领域中的应用仍然比较粗浅,有待进一步深化。例如,免疫计算在数据挖掘中的应用目前仅限于数据聚类分析和归类等任务,还没有真正走向工程实用,如大规模的 Web 数据挖掘、文本挖掘以及面向大规模工程数据库、多媒体数据库等的知识挖掘任务等,问题的关键包括学习算法缺乏健壮性和适应性,以及系统缺乏对不确定和模糊性等非规则信息处理的能力等。此外,免疫计算在优化问题求解方面具有很大的优越性,已经在函数优化和组合优化等方面得到广泛应用,并表现出明显优势,但是免疫计算在解决多目标动态优化、约束优化等复杂优化问题方面还处于起步和探索阶段,其研究也有待进一步深入。

3) 应用领域及其应用问题的拓展。免疫计算虽然在近十几年间获得了相当大的发展并被成功应用于一些领域的工程实际中,但是仍然没有取得和其他智能计算方法如遗传算法、神经网络、模糊系统等一样的地位。如前所述,EIC 具有强大的信息处理和求解能力,可以为广泛的工程应用提供有效的支持。因此,开辟新的 EIC 应用领域、拓展 EIC 的应用范围并尝试利用 EIC 解决目前还没有涉及的一些新的应用问题是 EIC 发展的一个重要方向。

4) 特别地,应该加强和深化免疫计算在产品设计领域中的应用。目前免疫计算在产品设计领域中的应用主要是被用于解决各种优化设计问题。虽然与信息安全、故障诊断、机器人技术和自动控制等相

比,产品设计是 EIC 的一个相对较新的应用领域,但 EIC 在产品设计领域中的应用却有着巨大发展潜力和广阔的前景。具体来说,EIC 在产品设计领域中的应用发展可以围绕以下几个方面进行:

提高 EIC 解决多峰函数优化、动态多目标优化、复杂约束优化和非线性优化等各种复杂优化问题的能力,从而为工程优化提供有效的解决手段和促进 EIC 在工程优化中的实际应用。

尽管目前 EIC 在产品设计中关于识别、控制、决策以及聚类、分类和联想记忆学习等问题的应用还比较少见,但是这些问题在产品设计中同样大量存在,如产品实例识别、设计方案决策、产品控制系统设计以及产品设计案例联想记忆、产品族设计中客户需求和核心平台的聚类分析等。因此,需要进一步加强 EIC 在产品设计中有关识别和学习等问题的应用,从而为产品设计提供更加广泛的支持工具。

探讨基于免疫策略的协同设计方法。免疫系统在整体上形成了一个分布式的多 Agent 自治系统^[32],从而可为协同问题的有效解决提供新的启发思路。作为 EIC 的典型工程问题之一,协同问题旨在借鉴生物免疫系统的网络协同机制和群体突现特性,研究基于免疫策略的智能体单元之间的通信、协调和协作机理,以实现复杂问题的协同求解。由此可知,EIC 可为复杂产品协同设计提供有力的支持。

面向产品演化的免疫设计方法的研究。目前免疫计算在产品设计领域中最主要的应用是解决设计中的各种复杂优化问题,也有解决诸如识别、聚类和分类等问题的少数应用。总的来说,免疫计算主要局限于解决产品设计中出现的各种问题,如零件形状优化、产品结构优化、机构同构判定和设计方案的识别等;也就是说,免疫计算仅仅被作为设计的一种辅助工具,其应用仍然停留在较低的层次,还没有形成将免疫的思想和原理真正用于产品设计的成功应用。实际上,免疫系统具有很强的自组织学习抗原的能力,因而在进一步挖掘免疫学习仿生机理的基础上,深入研究免疫学习算法,探讨直接基于免疫系统概念、功能、机理、特征和原理的产品设计方法,即面向产品演化的免疫设计方法,是一项非常有意义的研究工作。可以预见,面向产品演化的免疫设计将为复杂产品创新设计提供新的方法和途径。此外,面向产品演化的免疫设计方法的关键技术包括设计建模、设计评价和免疫演化操作设计等,这些关键技术(尤其是免疫演化操作设计)同时也是面向产品演化的免疫设计方法的技术难点,有待进行细致而深入的研究。

参考文献:

- [1] de CASTRO L N, TIMMIS J. Artificial immune system: a new computational intelligence approach [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [2] 肖人彬, 王 磊. 人工免疫系统: 原理、模型、分析及展望 [J]. 计算机学报, 2002, 25(12): 1281 - 1293.
- XIAO Renbin, WANG Lei. Artificial immune system: principle, models, analysis and perspectives [J]. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(12): 1281 - 1293.
- [3] DE CASTRO L N, VON ZUBEN F J. Artificial immune system (part I): basic theory and application [R]. [S.l.], 1999.
- [4] 黄席樾, 张著洪, 何传江, 等. 现代智能算法理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [5] FORREST S, HOFMEYER S A, SOMA YAJI A. Computer immunology [J]. Communications of the ACM, 1997, 40(10): 88 - 96.
- [6] DASGUPTA D, ATTOH - OKINE N. Immunity based systems: a survey [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Computational Cybernetics and Simulation [C]. Orlando: IEEE Press, 1997.
- [7] 丁永生, 任立红. 人工免疫系统: 理论和应用 [J]. 模式识别与人工智能, 2000, 13(1): 52 - 59.
- DING Yongsheng, REN Lihong. Artificial immune systems: theory and applications [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2000, 13(1): 52 - 59.
- [8] 焦李成, 杜海峰. 人工免疫系统进展与展望 [J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1540 - 1548.
- JIAO Licheng, DU Haifeng. Development and prospect of the artificial immune system [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(10): 1540 - 1548.
- [9] CHUN J S, LIM J P, JUNG H K. Optimal design of synchronous motor with parameter correction using immune algorithm [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 610 - 615.
- [10] LIU Y, XIAO R B. Optimal synthesis of mechanisms for path generation using refined numerical representation based model and AIS based searching method [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127(4): 688 - 691.
- [11] 李广强, 滕弘飞, 霍军周. 并行混合免疫算法及其在布局设计中的应用 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(6): 79 - 85.
- LI Guangqiang, TENG Hongfei, HUO Junzhou. Parallel hybrid immune algorithm and its applications to layout design [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(6): 79 - 85.
- [12] 曹先彬, 郑 振, 刘克胜, 等. 免疫进化策略及其在二次布局求解中的应用 [J]. 计算机工程, 2000, 26(3): 1 - 10.
- CAO Xianbin, ZHENG Zhen, LIU Kesheng, et al. Research on quadratic assignment problem using an immune evolution strategy [J]. Computer Engineering, 2000, 26(3): 1 - 10.
- [13] 肖人彬. 基于免疫计算的机构轨迹综合 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(6): 812 - 818.
- XIAO Renbin. Mechanism path synthesis based on immune computing [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(6): 812 - 818.
- [14] TIMMIS J, KNIGHT T. Data mining: a heuristic approach [M]. Hershey: Idea Publishing Group, 2001.
- [15] WATKINS A, BOGGESS L. A new classifier based on resource limited artificial immune systems [A]. Proceedings of Congress on Evolutionary Computation [C]. Washington, 2002.
- [16] XIAO R B, TAO Z W, LIU Y. Isomorphism identification of kinematic chains using novel evolutionary approaches [J]. ASME Journal of Computing and Information Science, 2005, 5(1): 18 - 24.
- [17] 肖人彬, 库 琼, 曹鹏彬. 基于免疫聚类识别的耦合功能规划方法与实例 [J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(9): 1421 - 1430.
- XIAO Renbin, KU Qiong, CAO Pengbing. Coupling function planning & practical example based on immune clustering recognition approach [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(9): 1421 - 1430.
- [18] CAO P B, XIAO R B. Assembly planning optimization using a novel immune approach [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 31(7 - 8): 770 - 782.
- [19] FARMER J D, PACKARD N H, PERELSON A S. The immune system, adaptation, and machine learning [J]. Physica D, 1986, 22(1): 187 - 204.
- [20] 王 磊, 肖人彬. 基于免疫记忆的人工免疫算法模型及其应用 [J]. 模式识别与人工智能, 2002, 15(4): 385 - 391.
- WANG Lei, XIAO Renbin. Artificial immune algorithm model based on immune memory [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2002, 15(4): 385 - 391.
- [21] 肖人彬, 刘 勇, 窦 刚. 面向多峰值函数优化的人工免疫网络算法特性分析 [J]. 模式识别与人工智能, 2005, 18(1): 17 - 24.
- XIAO Renbin, LIU Yong, DOU Gang. Analysis of the artificial immune network for multimodal function optimization [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2005, 18(1): 17 - 24.

- [22]王磊,潘进,焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74 - 79.
WANG Lei, PAN Jin, JIAO Licheng. Immune algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(7): 74 - 79.
- [23]罗小平,韦巍. 一种基于生物免疫遗传学的新优化方法[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 59 - 62.
LUO Xiaoping, WEI Wei. A new optimization method on immunogenetics[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(1): 59 - 62.
- [24]HAESELEER P, FORREST S, HELMAN P. An immunological approach to change detection algorithms: analysis and implications[A]. Proceedings of IEEE Symposium on Security and Privacy[C]. Oakland: IEEE Computer Society Press, 1996.
- [25]COOKE D E, HUNT J E. Recognising promoter sequences using an artificial immune system[A]. Proceedings of Intelligent Systems in Molecular Biology (ISMB '95)[C]. Cambridge: AAAI Press, 1995.
- [26]HUNT J E, COOKE D E. Learning using an artificial immune system[J]. Journal of Network and Computer Applications, Special Issue on Intelligent Systems: Design and Application, 1996, 19(1): 189 - 212.
- [27]de CASTRO L N, VON ZUBEN F J. An evolutionary immune network for data clustering[A]. Proceedings of Sixth Brazilian Symposium on Neural Networks[C]. Piscataway: IEEE Press, 2000.
- [28]DASGUPTA D. An artificial immune system as a multi-agent decision support system[A]. Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics[C]. San Diego: IEEE Press, 1998.
- [29]LEE D W, JUN H B, SIM K B. Artificial immune system for realization of co-operative strategies and group behavior in collective autonomous mobile robots[A]. Proceedings of Fourth International Symposium on Artificial Life and Robots[C]. Hajime: Tokyo Press, 1999.
- [30]LEE D W, SIM K B. Artificial immune network based cooperative control in collective autonomous mobile robots[A]. Proceedings of 6th IEEE International Workshop on Robot and human communication[C]. Sendai: IEEE Press 1997.
- [31]ISHIDA Y, ADACHI N. Active noise control by immune algorithm: adaptation in immune system as an evolution[A]. Proceedings of ICEC '96[C]. Piscataway: IEEE Press, 1996.
- [32]SATHYANATH S, SAHIN F. AISIMAM-An artificial immune system based intelligent multi agent model and its application to a mine detection problem[A]. Proceedings of 1st International Conference on Artificial Immune Systems[C]. Canterbury, U K: Springer-Verlag, 2002.

作者简介:



肖人彬,男,1965年生,教授,博士生导师,主要研究方向为群集智能与涌现计算、智能创新设计、复杂系统建模、管理系统模拟.主持国家自然科学基金6项,4次获得省部级科技进步奖;出版学术专著4部,其中《智能设计》获得全国优秀科技图书奖,发表学术论文100余篇,其中10余篇被SCI收录,60余篇被EI收录.

E-mail: rbxiao@mail.hust.edu.cn.



曹鹏彬,女,1974年生,讲师,博士,主要研究方向为智能设计与智能制造、智能计算及应用.

E-mail: caopengbin@263.net.



刘勇,男,1975年生,讲师,博士,主要研究方向为智能信息处理、模式识别,发表论文10余篇.

E-mail: yongliu@ctgu.edu.cn.