

文章编号: 1001-0920(2006)06-0601-05

基于进化算法的多目标优化方法

蓝艇^{1,2}, 刘士荣¹, 顾幸生²

(1. 杭州电子科技大学 自动化学院, 杭州 310018; 2 华东理工大学 自动化研究所, 上海 200237)

摘要: 进化算法在解决多目标优化问题中有其特有的优势. 首先对多目标优化问题进行了描述; 然后结合研究现状讨论了目前几种主要的基于进化算法的多目标优化方法, 以及它们的优缺点; 最后给出了多目标进化优化算法的一些应用, 以及进化多目标优化算法的未来发展方向

关键词: 进化算法; 多目标优化; Pareto 最优

中图分类号: TP301.6 **文献标识码:** A

Approaches of Evolutionary Multiobjective Optimization

LAN Ting^{1,2}, LIU Shi-rong¹, GU Xing-sheng²

(1. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2 Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China Correspondent: LAN Ting, E-mail: lanting@nbu.edu.cn)

Abstract: Evolutionary algorithms are particularly desirable to solve multiobjective optimization problems. Firstly, the multiobjective optimization problem is described. Then, several evolutionary multiobjective optimization approaches are discussed including their advantages and disadvantages. Finally, some applications of evolutionary multiobjective optimization are introduced and the future trends of this research topic are also addressed.

Key words: Evolutionary algorithm; Multiobjective optimization; Pareto optimum

1 引言

在现实工程中, 很多问题都是多目标优化问题, 需要同时满足两个或者更多的目标要求, 而且要同时满足的多个目标之间往往互相冲突, 此消彼长. 因此, 在多目标优化问题中, 寻求单一最优解是不现实的, 而是产生一组可选的折中解集, 由决策过程在可选解集中作出最终的选择.

进化算法在多目标优化问题中的应用最早由 Rosenberg 于 20 世纪 60 年代初提出的. 但是, 此后该问题的研究一直没有引起其他研究者的注意. 直到 80 年代中期, 多目标优化的进化计算方法才逐渐被广泛关注^[1].

本文对国内外基于进化算法的多目标优化 (EMOO) 的研究现状进行综述. 首先介绍了多目标优化问题; 然后讨论了目前主要的几种方法及其优

缺点; 最后给出了多目标优化研究中的未来发展方向.

2 多目标优化问题

多目标优化 (MOO) 可以描述为: 一个由满足一定约束条件的决策变量组成的向量, 使得一个由多个目标函数组成的向量函数最优化. 目标函数组成了性能标准的数学描述, 而性能标准之间通常是互相冲突的. 优化意味着要找到一个使得所有目标函数值都可接受的解.

多目标优化问题中的最优概念最先由 Francis Ysidro Edgeworth 提出, 后来 Vilfredo Pareto 给出了系统的定义, 通常称为 Pareto 最优.

不失一般性, 在一个有 k 个目标函数最大化的问题中, 称决策向量 $x^* \in F$ 是 Pareto 最优的, 当不存在另外一个决策向量 $x \in F$ 同时满足

收稿日期: 2005-07-19; 修回日期: 2005-11-02

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (Y104560); 浙江省留学回国基金项目.

作者简介: 蓝艇 (1976—), 男, 浙江象山人, 博士生, 从事优化理论、智能机器人的研究; 刘士荣 (1952—), 男, 浙江安吉人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与控制、智能机器人与智能系统等研究.

$$f_i(x) \leq f_i(x^*), \forall i \in \{1, 2, \dots, k\}, \quad (1)$$

$$f_j(x) > f_j(x^*), \exists j \in \{1, 2, \dots, k\}. \quad (2)$$

同样地,在最大化问题中称决策向量 x 是优于 y 的 (x dominate y), 记为

$$x \succ y.$$

当其同时满足

$$f_i(x) \leq f_i(y), \forall i \in \{1, 2, \dots, k\}, \quad (3)$$

$$f_j(x) > f_j(y), \exists j \in \{1, 2, \dots, k\}. \quad (4)$$

在上述定义下,多目标优化的结果通常是得到一个解集,称为 Pareto 最优集. 解集中的决策向量称为非劣的. 用图形化的方式表示由 Pareto 最优集中非劣向量所对应的目标函数值称为 Pareto 前沿. 以具有两个目标函数 f_1 和 f_2 的最大化问题为例. 假设图 1 中实线和虚线所包围的区域为解空间所对应的目标函数值域, 其中的实线部分就是该优化问题的 Pareto 前沿. 一般而言, 要得到 Pareto 前沿的解析表示是很困难的. 通常的方法是寻找落在实线上的解向量 (非劣向量), 当这些解足够多时可近似认为得到了优化结果.

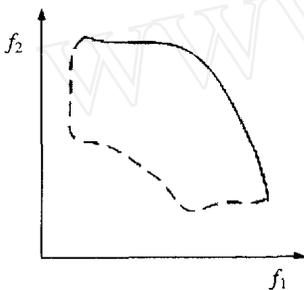


图 1 Pareto 前沿

多目标优化问题中的主要任务就是在满足一定约束条件的参数空间内搜索 Pareto 最优集 (非劣向量集合). 为了求得 Pareto 最优集, 研究者提出了各种各样的方法, 而最近提出的基于进化算法的多目标优化方法受到越来越多的关注. 本文主要讨论目前常见的几种基于进化算法的多目标优化方法.

3 EMOO 的主要方法

使用进化算法解决多目标优化问题的优点在于: 进化算法并行地处理一组可能的解 (群体), 不需要分别运算多次便能在一次算法过程中找到 Pareto 最优集中的多个解^[2]. 此外, 进化算法不局限于 Pareto 前沿的形状和连续性, 易于处理不连续的、凹形的 Pareto 前沿, 这在数学规划技术中是两个非常重要的问题.

3.1 聚合函数法

传统的遗传算法是在一个给定的适应函数的指导下在解空间中搜索. 因此, 利用遗传算法解决多目

标优化问题的方法之一就是多个目标函数表示成一个目标函数作为遗传算法的适应函数. 这个转化过程称为聚合. 加权法就是其中常见的一种方法. 对于一个有 k 个目标的最小化问题, 适应函数可以表示为

$$\min_{x \in X} \sum_{i=1}^k w_i f_i(x). \quad (5)$$

采用该方法最大的好处在于, 不用对遗传算法作任何改动. 但是, 优化结果跟权重的选择有很大关系. 特别地, 当缺乏优化问题信息时, 权重就很难确定. 此外, 如果 Pareto 前沿是凹形的, 则无论如何选择权重都很难得到 Pareto 最优集^[3]. 改进的方法有自适应权重法, 其在处理凹形 Pareto 前沿的情形时具有一定效果^[4].

3.2 向量评价遗传算法

Schaffer 在向量评估遗传算法 (VEGA) 中主要对遗传算法中的选择算子作了改进^[5]. 在进化过程中, 子种群的产生是根据每一个目标函数分别进行选择. 对于有 k 个目标函数, 种群大小为 M 的问题, 每一次进化产生 k 个大小为 M/k 的子种群. 将 k 个子种群合成一个大小为 M 的新种群, 再进行交叉和变异操作产生下一代.

在 VEGA 算法中, 每个子种群只根据单个目标函数产生, 而不考虑其他目标函数. 因此, VEGA 得到的解是局部非劣的, 但不一定是全局非劣的, 也就是说不同子种群中的个体仅是在子种群范围内对某一单个目标优化. 这就导致了一种非常不利的情形: 在进化过程中, 可能存在一个中间性能的个体对获得最后的折中解有利, 但在子种群的选择中却被淘汰, 因为他们在单个目标评价中不是最优的.

3.3 多目标遗传算法

Fonseca 和 Fleming 提出的多目标遗传算法 (MOGA) 采用一种基于等级的适应度指派策略^[6]. 首先种群中每一个个体的等级根据其所优于其他个体的数量来确定. 所有非劣个体的等级为 1, 而劣个体的等级可根据下式确定:

$$\text{rank}(x_i, t) = 1 + p_i^{(t)}. \quad (6)$$

其中: x_i 为第 i 个个体; t 为迭代代数; $p_i^{(t)}$ 表示在 t 代中 x_i 劣于 $p_i^{(t)}$ 个个体.

采用封闭适应度指派策略会产生较大的选择压力而导致种群过早收敛; 采用小生境形式可以在一定程度上保证种群在 Pareto 最优区域的均匀分布^[6]. MOGA 在解决多目标优化问题时 (特别在控制系统设计领域), 因有很好的性能而被广泛采用. 但是, 同其他基于 Pareto 分级方法一样, 算法的性能过多依赖于共享因子的精确选择.

3.4 非劣排序遗传算法

非劣排序遗传算法(NSGA)的基本思想是用分级选择方法来突出好的个体,以及用小生境方法来维持优秀个体子种群的稳定^[7]。

与MOGA相比,NSGA方法的总体性能和计算复杂度都不如MOGA方法,而且NSGA对共享因子更加敏感。但是,Deb等人后来对NSGA方法进行了改进(称为NSGA-II)。在NSGA-II中使用了精英选择策略,以及拥挤距离,大大改进了上述缺点。计算复杂度也从原来的 $O(MN^3)$ 减少到 $O(MN^2)$,这里 M 代表目标的数量, N 代表种群的大小^[8]。

3.5 小生境 Pareto 遗传算法

小生境 Pareto 遗传算法(NPGA)将传统遗传算法的选择算子改进为基于 Pareto 优劣的比武选择策略^[9]。不像传统的遗传算法只比较两个个体,而是多个个体参与竞争。当两个参与竞争者都是非劣的或者劣的,比武的结果应根据目标域内的适应值共享来决定。

NPGA不需要将 Pareto 分级应用到整个种群,而仅仅是其中的一部分。因此,它通常比MOGA和NSGA的计算速度快,但种群大小比其他方法大。除了共享因子外,该方法还需要一个参数来表示参与比武的个体个数。

3.6 Pareto 存档进化策略

Pareto 存档进化策略(PAES)方法与前面介绍的几种算法最大的区别在于将局部搜索引入到多目标优化中,因此大大减小了计算的复杂度^[10]。该算法在进化过程中仅使用变异算子,产生的个体副本被限制在一个局部范围,即 $(1+1)$ 的进化策略。

PAES方法的优点在于计算复杂度低。但是该方法也损失了基于群方法的一些优点。因此,Knowles等人在此基础上提出了M-PAES,将群体的优势结合到局部搜索中,在一定范围内作交叉计算^[11]。

3.7 强度 Pareto 进化算法

强度 Pareto 进化算法(SPEA)是在综合上述几种多目标进化优化算法的基础上发展而来。SPEA用一个外部非劣集保存每一次迭代过程找到的非劣解^[1]。在外部非劣集中,第 i 个个体的强度是一个 $[0, 1]$ 的实数 s_i ,即

$$s_i = \frac{n}{N+1} \quad (7)$$

其中: n 为在当前种群中该个体所优于其他个体的个数, N 为当前种群大小。对于外部非劣集中的个体,其适应值就等于其强度值,即 $f_i = s_i$;而对于当前种群中的个体,其适应值等于外部非劣集中所有

优于该个体的强度值之和。

SPEA与其他集中算法的不同点在于:个体的适应值只取决于外部非劣集中的存档,而与个体之间的相关性无关;外部非劣集中的个体同样参与竞争;特别地,采用基于Pareto的小生境方法不需要距离参数^[1]。

Zitzler在后来的研究中对SPEA作了改进(称为SPEA2)。SPEA2算法使用的是细粒度赋值策略,它融合了个体的密度信息^[12]。熊等人在SPEA2的基础上采用了全局并行模型和粗粒度并行岛模型^[13],将整个群体划分成若干子群体,这些子群体的演化是同步进行的。在全局范围内,每个子群体中个体的评价和遗传操作是并发进行的,由于采用了并行化的方法,计算性能得到了提高。

3.8 协同进化多目标优化算法

将协同进化概念引入到多目标优化中是最近几年出现的一种方法^[14,15]。其中Coello等人^[15]提出的方法是将搜索空间细分成若干个子区域,对于每一个子区域使用一个子种群,在进化过程中这些子种群之间互相协作和竞争,最终得到一个Pareto前沿。实验结果显示可以与其他几种方法(NSGA-II, PAES, microGA)相媲美^[15]。

3.9 多目标优化 PSO 算法

粒子群优化算法(PSO)已经成功用于解决单目标优化问题。由于其具有较快的收敛速度以及在单目标优化问题中的成功经验,最近也有学者开始研究用PSO算法解决多目标优化问题^[16,17]。

Coello的MOPSO方法是将搜索空间分成超立方体,并作为粒子的参考坐标系,粒子在超立方体内的坐标由每个目标函数的值来确定^[16]。MOPSO与其他算法(NSGA-II, PAES)相比具有较快的收敛速度,而且也同样得到了较满意的Pareto前沿^[16]。

3.10 多目标优化免疫算法

在多目标优化免疫算法中,优化问题的可行解对应抗体而Pareto最优个体对应抗原。这种抗原存于抗原群中,并应用新的聚类算法不断更新抗原群中的抗原,进而获得大量的Pareto最优解^[18~20]。

根据Coello在其文献中的实验结果可知,在解决非约束多目标优化问题时该方法能够得到比较满意的解,甚至比其他几种常见的方法(如:NSGA-II, PAES等)更好^[18]。黄等人的仿真结果也表明基于免疫应答原理所得到的解能很好地分布于Pareto前沿^[20]。基于免疫算法的多目标优化方法在保持解的多样性上有一定的优势。

4 EMOO 的应用

由于进化算法在解决多目标优化问题中的特有

优势和有效性,EMOO 已经被应用到许多领域,包括软件设计、控制工程、系统规划、生产调度等等

Zitzler 等人将SPEA 应用到计算机工程软硬件系统设计中。在视频编码器的设计中,对成本、时延和功耗等作优化设计。在软件设计中,对内存使用和运算效率进行优化^[21]。

EMOO 在控制工程中的应用主要集中在参数优化等问题上,譬如:汽车控制系统设计中的动态模拟参数优化;液压传动系统中的控制参数优化和工程设计问题;机器人技术中的运动规划问题等^[22, 23]。

在移动通讯网络基站的分布规划以及基站的功率与频率配置也是一个多目标优化问题^[24, 25]。在满足服务的前提下,既要节约基站的成本,又要尽量减少基站之间的冲突和干扰

在生产领域中,EMOO 还被用于生产计划调度和控制、生产线优化、灵活制造以及多目标价值链的设计^[26, 27]。

5 研究展望

基于进化算法的多目标优化方法已经受到越来越多的关注,但在EMOO 的发展和应用过程中,仍有大量问题值得探索和发展。以下几个方面值得关注:

1) 收敛性和多样性。

算法的收敛性和解的多样性是EMOO 理论性研究的两个重要内容。收敛性对于一个算法来讲是至关重要的,在许多文献中只是用实验的方法来说明算法可以收敛到 Pareto 最优集,而关于收敛性的理论研究还不多见。多目标优化算法的目的是要得到在 Pareto 前沿尽可能均匀分布的一组解,而非单个非劣解。因此在多目标优化问题中,保持解的多样性是一个非常关键的问题。为了保持多样性,目前用的最多的是基于小生境的适应度共享技术,共享因子的计算方法还值得深入研究。基于免疫应答原理的多目标优化方法在保持多样性上也有一定的优势^[19, 20]。免疫原理的作用减少了相似个体的复制概率,尽可能在进化过程中保持群体的多样性。

2) 算法的评价准则。

为了验证算法能否处理多目标问题,往往需要设计一些测试函数来评价该算法。一直以来,大家都沿用几种常见的测试函数来验证自己的算法,很少关注测试函数本身的设计。此外,由于基于进化算法的多目标优化得到的是一个近似的优化结果集合,如何评价不同算法得到的优化结果好坏需要一个度量标准。虽然目前已经在这方面有了一些研究^[28],但仍有许多问题需要解决,譬如在衡量算法的时候

考虑算法的随机性等

3) 与决策偏好的结合。

在以前的多目标优化问题的研究中,大多都集中在在非劣解集的搜索,很少考虑到决策者的偏好。而在一个实际的多目标优化问题中,决策者必须要在众多可能的解中作出一个选择^[29]。因此,如何将决策者的偏好结合到EMOO 方法中,使搜索的结果集主要集中在决策者感兴趣的区域,也是一个非常值得研究的内容。

4) 效率。

同其他领域的算法一样,EMOO 算法实现的效率也是一个值得关注的问题,特别是当算法应用到解决实际问题的時候。提高效率的途径主要有两种:一种是对现有的算法进行改进以提高算法的效率;而另外一个途径是对实现算法的方法进行优化,合理地设计算法的数据结构来提高运算效率^[30]。尤其是在实际应用中,第二种途径就非常值得重视。

5) 处理约束问题。

在工程优化中处理约束问题非常关键。罚函数是一种使用比较多的方法,但是罚函数方法处理约束问题的性能在很大程度上取决于罚系数的选择。也有研究者提出了用约束主导原理来处理多目标优化中的约束问题^[31, 32]。在处理约束问题的方法上,还值得更加深入的研究。

6 结 语

进化算法能够同时处理一组可能的解(群体),并在一次算法过程中就可以找到 Pareto 最优集中的多个解,而且进化算法能够处理非线性问题。许多实际应用例子也证明了该方法的有效性。

目前,多目标进化优化算法的研究在国外发展很快,并取得了许多研究成果,也得到了国内不少研究者的关注。但是多目标进化优化算法理论及其应用还值得更加深入地研究和完善。

参考文献(References)

- [1] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 257-271.
- [2] Coello C A C. A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques [J]. *Knowledge and Information Systems*, 1999, 1(3): 269-308.
- [3] Das I, Dennis J. A Closer Look at Drawbacks of Minimizing Weighted Sums of Objectives for Pareto Set Generation in Multicriteria Optimization Problems [J]. *Structural Optimization*, 1997, 14(1): 63-69.
- [4] Jin Y, Okabe T, Sendhoff B. Adapting Weighted

- Aggregation for Multiobjective Evolution Strategies [A]. *First Int Conf on Evolutionary Multi-Criterion Optimization* [C]. Zurich: Springer-verlag, 2001: 96-110
- [5] Schaffer J D. Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms [A]. *Proc of the First Int Conf on Genetic Algorithms* [C]. Lawrence Erlbaum Associates, 1985: 93-100
- [6] Fonseca C M, Fleming P J. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization [A]. *Proc of the Fifth Int Conf on Genetic Algorithms* [C]. San Mateo: Morgan Kaufman Publishers, 1993: 416-423
- [7] Srinivas N, Deb K. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms [J]. *Evolutionary Computation*, 1994, 2(3): 221-248
- [8] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197
- [9] Horn J, Nafpliotis N, Goldberg D E. A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization [A]. *Proc of the First IEEE Conf on Evolutionary Computation* [C]. New Jersey: IEEE Press, 1994: 82-87
- [10] Knowles J, Corne D. The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Multiobjective Optimization [A]. *Congress on Evolutionary Computation* [C]. Washington: IEEE Press, 1999: 98-105
- [11] Knowles J, Corne D. M²PAES: A Memetic Algorithm for Multiobjective Optimization [A]. *Congress on Evolutionary Computation* [C]. New Jersey, 2000: 325-332
- [12] Zitzler E, Thiele L. Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results [J]. *Evolutionary Computation*, 2000, 8(2): 173-195
- [13] 熊盛武, 李锋. 并行 Pareto 多目标演化算法 [J]. *武汉大学学报*, 2003, 49(3): 318-322
(Xiong S W, Li F. Parallel Pareto Multiobjective Evolutionary Algorithm [J]. *J of Wuhan University*, 2003, 49(3): 318-322)
- [14] Pamee I C, Watson A H. Preliminary Airframe Design Using Co-Evolutionary Multiobjective Genetic Algorithms [A]. *Proc of the Genetic and Evolutionary Computation Conf* [C]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1999: 1657-1665
- [15] Coello C A C, Sierra M R. A Coevolutionary Multi-Objective Evolutionary Algorithm [A]. *Congress on Evolutionary Computation* [C]. Canberra: IEEE Press, 2003: 482-489
- [16] Coello C A C, Lechuga M S. MOPSO: A Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization [A]. *Congress on Evolutionary Computation* [C]. New Jersey, 2002: 1051-1056
- [17] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Particle Swarm Optimization Method in Multiobjective Problems [A]. *Proc of the ACM Symposium on Applied Computing* [C]. Madrid, 2002: 603-607
- [18] Coello C A C, Cortes N C. An Approach to Solve Multiobjective Optimization Problems Based on an Artificial Immune System [A]. *First Int Conf on Artificial Immune Systems* [C]. Inglaterra, 2002: 212-221
- [19] Jiao L, Wang L. A Novel Genetic Algorithm Based on Immunity [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, 2000, 30(5): 552-561
- [20] 黄席樾, 张著洪. 基于免疫应答原理的多目标优化免疫算法及其应用 [J]. *信息与控制*, 2003, 32(3): 209-213
(Huang X Y, Zhang Z H. Multiobjective Optimization Immune Algorithm Based On Immune Response Principle and Its Application [J]. *Information and Control*, 2003, 32(3): 209-213)
- [21] Zitzler E. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications [R]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 1999
- [22] Laumanns M. Analysis and Applications of Evolutionary Multiobjective Optimization Algorithms [R]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology: Zurich, 2003
- [23] 张铭钧, 韩金华, 郎毅翔. 水下机器人运动规划中多目标遗传算法的操作方法 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2000, 21(2): 23-27.
(Zhang M J, Han J H, Lang Y X. Operating Method of Multiobjective Problems Genetic Algorithm in Motion Plan of AUV [J]. *J of Harbin Engineering University*, 2000, 21(2): 23-27.)
- [24] 李满林, 杜雷. 多目标优化遗传算法在移动网络规划中的应用 [J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 441-445
(Li M L, Du L. Applications of Multiple Objective Genetic Algorithms in Mobile Networks Planning [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 441-445)
- [25] Weicker N, Szabo G, Weicker K, et al. Evolutionary Multiobjective Optimization for Base Station Transmitter Placement With Frequency Assignment [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2003, 7(2): 189-203

(下转第 611 页)

6 结 语

本文基于特征模型的全系数自适应控制理论的思想,研究了多变量全驱动的欧-拉系统的基于特征模型的全系数自适应控制方法,建立了E-L系统的特征模型,利用建立的特征模型设计了相应的多变量黄金分割控制律和相应的多变量黄金分割自适应控制器,提出的基于黄金分割的多变量自适应控制策略在形式上简单,可调参数少,而且控制器的设计对系统动力学的先验知识依赖性不强

参考文献(References)

- [1] 吴宏鑫. 全系数自适应控制理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1990
(Wu H X. *All-Coefficient Adaptive Control Theory and Its Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990)
- [2] 孙多青, 吴宏鑫. 多变量黄金分割自适应控制系统的稳定性分析[A]. 2005年中国控制与决策学术年会论文集[C]. 哈尔滨, 2005: 85-88
(Sun D Q, Wu H X. Stability Analysis of Multivariable Golden Section Adaptive Control Systems[A]. *Proc of 2005 Chinese Control and Decision Conf* [C]. Harbin, 2005: 85-88)
- [3] Wu H X, Liu Y W, Liu Z H, et al. Characteristic Modeling and the Control of Flexible Structure[J]. *Science in China (Series F)*, 2001, 44(4): 278-291.
- [4] Wu H X, Wang Y C, Xin Y. Intelligent Control Based on Intelligent Characteristic Model and Its Application[J]. *China Science (Series F)*, 2003, 46(3): 225-241.
- [5] Park J, Chung W K. Transition to Nonlinear H Optimal Control From Inverse-optimal Solution for Euler-Lagrange System [A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. New Jersey: IEEE Press, 2001: 1161-1167.
- [6] Wai R J, Chen P C. Intelligent Tracking Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics via TSK-Type Fuzzy Neural Network[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(4): 552-559.
- [7] 齐春子, 吴宏鑫, 吕振铎. 多变量全系数自适应控制系统稳定性的研究[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(4): 489-494
(Qi C Z, Wu H X, Lv Z D. Study on the Stability of Multivariable All-coefficient Adaptive Control System [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(4): 489-494)
- [8] Goodwin G C, Sin K S. *Adaptive Filtering, Prediction and Control* [M]. Prentice Hall, 1984.
- [9] 王景. 空间机器人的轨迹跟踪自适应控制[D]. 北京: 北京控制工程研究所, 2000
(Wang J. *Adaptive Control of Trajectory Tracking for Space Robot* [D]. Beijing: Beijing Institute of Control Engineering, 2000)
- [10] 王景, 王昊瀛, 刘良栋, 等. 空间机械臂的鲁棒复合自适应控制[J]. *自动化学报*, 2003, 28(3): 378-384
(Wang J, Wang H Y, Liu L D, et al. Robust Composite Adaptive Control for Space Manipulators [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(3): 378-384)
- [26] Bagchi T P. Pareto-optimal Solutions for Multi-objective Production Scheduling Problems [A]. *First Int Conf on Evolutionary Multi-criterion Optimization* [C]. Springer-Verlag, 2001: 458-471.
- [27] 周永华, 陈禹六. 结合性能评价的多目标价值链设计[J]. *计算机集成制造系统-CIMS*, 2004, 10(2): 219-225
(Zhou Y H, Chen Y L. Multiobjective Value Chain Design Combined with Performance Evaluation [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(2): 219-225)
- [28] Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance Assessment of Multiobjective Optimizers: An Analysis and Review [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2003, 7(2): 117-132.
- [29] Coello C A C. Handling Preferences in Evolutionary Multiobjective Optimization: A Survey [A]. *Congress on Evolutionary Computation* [C]. New Jersey, 2000: 30-37.
- [30] Mostaghim S, Teich J. Quad-trees: A Data structure for storing Pareto-sets in Multi-objective Evolutionary Algorithms with Elitism [A]. *Evolutionary Computation Based Multi-criteria Optimization: Theoretical Advances and Applications* [C]. Springer-Verlag, 2005: 81-104.
- [31] Deb K, Pratap A, Meiyarivan T. Constrained Test Problems for Multiobjective Evolutionary Optimization [A]. *First Int Conf on Evolutionary Multi-criterion Optimization* [C]. Springer-Verlag, 2001: 284-298.
- [32] 王跃宣, 刘连臣, 牟盛静, 等. 处理带约束的多目标优化进化算法[J]. *清华大学学报*, 2005, 45(1): 103-106
(Wang Y X, Liu L C, Mu S J, et al. Constrained Multiobjective Optimization Evolutionary Algorithm [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2005, 45(1): 103-106)

(上接第605页)