文章编号: 1000-8152(2006)04-0593-04

无线传感器网络的改进GASA优化设计

王 雪,姜爱国,王 晟

(清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京100084)

摘要: 无线传感器网络由大量传感器节点构成, 因此对网络整体造价特别敏感.优化设计传感器网络构成, 可以 在满足监测精度的同时最小化网络造价.本文提出了一种GA和SA结合的改进GASA优化设计方法, 解决由异类、 多级传感器组成的无线传感器网络的优化设计问题.该方法采用特殊设计的排序组合算子提高GA的并行搜索能 力, 降低异类、多级传感器带来的复杂性; 通过最优可行化处理加速搜索过程; 利用SA的概率突跳特性避免陷入局 部极小值, 提高局部搜索能力.仿真实验表明, 改进的GASA方法可以快速、有效地解决异类、多级传感器优化问题. 关键词: 无限传感器网络; 造价; 优化设计; 遗传算法模拟退火

中图分类号: TP1, TP3 文献标识码: A

Optimal designs of wireless sensor network by adapted GASA

WANG Xue, JIANG Ai-guo, WANG Sheng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Wireless sensor network, consisting of lots of sensor nodes, is critical about the cost of entire network. The optimal design of wireless sensor network can minimize the cost of network and fulfill the desired accuracy of detection. An adapted GASA approach, which combines genetic algorithm (GA) and simulated annealing (SA), is developed to optimize the design of wireless sensor network consisted of multi-class, multi-level sensors. The sort-combination operator is specially designed to boost the ability of parallel search of GA and to reduce the complexity of multi-class, multi-level sensors. Optimal feasibility is also adopted to accelerate the search procession and SA is used to enhance the ability of local search. Finally, the results obtained by GA, SA and the adapted GASA are compared, and three major characters of the adapted GASA are analyzed.

Key words: wireless sensor network; cost; optimal design; genetic algorithm and simulated annealing(GASA)

1 引言(Introduction)

无线传感器网络(wireless sensor network,简称WSN)是目前一个重要的研究领域,在军事和民用方面都有广阔的应用领域,例如环境监测、场景重构、运动跟踪、运动探测、战场监督、遥感和全球定位等^[1].传感器节点是无线传感器网络的基本组成单元,远远超出了传统传感器即敏感元件的概念, 是包括处理器模块、通讯模块、传感器模块和电源 模块的集成单元.

WSN的优势在于可以通过布置大量低成本、低精度节点,协同完成过去需要价格昂贵的专用仪器才能完成的监测任务,降低监测花费.通过优化选择传感器节点的种类和数量,可以进一步降低网络造价,这是目前WSN研究中的一个热点问题.Brooks和Iyergar提出采用遗传算法 (genetic algo-

rithm,简称GA)或模拟退火(simulated annealing,简称SA)来解决该问题^[2].但是,GA易发生早熟收敛现 象,而且随着传感器种类和数量增加,搜索性能迅速 下降;SA取得优良的优化性能需要较长的搜索时间, 而且参数很难确定^[3].并且,这些算法只能解决由 同类传感器组成WSN优化问题,与WSN中往往同时 布置多种类型传感器的实际情况不符.本文提出一 种改进GASA方法,优化设计异类、多级传感器组成 的WSN.

 异类、多级传感器组成WSN的优化设计 模型 (Optimal design model of WSN consisting of multi-class, multi-level sensors)^[4,5] WSN中布置多种类型的传感器,如振动、图 像、磁力传感器等,每类传感器监测特定物理量,通 过协同工作完成大型、综合监测任务. 通过优化选

收稿日期: 2005-03-11; 收修改稿日期: 2005-10-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (50175056,60373014).

择各类传感器的组合可以降低WSN的总体造价.

N类、 $M(i)(i \in (1, N))$ 级传感器可供选择, 其中第*i*类、第*j*级传感器的误差和单价分别 为 σ_{ij} 和cos t_{ij} .通过优化选择各类、各级传感器的 数目 x_{ij} 可以将WSN的造价降到最低.优化过程中 需满足第*i* 类传感器的综合误差 Ω_i 不大于要求最大 误差 φ_i ,即

$$\Omega_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{M(i)} x_{ij} K_{ij}^2 \sigma_{ij}^2} \leqslant \varphi_i, \ i = 1, \cdots, N.$$
 (1)

其中 K_{ij} 表示权重系数,与传感器监测误差 σ_{ij} 成反 $M^{(i)}$ 比.由 $\sum x_{ii}K_{ii} = 1$ 作归一化处理,有

$$K_{ij} = \frac{1/\sigma_{ij}}{\sum_{j=1}^{M(i)} x_{ij}/\sigma_{ij}},$$

$$i = 1, \cdots, N, \ j = 1, \cdots, M(i).$$
(2)

将式(2)带入式(1)有

$$\Omega_{ij} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M(i)} [x_{ij}(\frac{1/\sigma_{ij}}{M(i)})^2 \sigma_{ij}^2]} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{M(i)} x_{ij}}{\sum_{j=1}^{M(i)} x_{ij}}}, \quad i = 1, \cdots, N. \quad (3)$$

上面的优化问题可转化为下面的最优化数学模型:

$$Y^* = \min Y = \min(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M(i)} x_{ij} \cos t_{ij}), \quad (4)$$

满足

$$\Omega_i \leqslant \varphi_i, \ i = 1, \cdots, N. \tag{5}$$

3 WSN的改进GASA优化设计方法(GASA approach for WSN optimal designs)

针对上面提出的优化模型,将并行GA(parallel GA,简称PGA)的并行搜索结构与SA的概率突跳特性有机结合,提出了一种改进GASA优化设计方法: PGA执行对种群并行全局搜索,SA对种群局部寻优(温度较高时表现出较强的概率突跳性);然后降低温度,进行下一轮PGA进化和SA局部寻优,直到收敛到最优解^[6].PGA 除复制、交叉、变异3个基本算子之外,针对多类、多级传感器优化问题的复杂性,设计了最优可行化算子和排序组合算子.实验结果表明,引入最优可行化和组合排序两算子后, PGA的进化代数明显减少.

3.1 PGA染色体和遗传算子设计(Designs of chromosomes and genetic operators of PGA)

将第 i 类、第 j 级传感器的数目 x_{ij} ($i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, M(i)$)按照

的顺序排列^[7],代表PGA基因池中的一个染色体 *X*, 染色体数目设定为*L*.

染色体的适应度函数定义为

$$f_k = 1/Y_k, \ k = 1, \cdots, L.$$
 (6)

PGA定义5种遗传算子,分别执行下面的操作:

1) 最优可行化. 将随机产生、不满足约束 (5) 的 染色体转变为可行解. 首先, 计算每类传感器只采 用一个精度级别时, 需要的传感器数量 x_{ij}^* , 并按照 造价进行排序, 确定WSN最低造价对应的传感器级 别 $J(i) i \in (1, N)$; 然后, 通过增加 J(i) 级别传感器 数目, 使不可行解变为可行解.

2) 排序组合. 将染色体 X_k 中元素按照对应的传 感器类型分为 N 个子段, 计算各子段对应的造价

$$Y_{ik} = \sum_{j=1}^{M(0)} x_{ijk} \cos t_{ij}, i = 1, \cdots, N, \ k = 1, \cdots, L.$$
(7)

将 N 个子段分别按照 E_{ik}(k = 1, · · · , L) 的升序排 列, 将排序相同的子段组合成新染色体. 经排序组合 操作后, 染色体的数目保持不变, 适应度最高染色体 的每个子段具有相应子段的最小花费. 组合排序后 的染色体组成父代基因池.

3) 复制. 将父代中适应度最高的 20% 的染色体 直接复制到子代基因池中.

4) 交叉. 子代基因池中 75% 的染色体通过父代 染色体交叉产生, 即从父代中随机选择两个染色 体, 然后依次随机选择两个父代染色体的每一位, 放 入子代染色体的相应位.

5) 变异. 子代基因池中 5% 的染色体由父代染色 体变异产生, 即从父代中随机选择一个染色体, 依次 对每一位以 0.3 的概率变异.

经过上面5个遗传算子操作后,基因池中染色体 数目保持不变,但是平均适应度提高.

3.2 SA局部寻优(Local optimization by SA)

PGA全局搜索后, 将 *L* 个染色体依次采用 SA 算法进行局部寻优, 降温系数设定为 α , 即 $t_{G+1} = \alpha t_G$. 染色体中每个基因位以 40% 的概率改变, 形成

(8)

新染色体,SA状态产生函数设计为

$$x_{ijk}(\text{new}) = \begin{cases} x_{ijk}(\text{old}) + 1, & 0$$

其中 p 在[0,1] 区间中随机产生. SA局部寻优的过程是:利用 SA 状态产生函数产生新染色体,计算新、旧染色体的适应度差 Δf_k ,计算接受概率 $p = \min(1, \exp(-\Delta f_k/t_G))$,随机产生一个 $r \in [0, 1]$,如果 p > r,用新染色体取代旧染色体;否则,保持旧染色体不变. 然后,将更新后的染色体返回给PGA.

3.3 异类、多级传感器组成WSN的改进GASA优 化设计方法(Adapted GASA approach for optimal designs of WSN consisting of multi-class, multi-level sensors)



图 1 WSN的改进GASA优化设计方法

Fig. 1 Adapted GASA approach for WSN optimal designs

第1步 对每类传感器,比较采用单一级别时的网络造价,选出最低造价对应的级别 $J(i), i \in (1, N)$;

第2步 采用随机方式初始化产生GA的规模 为L的0代基因池,设置最大进化代数G_{MAX}和退火 初温为t₀;

第3步 将L个染色体依次进行最优可行化操 作,通过增加 J(i) 级别传感器的数量,将不可行解 转变为可行解,形成父代基因池; 第4步 计算染色体适应度,排序组合操作;

第5步 对父代基因池中染色体进行复制、交叉 和变异操作,形成子代基因池;

第6步 对子代染色体进行SA局部搜索操作;

第7步 进化代数G加1,降温 $t_{G+1} = \alpha t_G$,如果 连续10代最优结果相同或者达到最大进化代数,转 第8步,否则将子代基因池中染色体全部复制到父代 基因池中,返回第3步;

第8步 将子代基因池中适应度最高的染色体作为最优解输出.

PGA全局搜索、SA局部寻优的异类、多级WSN优化设计方法可以用框图1描述.

- 4 仿真实验 (Simulation experiments)
- **4.1 WSN优化设计方法比较**(Comparison of approaches for WSN optimal designs)

当取 N = 1 时,上面设计的方法简化为优化设 计单类传感器组成WSN的特例算法,以位移传感器 为例,传感器精度取4个等级,相关参数见表1,要求 综合误差 $\Omega \leq \varphi = 0.166512$ mm.采用改进GASA 方法、文献[3]提出的GA和SA方法分别求解,基因池 规模取L = 100,退火初温和退火系数分别取 $t_0 =$ 1,k = 0.9,结果如表2所示.可以看出:1)改 进 GASA 和SA给出了相同的结果 33.60 RMB,优 于GA给出的结果33.70 RMB,可见GA陷入了局部极 小;2) SA耗时远大于改进GASA方法.

表1 位移传感器参数

Table 1 Parameters of displacement sensors

	级 别			
	1	2	3	4
$\sigma/{ m mm}$ cost/RMB	0.30 8.4	0.50 4.2	0.70 2.1	0.78 2.0

表2改进GASA, GA和SA优化结果比较

Tab	le 2	Comparison	of optimal	results of
-----	------	------------	------------	------------

adapted GASA, GA and SA

算法	优化	网络造	进化代	耗时/ s
类型	结果	价/ RMB	数/ 代	
改进GASA GA	(3,1,1,1) (3,1,2,0) (3,1,1,1)	33.60 33.70 33.60	10 32	0.45 0.92 2.21

4.2 WSN 的改进 GASA 优化设计方法分 析(Analysis of adapted GASA approach for WSN optimal designs)

单纯的 GA 或者 SA 方法不适合解决多类、多级传感器组成的WSN优化设计问题,本文提出的改进 GASA 方法与一般GA方法相比,进行了 3 个方

面的改进: 1) SA局部搜索; 2) 排序组合算子; 3) 最优 可行化处理, 以解决多类、多级传感器优化问题. 下 面通过实验来分析这 3 方面改进在算法中的作用.

为了便于比较,各类传感器取相同精度级 别M = 4,当传感器类型N从1增加到8,比较:1)完 整 GASA 方法;2)无 SA 局部搜索;3)无最优可 行化处理;4)无排序组合算子4种方法收敛到最 优解所需进化代数G(取50次实验的平均值),结 果如图2所示.其中完整GASA方法即本文提出 的改进GASA方法,后3种算法分别是改进GASA方 法不作相应处理得到的简化算法.最大进化代数 取250代,其他相关参数与4.1部分中相同.



图 2 WSN优化设计方法结果比较

Fig. 2 Comparison of approaches for WSN

optimal designs

由图 2 可知, 完整 GASA 方法、无 SA 局部搜索 方法和无最优可行化处理方法的进化代数 *G* 不随 传感器种类 *N* 增加而改变, 其中完整GASA方法收 敛到最优解需要 15 代左右, 无 SA 局部搜索方法 需要 40 代左右, 无最优可行化处理方法需要 90 代 左右; 而无排序组合方法收敛到最优解的进化代 数 *G* 随传感器种类 *N* 迅速增加, 而且当传感器种 类 *N* > 5 时, 算法无法在 250 代以内收敛到最优 解. 分析可知

1) 排序组合算子可以将收敛到最优解需要的进 化代数 G 保持在一个基本不变的值, 如果没有排序 组合算子, 无法解决传感器种类 N > 5 的WSN优化 设计问题;

 SA 局部搜索和最优可行化操作可以显著减 少收敛到最优可行解需要的进化代数.

5 结论 (Conclusion)

无线传感器网络的优化设计可以降低网络造价.本文提出的改进 GASA 方法将 GA 的全局并行搜索能力和 SA 的概率突跳性相结合, 解决了异类、多级传感器网络优化设计问题. 排序组合算子增强了并行搜索能力, 使算法收敛需要的进化代数不随传感器种类增加而改变; SA 局部搜索和最优可行化处理进一步提高了算法的收敛速度. 改进后的 GASA 方法可以在较少的进化代数内收敛到最优解, 可以胜任异类、多级传感器组成的WSN优化设计问题.

参考文献 (References):

- QI H, IYENGAR S S, CHAKRABARTY K. Distributed sensor networks: a review of recent research [J]. *J of the Franklin Institute*, 2001, 338(6): 655 – 668.
- BROOKS R R, IYENGAR S S. Multi-sensor Fusion: Fundamentals and Applications with Software [M]. Engle-wood,NJ: Prentice-Hall, 1998.
- [3] 王凌,郑大钟. 一种GASA混合优化策略 [J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 552 – 554.
 (WANG Ling, ZHENG Dazhong. A kind of GASA hybrid optimization strategy [J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(4): 552 – 554.)
- [4] ZHANG H. Two-dimensional optimal sensor placement [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, 25(5): 781 792.
- [5] WANG H, YAO K, POTTIC G, et al. Entropy-based sensor selection heuristic for target localization [C] // Proc of the 3rd Int Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Berkeley, California, USA: ACM Press, 2004: 26 –27.
- [6] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
 (WANG Ling. Intelligent Optimization Algorithms with Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.)
- [7] SALCEDO-SANZ S, XIN Y. A hybrid Hopfield network-genetic algorithm approach for the terminal assignment problem [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, 34(6): 2343 – 2353.

作者简介:

王 雪 (1963—), 男, 博士, 副教授, 主要从事传感器网络、信息 融合和智能测试与控制研究, E-mail:wangxue@mail.tsinghua.edu.cn;

姜爱国 (1980—), 男, 硕士研究生, 主要从事无线传感器网络 优化和移动代理应用研究, E-mail:jiangkai@tsinghua.org.cn;

王 晟 (1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事传感器网络理论 与应用研究, E-mail:wang_sheng00@mails.tsinghua.edu.cn.