新的 MOPSO 及其在大型复杂系统可靠性优化中的应用*

鲁 鹏, 章卫国, 李广文, 刘小雄
(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘 要: 可靠性优化问题是大型复杂系统设计的一个关键问题。针对大型复杂系统多个指标(可靠度、造价和冗余数)同时进行最优分配的结果多样性不好的问题,提出了一种基于杂草克隆的多目标粒子群算法—IWMOPSO(invasive weed multi-objective particle swarm optimization)的多指标分配方法。该分配方法通过引入杂草克隆机制来改善 Pareto 最优解的收敛性和多样性。通过对大型复杂系统多个指标进行分配,其分配效果与 NSGA-Ⅱ相比,得到的 Pareto 非劣解集多样性和均匀性好,分布范围更广,更利于设计者进行决策,是一种更有效的复杂系统多指标分配方法。

关键词: 可靠性优化; 多指标分配; 杂草克隆; 多目标粒子群算法; 最优分配; 多样性
中图分类号: TP311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2153-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.040

Novel MOPSO and its application in reliability optimization of large complex systems

LU Peng, ZHANG Wei-guo, LI Guang-wen, LIU Xiao-xiong
(*College of Automation*, *Northwestern Polytechnical University*, *Xi'an* 710072, *China*)

Abstract: Reliability optimization problem is a key problem of designing the large complex system. As there existed a diversity problem in the multi-indexes (such as reliability, cost and redundancy) allocation optimization, this paper proposed a novel multi-indexes allocation algorithm-IWMOPSO based on the multi-objective optimization. The algorithm introduced invasive weed mechanism in order to better the convergence and the diversity of the Pareto front. It utilized the algorithm to allocate the multi index of the large complex systems. In order to indicate its effectiveness and efficiency, the achieved Pareto front was compared with the result achieved by NSGA-Ⅱ. It turns out that the new algorithm gets a better diversity and convergence, and it is more convenient for designers to make a decision, therefore, it is a more effective multi-objective allocation algorithm of large complex systems.

Key words: reliability optimization; multi-indexes allocation; invasive weeds colony; multi-objective particle swarm optimization; optimal allocation; diversity performance

0 引言

在大型复杂系统设计过程中,可靠度[1~4]优化问题一直是一个关键的问题。如在飞行控制系统设计过程中,如何将系统的可靠度、冗余数、造价等指标合理地分配到子系统甚至元部件之中,是一个非常重要的问题。如在可靠度和冗余[5~7]分配过程中,单纯依靠增加成本来提高部件的可靠度在时间和成本的开销上特别大,是不可取的,这时候就要采取冗余设计,对分系统或元部件进行冗余数分配,因此可靠度设计实际上是个非线性整数规划问题。目前,解决可靠度设计的方法主要有以下三大类:

a)耦合法[6]。其中主要包括数学规划法、广义简化梯度法、广义拉格朗日函数法等。然而针对实际系统,这类算法在求解非线性整数规划问题都存在局限性,如数学规划法存在着随机变量的增加而增加维数的"灾难"。广义简化梯度法、广义拉格朗日函数法对求解大型非线性规划问题有效,但是利用这些算法所获得的是非整数解,而冗余分配必须是整数最优解,这一点得不到保障。整数规划得到的是整数解,但为了应用整数规划,把非线性目标函数和约束条件转换成线性形式是一项困难的工作。

b)分解协调法[8]和协同分配法[9,10]。这类方法将主系统和子系统进行解耦分开设计,首先主系统按经验将指标分配给子系统,子系统按照一定的规则进行寻优,然后将获得的最优值传递给主系统,再进行主系统寻优,主系统再将获得的最优指标分配给子系统,如此循环,最后经一定的终止准则判断是否终止循环。这类方法在处理多个指标的分配问题时,一般是对其中一个指标进行分配,而对其他指标采取约束限制的措施,或者采用加权的方式将多目标问题转换为单目标问题进行求解,不能给出多个指标的 Pareto 前沿,不利于设计者进行选择。

收稿日期: 2011-10-24; **修回日期:** 2011-11-28 **基金项目:** 航空科学基金资助项目(20090753008)

作者简介: 鲁鹏(1987-),男,安徽庐江人,硕士,主要研究方向为飞行器控制、智能进化算法(lplp8899@163.com);章卫国(1956-),男,教授,博士,主要研究方向为飞行器控制、先进控制理论;李广文(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为进化算法、飞行控制技术;刘小雄(1973-),男,副教授,博士,主要研究方向为飞行器控制与仿真、故障诊断与容错控制.

另外,当子系统或指标的数量过多时,计算量会随着变量的维数带来维数灾难。

c)智能优化算法包括遗传算法等。遗传算法利用生物的选择、复制和变异特性来进化,能够有效地处理可靠度优化问题,但是容易陷入局部最优解。

要对复杂系统进行分配的指标有可靠度、冗余数和造价三个。目标是提高系统的可靠度和降低系统的造价,因此要采用多目标优化方法进行分配,而上面提到的方法均是处理单目标问题的,故都不适用。另外,一般的多目标优化方法所获得的 Pareto 解具有收敛性和多样性不好的缺点,本文提出一种新的分配方法——基于杂草克隆[11]的多目标粒子群算法(IWMOPSO)。该方法引进一种新的多目标粒子群算法进行多指标分配,它能有效提高 Pareto 最优解的收敛性和多样性,处理指标分配问题能对系统的多个指标同时进行分配,包括冗余数分配,能够给出多指标分配的 Pareto 前沿,多样性好且分布范围广,有利于供设计者从中进行选择,且不会随着子系统数量的增加呈指数增长。

1 符号说明以及基本假设

1.1 符号说明

R_s 是主系统的可靠度;C_s 是主系统的造价;$R_i(r_i)$ 是第 i 个子系统的可靠度分配值;$C_i(r_i)$ 是第 i 个子系统的造价分配值;r_i 是第 i 个子系统部件的可靠度;C_0 是主系统的造价上限;R_0 是主系统的可靠度下限;m_i 是第 i 个子系统的冗余数即所包含部件数目;$m_{\max}$是最大冗余数。

1.2 基本假设

假设 1 每个子系统的部件只包含两种工作状态,即正常工作和失效。

假设 2 每个子系统所包含的部件的工作状态是独立的。

2 多指标分配及 IWMOPSO 算法

2.1 多指标分配模型

以往的文献往往都是将造价作为约束,对可靠度进行分配或者将造价作为约束,对冗余数分配,同时对可靠度、冗余数和造价进行分配的很少。而在实际工程中,单纯依靠提高部件的可靠度来提高系统的可靠度会花费大量的成本,另一方面节约成本也是一个关键的问题。因此本文提出将所有指标同时进行分配,而不是将其他指标作为约束条件处理。下面给出针对带冗余的可靠度和造价指标进行分配的多指标分配问题模型。

$$\begin{aligned}
&\text{find} \quad [r_1, r_2, \cdots, r_n; m_1, m_2, \cdots, m_n] \\
&\max \quad R_s = R_s[R_i(r_i)] \\
&\min \quad C_s = C_s[C_i(r_i)] \\
&\text{s.t.} \quad R_i(r_i) = 1 - (1 - r_i)^{m_i} \\
&R_s[R_1(r_i), R_2(r_i), \cdots, R_n(r_i)] \geqslant R_0 \\
&C_s[C_1(r_1), C_2(r_2), \cdots, C_n(r_n)] \leqslant C_0 \\
&0 \leqslant r_i \leqslant 1 \quad 1 \leqslant m_i \leqslant m_{\max} \quad i = 1, 2, \cdots, n
\end{aligned} \tag{1}$$

主系统包含 n 个子系统,每个子系统包含 m_i 个部件。由于模型包含多个目标函数,因此多指标分配问题归根结底是多目标优化问题。

2.2 IWMOPSO 算法

求解多目标优化问题的方法有很多,其中多目标粒子群算法(MOPSO)以其速度快、效率高在近年内得到较广泛的应用,但是大部分 MOPSO 在求解具有不连续 Pareto 前沿的函数时具有收敛性差、多样性不够好的问题。本文引进一种基于杂草克隆搜索机制的 MOPSO,即 IWMOPSO。由后文的指标分配结果可以看出,该方法能够有效地解决上述问题。其具体实现步骤如下:

a)初始化粒子群,确定其初始速度和位置。

b)将种群的非劣解保存到外部档案中。

c)对外部档案的粒子自适应地划分网格,计算每个网格的密度。

d)对种群中的每个粒子,从外部档案中找出支配该粒子的个体,从这些个体中选取一个密度大的个体作为该粒子的全局最优解。

e)根据粒子群迭代公式更新粒子的速度和位置。

f)将新产生的非劣解保存到外部档案中。

g)对档案中的粒子进行杂草克隆搜索操作:

(a)进行杂草克隆的生长繁殖操作。对档案中的粒子进行聚集距离排序,对聚集距离最大的分配最大的适应度,对距离最小的分配最小的适应度。然后按图 1 进行种子数分配。其中:f 是适应度值,$f_{\min}$是最小适应度,$f_{\max}$是最大适应度,N 是繁殖子代个数,$N_{\min}$是最小子代数目,$N_{\max}$是最大子代数目。

(b)进行杂草克隆的空间扩散操作。杂草克隆产生的种子按正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 的方式分布于父代个体周围,在每代中,正态分布的标准差 σ 是自适应变化的,当代标准差 σ_{iter}为

$$\sigma_{\text{iter}} = \frac{(\text{iter}_{\max} - \text{iter})^n}{(\text{iter}_{\max})^n}(\sigma_{\text{initial}} - \sigma_{\text{final}}) + \sigma_{\text{final}} \tag{2}$$

其中:σ_{initial}是初始标准差,σ_{final}是最终标准差,$\text{iter}_{\max}$是最大迭代次数。

(c)进行杂草克隆的竞争性生存操作。经过数代杂草克隆后,种群规模达到最大数量时需要进行竞争性生存操作。将新产生的个体与父代个体进行比较。若受支配则排除,若支配父代个体,则进入档案,同时将父代个体从档案中删除;若不受支配同时也不支配父代个体,则放入档案。

h)若外部档案的粒子规模超过指定规模,则用本文的维护档案的方法对档案进行裁断操作。

i)判断是否符合终止条件,若符合则停止搜索,否则转向 c)。

3 基于 IWMOPSO 的复杂系统多指标分配

本文提出的针对可靠性进行优化的指标包括可靠度、冗余数和造价,目标是使可靠度尽可能最大,造价尽可能小。

分析计算系统的可靠性采用基于联络矩阵法的最小路集法,然后用不相容原理求出系统的可靠度。带冗余的复杂的桥式网络系统的可靠性框图如图 2 所示。

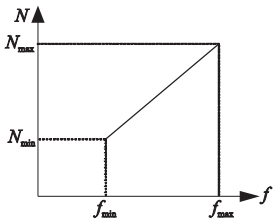

图1 杂草克隆种子数确定

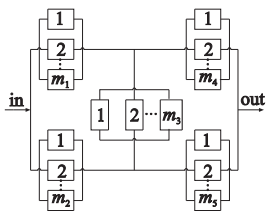

图2 桥式网络系统可靠性框图

$R_i(r_i) = 1 - (1 - r_i)^{m_i}$。

系统的造价与可靠度的函数为

$$C_s = \sum_{i=1}^{5} m_i \times a_i \times e^{\frac{b_i}{1-r_i}} \tag{3}$$

$$0.7 \leqslant r_i < 1, a_i = 1, b_i = 0.0003, i = 1,2,\cdots,5$$

对该桥式网络系统,主系统由五个子系统构成,每个子系统包含若干部件,对其分配可靠度、造价和冗余数,使主系统的可靠度尽可能大同时使造价尽可能小。要求主系统可靠度大于 0.9,造价不超过 20。

3.1　基于 IWMOPSO 的多指标分配的目标函数

运用 IWMOPSO 解决多指标分配问题的指标是可靠度、冗余数和造价。所以多目标优化的两个目标函数分别为

$$\begin{cases} f_1 = R_s[R_1(r_1), R_2(r_2), \cdots, R_n(r_n)] \\ f_2 = C_s[C_1(r_1), C_2(r_2), \cdots, C_n(r_n)] \end{cases} \tag{4}$$

其中:R_s、C_s 分别是系统的可靠度函数和造价函数。

3.2　约束的处理

采用惩罚函数法处理约束。由于约束包含可靠度和造价,因此采用双惩罚因子进行处理,从而构造惩罚函数为

$$f_1 = \begin{cases} f_1 & f_1 > R_0 \text{ or } f_2 < C_0 \\ f_1 + \lambda \times (f_1 - R_0) & \text{others} \end{cases}$$

$$f_2 = \begin{cases} f_2 & f_1 > R_0 \text{ or } f_2 < C_0 \\ f_2 + \mu \times (f_2 - C_0) & \text{others} \end{cases} \tag{5}$$

其中:f_1、f_2 分别是两个目标的适应度;λ 和 μ 分别是 f_1、f_2 的惩罚因子。

3.3　指标分配结果对比

将 IWMOPSO 得出的结果与 NSGA-Ⅱ得出的结果对比。NSGA-Ⅱ的种群规模是 200,迭代次数为 1 000 代;IWMOPSO 的种群规模是 200,档案规模是 200,迭代次数是 10 代,杂草种子数为 40。将出现的结果分为三种情形,如图 3 所示。

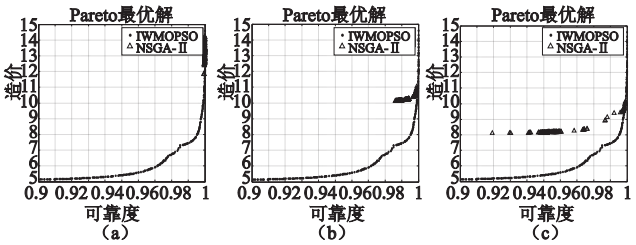

图3　IWMOPSO与NSGA-Ⅱ分配效果对比

图 3 中,△代表 NSGA-Ⅱ的分配效果,· 代表 IWMOPSO 的分配效果。由(a)可以看出,NSGA-Ⅱ所得到的 Pareto 最优解只分布在 IWMOPSO 得到的 Pareto 最优解的一小部分区域(其造价区间为[11.8,14.5],可靠度区间为[0.995,1]),丢失了造价在区间[5,11.8]上的最优解,即 NSGA-Ⅱ所分配的造价普遍较高。由(b)可以看出,NSGA-Ⅱ所分配的可靠度区间为[0.985,0.999],造价区间为[10,11]。虽然所分配的造价有所降低,但是与 IWMOPSO 分配效果相比,在分配相同的可靠度情况下,后者所需造价成本要小很多,因此其分配效果劣于后者,此外 NSGA-Ⅱ的分配区间仍然有限,丢失了造价较小和可靠度较大的区间。(c)中,虽然 NSGA-Ⅱ的分配区间相对前两幅图来说更大,可靠度区间为[0.918,0.999],造价区间为[8,10],但是在分配相同的可靠度情况下,其所耗费的造价仍然大于 IWMOPSO 所需造价,而且仍然丢失了可靠度较高的最优解。另外,NSGA-Ⅱ得到的最优解多样性差,很不利于设计者进行选择。

由图 3 可以看出,NSGA-Ⅱ的稳定性很差,每次分配得到的最优解变化都很大,而 IWMOPSO 每次分配得到的 Pareto 最优解变化不大。这充分说明了该分配算法的稳定性很好,而且分配范围很广(其可靠度分配区间为[0.9,1],造价分配区间为[5,15])。

表 1 是由两种分配方法得到的一些 Pareto 最优解,N 表示 NSGA-Ⅱ,I 表示 IWMOPSO。

表 1　两种分配方法 Pareto 解集对比

算法	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	R_s	C_s
N	0.775337	0.745106	0.700005	0.700001	0.70000	1	1	2	1	3	0.929622	8.112129
	0.814470	0.820399	0.700000	0.722629	0.700000	1	1	2	1	3	0.955619	8.171269
	0.758203	0.792477	0.705539	0.793997	0.770185	2	2	2	1	3	0.994226	10.24479
	0.904848	0.900484	0.753472	0.895519	0.905461	1	3	3	1	3	0.99982	14.12428
I	0.868015	0.848704	0.782915	0.867776	0.862854	1	1	1	1	1	0.956113	5.521524
	0.876700	0.883917	0.813427	0.861975	0.843354	1	1	1	1	2	0.979362	6.715449
	0.847247	0.865553	0.850349	0.874703	0.849902	3	1	1	2	2	0.998849	10.00351
	0.887408	0.908859	0.817161	0.893945	0.886365	3	2	1	2	3	0.999954	13.97695

由表 1 可以看出,两种方法均能对系统的可靠度、造价和冗余数进行分配,且得到的冗余数分配结果不止一种,有(2,2,2,1,3),也有(1,3,3,1,3)等。NSGA-Ⅱ的平均运行时间为 214.731 093 s,而 IWMOPSO 的平均运行时间为 77.097 147 s,得到的结果却是 IWMOPSO 的 Pareto 最优解几乎都支配 NSGA-Ⅱ得到的 Pareto 最优解(在表中列举的最优解中,IWMOPSO 的第 1 ~4 行分别支配 NSGA-Ⅱ的第 1 ~4 行),由此说明了 IWMOPSO 的收敛性能要优于 NSGA-Ⅱ。

综上所述,本文提出的基于 IWMOPSO 的分配方法在收敛性、多样性和稳定性方面均优于基于 NSGA-Ⅱ的分配方法,是一种很有效的多目标分配方法。

4　结束语

针对大型复杂系统的多指标分配问题,本文引进了基于杂草克隆搜索机制的多目标粒子群算法即 IWMOPSO,在多目标的角度上有效地解决了大型复杂系统可靠度、造价、冗余数等多个目标同时分配的问题,与传统将多目标转换为单目标的分配方法完全不同。通过实例证明,该分配方法与 NSGA-Ⅱ相比其收敛性、多样性和稳定性均很好,有利于设计者进行决策,是一种有效的多指标分配方法。该多目标指标分配方法可以广泛应用到航空、卫星、汽车等领域的可靠性设计以及多个指标同时分配的问题上,是一种很实用有效的分配方法。

参考文献:

[1] KUO W, WANG R. Recent advances in optimal reliability allocation [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2007, 37(2): 143-156.

[2] KUMAR R, IZUI K, YOSHIMURA M, *et al*. Multilevel redundancy allocation optimization using hierarchical genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Reliability, 2008, 57(4): 650-661.

[3] ALICE Y L, CHU C B, ERIC C L. Reliability allocation problem in a series-parallel system [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 90(1): 55-61.

[4] XIAO S L, WANG P F, GAO X D. Reliability optimal allocation and application based on neural networks[J]. Marine Electric and Electronic Engineering, 2004, 24(5): 42-44.

(下转第 2160 页)

(上接第 2155 页)

[5] ZAI W, KE T. A memetic algorithm for multi-level redundancy allocation[J]. IEEE Trans on Reliability,2010,59(4):754-765.

[6] METTAS A. Reliability allocation and optimization for complex systems[C]//Proc of Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2000.

[7] TIAN Z G,Ming J Z. Reliability redundancy allocation for multi-state series-parallel systems[J]. IEEE Trans on Reliability, 2008, 57(2):303-310.

[8] 高仁璟,王建国. 基于可靠度的系统优化设计[J]. 电机与控制学报,2003,7(3):239-241.

[9] SANGOOK J, JEON Y H. Application of collaborative optimization using response surface methodology to an aircraft wing design[C]// Proc of the 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. 2004.

[10] 魏红艳,李为吉,张科施. 工程系统设计指标的最优分析方法[J]. 机械设计与制造,2006(3):44-46.

[11] MEHRABIAN A R, LUCAS C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization[J]. Ecological Informatics, 2006,1(4): 355-366.

[12] 鲁鹏,章卫国,李广文,等. 一种基于杂草克隆的多目标粒子群算法[J]. 西北工业大学学报,2012,30(2):286-290.