

基于速度可控粒子群算法的航天测控系统任务可靠性分配*

张新贵, 武小悦

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 航天测控系统是一个典型的多阶段任务系统, 讨论了可靠性分配时的约束条件和分配目标, 构建了其任务可靠性分配模型, 针对任务可靠性分配这类复杂的约束组合优化问题, 提出了一种速度可控的粒子群优化算法。为克服粒子群算法的早熟问题, 该算法引入了速度更新的方向控制规则和尺度控制规则用于增加群体的多样性, 并根据两种控制规则, 提出了种群粒子的速度更新策略。通过算例仿真, 表明算法在用于航天测控系统任务可靠性分配问题时具有分配结果优、收敛速度快等优点。

关键词: 航天测控系统; 任务可靠性; 可靠性分配; 粒子群优化; 速度可控

中图分类号: TP18; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1011-2486(2012)04-0058-05

Mission reliability allocation of spaceflight TT&C system based on velocity controllable particle swarm optimization

ZHANG Xingui, WU Xiaoyue

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The tracking, telemetry and command (TT&C) system is a phased mission system. In this research, the constraint conditions and the allocation objective were discussed, and the mission reliability allocation model was built. The mission reliability allocation of TT&C system is a kind of combined optimization problem with complicated constraints, and a velocity controllable particle swarm optimization (VCPSO) was proposed for this problem. In order to overcome the local convergence of particle swarm optimization (PSO), velocity direction controllable regulation and velocity scale controllable regulation were introduced to increase the population diversity. The velocity iterative strategy in PSO was improved based on the two regulations. By simulation, it shows that the VCPSO can reach more optimal results and convergence in solving the mission reliability allocation of spaceflight TT&C system.

Key words: TT&C system; mission reliability; reliability allocation; particle swarm optimization; velocity controllable

航天测控系统是指在航天器飞行的各个阶段对航天器及其有效载荷进行跟踪测量、监视与控制的技术系统^[1]。航天测控系统的任务可靠性是指航天测控系统在航天器飞行的各个阶段完成规定的航天测控功能的能力。航天测控系统的任务可靠性分配问题是基于航天测控任务把系统规定的任务可靠性指标按一定的分配方法分配给组成该系统的各地面站、测量船、中继卫星、控制中心、路由等设备的过程。

目前关于航天测控系统任务可靠性分配这类复杂的非线性规划问题的研究比较少,但是,可靠性分配问题已经有许多成熟的算法,如遗传算法^[2]、启发式算法^[3]、动态规划法^[4]等,通过研究发现遗传算法收敛速度较慢,且算法计算时间随问题规模成指数增长;启发式算法对问题依赖性较强,难以对所有问题得到较优的结果;动态规划

法存在着维数“灾难”问题。同时,由于航天测控系统的任务类型多样,同一类型的任务可能包含多个时段。此外,各个时段涉及的单元及可靠性结构也可能不同,航天测控系统是一类高可靠度系统,导致任务可靠性预计计算时间长,直接采用常规的求解算法难以保证航天测控系统可靠性分析的计算精度和时间响应要求。为此,需要研究科学合理的任务可靠性分配方法,本文采用改进后的粒子群算法对航天测控系统任务可靠性分配问题进行求解。

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)^[5]是一种全局解空间智能寻优算法。该算法在解决多维寻优问题中表现出搜索速度快、鲁棒性好等优点,且问题维度的增加对算法速度影响不是很大。

* 收稿日期:2012-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071159)

作者简介:张新贵(1982—),男,湖南永州人,博士研究生, E-mail: xiaoguinhm@163.com;

武小悦(通信作者),男,教授,博士,博士生导师, E-mail: xiaoyuewucn@yahoo.com.cn

1 航天测控系统任务可靠性分配模型

1.1 问题描述

为了进行可靠性分配,必须针对具体的任务建立相应的任务可靠性模型,航天测控系统的任务可靠性模型是用来估计系统在执行任务过程中完成其规定功能的能力。航天测控系统执行一个任务可划分为多个时段,只有当所有时段任务都成功时,测控业务才算成功,为此必须建立各时段设备的逻辑关系。可靠性框图建模方法从可靠性与任务完成的角度出发,可以反映在完成条件的条件下,与任务有关的所有单元间的相互逻辑依赖关系^[3]。

根据可靠性框图模型,在确定各设备可靠性指标的基础上,采用相应的预计方法,可以计算出系统的可靠性指标,从而通过可靠性分配实时调整设备的可靠度指标值,使系统的可靠度指标满足要求。

目前针对航天测控系统任务可靠性预计方法有 BDD 方法^[6], Markov 法^[7], 离散事件仿真法^[8], 限制抽样法^[9]等。由于航天测控系统在任务中出现失效的情况是稀有事件,需要大量的仿真次数才能得到既定精度的仿真结果,这非常消耗时间,而限制抽样法是一种有效提高稀有事件的仿真效率的系统可靠性仿真方法,在航天测控任务的可靠性评估中有很好的适用性,因此,本文采用该方法在分配中进行预计。

1.2 分配模型

航天测控系统任务可靠性分配的目标就是要保证分配后各测控资源的预计可靠度大于系统设定的可靠度指标值。为此,本文设计了预计可靠度作为相应的评价指标:

$$R = f(R_1(x), R_2(x), \dots, R_N(x)) \quad (1)$$

由于航天测控通信系统是一个多阶段多任务系统,参与设备的可靠度 $R = e^{-\lambda t} = e^{-t/MTBF}$, 所以同一设备参加不同的业务和阶段的可靠度值是不一样的,为此要合理地、对航天测控通信系统进行可靠性分配,本文选择平均故障间隔时间(MTBF)作为测控资源的性能参数,航天测控通信系统任务可靠性分配模型,如下所示。

$$\begin{aligned} R &= f(R_1(x), R_2(x), \dots, R_N(x)) \\ &= f(MTBF_1, MTBF_2, \dots, MTBF_n) \\ \text{s. t. } &R > R^* \\ &U_i > MTBF_i > L_i \end{aligned}$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^n C_i x_i \leq C^* \quad x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, n 为测控资源数量; N 为系统业务数量; R^* 为系统任务可靠性指标, R 为分配完成后系统的可靠度预计值, $R_l(x)$ 为第 l 个业务的可靠度要求; $MTBF_i$ 为第 i 个测控资源的平均故障间隔时间; 第 i 个测控资源工程实际中可靠性的上限指标为 U_i , 可靠性的下限指标为 L_i ; C_i 为资源成本; $f(x)$ 为系统总成本; C^* 为系统总成本的约束值。

对于式(2), 由于航天测控系统的元素之间存在着复杂时空关联、可视与信息关联等动态约束关系, 造成可靠性分配输入(即可靠性分配方案 (R_1, R_2, \dots, R_N) 与输出(航天测控系统任务可靠性指标 R) 之间存在复杂的非线性关系, 难以采用常规的数学方法进行预计求解, 为此本文采用速度可控的粒子群算法。

2 速度可控粒子群算法

2.1 标准粒子群优化算法

PSO 算法的数学描述如下^[10]:

假设解空间为 M 维, 粒子的数目为 N , x_i^t 表示第 i 个粒子在第 t 步迭代中的位置, v_i^t 表示位置变化率(速度); 第 i 个粒子在前 t 步迭代中的历史最优位置为 P_i^t ; 整个粒子群在前 t 步迭代中的历史最优位置为 P_g^t 。算法的迭代公式如下:

$$\begin{aligned} v_i^t &= \omega v_i^{(t-1)} + c_1 r_1 (P_i^{(t-1)} - x_i^{(t-1)}) \\ &\quad + c_2 r_2 (P_g^{(t-1)} - x_i^{(t-1)}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$x_i^t = x_i^{(t-1)} + v_i^t \quad (4)$$

其中, ω 称为惯性权重; c_1 和 c_2 为正常数, 称为加速因子; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; f 表示目标函数。

速度可控粒子群算法即根据种群的历史进化过程, 对粒子速度迭代增量的方向和尺度进行调节, 避免陷入局部极值, 以达到提高算法搜索效果的目标。

2.2 粒子适应度

粒子 P_i 的适应度函数定义为 $f_i = (R_i, R^*)$, 其中, R_i 为 P_i 分配结果的系统预计值, R^* 为系统可靠度指标的设定目标。

定义 1: 粒子 P_i 的适应度优于粒子 P_j 的适应度, 记为 $f_i > f_j$, 当且仅当 (I) $R_i < R_j$ 且 $R_i > R^*$ 或者 (II) $R_i > R_j$ 且 $R_i < R^*$ 或者 (III) $R_i > R^*$ 且 R_j

$< R^*$ 。

2.3 速度方向和尺度调控规则

将 PSO 算法的速度更新式(3)简记为:

$$v_i^{(t)} = w_i^{(t)} v_i^{(t-1)} + c_{1,i}^{(t)} r_1 Dv_{l,i}^{(t)} + c_{2,i}^{(t)} r_2 Dv_{g,i}^{(t)} \quad (5)$$

式中, $w_i^{(t)}$ 、 $c_{1,i}^{(t)}$ 和 $c_{2,i}^{(t)}$ 分别为步骤 t 时粒子 i 的惯性权重和学习因子。

定义 2: 当速度更新项 $Dv_{l,i}^{(t)}$ 和 $Dv_{g,i}^{(t)}$ 分别由下式计算时, 式(5)称为速度方向的保守调控

$$\begin{cases} Dv_{l,i}^{(t)} = p_i^{(t-1)} - p_{l,i}^{(t)}(K) \\ Dv_{g,i}^{(t)} = p_i^{(t-1)} - p_{g,i}^{(t)}(K) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $p_{l,i}^{(t)}(K)$ 表示时刻 t 粒子在最近 K 步迭代中适应度最差的位置, $p_{g,i}^{(t)}(K)$ 表示时刻 t 种群在最近 K 步迭代中适应度最差的位置^[10]。

相应地, 标准 PSO 算法中的速度更新称为速度方向的积极调控。

粒子速度更新规则通过控制粒子速度更新量的方向, 以降低算法迭代过程中易陷入局部极值的缺点。

定义 3: 当惯性权重和学习因子满足以下关系式时, 式(5)称为速度尺度的调控

$$\begin{cases} w_i^{(t)} = \mu_1(w_i^{(t-1)}) \\ c_{1,i}^{(t)} = \mu_1(c_{1,i}^{(t-1)}) \\ c_{2,i}^{(t)} = \mu_1(c_{2,i}^{(t-1)}) \end{cases} \quad (7)$$

当 $\mu_1(x) = (4 - (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}))x$ 时, 显然 $\mu_1(x) > 3x$, 因此它是速度尺度扩张计算函数, 变量 x 代表 $w_i^{(t-1)}$ 、 $c_{1,i}^{(t-1)}$ 或者 $c_{2,i}^{(t-1)}$; 当 $\mu_1(x) = (1 - (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}))x$, $\mu_1(x) < x$, $\mu_1(x)$ 是速度尺度收缩计算函数。

速度扩张和速度收缩通过改变 PSO 算法速度更新公式中控制参数的取值, 适度地扩大或者缩小了粒子位置的变化范围, 使得迭代过程具有一定的可控性, 可以避免陷入局部极值。同时, 随机性参数 r_1 和 r_2 的存在, 保证了算法的全局优化特性。

3 算法应用

3.1 任务可靠性分配粒子更新策略

本文根据粒子适应度的大小选择速度更新的尺度控制规则, 同时, 根据粒子位置与全局最优之间的差异程度选择合适的速度方向控制策略。根据种群中粒子的适应度, 将种群划分为三部分, 提出种群迭代时速度可控的粒子更新策略:

(1) 处于局部最优, 且适应度小于 δ_ω 的粒

子, 采用速度收缩规则缩减粒子的搜索空间;

(2) 处于局部最优, 且适应度大于 δ_b 的粒子, 采用速度扩张规则扩张种群中粒子的搜索空间;

(3) 种群其他粒子具有较好的全局搜索能力和局部优化能力, 保持原有的迭代控制参数。

其中, δ_b 为粒子适应度的扩张阈值, δ_ω 为粒子适应度的收缩阈值, 本文为方便计算, 将这两个参数设置为 $\delta_b = 0.2$, $\delta_\omega = 0.01$ 。

根据粒子位置与全局最优之间的差异程度, 得到粒子的速度方向更新策略为:

(1) 粒子的位置迭代 t 步, 变化范围很小, 小于 δ_a , 基本认为是处于局部最优, 同时与全局最优的位置大于 δ_d , 采用保守调控方式, 使其离开局部最优。

(2) 其余情况采用积极调控方式, 即标准 PSO 中的速度方向调控方式。

其中, t 称为局部迭代步数阈值; δ_a 为粒子局部迭代阈值, 即两次迭代适应度的差值小于 δ_a , 认为处于局部迭代范围; δ_d 为粒子全局最优阈值, 即迭代过程中粒子适应度大于 δ_d 为局部最优解, 否则为全局最优解; 本文为方便计算, 将这三个参数分别设置为 $t = 6$, $\delta_a = 0.0008$, $\delta_d = 0.0005$ 。

3.2 任务可靠性分配算法流程

航天测控系统任务可靠性分配的具体算法流程如下:

Step 1 设置初始参数 ω 、 c_1 、 c_2 、 r_1 和 r_2 , 输入粒子群的初始值 $X^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_M^0)$, 给出系统的可靠性指标 R^* 以及初始种群的局部最优解 P_l 和全局最优解 P_g ;

Step 2 根据速度可控粒子更新策略更新粒子的速度和方向;

Step 3 根据限制抽样法计算出系统的预计可靠度 R , 比较 R 与 R^* 的差值, 从而确定各粒子群的适应度;

Step 4 根据粒子的适应度值, 更新局部最优解和全局最优解;

Step 5 判断迭代步数是否达到设置的迭代次数 ($t > T$), 如果达到, 则转到 Step 7; 否则转到 Step 6;

Step 6 判断适应度是否满足最小误差标准 ($R - R^* < \varepsilon$), 如果满足, 则转到 Step 7; 否则转到 Step 2;

Step 7 结束。

4 仿真分析

本文采用 Microsoft Visual Studio 2008 C#自行开发实验平台对仿真算例进行分析,实验平台运行的计算机硬件配置为 Pentium 4, CPU 3.00GHz, 内存 1G。

4.1 仿真想定设计

为验证算法的有效性,以下选择航天测控系统某飞行阶段的两个业务为例。其任务可靠性框图模型如图 1 和图 2 所示。其中 S1 ~ S10 代表 10 个不同的站点,各个站点由相应的设备按照一定的逻辑关系组成,逻辑结构如表 1 所示,图中时间刻度为 h:min:s,如 5:0:40 表示 5 h 0min 40s。

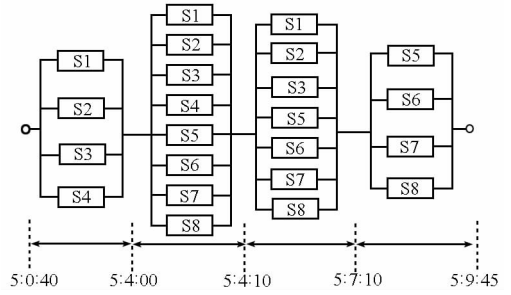


图 1 业务 1 的任务可靠性框图

Fig. 1 Sequential diagram of spaceflight mission 1

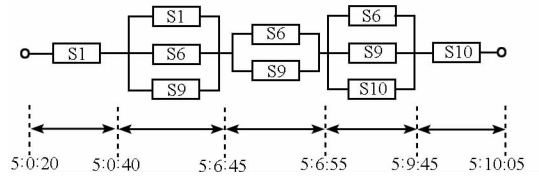


图 2 业务 2 的任务可靠性框图

Fig. 2 Sequential diagram of spaceflight mission 2

表 1 站点设备逻辑组成表

Tab. 1 Logic table of equipments

地面站	组成设备	逻辑结构
S1	S11 P11 P12	S11 — P11 — P12
S2	S21 P11 P12	S21 — P11 — P12
S3	S31 P11 P12	S31 — P11 — P12
S4	S41 P11 P12	S41 — P11 — P12
S5	S51 S52 S53 S54 S55 S56 P11 P12 P13 P14	S51 — S52 — S53 — S54 — P13 S55 — S56 — P14 — P11 — P12
S6	S61 S62 S63 S64 S65 S66 P11 P12 P13 P14	S61 — S62 — S63 — S64 — P13 S65 — S66 — P14 — P11 — P12
S7	S71 S72 S73 S74 S75 S76 P11 P12 P13 P14	S71 — S72 — S73 — S74 — P13 S75 — S76 — P14 — P11 — P12
S8	S81 S82 S83 S84 S85 S86 P11 P12 P13 P14	S81 — S82 — S83 — S84 — P13 S85 — S86 — P14 — P11 — P12
S9	S91 S92 S93 S94 S95 S96 P11 P12 P13 P14	S91 — S92 — S93 — S94 — P13 S95 — S96 — P14 — P11 — P12
S10	S101 S102 S103 S104 S105 S106 P11 P12 P13 P14	S101 — S102 — S103 — S104 — P13 S105 — S106 — P14 — P11 — P12

其中 S11 ~ S106 分别代表各地面站完成任务所用设备、P11 ~ P14 分别代表公用的控制中心、通信设备和路由等。假设系统的可靠度指标为 $R^* = 0.995$,各个设备的初始可靠度指标为 0.95,站属设备的可靠性指标限制条件为 $800 > MTBF_{S_{mn}} > 1$,公用设备的可靠性指标限制条件为 $800 > MTBF_{P_{mn}} > 2$,单位为 h。

4.2 算例

本算例中最大迭代次数 $T = 40$,速度迭代公式的各参数取值分别为: $w \in [0.7, 1.4], c_1 = c_2 \in$

[2,7]。对想定进行了 10 次仿真计算,系统的预计值和所需时间如表 2 所示。对分配效果的评价标准是分配后预计值与目标值的差距以及所需的分配时间,VCPSO 分配效果与标准粒子群算法(BPSO)和启发式(HA)算法^[4]分配效果进行了比较,见表 3。

由表 3 可见,VCPSO 计算时间和计算效果比 BPSO 和 HA 有较大幅度改善,并且随着想定规模的增大,VCPSO 的优势更加明显。

表 2 VCPSO 分配结果表

Tab.2 Allocation results of VCPSO

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次	第九次	第十次
预计值	0.995 751	0.995 794	0.995 308	0.995 002	0.995 115	0.995 388	0.995 635	0.995 181	0.995 027	0.995 002
运行时间	347.03	345.53	351.14	350.78	340.78	422.09	345.98	349.59	343.26	349.85

表 3 分配结果对比

Tab.3 Comparison of allocation results

HA		BPSO		VCPSO	
分配后系统的可靠度指标	平均运行时间	分配后系统的可靠度指标	平均运行时间	分配后系统的可靠度指标	平均运行时间
最优值	最差值	最优值	最差值	最优值	最差值
0.995 104	0.996 254	0.995 026	0.995 925	0.995 002	0.995 794
436.826	041	350.78	340.78	349.59	343.26

选取想定某次计算结果,给出粒子群迭代过程中可靠性预计值的变化情况,如图 3 所示。由图 3 可见,VCPSO 在迭代过程前期的全局探索过程中,使可靠度的预计增长较大(从 0.908786 增加到 0.994881);后期局部寻优过程中,算法在保证预计值增加的同时,使得可靠度预计值与指标值最大限度接近,最终达到近似最优解。同时,VCPSO 能在 40 步迭代中获得较优的结果,具有很好的收敛性。

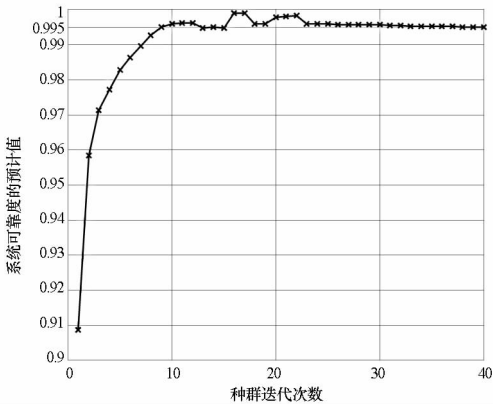


图 3 可靠度预计值变化图

Fig.3 Relationship diagram between predicted value and population iterating times

5 结束语

本文构建了航天测控系统任务可靠性分配模型,设计了航天测控系统任务可靠性分配问题的粒子群优化框架。针对粒子群优化易陷入局部极值的缺点,改进了算法的迭代过程,提出了速度可控的粒子群算法,本文提出的问题求解框架及算法为解决航天测控系统任务可靠性分配等复杂系统优化问题提供了一种新的工具。

参考文献 (References)

[1] 于志坚. 航天测控系统工程[M]. 北京: 国防工业出版

社,2008.
 YU Zhijian. Space TT&C system engineering [M]. Beijing: Defenses Industry Press, 2008. (in Chinese)
 [2] Tian Z G, Zuo M J, Huang H Z. Reliability-redundancy allocation for multi-state series-parallel systems [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57(2): 303-311.
 [3] Zhang X G, Wu X Y. A heuristic algorithm for mission reliability allocation of spaceflight TT&C system [C] // The Proceedings of 9th International Conference on RMS, Guiyang, China, 2011, 6: 1208-1213.
 [4] Yalaoui A, Châtelet E, Chu C B. A new dynamic programming method for reliability & redundancy allocation in a parallel-series system [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2): 254-262.
 [5] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // Proc. of IEEE International Conf. on Neural Networks, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1995.
 [6] Meng L, Wang G, Wu X Y. Mission reliability analysis of TT&C system using BDD algorithm [C] // Proceeding of the 7th International Conference on "Mathematical Method in Reliability". Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011: 682-686.
 [7] 闫华, 武小悦. 多阶段系统可靠性分析的状态映射机制 [C] // 2011 年复杂系统理论与方法及其工程实践学术会议, 北京: 中国系统工程学会, 2011: 648-651.
 YAN Hua, WU Xiaoyue. States mapping mechanism in PMS reliability analysis [C] // Conference on Complex Systems Theory, Methodology and Engineering Practice, Beijing: Systems Engineering Society of China, 2011: 648-651. (in Chinese)
 [8] Yang X S, Wu X Y. Mission reliability evaluation of TT&C system using discrete-event simulation [C] // Proceeding of the 7th International Conference on "Mathematical Method in Reliability", Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011: 672-676.
 [9] Xu S W, Wu X Y, Yan H. An efficient and approximate evaluation method for mission reliability of TT&C system [C] // Proceeding of the 7th International Conference on "Mathematical Method in Reliability", Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011: 687-692.
 [10] 常飞, 武小悦. 卫星数据调度问题的速度可控粒子群优化算法 [J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 2015-2022.
 CHANG Fei, WU Xiaoyue. Satellite data transmission scheduling problem based on velocity controllable particle swarm optimization [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 2015-2022. (in Chinese)