

航空发动机分布式控制拓扑结构优化方法

宋军强^{1,2}, 汤丽丽¹, 潘慕绚¹, 黄金泉^{1,3}

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 中国航空工业集团公司 航空动力控制系统研究所, 江苏 无锡 214063;
3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 以控制系统的质量和可靠性为目标, 采用基于遗传算法的改进 NSGA(non-dominated sorting genetic algorithm)-II 对航空发动机分布式控制系统的网络拓扑结构进行优化设计. 针对可靠性评估方法存在的不足, 提出一种用于评估一般网络结构可靠性的方法. 结果表明: 随着加入的环形节点的增加或基本回路数目增加, 系统的质量和可靠性都逐渐增大, 但当基本回路数目大于 2 时, 系统的质量会快速增加而可靠性则没有明显变化. 因此, 在系统质量和可靠性的综合影响下, 航空发动机网络拓扑结构中的基本回路数应尽可能不大于 2.

关 键 词: 航空发动机; 分布式控制系统; 改进 NSGA-II; 可靠性评估; 网络拓扑结构

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Aero-engine distributed control system topology optimization method

SONG Jun-qiang^{1,2}, TANG Li-li¹, PAN Mu-xuan¹, HUANG Jin-quan^{1,3}

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Aviation Motor Control System Institute, Aviation Industry Corporation of China, Wuxi Jiangsu 214063, China;
3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: Improved NSGA(non-dominated sorting genetic algorithm)-II was used to optimize the network topology of aero-engine distributed control system while setting the reliability and weight of the control system as subjects. Taking the former reliability evaluation method's shortcoming into consideration, a method was proposed. Results show that reliability and weight of the control system increase with the increasing of nodes added into the circle topology or the increase of fundamental cycle's number. But when the number of fundamental cycle is larger than two, weight increases quickly without obvious increase of control system reliability. So, the number of fundamental cycles in aero-engine distributed control system topology shouldn't be larger than two in order to keep a balance between the topology's weight and the reliability.

Key words: aero-engine; distributed control system;

收稿日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(51406084); 中央高校基本科研业务费专项资金(NP2012504); 航空基金(2013ZB52030); 中央高校青年创新基金(56XAA14017, 56XHA13005)

作者简介: 宋军强(1972—), 男, 浙江奉化人, 研究员, 博士生, 主要从事航空发动机控制研究.

通讯作者: 潘慕绚(1977—), 女, 江西九江人, 副教授, 博士, 主要从事航空发动机控制研究.

improved non-dominated sorting genetic algorithm- II ;
reliability evaluation; network topology

为适应越来越复杂的控制功能,航空发动机控制系统正向低成本、轻质量和高性能方向发展^[1],目前最为有效的办法之一是将发动机控制系统由集中式控制结构向分布式控制结构过渡,减少推进系统控制器和附件系统质量,增加系统通用性、可靠性^[2-3].典型的航空发动机分布式控制系统其功能元件采用智能装置(包括智能传感器和智能执行机构),分布式控制系统的空间结构是以系统节点为节点,以节点间连接的通讯总线为边形成的拓扑结构,系统节点之间根据需要通过拓扑网络进行信息交互^[4];而集中式控制系统则是由传感器或执行机构与电子控制器之间的点对点连接形成的控制结构,这是分布式控制系统与集中式控制系统之间最显著的区别^[5].Thompson等曾对航空发动机分布式控制系统构架进行研究^[6],但主要针对环型、星型和总线型拓扑结构.事实上,分布式控制系统没有规定具体结构形式,可以是系统节点的不同聚类,以实现效益最大化^[7].这意味着,航空发动机分布式控制系统结构并不局限于环型、星型和总线型,它可以是这3种类型的混合结构,也可是不规则的网络拓扑结构.

本文选择以轻质量和高可靠性为追求目标,对航空发动机分布式控制系统进行无规则网络拓扑结构优化.需要指出的是,在此过程中,控制系统的可靠性评估是一个难题.控制系统的可靠性不仅与控制系统节点与通讯总线的可靠性有关,而且与网络结构有关,由于网络结构的复杂多变使得控制系统的可靠性评估变得困难.目前,已有学者对通信网络可靠性做出相应研究,如利用最小路径和 binary decision diagram(BDD)算法求得源节点和阱节点在规定时间和规定条件下的连通可靠性作为通信网络可靠性^[8];文献[9]中运用网络收缩法得到使所有节点保持连通的所有子网络,以所有子网络的生成概率之和作为通信网络可靠性.由于分布式控制系统中不存在源节点和阱节点,即每个节点都可以是源节点和阱节点,所以这一可靠性评估方法并不适用于控制系统的可靠性评估.本文在文献[9]的可靠性评估思想基础上,提出一种用于一般网络可靠性的评估方法,并以此计算航空发动机分布式控制系统的可靠性.

本文研究航空发动机分布式控制系统的结构优化,其数学本质是多目标的组合优化问题,可运

用多目标遗传算法来进行求解.目前较为常用的多目标遗传算法有 multi-objective genetic algorithm(MOGA)^[10], Pareto archived evolution strategy(PAES)^[11], non-dominated sorting genetic algorithm- II(NSGA-II)^[12-13]和 strength Pareto evolutionary algorithm 2(SPEA2)^[14].其中 NSGA-II 计算量小,计算时间较短,并且通过精英保留、快速无支配排序和个体密集程度估计能较好的保持 Pareto 解集的多样性和避免优秀个体的流失.但是,标准 NSGA-II 解集多样性不足和解集容易陷入局部最优,这些问题在求解较为复杂的实际问题时更为突出.所以,本文对 NSGA-II 进行改进以期更好地解决航空发动机分布式控制结构的优化问题.

1 分布式控制系统可靠性评估方法

系统的可靠性以它在规定条件下规定时间内完成规定功能的能力来评定.航空发动机分布式控制系统网络需要保证在规定时间内所有系统节点与通讯总线保持连接以完成信息交互,因此定义分布式控制系统网络的可靠性为:在规定条件下、规定时间内,所有节点保持连通的能力,即所有节点通过总线保持连通的概率.

这样可以将控制系统网络的可靠性分成两部分:一是网络中节点的可靠性,它是所有节点可靠性的乘积,是一个常数,不随网络结构的不同而变化;网络中传输路径的可靠性,它与网络结构密切相关.因此,为区分不同网络结构可靠性的高低,只需计算控制系统网络中传输路径的可靠性.所以,本文中用控制系统网络中传输路径的可靠性代替控制系统网络的可靠性.

本文中定义 (N, M) 网络为有 N 个节点、 M 条链路、并且所有节点保持连通的网络.设原网络为 (N, M) 网络,定义 $(N, M-i)$ 网络为在原网络中断掉 i 条链路后所有节点仍保持连通的网络,称为 (N, M) 网络的子网络.由于 N 个节点至少需要 $N-1$ 条链路连接,所以 $(N, N-1)$ 网络是原网络链路最少的子网络,称为原网络的生成树.这就意味着 $1 \leq i \leq M-N+1$.本文不考虑节点、链路故障之间的相互耦合作用,所以,控制系统中每个节点、每条链路的故障发生是相互独立的,则系统可靠性 R 为

$$R = \sum_{i=0}^{M-N+1} \sum_{j=1}^{\text{num}(N, M-i)} \left\{ \prod_{k=1}^M [(1-s_k) + (-1)^{1-s_k} \cdot p_k] \right\} \quad (1)$$

其中 $\text{num}(N, M-i)$ 表示 $(N, M-i)$ 网络拓扑结构的数目, p_i 表示第 i 链路的可靠性, s_i 表示第 i 链路的断开情况, 若断开 $s_i=0$, 否则 $s_i=1$. 所以求解系统可靠性除需要知道每条链路的可靠性, 还需知道每种子网络的数目和每个子网络中每条链路的断开情况. 文献[9]运用网络收缩法求解子网络的数目, 以图1所示的网络结构为例. 图1中原连通网络有9个节点, 12条链路, 以 $(9, 12)$ 网络表示. 容易看出, 图1的网络结构中去掉12条链路中的任意一条, 所有节点仍能保持连通, 即 $(9, 11)$ 网络的数目应为12, 而文献[4]中计算结果为8. 这是因为文献[9]中用所有3阶收缩网络(即将4个基本回路中的任意3个回路收缩为一个节点)的生成树总数目作为 $(9, 11)$ 网络的数目, 共有4种3阶收缩网络如图2所示. 由图2可知, 此种方法只考虑到了8条链路的断开, 却忽略了在4种收缩网络中都被收缩的链路 e_1, e_6, e_7, e_8 . 所以文献[9]中的求解子网络数目的方法存在一定的漏洞, 为此, 本文提出另一种计算子网络数目的方法.

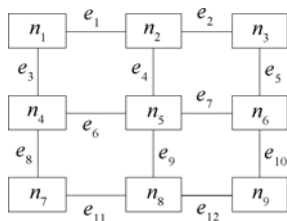


图1 网络拓扑结构示例

Fig. 1 Network topology example

设原网络为 (N, M) 网络, 在原网络中去掉 i ($1 \leq i \leq M-N+1$) 条链路共有 C_M^i 种不同组合, 判断 C_M^i 种组合中使所有节点保持连通的组合数, 即 $\text{num}(N, M-i)$. 但是如果将 C_M^i 种可能穷举, 在 N, M 较大的情况下, 这种计算量无疑是难以接受的. 所以, 本文提出如下算法:

1) 对 M 条链路编以 $1 \sim M$ 的号码.

2) 穷举法得到 $\text{num}(N, M-1)$, 将可删除的路径编号存入数组 $\text{del_path}\{1\}$.

3) $i > 2$ 时, 设去掉链路 $(e_1, e_2, \dots, e_i)$ 后生成一种 $(N, M-i)$ 网络, 去掉链路 $(e_1, e_2, \dots, e_i)$ 中任意 $i-1$ 条链路一定能生成一种 $(N, M-i+1)$ 网络, 那么可通过 $\text{del_path}\{1\}$ 与 $\text{del_path}\{i-1\}$ 中

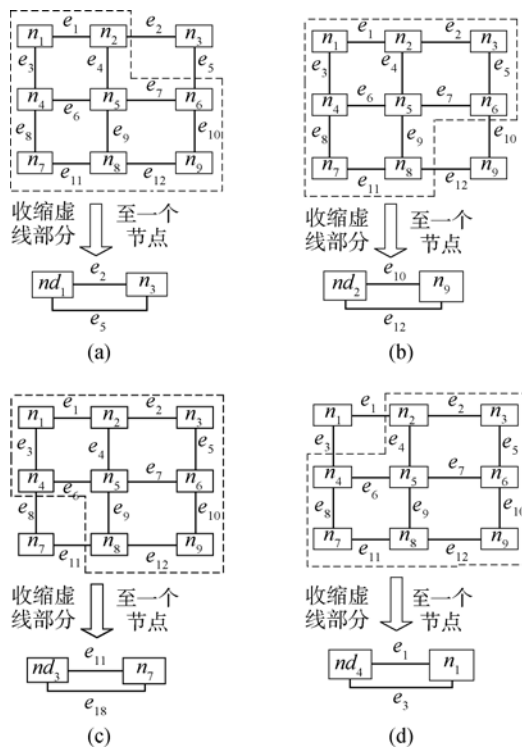


图2 3阶收缩网络拓扑结构图

Fig. 2 Third-order contraction network topology

元素的组合来确定 $\text{del_path}\{i\}$, 组合方法为, 设 $(e_1, e_2, \dots, e_{i-1}) \in \text{del_path}\{i-1\}$, 只需从 $\text{del_path}\{1\}$ 中链路编号大于 $(e_1, e_2, \dots, e_{i-1})$ 中最大链路编号处开始搜索, 找出所有可能的链路 e_i , 使得去掉链路 $(e_1, e_2, \dots, e_i)$ 后能生成一种 $(N, M-i)$ 网络.

此种算法可以减少重复搜索和无效所搜, 有效减少计算时间, 提高计算效率. 并且此种方法在计算子网络数目的同时, 记录了每个子网络中断开的链路, 即具备了运用式(1)求解系统可靠性所需的所有的条件.

以图1所示的结构为例, 用 $(9, 12)$ 网络表示. 运用上述方法求得 $(9, 8)$ 网络的数目为192, 即 $(9, 12)$ 网络的生成树的个数为192. 根据文献[15]定理可知 (N, M) 网络的生成树的数目 n 为

$$n = \det(\mathbf{A}\mathbf{A}^T) / 2^{N-1} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{A}$ 表示 (N, M) 网络的关联矩阵, $\det(\cdot)$ 表示求取矩阵的行列式值. 由此算得 $(9, 12)$ 网络的生成树的数目也为192. 两者计算结果相同, 从而验证上述计算方法的正确性.

2 航空发动机分布式控制系统网络结构优化

本文采用改进多目标遗传算法 NSGA-II 进

行航空发动机分布式控制系统的网络结构优化。

2.1 个体编码

设控制系统共有 p 个节点. 本文每个个体编码对应一种控制系统网络结构, 即每个个体需要反映 p 个节点之间的相互连接情况. 对于节点间的连接情况可以由邻接矩阵表示, 定义邻接矩阵为

$$\begin{cases} x(n_i, n_j) = \begin{cases} 1 & \text{节点 } n_i \text{ 与节点 } n_j \text{ 连接} \\ 0 & \text{节点 } n_i \text{ 与节点 } n_j \text{ 不连接} \end{cases} & (i \neq j) \\ x(n_i, n_j) = 0 & (i = j) \end{cases} \quad (4)$$

由上述定义可知, $x(n_i, n_j) = x(n_j, n_i)$, 所以邻接矩阵是主对角元素全为 0 的对称矩阵. 那么, 邻接矩阵左上角元素可以表征整个邻接矩阵, 所以对个体的编码可以为

$$C_{\text{ind}} = [x(n_1, n_2), \dots, x(n_1, n_p), \dots, x(n_{i-1}, n_p), x(n_i, n_{i+1}), \dots, x(n_{p-1}, n_p)] \quad (5)$$

2.2 目标函数的建立

本文以控制系统的质量和可靠性为目标对航空发动机分布式控制系统结构进行优化设计, 所以, 目标函数的建立基于控制系统质量和可靠性的求解。

控制系统质量主要由系统节点、通讯网线、线路接口等质量组成. 由于控制系统的结构设计是针对固定数目的系统节点之间连接关系的设计, 所以对于不同的控制系统结构, 系统节点的质量保持不变, 在控制系统质量的优化中可以不考虑. 本文假设: ①每单位长度通讯总线质量保持不变; ②每个线路接口质量相同. 从而将控制系统质量的优化转化为通讯总线长度和线路接口个数的求解。

通讯总线长度与节点之间的连接关系和节点之间的距离有关, 节点之间的连接关系可由邻接矩阵反应, 这就要求求解节点之间的距离。

航空发动机机匣简化模型如图 3 所示, 将简化机匣模型沿着径向和轴向划分网格, 利用最短路径的 Floyd 算法^[16]求解节点 n_i 所在的网格点与节点 n_j 所在网格点之间的最短路径的长度, 记为 $d(n_i, n_j)$. 求出 p 个节点中任两个节点之间的距离, 形成距离矩阵

$$D = \begin{bmatrix} d(n_1, n_1) & \cdots & \cdots & \cdots & d(n_1, n_p) \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & d(n_i, n_j) & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ d(n_p, n_1) & \cdots & \cdots & \cdots & d(n_p, n_p) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X = \begin{bmatrix} x(n_1, n_2) & \cdots & \cdots & \cdots & x(n_1, n_p) \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & x(n_i, n_j) & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ x(n_p, n_1) & \cdots & \cdots & \cdots & x(n_p, n_p) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

其中 $d(n_i, n_i) = 0$, 所以距离矩阵也是主对角元素全为 0 的对称矩阵. 通讯总线长度 L 为

$$L = \frac{1}{2} X D \quad (7)$$

其中 X 表示节点的邻接矩阵。

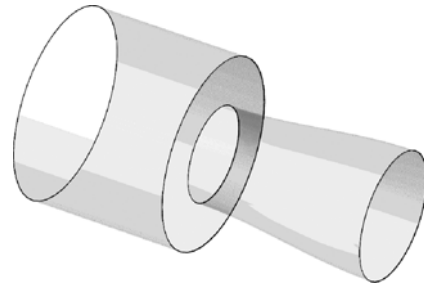


图 3 航空发动机机匣简化模型

Fig. 3 Aero-engine case simplified model

控制系统接口数量与控制系统中节点间的连接关系相关, 若有 $x(n_i, n_j) = 1$, 则控制系统接口数量会增加两个, 即

$$N = 2 \times \text{num}(C_{\text{ind}} = 1) \quad (8)$$

其中 N 表示接口总数量, $\text{num}(C_{\text{ind}} = 1)$ 表示个体编码中为 1 的个数, 即控制系统拓扑结构的连接边数。

控制系统质量 W 为

$$W = \rho(L + \omega N) \quad (9)$$

其中 ω 表示每个接口引起的质量变化相对于每单位长度通讯总线质量的权重, ρ 表示通讯总线的密度。

控制系统可靠性的评估在第 2 节中进行了详细的描述, 通过计算, 求得可靠性为 R . 由此可以得到航空发动机分布式控制系统结构优化设计时的双目标 $J = \begin{bmatrix} W \\ R \end{bmatrix}$. 然后利用标准 NSGA-II 进行优化设计, 但是标准 NSGA-II 容易陷入局部最优, 所以本文对标准 NSGA-II 进行了改进。

2.3 遗传算法改进

标准 NSGA-II 容易陷入局部最优主要原因是随着迭代次数的增加,父代种群中重复个体数目增加,随之相同个体进行遗传变异操作的概率增大,导致个体重复数的不断增加,影响种群的多样性,种群容易收敛到局部最优。所以,需要对种群中的重复个体进行控制,这主要可以从两个方面进行:①抑制重复个体的生成;②删除产生的重复个体。对此,本文从以下几个方面进行了考虑:

1) NSGA-II 特点之一是种群个体的快速无支配排序,即根据个体的多目标值将个体分成不同的等级 1,2,⋯,等级 1 为最高等级,同一等级中个体的优劣程度相同。NSGA-II 中父代种群的个体优先从等级 1 中选取,随着重复个体数目的增多,等级 1 中重复个体的数目也相应增多,从而新父代种群中存有较多的重复个体,破坏新父代种群中个体的多样性,形成恶性循环。所以,为保证种群的多样性,新父代种群应由来自不同等级的个体组成^[17]。新父代种群中同一等级的个体数目为

$$n_i = N \frac{1-r}{1-r^K} r^{i-1} \quad (10)$$

式中 K 表示个体的等级, $i=1,2,\dots,K$; r 为自行设定值, $0 < r < 1$, 本文取 $r=0.5$; N 表示父代种群的个体数。

如果 i 等级的 n_i 小于此等级的个体数 m_i , 则将此等级的个体按照个体的稀疏程度进行排序, 越稀的个体越优, 选取最优的 n_i 个个体进入新父代种群; 如果 n_i 大于此等级的个体数 m_i , 此等级中所有个体进入父代种群, 并且 $n_{i+1} = n_{i+1} + n_i - m_i$, 以此类推。

2) 遗传算法寻优过程中需要重复个体引导算法收敛, 如果种群中每个个体都不相同在很大程度上增加收敛时间。所以如果寻优算法每迭代一次都删除种群中的重复个体, 会造成收敛时间过长, 因此, 本文选择每迭代 50 次进行重复个体的删除, 同时对等级 1 中的所有个体局部寻优, 局部寻优过程实际上是对个体向着更优的方向进行变异操作, 这样可避免在较短的时间内收敛到局部最优、增加种群的多样性并且不造成收敛时间显著增加。

3 优化算例

为简化计算只选取 8 个节点作为航空发动机分布式控制系统的系统节点进行研究。选取交叉

概率 $p_c = 0.9$, 变异概率 $p_m = 0.1$, 种群规模为 100, 迭代次数为 100, 运用改进 NSGA-II, 以控制系统的质量和可靠性为目标, 对航空发动机分布式控制系统结构进行优化设计。优化结果如图 4 所示, 横坐标为系统的质量, 以系统束长度 W/ρ 计, 选取图 4 中的 5 个个体(记为 a, b, c, d, e), 5 个个体所代表的网络结构如图 5 所示。

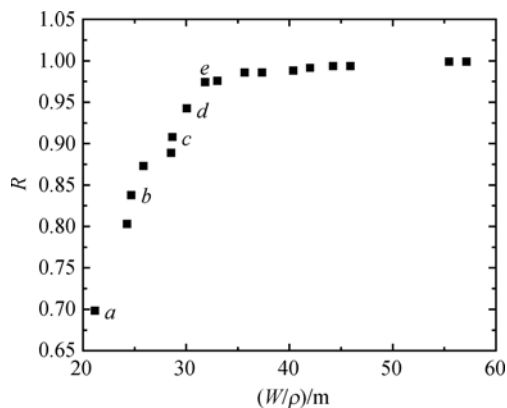


图4 分布式控制系统拓扑结构优化结果

Fig. 4 Optimization results of distributed control system topology

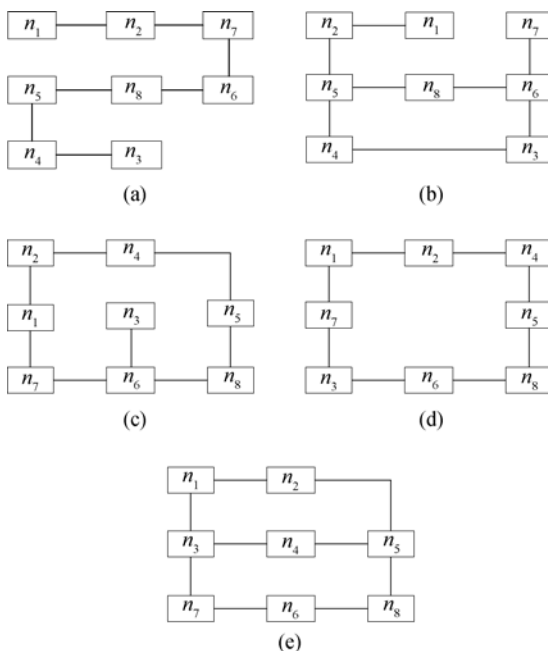


图5 控制系统拓扑结构平面连接图

Fig. 5 Plane connection diagram of control system topology

由图 5 中的 5 个网络结构平面示意图可以看出:总线型结构的质量最小但是可靠性相对也最低,环型与总线型的混合拓扑结构相对于单一的

总线型结构,控制系统的质量和可靠性都有所增加,并且可靠性的增加速度较快.随着混合拓扑结构中连入环的节点逐渐增多,质量和可靠性也逐步增加,直至8个节点形成环型结构.双环结构相对于单环结构在控制系统质量增加较小的情况下,系统可靠性存在明显的提高.而当控制系统的结构复杂度进一步增加,即网络结构中基本回路(互不嵌套的环形)数量的增多,控制系统的质量迅速增加,而可靠性增加幅度很小,这也就意味着,在此种优化条件下,双环结构的可靠性已经趋于饱和值,所以,选择控制系统网络结构方案时,应尽量不选择比双环结构更为复杂的网络结构.

4 结 论

考虑到航空发动机轻质量、高可靠性的实际需求,本文以控制系统的质量和可靠性为优化目标提出一种用于一般网络的可靠性评估方法,并对NSGA-II双目标遗传算法进行改进,在此基础上对航空发动机分布式控制系统的网络拓扑结构进行优化设计,获得质量和可靠性都最优的一组可能的分布式控制系统结构.结果表明:总线型、单双环型以及总线型和单环型的混合拓扑结构可作为航空发动机分布式控制系统结构的首选.

参考文献:

- [1] Balakrishnan S R. Evolution of control systems for aircraft gas turbine engines under development [J]. Journal of Aeronautical Society of India, 1996, 48(1): 96.
- [2] Lewis T J. Distributed architectures for advanced engine control systems[R]. Advisory Group for Aerospace Research and Development, AGARD-CP-572, 1996.
- [3] Ballal D R, Zelina J. Progress in aero-engine technology [J]. Journal of Aircraft, 2004, 41(1): 43-50.
- [4] Pakmehr M, Mounier M, Fitzgerald N, et al. Distributed control of turbofan engines[R]. AIAA-2009-553, 2009.
- [5] 宋军强, 潘慕绚, 黄金泉. 航空发动机分布式控制系统技术分析及其系统方案[J]. 航空动力学报, 2013, 28(10): 2391-2400.
SONG Junqiang, PAN Muxuan, HUANG Jinquan. Technology analysis and system scheme for aero-engine distributed control system [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(10): 2391-2400. (in Chinese)
- [6] Thompson H A, Fleming P J, Chipperfield A J. Multi-objective optimization of system architectures for distributed aero-engine control system [C] // Proceeding of International Gas Turbine and Aero-engine Congress and Exhibition Conference, Stockholm, Sweden; American Society of Mechanical Engineers, 1998: 4-9.
- [7] Behbahani A, Culley D, Smith B, et al. Status, vision, and challenge of an intelligent distributed engine control architecture[R]. Society of Automotive Engineers, SAE-2007-01-3859, 2007.
- [8] 胡娱欧. 电力光纤通信可靠性研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.
HU Yuou. Study on reliability of power optical fiber communications network [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2009. (in Chinese)
- [9] 陈国龙, 张德运, 王晓东. 通信网络可靠性评估的一种算法[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 21(12): 1248-1251.
CHEN Guolong, ZHANG Deyun, WANG Xiaodong. An algorithm for reliability evaluation of communication networks [J]. Mini-micro System, 2003, 21(12): 1248-1251. (in Chinese)
- [10] Fonseca C M, Fleming P J. Multi-objective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms: I a unified formulation [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics; Part A Systems and Humans, 1998, 28(1): 26-37.
- [11] Knowles J, Corne D. The pareto archived evolution strategy: a new baseline algorithm for pareto multi-objective optimization [C] // Proceeding of Evolutionary Computation Conference, Washington D C: IEEE, 1999: 98-105.
- [12] Kalyanmoy D, Samir A, Amrit P, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2000, 1917: 849-858.
- [13] Deb K, Agarwal S, Megarivan T. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [14] Eckart Z, Marco L and Lothar T. SPEA2: improving the strength pareto evolutionary algorithm [R]. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [15] 徐俊明. 图论及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [16] 项荣武, 刘燕杰, 胡忠盛. 图论中最短路径问题的解法[J]. 沈阳航空工业学报, 2007, 21(2): 86-88.
XIANG Rongwu, LIU Yanjie, HU Zhongsheng. Solution of the shortcut problem in graph algorithms [J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2007, 21(2): 86-88. (in Chinese)
- [17] Deb K, Goel T. Controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithms for better convergence [C] // Proceeding of Evolutionary Multi-Criterion Optimization Conference, Berlin Heidelberg: Springer, 2001: 67-81.

(编辑: 王碧琚)