第 27 卷第 5 期
2010 年 5 月

控制理论与应用
Control Theory & Applications

Vol. 27 No. 5
May 2010

文章编号: 1000−8152(2010)05−0575−07

离散Weibull分布下实现系统可用度的最小波动

王立超[1,2], 杨 懿[2], 邹 云[1], 于永利[3], 康 锐[2]

(1. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094; 2. 北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100191;

3. 军械工程学院 维修工程研究所, 河北 石家庄 050003)

摘要: 基于目前装备系统中存在的新装备在投入使用初期出现瞬时可用度剧烈波动的现象, 分析了离散时间下单部件可修系统的瞬时可用度模型, 提出了可用度振幅的概念用以刻画这种系统瞬时可用度波动. 在此基础上, 建立了关于可用度波动振幅的最优模型. 然后针对装备工程大量存在离散Weibull分布的假定, 用粒子群算法解决了系统可用度最小波动的设计问题, 并用两组算例对最优设计模型的有效性给予了验证说明.

关键词: 瞬时可用度; 单部件可修系统; 粒子群算法; 离散Weibull分布

中图分类号: TB114.3 **文献标识码**: A

Minimal availability variation design of repairable system under discrete Weibull distribution

WANG Li-chao[1,2], YANG Yi[2], ZOU Yun[1], YU Yong-li[3], KANG Rui[2]

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;
2. Department of System Engineering of Engineering Technology,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
3. Institute of Maintenance Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract: Based on the variation of instantaneous availability of new equipment in its early stage of application, we study the instantaneous availability model for a system with repairable assembly parts at discrete-time instances, and propose the concept of availability amplitude to characterize the instantaneous availability variation of this system. On this basis, the optimal model of the availability amplitude for the system is built. The particle-swarm method is applied to minimize the availability variation of this system under the assumption of discrete Weibull distribution which is abundant in equipment engineering. Finally, two examples are given to illustrate the effectiveness of the proposed model.

Key words: instantaneous availability; particle-swarm-optimization; discrete Weibull distribution

1 引言(Introduction)

可用性表示装备或产品在任一时刻需要和开始执行任务时, 处于可工作或可使用的程度. 它是将装备系统的可靠性、维修性、保障性(RMS)变换成效能时的一个参数, 表征了装备在任意时刻可投入战斗的能力, 可用性的概率度量称为可用度[1~3].

基于可用度的优化设计主要是指以可用度作为优化指标或约束条件的数学模型, 具体形式根据装备和研究阶段的设计变量和约束条件而定, 如在论证阶段给定系统固有可用度的门限值, 而在研制阶段给出平均故障间隔时间(MTBF)和平均修复时间(MTTR)的门限值. 从检索的文献来看, 基于系统可用度的系统设计主要可以分为: 系统最优设计[4~10], 维护和测试策略优化[11~15], 备件冗余优化[16~18], 或是它们的综合[19~21].

文献[22]发现瞬时可用度的调整并不需要变动MTBF和MTTR, 甚至固有可用度. 这种现象表明在对装备进行设计和分析时, 单单考虑稳态指标往往是不够的. 文献[23]研究某复杂系统可用度时发现, 该系统瞬时可用度存在波动现象, 并且这种波动随着时间的增长而减小, 并趋于零. 在新装备投入使用初期, 确实存在可用度波动的现象[24]. 文献[25,26]根据工程上的需要, 通过分析瞬时可用度在有限时间段内的波动变化情况, 研究了新装备系统由于子系统间的相互作用而产生的匹配问题, 并提出了可用度波动的相关概念和研究框架. 那么, 如何设计合

收稿日期: 2008−12−22; 收修改稿日期: 2009−07−05.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60674014, 60874007).

理的匹配系统来消除或尽量减少这种可用度的波动程度, 为装备的设计和管理探索一条可行的解决方法, 从而为RMS工程的实施提供参考, 这构成了本文的研究动机. 因此, 论文也是在文献[24～26]的基础上进行的展开.

目前, 基于可用度的优化设计基本都是围绕固有可用度或稳态可用度展开, 而对于减小系统瞬时可用度波动的设计却未见有其他文献涉及. 为了更加全面地研究系统可用度, 本文将主要研究系统瞬时可用度波动的最优设计问题.

Weibull于1951年提出Weibull分布[27], 实践表明该分布在RMS工程中具有重要意义. Weibull分布被广泛应用, 诸如钢铁的疲劳寿命、玻璃的结构强度、管道的腐蚀等领域[28～33]. 近年来, 文献[34～37]对Weibull分布进行了拓展. 由于Weibull分布在RMS工程中具有很强的代表性, 本文将在两参数离散Weibull分布的假定下进行研究.

粒子群算法(PSO)最早由James Kenndy和Russell Eberhart于1995年提出[38]. 研究和实践表明, PSO在多维空间函数寻优、动态目标寻优等方面有着收敛速度快、解质量高、鲁棒性好等优点, 在可靠性工程中也得到了广泛应用[39～46]. 本文将选择该算法来解决可用度波动设计中的优化问题.

2 系统瞬时可用度模型[24](Instantaneous availability model)

假定系统由单个部件组成, 寿命为X, 故障后对其进行修理, 修复时间为Y, 修复后部件如新并立即转为工作状态, 系统故障率和修复率函数分别为$\lambda(k)$和$\mu(k)$, $k=0,1,2,\cdots$. 进一步假定X和Y相互独立, 定义系统状态:

$$\begin{cases} Z(k)=0, \text{系统在}k\text{时刻能正常工作}, \\ Z(k)=1, \text{系统在}k\text{时刻处于故障状态}, \end{cases}$$
$$k=0,1,2,\cdots.$$

令$P_0(k,j)$表示系统在k时刻已经处于了0状态j个单位时间的概率, $P_1(k,j)$表示系统在k时刻已经处于了1状态j个单位时间的概率, 即

当$j=0,1,\cdots,k-1$时:

$$\begin{cases} P_0(k,j)=\Pr\{Z(k)=\cdots=Z(k-j)=0, \\ \qquad\qquad Z(k-j-1)=1\}, \\ P_1(k,j)=\Pr\{Z(k)=\cdots=Z(k-j)=1, \\ \qquad\qquad Z(k-j-1)=0\}. \end{cases}$$

当$j=k$时:

$$\begin{cases} P_0(k,k)=\Pr\{Z(k)=\cdots=Z(0)=0\}, \\ P_1(k,k)=\Pr\{Z(k)=\cdots=Z(0)=1\}. \end{cases}$$

那么系统的状态变化过程可以描述为

$$\begin{cases} P_0(k+1,j+1)=P_0(k,j)(1-\lambda(j)), \\ P_1(k+1,j+1)=P_1(k,j)(1-\mu(j)). \end{cases} \tag{1}$$

边界条件

$$\begin{cases} P_0(k+1,0)=\sum\limits_{j=0}^{k} P_1(k,j)\mu(j), \\ P_1(k+1,0)=\sum\limits_{j=0}^{k} P_0(k,j)\lambda(j). \end{cases} \tag{2}$$

一般假定部件开始为新, 即初值

$$P_0(0,0)=1, P_1(0,0)=0. \tag{3}$$

系统瞬时可用度为

$$A(k)=\sum_{j=0}^{k} P_0(k,j). \tag{4}$$

3 最小可用度波动设计模型(Minimal availability undulation model)

由第2部分, 有

$$EX=\sum_{k=0}^{+\infty}\{k\lambda(k)\prod_{j=0}^{k-1}[1-\lambda(j)]\},$$
$$EY=\sum_{k=0}^{+\infty}\{k\mu(k)\prod_{j=0}^{k-1}[1-\mu(j)]\}.$$

根据系统固有可用度A_0的定义, 可以得到

$$A_0=\frac{EX}{EX+EY}=\frac{\sum\limits_{k=0}^{+\infty}\{k\lambda(k)\prod\limits_{j=0}^{k-1}[1-\lambda(j)]\}}{\sum\limits_{k=0}^{+\infty}k\{\lambda(k)\prod\limits_{j=0}^{k-1}[1-\lambda(j)]+\mu(k)\prod\limits_{j=0}^{k-1}[1-\mu(j)]\}}.$$

定义 1 可用度(最大)振幅定义为瞬时可用度低于固有可用度的最大值:

$$M=M(\lambda(\cdot),\mu(\cdot))=A_0-\min_k\{A(k)\}\geqslant 0. \tag{5}$$

其中A_0为系统的固有可用度, $A(k)$为系统瞬时可用度, 其满足式(1)～(4).

注 1 可用度振幅反映了系统最小可用度和固有可用度的差距, 反映了可用度波动的剧烈程度. 可用度振幅越大, 就表示系统可用度的波动越剧烈.

为了更清楚地说明问题, 这里给出一个两系统比较的例子. 系统1: 寿命和修复时间均遵从形状参数为1、尺度参数为0.98的离散Weibull分布, 该离散Weibull分布退化为几何分布; 系统2: 寿命和修复时间均遵从形状参数为3、尺度参数为0.99998的离散Weibull分布. 如图1所示, 系统1的瞬时可用度单调递减, 从而其可用度振幅为0, 而系统2的瞬时可用度

出现较大波动, 可用度振幅达到0.25. 显然, 用可用度振幅来刻画可用度的波动情况在一定程度上是合理的.

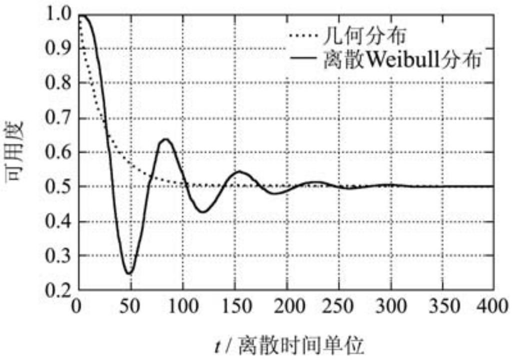

图 1　固有可用度相同的两系统瞬时可用度曲线

Fig. 1　Instantaneous availability of two systems with the same inherent availability

实际工程设计中往往要在保证系统固有可用度要求不变或在大于某临界值的情况下, 把可用度振幅作为刻画可用度波动特性的一项设计指标, 该问题可以表述为最优控制问题:

$$\min_{(\lambda(\cdot),\mu(\cdot))\in\Omega} \quad J=M(\lambda(\cdot),\mu(\cdot)),$$
$$\text{s.t. } A_0=A_0^1 \text{ 或 } A_0\geqslant A_0^1. \tag{6}$$

其中: Ω为设计约束, A_0^1表示固有可用度要求, $M(\lambda(\cdot),\mu(\cdot))$满足模型(5). 为了描述的方便, 本文仅对约束条件为$A_0=A_0^1$的情况进行研究, 其他情况可以用类似的方法.

本文主要研究离散Weibull分布条件下系统可用度波动的最优设计问题. 假定系统工作寿命X遵从尺度参数为$\alpha_1\in(0,1)$, 形状参数为$\beta_1>0$的离散Weibull分布, 修复时间Y遵从尺度参数为$\alpha_2\in(0,1)$, 形状参数为$\beta_2>0$的离散Weibull分布, 那么系统故障率函数和修复率函数分别为

$$\lambda(k)=1-\alpha_1\wedge[(k+1)\wedge\beta_1-k\wedge\beta_1],$$
$$\mu(k)=1-\alpha_2\wedge[(k+1)\wedge\beta_2-k\wedge\beta_2],$$
$$k=0,1,2,\cdots.$$

那么根据离散Weibull分布的特点[47], 有

$$M=M(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)=$$
$$A_0(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)-\min_k\{A(k;\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)\}\geqslant 0,$$
$$EX=\sum_{k=1}^{+\infty}\alpha_1\wedge(k\wedge\beta_1),$$
$$EY=\sum_{k=1}^{+\infty}\alpha_2\wedge(k\wedge\beta_2).$$

从而系统固有可用度为

$$A_0=\frac{\sum\limits_{k=1}^{+\infty}\alpha_1\wedge(k\wedge\beta_1)}{\sum\limits_{k=1}^{+\infty}\alpha_1\wedge(k\wedge\beta_1)+\sum\limits_{k=1}^{+\infty}\alpha_2\wedge(k\wedge\beta_2)}.$$

那么有如下结论成立:

命题 1　EX是α_1的单调递增函数, 是β_1的单调递减函数; EY是α_2的单调递增函数, 是β_2的单调递减函数.

命题 2　A_0是α_1的单调递增函数, 是β_1的单调递减函数, 是α_2的单调递减函数, 是β_2的单调递增函数.

那么在上述离散Weibull分布的条件下, 最优设计问题(6)退化为一个四参数的优化问题:

$$\min_{(\alpha_1,\alpha_2\beta_1,\beta_2)\in\Omega_1} \quad J=M(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2), \tag{7}$$
$$\text{s.t. } A_0(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)=A_0^1, \tag{8}$$

其中

$$\Omega_1=\{(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)|0<\alpha_1,\alpha_2<1;$$
$$\beta_1,\beta_2>0\}\cap\Omega_2,$$

Ω_2为设计约束.

因此, 如果优化问题(7)(8)有解, 即集合

$$\varTheta=\{(\alpha_1,\beta_1,\beta_2)|\exists\, x\in\Omega_1,\text{s.t.}A_0(x)=A_0^1\}$$

非空, 则存在函数

$$\varphi:(0,1)\times\varTheta\to\mathbb{R}^+,$$

使得

$$\alpha_2=\varphi(\alpha_1,\beta_1,\beta_2),A_0(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)=A_0^1.$$

那么优化问题(7)(8)退化为一个三参数的优化问题:

$$\min_{(\alpha_1,\beta_1,\beta_2)} \quad J=M(\alpha_1,\varphi(\alpha_1,\beta_1,\beta_2),\beta_1,\beta_2),$$
$$\text{s.t. } (\alpha_1,\beta_1,\beta_2)\in\varTheta. \tag{9}$$

注 2　优化问题(9)中的优化参数选为$(\alpha_1,\beta_1,\beta_2)$, 类似地还可以选$(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1)$, $(\alpha_2,\beta_1,\beta_2)$或$(\alpha_1,\alpha_2,\beta_2)$作为优化参数, 这4种选法从本质上没有差别.

一般情况下, 设计约束可取为

$$\Omega_1=\{(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)\mid\alpha_{11}\leqslant\alpha_1\leqslant\alpha_{12},$$
$$\alpha_{21}\leqslant\alpha_2\leqslant\alpha_{22},\beta_{11}\leqslant\beta_1\leqslant\beta_{12},$$
$$\beta_{21}\leqslant\beta_2\leqslant\beta_{22}\}.$$

其中:

$$0<\alpha_{11}\leqslant\alpha_{12}<1,0<\beta_{11}\leqslant\beta_{12},$$
$$0<\alpha_{21}\leqslant\alpha_{22}<1,0<\beta_{21}\leqslant\beta_{22}.$$

那么

$$A_0(\alpha_{11},\alpha_{22},\beta_{12},\beta_{21}) \leqslant A_0(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2),$$
$$A_0(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2) \leqslant A_0(\alpha_{12},\alpha_{21},\beta_{11},\beta_{22}).$$

从而有如下结论成立.

命题 3 约束优化问题(9)有解的充要条件是

$$A_0^1 \in (A_0(\alpha_{11},\alpha_{22},\beta_{12},\beta_{21}), A_0(\alpha_{12},\alpha_{21},\beta_{11},\beta_{22})).$$

4 算法设计(Algorithm design)

在粒子群算法中, 每个粒子表示n维空间的一个解, 记第i个粒子的位置和速度向量分别为

$$X_i=(x_1,x_2,\cdots,x_n)\text{和}V_i=(v_1,v_2,\cdots,v_n).$$

该粒子经历过的最优位置记作PB_i, 群体经历过的最优位置用GB表示, 第i个粒子的位置和速度更新方程如下所示.

$$\begin{cases} V_i^{k+1}=\omega*V_i^k+c_1*\mathrm{rand}(\cdot)*(PB_i^k-X_i^k)+ \\ \qquad c_2*\mathrm{rand}(\cdot)*(GB^k-X_i^k), \\ X_i^{k+1}=X_i^k+V_i^{k+1}. \end{cases} \tag{10}$$

其中: V_i^k为粒子i在第k次更新时的速度, X_i^k为粒子i在第k次更新前所处的位置, ω是惯性权重, c_1和c_2为加速度常数. 从社会心理学的角度解释, ω表示粒子对自身当前信息的依赖情况, c_1表示粒子对自身经验的依赖情况, c_2表示粒子对社群信息的依赖情况, $\mathrm{rand}(\cdot)$表示0到1间的随机数.

相应的算法步骤如下, 流程如图2所示.

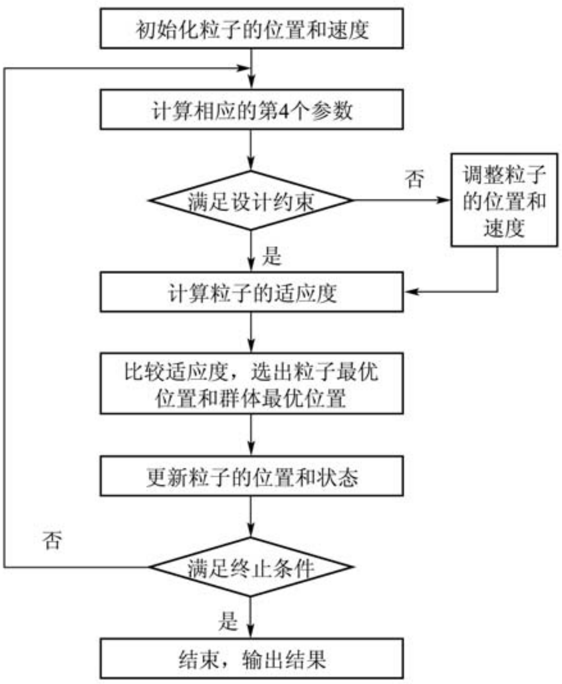

图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

Step 1 初始化一个规模为N的粒子群, 设定初始位置和速度;

Step 2 根据每个粒子的前3个参数求出相应的第4个参数;

Step 3 判断各个粒子是否满足设计约束, 如果不满足则调整其位置和速度;

Step 4 计算每个粒子的适应值;

Step 5 将每个粒子的适应值和其全局经历过的最好位置PB_i进行比较, 若前者优于后者, 则将其作为当前最好的位置;

Step 6 将每个粒子的适应值和群体经历过的最优位置GB进行比较, 若前者优于后者, 则将其作为当前群体经历过的最优位置;

Step 7 根据式(10)分别对粒子的速度和位置进行更新;

Step 8 如果满足终止条件, 则输出解; 否则返回Step 2.

算法流程中, 如果设计约束得不到满足, 即$(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)\notin\Omega_1$, 那么根据命题2, 相应粒子的参数调整方式可以选取以下2种:

1) 若$\alpha_2>\alpha_{22}$且$A_0(\alpha_1,\alpha_{22},\beta_1,\beta_2)>A_0^1$, 那么可以取

$$(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)\in \{(\gamma_1,\alpha_{22},\gamma_2,\gamma_3)|\varphi(\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3)=\alpha_{22}\}.$$

2) 若$\alpha_2<\alpha_{21}$且$A_0(\alpha_1,\alpha_{21},\beta_1,\beta_2)<A_0^1$, 那么可以取

$$(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)\in \{(\gamma_1,\alpha_{21},\gamma_2,\gamma_3)|\varphi(\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3)=\alpha_{22}\}.$$

5 优化设计及其仿真分析(Optimization design and simulation analysis)

下面用实值编码的粒子群算法对模型(9)进行算例分析, 实验环境为: PC机Celeron(R) 1.80 GHz CPU, 0.99 GB RAM, Windows XP, 仿真软件为MATLAB 7.3; 粒子群规模为40, 加速度常数取$c_1=c_2=1.4962$[24], 惯性权重$\omega=0.7298$; 算法终止条件: 取最大进化代数为50; 取固有可用度要求$A_0^1=0.8$.

例 1 设计约束取为

$$\Omega_1=\{(\alpha_1,\alpha_2,\beta_1,\beta_2)\mid \alpha_{11}\leqslant\alpha_1\leqslant\alpha_{12}, \alpha_{21}\leqslant\alpha_2\leqslant\alpha_{22},\beta_{11}\leqslant\beta_1\leqslant\beta_{12}, \beta_{21}\leqslant\beta_2\leqslant\beta_{22}\},$$

其中:

$$\alpha_{11}=0.99,\alpha_{21}=0.99,\alpha_{12}=\alpha_{22}=0.9998,$$

$$\beta_{11}=2, \beta_{12}=4, \beta_{21}=0.95, \beta_{22}=4.$$

由于

$$A_0(\alpha_{11}, \alpha_{21}, \beta_{12}, \beta_{21})=0.0004,$$
$$A_0(\alpha_{12}, \alpha_{22}, \beta_{11}, \beta_{22})=0.9495,$$

根据命题3, 优化问题(9)有解. 算法得到的近似最优解为

$$\alpha_1^*=0.997719603, \beta_1^*=2.004841597,$$
$$\alpha_2^*=0.996551024, \beta_2^*=3.670644045.$$

系统近似最优值为

$$M^*=0.014162902.$$

为了说明算法的有效性, 这里给出算法近似设计和某一可行设计对应的系统瞬时可用度比较, 如图3所示. 其中可行设计取为

$$\alpha_1'=0.99979,\ \beta_1'=3.00000,$$
$$\alpha_2'=0.99465,\ \beta_2'=3.96950.$$

显然, 它满足可行解条件. 从图中可以看出, 算法近似最优设计对应的系统瞬时可用度的振幅明显小于图中所对比的可行设计结果, 其瞬时可用度更平滑更“稳定”.

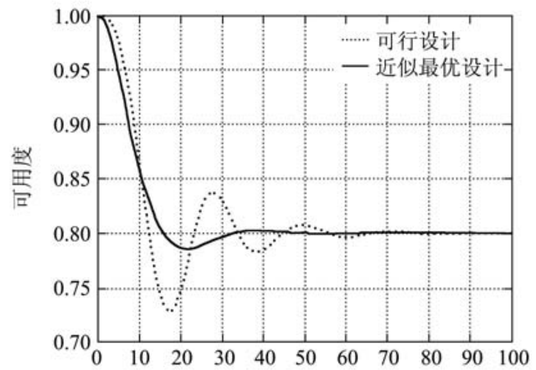

图 3　近似最优设计和某可行设计对应的瞬时可用度比较

Fig. 3　Comparison of instantaneous availability between the approximate design and a feasible design

因此, 可以认为: 粒子群算法可以较好地解决最小可用度振幅的设计问题, 并且该最优设计模型可以很好地抑制系统瞬时可用度的波动.

粒子群体最优适应度的进化过程如图4所示, 从图中可以看出该算法的寻优过程是逐步收敛并逼近最优值. 迭代次数为5, 10和50时算法对应的近似最优解和近似最优值在表1中分别给出. 从表中可以看出: 进化过程中近似最优解β_1^*向2(即约束下界)逼近. 那么, 有如下2个问题:

1) 由于当$\beta_1=1$时寿命所遵从的离散Weibull分布退化为几何分布, 而系统的故障率为常数, 那么是否β_1的设计值越小, 对应的系统可用度振幅就越小?

2) 当故障后修复时间所遵从的分布固定时, 是不是参数β_1^*越接近于1(系统的故障率越逼近常数), 系统可用度振幅就越小?

上述问题的答案如果是肯定的, 那么在进行参数设计时, 该参数的最优取值可直接得出, 无需考虑算法; 如果是否定的, 则说明用粒子群算法求解优化问题(9)是合理的. 对于上述问题, 例2将给出答案.

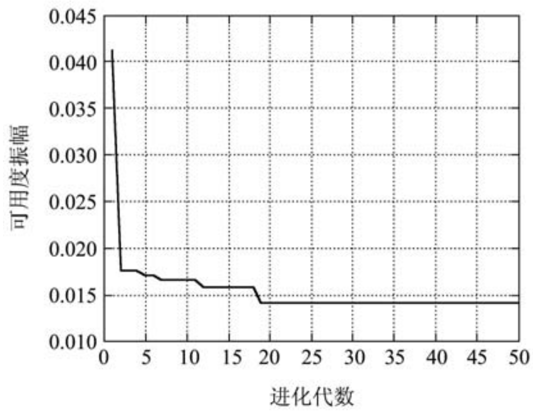

图 4　粒子群算法结果的进化过程

Fig. 4　Evolution of solutions in PSO

表 1　迭代次数为5, 10和50时算法对应的近似最优解和近似最优值

Table 1　Approximate optimal solution and optimal value with iteration number 5, 10, 20

近似最优解	迭代次数		
	5	10	50
α_1^*	0.998652088	0.997843974	0.997719603
β_1^*	2.075520350	2.055555026	2.004841597
α_2^*	0.996810612	0.990471043	0.996551024
β_2^*	3.357937644	3.096806527	3.670644045
近似最优值	0.017068604	0.016555854	0.014162902

例 2　设计约束取为

$$\Omega_1=\{(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \mid \alpha_{11} \leqslant \alpha_1 \leqslant \alpha_{12},$$
$$\alpha_2=0.995, \beta_{11} \leqslant \beta_1 \leqslant \beta_{12}, \beta_2=3\},$$

其中

$$\alpha_{11}=0.95,\ \alpha_{12}=0.9998,\ \beta_{11}=0.9,\ \beta_{12}=3.$$

粒子群体最优适应度的进化过程如图5所示. 从图中可以看出该算法的寻优过程是收敛的, 并在算法进化到11代后达到最优值0, 这时算法得到的最优解为:

$$\alpha_1^* = 0.962865216,\ \beta_1^* = 1.047416511.$$

进一步地, 如果取$\beta_1 = 1$, 那么根据固有可用度要求$A_0^1 = 0.8$, 可以得到相应的

$$\alpha_1 = 0.956276700000134,$$

系统可用度振幅为0.007380235983252, 对比算法得到的那个最优值0, 例1中所提出问题的答案显然是否定的. 结合例1的分析, 可以得到如下结论: 用优化算法来求解最小可用度振幅的设计是有必要的, 用粒子群算法来求解该最优设计问题是可行的.

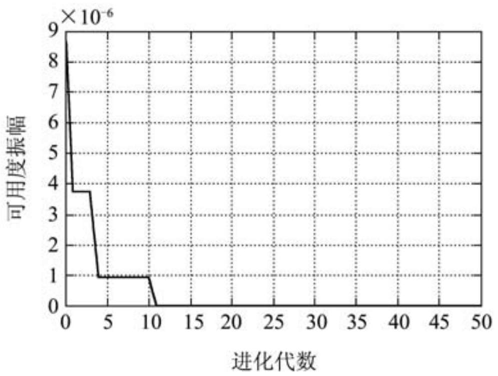

图 5 例2的算法进化过程

Fig. 5 Evolution of solutions in PSO of example 2

6 结论(Conclusions)

本文主要研究了离散时间下单部件可修系统的瞬时可用度模型, 建立了基于系统瞬时可用度的优化设计模型. 在离散Weibull分布的假定下, 该模型退化为一个优化问题. 文中选用粒子群算法来对该最优问题进行研究, 并通过一组算例对模型有效性进行了描述.

文中模型对瞬时可用度波动的研究具有重要意义, 特别是对基于瞬时可用度的设计具有指导作用. 为了更加完善, 本课题组下一步的研究内容主要包括:

1) 把本文模型推广到更加复杂的可修系统中去;

2) 针对一类具体的装备系统, 找出本文的设计参数和现实中可以直接控制或操作的因素的关系, 建立可用度振幅和这些因素的直接关系, 把本文理论推向应用;

3) 把固有可用度, 可用度振幅和成本约束综合考虑, 建立多目标优化问题来研究.

参考文献(References):

[1] 康锐, 于永利. 我国装备可靠性维修性保障性工程的理论与实践[J]. 中国机械工程, 1998, 9(12): 3 – 6.
(KANG Rui, YU Yongli. Theory and practice of reliability, maintainability and supportability engineering in weapon system[J]. *China Mechanical Engineering*, 1998, 9(12): 3 – 6.)

[2] 杨为民, 阮镰, 俞沼, 等. 可靠性·维修性·保障性总论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
(YANG Weimin, RUAN Lian, YU Zhao, et al. *Pandect of Reliability, Maintainability and Supportability*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004)

[3] 康锐, 王自力. 可靠性系统工程的理论与技术框架[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 633 – 636.
(KANG Rui, WANG Zili. Framework of theory and technique about reliability system engineering[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(5): 633 – 636.)

[4] USHAKOV I A. *Handbook of Reliability Engineering*[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley& Sons, Inc. 1994.

[5] 胡华平, 金士尧, 王维. 分布式系统高可用度方案的选择[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(3): 65 – 67.
(HU Huaping, JIN Shiyao, WANG Wei. The selection of high availability scheme for distributed system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(3): 65 – 67.)

[6] 高文, 祝明发. 基于生灭过程的机群系统高可用性分析与设计[J]. 微电子学与计算机, 2001, 18(4): 47 – 49.
(GAO Wen, ZHU Mingfa. The design and analysis of cluster's high availability based on birth-death process[J]. *Microelectronics & Computer*, 2001, 18(4): 47 – 49.)

[7] 王金诺, 赵永翔. 基于劣化理论的寿命周期可靠性和性能并行预计[J]. 中国机械工程, 2001, 12(6): 609 – 613.
(WANG Jinnuo, ZHAO Yongxiang. Concurrent prediction of the life cycle reliability and performance based on a degradation theory[J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(6): 609 – 613.)

[8] LEVITIN G. Redundancy optimization for multi-state system with fixed resource-requirements and unreliable sources[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2001, 50(1): 52 – 59.

[9] 任欣欣, 董伟燕, 赵跃进. 多级备件供需状态下装备使用可用度的优化[J]. 航天控制, 2005, 23(3): 60 – 63.
(REN Xinxin, DONG Weiyan, ZHAO Yuejin. Optimization in operational availability under multiple spares states[J]. *Aerospace Control*, 2005, 23(3): 60 – 63.)

[10] YU H, YALAOUI F, CHATELET E, et al. Optimal design of a maintainable cold-standby system[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2007, 92(1): 85 – 91.

[11] VAURIO J K. Optimization of test and maintenance intervals based on risk and cost[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1995, 49(1): 23 – 26.

[12] DEKKER R. Applications of maintenance optimization models: A review and analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1996, 51(3): 229 – 240.

[13] DEKKER R, SCARF P A. On the impact of optimization models in maintenance decision making: the state of the art[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1998, 60(2): 111 – 119.

[14] HOSSEINI M M, KERR R M, RANDALL R B. An inspection model with minimal and major maintenance for a system with deterioration and Poisson failures[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2000, 49(1): 88 – 98.

[15] CHEN D, TRIVEDI K S. Optimization for condition-based maintenance with semi-Markov decision process[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2005, 90(1): 25 – 29.

[16] KUMAR U D, KNEZEVIC J. Availability based spare optimization using renewal process[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1998, 59(2): 217 – 223.

[17] OLIVETO F E. An optimal sparing model for the operational availability to approach the inherent availability[C] //*Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Philadelphia, PA, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2001: 252 – 257.

[18] JUANG Y S, LIN S S, KAO H P. A knowledge management system for series-parallel availability optimization and design[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(1): 181 – 193.

[19] VAURIO J K. On time-dependent availability and maintenance optimization of standby units under various maintenance policies[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1997, 56(1): 79 – 89.

[20] CHIANG J H, YUAN J. Optimal maintenance policy for a Markovian system under periodic inspection[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2001, 71(2): 165 – 172.

[21] CHEN D, TRIVEDI K S. Closed-form analytical results for condition-based maintenance[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2002, 76(1): 79 – 89.

[22] SUN H R, HAN J J. The failure of MTTF in availability evaluation[C] //*Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Seattle, WA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2002: 279 – 284.

[23] MACHERET Y, KOEHN P, SPARROW D. Improving reliability and operational availability of military systems[C] //*2005 IEEE Aerospace Conference*. Montana, USA: [s.n.], 2005: 3489 – 3957.

[24] YANG Y. *The discrete-time modeling, analysis and application for the instantaneous availability of the systems under general probability distribution*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008.

[25] 王立超, 杨懿, 于永利, 等. 基于系统可用度的匹配问题的分析[J]. 系统工程学报, 2009, 24(2): 253 – 256.
(WANG Lichao, YANG Yi, YU Yongli, et al. Analysis of matchable problems based on system availability[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2009, 24(2): 253 – 256.)

[26] 王立超, 杨懿, 于永利, 等. 离散Weibull分布条件下系统瞬时可用度的波动分析[J]. 系统工程学报, 2010, 25(2): 277 – 283.
(WANG Lichao, YANG Yi, YU Yongli, et al. Undulation analysis of instantaneous availability under discrete Weibull distributions[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2010, 25(2): 277 – 283.)

[27] WEIBULL W. A statistical distribution of wide applicability[J]. *Applied Mechanics*, 1951, 18(3): 293 – 297.

[28] KESHEVAN M K, SARGENT G A, CONRAD H. Statistical analysis of the Hertzian fracture of Pyrex glass using the Weibull distribution function [J]. *Materials Science*, 1980, 15(4): 839 – 844.

[29] SHEIKH A K, BOAH J K, HANSEN D A. Statistical modeling of pitting corrosion and pipeline reliability[J]. *Corrosion*, 1990, 46(3): 3 – 8.

[30] QUEESHI F, SHEIKH A K. A probabilistic characterization of adhesive wear in metals[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1997, 46(1): 38 – 44.

[31] DURHAM S D, PADGETT W J. A cumulative damage model for system failure with application to carbon fibers and composites[J]. *Technometrics*, 1997, 39(1): 34 – 44.

[32] FORK S L, MITCHELL B C, SMART J, et al. A numerical study on the application of the Weibull theory to brittle materials[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(10): 1171 – 1179.

[33] LI S Q, FANG J Q, LIU D K, et al. Failure probability prediction of concrete components[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(10): 1631 – 1636.

[34] PRABHAKAR MURTHY D N, BULMER M, ECCLESTON J A. Weibull model selection for reliability modeling[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2004, 86(3): 257 – 267.

[35] NADARAJAH S, KOTZ S. On some recent modifications of Weibull distributions[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, 54(4): 561 – 562.

[36] BEBBINGTON M, LAI C D, ZITIKIS R. A flexible Weibull extension[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, 92(6): 719 – 726.

[37] PHAM H, LAI C D. On recent generalizations of the weibull distribution[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2007, 56(3): 454 – 458.

[38] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particles swarm theory[C] //*Proceeding of 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*. Nagoya, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1995: 39 – 43.

[39] 陈建桥, 葛锐, 魏俊红. 基于PSO算法的复合材料层合板可靠性优化设计[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(4): 96 – 98.
(CHEN Jianqiao, GE Rui, WEI Junhong. Optimization of the reliability of laminated plates based on the PSO[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2006, 34(4): 96 – 98.)

[40] 张义民, 刘仁云, 于繁华. 基于多目标粒子群算法的可靠性稳健优化设计[J]. 机械设计, 2006, 23(1): 3 – 6.
(ZHANG Yimin, LIU Renyun, YU Fanhua. Steady optimization design of reliability based on algorithm of multi-objected particle swarm[J]. *Journal of Machine Design*, 2006, 23(1): 3 – 6.)

[41] 张义民, 刘仁云, 刘巧伶. 基于粒子群算法的后桥可靠性稳健优化设计[J]. 机械强度, 2007, 29(5): 774 – 778.
(ZHANG YiMin, LIU Renyun, LIU Qiaoling. Robust optimization design of reliability on rear-axles based on particle swarm optimization[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 29(5): 774 – 778.)

[42] 高尚, 杨静宇. 可靠性优化的一种新的算法[J]. 工程设计学报, 2006, 13(2): 74 – 77.
(GAO Shang, YANG Jingyu. New algorithm for optimization of system reliability[J]. *Journal of Engineering Design*, 2006, 13(2): 74 – 77.)

[43] 王正初, 李微微. 基于粒子群算法的可靠性优化[J]. 台州学院学报, 2006, 28(6): 29 – 32.
(WANG Zhengchu, LI Weiwei. Optimization of system reliability based on particle group algorithms[J]. *Journal of Taizhou University*, 2006, 28(6): 29 – 32.)

[44] 王正初, 赵燕伟. 复杂系统可靠性冗余优化的量子粒子群算法研究[J]. 中国制造业信息化, 2007, 36(11): 72 – 75.
(WANG Zhengchu, ZHAO Yanwei. QPSO-based reliability redundancy optimization for complex system[J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2007, 36(11): 72 – 75.)

[45] YIN P Y, YU S S, WANG P P, et al. Task allocation for maximizing reliability of a distributed system using hybrid particle swarm optimization[J]. *The Journal of Systems and Software*, 2007, 80(5): 724 – 735.

[46] YIN P Y, YU S S, WANG P P, et al. Multi-objective task allocation in distributed computing systems by hybrid particle swarm optimization[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 184(2): 407 – 420.

[47] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
(CAO Jinhua, CHENG kan. *Theory of Reliability Mathematics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.)

作者简介:

王立超 (1982—), 男, 博士, 主要研究方向为可靠性分析与设计、综合保障工程、最优控制等, E-mail: uglyme@yahoo.cn;

杨　懿 (1978—), 女, 博士, 主要研究方向为可靠性分析与设计、综合保障工程、维修工程理论与应用等, E-mail: zzpcissy@163.com;

邹　云 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为可靠性分析与设计、非线性系统建模与控制、应急控制理论与方法、广义系统的稳定性分析与控制等, E-mail: zouyun@vip.163.com;

于永利 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为软件保障理论与应用、保障系统建模与仿真、维修工程理论与应用等;

康　锐 (1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为系统可靠性、维修性、保障性CAD技术、软件工程与软件可靠性、故障诊断与专家系统等, E-mail: kangrui@buaa.edu.cn.