

一体化装置故障诊断及系统可靠性规划研究 *

贾建国^{1,2}, 杨 育¹, 张维平³, 刘 娜¹, 杨 涛¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆化医控股(集团)公司, 重庆 400010; 3. 重庆高技术创业中心, 重庆 400010)

摘 要: 针对一体化装置的故障预测难题, 提出了一体化装置故障诊断模型。通过对模型进行分析, 找出系统主要的故障元素及各子系统的故障概率, 根据系统可靠性理论, 从提高系统可靠性的角度出发, 提出了可靠性规划方法, 以各个装置分配备用装置的顺序为阶段和装置间所允许使用的总备用个数为状态变量, 对主要故障元素进行可靠性规划。最后通过仿真分析, 大幅度提高了一体化装置的安全稳定性, 结果表明了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 故障诊断; 故障预测; 系统可靠性; 一体化装置; 模型

中图分类号: TP278

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)03-0877-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.03.021

Research on integrated device fault diagnosis and system reliability planning

JIA Jian-guo^{1,2}, YANG Yu¹, ZHANG Wei-ping³, LIU Na¹, YANG Tao¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Chongqing Chemical & Pharmaceutical Holding(Group) Company, Chongqing 400010, China; 3. Chongqing High Technology Venture Center, Chongqing 400010, China)

Abstract: This paper considered an integrated device failure prediction problem, and proposed an integrated device of failure diagnosis model, through analyzing this model, found the main elements of the system and the subsystem failure probability. Based on the system reliability theory to improve the system reliability, it gave the reliability programming algorithm, according to the phases and the state variables of the device's sequences of standby equipments and the number of standby equipments allow to used between the device, programmed the key failure elements. Finally, through the simulation analysis, it improves the system security and stability greatly. As a result, the application of this method indicates that the method is rational and efficient.

Key words: failure diagnosis; fault forecast; system reliability; integrated device; model

0 引言

设备故障诊断及可靠性分析一直是安全生产领域的研究热点。自从 Barlow 等人^[1]提出小波理论以来, 国内外学者进行了深入的研究, 建立了数以千计的故障诊断及预防性维护模型, 这些模型在提高设备可靠性、防止设备故障以及减少维护成本方面发挥了重要作用。建立了基于贝叶斯网络分类器^[2]和改进粒子群优化 BP 网络^[3]等智能化的故障诊断方法; 提出了基于模式重要度^[4]、贝叶斯网络^[5]和零部件可靠性^[6]的系统可靠性评估技术; 在可靠性分析的基础上, 建立了多阶段任务(PMS)可靠性模型^[7]、可靠性规划^[8]、设备维护^[9]、检修规划模型^[10]。这些研究成果丰富了故障诊断、可靠性规划及设备维护的理论与应用体系。但鲜见基于故障诊断的可靠性规划研究, 特别是在化工领域中一体化装置可靠性规划的应用研究。化工一体化生产的特点是产品链长、生产关联度高, 上道工序的产品常常是下道工序的原料, 生产装置一般通过管道连

接等。通过对一体化装置进行故障预测及可靠性规划研究, 找出装置运行管理过程中存在的危险和隐患, 以期实现安全生产、及时预防重大事故发生。

化工生产规划中, 复杂的备用分析是极具挑战性的。虽然过去二十多年, 在化工安全生产规章制度、化工事故损失评估、化工危险源识别等方面进行了大量的研究, 但是对于化工生产装置运行过程危险预测及装置可靠性规划的概率分析还没有得到应有的关注。至今, 在该领域中, 大多数化工公司采用的都是基于经验的判断方法。

在化工生产过程中, 装置可靠性规划来自以下几方面的原因:

a) 化工装置(如蒸馏塔、过滤器、电容器和发电机等)的可修复失效常常需要较长的修复时间。如果因为缺乏可靠性规划, 致使系统充裕度不足, 系统可能会失去大量负荷而遭受严重的经济损失。

b) 装置老化^[11]是化工生产公司多年来关心的主要问题。在化工生产过程中, 装置承受着各种化学反应过程, 必然造成

收稿日期: 2011-07-13; **修回日期:** 2011-09-05 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71071173); 国家教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目(20090191110004); 重庆市科技计划项目(2010GGB108)

作者简介: 贾建国(1966-), 男, 重庆人, 公司副总裁, 博士研究生, 主要研究方向为化工项目管理、战略发展、企业建模等(jjg023@126.com); 杨育(1971-), 男, 四川成都人, 教授, 博导, 主要研究方向为大规模定制、客户协同创新、网络化制造; 张维平(1955-), 男, 北京人, 部长, 主要研究方向为科技项目管理、科技企业孵化器运作及政策环境的研究; 刘娜(1987-), 女, 新疆人, 硕士研究, 主要研究方向为复杂系统设计、项目管理; 杨涛(1985-), 男, 安徽宿州人, 博士研究生, 主要研究方向为工系统可靠性、项目管理等。

对装置本身的损坏,特别是老化了的装置其失效概率更高,因此更需要进行可靠性规划。

c)在化工工业的竞争环境下,基于化工生产联盟的一体化生产过程中,由装置组共享公共备用的策略越来越流行。一个公共装置的损毁,将造成一体化企业的连锁反应,直接影响一个地区的经济发展进程,如果事故重大,可能造成像日本核电一样的连锁危机^[12]。

要实现可靠经济的装置备用策略需要解决如下两个基本问题:(a)分析一体化系统装置的连接模式及各种模式的可靠性;(b)在确定各子装置可靠性的基础上,选择科学的方法规划一体化系统整体可靠性。本文以子系统的可靠性预测为基础,进行化工一体化生产装置的可靠性规划研究。

1 一体化系统可靠性模型

一体化系统是由分属于不同企业主体的多个装置串联或并联组成。其中化工一体化装置串联系统是最常见的生产装置,每个装置的正常工作效率称为该装置的可靠性,整个一体化系统正常工作的概率称为系统的可靠性。常见一体化系统结构如图 1 所示。

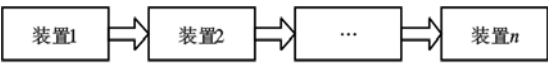


图1 一体化系统示意图

在图 1 所示的一体化串联系统中,所有串联的元件都必须可靠地工作,系统才能正常工作。所以,串联系统的可靠度等于所有串联元件可靠度的连乘积:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \tag{1}$$

其中: R_s 是系统的可靠度; R_i 是元件 i 的可靠度($i=1,2,\cdots,n$); n 是所有串联元件的个数。在这种串联一体化系统中,只要有一个装置失灵,整个系统就不能正常工作。为了提高系统工作的可靠性,可以给各个装置配备备用装置,并设计备用装置自动投入控制系统,一旦装置损坏,则备用装置自动投入运行,形成如图 2 所示的串并混联的结构系统。这种系统是指由若干个并联子系统串联而成的系统,其中各并联子系统所具有的元件种类和数量可以不同,且每个子系统中只要有一个元件可以正常工作,该子系统便可以正常工作,但是只有所有子系统都正常工作时,系统才正常工作。

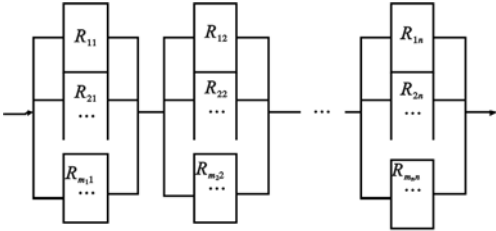


图2 串并混联的结构系统示意图

串并联系统的可靠度为

$$R_s = \prod_{j=1}^n [1 - \prod_{i=1}^{m_j} (1 - R_{ij})] \tag{2}$$

当各单元的可靠度都相等时,即 $R_{ij} = R$,且 $m_1 = m_2 = \cdots = m_n = m$ 时,有

$$R_s = [1 - (1 - R)^m]^n \tag{3}$$

在这种串联一体化系统中,装置的备用数量越多,工作的可靠性就越大,从而整个系统工作可靠性就越大。但是备用装置多了,整个系统的成本、重量、体积都要相应增大,而系统所允许

的总成本、总重量、总体积往往是有限的。因此,一体化系统可靠性规划主要问题是:讨论在上述限制条件下,预测一体化系统中各装置的故障概率,对故障概率大的装置,分配较多的备用件数量,使系统的工作可靠性最大,并且满足经济性原则。

2 动态可靠度模型

在可靠性理论中,可靠性的度量可靠度。可靠度定义为:设备在规定的条件下和规定的时间 t 内,完成规定功能的概率,用 $R(t)$ 表示,即 $R(t) = P(X > t)$ 。其中: X 代表产品寿命。相反,不可靠度是表征产品在规定条件下和规定时间 t 内,丧失规定功能的概率,也称为失效概率,它也是时间 t 的函数,记做 $F(t)$,有 $R(t) + F(t) = 1$,且有 $F(t) = \int_0^t f(u) du$,其中 $f(t)$ 为故障概率密度函数。

定义 1 平均寿命(记为 MTTF)。对于不可以修复的产品,指产品平均失效前的工作时间;对于可以修复的产品,指平均故障间隔时间。

$$MTTF = \int_0^\infty R(t) dt = \int_0^\infty t dF(t) \tag{4}$$

定义 2 元件的可靠度 $R(t)$ 。元件在时刻 t 的生存概率为

$$R(t) = P\{X > t\} = 1 - F(t) = \bar{F}(t) = \int_t^\infty f(u) du \tag{5}$$

它是元件在 $[0, t]$ 内不失效的概率。

定义 3 动态可靠度。若产品寿命 $X \geq t, t \geq 0$,随机变量 $X_t = X - t$ 成为剩余寿命,它表示元件生存到 t 未发生故障继续使用的寿命,易得其概率为

$$\begin{aligned} \bar{F}_t(x) &= P\{X_t \geq x\} = P\{X - t \geq x | X \geq t\} = \\ &= \frac{P\{X - t \geq x \cap X \geq t\}}{P\{X \geq t\}} = \frac{P\{X \geq x + t\}}{P\{X \geq t\}} = \\ &= \frac{\bar{F}(x + t)}{\bar{F}(t)} \end{aligned} \tag{6}$$

其中: $F(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\bar{F}(t)$ 、 $\lambda(t)$ 构成了可靠性的完全特征,即包含了不可修复元件可靠性的全部信息。

根据现代工业实践,化工一体化装置常见的设备故障密度函数服从指数分布,其分布函数和可靠性特征如下:

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \tag{7} \\ F(t) &= \int_0^t f(t) dt = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda t} \\ R(t) &= e^{-\lambda t}, \lambda(t) = \lambda \end{aligned}$$

其中: $\frac{1}{\lambda}$ 表示平均寿命, λ 是设备的恒定故障率。

3 一体化系统可靠性规划模型

一体化系统可靠性规划问题是一个多阶段规划问题,是指在系统的每个阶段都需要作出规划,并且一个阶段的可靠性规划确定以后,常影响下一个阶段的规划,从而影响整个系统的可靠性。即在一定的资源约束条件下,通过为每一个子系统选择合适的可靠度,使系统获得最高的可靠度。

以各个装置分配备用装置的顺序为阶段,以由第 k 个到第 n 个装置所允许使用的总备用个数 x_k 为状态变量; u_k 表示部件 k 拥有的元件数。

$$x_{k+1} = T(x_k, u_k) = x_k - u_k \tag{8}$$

记 $f_k(x_k)$ 为装置 $k \sim n$ 最大可靠性:

$$\begin{aligned} f_k(x_k) &= \max\{P_k(u_k) \times f_{k+1}(x_{k+1})\}; k = n-1, n-2, \cdots, 1 \\ f_{n+1}(x_{n+1}) &= 1 \end{aligned} \tag{9}$$

全过程目标函数等于各阶段目标函数的积,即

$$R_s = R_1(x_1, u_1) \times R_2(x_2, u_2) \times \cdots \times R_n(x_n, u_n) \tag{10}$$

系统可靠性规划问题就转换成下列不等式:

$$f(R_1, R_2, \cdots, R_n) \geq R_s^* \tag{11}$$

其中: x_k 为配置第 k 个元件时可用元件的总数; u_k 为第 k 个元件并联的数目; $u_k(x_k)$ 为第 k 阶段 x_k 状态下的决策变量; R_s^* 为系统可靠性目标; $R_1, R_2, \cdots, R_n$ 为装置 1, 2, $\cdots, n$ 的可靠性; $f(R_1, R_2, \cdots, R_n)$ 表示分系统可靠性与系统可靠性的关系。对于串并联系统而言,式(15)可以表示为

$$R_s = \prod_{j=1}^n [1 - \prod_{i=1}^{m_j} (1 - R_{ij})] \geq R_s^* \tag{12}$$

同时需要满足以下假设:

- a) 当某个阶段状态给定后,在该阶段以后的过程发展不受这段以前各段状态的影响;
- b) 同一种元件多个并联时,不会影响元件原本的可靠性;
- c) 不考虑元件的损坏、失灵等问题;
- d) 不考虑元件自身因素(如大小、体积等)对设备的影响;
- e) 不考虑外界环境(如温度等)对元件可靠性的影响。

4 一体化装置故障诊断及可靠性规划算法

- 1) 划分阶段。按照问题的时间或空间特征,把问题分为 n 个阶段。
- 2) 选择状态变量 x_k 。一般来说, x_k 具有以下三特性:

a) 要能够用来描述决策过程的演变特征。

b) 要满足无后效性。即如果某阶段状态给定后,则以后过程的进展不受以前各状态的影响,也就是说,过去的历史只通过当前的状态去影响未来的发展。

c) 递推性。即有 k 阶段的状态变量 x_k 及决策变量 u_k ,可计算出 $k+1$ 阶段的状态变量 x_{k+1} 。
- 3) 确定决策变量 u_k 以及允许决策变量的集合 $D_k(x_k)$; u_k 表示部件 k 上的备用元件数, $D_k(x_k) = \{u_k | 0 \leq u_k \leq \min(x_k), \text{且 } u_k \text{ 为整数}\}$ 。
- 4) 写出状态转移方程。根据状态变量之间的递推关系,写出状态转移函数。状态变量 x_k 表示从第 k 个到第 n 个部件可使用的元件总数, $x_{k+1} = T(x_k, u_k(x_k)) = x_{k+1} = x_k - u_k$ 。
- 5) 建立指标函数。一般用 $v_k(x_k, u_k)$ 表示第 k 个部件的正常工作概率, $f_k(x_k)$ 表示由状态 x_k 出发,从部件 k 到部件 n 的系统工作最大可靠性。

6) 建立动态规划基本方程。

第 n 阶段:指标函数的最优值 $x_{k+1} = T(x_k, u_k)$, $f(x_n) = \text{opt}_{u_n \in U} (x_n, u_n)$,此为一阶段极值问题。设有最优决策为 u_n 和状态为 x_n ,于是可有最优值 $f_1(x_n)$ 。

第 $n-1$ 阶段:类似的可解得 x_{n-1} ,有 $x_n = T(x_{n-1}, u_{n-1})$,得到最优决策 u_{n-1} ,于是最优值 $f(x_{n-1}) = \text{opt}_{u_{n-1} \in U_{n-1}} \{v_{n-1}(x_{n-1}, u_{n-1}) \times f_1(x_n)\}$ 。

以此过程,建立可靠性规划的动态规划基本方程:

$$f(x_k) = \text{opt} \{v_k(x_k, u_k) \times f_{k+1}(x_{k+1})\}; k = n, n-1, \cdots, 1$$
$$f_{n+1}(x_{n+1}) = C \tag{13}$$

7) 最优状态确定。

由状态转移方程计算出每个阶段的决策变量值,形成综合最优策略集 $\{u_1(x_1), u_2(x_2), \cdots, u_n(x_n)\}$ 。

5 仿真分析

化工生产一体化装置的可靠性问题可看成是一个相互联

系的 n 阶段的动态规划问题,每个装置的配置看成是一个阶段,每一个阶段都是一个最优化子问题。选择逆序算法,由最后一个阶段开始分析计算,确定状态变量 x_k 、决策变量 u_k ,然后写出状态转移方程,逐段前推,分析阶段指标函数,从而得到基本方程,由每个阶段的决策来确定整个问题的决策。某化工园区中生产一体化装置由 10 种类型的装置组成,根据装置设计参数采用式(7)计算出这 10 种装置的可靠性依次为 0.9、0.8、0.6、0.6、0.75、0.68、0.91、0.87、0.97、0.9,可见 10 种装置可靠性差距较大,要保证化工一体化装置系统的可靠性,必须对各子系统进行可靠性规划。已知 10 种装置单价差距较小,可以忽略,且在年经费预算下,可以购置装置总数为 25 个。在 Pentium4、CPU 主频 2.80 GHz、512 MB 内存、Windows XP 操作系统下,利用 MATLAB 7.1 仿真工具进行运算。仿真逆序算法伪代码如下所示:

```
for step = 9: -1: 1
if step ~ = 1
begin = 1;
else
begin = 25;
end
for state = begin: 25
best_V_found = 0;
for u = 1: state
state_next = STF(state, u);
if (state_next > = 1) && (state_next < = 25) && (isnan
(U(state_next, (step + 1)) = 0)
V_kn = CSIF(step, u) * OptValFun(state_next, (step + 1));
if V_kn > best_V_found
best_V_found = V_kn;
U(state, step) = u;
end
end
end
OptValFun(state, step) = best_V_found;
end
end
```

其中:STF 表示状态转移函数;CSIF 表示装置正常工作的概率函数;OptValFun 表示系统正常工作的最大可靠性。

可靠性规划结果如表 1 所示。

表 1 可靠性规划结果

装置序号	最优策略	装置可靠性	装置序号	最优策略	装置可靠性
1	2	0.99	6	3	0.97
2	2	0.96	7	2	0.99
3	4	0.97	8	2	0.98
4	4	0.97	9	1	0.97
5	3	0.98	10	2	0.99

由表 1 可知,可靠性规划装置最优分配策略为(2,2,4,4,3,3,2,2,1,2),此时可同时保证各装置及一体化装置的可靠度最大,分别为(0.99,0.96,0.97,0.97,0.98,0.97,0.99,0.98,0.97,0.99)和 0.8。将仿真结果应用到实际生产中,比原可靠性规划方案取得了更佳的效果。

6 结束语

本文提出基于故障诊断的化工一体化装置可靠性规划方法,对串联及串并混合连接模式的一体化装置可靠度进行了分析,确定多级复杂连接模式下的整体可靠度计算公式。在确定各分装置可靠度的基础上,采用动态规划方法求解满足约束条件的化工一体化装置可靠性规划方案,以化工 (下转第 884 页)

表 3 费用与资源约束双重模糊情形下的总成本求解结果

Case	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	TC_e	TC_d
1	0.1	0.15	0.01	0.015	2 921.2	2 919.5
2	0.1	0.2	0.01	0.02	2 927.7	2 924.5
3	0.1	0.25	0.01	0.025	2 934.3	2 929.4
4	0.2	0.1	0.01	0.02	2 924	2 921.6
5	0.2	0.15	0.015	0.02	2 919.3	2 918.1
6	0.3	0.25	0.025	0.03	2 919.3	2 918.1
7	0.1	0.15	0.015	0.01	2 909.9	2 911.1
8	0.1	0.2	0.02	0.01	2 905.2	2 907.5
9	0.1	0.25	0.025	0.01	2 900.5	2 904
10	0.2	0.3	0.015	0.015	2 916.5	2 916
11	0.3	0.3	0.025	0.03	2 920.2	2 918.8
12	0.3	0.3	0.03	0.025	2 908.9	2 910.3
13	0.2	0.5	0.02	0.015	2 914.6	2 914.6
14	0.2	0.6	0.025	0.015	2 910.9	2 911.8
15	0.15	0.1	0.015	0.01	2 908.0	2 909.6
16	0.25	0.1	0.025	0.01	2 894.8	2 899.8

参考文献:

[1] GOYAL S K. Determination of economic packaging frequency for items jointly replenished [J]. *Management Science*, 1973, 20 (2):233-235.

[2] 欧阳强国,王林,王道平,等. 资金和存储能力约束下基于改进差分进化算法的联合采购模型研究[J]. *管理学报*, 2010, 7(6): 879-884.

[3] OLSEN A L. An evolutionary algorithm to solve the joint replenishment problem using direct grouping [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2005, 48(2): 223-235.

[4] HOQUE M A. An optimal solution technique for the joint replenishment problem with storage and transportation capacities and budget constraints [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 175(2):1033 -1042.

[5] PORRAS E, DEKKER R. An efficient optimal solution method for the joint replenishment problem with minimum order quantities [J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 174 (3): 1595-1615.

[6] 王林,贺靖,陈璨,等. 资金约束下基于自适应差分进化算法的联合采购模型及其应用[J]. *系统工程*, 2010, 28(9):63-68.

[7] 李成严,徐晓飞,战德臣. 模糊资源约束的联合补充问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(1): 113-117.

[8] ARKIN E, JONEJA D, ROUND Y R. Computational complexity of uncapacitated multi-echelon production planning problems [J]. *Operations Research Letters*, 1989, 8(2): 61-66.

[9] KHOUJA M, GOYAL S. A review of the joint replenishment problem literature: 1989—2005 [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 186(1): 1-16.

[10] WANG Yi-chi, CHENG Wei-ting. A sensitivity analysis of solving joint replenishment problems using the RAND method under inaccurate holding cost estimates and demand forecasts [J]. *Computes & Industrial Engineering*, 2008, 55(1): 243-252.

[11] YUAN Jun-gang, SUN Zhi-guo, QU Guang-ji. Simulation study of differential evolution [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19 (20):4646-4648.

[12] 王林,陈璨. 一种基于差分进化算法和 NSGA-II 的多目标混合进化算法[J]. *运筹与管理*, 2010, 19(6):58-64.

[13] MOON I K, CHA B C. The joint replenishment problem with resource restriction [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 173(1): 190-198.

5 结束语

本文主要工作和贡献如下:a)在次要订货费用和库存持有费用均为模糊变量的情况下,考虑到更接近现实的一些不确定资源限制,构建了有多种模糊资源约束的 JRP 模型;b)在采用符号距离法和重心法对模糊总成本去模糊化后,设计了一种基于改进 DE 的模糊 JRP 求解新算法(在变异算子与选择操作上进行了改进),通过算例证明了改进 DE 的有效性,为解决此 NP-hard 问题提供一种新途径。相对于确定型模型,本文模型考虑了企业实际运作中的多种不确定因素,更具实用价值。

本研究理论上丰富了复杂不确定情况的联合采购决策理论,也扩大了 DE 的应用领域。未来将在模糊运输费用和配送资源约束情形下研究联合采购与配送调度的集成优化模型。此模型涉及更多的决策参数,需要融合其他智能算法优点设计更具针对性的混合求解算法。

(上接第 879 页)产业园区一体化生产装置的实际应用验证了所提出的方法和计算步骤的正确性及有效性,这种综合故障诊断与可靠性规划于一体的方法能够应用到任何含公共备件的系统可靠性规划中。

参考文献:

[1] BARLOW R E, HUNTER L C. Optimum preventive maintenance policies [J]. *Operations Research*, 1960, 8(1): 90-100.

[2] 曾谊晖,鄂加强,朱浩,等. 基于贝叶斯网络分类器的船舶柴油机冷却系统故障诊断 [J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2010, 41 (4):1379-1384.

[3] 张建军,张利,穆海芳,等. 基于改进粒子群优化 BP 网络的发动机故障诊断方法 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1):198-203.

[4] 吕弘,袁海文,张莉,等. 基于模式重要度的航空电源系统可靠性估计 [J]. *航空学报*, 2010, 31(3): 608-613.

[5] 尹晓伟,钱文学,谢里阳. 基于贝叶斯网络的多状态系统可靠性建模与评估 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2):206-212.

[6] 付桂翠,上官云,史兴宽,等. 基于产品可靠性的工艺系统可靠性

模型 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(1):9-12.

[7] AKHILESH S, XING Liu-dong, DAI Yuan-shun. Reliability analysis of multi-state phased-mission systems [C]//Proc of Reliability and Maintainability Symposium. 2010:151-156.

[8] 王维兴,蒋里强,张振友,等. 武器系统可靠性分配的动态规划方法 [J]. *火炮发射与控制学报*, 2006(1): 54-57.

[9] 周晓军,奚立峰,李杰. 一种基于可靠性的设备顺序预防性维护模型 [J]. *上海交通大学学报*, 2005, 39(12):2044-2047.

[10] 冯长有,王锡凡,别朝红,等. 基于系统可靠性评估的机组检修规划模型 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(8):80-84.

[11] FLEETWOOD D M, RODGERS M P, TSETSERIS L, et al. Effects of device aging on microelectronics radiation response and reliability [C]//Proc of the 25th International Conference on Microelectronics. 2006:84-91.

[12] WANG Xiao-guang, HUANG You-fang, XIE Ya-li, et al. Uncertain risks control in the industrial chain based on the complex network [C]//Proc of the 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2009:1317-1320.