

# 基于浴盆曲线故障率函数的 FFOP 预计方法

马纪明<sup>1,\*</sup>, 万蔚<sup>2</sup>, 曾声奎<sup>2</sup>

1. 北京航空航天大学 中法工程师学院, 北京 100191
2. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191

**摘要:** 与传统可靠性指标中假设产品的随机失效不可避免不同, 无故障工作期 (FFOP) 内产品不会发生任何故障 (即零故障)。首先阐述了 FFOP 的概念内涵、与平均故障间隔时间 (MTBF) 的区别和联系, 提出了一种 FFOP 的预计方法。该方法假设产品的故障率函数具有浴盆曲线特征、故障发生过程为泊松过程、产品具有固定的免维修工作期。然后以一种改进的 Weibull 分布函数描述具有浴盆曲线函数特征产品的故障率。基于泊松过程理论, 给出了 FFOP 的预计算法、流程和仿真验证手段。最后以某型无人机舵机为案例对研究方法的可用性进行了验证。结果表明: FFOP 与免维修工作期 (MFOP)、置信度水平密切相关, 及时维修的产品能够保证较长的 FFOP。在工程应用时, FFOP 的确定应综合考虑运行维护费用进行权衡。

**关键词:** 无故障工作期; 免维修工作期; 泊松过程; 浴盆曲线; 可靠性; 舵机

**中图分类号:** V37; TB114.3 **文献标识码:** A

无故障工作期 (Failure Free Operating Period, FFOP) 定义为产品不会发生任何故障 (即零故障) 的时间。对于符合设计要求、质量合格的产品, 往往都要求其具有一定的无故障工作期, 尤其是具有高可靠性/安全性需求的系统, 如武器装备、核能系统、载人航空航天器、高速列车等。作为耐久性度量指标, FFOP 的长短与维修费用、保障费用紧密相关。准确预计 FFOP, 结合合理的维修策略, 能够实现对产品的充分使用, 降低运行成本。

FFOP 概念最早在美国空军颁布的军用规范 MIL-A-87244《航空电子设备完整性大纲要求》中提出<sup>[1]</sup>, 其中 FFOP 作为耐久性参数, 对传统的可靠性参数进行了补充, 并指导设计和生产。后来美国又颁布了一系列规范和指南, 都对装备的

FFOP 指标有了明确的要求<sup>[2-3]</sup>。

在 1996 年英国国防部 (Ministry of Defence, MOD) 提出免维修工作期 (Maintenance Free Operating Period, MFOP) 的概念以后<sup>[4]</sup>, FFOP 就通常与 MFOP 结合度量产品的耐久性。MFOP 概念比 FFOP 严格, 在 MFOP 内, 产品不允许出现任何影响性能和任务的失效事件; 而 FFOP 内不允许故障但允许维修活动, FFOP 是一系列免维修工作期的集合<sup>[5-6]</sup>。文献<sup>[6]</sup>分析了英国国防部为新一代战机提出的 MFOP 概念, 与平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failures, MTBF) 进行了对比, 并分别研究了基于任务可靠度和更新理论的 MFOP 预计方法, 英国国防部计划将 MFOP 概念应用于英国的超高可靠飞行器 (Ultra Reliable Air-

收稿日期: 2011-11-30; 退修日期: 2012-02-21; 录用日期: 2012-03-08; 网络出版时间: 2012-03-20 11:00

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120320.1100.005.html

基金项目: 国防预研基金 (9140A19021010HK0101)

\* 通讯作者. Tel.: 010-82339761 E-mail: jiming.ma@buaa.edu.cn

引用格式: Ma J M, Wan W, Zeng S K. FFOP prediction method based on bathtub-shaped failure rate function. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(9): 1664-1670. 马纪明, 万蔚, 曾声奎. 基于浴盆曲线故障率函数的 FFOP 预计方法. 航空学报, 2012, 33(9): 1664-1670.

craft, URA) 和未来攻击飞行器 (Future Offensive Aircraft, FOA) 项目。

当前国内外的研究大多集中在对无故障工作期/免维修工作期 (F/M-FOP) 概念的阐述以及适用场合分析等方面<sup>[7-11]</sup>, 证明了基于 F/M-FOP 维修策略的有效性。文献[12]~文献[14]假设产品故障为有限时间区间内的离散事件, 基于统计方法估计了产品存在某固定长度 MFOP 的概率。文献[15]以典型机电产品为案例, 研究故障事件为齐次泊松过程情况下 FFOP 的评估方法, 并对结果进行了合理性分析。文献[16]和文献[17]基于 Petri 网络, 使用仿真方法分析了固定 MFOP 系统的可靠度。以上研究集中在 MFOP 预计方法方面, 没有考虑维修策略对 FFOP 的影响。然而, 为促进基于 FFOP 维修策略的应用, 需要进一步研究 FFOP 的预计方法与模型。

在很多情况下, 产品 (系统) 的 F/M-FOP 大多由运行过程中随机故障事件之间的相对位置 (时间、空间距离) 决定, 相对位置的远近直接影响产品的 FFOP。以图 1 所示的时间 (空间) 区间  $[0, L]$  为例, 假设系统是一个客户服务系统, 为一个客户服务的免维修周期为  $s$ 。如果两个或者更多的客户集中在  $s$  内出现, 如图 1(a) 所示, 则系统会出现过载 (故障), 此系统的 FFOP 为  $s$  的概率就是  $P\{n[t, t+s] \leq 1\}$ ,  $n[t, t+s]$  为  $[t, t+s]$  区间内的客户数量。类似的方法也可以用于分析交通处理系统, 如图 1(b) 所示, 如果一个交通意外的恢复周期为  $s$ , 在这段周期内出现的其他意外则会导致拥堵 (故障); 如果把事件区间换作一段钢结构 (见图 1(c)) 或者电缆 (见图 1(d)), 也存在一个极限区间  $s$ , 在这个区间内应力集中点或缺陷次数要低于某一确定数量, 否则会出现故障。以上案例中, 客户出现与事故发生时刻、应力集中点或缺陷次数是互相独立且具有随机性的事件, 但是它们之间的相对位置与产品 (系统) 的无故障工作期密切相关。

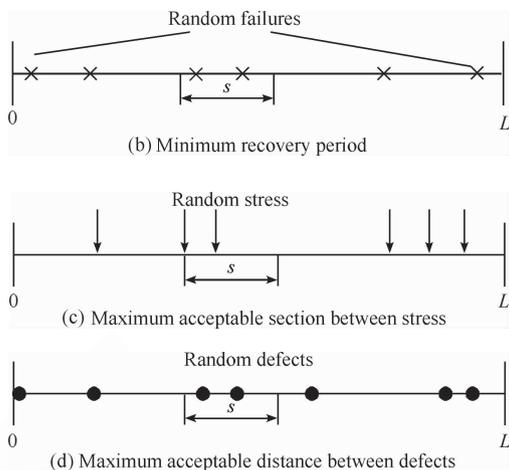
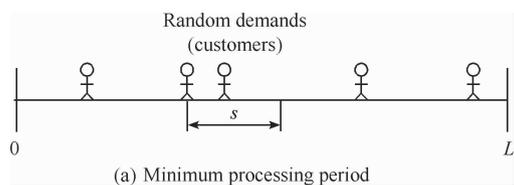


图 1 随机事件聚集导致系统故障

Fig. 1 System failures due to clustering of random events

泊松过程是描述随机事件发生的基本数学模型之一, 实际生活或自然世界中的随机事件, 大多可以用泊松过程描述<sup>[18]</sup>。对于寿命服从指数分布的产品, 故障率是一个常数, 寿命周期内随机故障事件可以用齐次泊松过程描述。然而, 实践证明, 大多数产品的故障率随时间变化的曲线是浴盆曲线<sup>[19]</sup>, 故障率是时变函数, 故障事件需要用非齐次泊松过程描述。

本文首先阐述 FFOP 与 MFOP 之间的区别与联系, 然后提出一种 FFOP 预计方法, 预计故障率函数为浴盆曲线的产品的无故障工作期。该方法作了如下假设: ① 故障事件服从泊松过程; ② 故障率函数为浴盆曲线; ③ FFOP 内允许固定周期的计划维修, 产品修复如新; ④ 一个 MFOP 内不允许有任何影响产品正常运行的故障事件, 一个维修恢复期 (Maintenance Recovery Period, MRP) 只能处理一次随机故障。

在以上假设的基础上, 给出了 FFOP 的预计方法、模型和预计步骤, 并通过某型无人机舵机对所提方法进行了应用验证。

## 1 FFOP 概念与内涵

在 MIL-A-87244 中, FFOP 被定义为故障概率达到 2% 的时间。图 2 描述了概率密度函数 (Probability Density Function, PDF)、MTBF、FFOP 这 3 者之间的区别与联系。

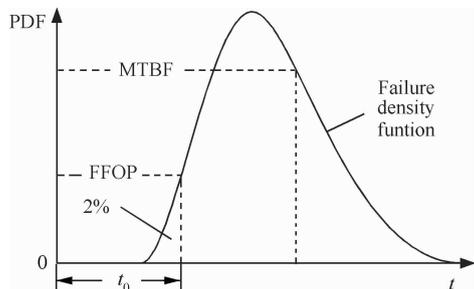


图2 寿命分布与FFOP

Fig. 2 Life distribution and FFOP

根据 FFOP 和 MTBF 的定义,有

$$\int_0^{\text{FFOP}} f(t) dt = 2\% \quad (1)$$

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau dt \quad (2)$$

式中:  $f(t)$  为故障密度函数;  $R(t)$  为可靠度函数。

对于大多数产品来说,由于不可避免的随机失效,图2所示时间  $t_0$  通常为0,这样就导致产品的FFOP很短。然而对于具有高可靠性/安全性需求的系统,又需要具有一定长度的FFOP。这个要求既可以通过设计手段降低产品的故障率实现,对于可修复产品,又可以通过固定周期的维护,使产品始终工作在比较“新”的状态,进而降低随机故障事件发生的概率来实现。

对于可修复的产品,FFOP与MFOP密切相关<sup>[10]</sup>。如果维护频繁,并且能够保证修复如新的话,FFOP会比维护不力的设备要长。

建立FFOP预计模型是预计FFOP的关键步骤。若要使产品在整个工作周期  $[0, L]$  内无故障运行,则要求在每次故障发生前进行维护并恢复到完好状态。由于一个维修恢复期只能处理一次随机故障,所以要求维修次数要和随机故障的次数一致,并且在故障事件实际发生之前就已经得到维修并完全修复,即第  $i$  次和第  $i+1$  次维修之间的间隔时间  $s_{i,i+1}$  小于第  $i$  次和第  $i+1$  次实际故障间隔时间  $S_{i,i+1}$ 。若在整个寿命周期  $[0, L]$  内出现  $k$  次故障,设定免维修工作期  $\text{MFOP}_{i,i+1} = s_{i,i+1}$ ,那么存在长度为  $L$  的FFOP的概率  $P_{\text{FFOP}}$  (故障发生前都能被完全修复以避免故障实际发生的概率)为<sup>[15]</sup>

$$P_{\text{FFOP}} = P(s_{0,1} \leq S_{0,1} \cap s_{1,2} \leq S_{1,2} \cap \dots \cap s_{k-1,k} \leq S_{k-1,k}) \quad (3)$$

式中:  $k$  为故障次数。

## 2 FFOP的预计模型

研究对象为故障率函数类似浴盆曲线的产品,并且故障事件具有泊松过程特性。由于寿命分布不是指数分布,故障率随时间变化,寿命周期内随机故障事件必须用非齐次泊松过程描述。

### 2.1 泊松过程

泊松过程具有以下特性:

1) 令  $N(t)$  为  $(0, t]$  中随机事件出现的次数,则有

$$P(N(t) = m) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为故障率/故障强度函数。

2) 随机事件之间的间隔时间  $T$  互相独立并且服从指数分布特征,即

$$P(T > t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

假设随机事件是故障事件,在  $t$  时刻,随机故障事件导致的系统不可靠度为

$$F(t) = P(T < t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$

### 2.2 浴盆曲线的故障率函数

已有的研究成果表明,基于浴盆曲线的故障密度函数有如下形式<sup>[20]</sup>:

$$f(t) = \gamma \beta (t/\alpha)^{\beta-1} \exp((t/\alpha)^\beta + \gamma \alpha (1 - \exp((t/\alpha)^\beta))) \quad (7)$$

对应的可靠度函数为

$$R(t) = \exp(\gamma \alpha (1 - \exp((t/\alpha)^\beta))) \quad (8)$$

故障率函数为

$$\lambda(t) = \gamma \beta (t/\alpha)^{\beta-1} \exp((t/\alpha)^\beta) \quad (9)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma$  均为分布函数中的参数。绘制故障率函数曲线,如图3所示。

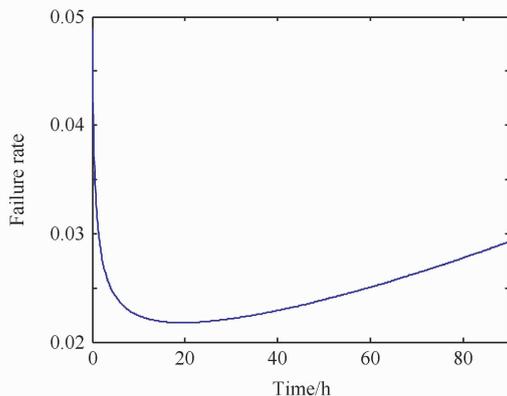


图3 故障率函数曲线

Fig. 3 Plot of failure rate function

从图 3 可以看出,产品的故障率明显呈浴盆曲线特性,可以描述分布特征为浴盆曲线的产品故障率。

### 2.3 FFOP 的预计步骤

研究具有浴盆曲线故障率函数的产品,与指数分布不同,其故障率为非常值,且导致故障发生为非齐次泊松过程,对比文献[15]中  $P_{FFOP}$  的计算公式,可以得到

$$P_{FFOP} = \exp\left(-\int_0^L \lambda(t) dt\right) \sum_{k=0}^r \left[ \frac{\left(\int_0^L \lambda(t) dt\right)^k}{k!} \cdot \left(1 - \frac{kS}{L}\right)^k \right] \quad (10)$$

式中:  $r$  为允许的维护次数。在进行 FFOP 预计之前,需要根据式(7)~式(9)确定产品的  $\lambda(t)$ 。

FFOP 的预计步骤如图 4 所示。

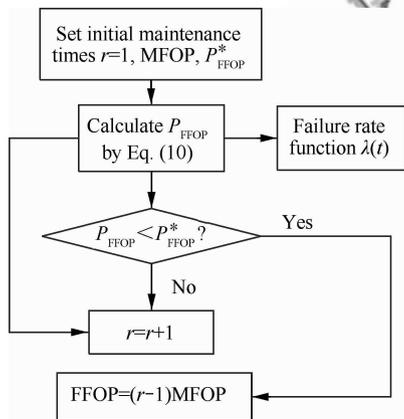


图 4 FFOP 预计步骤

Fig. 4 Prediction steps of FFOP

首先,设置 FFOP 为  $L$  的置信度  $P_{FFOP}^*$  和 MFOP。在整个 FFOP 周期内的维护次数为  $r$ , 设置初始维护次数  $r=1$ 。

按照图 4 所示的流程,对维护次数递增,得到满足式(11)的最大维护次数  $r$ 。

$$P_{FFOP}^* < \exp\left(-\int_0^{rs} \lambda(t) dt\right) \sum_{k=0}^r \left[ \frac{\left(\int_0^{rs} \lambda(t) dt\right)^k}{k!} \cdot \left(1 - \frac{kS}{L}\right)^k \right] \quad (11)$$

FFOP 的估计区间为

$$FFOP \subset [rs, (r+1)s] \quad (12)$$

对于大多数工程应用,式(12)所描述的

FFOP 区间已经足够。更精确的预计结果可以通过在区间内多点取值,由式(11)反复校验的方式获取。

### 3 案例

案例研究以某无人机舵机为对象。舵机是无人机飞行操纵系统的关键设备,其发生故障会导致飞行任务中断,是影响无人机 FFOP 的关键设备。基于寿命试验数据,对其进行 FFOP 评定,可以帮助实现无人机的寿命评估,为制定维修策略提供依据。表 1 为 15 台样本的寿命试验结果,表中:  $t_i$  为故障前时间(Time to Failure, TTF);  $F(t_i)$  为累计分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。

表 1 舵机失效寿命数据(N=15)

Table 1 Failure life data of actuators (N=15)

No.	$t_i/h$	$F(t_i)$
1	265.9	0.045 45
2	302.1	0.110 4
3	309.1	0.175 3
4	334.1	0.240 2
5	343.7	0.305 2
6	352.8	0.370 1
7	364.8	0.435 1
8	369.8	0.500 0
9	374.4	0.564 9
10	427.5	0.629 9
11	429.1	0.694 8
12	431.7	0.759 7
13	501.8	0.824 7
14	588.5	0.889 6
15	604.6	0.954 5

根据同类产品的历史数据,得知其故障率服从浴盆曲线特征。用式(7)描述该无人机舵机的故障分布函数。

采用极大似然法估计分布参数<sup>[20]</sup>,构造的似然函数为

$$L(\alpha, \beta, \gamma) = \gamma^n \beta^n \prod_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta + \sum_{i=1}^n \gamma \alpha \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta\right)\right)\right) \quad (13)$$

式中,  $n$  为舵机个数(全寿命试验),  $0 < i \leq n$ 。

由于故障产品的样本较少,采用近似中位秩公式计算其 CDF<sup>[21]</sup>。通过求解式(14)~式(16),得到分布函数中的参数  $\alpha, \beta, \gamma$ 。

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \gamma} = \frac{n}{\gamma} + n\alpha - \alpha \sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \beta} = \frac{n}{\beta} + \sum_{i=1}^n \ln \frac{t_i}{\alpha} + \sum_{i=1}^n \left[ \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta \ln \frac{t_i}{\alpha} \right] - \gamma \alpha \sum_{i=1}^n \left[ \exp\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta (t_i/\alpha)^\beta \ln(t_i/\alpha) \right] = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} = -\frac{n(\beta-1)}{\alpha} + n\gamma - \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta - \gamma \sum_{i=1}^n \left[ \exp\left(\frac{t_i}{\alpha}\right)^\beta (1 - (t_i/\alpha)^\beta) \right] = 0 \quad (16)$$

把表 1 的数据代入式(14)~式(16),利用数值分析工具,解得  $\alpha = 110, \beta = 0.62, \gamma = 1.34$ ,代入式(8)和式(9),可得:

$$\lambda(t) = 0.83 \left(\frac{t}{110}\right)^{-0.38} \exp\left(\frac{t}{110}\right)^{0.62} \quad (17)$$

$$R(t) = \exp\left(147.5 \left(1 - \exp\left(\frac{t}{110}\right)^{0.62}\right)\right) \quad (18)$$

根据式(2)对 MTBF 的定义,利用数值解法得到该无人机舵机的 MTBF 为 406 h。

考虑无人机舵机的工作要求,设定 MFOP 为 25 h,根据图 4 所示 FFOP 的计算流程,将式(17)代入到式(11),得到不同维护次数对应的  $P_{\text{FFOP}}$  和 FFOP,具体参数见表 2。

表 2 不同置信度对应的 FFOPs(MFOP=25 h)  
Table 2 FFOPs under different confidence levels (MFOP=25 h)

$r$	$P_{\text{FFOP}}$	FFOP/h
1	0.964 6	258
2	0.964 0	283
3	0.943 7	308
4	0.923 3	333
5	0.901 6	358
6	0.877 9	

要求置信水平  $P_{\text{FFOP}}^* = 90\%$ ,由表 2 可知,在满足规定的置信度下,该舵机的最大允许故障次数为 5 次,此时舵机的 FFOP 为 358 h,低于 MT-

BF,这也与 FFOP 的定义相符合。

对于不同的 MFOP,同样要求置信度为 90%,可以得到该舵机允许的最大维护次数和 FFOP 如表 3 所示。

表 3 FFOP、MFOP 和最大维护次数

Table 3 FFOP, MFOP and maximum maintenance times

MFOP/h	$r$	FFOP/h
10	21	443
15	16	398
20	7	373
25	5	358
30	3	338
35	3	323
40	2	323
45	2	313
50	0	0

由表 3 可知,若每隔 30 h 维修一次,则在 3 次维修内仍能保证无故障工作的概率为 90%;若每隔 40 h 维修一次,则只能在两次维修内保证无故障工作的概率为 90%;若维修间隔增大到 50 h,则舵机在维修之前无故障工作的概率就已经降低到 90% 以下。这是因为舵机的故障率随着时间增大而增大,导致其可维护次数急剧减少,无故障工作周期随之减小。并且,当 MFOP 增大到一定期限后,舵机就不再有故障工作周期。

只有维修间隔缩短到 10 h,舵机的 FFOP 才能够达到 MTBF 的水平(406 h)。但随着 MFOP 的增大,维护(容许故障)次数逐渐减少,同时 FFOP 与 MTBF 的差异也逐渐明显。

## 4 结 论

基于浴盆曲线故障率函数的 FFOP 预计方法,能够预计失效过程为泊松过程,并且故障率函数服从浴盆曲线特征情况下的产品无故障工作期。将 FFOP 作为设备耐久性参数之一,可以为产品的寿命评估和维护策略制定提供依据。

1) 寿命分布函数一旦确定,MTBF 就是固定不变的。与 MTBF 不同,FFOP 与 MFOP、 $P_{\text{FFOP}}^*$  一一对应,MFOP 过长或  $P_{\text{FFOP}}^*$  过高都会导

致 FFOP 不存在,只有在某固定维护策略下,产品的 FFOP 与 MTBF 才能够达到类似水平。

2) 缩短 MFOP 是延长 FFOP 的重要途径。然而维护频率的提高通常导致产品的运行维护费用增加,在工程应用中,应综合考虑维护费用进行权衡,合理确定 MFOP 和 FFOP。

通过某无人机舵机的应用,验证了所提方法的可行性,可推广应用到对可靠性要求较高的产品的 FFOP 预计过程中。但是提出的 FFOP 预计方法仍然是基于概率和统计理论的,要求研究对象具有某种固定寿命分布,故障事件服从泊松过程的特征。对于故障率函数未知、故障事件统计特征不确定的场合,本文提出的方法并不可行。需要在深入研究产品的失效机理,掌握其失效的动态演化过程前提下进行 FFOP 的预计。

### 参 考 文 献

- [1] MIL-A-87244A Avionic/electronic integrity program requirements(AVIP). USAF, 1986: 10-18.
- [2] MIL-HDBK-87244 Avionic/electronic integrity. USAF, 1995: 6-55.
- [3] DOD. Guide for achieving reliability, availability, and maintainability. Washington: USA DOD, 2005: 31-35.
- [4] Hockley C J, Appleton D P. Setting the requirements for the Royal Air Force's next generation aircraft. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1997: 44-48.
- [5] Brown M A, Hockley C J. Cost of specifying maintenance/failure free operating periods for Royal Air Force aircraft. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2001: 425-432.
- [6] Kumar U D, Knezevic J, Crocker J. Maintenance free operating period; an alternative measure to MTBF and failure rate for specifying reliability. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 64(1): 127-131.
- [7] Todinov M T. Reliability and risk models: setting reliability requirements. England: John Wiley & Sons, 2005: 69-237.
- [8] Cini P F, Griffith P. Designing for MFOP: towards the autonomous aircraft. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1999, 5(4): 295-306.
- [9] Dietl C, Rakowsky U K. An operating strategy for high-availability multi-station transfer lines. International Journal of Automation and Computing, 2006, 3(2): 125-130.
- [10] Sun J, Yu J F. Research on concept and application of airplane MFOP. Aviation Maintenance and Engineering, 2010(2): 33-36. (in Chinese)
- 孙蛟, 虞健飞. 飞机 MFOP 概念与应用研究. 航空维修与工程, 2010(2): 33-36.
- [11] Jiang L, Wei A J. A method for maintenance scheduling in manufacturing systems based on TPM and MFOP. Applied Mechanics and Materials, 2011, 44(47): 404-408.
- [12] Warrington L, Jeffery A, Davis J N. The use of a discrete event simulation to model the achievement of maintenance free operating time for aerospace systems. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2001: 170-175.
- [13] Warrington L, Jeffery A, Davis J N. Modeling of maintenance within discrete event simulation. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002: 260-265.
- [14] Todinov M T. Reliability governed by the relative locations of random variables following a homogeneous Poisson process in a finite domain. IEEE Transactions on Reliability, 2004, 53(2): 226-237.
- [15] Ma J M, Wu W W. Research on FFOP prediction approach of a pulse generator based on homogeneous Poisson process. Proceedings of International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2011: 334-338.
- [16] Chew S P, Dunnett S J, Andrews J D. Phased mission modeling of system with maintenance-free operating periods using simulated Petri nets. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93(7): 980-994.
- [17] Chew S P. System reliability modeling for phased with maintenance free operating periods. Lough borough; Loughborough University, 2010.
- [18] Athanasios P, Unnikrishna P S. Probability, random variables and stochastic processes. Bao Z, Feng D Z, Shui L P, translated. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004: 364-372. (in Chinese)
- Athanasios P, Unnikrishna P S. 概率、随机变量与随机过程. 保铮, 冯大政, 水鹏朗, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 364-372.
- [19] Zeng S K. Reliability design and analysis. Beijing: National Defense Industrial Press, 2011: 14-30. (in Chinese)
- 曾声奎. 可靠性设计与分析. 北京: 国防工业出版社, 2011: 14-30.
- [20] Xie M, Tang Y, Goh T N. A modified Weibull extension with bathtub shaped failure rate function. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76(3): 279-285.
- [21] He G F, Xu H B. Collection and analysis of reliability data. Beijing: National Defense Industrial Press, 1995: 25-44. (in Chinese)
- 贺国芳, 许海宝. 可靠性数据的收集与分析. 北京: 国防工业出版社, 1995: 25-44.

## 作者简介:

马纪明 男,博士,讲师。主要研究方向:机电系统的可靠性设计分析,控制系统诊断,工业科学与技术。

Tel: 010-82339761

E-mail: jiming.ma@buaa.edu.cn

万蔚 男,硕士研究生。主要研究方向:机电系统的可靠性设计与故障诊断。

Tel:010-82338403

E-mail: wanwei817@163.com

曾声奎 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:系统科学与工程,复杂系统的可靠性设计分析。

Tel: 010-82314731

E-mail: zengshengkui@buaa.edu.cn

## FFOP Prediction Method Based on Bathtub-shaped Failure Rate Function

MA Jiming<sup>1,\*</sup>, WAN Wei<sup>2</sup>, ZENG Shengkui<sup>2</sup>

1. Sino-French Engineer School, Beihang University, Beijing 100191, China

2. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract:** Failure free operating period (FFOP) is defined as a period during which no failures resulting in a loss of system functionality occur. First, the concept of FFOP and the difference between FFOP and mean time between failures (MTBF) are introduced. Three hypotheses are held as the preconditions of the presented methodology. First, the fault event is a Poisson process. Second, the failure rate function is shaped like a bathtub curve. Third, constant interval scheduled maintenance is permitted during which the product must maintain trouble-free function. A modified Weibull distribution function is used to model the bathtub-shaped failure rate function. Furthermore, based on the probability and stochastic processes theory, FFOP prediction algorithm and procedure are developed, whose accuracy is verified through simulation. Finally, an actuator is selected as the sample case to validate the feasibility of the proposed method. The result shows the FFOP is correlated with maintenance free operating period (MFOP) and the predefined confidence coefficient. Shorter MFOP will deliver both higher maintenance and operating costs and longer FFOP. In engineering practice, a tradeoff between FFOP and maintenance and operation cost should be considered.

**Key words:** failure free operating period; maintenance free operating period; Poisson process; bathtub curve; reliability; actuators

**Received:** 2011-11-30; **Revised:** 2012-02-21; **Accepted:** 2012-03-08; **Published online:** 2012-03-20 11:00

**URL:** www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20120320.1100.005.html

**Foundation item:** National Defence Pre-research Foundation (9140A19021010HK0101)

\* **Corresponding author.** Tel.: 010-82339761 E-mail: jiming.ma@buaa.edu.cn