可用度限定的装备定期预防置换维修策略研究 *

Periodic Preventive Replacement Maintenance of Equipment Based on Limited Availability

西北工业大学管理学院　赵永强　梁工谦

[摘要]　可用度是一种以比例或概率来衡量系统是否可以正常工作的参数，是衡量装备效能的重要指标。首先，以威布尔分布作为装备的失效密度函数，利用函数关系求出其期望函数；其次，在建立了似然函数后，用最大似然估计方法建立联合方程组，求出密度函数参数的估计值，该参数与装备的有效运行时间有关；第三，在可用度限定条件下，利用可用度函数求出装备的最佳预防置换维修周期及其维修次数；最后，以某装备为实例，在已知参数的条件下求出该装备的最优预防维修周期及其维修次数，证明了模型的有效性。

关键词：可用度　威布尔分布　定期预防维修　置换

[ABSTRACT]　Availability is parameter to measure the proportion or probability of the system' normal work ability, it's an important factor to measure equipment performance. First, assume that the equipment failure density function obeying Weibull distribution, the expected function is calculated, which is the expected average life time of equipment. Second, the maximum likelihood estimation method is established to estimate the density function parameters. Third, the optimal preventive replacement maintenance of equipment and its repair cycle times are found out by using availability functions based on limited availability. Finally, the optimal preventive replacement maintenance and repair cycle times are obtained on the conditions of limited availability by taking certain equipment as an example, the results show the model is useful to equipment.

Keywords: Availability　Weibull distribution　Periodic preventive maintenance　Replacement

武器装备具有系统复杂、性能要求高的特点，在采购初期已经花费大量的资金。在使用过程中，由于高质量的战备特性，要求在日常使用中保持高的可用度及可靠性，这就需要完善的后勤保障制度来支撑整个装备体系。后勤保障体系主要包括了装备的维护体系及零备件的保障体系。从寿命周期的角度来看，后期的维护费用远远高于初期的采购成本，一方面是由于装备使用寿命较长，需要花费大量的资源来保证其有效性，另一方面则与维修的质量及效率有关。由于军事装备系统复杂，维修过程中需要多个部门协同合作，如何在有效时间内完成维修任务已经成为装备维修的关键点之一。可用度是判断装备能否正常工作的重要指标。装备可以通过可靠性设计及优质的制造过程实现高水平的可用度，还可在使用阶段利用检查、维护、预防维修等措施保持高的可用度，然而，由于装备系统的功能要求复杂，所以依靠设计、制造阶段提高可用度的能力受到技术、工艺及管理能力的限制，这两个阶段提升可用度的能力十分有限，因此研究在使用阶段利用预防维护措施保障高的可用度就显得十分重要。

装备维修的研究较为成熟，大体可以分为预防维修及事后维修。预防维修按照其维修程度可分为完全维修、不完全维修和最小维修；按照维修周期则可分为定期预防维修及逐次预防维修。定期预防维修是指在寿命周期内以固定周期对装备进行预防维修，有时候装备会随着时间的增加而老化，定期预防维修无法使用，就需要考虑逐次维修；逐次维修会随着时间的推移缩短维修周期。杜清玲等以维修部门的工作为分析对象，动态跟踪装备的维修信息，按有效度最大原则，利用数学模型求解出机械装备预防维修周期 [1]；韩东、李石磊探讨了修复型电子装备基于最大可用度的修复型预防维修周期决策模型的仿真计算方法，结合数据采集板给出了仿真运算结果 [2]；李扬彬、俞志强讨论了基于可靠度的预防维修决策方案，给出了该模型的可靠度计算公式，在此基础上提出预防维修决策方案 [3]；盛天文等提出一种基于可靠度和经济性求解维修周期和维修时间策略的方法，考虑了设备失效率函数递增及寿命限制条件下的维修模型，给出了维修周期及维修策略 [4]；谭林等提出一类基于 gamma 劣化过程的可修串联系统的可用度计算方法，考虑系统维修效果的不完全性，在此基础上推导出系统可用度的表达式 [5]；方瑛等在综合考虑了复杂串联系统中不同组件寿命分布及其相对系统权重的

*　航空科学基金（2009ZG55018）资助。

差异，建立了一种可计算系统最佳维修周期的模型，得出了系统的最优预防性维修周期[6]。

从以上文献可以看到，多数对预防维修模型的研究都是建立在一定约束条件下的，如可靠性及总维修正本最低条件下构建维修模型，随后求出维修周期及其维修策略，但从可用度的角度探讨较少。由于可用度是衡量装备使用情况的关键参数，因此，有必要考虑可用度已知条件下的装备预防维修策略。本文以威布尔分布作为装备的失效密度函数，求出该分布条件下的装备平均寿命期望。随后利用最大似然估计对函数中的参数进行估计，进而获得装备的平均寿命时间。在可用度限定的条件下，求出装备的最佳预防维修周期及其维修次数，对装备的预防维修有重要参考意义。

1 模型约束条件及相关函数

1.1 假设条件

由于模型是在可用度已知条件下的预防维修模型，维修的核心是为了保障装备的高战备性，所以模型构建需要假定一些约束条件。

（1）将整个装备看作一个整体的维修单位，不考虑零部件失效的问题。

（2）装备的故障率会随着使用时间的增加而增加。

（3）已知装备的预期寿命时间。

（4）装备发生故障以后，维修方式为置换维修，不考虑维修成本的投入。

（5）预防周期内的故障处理时间很短，可以忽略不计其时间及成本。

（6）以机械装备为研究对象。

1.2 可用度函数

可用度是一种以比例或概率来衡量系统是否正常的参数，描述了当任务需要时某个系统或装置能够使用的程度，能够使用的程度即为此系统是否能正常运作并发挥其应有性能的能力，所以可用度是评估武器系统效益的重要指标[7]。根据美国武器装备系统效能咨询委员会的定义，把可用度定义为在开始执行任务时系统状态的度量，是硬件、人员和时间关系的函数。此外，可用度也可以表示为系统在规定条件下随时使用时正常工作的概率[7]。换句话说，系统可用度是系统在给定条件下使用时，能根据任务需要开始操作执行的可能性；而可靠性是指产品在规定的条件和时间内，完成规定功能的能力。可靠性通常与时间相关。可靠性对于保障系统的质量，对系统进行及时维护，是减少损失、降低成本的重要方法，而系统的正常运转则与设计阶段、制造阶段零件的选用、组件可靠度水平的加强、组件组合、配置方式的改良等方式实现系统可靠度有关，因此，系统的正常运转与系统的初始状态有关。

早期的可用度不考虑保障过程的分析，只考虑装备自身的客观属性，所以在维修的过程中只对装备进行事后维修，称为固有可靠度 A，其表达公式如下：

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF+MTTR}} , \tag{1}$$

其中，MTBF（Mean Time Between Failure）为平均故障间隔时间，MTTR（Mean Time to Repair）为平均修复时间。

当考虑后勤保障、服务质量时，就会在时间序列上出现平均等待时间 MWT（Mean Wait Time）。那么从实际出发，实际有效度 A_0 应表示为：

$$A_0 = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF + MTTR + MWT}} 。 \tag{2}$$

从概率分布的角度考虑可用度，还可以将其划分为瞬时可用度、极限可用度、平均可用度和极限平均可用度 4 个类型。

2 模型的建立

2.1 装备的失效分布

随着装备的持续使用，发生故障是不可避免的。机械装备的故障密度函数通常服从威布尔分布，其故障密度函数 $f(t)$ 为：

$$f(t) = \frac{m}{\eta}\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^{m-1}\exp-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^{m-1} ,$$

$$(\delta \leqslant t; m, \eta > 0) , \tag{3}$$

式中，m 为形状参数，η 为尺度参数，δ 为位置参数，t 为装备运行时间。假定装备的失效率与时间相关，则位置参数 δ=0，那么故障密度函数 $f(t)$ 则为：

$$f(t) = \frac{m}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1}\exp-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} 。 \tag{4}$$

由于 $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$，$R(t) = \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{d}t}$，其中 $\lambda(t)$ 为故障率函数，$R(t)$ 为可靠度函数，则有：

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} , \tag{5}$$

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1}\right] 。 \tag{6}$$

装备的平均寿命是指装备从投入使用到发生故障的平均工作时间。对于不维修产品又称失效前平均时间，根据数学期望的定义，可得：

$$\text{MTBF} = \int_0^\infty t f(t)\mathrm{d}t 。 \tag{7}$$

2.2 失效密度函数的参数估计

已知威布尔分布的失效密度函数，这里采用最大似然估计对参数进行估计，写出样本的联合密度函数：

$$L=L(t_1,\cdots,t_n;m,\eta)=\prod_{i=1}^{n}\frac{m}{\eta}\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1}\exp-\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1}=$$

$$\left(\frac{m}{\eta}\right)^{n}\prod_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1}\exp-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1}。\qquad(8)$$

对似然函数求对数，则有：

$$\ln L(t_1,\cdots,t_n;m,\eta)=$$

$$\ln\left(\frac{m}{\eta}\right)^{n}\prod_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1}\exp-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1}=$$

$$n\ln\left(\frac{m}{\eta}\right)+n(m-1)\ln\frac{1}{\eta}+(m-1)\prod_{i=1}^{n}t_i-\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{t_i}{\eta}\right)^{m-1},\qquad(9)$$

式中，t_i 为装备在第 i 次失效前的有效运行时间，对对数似然函数分别求 η 及 m 的偏导，令其等于零，得出联合函数：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\ln L(t_1,\cdots,t_n;m,\eta)}{\partial m}=\dfrac{n}{m}-n\ln\eta+\prod_{i=1}^{n}t_i-\\ \qquad\sum_{i=1}^{n}\left(\dfrac{t_i}{\eta}\right)^{m-1}\ln\left(\dfrac{t_i}{\eta}\right)=0\\ \dfrac{\partial\ln L(t_1,\cdots,t_n;m,\eta)}{\partial\eta}=-\dfrac{nm}{\eta}+\\ \qquad\dfrac{(m-1)}{\eta}\sum_{i=1}^{n}\left(\dfrac{t_i}{\eta}\right)^{m-1}=0\end{cases},\qquad(10)$$

若已经从装备日常运行过程获得装备的有效运行时间 t_i，将这些数据代入到上公式，即可利用计算工具求出 η、m 的估计值 η'、m'，η'、m' 是关于 t_i 的函数。

2.3 装备定期预防置换维修决策

装备的平均寿命时间 MTBF 可以用下式计算：

$$\mathrm{MTBF}=\int_0^{+\infty}tf(t)\mathrm{d}t=\eta\Gamma\left(1+\frac{1}{m}\right),\qquad(11)$$

式中，$\Gamma(t)=\int_0^{+\infty}t^{t-1}\,\mathrm{e}{-}x\mathrm{d}x$，若已经通过统计获得了装备失效前的有效运行时间 t_i，则可求出 η'、m'。在装备可用度已知的条件下，可以求出 MTTR：

$$\mathrm{MTTR}=\frac{(1-A)}{A}\mathrm{MTBF}=\eta'\frac{(1-A)}{A}\Gamma\left(1+\frac{1}{m'}\right)。\qquad(12)$$

假设装备的使用期限为 T，装备的预防维修周期即为 MTBF+MTTR。装备的预防维修周期次数 k 为：

$$k=\frac{T}{\mathrm{MTBF}+\mathrm{MTTR}}=\frac{T}{\Gamma\left(1+\frac{1}{m'}\right)\left(\frac{\eta'}{A}\right)}。\qquad(13)$$

3 实例分析

某装备的期望可用度 A=0.98，其设计寿命时间 T=5 年，在使用过程中统计到了 10 次该装备失效前的有效运行时间 ti，具体时间如表 1 所示。

表1 装备失效前的有效运行时间

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_i/天	76.8	52.4	18.5	7.4	57.8	68.9	23.8	101.8	19.0	25.8

将这些数据带入到公式（10）中，利用 Matlab 软件求解，可以求出 η'=49.7，m'=2.2。将两个参数带入到公式（11）中，求得装备的平均寿命时间 MTBF=49.7 Γ（1.46）=43.9 天。将 A=0.98，带入到公式（12）中，可以求得 MTTR=1.01 天。因此，装备的预防维修周期为 50 天。由于 T=5 年，所以该装备在寿命期限内的维修次数 K=40 次。依据这些数据，维修部门可以做出相应的预防维修安排。若将上表中的数据带入可靠度计算公式（6）中求其对应的可靠度 R（t），可得出可靠函数曲线，如图 1 所示。

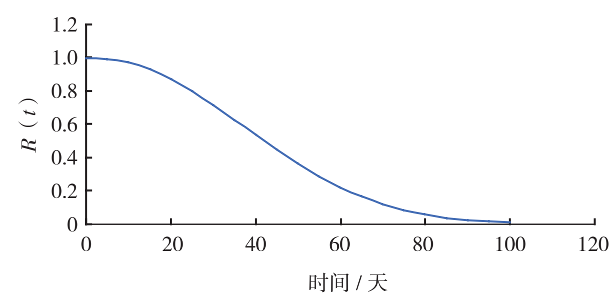

图1 某装备的可靠度函数曲线

Fig.1 Equipment reliability function curve

由图 1 可以看出：

（1）随着时间的增加，装备的可靠度在逐渐下降，当装备运行时间达到 43.9 天时，其可靠度只有 0.533，在这样低的可靠度下装备的故障发生故障的概率已经很高，随时都会失效，必须对其进行维修。

（2）装备自身的可靠性水平比较差，为了提高装备的可用度，需要对该装备可靠性设计及制造阶段进行优化，包括零件的选用、组件可靠度水平的加强、组件组合、配置方式的改良等，进一步的改善会改变装备的固有可用度。

（3）需要进行细致的保养，可以依据维修次数来储备足够的维修备件，避免出现发生故障无法维修的问

（下转第 143 页）

位初始点规模不同而导致的 det（$\boldsymbol{M}$）变化情况，可以看出 Greedy 算法具有较好的计算结果，能取得较大的 det（$\boldsymbol{M}$）。

图 10 为 Greedy 算法与 Interchange 算法随定位初始点规模不同而导致的计算时间变化情况，从图中可以看出，Greedy 算法计算时间随着定位初始点规模增加而迅速变长，而 Interchange 算法随着定位初始点规模增加计算时间变化不大。

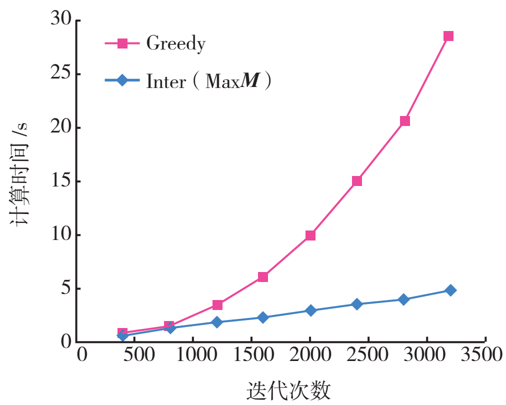

图10 计算时间变化情况

Fig.10 Calculation of time changes

4 结束语

本文针对涡轮叶片精密铸造工艺中需对蜡型陶芯定位点布局进行优化，提出利用 Greedy 算法和 Interchange 算法对优化方案求解，并分析了求解结果的计算精度和计算效率。其中 Greedy 算法求解的陶芯定位点布局优化方案精度较高；Interchange 算法求解的陶芯定位点布局优化方案的效率较高。实际工程运用中，初始定位点一般数量较多，所以在精度允许的前提下，应优先考虑使用 Interchange 算法求解蜡型陶芯定位点布局优化方案。

参 考 文 献

[1] Kang K. Computer-aided fixture design verification [D]. Worcester Polytechnic Institute, 2001.

[2] Kim P, Ding Y. Optimal design of fixture layout in multistation assembly processes. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2004, 1(2): 133-145.

[3] Kleinberg J, Tardos E. Algorithm Design. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, 2005.

[4] Lee R C T, Chang R C, Tseng S S, et al. Introduction to the Design and Analysis of Algorithms. Taiwan: Unalis Press, 2005.

[5] 马骊溟，姜虹，负敏，等．大型复杂曲面类毛坯加工定位的全局优化算法．系统仿真学报，2005(4):825-826，830.

[6] Asada H, By A B. Kinematic analysis of workpiece fixturing for flexible assembly with automatically reconfigurable fixtures. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1985, RA-1(2): 86-94.

[7] Kleinberg J, Tardos E. Algorithm Design. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, 2005.

[8] Lee R C T, Chang R C, Tseng S S, et al. Introduction to the Design and Analysis of Algorithms, Unalis Press, 2005.

（责编 三丰）

（上接第 136 页）

题。要分析维修过程，对维修流程进行优化，加快维修的速度及质量，缩短装备的置换维修时间，也可以达到提高可用度的目的。

4 结论

装备可用度可以通过可靠性设计及优质的制造过程实现高水平的可用度，还可在使用阶段利用检查、维护、预防维修等措施保持高的可用度。然而，由于装备系统的功能要求复杂，所以依靠设计、制造阶段提高可用度的能力受到技术、工艺及管理能力的限制，这两个阶段提升可用度的能力十分有限，如何在使用阶段利用预防维护措施控制高装备的可用度就显得十分重要。

本文假定装备的故障密度函数服从威布尔分布，利用函数关系求出该分布的可靠度函数及其期望函数(装备平均寿命时间)。在建立了似然函数后，用最大似然估计方法建立了联合方程组，利用计算工具求出了形状参数及尺度参数估计函数，该函数与装备有效运行时间有关，这样即获得了装备的平均寿命时间函数。在可用度限定条件下，利用可用度函数求出了装备的最佳预防维修周期及其维修次数。最后，以某装备为实例，在已知参数的条件下，求出了该装备的最优预防维修周期及其维修次数，证明了模型的有效性。

参 考 文 献

[1] 杜清玲，李美芳，刘家科．机械设备预防维修周期的确定．机床与液压，2000(6): 92-93.

[2] 韩东，李石磊．基于可用度的电子装备预防维修周期研究．军械工程学院学报，2008，20(5): 12-14.

[3] 李扬彬，俞志强．一种基于可靠度的预防维修决策方案．空军雷达学院学报，2009，23(6): 399-401.

[4] 盛天文，陈晓慧，易树平．寿命型设备的预防维修策略研究．计算机集成制造系统，2009，15(3): 598-603.

[5] 谭林，程志君，郭波．考虑不完全维修的可修串联系统可用度模型．国防科技大学学报，2009，31(6): 100-105.

[6] 方瑛，黄征，肖枝洪，等．复杂串联系统预防维修策略研究[J]. 湖北工业大学学报，2011, 26(3): 17-19.

[7] 毛德军，李庆民，张志华．以装备可用度为中心的保障方案优化方法．兵工学报，2011，32(5): 636-640.

（责编 深蓝）