

doi: 10.7690/bgzd.2018.07.006

一种基于状态监控的自动测试系统更换订购策略

陈鲁聪¹, 冯玉光¹, 史贤俊²

(1. 海军航空大学兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空大学控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对海军导弹通用自动化测试系统的劣化故障, 结合测试系统模块和元器件不可修复件多的特点, 以及现有维修策略维修周期长的问题, 提出一种基于状态监控维修更换和备件订购策略。该维修策略引入性能可靠性, 通过状态监控和周期检查来确定不可维修模块劣化水平, 进而基于模块劣化水平进行模块更换决策, 并根据库存中剩余备件个数决定是否需要订购备件, 减少停机时间, 实现决策优化。理论分析和实例分析结果表明, 与原策略相比, 该策略能够缩短维修周期, 提高使用可用度, 保证系统的持续安全运行。

关键词: 状态监控; 性能可靠性; 维修更换; 订购

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

A Replacement and Ordering Strategy of Automatic Test System Based on Condition Monitoring

Chen Lucong¹, Feng Yuguang¹, Shi Xianjun²

(1. Department of Ordnance Science & Technology, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China;

2. Department of Control Engineering, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the deterioration failure of the naval missile general automation test system, combined with the characteristics of the test system module and the non-repairable parts and spares, spares for a long time to prepare, based on the condition monitoring maintenance replacement and the spares ordering strategy. The maintenance strategy introduces performance reliability, determines the level of non-serviceable module degradation by condition monitoring and cycle check, and then makes module replacement decisions based on the module degradation level and determines whether to reserve spares and reduce downtime according to the number of spare parts in the inventory, To ensure the operational readiness, to achieve decision-making optimization. Theoretical analysis and case analysis show that compared with the original strategy, the proposed strategy can shorten the maintenance cycle, improve the operational availability, to ensure the continuous and safe operation of the system.

Keywords: condition monitoring; performance reliability; maintenance replacement; ordering

0 引言

新时期, 海军导弹装备飞速发展, 相应地, 配套的海军通用导弹自动测试系统的集成程度越来越高。作为导弹维护保障的主要装备, 测试系统的使用可用度对于导弹战斗力生成十分重要, 但对于自动测试系统维修保障策略的研究相对较少。

海军导弹通用自动测试系统是海军导弹武器系统的重要组成部分, 是导弹技术支援系统的主要配套设备之一, 主要用于导弹在总装厂和技术阵地的测试与维护。该自动测试系统具有通用化、模块化、智能化、机动化的特点, 通过换装相应的适配器和测试软件后, 可对海军绝大部分导弹进行测试^[1]。自动测试系统 (automatic test system, ATS)^[2]设备组成复杂, 涉及到元器件有二百余种, 原材料有十余

种, 且有原装进口产品。其中, 大部分箱体为标准抽屉式结构, 内部有印制板等功能模块, 依靠引线将机箱前面板元器件和内部功能模块连接起来。此结构的产品质量可靠, 维修方便, 且从基层使用单位调研发现, 该系统具有良好的维修性; 因此, 如果使用单位配备足够的备件和相应的支援设备, 基层人员经过培训, 完成测试系统的一般维修工作是比较便捷方便的。

ATS 的维修保障工作主要包括: 技术检查、维护与修理、维修器材筹措与供应、设备建设、专业培训等方面, 其中维护与修理、维修器材筹措与供应是最为重要的 2 方面, 具体体现在模块维修更换、备件筹措 2 个核心环节。现阶段 ATS 的维修方式主要采取事后维修 (corrective maintenance, CM), 备

收稿日期: 2018-03-17; 修回日期: 2018-04-29

作者简介: 陈鲁聪 (1991—), 男, 山东人, 研究生, 从事武器系统测试与健康研究。

件充足时平均修复时间 (mean time to repair, MTTR) 较小。但由于基层条件的制约, 不可能储备大量备件, 等待备件的保障延误时间 (lead time, LT) 长, 大大降低了 ATS 的使用可用度; 因此, 无法保证系统的持续安全运行。针对此问题, 国内外相关专家学者提出了一系列基于状态监控的维修模型, 但在此类更换订购模型中, 模块的劣化过程中只有传统的正常工作和故障 2 个状态, 无法描述设备各阶段劣化程度。Dohi 等^[3]提出了基于模块运行时间对部件更换和备件订购决策策略, 在特定时刻 t_0 进行订购更换模型, 对综合仓库中备件情况和系统的劣化失效情况进行维修决策; Sheu 等^[4]提出了基于设备使用年限进行最优更换策略, 考虑了年龄更换策略应用于冲击型劣化系统的问题。但上述方法均只考虑基于时间的维修更换和备件订购, 并未考虑系统寿命与性能之间的关系。

同时, 维修备件是装备维修保障的重要物质资源, 是影响维修保障效能的重要因素, 直接影响故障设备的及时修复。由于维修机构对 ATS 主要采用换件修理的方式, 导致维修器材的消耗数量大; 因此, 如何更好地解决维修备件的需求是 ATS 维修保障面临的长期而复杂的任务。对于不可修复维修器材而言, 维修备件满足率与是影响系统性能的重要参数, 提高维修备件满足率成为提高维修器材保障效能的重要途径^[5]。现阶段 ATS 备件筹措过程, 现实中基层维修部门只有数量有限可用的维修备件, 并且备件保障延误时间长, 常会出现维修过程中缺少维修备件, 维修备件满足率低的情况, 从而导致停机以致延误战机。

针对现有事后维修策略中设备维修、备件订购存在的维修周期长, 且没有考虑两者关联性的问题, 笔者以失效阈值为纽带将设备维修与订购联合考虑, 提出了一种基于状态监控的维修更换和备件订购策略, 建立了以失效限度为基础的测试系统机会维修模型, 减小中间不必要环节, 缩短了维修周期, 提高使用可用度, 保证了系统的持续安全运行。

1 基于状态监控的维修更换和订购策略

考虑到现有 ATS 维修、订购特点和不足, 如何将维修与订购进行统一考虑, 提高使用可用度, 保证系统的持续安全运行, 是目前急需解决的一个关键问题。同时, 设备维修和订购存在相互依存、相互推动的关系, 只有将维修更换和订购有机结合, 才能更好地保证系统的安全高效运行。基于上述分

析, 笔者以失效阈值为纽带, 提出了一种基于状态监控的维修更换和备件订购策略 (如图 1 所示), 主要包含数据采集、健康评估、视情更换决策、构建备件订购策略。

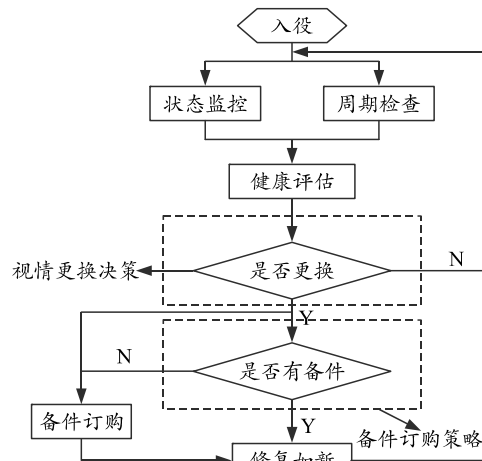


图 1 自动测试系统更换维修流程

1) 视情更换决策: 在该策略里, 当设备故障或者劣化水平达到预防性更换劣化阈值 x_p 时, 进行备件订购、预防性更换, 使基层储备较少备件。同时, 无论被更换的设备寿命长短, 更换行为都在预防的阈值点进行; 除此之外, 若设备出现故障也可能进行更换, 其单元的更换条件是发生故障或达到预定门限阈值, 两者取先发生的。

2) 构建备件订购策略: 针对包含多个相似、独立模块的自动化测试系统中不可修复的可更换单元或模块 (以下统称模块), 笔者提出了利用状态监控和健康评估的更换订购策略—— (s, x_p, S) 策略。其中: s 为备件再订购库存水平; S 为基层级备件最大库存; x_p 为系统中模块的需要预防更换状态阈值。应用 (s, x_p, S) 策略时, 根据监控和检查得到的模块健康状态决定是否更换相应的模块, 根据基层仓库中剩余维修备件的数量决定是否订购维修备件, 流程如图 1 所示。通过这种方法可以对基层使用单位备件器材的订购、管理、更换以及状态监控的周期进行优化处理, 保证战备完好性。

2 基于性能可靠性的模块劣化建模

2.1 性能可靠性

随着硬件、应用程序的不断发展和更新, 跟踪和监测关键模块的实时性变得可行。Lu Huitian 等^[6]提出了一种实时评估在线单元模块性能可靠性的方法, 该方法基于系统或组在当前工作的条件, 通过在线监测一个或多个物理量来评估系统的性能, 实

现物理性能预测。故障(失效)是根据超过给定性能标准 y_{CL} 的物理性能度量定义的, 根据性能测量的失效定义, 性能可靠性被定义为在指定的时间段或使用期间 Δt 小于(或大于) y_{CL} 的条件概率^[7]:

$$\Pr\{\text{failure}\} = \Pr\{Y_t \geq y_{CL}\} = \int_{y_{CL}}^{\infty} f_t(y_t) dy_t \quad (1)$$

其中: y_{CL} 是一个固定的标量, 称为失效阈值(表示系统故障某个物理性能的适当值); Y_t 代表系统的劣化水平, Y_t 值越大, 表明系统劣化越严重。

由式(1)可知: 性能可靠性是一种条件概率, 表示根据当前或最近的性能信息, 判断模块在下一个时间段内正常运行的概率。性能的变化通常会提供关于可能出现故障的线索。性能可靠性概念将可靠性与实际性能联系起来。性能随时间或使用而变化, 可从当前与最近的性能数据中提取可靠性特征^[8]。该模型实施时, 使用在线测量传感器提供性能数据, 而不是传统记录故障次数的寿命测试方法。

从性能可靠性的定义来看, 系统性能可靠性的预测显然是基于性能数据的预测。类比传统的可靠性理论, Lu Huitian 等^[6]给出了单元模块性能实时可靠性、累积失效概率、失效概率密度的定义:

性能可靠性定义:

$$R(x_n) = P\{x_f > x_n\} = 1 - P\{x_f \leq x_n\} \quad (2)$$

其中: x_n 为 t_n 时间模块的劣化水平; x_n 与劣化程度呈正相关; x_f 表示模块发生劣化失效。

累积失效概率定义:

$$F(x_n) = 1 - R(x_n) \quad (3)$$

失效概率密度定义:

$$f(x_n) = F'(x_n) = -R'(x_n) \quad (4)$$

2.2 模块劣化建模

基于 2.1 节性能可靠性的分析, 针对包含多模块的导弹自动化测试系统, 考虑到同一批次相同功能的不同模块发生故障时, 失效劣化水平不会完全相同, 但对单个模块而言, 其劣化失效是有规律的。

假设导弹自动化测试系统中某设备由 n 个独立的模块组成, 各个模块的劣化特征如下。

1) 对任意时间 t , 某模块的劣化水平由连续的随机变量 $X(t)$ 表示, 在一个寿命周期(从模块投入使用到被替换这一过程称为一个寿命周期)内 $X(t)$ 是单调增函数。初始时刻, 有 $X(0)=0$, 这时, 模块处于全新的初始状态, $X(t)$ 值与模块发生故障的可能性成正相关。

2) 故障发生时模块劣化水平 x_f 是不同的, 故劣化失效具有不确定性^[9]。由性能可靠性理论, 设定关于 x_f 的基于状态故障累积密度函数为 $F(x)$ 。 $F(x)$ 是统计独立的而且非负, 服从特定的概率分布^[10]。

3) 状态检查发生在离散的时间点 t_n 上, 以此确定模块的劣化程度。

通过上述分析可知: 对于单个模块而言, 其劣化失效是有规律的, 并可建立相关模型。笔者首先结合最小停机时间模型, 对自动测试系统视情更换决策进行研究; 其次, 结合 (S, s) 型策略, 对自动测试系统备件订购策略进行研究, 并给出基于状态监控的维修更换和备件订购策略。

3 构建视情更换决策

ATS 具有完善的状态监测功能, 依靠自检适配器和相应软件完成测试设备技术状态的判定。健康状态监控功能能够监控部件老化和性能退化, 进行状态监测, 采集、特征提取后的数据在此基础上进行超限判断预警, 将获得的数据与预定的失效判据进行对比, 来确定被监测模块的健康状态, 根据阈值判定是否提供报警为视情更换提供基础。

在基层修理分队对不可维修模块采用的维修工作有“故障后更换”和“预防更换”2 种更换, 认为更换后模块的劣化水平为零, 其中预防更换需要时间为 T_p , 故障后更换需要时间为 T_f , 由历史维修数据可知 $T_p < T_f$ 。

各个模块劣化水平可由专家系统通过 ATS 状态综合判定, 假设模块 ω 的劣化水平记为 x_ω , 厂家给出的模块劣化水平门限阈值为 x_f (劣化水平超过 x_f , 判定该模块失去工作能力)。在对模块进行状态检查之后, 根据备件的健康状况和模块 ω 的劣化水平进行维修更换和备件订购决策, 其中模块劣化水平的劣化阈值为 x_p 。在笔者给出的视情更换决策中, 为达到提前预测剩余寿命, 对模块进行提前订购, 以便于在模块失去工作能力之前, 完成对模块的更换, 理想情况下, 劣化阈值 x_p 与门限阈值为 x_f 应满足 $x_p < x_f$ 。

在实际应用中, 若监测发现 $x_p \leq x_\omega \leq x_f$, 系统报警。1) 库存中有可用备件, 则立即对模块 ω 进行预防更换; 2) 库存中没有备件可用, 让模块 ω 继续工作。在此状况下, 订购的备件一旦到达, 即使模块 ω 未造成停机, 仍在正常工作, 也应马上进行“更换”; 若订购的备件到达前, 原模块 ω 劣化阈值已经超过

x_f ，则当备件到达时立即对该模块进行“故障后更换”，则在备件等待时间不变的情况下，此模块的警示阈值设定偏大，需要调整。

同时，由于ATS对设备监测间隔期 x_ω 物理性能可能突变，存在 x_ω 突然升高的特殊情况，这是任何策略与方法都无法避免的；因此，若监测发现 $x_f \leq x_\omega$ ，系统报错，停机保护，等待维修更换。此外，若设备出现故障也可能进行更换。除 $x_f \leq x_\omega$ 、偶发故障2种特殊情况外，无论被更换的设备寿命长短，更换行为都在预防的阈值点 x_p 进行。

在这种策略里，当设备达到阈值 x_p 时，进行预防性更换。更换阈值 x_p 设置的优劣程度将直接影响策略实施的有效性，因此，该策略的核心是根据当前和历史性能数据，确定最优的劣化更换阈值 x_p ，使单位时间内的停机时间最小。借鉴Jardine等^[11]提出的依据时间规律的最小停机时间模型，笔者通过将时间规律改为依据劣化规律，给出一种基于依据劣化规律的最小停机时间模型。最小单位时间内停机时间的函数可以表示为：

$$D(x_n) = \frac{T_p R(x_n) + T_f [1 - R(x_n)]}{(t_n + T_p)R(x_n) + [\int_0^{x_n} x f(x) dx + T_f][1 - R(x_n)]} \quad (5)$$

其中：分子为一个周期内总预计停机时间，分母为预计周期长度； t_n 为检测到劣化水平 x_n 对应的时间点； T_f 为进行故障更换的时间； T_p 为进行预防性更换的时间。

根据可靠性试验，当最小单位时间 $D(x_n)$ 最小时， x_n 即为最优更换阈值 x_p 。

4 备件订购策略

由厂家的综合测试设备可靠性与维修性分析与评估报告和现有的ATS可靠性研究^[12]可知：工控机、UPS电源、示波器、直流电源等设备劣化过程较慢，可靠性高，更换可能性小，故不对其进行频繁的状态监控。若预防维修阈值 x_p 设定较小，就存在维修过度问题，模块中大部分元器件剩余使用寿命得不到很好的使用。若 s 设定很小，则增加了需要更换模块时备件缺少的可能性。要想提高设备使用可用度，保证系统的持续安全运行，需要平衡费用率和系统战备完好性(停机时间)2方面因素。但在ATS中，如何有效平衡费用率和系统战备完好性，缩短维修周期，提高设备使用可用度，目前所阅读文献中未见相关研究报道。

针对现阶段ATS备件筹措过程中备件准备过程

十分繁琐，造成备件准备时间长，从而导致系统故障后等备件的问题，考虑到基层级的器材仓库直接面向维修活动，其缺货将会造成自动测试设备维修活动的中止，甚至影响导弹的作战和训练任务^[13]，笔者引入采用精确的库存控制策略，给出一种基于 (S, s) 型的备件订购策略—— (s, x_p, S) 型策略。

为便于理论分析，库存中维修备件初始数目为最大库存 $S(S \in N^+)$ ，通过对库存中备件数量进行实时监控，获取备件再订购水平为 s (满足 $0 \leq s \leq S, s \in N^+$)。在 (s, x_p, S) 型策略中，如果库存中备件个数减少到 s ，部件劣化到达模块关于劣化水平的预防更换阈值 x_p ，则立即进行订购。

在任何一次更换之后，应根据 (s, x_p, S) 型备件订购策略决定是否继续订购备件。

假设模块故障数为 M ，单品备件库存为 s ，备件订购平均时间 T_{LT} ，其中 $T_{LT} \gg T_f > T_p$ 。

那么，当 $M \leq s$ 时，无需进行备件订购，即可完成故障设备的维修更换，因此2种方法完成的时间相同

$$D(x_n) = \frac{T_p R(x_n) + T_f [1 - R(x_n)]}{(t_n + T_p)R(x_n) + [\int_0^{x_n} x f(x) dx + T_f][1 - R(x_n)]} \quad (6)$$

当 $M > s$ 时，即库存无法保证对设备维修更换的支持，会产生备件保障延误时间 T_{LT} ，则2种策略的单位停机时间为：

$$D_{CM}(x_n) = \frac{T_f \times s + (T_f + T_{LT})(M - s)}{\left\{ (t_n + T_p)R(x_p) + [\int_0^{x_n} x f(x) dx + T_f + T_{LT}][1 - R(x_n)] \right\} M} \quad (7)$$

$$D(x_n) = \frac{\left\{ T_p R(x_n) + (T_f + T_{LT})[1 - R(x_n)] \right\} M}{\left\{ (t_n + T_p)R(x_n) + [\int_0^{x_n} x f(x) dx + T_f + T_{LT}][1 - R(x_n)] \right\} M} \quad (8)$$

定义 $\Delta D(x_n)$ 为2种维修策略的单位时间差

$$\Delta D(x_n) = D_{CM}(x_n) - D(x_n) \quad (9)$$

把式(8)和式(9)代入式(10)得

$$\Delta D(x_n) = \frac{[T_{LT} + T_f - T_p]R(x_n)M - T_{LT}s}{\left\{ (t_n + T_p)R(x_n) + [\int_0^{x_n} x f(x) dx + T_f + T_{LT}][1 - R(x_n)] \right\} M} \quad (10)$$

因为 $T_{LT} \gg T_f > T_p$ ，所以

$$\Delta D(x_n) = \frac{T_{LT}[R(x_n)M - s]}{\left\{ (t_n + T_p)R(x_n) + [\int_0^{x_n} x f(x) dx + T_f + T_{LT}][1 - R(x_n)] \right\} M} \quad (11)$$

结合式(11)与式(2)可知：随着 x_n 的减小，性能可靠性 $R(x_n)$ 逐渐增大， (s, x_p, S) 型策略与之前事后维修的停机时间差值逐渐增加；反之，随着 x_n 的增加，性能可靠性 $R(x_n)$ 逐渐减小， (s, x_p, S) 型策略与

之前事后维修的停机时间差值逐渐减小。

通过上述分析可知:与事后维修筹措流程相比, (s, x_p, S) 型策略能够对是否需要订购进行预测,选择提前订购,视情更换。这避免了库存量小于需求量时,事后维修策略中模块发生故障的备件等待时间问题,可以显著减少 ATS 的停机时间,保证战备完好性,更换下来的模块,修理后符合再次使用的,进行再利用。

5 策略应用分析

该自动化测试系统的某模块劣化水平 x 服从 $\gamma=1, \theta=900$ 伽马分布^[14]。在类比同类系统可知: $T_f=10$ h, $T_p=20$ h, $T_{LT}=500$ h, $x_f=300$, $s=2$, $S=3$, $M=5$ 。不同的劣化水平阈值 x_p 条件下,2 种更换订购策略单位停机时间如图 2 所示,由仿真结果可知:

1) (s, x_p, S) 型策略能够有效减少测试设备的停机时间。当劣化水平为 50 时,事后维修需要时间 3.348, (s, x_p, S) 型策略为 0.495 6,与事后维修相比, (s, x_p, S) 型策略所用时间降低与 85.20%。当劣化水平为 100 时,事后维修需要时间 1.949, (s, x_p, S) 型策略为 0.443 9,与事后维修相比, (s, x_p, S) 型策略所用时间降低与 77.22%。

2) 随着量化水平的增加, (s, x_p, S) 型策略减少测试设备的停机时间不断降低,但 (s, x_p, S) 型策略的停机时间始终小于事后维修的停机时间。

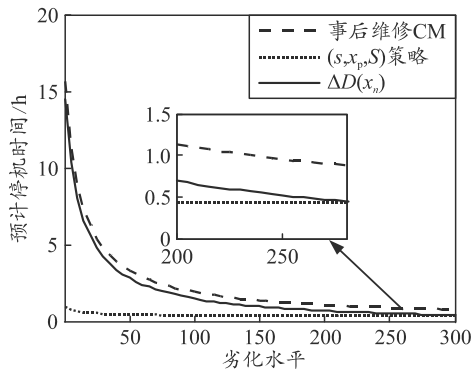


图 2 2 种维修策略单位停机时间比较

综上所述:仿真结果与理论分析一致,证明理论分析的正确性,表明 (s, x_p, S) 型策略能有效减少测试设备的停机时间,保证战备完好性。

6 结束语

针对海军导弹通用自动化测试系统事后维修策略存在维修周期长,且没有考虑两者关联性的问题,笔者提出一种基于状态监控的更换订购策略,根据

模块的劣化规律,确定维修更换和备件订购时机。理论分析和实例分析结果表明:该策略能够缩短维修周期,提高使用可用度,保证系统的持续安全运行。需要特别说明的是,由于该测试系统维修决策十分复杂,还有许多实际问题需要解决,如何回收更换下来的部件进行返厂再利用,进一步降低成本,如何根据设备之间的相互联系设定合理的更换订购阈值,是下一步将要重点关注研究的内容。

参考文献:

- [1] 秦红磊,路辉,郎荣玲.自动测试系统——硬件及软件技术: Automatic test system: hardware and software technology[M].北京:高等教育出版社,2007: 315-347.
- [2] 奚文骏,秦亮,冯玉光,等.基于FPGA的军用ATE信号发生模块设计[C]//全国测控计量仪器仪表学术年会.2007.
- [3] DOHI T, KAIO N, OSAKI S. On the optimal ordering policies in maintenance theory: survey and applications [J]. Applied Stochastic Models & Data Analysis, 1998, 14 (14): 309-321.
- [4] SHEU S H, GRIFFITH W S. Optimal age-replacement policy with age-dependent minimal-repair and random-leadtime[J]. 2001, 50(3): 302-309.
- [5] 聂成龙,张建荣.多品种维修器材库存决策优化技术[M].北京:国防工业出版社,2015: 1-2.
- [6] LU H T, WILLIAM J K, SUSAN S L. Real-time performance reliability prediction[J]. Reliability IEEE Transactions on, 2001, 50(4): 353-357.
- [7] LU S, LU H, KOLARIK W J. Multivariate performance reliability prediction in real-time[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 72(1): 39-45.
- [8] 白芳.民航发动机机群调度优化与视情维修决策方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [9] 黄建新,边亚琴.状态可靠性的装备视情维修决策分析[J].火力与指挥控制,2011,36(10): 134-137.
- [10] 肖磊.劣化系统维修决策建模与仿真方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008.
- [11] ELSAYED E A. Reliability Engineering[M]// Principles of Loads and Failure Mechanisms. Springer London, 2013: 509-517.
- [12] 陆琦.电气自动化控制设备可靠性测试研究[J].科技展望,2015(32): 375-375.
- [13] 张建荣,于永利,张柳,等.基于定周期策略的多品种维修器材联合订购模型[J].火力与指挥控制,2012, 37(9): 112-116.
- [14] NOORTWIJK J M V. A survey of the application of gamma processes in maintenance[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(1): 2-21.