

doi: 10.7690/bgzd.2014.04.004

基于 Gamma 过程的视情维修策略分析

邵松世¹, 樊强²

(1. 海军工程大学科研部, 武汉 430033; 2. 海军工程大学训练部, 武汉 430033)

摘要: 针对现有文献对视情维修的研究忽略了设备检测时间的问题, 建立一种基于 Gamma 过程的视情维修的解析模型。以维修费用为目标函数求解获得了设备的最优预防维修阈值和最优检测间隔, 对设备的劣化状态进行描述并对维修过程建模, 在该解析模型下, 通过大量的数值仿真, 分别比较分析了设备劣化状态变化特性以及维修能力对视情维修最优策略值选取的影响, 并获得了相应的结论。仿真算例证明了该方法的可行性, 可为维修方选取最优策略值提供一定的参考。

关键词: Gamma 过程; 视情维修; 劣化状态; 检测能力

中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

Research of Condition-Based Maintenance Strategy Based on Gamma Process

Shao Songshi¹, Fan Qiang²

(1. Department of Scientific & Research, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Department of Training, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For some product that the detect time can't be neglected, the analytical model of condition-based maintenance was built based on the Gamma process. The optimal preventive maintenance threshold and inspect time were decided through optimizing the maintenance cost. The simulation example was proposed based on the model. It analyzed the effect of the character of product deteriorating state and maintenance ability on the maintenance strategy. Some relevant conclusions were obtained. The simulation example shows that the method is feasible and can serve as the guidance for maintenance strategy.

Keywords: Gamma process; condition-based maintenance; deteriorating state; inspect ability

0 引言

视情维修是指利用检测技术掌握设备的劣化状态, 并以此为基础对其失效的可能性进行评估, 从而采取相应的维修形式。由于视情维修针对性强, 可以较为有效地利用设备的工作寿命, 加之各种检测技术(如传感技术)的发展, 使对劣化状态的检测容易实现等原因, 视情维修近年来逐渐得到了人们广泛的关注和应用。

对于视情维修而言, 其研究内容主要包括 2 个方面: 一是考虑设备劣化状态为离散的情况, 人们利用离散时间马尔可夫过程及相关理论进行处理并应用于桥梁劣化建模^[1-2]等; 二是考虑设备劣化状态为连续的情况, 人们利用 Gamma 过程、比例风险模型等方法进行处理^[3-5]。尽管 Grall 在文献[3-4]中利用 Gamma 过程描述了单设备的视情维修过程, 但是其要求对设备进行不定期的检测。而不定期检测在设备实际使用过程中需要较大的人力和物力才能实现, 所以在工程实际中视情维修一般采用定期检测的方法; 因此, 较多学者以维修费用最低为目标, 建立了设备定期检测的视情维修模型^[6-7]。为

了方便求解以及建模, 上述文献一般忽略了检测时间或者失效时刻的影响, 即认为设备的检测不需要时间, 设备失效需要检测才能确定。上述研究成果虽然成功地解决了相应的视情维修问题, 但是实际中存在一类设备, 其检测时间往往不能忽略, 并且其一旦失效直接会停止工作, 不需要检测状态便可以确定。如绝缘体的老化问题, 一旦其发生失效, 会导致设备被击穿, 被迫停止工作。

为了解决检测时间不能忽略, 发生失效会导致停止工作的设备视情维修问题, 笔者利用 Gamma 过程描述了该类设备的连续劣化状态规律, 以维修费用最小为目标确定了设备的最优预防维修阈值和最优检测间隔。同时, 分析了劣化状态性质不同对视情维修策略值选取的影响, 并比较了不同维修能力下设备可用度和最优策略值的变化规律, 得出了相应的结论。

1 视情维修过程分析

1.1 劣化状态描述

Gamma 过程属于典型的独立增量过程, 由于其

收稿日期: 2013-12-19; 修回日期: 2014-01-07

作者简介: 邵松世(1979—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事海军装备保障研究。

能较好地反映状态随时间变化的性质并刻画了设备的失效机理，被广泛应用于维修建模和可靠性研究中。文献[8]便证明了利用 Gamma 过程对设备的劣化状态建模时，其最优预防维修阈值的存在性。由此可见，Gamma 过程适用于描述设备的劣化过程。

根据设备劣化失效的定义：设备的劣化状态会随时间推移而逐渐增加，当其超过某阈值时，设备便为失效。如判断汽车发动机失效的一个标准便是油箱内汽油中金属颗粒的含量。当金属颗粒含量较高时，说明发动机金属部件摩擦较为严重，可能会导致发动机无法正常工作。此时，劣化状态表现为金属颗粒的含量。由于视情维修强调设备劣化状态的掌握，笔者利用 Gamma 过程将其性质描述如下：

1) 任意时刻 t 的劣化状态记为 $X(t)$ ，其为连续变量。特别地，当 $t=0$ 时， $X(0)=0$ ，即设备初始状态为全新。随时间推移，设备的劣化状态 $X(t)$ 逐渐增加，发生失效的可能性也随之增大。当 $X(t_s) \geq L_s$ 时，设备即为失效， t_s 为失效时刻， L_s 为失效阈值（通常根据经验或者历史信息预先给出）。

2) 对于 $t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n, t_i \in (0, \infty), 1 \leq i \leq n$ ，劣化状态增量 $X(t_2) - X(t_1), \dots, X(t_n) - X(t_{n-1})$ 互相独立。

3) 对于任意 $\tau \in (0, \infty)$ ，劣化状态增量 $X(t+\tau) - X(t)$ 的分布只依赖于 τ 且服从 $Ga(a\tau, b)$ ，即

$$g(x, \tau) = \frac{b^{a\tau}}{\Gamma(a\tau)} x^{a\tau-1} e^{-bx}, x \geq 0$$

其中 (a, b) 为参数。为了方便书写，记 $G(X, t)$ 为参数 (a, b) 的 Gamma 分布的累积密度函数。

1.2 维修过程建模

在实际工程中，设备的劣化状态需要通过定期检测来获得。虽然频繁的检测利于劣化状态的掌握，但是会造成检测费用过高，设备停机检测总时间较长，工作时间降低等不利影响。而过长的检测间隔不利于劣化状态的检测，可能会导致设备发生失效。同时，通常情况下，采取视情维修策略的设备一旦发生失效会造成十分恶劣的影响，是人们所不希望。如飞机的发动机，一旦其停止工作会带来很大的人员伤亡。为了避免设备失效，通常在设备劣化状态达到某阈值（称为预防维修阈值）时便开始对其进行预防性维修，以便使设备处于全新状态。过低的预防维修阈值虽然会降低设备失效的可能性，但

是没有充分利用失效前的剩余寿命，造成了资源浪费。而过高的预防维修阈值又会增加设备失效的可能性，不利于避免其失效^[9]。综上所述，上述两因素直接影响着维修的效果。在确定视情维修的目标函数后，需要对上述两因素进行优化，以选取最优检测间隔 Δt 和最优预防维修阈值 L_p 。

在确定最优检测间隔 Δt 和最优预防维修阈值 L_p 后，设备视情维修过程中的决策规则可描述为：

1) 在离散的时间点 $i\Delta t, i=1, 2, 3, \dots$ 上对设备的劣化状态进行定期检测，并将相应的劣化状态记为 $X(i\Delta t)$ 。每次检测固定耗时为 t_1 ，费用为 c_1 。检测状态时设备停止工作，并且检测不影响当前劣化状态值以及变化规律。

2) 当检测到的劣化状态 $L_p \leq X(i\Delta t) < L_s$ 时，需要对设备进行预防性维修，其耗时为 t_2 ，费用为 c_2 。维修后设备的劣化状态“归零”，即“修复如新”；

3) 当劣化状态 $X(t) \geq L_s$ 时， t 为任意值，不一定等于离散时间点 $i\Delta t, i=1, 2, 3, \dots$ ，即设备失效不需要检测便可以直观获得。此时，需要对设备进行完全维修，其耗时为 t_3 ，费用为 c_3 。

4) 由于设备的劣化状态 $X(t)$ 越高，其维修的难度便越高，表现为维修时间应满足 $t_2 < t_3$ ，其消耗的财力也越多，表现为维修费用应满足 $c_2 < c_3$ 。由于检测状态不采取维修行为，其耗时 t_1 和费用 c_1 相比之下应为最低。综上，时间参数和维修费用分别满足下列关系： $t_1 < t_2 < t_3, c_1 < c_2 < c_3$ 。

5) 在设备开始交付使用后，其运营成本不仅包括维修费用，也包括因为检测、维修造成的停机所带来了停机损失费用。为方便研究，记设备单位时间停机造成的停机损失费用为 Δc 。通常，设备的运营成本是人们关心的重要指标之一，因此笔者确定目标函数为在无限使用期下设备的平均成本最低。

结合上述描述，可以将设备的视情维修过程通过图 1 直观地表示出来。

图 1(a) 表示设备因为定期检测到的劣化状态满足 $L_p \leq X(i\Delta t) < L_s$ ，进行了预防性维修，使设备状态恢复如新，即 $X(i\Delta t + t_2) = 0$ ；图 1(b) 表示因为劣化状态 $X(t) \geq L_s$ ，设备失效停止工作，进行了事后维修，使设备状态恢复如新，即 $X(t + t_3) = 0$ 。由于每次维修后，设备的劣化状态都“归零”，可以将设备从初始状态经过视情维修过程恢复到全新状态所用

时间记为一个使用周期，记为 T 。考虑到使用周期内包含了对设备的检测和维修时间，在检测和维修过程中，设备需要停止工作；因此，使用周期 T 不等于传统上的工作周期，它反映的是设备交付使用后的整体情况。

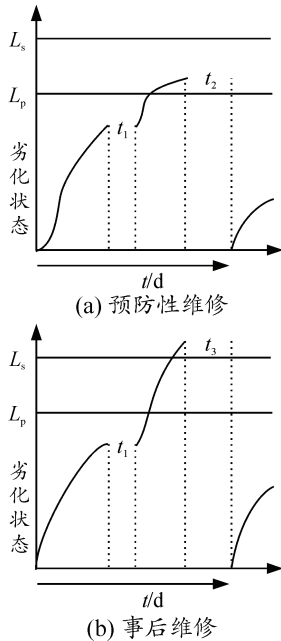


图 1 设备维修示意图

当一个使用周期结束时，劣化状态发生了更新，可认为周期结束时刻为更新点。若设设备在更新点（即周期结束时）需要支付本周期内所有的费用（包括检测、维修和停机损失费用），则可将随时间变化的费用看为是更新报酬过程。记设备任意时刻 t 的成本为 $C(t)$ ，期望平均成本为 M_c ，根据基本更新定理^[10]确定无限使用期下设备的期望成本应满足：

$$M_c = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{E(C(T))}{E(T)}$$

上式表明：长时间运行后求得的期望平均成本，等于 1 个周期内得到的期望成本 $E(C(T))$ 除以 1 个周期的期望时间 $E(T)$ 。

为了求解目标函数，需要确定 1 个周期内得到的期望成本 $E(C(T))$ 和 1 个周期的期望时间 $E(T)$ 的值。根据前文分析，维修费用主要由检测费用 c_1 ，预防维修费用 c_2 和事后维修费用 c_3 产生。而停机损失费用主要与检测和维修造成的停机时间有关。由此可确定 $E(C(T))$ 应满足下式：

$$E(C(T)) = c_1 E(N_i) + c_2 P_p + c_3 P_s + \Delta c (E(N_i)t_1 + P_p t_2 + P_s t_3)$$

其中： $E(N_i)$ 表示设备使用周期内检测次数的期望值； P_p 表示设备使用周期内需要预防性维修的概率； P_s 表示设备使用周期内需要事后维修的概率（也为停止工作的概率）。

对于使用周期的期望时间，主要由周期内检测次数和劣化状态的变化规律确定，从检测次数方面， $E(T)$ 应满足下式：

$$E(T) = E(E(T | N_i)) = \sum_{i=0}^{\infty} E(T | N_i = i) P(N_i = i)$$

综上所述，确定目标函数为：

$$\min M_c = \min \frac{c_1 E(N_i) + c_2 P_p + c_3 P_s}{\sum_{i=0}^{\infty} E(T | N_i = i) P(N_i = i)} \quad (1)$$

2 视情维修的解析模型

为了确定出视情维修过程中的最优检测间隔 Δt 和最优预防维修阈值 L_p ，笔者建立了数学解析模型，并给出了相应的求解方法。

2.1 设备失效时刻 t_s 的计算

根据 1.1 节的分析，结合劣化状态的变化规律，笔者给出了设备失效时刻的确定方法。

在不考虑检测的情况下，当设备劣化状态超过失效阈值 L_s 时，设备便会失效停止工作。显然，设备停止工作时刻和失效时刻为同一时刻，统一记为 t_s 。因为劣化状态增量服从 Gamma 分布，所以 t_s 应满足如下关系式：

$$F_s(t) = P(t_s \leq t) = \Pr\{X(t) \geq L_s\} = F(L_s, t) = 1 - G(L_s, t) \quad (2)$$

2.2 期望成本 $E(C(T))$ 的计算

首先确定设备使用周期内的期望检测次数：

$$E(N_i) = \sum_{i=1}^{\infty} i P(N_i = i) \quad (3)$$

对于设备任意一个使用周期而言，其检测次数的多少与劣化状态值有关。当检测到劣化状态满足 $\{L_p \leq X(i\Delta t) < L_s\}$ 时，设备进行预防性维修导致使用周期结束，本次检测是该使用周期内最后 1 次检测。由于劣化状态的增量服从 Gamma 分布，则：

$$P(N_i = i) = \Pr\{X((i-1)\Delta t) < L_p, L_p \leq X(i\Delta t) < L_s\} = \Pr\{X((i-1)\Delta t) < L_p, L_p - X((i-1)\Delta t) \leq X(i\Delta t) - X((i-1)\Delta t) < L_s - X((i-1)\Delta t)\} = G(L_s, i\Delta t) - G(L_p, i\Delta t) - \int_{L_p}^{L_s} g(\theta, (i-1)\Delta t) G(L_s - \theta, \Delta t) d\theta \quad (4)$$

当设备失效停止工作时，需要进行事后维修导致使用周期结束，那么失效前一次的检测为该使用周期内最后一次检测。注意到，即使失效时刻恰好为定期检测时刻，由于设备停止工作直观地反映了劣化状态超出失效阈值这一事件，所以不需要检测，失效前一次的检测仍为该使用周期内最后一次检测。那么：

$$P'(N = i) = \Pr\{i\Delta t < t_s \leq (i+1)\Delta t\} = \Pr\{X(i\Delta t) < L_p\} \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} dF(L_s, t) = G(L_p, i\Delta t) \{F(L_s, (i+1)\Delta t) - F(L_s, i\Delta t)\} \quad (5)$$

同理，可以确定使用周期内需要预防性维修的概率为

$$P_p = \sum_{i=1}^{\infty} \Pr\{X((i-1)\Delta t) < L_p, L_p \leq X(i\Delta t) < L_s\} \quad (6)$$

使用周期内需要事后维修的概率为

$$P_s = \sum_{i=0}^{\infty} \Pr\{i\Delta t < t_s \leq (i+1)\Delta t\} \quad (7)$$

综上所述，利用式 (3)~式 (7) 便可以确定期望成本 $E(C(T))$ 的具体值。

2.3 期望时间 $E(T)$ 的计算

结合 1.2 节的分析，对于使用周期内的期望时间 $E(T)$ ，可以分 2 种情况考虑。一种情况是由于预防性维修而导致寿命周期结束，其期望时间满足下式：

$$E'(T) = \sum_{i=1}^{\infty} E(T | N_i = i) P(N_i = i) = \sum_{i=1}^{\infty} [i(\Delta t + t_1) + t_2] P(N_i = i) \quad (8)$$

另一种情况是由于事后维修而导致寿命周期结束，此时，由于设备失效不需要检测，其失效时刻 t_s 与失效前一次检测时刻有关，那么，其期望时间应满足下式：

$$E''(T) = E(t_s | t_s \leq \Delta t) + \sum_{i=1}^{\infty} E(T | N_i = i) P'(N_i = i) + \sum_{i=1}^{\infty} E(t_s - i\Delta t | i\Delta t < t_s \leq (i+1)\Delta t) = \int_0^{\Delta t} (t_s + t_3) dF(L_s, t_s) + \sum_{i=1}^{\infty} [i(\Delta t + t_1) + t_3] P'(N_i = i) + \sum_{i=1}^{\infty} \Pr\{X(i\Delta t) < L_p\} \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} (t_s - i\Delta t) dF(L_s, t_s) \quad (9)$$

综上所述，利用式 (8) 和式 (9) 便可以确定设备使用周期内期望时间 $E(T)$ 的具体值。

在确定期望成本 $E(C(T))$ 和期望时间 $E(T)$ 的解析表达式后，便可以利用成熟的优化算法^[11]对其目标函数式 (1) 进行迭代求解，从而确定视情维修的最优策略值。

3 仿真分析

为了验证文中方法的可行性并分析视情维修策略的选取特性，笔者对以下数值模拟算例进行了重点研究。

3.1 劣化状态的影响

在已知维修能力的情况下，设备劣化状态增量的变化特性对视情维修策略的选取有一定的影响，比如对于单位时间内劣化状态增加幅度较大的设备而言，维修方需要降低预防维修阈值以避免设备出现失效。根据上文分析，任意时间间隔内的设备劣化增量服从 Gamma 分布，所以笔者从 Gamma 分布自身的性质特点开展了如下算例研究。

利用计算机对设备的视情维修过程进行数值模拟，模拟条件具体为：对设备进行检测和预防维修的费用分别为 $C_1=1\ 000$ 元、 $C_2=10\ 000$ 元，设备失效后的维修费用 $C_3=60\ 000$ 元；检测和预防维修所需时间分别为 $t_1=0.2$ d、 $t_2=4$ d，设备失效后恢复工作需要用时 $t_3=8$ d；失效阈值 $L_s=12$ 。设备单位时间停机损失费用 $\Delta c=100$ 元/d。任意间隔时间 τ 的劣化状态增量 $X(\tau)$ 服从 $Ga(a\tau, b)$ ，其中 $b=1$ ， a 值分别取 0.90, 1.00, 1.15 和 1.40。针对上述条件，以维修费用最低为目标利用优化算法求解出最优预防维修值 L_p ，最优检测间隔 Δt 和设备的可用度 A ，具体数值如表 1。

表 1 视情维修策略

序号	a	L_p	Δt	C	A
1	0.90	3.261 1	3.414 6	367.356 9	0.897 9
2	1.00	3.259 0	3.084 8	446.388 6	0.874 0
3	1.15	3.239 2	2.719 7	567.276 4	0.836 6
4	1.40	3.157 7	2.257 9	763.969 0	0.772 5

由上表可知，在维修能力相同的情况下，劣化状态增量变化性质不同的设备，其预防维修阈值 L_p 和检测间隔 Δt 有着较为明显的变化规律——随着 a 值的增加，预防维修阈值 L_p 和检测间隔 Δt 会随之下降。造成该现象的根本原因是 Gamma 分布的特性：在固定 b 值的情况下，随着 a 值的增大，其超过某

定值的概率会随之增加。对于视情维修而言，可以描述为在相同工作时间内，较大的 a 值会提高设备劣化状态达到失效阈值的可能性。图 2 反映了相同时间内不同 a 值下超过某劣化状态的概率值。以劣化状态超过 2 这个事件为例，在 $a=1.4$ 的情况下，其概率值为 0.23，而在 $a=0.90$ 的情况下，其概率值为 0.11。由于任意时间间隔内的劣化状态增量互相独立，所以随着时间的推移， a 值较大设备的劣化状态值超过失效阈值的可能性较大。那么，对于 a 值较大的设备，为了减少维修费用和降低设备发生失效的风险，可以选取较低的预防维修阈值 L_p 并降低检测间隔 Δt 。如表 1 第 4 组数据所示，相比第 1 组数据而言， a 值增大为 1.4，其预防维修阈值和检测间隔都有所下降。其中检测间隔下降较为明显，说明可以加大检测的频率来避免设备失效。这与直观规律相符，由此可见本文方法是可行的。

通过表 1 还可以发现，在维修能力相同的情况下，随着参数 a 值的增大，设备的最小维修费用会逐渐增大，可用度则会逐渐降低。对于维修费用而言，通常设备由失效恢复工作所需的费用要高于其他费用，导致了在相同工作时间内，失效概率较大的设备会产生高额的维修。同理，由于设备一旦发生失效，需要较长的时间才能恢复，那么失效概率较大的设备花费在维修上的时间就会较长，从而降低了设备的可用度。结合前文分析，尽管对于 a 值较大的设备采取了相应方式以避免其失效，但是设备的维修费用仍相对较高，并且其可用度相对较低。

综上所述，设备劣化状态的变化特性对视情维修最优策略值的选取有着重要影响，对于 a 值较大的设备应该引起使用方和维修方的重视，特别是对于一旦停止工作会造成重大人员伤亡的设备(如民航发动机)而言，需要加强劣化状态的检测力度。

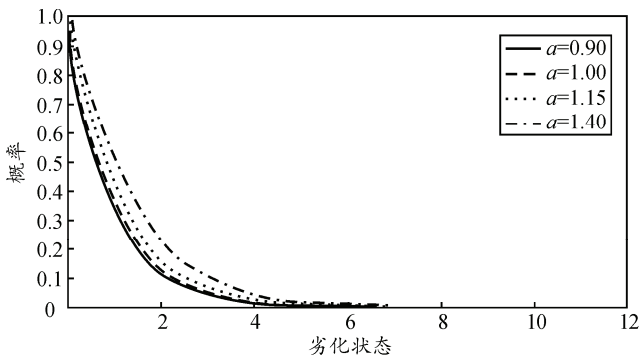


图 2 相同时间内劣化状态增量概率

3.2 检测能力的影响

视情维修需要通过通过对设备进行检测以掌握其劣

化状态的变化情况，从而采取相应的维修形式。在实际中存在着一类设备，其发生失效可能会导致较为严重的安全性事故，比如桥梁、民航发动机。该类设备通常为了避免失效会选取较低的预防性维修阈值，此刻，其视情维修策略主要由检测周期来确定。对于维修方而言，其检测周期受其检测能力的影响。如果维修方的检测耗时较短，即获取劣化状态相对容易，那么可以通过频繁检测来获取劣化状态，避免设备失效。为了分析检测耗时对视情维修策略选取的影响，笔者开展了如下算例研究。

假设某些设备失效后会引发严重的安全性事故，为了避免发生失效，规定劣化状态达到 L_p 必须进行预防性维修，那么可以认为最优预防性维修阈值 $L_p = L_p^*$ 。图 3 给出了以维修费用最小为目标，预防性维修阈值 L_p 固定，不同检测耗时 t_1 情况下的最优检测周期变化情况。维修参数和劣化参数分别为： $C_1=1\ 000$ 元、 $C_2=10\ 000$ 元、 $C_3=100\ 000$ 元、 $t_2=5$ d、 $t_3=15$ d、 $a=2$ 、 $b=1$ 和 $L_s=14$ 。图 3 中各最优检测周期 Δt 对应的费用如图 4 所示。图 3 和图 4 的结果表明，随着检测用时 t_1 的增加，设备的最小费用、可用度、最优预防维修阈值和最优检测间隔都随之下降。该现象可以通过式 (1) 进行解释。直观上来看，对同一类设备，要达到维修费用最小的目的，可以降低分子上设备使用周期内的期望维修费用或者提高分母上设备使用周期的期望时间来实现。如果维修方每次检测设备耗时较长，设备期望时间会随之增长，那么为了降低设备使用周期内的维修费用，可以降低预防维修阈值和缩短检测间隔。在实际维修过程中表现为多检测设备的劣化状态，尽量多地对设备进行预防性维修，从而降低使用周期内的期望平均维修费用。图 4 恰恰描述上述现象，随着检测耗时的增加， L_p 和 Δt 都随之下降。可是遗憾的是，由于每次检测耗时较长，造成了设备一定时间不工作，影响了设备使用周期内的工作时间，使其可用度下降。由此可见，在维修能力较弱(表现为检测耗时较长)的情况下，不仅需要考虑设备的维修费用最低，也应该适当考虑设备可用度的约束。

以 $t_1 = 1$ 天为例，在不考虑可用度约束的情况下，其最小费用 $C = 401.32$ 元/d，可用度 $A = 0.78$ ，最优预防性维修阈值 $L_s = 3.224$ 和最优检测间隔 $\Delta t = 2.976$ d。如果考虑可用度 $A \geq 0.80$ ，则其最小费用上升为 417.77 元/d，最优预防性维修阈值

$L_s = 3.622$ 和最优检测间隔 $\Delta t = 3.449$ d。对比发现，后者的最优策略值均有所上升，说明通过延长设备预防维修前的使用时间和适当降低检测的频率，增加了使用周期内的工作时间，从而提高了设备的可用度。由此可见，检测耗时对设备的可用度指标影响较大，较长的检测耗时会降低设备的工作时间，造成不利的影

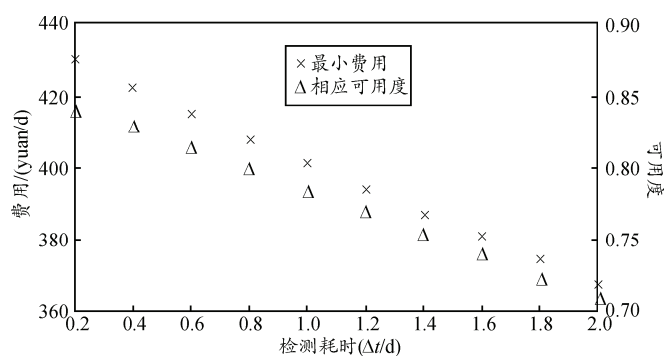


图3 不同检测耗时下的最小费用和相应可用度的对比

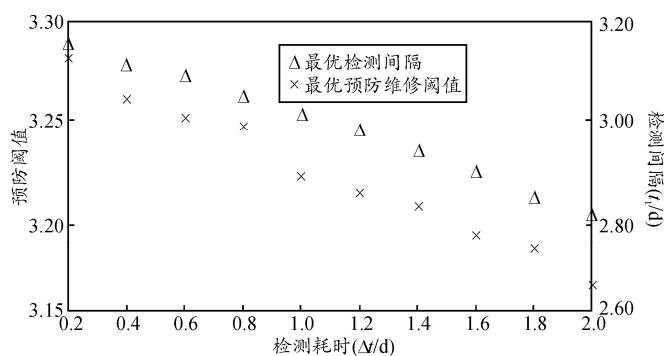


图4 不同检测耗时下最优预防维修阈值和检测间隔对比

对于维修方而言，提高设备预防性维修和事后维修能力所增加的物力和人力可能较多，相比之下，随着检测技术的发展，降低检测耗时比较容易实现。通过本节分析，为了提高设备的可用度，可以考虑从检测方面着手进行改进。同时，在维修方维修能力较为有限的情况下，需要满足一定的可用度要求，不应只一味追求低维修费用。

4 结束语

对于检测时间不能忽略以及设备失效不需要检测可以直观表现出来的设备，笔者研究了其视情维修策略。通过利用 Gamma 过程，笔者建立了视情维修的解析模型，通过求解获得了设备的最优预防

维修阈值和最优检测间隔，并分别比较分析了设备劣化状态变化特性以及维修能力对视情维修最优策略值选取的影响。结果表明：

1) 对于劣化状态变化较快的设备，维修方需要加强检测的力度，包括提高检测的频率和尽快采取预防性维修；

2) 为了提高设备的可用度，维修方可以采用提高检测能力(降低耗时)的方式来实现。

参考文献：

- [1] Wang W B. An inspection model based on a three-stage failure process[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(7): 838-848.
- [2] Zhao X J, Mitra F, Christophe B, et al. Condition-based inspection/replacement policies for non-monotone deteriorating systems with environmental covariates[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(8): 921-934.
- [3] Castanier B, Grall A, Berenguer C. A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 87(1): 109-120.
- [4] Grall A, Berenguer C, Dicuile L. A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76(2): 167-180.
- [5] Ming M Y, Li H G, Meng G. Control-limit preventive maintenance policies for components subject to imperfect preventive maintenance and variable operational conditions[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(5): 590-598.
- [6] 徐廷学, 张公学, 孙臣良. 基于 RCM 的导弹装备最佳预防性维修周期决策[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 21-24.
- [7] 王凌. 维修决策模型和方法的理论与应用研究[D]. 浙江大学, 2007: 30-33.
- [8] Park, K. S. Optimal continuous-wear limit replacement under periodic inspections[J]. IEEE Transaction on Reliability, 1988, 37(1): 97-102.
- [9] 吴芳德, 张奔奔, 胥芳. 基于正反馈主动移频式孤岛检测算法的模糊优化[J]. 机电工程, 2013, 30(2): 223-227.
- [10] 林元烈. 应用随机过程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 64-66.
- [11] 高鹏, 孙德翔, 邢国平, 等. 基于遗传算法优化支持向量机的航空装备维修费用预测[J]. 兵工自动化, 2011, 30(9): 24-27.