

二维产品二维成组更换间隔期优化研究

韩玉成, 宋文渊, 白永生, 李欣玥

(军械工程学院 装备指挥与管理系, 石家庄 050003)

摘要: 对于故障受日历时间与使用时间共同影响的二维产品, 传统的只按照单一时间变量开展的预防性维修已不能满足二维产品的实际维修保障需求, 鉴于此, 针对二维产品的特点, 提出了二维预防性维修的策略, 以日历时间与使用时间对二维产品进行二维预防性维修决策; 首先建立了二维产品故障率函数表达式, 然后对二维成组更换的过程进行具体的分析, 在有限使用条件下分别从经济性的角度与任务性的角度建立二维成组更换的费用模型与可用度模型; 根据所建模型, 结合实例, 采用了费效分析中的费效比准则来优化二维成组更换间隔期, 通过对比分析验证了该模型的适用性与有效性, 证明了二维成组更换策略要优于传统的成组更换策略, 最后对二维预防性维修提出了展望。

关键词: 二维产品; 二维成组更换; 数学模型; 维修间隔期

An Optimization Research on Preventive Maintenance Interval of Two-Dimensional Product

Han Yucheng, Song Wenyuan, Bai Yongsheng, Li Xinyue

(Department of Equipment Command and Management, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: For the failures of two-dimensional product affected by the calendar time and usage time, traditional one-dimensional preventive maintenance can't meet the actual maintenance demand of two-dimensional product, therefore, according to the features of two-dimensional product, preventive maintenance strategy for two-dimensional product is proposed, this paper makes decision for two-dimensional product through calendar time and usage time. First we establish failure rate function expression of two-dimensional product and analyze the process of two-dimensional preventive maintenance in detail, after propose a cost model and availability model from the view of economy and mission in finite span. According to the cost and availability model, through examples, we derive the optimal two-dimensional age-replacement interval by cost-effectiveness analysis, and verify the model's applicability and the validity through contrast and analysis, verify that two-dimensional block-replacement strategy is better than traditional block-replacement strategy, the last we give a brief discussion of future research area about two-dimensional maintenance.

Keywords: two-dimensional product; two-dimensional block-replacement; math model; maintenance interval

0 引言

由于经济的快速发展与社会的不断进步, 产品的复杂性越来越高, 性能越来越先进, 很多复杂产品的寿命受产品的日历时间、使用时间等因素的共同影响。过久的使用时间或过高的使用强度将加速产品部件的退化、增加产品的故障强度。陈相臣^[1]将故障受日历时间与使用时间共同影响的产品称之为二维产品, 其中使用时间可以是打印机的打印张数, 汽车的行驶里程, 飞机的起降次数等, 对此类产品进行预防性维修时, 要结合实际的使用情况, 确定反映使用情况的使用间隔期。比如说家用汽车的维护保养, 多采用日历时间与行驶里程的二维约束, 通常间隔期为半年或者一万公里, 在消费者正常的使用情况下, 无论哪个期限先到, 就进行相应的维护保养。

关于二维产品维修的研究最初来源于产品的二维保修领域, 目前关于二维保修的研究主要是关于二维保修策略以及二维保修成本的优化研究。Nat Jack^[2]讨论了一种最优策略, 使

得在产品二维保修期内的保修成本最低。Mahmood Shafiee 和 Stefanka^[3]为二手产品制定了一种全新的二维保修策略, 并通过数学模型分析了二手产品的二维保修成本。N. Jack^[4], S. Varnosafaderani^[5], T. Chen^[6], 等也都对二维保修期内发生故障后的维修策略进行了优化。可以发现大部分二维保修的文献都是针对故障后维修的情况, 在二维保修期内采用预防性维修的策略相对较少。

预防性维修是为预防产品故障或故障的严重后果, 使其保持在规定状态所进行的全部活动^[7]。预防性维修作为一种计划性维修的方式在各个领域中都有着广泛的应用, 其可以有效地避免故障的发生, 并可以大大降低故障所造成的损失。在二维产品保修中也有一些文献考虑到预防性维修, Yeu-Shiang Huang^[8]使用了二维故障率中双因素变量的方法, 针对于可修的产品, 在二维保修期限内建立了定期预防性维修费用模型, 最终对保修策略进行了优化研究。K Shahanaghi^[9]在二维保修期下, 采用定期不完全预防性维修的策略, 建立了关于费用的模型, 以费用最小为决策目标, 对预防性维修的次数以及维修程度进行了优化; Hu^[10]考虑了二维预防性维修的问题, 提出了一个以日历时间与使用时间同时进行备件更换的二维预防性维修策略, 最终对备件需求量进行了优化求解。

收稿日期: 2015-08-31; 修回日期: 2015-10-13。

基金项目: 国家自然科学基金(71401173)。

作者简介: 韩玉成(1990-), 男, 辽宁大连人, 工学硕士研究生, 主要从事维修保障理论与技术方向的研究。

通过以上综述可以发现,二维产品保修是在二维的“时间”约束下(即二维保修期内)开展一系列的维修策略优化研究,维修策略优化的时间变量都是单维的日历时间,很少有文章考虑到二维预防性维修的问题。二维预防性维修是针对二维产品而言,同时以两个度量指标(如日历时间与使用时间)对产品开展的一系列预防性维修活动,即使有文献[10]考虑到二维预防性维修的问题,也都是假设维修间隔期是已知的,而在实施预防性维修的过程中,维修间隔期的确定是维修决策中的重要一环。所以针对可以准确获取到日历时间与使用时间的二维产品,结合产品的实际维修需求,以费用与可用度为优化目标,对产品的二维预防性维修间隔期进行优化研究具有重要的现实意义。

因此,本文结合二维产品的维修实际,从二维产品预防性维修的角度出发,对二维产品采取二维成组更换策略,研究二维产品在有限使用期下二维成组更换间隔期的确定问题。

1 系统描述

1.1 模型描述

本节主要针对寿命受日历时间 T 与使用时间 U 双重影响的二维产品,对产品中使用量较大的一些部件采取二维成组更换策略,这种策略表示每到规定成组更换间隔期 (T_0, U_0) 就进行预防性更换,在成组更换间隔期内出现故障进行故障后维修,所有维修皆为修复如新,即使有个别产品或部件在更换间隔期内发生故障更换过,到指定的二维预防性维修间隔期 (T_0, U_0) 也一起更换,在有限使用条件下分别从经济性的角度与任务性的角度建立相应的费用模型与可用度模型,然后采用费效分析的方法,权衡费用与可用度的综合影响,确定最优的二维成组更换间隔期。

1.2 模型假设

- 1) 产品的寿命具有日历时间和使用时间两个度量指标;
- 2) 产品是不可修的,故障率是递增的 (Increasing Failure Rate);
- 3) 对于给定的用户来说,其使用率 r 是长期恒定不变的,不同的用户使用率不同,对于批次产品来说,使用率是随机变量,用 $G(r)$ 表示;
- 4) 为了更精确地建立模型,考虑维修时间的影响,修复性维修时间 T_f 大于预防性维修时间 T_p ,预防性维修间隔期大于 T_f ,且维修时间都是固定的;
- 5) 产品按照时间间隔 (T_0, U_0) 进行预防性维修,对于产品来说,其日历时间与使用时间二者有其一达到 T_0 或者 U_0 则开展预防性维修;
- 6) 故障后立即进行更换,忽略故障反应时间。

1.3 模型参数

- (T_0, U_0) : 二维成组更换间隔期, T_0 表示日历时间间隔期, U_0 表示使用时间间隔期;
- T_f : 故障维修平均时间;
- T_p : 预防性维修平均时间;
- C_d : 停机造成的单位时间损失;
- C_{fr} : 故障维修的平均费用;
- C_{pr} : 预防性维修的平均费用;
- C_f : 故障维修总费用, $C_f = C_{fr} + C_d T_f$;

C_p : 预防性维修总费用, $C_p = C_{pr} + C_d T_p$;

R : 产品的使用率;

$G(r), g(r)$: 产品使用率的分布函数与概率密度函数;

r_l, r_u, r_0 : 分别表示批次产品中最低的使用率、最高的使用率以及二维间隔期 U_0 与 T_0 的比;

$\lambda(t | r)$: 产品在使用率为 r 时的故障率函数;

$F(t | r)$: 产品在使用率为 r 时的累计故障分布函数;

T_w : 产品的使用期限;

$C(T_0, t)$: 在间隔期为 T_0 的预防性维修策略下, $[0, t]$ 时间内的期望维修费用;

$\text{int} \left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)} \right]$: 产品在 $[0, T_w]$ 内进行预防性维修的次数;

$EC_f(T_0)$: 一个以 T_0 为预防性维修间隔期内故障费用的期望值;

$ET_f(T_0)$: 一个以 T_0 为预防性维修间隔期内故障引起停机时间的期望值;

$C(T_w, T_0, U_0)$: 在二维预防性维修间隔期为 (T_0, U_0) 时,有限使用期 T_w 内,产品的期望总维修费用。

$A(T_w, T_0, U_0)$: 在二维预防性维修间隔期为 (T_0, U_0) 时,有限使用期 T_w 内,产品的平均可用度。

2 模型建立

在本章,对有限使用期下的二维产品开展二维成组更换预防性维修,维修间隔期为 (T_0, U_0) 。首先需要给出二维产品的故障率函数表达式,然后进行具体维修过程分析,根据分析的结果建立与之对应的费用表达式与可用度表达式。

2.1 二维故障率模型

在二维产品维修领域中,共有3种不同的二维故障率表示方法,分别是双因素变量法、复合尺度法与使用率法。其中使用率法的应用最为广泛,该方法中,让 $T(t)$ 与 $U(t)$ 分别表示产品的日历时间、使用时间与广义时间 t 的函数,在使用率方法中,假设 $U(t) = R * T(t)$,两者为线性关系,其中 R 为非负的系数, R 表示每单位时间的使用情况,即使用率,由于本文假设产品的使用率为随机变量,不同的消费者对产品的使用率不变,且同一消费者的使用率保持长期恒定不变,同时 R 服从一定的分布, $G(r) = P(R \leq r)$,根据实际使用消费者的不同, R 服从不同的分布。

产品的故障是一个点过程,通过故障率函数进行建模,根据泊松过程,产品在使用率为 r 时的故障率函数可以表示为:

$$\lambda(t | r) = \varphi(T(t), U(t)) \quad (1)$$

式中, $\varphi(T(t), U(t))$ 是关于 $T(t)$ 与 $U(t)$ 的增函数,这表示产品的故障率是日历时间与使用时间的增函数。Iskandar and Murthy^[11]给出了如下的故障率函数公式:

$$\lambda(t | r) = \theta_0 + \theta_1 r + \theta_2 T(t) + \theta_3 U(t) \quad (2)$$

Moskowitz and Chun^[12]考虑了以下的特殊形式:

$$\lambda(t | r) = \theta_0 + \theta_1 r + \theta_2 T(t) + \theta_3 U(t) + \theta_4 T^2(t) + \theta_5 T(t)U(t) \quad (3)$$

Iskandar and Murthy^[13]与 Yun and Kang^[14]同时采用了下面的形式:

$$\lambda(t | r) = \theta_0 + \theta_1 r + \theta_2 T(t)^2 + \theta_3 U(t)T(t) \quad (4)$$

本文在算例分析一章也采用公式(4)的形式,由于本文

假设 $T(t) = t, U(t) = rt$ ，所以最终的故障率函数表达式为：

$$\lambda(t | r) = \theta_0 + \theta_1 r + (\theta_2 + \theta_3 r)t^2 \quad (5)$$

对于传统的故障率而言，故障率只是关于变量 t 的增函数，但是对于二维故障率来说，其是关于时间变量 t 与使用率变量 r 的增函数。通过式 (5) 我们无法直观地看到故障率与两个变量之间的最终关系，当时间变量的单位取年，使用率变量单位取万公里时，结合文献 [13] 中所给的参数，假设参数取 $\theta_0 = 0.1, \theta_1 = 0.2, \theta_2 = 0.3, \theta_3 = 0.3$ 时，二维故障率函数图像如图 1 所示。

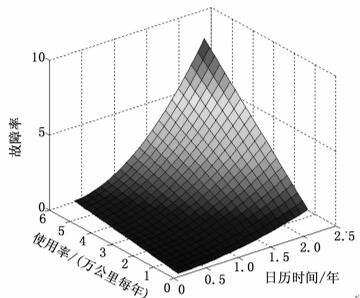


图 1 二维故障率函数图像

由图 1 可以发现二维故障率函数是关于变量 t 和 r 的增函数，当使用率 r 一定时，故障率随着日历时间 t 的增加而增加；同样的，当日历时间 t 一定时，故障率随着使用率 r 的增加而增加，证明了该故障率函数形式与实际是相符的。

2.2 费用模型

由于本文研究的是有限使用期下的二维成组更换模型，其中建模的方法与过程与无限使用期费用模型类似，不同在于建模的机理，无限使用期是建立单位时间平均费用模型，有限使用期是建立产品在使用期限内的总费用模型。在有限使用期内对产品进行二维成组更换，如图 2 所示。

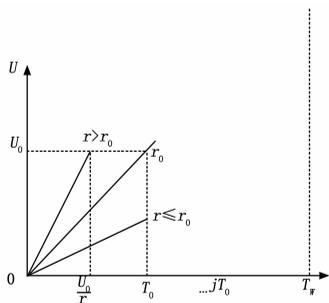


图 2 二维成组更换周期图

本文要确定最优的一组 (T_0, U_0) 使产品在有限时间 T_w 内总维修费用最低，由于 r 在不同的情况下，对应的预防性更换间隔期不尽相同，此时分为两种情况 (1) $r \leq r_0$ ，(2) $r > r_0$ ，分别进行讨论。

当 $r \leq r_0$ 时，如图 2 所示，定期预防性维修时间为 T_0 ，在产品的寿命周期 T_w 内，产品在使用率为 r 时的期望费用

$$C_1 = n_1 * [EC_f(T_0) + C_p] + C[T_0, T_w - n_1(T_0 + T_p)] \quad (6)$$

式中， n_1 表示在寿命周期 T_w 内开展预防性的次数， $n_1 = \text{int}\left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)}\right]$ ， $EC_f(T_0)$ 表示一个完整的预防性维修周期中

故障费用的期望值， $C[T_0, T_w - n_1(T_0 + T_p)]$ 表示 $[n_1(T_0 + T_p), T_w]$ 时间内故障维修费用的期望值。

在一个完整的预防性维修周期中，产品的故障费用期望值包括，故障后维修费用与停机的损失费用，

$$EC_f(T_0) = C_f * EN_b(T_0) + \int_{T_0 - T_f}^{T_0} (T_0 - t) * C_d dF(t | r) \quad (7)$$

$EN_b(T_0)$ 表示在 $[0, T_0]$ 内产品的期望故障次数，根据更新过程与更新定理^[15]

$$EN_b(T_0) = \int_0^{T_0 - T_f} [1 + EN_b(T_0 - T_f - t)] dF(t | r) \quad (8)$$

产品在 $[n_1(T_0 + T_p), T_w]$ 内的费用组成只有故障后维修的费用，所以

$$C[T_0, T_w - n_1(T_0 + T_p)] = C_f * EN_b \left\{ T_w - \text{int}\left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)}\right] * (T_0 + T_p) \right\} \quad (9)$$

所以最终当 $r \leq r_0$ 时，在使用率为 r 时的期望费用

$$C_1 = \left\{ C_p + C_f * \int_0^{T_0 - T_f} [1 + EN_b(T_0 - T_f - t)] dF(t | r) \right\} + \int_{T_0 - T_f}^{T_0} (T_0 - t) * C_d dF(t | r) * \text{int}\left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)}\right] + C_f * EN_b \left\{ T_w - \text{int}\left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)}\right] * (T_0 + T_p) \right\} \quad (10)$$

当 $r > r_0$ 时，如图 2 所示，定期预防性维修时间为 $\frac{U_0}{r}$ ，

在产品的寿命周期 T_w 内，产品在使用率为 r 时期望费用

$$C_2 = n_2 * \left[EC_f\left(\frac{U_0}{r}\right) + C_p \right] + C\left[\frac{U_0}{r}, T_w - n_2 * \left(\frac{U_0}{r} + T_p\right)\right] \quad (11)$$

式中， n_2 表示在寿命周期 T_w 内开展预防性的次数， $n_2 = \text{int}\left[\frac{T_w}{\left(\frac{U_0}{r} + T_p\right)}\right]$ ， $EC_f\left(\frac{U_0}{r}\right)$ 表示一个完整的预防性维修周期中故障费用的期望值，表示 $\left[n_2\left(\frac{U_0}{r} + T_p\right), T_w\right]$ 时间内故障维修费用的期望值。

具体的维修过程与 $r \leq r_0$ 的情况类似，只需将 T_0 变为 $\frac{U_0}{r}$

即可，所以最终当 $r > r_0$ 时，在使用率为 r 时期望费用最终表达式为：

$$C_2 = \left\{ C_p + C_f * \int_0^{\frac{U_0}{r} - T_f} [1 + EN_b\left(\frac{U_0}{r} - T_f - t\right)] dF(t | r) \right\} + \int_{\frac{U_0}{r} - T_f}^{\frac{U_0}{r}} \left(\frac{U_0}{r} - t\right) * C_d dF(t | r) * \text{int}\left[\frac{T_w}{\left(\frac{U_0}{r} + T_p\right)}\right] + C_f * EN_b \left\{ T_w - \text{int}\left[\frac{T_w}{\left(\frac{U_0}{r} + T_p\right)}\right] * \left(\frac{U_0}{r} + T_p\right) \right\} \quad (12)$$

以上费用模型的表达式都是在 r 一定的情况下所建立的，由于 r 服从一定的分布 $G(r)$ ，本文假设产品的使用期限为 T_w ，费用模型的目标是要寻找最优的一组 (T_0, U_0) ，使得在使用期限 T_w 内产品的总费用的期望值最小，即 $\min C(T_w, T_0, U_0)$ 。

此时在使用期限 T_w 内产品的期望平均费用

$$\begin{aligned}
 C(T_w, T_0, U_0) &= \int_{r_l}^{r_0} C_1 dG(r) + \int_{r_0}^{r_u} C_2 dG(r) = \\
 &\int_{r_l}^{r_0} \left(\{C_p + C_f * \int_0^{T_0 - T_f} [1 + EN_b(T_0 - T_f - t) dF(t | r)] + \right. \\
 &\left. \int_{T_0 - T_f}^{T_0} (T_0 - t) * C_d dF(t | r) \right) * \text{int} \left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)} \right] + \\
 &C_f * EN_b \left\{ T_w - \text{int} \left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)} \right] * (T_0 + T_p) \right\} dG(r) + \\
 &\int_{r_0}^{r_u} \left(\{C_p + C_f * \int_0^{U_0/r - T_f} [1 + EN_b \left(\frac{U_0}{r} - T_f - t \right) dF(t | r)] + \right. \\
 &\left. \int_{U_0/r - T_f}^{U_0/r} \left(\frac{U_0}{r} - t \right) * C_d dF(t | r) \right) * \text{int} \left[\frac{T_w}{\left(\frac{U_0}{r} + T_p \right)} \right] + \\
 &C_f * EN_b \left\{ T_w - \text{int} \left[\frac{T_w}{\left(\frac{U_0}{r} + T_p \right)} \right] * \left(\frac{U_0}{r} + T_p \right) \right\} dG(r) \quad (13)
 \end{aligned}$$

2.3 可用度模型

与费用模型类似, 可用度模型在建立的过程中也需要分为 $r \leq r_0$ 与 $r > r_0$ 两种情况分别进行建模分析。

在二维预防性维修中, 可用度可以表示为:

$$A(T_w, T_0, U_0) = \frac{\text{使用期限} - \text{期望停机时间}}{\text{使用期限}} \quad (14)$$

当 $r \leq r_0$ 时, 与费用模型相同, 定期预防性维修时间为 T_0 , 在产品的寿命周期 T_w 内, 产品在使用率为 r 时期望停机时间:

$$D_1 = n_1 * [ET_f(T_0) + T_p] + D[T_0, T_w - n_1(T_0 + T_p)] \quad (15)$$

式中, n_1 表示在寿命周期 T_w 内开展预防性的次数, $n_1 = \text{int} \left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)} \right]$, $ET_f(T_0)$ 表示一个完整的预防性维修周期中因故障停机时间的期望值, $D[T_0, T_w - n_1(T_0 + T_p)]$ 表示 $[n_1(T_0 + T_p), T_w]$ 时间内故障维修时间的期望值。

停机时间的公式与平均费用模型的公式极其相似, 只需将 T_f, T_p 代替 C_f, C_p 即可, 相应的故障停机时间表达式如下,

$$ET_f(T_0) = T_f * EN_b(T_0) + \int_{T_0 - T_f}^{T_0} (T_0 - t) dF(t | r) \quad (16)$$

$$D[T_0, T_w - n_1(T_0 + T_p)] = T_f *$$

$$EN_b \left\{ T_w - \text{int} \left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)} \right] * (T_0 + T_p) \right\} \quad (17)$$

所以最终当 $r \leq r_0$ 时, 在使用率为 r 时期望停机时间

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \{T_p + T_f * \int_0^{T_0 - T_f} [1 + EN_b(T_0 - T_f - t) dF(t | r)] + \\
 &\int_{T_0 - T_f}^{T_0} (T_0 - t) dF(t | r) \} * \text{int} \left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)} \right] + \\
 &T_f * EN_b \left\{ T_w - \text{int} \left[\frac{T_w}{(T_0 + T_p)} \right] * (T_0 + T_p) \right\} \quad (18)
 \end{aligned}$$

当 $r > r_0$ 时, 同样的, 与 $r > r_0$ 时的费用模型相似, 定期预防性维修时间为 $\frac{U_0}{r}$, 只需将 T_f, T_p 代替 C_f, C_p 即可, 所以最终当 $r > r_0$ 时, 在使用率为 r 时期望停机时间

$$D_2 = \{T_p + T_f * \int_0^{U_0/r - T_f} [1 + EN_b \left(\frac{U_0}{r_0} - T_f - t \right) dF(t | r)] +$$

$$\int_{U_0/r - T_f}^{U_0/r} \left(\frac{U_0}{r} - t \right) dF(t | r) \} * \text{int} \left[\frac{T_w}{\left(\frac{U_0}{r} + T_p \right)} \right] + \\
 T_f * EN_b \left\{ T_w - \text{int} \left[\frac{T_w}{\left(\frac{U_0}{r} + T_p \right)} \right] * \left(\frac{U_0}{r} + T_p \right) \right\} \quad (19)$$

综合以上两种情况, 在使用率 r 的分布函数为 $G(r)$ 时, 可以得到产品在使用期限 T_w 内期望平均可用度为:

$$\begin{aligned}
 A(T_w, T_0, U_0) &= \int_{r_l}^{r_0} \frac{(T_w - D_1)}{T_w} dG(r) + \int_{r_0}^{r_u} \frac{(T_w - D_2)}{T_w} \\
 dG(r) &= \int_{r_l}^{r_0} (T_w - \{T_p + T_f * \int_0^{T_0 - T_f} [1 + EN_b(T_0 - T_f - t) \\
 dF(t | r)] + \int_{T_0 - T_f}^{T_0} (T_0 - t) dF(t | r) \} * \text{int}[T_w / (T_0 + T_p)] - \\
 T_f * EN_b \{ T_w - \text{int}[T_w / (T_0 + T_p)] * (T_0 + T_p) \} / T_w) \\
 dG(r) + \int_{r_0}^{r_u} (T_w - \{T_p + T_f * \int_0^{U_0/r - T_f} [1 + EN_b(U_0/r - \\
 T_f - t) dF(t | r)] + \int_{U_0/r - T_f}^{U_0/r} (U_0/r - t) dF(t | r) \} * \text{int} \\
 [T_w / (U_0/r + T_p)] - T_f * EN_b \{ T_w - \text{int}[T_w / (U_0/r + T_p)] * \\
 (U_0/r + T_p) \} / T_w) dG(r) \quad (20)
 \end{aligned}$$

2.4 模型解析

由于模型的表述过于复杂, 无法用函数的方法对其直接求解, 本文采用数值算法, 通过 Matlab 软件对所建模型进行求解, 根据产品的故障特点选取 T_0 与 U_0 的适当取值范围, 选取 T_0 与 U_0 适当的步长, 生成有限组 (T_0, U_0) , 将生成的每组 (T_0, U_0) 代入到编好的模型程序中。这里需要强调的是, 在计算期望故障次数 $EN_b(T)$ 时采用了递归编程的方式, 而递归过程中的步长最小为 1, 步长表示的是时间, 在故障率函数表达式中时间的单位为年, 如果步长的单位取年, 在计算过程中会产生很大误差, 故递归过程中的步长单位取天, 这就需要对二维故障率函数的参数进行重新设定。故障率函数中的时间变量单位取天, 使用率变量单位取公里每天, 在案例分析一节中会有所体现, 之后通过 Matlab 进行迭代计算, 分别计算每组 (T_0, U_0) 所对应费用与可用度的值。

如果单从费用的角度处理问题, 则维修费用越少越好; 如果单从可用度的角度看问题, 则可用度越高越好; 而产品的维修费用和可用度是一对相互制约的矛盾体, 只强调费用最优或者可用度最优不一定会达到整体最优, 只有控制费用并同时保证可用度才是科学的方法。为此, 本文采用单位时间费效比函数 V , 来综合权衡保修费用和可用度, 对模型进行费效比分析, 从而得到最优的二维成组更换间隔期。费效比函数表达式如下:

$$V = \frac{C(T_w, T_0, U_0)}{A(T_w, T_0, U_0)} \quad (21)$$

将式 (13) 与式 (20) 代入到式 (21) 可以得到最终的费效比函数表达式, 将生成的每一组 (T_0, U_0) 代入到式 (21) 中, 以费效比的值为二维成组更换间隔期优化的判定标准, 费效比 V 最小时所对应的一组 (T_0, U_0) 即为最优二维成组更换间隔期。

3 案例分析

3.1 问题描述

在对某部队的某型按批投入使用的轮式装备进行调研时发

现, 该装备中的轮胎只是按照传统的方式进行修复性维修, 修复性维修费用很高, 且停机时间很长, 生产停工及维修造成的损失也较大, 该装备的使用具有日历时间与使用时间(行驶里程)两个测量维度, 而且发现使用率高的装备轮胎出现的故障更为频繁, 严重地影响到部队的正常训练。假设该装备轮胎的故障函数表达式形式为 $\lambda(t|r) = \theta_0 + \theta_1 r + (\theta_2 + \theta_3 r)t^2$, 在实际调研中了解到均匀分布与威布尔分布是使用率 r 最为常见的分布形式, 为了便于比较, 假设两种分布具有相同的上下限, 最高使用率 r_u 为 105 公里每天, 最低使用率 r_l 为 5 公里每天, 其他参数的具体设置如下表所示,

表 1 参数设置

参数	设定值
C_{fr}, C_{pr}	1000 元、600 元
C_d	200 元/每天
T_f, T_p	10 天、2 天
T_w	1000 天
使用率上下限	$r_l = 5$ 公里每天, $r_u = 105$ 公里每天
威布尔分布参数	尺度参数 $\alpha = 40$, 形状参数 $\beta = 2$
故障率函数参数	$\theta_0 = \frac{3}{365000000}, \theta_1 = \frac{3}{365000000},$ $\theta_2 = \frac{6}{365000000}, \theta_3 = \frac{9}{365000000}$

同样地, 对该装备的轮胎采取二维成组更换预防性维修方式, 将所有参数代入到费用模型、可用度模型以及费效比模型中, 得到与之相应的费用、可用度以及费效比函数表达式。

3.2 求解计算

运用 Matlab 工具软件, 根据装备的故障特点选取 T_0 与 U_0 的适当取值范围, T_0 在 $[1, 500]$ 内取值, 对应的步长取 1 天, U_0 在 $[50, 25\ 000]$ 内取值, 步长取 50 km, 生成 250 000 组 (T_0, U_0) , 通过 Matlab 进行迭代计算, 分别计算每组 (T_0, U_0) 所对应费用值、可用度值与费效比的值。分别绘制使用率服从不同分布下的二维成组更换费用模型三维图、二维成组更换可用度模型三维图与费效比三维图, 如图 3~图 8 所示, 根据计算的结果求出最小费效比对应的二维成组更换间隔期; 同时, 为了比较二维成组更换与传统的一维成组更换的关系, 绘出图 9, 根据数值计算的结果, 列表表 2, 为了比较以不同约束目标下费用、可用度与费效比值之间的关系, 列表表 3。

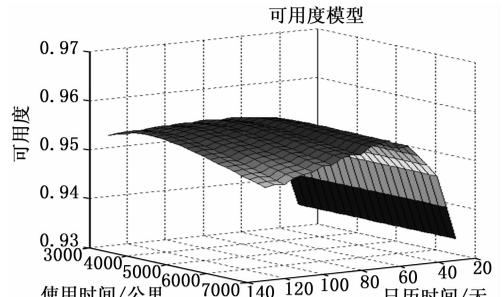


图 4 使用率服从均匀分布可用度三维图

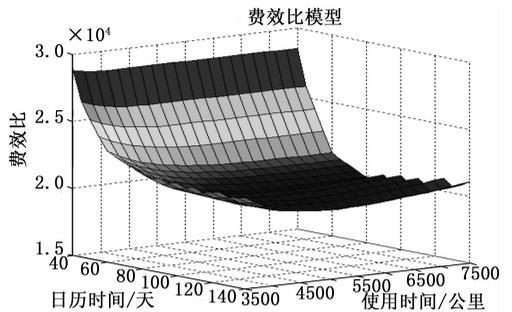


图 5 使用率服从均匀分布费效比三维图

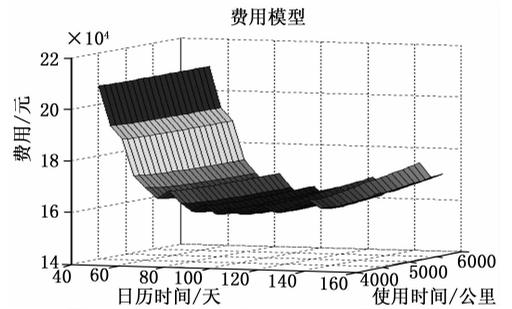


图 6 使用率服从威布尔分布费用三维图

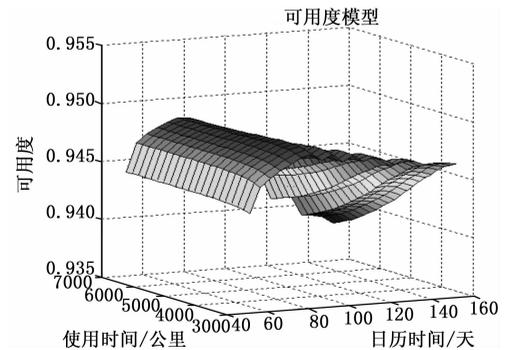


图 7 使用率服从威布尔分布可用度三维图

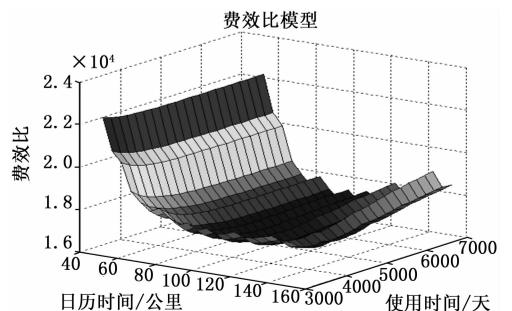


图 8 使用率服从威布尔分布费效比三维图

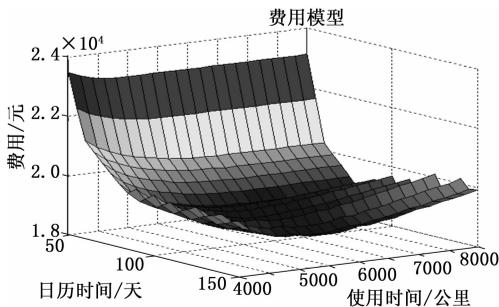


图 3 使用率服从均匀分布费用三维图

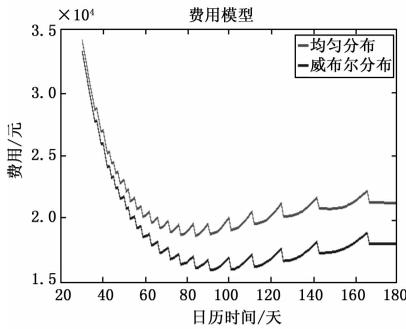


图 9 一维费用模型 (只以日历时间进行预防性维修)

表 2 有限使用期不同分布下不同维修方式对应的费效比最优值

	均匀分布最优间隔期	最低费效比值	威布尔分布最优间隔期	最低费效比值
无预防性维修	无	25 936	无	21 287
一维成组更换 (间隔期为 CT)	84 天	19 814	77 天	17 125
一维成组更换 (间隔期为 UT)	5 100 km	20 899	3 600 km	17 948
二维成组更换	(91 天, 6200 km)	19492	(101 天, 5100 km)	16 809

注:CT 表示日历时间,单位为天;UT 为使用时间,单位为公里,费用单位为元/每天。

表 3 有限使用期不同分布下不同约束目标对应的各指标最优值

	均匀分布			威布尔分布		
	以费用为优化目标	以可用度为优化目标	以费效比为优化目标	以费用为优化目标	以可用度为优化目标	以费效比为优化目标
最优间隔期	(85 天, 6 200km)	(75 天, 4 800km)	(91 天, 6 200km)	(98 天, 5 100km)	(82 天, 4 000km)	(101 天, 5 100km)
费用	18 589	19 604	18 598	15 903	16 953	15 915
可用度	0.9533	0.9561	0.9541	0.9455	0.9487	0.9468
费效比	19 500	20 504	19 492	16 820	17 870	16 809

3.3 结果分析

通过图 3、图 4、图 6 及图 7 可知,不同的优化目标会优化出不同的最优二维成组更换间隔期,以费用为优化目标时,使用率服从均匀分布时最优的二维成组更换间隔期为 (85 天, 6 200 公里),威布尔分布的最优二维成组更换间隔期为 (98 天, 5 100 公里);以可用度为优化目标时,均匀分布下最优的二维成组更换间隔期为 (75 天, 4 800 公里),威布尔分布为 (82 天, 4 000 公里);

由于本节给定的优化目标为费效比最低,通过图 5、图 8 可知,以费效比为优化目标时,同样存在极值点,意味着同样能优化出最优的二维成组更换间隔期,经过计算可得,以费效比为优化目标时,均匀分布下最优的二维成组更换间隔期为 (91 天, 6 200 公里),对应的最低费效比为 19 492;威布尔分布下最优的二维成组更换间隔期为 (101 天, 5 100 公里),对应的最低费效比为 16 809。

通过图 3~图 8 亦能发现,在有限使用期下进行间隔期优化研究的图像不是平滑的,图像整体是呈起伏趋势,通过图 9 可以找到原因,在只以日历时间进行成组更换时,图中有明显的跳跃点,这些跳跃点是由于不同的更换间隔期引起的,所以在最终的三维图像中会出现不平滑的现象。

通过表 2 可知,按照传统的方法同样可以给出有限使用期下最优的一维成组更换间隔期,通过对比可以发现,二维成组更换间隔期要明显优于一维成组更换间隔期,而在不采用任何预防性维修措施的情况下,使用率服从均匀分布下总维修费用高达 25 936 元,使用率服从威布尔分布下总维修费用高达 21 287 元,由此可以证明二维成组更换预防性维修策略更为科学、更为合理。

通过图 3~图 8,以及表 3 对比可知,以不同的约束条件为优化目标会得到不同的二维成组更换间隔期,加粗部分为不同优化目标下对应的最优值,以费效比为优化目标时,可以发现费用与可用度的值都不是最优的,但是费效比的值是最小的,证明整体最优不一定个体就是最优的。

4 结束语

针对故障受日历时间与使用时间双重影响的二维产品,提出了二维预防性维修的策略,从经济性与任务性的角度,分别建立了有限使用情况下二维成组更换费用模型与可用度模型,采用了费效分析中的费效比准则来优化二维成组更换间隔期。通过实例对比分析,进一步验证了该模型的有效性与适用性。二维预防性维修是一个较新的概念,本文只是进行了初步的探讨,研究还比较有限,下一步可以针对更为复杂的产品,采用更通用的二维故障函数表达式,选择不完全维修、最小维修以及改进维修等组合维修策略,进行二维预防性维修多目标优化的相关研究。

参考文献:

- [1] 陈相臣. 基于不完全维修的二维产品保证成本研究 [D]. 杭州: 电子科技大学, 2010.
- [2] Jack N, Schouten F V D. Optimal repair-replace strategies for a warranted product [J]. Int. J. Production Economics 2000, 67 (1): 95-100.
- [3] Shafiee M, Chukova S. Two-dimensional warranty cost analysis for second-hand products [J]. Communications in Statistics—Theory and Method, 2011, 40 (4): 684-701.
- [4] Jack N, Iskandar B P, Murthy D N P. A repair-replace strategy based on usage rate for items sold with a two-dimensional warranty [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94: 611-617.
- [5] Varnosafaderani S, Chukova S. A two-dimensional warranty servicing strategy based on reduction in product failure intensity [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 63: 201-213.
- [6] Chen T, Popova E. Maintenance policies with two-dimensional warranty [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2002; 77 (1): 61-9.
- [7] 甘茂治, 康建设, 高崎, 等. 军用装备维修工程学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [8] Huang Y S, Gau W Y, Ho J W. Cost analysis of two-dimensional warranty for products with periodic preventive maintenance [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015 (134): 51-58.
- [9] Shahanaghi K, Noorossana R. Failure modeling and optimizing preventive maintenance strategy during two-dimensional extended warranty contracts [J]. Engineering Failure Analysis 28 (2013) 90-102.

1) 脉冲信号测试

实验结果如图 5 所示。

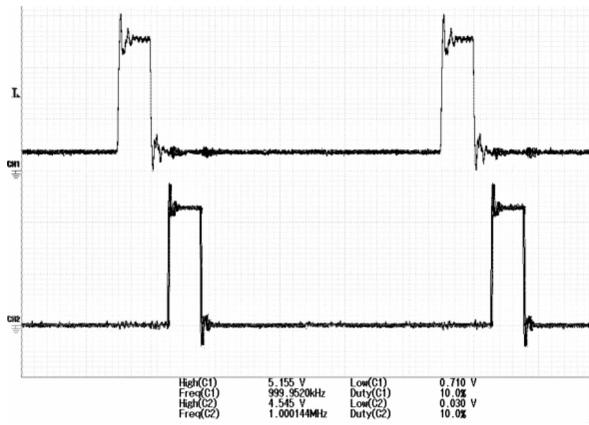


图 5 脉冲信号实验结果

在图 5 中,采集端输入 5 V 1MHz、脉冲宽度 100 ns、上升沿和下降沿均为 3 ns 的 TTL 脉冲信号,测得输出脉冲信号前后沿抖动小于 15 ns,上升沿和下降沿小于 5 ns,输入输出延时小于 180 ns。

2) 数字信号测试

实验结果如图 6 所示。

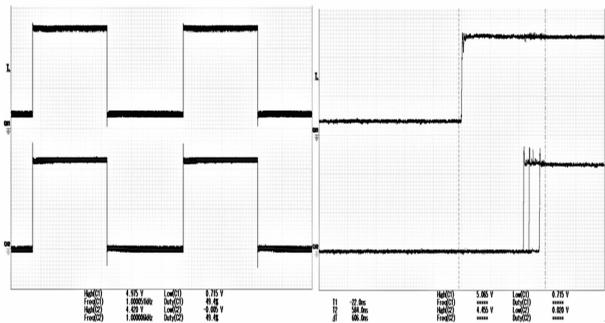


图 6 数字信号实验结果

在图 6 中,在信号采集端和数据处理控制端依次用信号发生器输入 16 路 5 V、1 kHz、占空比 50% 的数字信号,测得 16 路数字信号输出频率为 1 kHz、高电平约为 5 V,输入输出延时小于 700 ns。

3) 模拟信号测试

结果如图 7 所示。

在图 7 中,在信号采集端输入 0.5~4.5 V 的模拟信号,

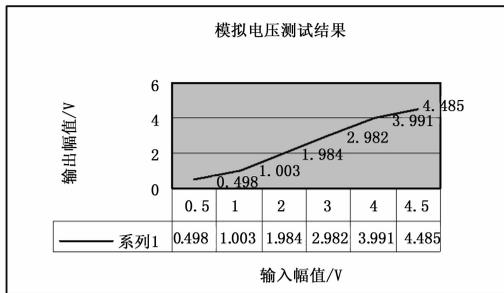


图 7 模拟电压测试结果

选取不同的测试点进行测试,由测试结果可知,在 0.5~4.5 V 的输入电压范围内,输出电压最大误差为 18 mV,精度不低于 0.6%。

4 结论

多路信号光纤传输系统基于单片机和 FPGA 联合开发技术,使用一根光纤实现了多路信号的双向传输,不仅实现了多路模拟与数字信号的采集和传输,还实现了高速脉冲信号和低速数字信号的传输,一方面减小了产品的体积,另一方面降低了产品成本,使用方便、便于工程维护。通过实验验证了多路信号光纤传输系统的正确性,其设计原理、硬件架构设计和程序设计为其他多路信号的采集、控制、传输提供了设计参考,具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 李亮,胡一梁,韩瑞珍.基于 FPGA 的数字光端机的设计 [J]. 中国有线电视,2008 (9): 955-957.

[2] 卢敏,张子墨.基于 FPGA 的 LVDS 光纤通讯系统的实现 [J]. 信息技术,2007,12 (12): 164-166.

[3] 蹇清平,余新平.一种新的多路数字信号光纤传输系统的设计与仿真 [J]. 长江大学学报(自然科学版)理工卷,2009 (3): 81-84.

[4] 来卫国.10 位 BLVDS 串化器 DS92LV1023 和解串器 DS92LV1224 的原理及应用 [J]. 国外电子元器件,2002 (8): 45-47.

[5] 季晓飞,迟泽英,游明俊,等.光纤双向传输系统中数字光端机的研制 [J]. 南京理工大学学报,2001,25 (2): 182-185.

[6] Johnson H, Graham M. High-speed digital design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 106-127.

[7] 孙坚.基于 GPIB 的光纤收发器的设计与实现 [J]. 数字技术与应用,2009 (12): 22-23.

[8] 郭玉彬,霍佳雨,靳江涛,等. LiNbO₃ 外调制器的 10Gbit/s 光纤传输系统 [J]. 光学精密工程,2007,15 (1): 22-26.

(上接第 221 页)

[10] Hu Q, Bai Y S, Zhao J M, et al. Modeling spare parts demands forecast under two-dimensional preventive maintenance policy [J]. Mathematical Problems in Engineering Volume 2015: 1-9.

[11] Iskandar B P, Murthy D N P. Repair-replace strategies for two-dimensional warranty policies [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2003, 38 (11): 1233-1241.

[12] Moskowitz H, Chun Y H. A poisson regression model for two-attribute warranty policies [J]. Naval Research Logistics (NRL), 1994, 41 (3): 355-376.

[13] Iskandar B P, Murthy D N P, Jack N. A new repair-replace strategy for items sold with a two-dimensional warranty, Computers & Operations Research 2005 (32): 669-682.

[14] Yun W Y, Kang K M. Imperfect repair policies under two-dimensional warranty. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, [J]. Journal of Risk and Reliability, 2007, 221 (4): 239-247.

[15] 贾希胜.以可靠性为中心的维修决策模型 [M]. 北京:国防工业出版社,2007.