

DOI:10.13196/j.cims.2014.05.shihui.1133.8.20140516

基于寿命预测的预防性维护维修策略

石 慧, 曾建潮

(太原科技大学 工业与系统工程研究所, 山西 太原 030024)

摘 要:针对退化分布函数难以估计的复杂系统,研究了剩余寿命预测及预防性维护维修最优决策问题,提出一种基于复杂系统剩余寿命有效预测的预防性维护维修策略。在系统退化状态分布函数未知的条件下,由已知的设备寿命分布函数预测其平均剩余寿命,以平均剩余寿命为阈值制定预防性维护维修策略。根据更新过程理论,建立了以系统的预测间隔、预防性维护阈值为优化变量和最小化平均维护维修费用为目标函数的优化模型。采用微粒群算法进行优化求解,得到系统最佳的预测周期和维护维修阈值,并使系统长期运行的平均费用率最低。分别以在翼寿命符合威布尔分布的民航发动机和寿命分布符合正态分布的航海设备电控罗经中的某型变压器为例,验证了所提维护维修策略的可行性。

关键词:剩余寿命;长期平均费用率;预防性维护维修;优化

中图分类号: TH163.5;TP277

文献标识码: A

Preventive maintenance strategy based on life prediction

SHI Hui, ZENG Jian-chao

(Institute of Industrial and System Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the inestimable complicate system of degradation distribution function, the optimal decision for remaining useful life prediction and preventive maintenance was proposed, and a preventive maintenance strategy was presented based on effective prediction of remaining life for complex system. Under the conditions of unknown degradation distribution function, the average remaining useful life of the known life distribution function was forecasted as the threshold to draft preventive maintenance strategies. According to the theory of renewal process, an optimization model with the system prediction interval and the threshold of preventive maintenance as the optimization variables and the minimum average maintenance cost as the target function was established. By using Particle Swarm Optimization (PSO), the optimal preventive cycle and maintenance threshold of system were obtained, and the long-run average cost rate was the lowest. The civil aeroengine operation of Weibull distribution and the transformer of electromagnet control gyrocompass in the navigation equipment of Normal distribution were taken as examples to verify the feasibility of proposed strategy.

Key words: remaining useful life; long-run average cost rate; preventive maintenance; optimization

0 引言

飞机、舰船、车辆、发电机组等机械装备的安全服役对国民经济建设具有重要意义。但这些机械装

备的工作条件复杂、环境恶劣,在长期运行过程中会逐渐退化,剩余寿命逐步下降,容易发生恶性事故。同时,许多系统零部件加工困难、制造周期长、价格昂贵、损坏后果严重。因此,为确保正常持续的生

收稿日期:2013-02-04;修订日期:2013-04-16。Received 04 Feb. 2013; accepted 16 Apr. 2013.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41272374)。**Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 41272374).

产,避免停产事故造成的损失,预防性的维护维修策略显得尤为重要。

现有的预防性维护维修主要包括基于时间的维护维修和基于状态的维护维修。基于时间的维护维修指根据给定的时间,定期对未失效的系统进行维护维修^[1-2],以减少系统在使用过程中出现故障的可能性,降低由系统失效造成的损失。在复杂系统寿命分布已知的条件下,大多采用定时维护维修策略。基于状态的维护维修是根据状态监测信息实施的预防性维修策略,发现设备有功能故障征兆时,进行有针对性的维护和维修。但是,许多基于状态维护维修方法均假设已知系统的退化状态分布函数,而在实际运行过程中由于历史运行数据不足,以及周围环境或负载发生变化,很难估计退化分布,或者估计成本过高。

与退化状态分布函数相比,寿命分布相对更容易估计。对于已经投入使用的设备,其生产厂家或维修部门可以在设备发生故障维修及运行维护过程中对同类部件的寿命进行统计,从而得到其寿命分布。另外,基于实时状态监测的故障预测与健康管理的目的也是估计系统的剩余寿命分布^[3]。因此,基于设备的寿命分布或剩余寿命分布研究其维护维修策略,具有非常重要的现实意义和应用价值。Si 等^[4]综述了目前寿命预测方面的一些工作;Jardine 等^[3]总结了寿命预测和预防维护两方面的主要研究内容,可以看出目前寿命预测和预防维护维修的研究比较独立,关于剩余寿命的研究大部分集中在寿命预测模型方面^[5],包括比例故障模型^[6]、非线性随机滤波模型^[7]、隐马尔科夫模型^[8]和模糊神经网络模型^[9-10]等预测方法,而由寿命预测结果制定相应的预防性维护维修策略的研究较少。Gebrael 等^[11]提出将基于贝叶斯理论的剩余寿命分布估计与预防性维护维修相结合,但假设退化函数为简单的线性函数,而一般复杂设备的退化过程通常是非线性的随机动态过程。樊东红等^[12]在文献^[11]的基础上考虑部件的退化函数为非线性函数时剩余寿命分布估计及维修策略,是根据已知退化状态的分布函数估计到达预防性退化状态阈值的时间。Qiu^[13]和 Yam^[14]等分别采用不同的方法预测剩余寿命,并根据预测到的剩余寿命估计设备的故障更换时间。Matthew^[15]等提出将基于扩展卡尔曼滤波的剩余寿命预测与维护维修策略相结合的方法,但其是在假设系统整个寿命周期始终为定值,且退

化分布函数已知的条件下求解。

本文假设在系统退化分布函数未知的条件下,已知设备的寿命分布函数,周期性地估计其平均剩余寿命,当其平均剩余寿命小于某一阈值时进行维护的维护维修策略。建立了以预测周期和平均剩余寿命阈值为优化变量、以最小化平均维护维修费用率为目标的优化模型。以寿命分布分别服从威布尔和正态分布的情况为例,采用微粒群算法对问题进行求解,验证了所提维护维修策略的正确性和有效性。

1 剩余寿命定义及剩余寿命预测

根据 GJB451-90,使用寿命就是从产品制造完成到出现不可修复的故障或不可接受的故障率时的寿命单位数,是随机变量,一般用 T 表示。寿命分布函数又称累积失效函数,也称累积故障概率,它被用来表示设备的不可靠度^[16],记为 $F(t)$,系统寿命可靠度为 $R(t)$ 。系统的剩余寿命定义为当前时刻至发生失效这段时间的长度, m 时刻的剩余寿命记为 T_m ,剩余寿命分布记为 $F_m(t)$,可靠度记为 $R_m(t)$,概率密度函数记为 $f_m(t)$,可知:

$$T_m = \{T - m | T > m\}; \quad (1)$$

$$R_m(t) = P(T_m > t) = P(T - m > t | T > m) = \frac{R(m+t)}{R(m)}, t \geq 0; \quad (2)$$

$$f_m(t) = -\frac{dR_m(t)}{dt}. \quad (3)$$

m 时刻剩余寿命的均值为

$$u(m) = E[T_m] = \int_0^\infty R_m(t) dt = \int_0^\infty \frac{R(m+t)}{R(m)} dt = \frac{1}{R(m)} \int_m^\infty R(t) dt \geq \int_m^\infty R(t) dt. \quad (4)$$

系统的平均寿命就是失效前的平均时间,即 T 的期望值 $E[T_0]$,

$$E[T_0] = \int_0^\infty R(t) dt = \int_0^m R(t) dt + \int_m^\infty R(t) dt \leq m + u(m). \quad (5)$$

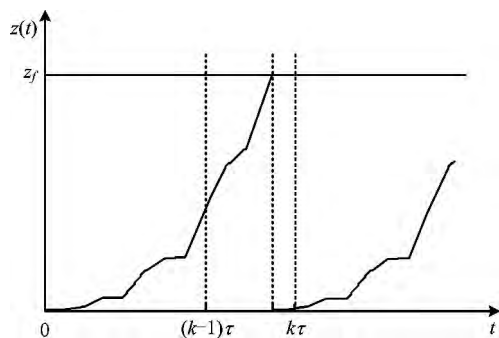
系统在运行过程中,受噪声干扰、检测误差和检测信息不完备等因素的影响,难以获取精确的退化状态。同时,由于系统的退化状态分布函数估计困难,很难基于退化状态进行维护维修。而在系统已知寿命分布的条件下,多采用基于设备平均寿命 $E[T_0]$ 的定时维护维修策略,由式(5)可知这样制定

的维修策略容易导致“过维修”或“欠维修”。因此,在退化状态分布函数未知、也无法获取系统的精确退化状态条件下,可根据在 m 时刻预测得到的平均剩余寿命 $u(m)$ 动态地调整预防性维护维修时间,制定更为科学的预防性维护维修策略,提高系统的可靠度。此外,与传统的周期性视情维修策略相比,预测代替了周期性的检查,以提高系统的经济性。

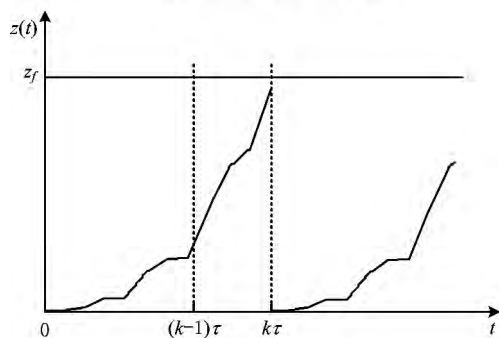
2 根据对系统健康状态的预测制定科学的维护维修决策

在已知寿命分布 $F(t)$ 的条件下,制定如下维护维修决策:

(1) 维修方式的选择 设备运行过程中,忽略外部环境因素对部件的影响,对设备采取预防性替换和故障后更新两种维修方式(如图1),其维修效果均为修复如新。图中: $z(t)$ 表示未知的退化状态, τ 表示设备寿命预测周期,设平均剩余寿命 u_0 为预防性维护阈值。在某一时刻 $k\tau$ ($k=0,1,\dots,N$),预测到其平均剩余寿命 $u(k\tau) < u_0$ 时,进行预防性替换活动;一旦系统在运行过程中发生故障,必须进行故障后更新。



a 故障后维修更新示意图



b 预防性维护替换示意图

图1 预防性维护替换示意图

(2) 维护费用的确定 预防性维护的费用为 C_p ,发生故障后的维修费用为 C_f ,通常假设 $C_p < C_f$,且维修时间很短,可忽略不计。

(3) 寿命周期的确定 系统开始工作后,会经历若干次预测、预防性维护维修和故障后的更换等。假设系统进行预防性替换或发生故障更新后重新回到开始工作状态均认为是 0 时刻,即前一寿命周期结束,进入下一个新的寿命周期。

为了达到维修优化的目标,对系统的预测与维修策略进行优化分析。假设系统在 $[0, t]$ 周期内运行所需的维护和维修费用为 $C(t)$,设备长期运行的平均费用率为 c_∞ 。由更新定理^[17]可知, c_∞ 可由寿命周期内的平均费用率求得^[18-21],

$$c_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{E[C(T)]}{E[T]}. \quad (6)$$

式中: $E[C(T)]$ 为设备寿命周期运行的平均费用, $E(T)$ 为设备平均寿命周期。设在寿命周期内,即在 $k\tau$ 时刻进行预防性维护的概率为 P_{pk} ,或系统在 $[(k-1)\tau, k\tau]$ 周期内突然出现故障的概率为 P_{fk} 。根据更新过程理论^[18]可知,系统第 N 次预防性维护的累加概率为 $\sum_{k=1}^N P_{fk}$,第 N 次故障后更换的累加概率为 $\sum_{k=1}^N P_{pk}$,系统产生的维修费用主要由预防性的替换或故障后的更新产生,可求得设备寿命周期运行的平均费用为

$$E[C(T)] = \sum_{k=1}^N [C_p P_{pk} + C_f P_{fk}]. \quad (7)$$

由于在使用过程中出现磨损、腐蚀或负载及其周围环境随时间变化等问题,系统性能逐渐退化,剩余寿命不断减少。系统性能退化过程一般为独立增量过程^[22],即对于任意时刻,退化增量是相互独立的随机变量。因此,不同时刻剩余寿命的增量也是独立的随机变量。 P_{pk} 可表示为

$$\begin{aligned} P_{pk} &= P\{0 < [u(k\tau)] \leq u_0 \mid u[(k-1)\tau] > u_0\} = \\ &= P\{0 < u(k\tau) \leq u_0\} = P\left\{\int_0^\infty t f_{k\tau}(t) dt \leq \right. \\ &\quad \left. \int_0^\infty u_0 f_{k\tau}(t) dt\right\} = P(t \leq u_0) = \\ &= 1 - P(t > u_0) = 1 - \frac{R(k\tau + u_0)}{R(k\tau)}. \end{aligned} \quad (8)$$

系统在 $[(k-1)\tau, k\tau]$ 周期内突然出现故障的概率

$$P_{fk} = P\{T \leq k\tau \mid T > (k-1)\tau\} =$$

$$\begin{aligned} \frac{P[(k-1)\tau < T \leq k\tau]}{P[T > (k-1)\tau]} &= \\ \frac{P[T > (k-1)\tau] - P[T > k\tau]}{P[T > (k-1)\tau]} &= \\ \frac{R[(k-1)\tau] - R(k\tau)}{R[(k-1)\tau]} &= 1 - \frac{R(k\tau)}{R[(k-1)\tau]}. \quad (9) \end{aligned}$$

将式(8)和式(9)代入式(7),可求得设备寿命周期运行的平均费用

$$\begin{aligned} E[C(T)] &= \sum_{k=1}^N \{C_p [1 - \frac{R(k\tau + u_0)}{R(k\tau)}] + \\ &C_f [1 - \frac{R(k\tau)}{R[(k-1)\tau]}]\}. \quad (10) \end{aligned}$$

由系统失效定义可知,在 $[(k-1)\tau, k\tau]$ 内某一时刻 t 突然发生故障的分布函数为

$$\begin{aligned} F_{T_f}(t) &= P\{T \leq t \mid T > (k-1)\tau, (k-1)\tau < \\ &t \leq k\tau\} = \frac{P[(k-1)\tau < T \leq t]}{P[T > (k-1)\tau]} = \\ &\frac{P[T > (k-1)\tau] - P(T > t)}{P[T > (k-1)\tau]} = \\ &\frac{R[(k-1)\tau] - R(t)}{R[(k-1)\tau]} = 1 - \frac{R(t)}{R[(k-1)\tau]}. \quad (11) \end{aligned}$$

式中: $E(T_f)$ 表示在 $[(k-1)\tau, k\tau]$ 内某一时刻 t 发生故障的平均寿命周期,

$$\begin{aligned} E(T_f) &= \int_0^\infty t dF_{T_f} = \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} t dF_{T_f} = t F_{T_f} \Big|_{(k-1)\tau}^{k\tau} - \\ &\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} F_{T_f} dt = \{t[1 - \frac{R(t)}{R[(k-1)\tau]}]\} \Big|_{(k-1)\tau}^{k\tau} - \\ &\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} [1 - \frac{R(t)}{R[(k-1)\tau]}] dt = \\ &k\tau [1 - \frac{R(k\tau)}{R[(k-1)\tau]}] - \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} [1 - \frac{R(t)}{R[(k-1)\tau]}] dt. \quad (12) \end{aligned}$$

式中 $E(T)$ 为系统运行的平均寿命周期。 $k\tau$ 时刻进行预防性维修或者在 $[(k-1)\tau, k\tau]$ 区间内某一时刻 t 发生故障进行故障后维修,两种情况均认为是一个寿命周期结束,可求得

$$\begin{aligned} E(T) &= \sum_{k=1}^N \{k\tau P\{0 < [u(k\tau)] \leq \\ &u_0 \mid u[(k-1)\tau] > u_0\} + E(T_f) P_{fk}\} = \\ &\sum_{k=1}^N \{k\tau (1 - \frac{R(k\tau + u_0)}{R(k\tau)}) + [k\tau (1 - \frac{R(k\tau)}{R[(k-1)\tau]} - \\ &\int_{(k-1)\tau}^{k\tau} (1 - \frac{R(t)}{R[(k-1)\tau]}) dt] [1 - \frac{R(k\tau)}{R[(k-1)\tau]}]\}. \quad (13) \end{aligned}$$

基于寿命预测的预防性维护维修策略是期望在保证设备安全可靠运行的前提下使平均费用率达到

最小,建立相应的系统维修优化的目标函数如式(14)所示。根据系统的假设条件,预防性维护阈值 u_0 和预测周期 τ 均影响平均费用率的值,因此可根据目标函数对两者同时进行优化。

$$\min\{c_\infty\} = \min\{\frac{E[C(T)]}{E[T]}\}. \quad (14)$$

3 实例计算与分析

3.1 寿命分布符合威布尔分布

为验证本文提出的基于寿命预测的预防性维护策略的有效性,首先以寿命分布符合威布尔分布进行分析。威布尔分布在可靠性工程中被广泛应用,尤其适用于机电类产品的磨损寿命分布形式。装备中的滚动轴承、某些电容器、电动机、发动机、机械液压恒速传动装置、液压泵、齿轮等都属于威布尔分布类型。以某型号民航空发动机在翼寿命符合威布尔分布为例^[23],其寿命分布及可靠度分别为:

$$F(t) = 1 - \exp[-(\frac{t}{\eta})^\beta], t \geq 0; \quad (15)$$

$$R(t) = \exp[-(\frac{t}{\eta})^\beta]; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} f_m(t) &= (\frac{\beta}{\eta})(\frac{m+t}{\eta})^{\beta-1} \exp[-(\frac{m}{\eta})^\beta - (\frac{m+t}{\eta})^\beta], \\ &t \geq 0. \quad (17) \end{aligned}$$

式中形状参数与尺度参数分别为 $\beta = 2.196$, $\eta = 6027.639$ 。

图2所示为不同当前时刻 m 的剩余寿命概率密度函数图,每一个当前时刻 m 对应一条剩余寿命概率密度函数曲线。从图中可以看出,随着当前时间 m 的增加,剩余寿命取值逐渐减小的概率增大。意味着随着使用时间的增加,剩余寿命越来越小。

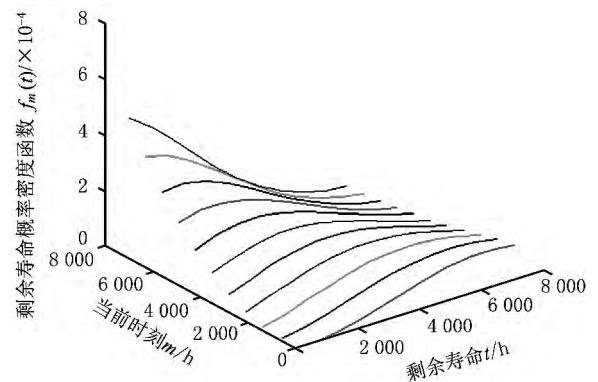


图2 不同当前时刻的剩余寿命概率密度函数 $f_m(t)$

在 0 时刻预测其平均寿命为

$$E[T_0] = \int_0^\infty R(t)dt = \int_0^m R(t)dt + \int_m^\infty R(t)dt = 5\,338. \quad (18)$$

若不采用预防性维护策略,只是基于设备运行的平均寿命 $E[T_0]$ 的定时维护维修策略,则系统设备寿命周期运行的平均费用率为

$$c_\infty = \frac{E[C(T)]}{E[T]} \geq \frac{1\,500}{5\,338} = 0.281\,0. \quad (19)$$

采用本文提出的基于寿命预测的预防性维护策略,可计算其设备寿命周期运行的平均费用为

$$E[C(T)] = \sum_{k=1}^N \left\{ C_p \left[1 - \frac{\exp[-(\frac{k\tau + u_0}{\eta})^\beta]}{\exp[-(\frac{k\tau}{\eta})^\beta]} \right] + C_f \left[1 - \frac{\exp[-(\frac{k\tau}{\eta})^\beta]}{\exp[-(\frac{(k-1)\tau}{\eta})^\beta]} \right] \right\}. \quad (20)$$

设备运行的平均寿命周期为

$$E(T) = \sum_{k=1}^N \left\{ k\tau \left[1 - \frac{\exp[-(\frac{k\tau + u_0}{\eta})^\beta]}{\exp[-(\frac{k\tau}{\eta})^\beta]} \right] + \left[k\tau \left(1 - \frac{\exp[-(\frac{k\tau}{\eta})^\beta]}{\exp[-(\frac{(k-1)\tau}{\eta})^\beta]} \right) - \int_{(k-1)\tau}^{k\tau} \left(1 - \frac{\exp[-(\frac{t}{\eta})^\beta]}{\exp[-(\frac{(k-1)\tau}{\eta})^\beta]} \right) dt \right] \left[1 - \frac{\exp[-(\frac{k\tau}{\eta})^\beta]}{\exp[-(\frac{(k-1)\tau}{\eta})^\beta]} \right] \right\}. \quad (21)$$

将式(20)和式(21)代入式(14),即可建立平均费用率 c_∞ 与决策变量 (u_0, τ) 之间的关系。显然这是一个多变量的连续优化问题,采用微粒群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法求解上述问题。

图 3 所示为参数取值分别为 $\tau \in [100, 5\,338]$, $C_p = 100, C_f = 1\,500$ 时的 PSO 迭代进化图,其中:横坐标表示迭代次数,纵坐标表示适应值即系统运行的平均费用率 c_∞ 。经优化后求得的最小平均费用率 $\min c_\infty = 0.027\,3$ 。

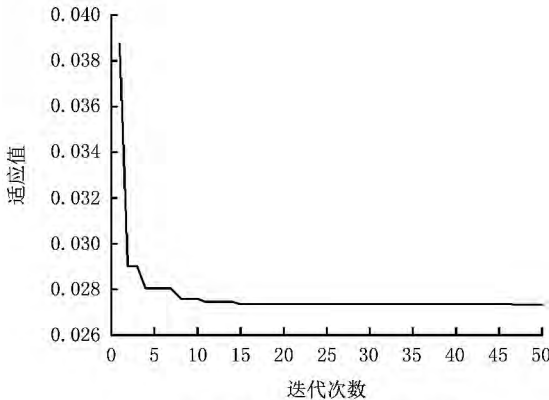


图3 微粒群算法迭代进化曲线图

令故障后的维修费用为固定值 $C_f = 1\,500$, 改变预防性维护费用 C_p , 可以得到系统长期运行的最小平均费用率 $\min c_\infty$ 及对应的优化变量 u_0 和 τ 的取值,如表 1 所示。由式(18)可知平均剩余寿命的最大取值为 5 338,从而确定 u_0 和 τ 的取值范围。其中 u_0 的取值范围为 $u_0 \in [10, 5\,338]$, τ 的取值范围为 $\tau \in [10, 5\,338]$ 。

表 1 $\tau \in [10, 5\,338]$ 时的平均最小费用率及优化变量取值

预防性维护费用 C_p	故障后维修费用 C_f	预防性维护费用与故障 后维修费用比值 C_p/C_f	最小平均费用率 $\min c_\infty$	最小平均费用率时 的最佳维护阈值 u_0	最小平均费用率时 的最佳预测周期 τ
100	1 500	1/15	0.016 2	1 092	10
300	1 500	1/5	0.041 8	994	10
500	1 500	1/3	0.065 0	757	10
1 000	1 500	2/3	0.134 1	586	1 286
1 200	1 500	4/5	0.148 2	353	1 597

由表 1 可以看出,应用本文提出的基于寿命预测的预防性维护策略,随着预防性维护费用 C_p 的增大,设备寿命周期运行的平均费用率在增大,但均小于式(19)计算的定时维护维修策略系统设备寿命

周期运行的最小平均费用率。当预防性维护费用 C_p 所占的比例较小时,优化变量 τ 总取得最小值,令故障后的维修费用 $C_f = 1\,500$ 固定不变, u_0 的取值范围不变,仍然为 $u_0 \in [10, 5\,338]$, 改变预防性维

护费用 C_p 及预测周期 τ 的取值范围,即 $\tau \in [100, 5388]$,再次得到系统长期运行的最小平均费用率

$\min c_\infty$ 及对应的优化变量 u_0 和 τ 的取值,如表 2 所示。

表 2 $\tau \in [100, 5388]$ 时的平均最小费用率及优化变量取值

预防性维护费用 C_p	故障后维修费用 C_f	预防性维护费用与故障 后维修费用比值 C_p/C_f	最小平均费用率 $\min c_\infty$	最小平均费用率时 的最佳维护阈值 u_0	最小平均费用率时 的最佳预测周期 τ
100	1 500	1/15	0.027 3	1 776	100
300	1 500	1/5	0.053 3	1 434	100
500	1 500	1/3	0.080 9	1 145	100
1 000	1 500	2/3	0.147 4	493	1 588
1 200	1 500	4/5	0.159 6	294	1 703

由表 2 看出,当预防性维护费用 C_p 所占的比例较小时,优化变量 τ 仍取得最小值,这是当预防性维修费用所占的比例较小时,每次预测不产生费用,所以 u_0 取值较大时 τ 取得最小值,即增大预防性维护的可能性可使平均费用率达到最小值。随着预防性维护费用 C_p 的增大,接近故障后的维修费用时 u_0 取值减小,从经济性的角度考虑,接近故障时再进行预防性维护即可,即 τ 值增大。

3.2 寿命分布符合正态分布

对装备而言,正态分布主要适用于具有磨损等特征的机械件^[23],如复杂系统中的半导体器件、晶体管、变压器、灯泡、电机绕组绝缘和减速器等。以航海设备电控罗经中某型变压器的寿命分布符合正态分布为例,其寿命分布及可靠度分别为

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt; \quad (22)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]; \quad (23)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (24)$$

式中该变压器的平均寿命为 $\mu = 10\ 000$, 方差为 $\sigma^2 = 2\ 000$ 。

将式(23)代入式(10)和式(13),计算设备寿命周期运行的平均费用 $E[C(T)]$ 及设备运行的平均寿命周期 $E[T]$,将结果代入式(14)即可建立优化目标为系统运行的平均费用率 c_∞ 与决策变量 (u_0, τ) 之间的关系。令故障后的维修费用 $C_f = 150$ 固定不变,改变预防性维护费用 C_p ,采用 PSO 算法可以得到系统长期运行的最小平均费用率 $\min c_\infty$ 及对应的优化变量 u_0 和 τ 的取值。已知平均剩余寿命最大取值为 10 000,可得到 u_0 和 τ 的取值范围分别为 $u_0 \in [10, 10\ 000]$, $\tau \in [10, 10\ 000]$ 时的结果(如表 3), u_0 和 τ 的取值范围分别为 $u_0 \in [10, 10\ 000]$, $\tau \in [100, 10\ 000]$ 时得到表 4 的结果。

如果不采用预防性维护策略,只是基于设备运行平均寿命 $\mu = 10\ 000$ 的定时维护维修策略,则系统寿命周期运行的平均费用率为

$$c_\infty = \frac{E[C(T)]}{E[T]} \geq \frac{150}{10\ 000} = 0.015. \quad (25)$$

由表 3 和表 4 可以看出:本文所提的基于寿命预测的预防性维护策略同样适用于寿命分布符合正态分布的系统,随着预防性维护费用 C_p 的增大,设备寿命周期运行的平均费用率增大,但均小于式(25)计算的定时维护维修策略系统设备寿命周期运行的最小平均费用率。

表 3 $\tau \in [10, 10\ 000]$ 时的平均最小费用率及优化变量取值

预防性维护费用 C_p	故障后维修费用 C_f	预防性维护费用与故障 后维修费用比值 C_p/C_f	最小平均费用率 $\min c_\infty$	最小平均费用率时 的最佳维护阈值 u_0	最小平均费用率时 的最佳预测周期 τ
10	150	1/15	0.001 1	1 540	10
30	150	1/5	0.003 2	1 024	10
50	150	1/3	0.005 1	726	10
100	150	2/3	0.010 0	585	1 344
120	150	4/5	0.011 2	353	1 820

表 4 $\tau \in [100, 10\ 000]$ 时的平均最小费用率及优化变量取值

预防性维护费用 C_p	故障后维修费用 C_f	预防性维护费用与故障 后维修费用比值 C_p/C_f	最小平均费用率 $\min c_\infty$	最小平均费用率时 的最佳维护阈值 u_0	最小平均费用率时 的最佳预测周期 τ
10	150	1/15	0.001 8	2 012	100
30	150	1/5	0.003 7	1 983	100
50	150	1/3	0.005 7	1 875	100
100	150	2/3	0.010 4	487	1 994
120	150	4/5	0.011 5	342	2 910

4 结束语

本文针对已知寿命分布的情况,分析并建立了基于寿命分布的预防性维护维修优化模型,合理地确定预防性维修阈值和预测间隔期,降低了系统的运行和维护维修成本,通过 MATLAB 仿真,并与基于时间的维护维修策略进行比较,验证了本文所提预防性维护维修策略的有效性,对可预测的视情维修决策的相关研究工作具有一定的参考作用。

下一步工作是基于实时监测剩余寿命的预测的建模及非完美预防性维护维修策略进行研究,并考虑设备运行中非完美预防性维护维修策略取代修复如新时,维护策略的维护效果与时间相关性的关系。

参考文献:

[1] AHMAD R, KAMARUDDIN S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application [J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(1): 135-149.

[2] WANG Jianmin, REN Genquan, ZHANG Li, et al. Maintenance repair and overhaul/operations support technology [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2017-2025(in Chinese). [王建民,任艮全,张 力,等. MRO 支持技术研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2017-2025.]

[3] JARDINE A K S, LIN D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(7): 1483-1510.

[4] SI X S, WANG W, HU C H, et al. Remaining useful life estimation—a review on the statistical data driven approaches [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 213(1): 1-14.

[5] CHELIDZE D. Multimode damage tracking and failure prognosis in electromechanical systems[C]//Proceedings of the 2nd Conference on Component and Systems Diagnostics, Prognostics and Health Management. Bellingham, Wash., USA: SPIE, 2002: 1-12.

[6] KUMAR D, WESTBERG U. Maintenance scheduling under

age replacement policy using proportional hazards model and TTT-plotting [J]. European Journal of Operational Research, 1997, 99(3): 507-515.

[7] WANG W. A two-stage prognosis model in condition based maintenance [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 182(3): 1177-1187.

[8] ZHOU Z J, HU C H, XU D L, et al. A model for real-time failure prognosis based on hidden Markov model and belief rule base [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207(1): 269-283.

[9] WANG W Q, GOLNARAGHI M F, ISMAIL F. Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2004, 18(4): 813-831.

[10] WANG Peng, VACHTSEVANOS G. Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks [J]. AI EDAM, 2001, 15(4): 349-365.

[11] GEBRAEEL N Z, LAWLEY M A, LI R, et al. Residual-life distributions from component degradation signals: a Bayesian approach [J]. IIE Transactions, 2005, 37(6): 543-557.

[12] FAN Hongdong, HU Changhua, CHEN Maoyin, et al. A degradation measurement based decision support method for optimal predictive maintenance policy [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(8): 45-48 (in Chinese). [樊红东,胡昌华,陈茂银,等. 基于退化数据的最优预测维护决策支持方法 [J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(8): 45-48.]

[13] QIU J, SETH B B, LIANG S Y, et al. Damage mechanics approach for bearing lifetime prognostics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(5): 817-829.

[14] YAM R C M, TSE P W, LI L, et al. Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(5): 383-391.

[15] CARR M J, WANG W. An approximate algorithm for prognostic modelling using condition monitoring information [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 211(1): 90-96.

[16] BANJEVIC D. Remaining useful life in theory and practice [J]. Metrika, 2009, 69(2/3): 337-349.

[17] CHENG Zhijun, GUO Bo. Analysis of optimal inspection and

- maintenance policy for continuous deteriorating system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30 (1):193-196 (in Chinese). [程志君, 郭 波. 连续劣化系统的最佳检测与维修策略分析[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1):193-196.]
- [18] HESS A. Prognostics, from the need to reality-from the fleet users and PHM system designer/developers perspectives [C]//Proceedings of Aerospace Conference. Washington, D. C., USA: IEEE, 2002, 6: 6-2791-6-2797.
- [19] PARK K S. Optimal continuous-wear limit replacement under periodic inspections [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1988, 37(1): 97-102.
- [20] KALLEN M J, VAN NOORTWIJK J M. Optimal maintenance decisions under imperfect inspection [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 90(2): 177-185.
- [21] JIA X, CHRISTER A H. A prototype cost model of functional check decisions in reliability-centred maintenance [J]. Journal of the Operational Research Society, 2002, 53(12): 1380-1384.
- [22] BOUVARD K, ARTUS S, BÉRENGUER C, et al. Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. application to commercial heavy vehicles [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(6): 601-610.
- [23] PENG Wenjuan, HAN Song, SUN Mingming, et al. Calculating modes of spare parts demand based on types of life distribution [J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29 (12): 183-185 (in Chinese). [彭文娟, 韩 松, 孙铭明, 等. 基于寿命分布的备件需求计算模型分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29 (12):183-185.]
- [24] RONG Xiang. Methods of life prediction and maintenance decision making in civil aeroengine health management [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008 (in Chinese). [戎 翔. 民航发动机健康管理中的寿命预测与维修决策方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.]

作者简介:

石 慧(1979—),女,山西太原人,博士研究生,副教授,研究方向:物联网环境下的复杂系统预测与健康管理、维护维修策略等, E-mail: huishi1979@sohu.com;

曾建潮(1963—),男,陕西大荔人,教授,博士,博士生导师,研究方向:复杂系统建模与仿真、智能计算、复杂系统预测与健康管理等。