

文章编号:1674-8190(2020)04-572-05

# 基于服役数据的飞机计划维修任务间隔优化方法

林聪, 蒋庆喜, 周扬

(中国航空综合技术研究所 装备服务产品部, 北京 100028)

**摘要:** 计划维修任务间隔是反映飞机可靠性和经济性的重要指标, 而飞机服役后维修及故障数据的累积对维修间隔调整提供依据。通过梳理飞机维修任务间隔优化的流程, 确定数据抽样样本量的方法; 给出基于数据拟合的故障趋势分析方法对间隔优化的必要性进行判断; 定义维修间隔优化的假设检验准则, 对提出的优化方法进行算例验证。结果表明: 本文的方法能够对新维修任务间隔的可行性进行判断, 指导维修大纲的更新。

**关键词:** 计划维修任务; 维修间隔优化; 假设检验

中图分类号: V267+.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.04.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Schedule Maintenance Task Interval Optimization Method Based on In-service Data

LIN Cong, JIANG Qingxi, ZHOU Yang

(Department of Equipment Service, China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Schedule maintenance task interval is a key index representing the reliability and economy of aircraft, and the accumulation of maintenance and fault data after aircraft service provides the basis for the adjustment of maintenance task interval. The method for data sampling size is determined by analyzing the optimization process of aircraft maintenance task interval. The failure trend analysis method based on data fitting is given to judge the necessity of interval optimization method. The hypothesis test criteria of maintenance interval optimization is defined. The proposed optimization method is verified with instance. The results show that the method can judge the feasibility of new maintenance task interval, and guide the update of maintenance review board report (MRBR).

**Key words:** schedule maintenance task; maintenance interval optimization; hypothesis test

## 0 引言

计划维修要求(SMR)是保障一型装备在服役阶段持续可用的规范性文件, 在民用航空领域指的是一型飞机的维修大纲(MRBR), 其主要内容通常

包括维修间隔、维修对象、维修任务, 即阐明“什么时间对什么设备执行什么检修活动”。MRBR 是 EASA、FAA、CAAC、TCCA 等适航当局强制要求飞机型号合格证持有者在研制过程中必须编制的文件<sup>[1]</sup>。在制定 MRBR 的过程中, 对于计划维修任务间隔(含门槛值和重复间隔)的选择, 由于缺少

收稿日期: 2020-03-26; 修回日期: 2020-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(71801198); 装备综合保障技术重点实验室稳定支持项目(61420030301)

通信作者: 林聪, linc@cape.avic.com

引用格式: 林聪, 蒋庆喜, 周扬. 基于服役数据的飞机计划维修任务间隔优化方法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 572-576, 584.

LIN Cong, JIANG Qingxi, ZHOU Yang. Schedule maintenance task interval optimization method based on in-service data[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 572-576, 584. (in Chinese)

必要的数 据,通常采取保守策略保证飞机安全性。飞机服役后,随着使用和维修数据的积累,有必要对 MRBR 中任务间隔的有效性进行重新评估<sup>[2]</sup>。例如,空客于 2005 年发布的《A320 飞机维修大纲》中对“ A 检”间隔由 500 fh(飞行小时)调整为 600 fh,“ C 检”间隔由 15 个日历月调整为 6 000 fh。

近年来,基于故障趋势分析的可靠性预测及维修任务间隔优化得到了广泛研究。例如, Hong Sheng 等<sup>[3-4]</sup>基于性能退化数据对轴承的健康趋势进行预测; S. Porotsky 等<sup>[5]</sup>提出了基于 PHM 思想利用剩余寿命(RUL)来判断是否需要各个部件进行预防性维修。此类研究方法适用于轴承等细粒度部件的寿命趋势分析,这类对象的工作条件相对单一,并且能够产生充足的数据量来支撑建模分析。但是,这类方法给出的对维修间隔调整的建议是针对维修方案的,而不是针对维修大纲中的维修任务进行间隔调整。

对于维修大纲中任务间隔确定最朴素的想法是借鉴相似机型的历史经验,因此, Bai Wenhua 等<sup>[6]</sup>开展了基于案例推理(CBR)的维修大纲制定方法。由于机型之间存在差异,使得制定新机型维修大纲时都采取偏向保守的原则,因此这种方法给出的维修任务间隔与飞机实际表现差距较大。

在实际运营过程中为了降低飞机的维护成本,航空公司会在 MRBR 规定的维修间隔内基于费用和风险评估思想调整维修任务的时机<sup>[7]</sup>。例如, A. Ahmadi 等<sup>[8]</sup>对“非安全影响”和“安全影响”类别的隐藏故障,采用风险约束优化的方法,得出单位飞行小时成本最小的维修间隔;李景奎等<sup>[9]</sup>提出运用改进的三参数威布尔极大似然估计法,对历史故障数据进行可靠性分析,并建立了可靠寿命区间约束下的部件最优定时维修费用率模型;以国航波音 737NG 机队空调系统空气循环机为例,张连磊<sup>[10]</sup>建立维修成本与预防性维修间隔的数学模型,寻找维修成本最小的预防性维修间隔;贾宝惠等<sup>[11]</sup>提出一种基于风险约束函数的平均不可靠度和成本率函数优化检查和恢复间隔的模型。以上研究都是针对某一类具体对象开展的维修间隔优化研究,没有给出通用的方法指导 MRBR 中任务间隔的优化。

由于对 MRBR 中计划维修任务间隔进行调整

的目标是希望改变维修间隔后不会增加飞机发生故障的可能性,通过拟合分析飞机故障与飞行小时的关系,判断调整维修间隔可能对飞机的故障发生频率造成何种影响。

本文给出针对某一项维修任务进行间隔优化的方法,包括确定相关数据的抽样本量,通过拟合分析故障发生趋势预判是否有必要对该任务进行间隔优化,基于故障到达的概率模型对新的维修间隔进行假设检验,并对该方法进行算例验证。

## 1 确定维修任务及飞机样本量

首先,在开展优化前需要确定当前已收集的维修数据量是否能够支撑优化工作的进行。一型飞机的维修间隔优化工作需要收集该型飞机 5 年以上的故障、维修及运营数据,数据维度包括机队规模、年平均利用率、数据收集时间、维修间隔、机龄等。

针对某一特定维修任务,基于上述数据可估算求得对该型飞机在数据收集期间所产生该任务的总数  $S$  为

$$S = \frac{N_a U_y T_s}{I} \quad (1)$$

式中:  $N_a$  为机队规模,架;  $U_y$  为每架飞机的年平均利用率, fh/年;  $T_s$  为数据收集时间,年;  $I$  为该维修任务的初始间隔, fh。

其次,需要确定从总体  $S$  中抽取多少条维修数据作为样本,记为  $m$ 。由于计划维修任务的目的是通过定期对飞机进行检查从而发现隐蔽性故障,因此,假设每次维修任务能够识别并发现重要故障的概率为  $p$  以及可接受误差范围  $c$ 。这两个参数的取值可由型号设计及维修专家给定<sup>[12]</sup>,并得到维修审查委员会(MRB)的认可。

基于上述假设,定义每次检查能够发现故障的数量为  $X_i$ ,该随机变量服从  $0 \sim 1$  概率分布,即:

$$X_i = \begin{cases} 1 & (p) \\ 0 & (1-p) \end{cases} \quad (2)$$

随机变量期望为  $E(X_i) = p$ , 方差  $D(X_i) = p(1-p)$ 。在  $m$  次检查中平均每次发现的故障数目为  $\bar{X} = \sum_{i=1}^m X_i / m$ , 该随机变量的期望和方差分别为  $E(\bar{X}) = p, D(\bar{X}) = \frac{p(1-p)}{m}$ 。

对  $\bar{X}$  构造标准正态分布, 得到:

$$\frac{\bar{X} - p}{\sqrt{\frac{p(1-p)}{m}}} \sim N(0, 1)$$

当置信度为  $1 - \alpha$  时, 由标准正态分布的性质得到:

$$\frac{|\bar{X} - p|}{\sqrt{\frac{p(1-p)}{m}}} = Z_{\alpha/2} \quad (3)$$

式中:  $|\bar{X} - p|$  为每次检查能够发现重要故障概率的误差值, 即  $c = |\bar{X} - p|$ ;  $Z_{\alpha/2}$  为标准正态分布的  $\alpha/2$  分位数。

综上所述, 为了开展维修间隔优化所需抽取的维修任务样本量为

$$m = \frac{Z_{\alpha/2}^2 p(1-p)}{c^2} \quad (4)$$

样本量  $m$  是在假设样本总体足够大的前提下得到的, 当样本总体  $S$  较小 ( $S < m$ ), 需要对抽样的数量进行压缩, 得到小总体条件下的样本量  $n$ 。由于  $n$  的取值与总体  $S$  和样本量  $m$  有关, 用这两个参数构造函数  $n = f(z; S, m)$ , 使得  $n \leq m$ 。

$$n = \frac{m}{1 + \frac{z}{S}} \quad (z \in [0, S]) \quad (5)$$

对样本量进行调整时, 还需要注意缩减后的样本量能够体现随机变量  $(\bar{X} - p) / \sqrt{p(1-p)/m}$  是否服从标准正态分布。

综上所述, 想要对某一项维修任务的间隔进行优化所需的样本量应至少为  $n$ 。

对维修任务抽样后, 可以计算维修任务抽样比例  $R_i = n/S$ , 假设每架飞机的维修任务数等概率 (该假设符合实际情况, 因为航空公司一般都会均匀地给每架飞机安排运营, 因此, 产生的维修需求也是均匀的), 则飞机数抽样比例  $R_a = R_i$ , 故飞机的样本量应为

$$n_a = R_a N_a \quad (6)$$

最后, 由于一型飞机的服役时间很长, 使得航空公司拥有该型飞机的机龄跨度较大, 而间隔调整工作影响的是整个型号维修任务, 因此需要对不同机龄的飞机进行分层抽样, 进而得到的样本能够更真实地反映总体情况。分层抽样的原理, 是基于飞机抽样比例从不同机龄的飞机总数中进行抽取, 得到第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) 种机龄飞机的抽样数量为

$$n_{a,i} = R_a N_{a,i} \quad (7)$$

式中:  $N_{a,i}$  为第  $i$  种机龄飞机的机队规模, 且满足

$$N_a = \sum_{i=1}^k N_{a,i}$$

## 2 判定维修间隔优化的必要性

完成样本量抽取需要对维修间隔优化的必要性进行初步判定, 该步骤需要对维修任务在不同时间段出现的故障数量进行统计分析, 并进行趋势分析, 用于帮助预判维修间隔调整对故障数量造成的影响<sup>[13]</sup>。

鉴于飞机故障的统计是按照飞行小时区间划分进行的, 因此得到的分组统计数据组数较少, 例如, 以 4 000 fh 为间距进行分组, 则到 20 000 fh (以 8 fh/天的使用率来计算, 此时飞机服役时间已接近 10 年, 需要开展 D 检) 为止只能得到 5 组数据。在进行趋势拟合时建议使用线性回归, 从而更加直观地表达故障产生的情况。

通过对  $N$  组样本值的飞行小时数和故障数  $(x_i, y_i)$  进行分组统计, 令拟合直线为  $y = a + bx$ , 基于最小二乘法可得拟合直线的参数分别为

$$\begin{cases} \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \\ \hat{b} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ;  $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ ;  $S_{xx} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$ ;  $S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ , 其中  $N$  为实际抽取的样本量, 而  $n$  为最低要求抽取的样本量。

当拟合直线斜率较大时, 表明扩展维修间隔导致更多的故障发生, 建议尝试缩短维修间隔; 当斜率较小时, 表明扩展维修间隔不会明显增加或减少故障发生的数量, 建议尝试对维修间隔进行适当的扩展。

理论上讲, 还存在斜率为负数的可能, 表明故障率会随着使用时间的增加逐步降低, 这种情况只有在选用的设备未通过“老炼”的时候才会发生。对于经过严格选材和试验的装备来说, 在实际工程中发生这种情况的可能性非常低。

例如, 对某型飞机的  $N = 494$  条维修数据进行统计后所得到的趋势拟合如图 1 所示, 其中直线的

斜率为  $\hat{a}=6 \times 10^{-5}$ ,表明一架飞机平均使用 2 000 fh 可能会产生 0.12 个故障,若对该项计划维修任务的间隔进行扩展,则会增加故障发生的可能性。

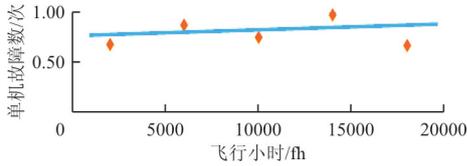


图 1 故障趋势分析示意图

Fig.1 Schematic diagram of failure trend analysis

在实际工程中,如果故障趋势满足相应制造商的“趋势”定义,即斜率达到制造商可接受的程度时,便可对该项维修任务的间隔进行相应调整。也就是说,即使斜率为正数时,但只要延长维修间隔后导致可能增加的故障数在可接受范围内,便认为该任务的间隔可扩展。

### 3 定义拒绝域及假设检验准则

若维修任务的间隔存在优化的必要性,则需给出新的维修间隔  $I' = I + \Delta I$ ,其中  $\Delta I$  可以为正数或负数。对于新给定的维修间隔,需要通过定义拒绝域对其进行假设检验。合理地定义拒绝域是维修间隔优化的关键步骤。

由于预防维修的目的是通过定期开展维修活动实现减少故障发生,因此,用故障数与检查次数的比例  $R$  来度量当前维修间隔下维修活动的有效性,故有

$$R = I \times \lambda_a \times 100\% = F/N \quad (9)$$

式中: $I$  为维修任务的原始间隔, fh;  $\lambda_a$  为该任务可接受失效率, 1/fh, 该值是制造商对 MSG-3 各类故障的可接受失效率;  $N$  为任务数;  $F$  为故障数。

将维修间隔调整为  $I'$  后,新得到的故障发生比例  $R'$  应比调整前更低才能表明间隔调整后,维修活动的有效性没有降低,即满足  $R' \leq R$ , 其中,  $R' = I' \times \lambda_a \times 100\% = F'/N$ 。

假设检验为:若间隔调整后故障数量  $F'$  比间隔调整前的故障数量  $F$  少的概率达到置信程度  $\beta$ , 则认为本次间隔调整是有效的, 否则重新确定调整幅度。故定义:

$$\begin{cases} H_0 : P\{F' \leq F\} < \beta \\ H_1 : P\{F' \leq F\} \geq \beta \end{cases} \quad (10)$$

对于故障来说,一般假定其到达服从泊松分布,到达强度表征的是当前间隔下的平均故障数。故调整后故障发生次数的平均值为  $\mu = R'N$ , 因此可以得到原假设的拒绝条件为

$$P\{F' \leq F\} = P\{F' \leq RN\} = \sum_{i=0}^{RN} e^{-R'N} \frac{(R'N)^i}{i!} \geq \beta \quad (11)$$

### 4 数值算例

假设某航空公司拥有某型飞机  $N_a = 59$  架,年平均利用率  $U_y = 2\ 200$  fh,针对某项维修任务收集了  $T_s = 6$  的数据,该任务初始维修间隔为  $I = 6\ 000$  fh,每次检查能够发现故障的概率为  $p = 0.15$ ,制造商给出的可接受水平值为  $p = 0.04$ ,则由式(4)可知需要抽取的任务样本量为  $m = 306$  条,高于航空公司拥有的任务总数  $S = 130$ ,因此需要对样本量进行调整。基于式(5),令  $z = m - 1$ <sup>[14]</sup>,得到至少需要抽取的样本量  $n = 91$  条,且需要抽取的飞机总量为  $n_a = 42$  架。

假设航空公司该型飞机的机龄分布如表 1 所示,得到在本次维修间隔优化工作中,需要从不同机龄群体中抽取样本量,将这  $n_a = 42$  架飞机的维修数据抽取后,得到最终任务样本量  $N = 105$  条。

表 1 某型飞机机龄分布情况

Table 1 Age distribution of type X aircraft

机龄区间/fh	拥有数量/架	抽样数/架
[2 000, 4 000)	3	2
[4 000, 8 000)	18	13
[8 000, 12 000)	27	19
[12 000, 16 000)	7	5
[16 000, 20 000)	4	3

对  $N = 105$  条维修数据及故障数据进行统计后,得到的故障数分布情况如表 2 所示,进而由式(8)可以得到拟合直线的斜率为  $\hat{a} = 3 \times 10^{-4}$ ,表明每延长 100 fh 将使得故障数增加 0.03 次,即平均故障数上升 1%,若制造商认为该趋势是可接受的,则启动新的维修间隔确定工作。

表 2 某型飞机故障分布趋势

Table 2 Failure/AC distribution of type X aircraft

机龄区间/fh	故障数/次	单机故障数/次
[2 000,4 000)	2	1.00
[4 000,8 000)	28	2.15
[8 000,12 000)	30	1.58
[12 000,16 000)	22	4.40
[16 000,20 000)	16	5.33

假设该维修任务是 MSG-3 分析<sup>[15]</sup>得到的一个 9 类任务,则对应故障的可接受失效率为  $\lambda_a = 4 \times 10^{-5}$ ,进而得到故障数与检查次数的比例  $R = 25\%$ 。当置信度  $\beta = 0.5$ ,得到新的维修间隔结果如表 3 所示,即最大可以尝试将维修间隔延长至 6 300 fh。

表 3 间隔延长假设检验结果

Table 3 Hypothesis test result for lengthen interval

$I'/\text{fh}$	$R'/\%$	$P\{F' \leq F\}$	接受/拒绝
6 100	24.4	0.58	接受
6 200	24.8	0.55	接受
6 300	25.2	0.52	接受
6 400	25.6	0.48	拒绝
6 500	26.0	0.45	拒绝

## 5 结束语

本文给出一套工程实用的维修间隔优化方法,能够对维修间隔进行优化。通过适当的维修间隔调整可将本文方法延用到其他类型装备的预防性维修任务间隔优化工作之中,为该装备计划维修要求(SMR)的更新提供支撑。

### 参考文献

- [1] FAA. Instructions for continued airworthiness: FAR25 [S]. US: FAA, 2003.
- [2] 蒋庆喜,危虹,蒋海涛. 民用飞机维修大纲优化指南 IMRBPB IP44 及应用研究[J]. 航空标准化与质量, 2018(1): 44-46.  
JIANG Qingxi, WEI Hong, JIANG Haitao. Civil aircraft maintenance review board report guidance IMRBPB IP44 and its application[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2018(1): 44-46. (in Chinese)
- [3] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings[J]. Digital Signal Processing, 2014, 35: 117-123.
- [4] HONG Sheng, ZHOU Zheng, ZIO E, et al. Condition assessment for the performance degradation of bearing based on a combinatorial feature extraction method[J]. Digital Signal Processing, 2014, 27: 159-166.
- [5] POROTSKY S, BLUVBAND Z, YANG Lin. Replacement interval optimization for aircraft maintenance[C]// 2015 IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). Palm Harbor: IEEE, 2015: 1-9.
- [6] BAI Wenhua, ZUO Hongfu, WU Jingmin. Study on making method of civil aircraft's maintenance review board report based on CBR[J]. Aircraft Design, 2011(5): 1-5.
- [7] 余芬,李哲,张军,等. 民用飞机维修间隔风险评估方法研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(1): 73-76.  
YU Fen, LI Zhe, ZHANG Jun, et al. Research on risk assessment methods of civil aircraft maintenance interval[J]. Computer Simulation, 2018, 35(1): 73-76. (in Chinese)
- [8] AHMADI A, KUMAR U. Cost based risk analysis to identify inspection and restoration intervals of hidden failures subject to aging[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(1): 197-209.
- [9] 李景奎,蔺瑞管,段飞飞,等. 民机系统部件维修间隔优化[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(1): 90-94.  
LI Jingkui, LIN Ruiguan, DUAN Feifei, et al. Optimization of maintenance interval for civil aircraft system components[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(1): 90-94. (in Chinese)
- [10] 张连磊. 基于维修成本的波音 737NG 飞机 ACM 预防性维修间隔决策建模[J]. 航空维修与工程, 2015(3): 46-48.  
ZHANG Lianlei. Establishment model of preventive maintenance interval for B737NG fleet ACM based on maintenance cost[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2015(3): 46-48. (in Chinese)
- [11] 贾宝惠,刘涛,杨杭,等. 民机隐蔽故障维修间隔优化方法研究[J]. 航空制造技术, 2015(s1): 20-23,32.  
JIA Baohui, LIU Tao, YANG Hang, et al. Study on maintenance interval optimization of hidden failure of civil aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(s1): 20-23,32. (in Chinese)
- [12] 余芬,李哲,张军,等. 裂纹检出概率对飞机结构维修间隔影响的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 15-20.  
YU Fen, LI Zhe, ZHANG Jun, et al. Influence studying of crack inspection probability on aircraft structure maintenance interval[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(12): 15-20. (in Chinese)
- [13] 徐志锋,王勇. 民用飞机维修间隔优化调整方法研究[J]. 航空维修与工程, 2012(4): 58-60.  
XU Zhifeng, WANG Yong. Research on commercial aircraft maintenance interval optimization method[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2012(4): 58-60. (in Chinese)

- nance plan[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2009(6): 88-89. (in Chinese)
- [15] 门江. 维修方案项目优化的可靠性分析方法[J]. 航空维修与工程, 2016(9): 65-66.  
MEN Jiang. Reliability analysis method of maintenance plan optimization[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2016(9): 65-66. (in Chinese)
- [16] 杨王锋. 军用飞机维修大纲修订流程研究[J]. 航空工程进展, 2010, 1(4): 402-406.  
YANG Wangfeng. Research on military aircraft maintenance program revision process[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(4): 402-406. (in Chinese)
- [17] EASA. Clarification of IP44; IMRBPB IP116[S]. US: EASA, 2011.
- [18] EASA. Evolution/optimization guidelines; IMRBPB IP44 [S]. US: EASA, 2011.
- [19] ATA. Operator/manufacturer scheduled maintenance; MSG-3[S]. US: ATA, 2018.
- [20] 蒋庆喜, 危虹, 蒋海涛. 民用飞机维修大纲优化指南 IMRBPB IP44 及应用研究[J]. 航空标准化与质量, 2018(1): 42-44.  
JIANG Qingxi, WEI Hong, JIANG Haitao. Introduction of guideline for MRBR evolution of civil aircraft-IMRBPB IP44[J]. Aviation Standardization and Quality, 2018(1): 42-44. (in Chinese)
- [21] RCM. International specification for developing and continuously improving preventive maintenance: S4000P-B6865-04000-00[S]. US: RCM, 2018.

#### 作者简介:

南雁飞(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:维修工程。

蒋庆喜(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:维修工程分析。

林 聪(1986—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:可靠性评估、维修工程分析。

(编辑:丛艳娟)

#### (上接第 576 页)

- [14] 航空工业沈飞民用飞机有限责任公司. 一种民用飞机系统维修时间间隔计算方法: CN201510575578. 4[P]. 2013-04-03.  
AVIC SAC Commercial Aircraft Company Limited. A method for computing aircraft system maintenance interval: CN201510575578. 4[P]. 2013-04-03. (in Chinese)
- [15] IMRBPB. Evolution/optimization guidelines IMRBPB issue paper 44(issue 3)[EB/OL]. [2020-03-26]. <http://www.deq.state.or.us/wq/tmdls/docs/midcoast/Advisory/20120717paper3.pdf>.

#### 作者简介:

林 聪(1986—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:可靠性评估、维修工程分析。

蒋庆喜(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:维修工程分析。

周 扬(1981—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:装备综合保障。

(编辑:丛艳娟)