

# 面向生产过程的CBM策略效益评估方法研究\*

马伦<sup>1a</sup>, 康建设<sup>1a</sup>, 赵春宇<sup>2</sup>, 刘凯东<sup>1b</sup>

(1. 军械工程学院 a. 装备指挥与管理系; b. 基础部, 石家庄 050003; 2. 白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

**摘要:** 针对当前设备维修策略选择主要依据人工经验或故障后果严重程度的不足, 从产品生产过程涉及的设备维修问题出发, 提出一种定量评估基于状态维修(CBM)策略效益的方法。利用离散事件仿真模拟整个生产过程, 根据预测的设备故障时间分布和故障设备的维修时间构建维修策略效益评估的基本框架。以某个加工生产线为应用对象, 使用ExtendSim可视化仿真软件包建立生产线的仿真模型, 按照维修策略效益评估流程设计三种应用案例, 评估事后维修、定期维修和基于状态维修产生的效益, 结果表明, 基于状态维修策略产生的效益最大, 从而验证该评估方法的可行性, 可为工程实际中最优维修策略的选择提供依据。

**关键词:** 生产过程; 基于状态的维修; 效益评估; 离散事件仿真; ExtendSim 软件

**中图分类号:** TP391.9; F224.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)02-0436-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.032

## Research on benefit evaluation from CBM execution oriented to production process

MA Lun<sup>1a</sup>, KANG Jian-she<sup>1a</sup>, ZHAO Chun-yu<sup>2</sup>, LIU Kai-dong<sup>1b</sup>

(1. a. Dept. of Equipment Command & Management, b. Dept. of Fundamental Courses, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng Jilin 137001, China)

**Abstract:** The maintenance strategy selection based on personal experience or failure consequence severity had some disadvantages. However, maintenance decision making for multiple equipments was inevitable in industrial production process. In order to obtain the quantitative benefit from condition based maintenance(CBM) execution, this paper presented a general benefit evaluating framework for maintenance strategies application through simulating the production process using discrete event simulation, the predicted failure time distribution and the maintenance down time for failure equipment. For verifying this evaluating framework feasibility, the application object focused on machining production line. Firstly, it established the simulation model for this production line by ExtendSim software. Secondly, according to the evaluating flow of maintenance policy benefit, it designed three cases for evaluating the benefit yielding from corrective maintenance, periodic maintenance and condition based maintenance. Finally, the results from these cases indicate entirely that the benefit from condition based maintenance execution is the maximum. So the option for determining the best maintenance policy in engineering practice can be achieved.

**Key words:** production process; condition based maintenance; benefit evaluation; discrete event simulation; ExtendSim software

设备故障发生的必然性使得维修成为设备使用者不可回避的现实。根据设备故障后果的严重程度, 需要采用不同的维修策略才能最大限度地消除设备故障后产生的影响, 如安全性、任务性和经济性影响等<sup>[1]</sup>。因此, 针对设备不同的故障类型, 有必要比较不同维修策略产生的效益, 从中选择最适合的维修策略<sup>[2]</sup>。

维修策略的发展依次经历了事后维修、定期维修和基于状态的维修(condition based maintenance, CBM)<sup>[3]</sup>。事后维修采取一种设备故障后才修理的策略, 适用于故障后果不严重、故障后容易修理的设备; 定期维修从预防故障发生的角度, 采用固定的时间间隔实施维修, 可以显著减少设备的非计划停机次数, 提高设备的可用度, 但容易引起维修不足或维修过剩的问题, 造成非计划停机损失或增加不必要的维修费用; CBM 根据监测的设备状态信息, 评估设备当前所处的“健康”状态, 并预

测其未来的变化趋势, 以便在设备功能故障前确定最优的维修时机, 从而有效避免维修不足和维修过剩的问题, 该类维修非常适用于故障后果严重的关键设备<sup>[4]</sup>。随着现代设备向大型、复杂的方向发展, CBM 策略的应用前景更为广阔, 因此受到了国内外学者的广泛关注并加以研究<sup>[5]</sup>。目前关于 CBM 的研究大部分集中于如何在具体设备上实现, 考虑到实际生产过程的复杂性, 只有在评估 CBM 策略效益的基础上, 实施 CBM 才具备合理性, 因此需要开展 CBM 策略的效益评估研究。现有确定设备维修策略的研究中, 常用的方法是对设备故障进行故障模式影响及危害性分析(failure mode effect and criticality analysis, FMECA)。根据分析结果对设备故障模式按照危害性高低进行排序, 对应维修策略依次为 CBM、定期维修和事后维修<sup>[6,7]</sup>。应用 FMECA 实现故障模式危害性排序时, 需要评估的三个基本要素为严重度、出现频率和检测率<sup>[8]</sup>, 因而对于致

收稿日期: 2012-06-27; 修回日期: 2012-07-30 基金项目: 武器装备预研基金资助项目(9140A27040411JB34)

作者简介: 马伦(1985-), 男, 四川西昌人, 博士研究生, 主要研究方向为维修工程理论与应用(malun018@163.com); 康建设(1963-), 男, 河北石家庄人, 教授, 博士, 主要研究方向为维修工程理论与应用; 赵春宇(1984-), 女, 黑龙江伊春人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为虚拟维修训练; 刘凯东(1983-), 男, 河北唐山人, 讲师, 学士, 主要研究方向为军事技能训练。

命性或者危害性最低的故障模式来说,维修策略的选择还比较直观。但设备故障后果不一定都产生致命性的安全影响,通常情况下只产生经济性影响,直接导致危害性分析结果难以有效界定不同维修策略选择的分割点,所以可行的方法是评估不同维修策略的经济效益。因此,针对生产过程中设备故障后果的经济性影响,对于实施 CBM 策略的多个设备,本文根据预测的设备故障概率,利用离散事件仿真方法模拟设备运行过程,构建维修策略效益评估流程,定量评估 CBM 策略产生的经济效益,量化 CBM 策略相对于事后维修和定期维修策略的优势。

### 1 维修策略概述

CBM 的出现得益于状态监测技术的发展,使得根据设备当前状态制定维修计划成为可能。从时间上,维修策略演变主要经历事后维修、预防性维修到基于状态的维修。三种维修策略的对比如表 1 所示。

表 1 维修策略比较

维修策略	方法	优/缺点
修复性维修	设备一直运行到故障发生才修理或替换	故障发生时间和位置不可预计;停机时间长;设备故障后引起其他设备的连续损伤;故障带来安全风险
预防性维修	根据规定的间隔期来实施设备的检测/维修/替换	工作密集;库存费用高;设备很少按规定间隔发生故障,从而不能够避免故障发生;定期拆卸设备可能带来额外损伤
CBM	根据设备当前状态确定最优的维修或替换时机	便于识别故障部件;避免故障发生和提高可用度;降低维修费用;降低库存费用;改进生产质量;改进安全性

通过对比可以看出 CBM 相对于其他两种维修策略的优势,但这并不意味着 CBM 可以完全取代这两种维修策略。因为受 CBM 实现条件和适用范围的限制,CBM 策略不可能适用于所有设备。一般来说,CBM 实施需要满足的条件包括:a)设备从潜在故障到功能故障过程中存在足够长的延迟时间;b)能够根据监测的状态信息预测设备功能故障发生时间;c)预测的最长时间间隔不能小于维修准备时间,并且适用 CBM 策略的设备,其故障后果都比较严重。

因此,在实际生产过程中,考虑到 CBM 策略的局限性和复杂性,对于存在经济性故障后果且能够实施 CBM 策略的故障模式,需要量化 CBM 策略能够产生的经济效益,从而为维修决策过程中最优维修策略的选择提供依据。

### 2 维修策略效益评估流程

#### 2.1 前提假设

设备故障后产生的影响可概括为安全性影响、任务性影响和经济性影响。故障发生的必然性使得只能通过选择适合的维修策略来避免或降低以上故障影响。因此,维修策略的效益可以体现在多个方面,本文主要评估维修策略产生的经济效益,以多个设备组成的生产系统为研究对象,构建适合评估不同维修策略效益的目标函数。

在评估 CBM 策略的效益时,本文假设对于生产系统中的每一个设备,根据故障预测算法和设备历史可靠性数据能够确

定其剩余使用寿命的概率分布,如果不能获得设备随时间的故障概率,本文构建的评估方法将不能使用。

#### 2.2 基本原理

设备故障和维修安排可以看成是设备使用过程中发生的一系列离散事件,因此本文采用离散事件仿真的方法来评估不同维修策略的效益,其优势体现为:a)不需要假设设备退化过程的特征,如假设退化过程的马尔可夫性以及退化函数形式等;b)离散事件建模直观性强,能够使用多种可视化的仿真软件。本文在建模过程中,对系统状态的描述方式和决策目标函数定义如下:

##### 1) 系统状态描述

设备运行过程中会经历一系列事件,包括开机、停机、故障、维修开始、维修结束等。不同事件之间持续时间对应设备的不同状态,而这一系列状态集合可以描述生产系统的使用过程。因此系统状态可用向量描述如下:

$$S_i = \{IPR_1, IPR_2, \dots, IPR_n, CCR_1, CCR_2, \dots, CCR_m, MA\} \quad (1)$$

其中: $IPR$  表示设备的瞬时生产率; $CCR$  表示生产系统容量变化率; $MA$  为状态  $S$  下可工作的维修人员数量。 $IPR$  描述设备单位时间生产产品的数量,衡量设备生产快慢程度; $CCR$  描述生产线缓冲区容量的变化快慢。 $CCR$  与  $IPR$  直接相关,当  $CCR$  为正值时,表示缓冲区输入件数大于输出件数,导致缓冲区容量不断变小,最终导致缓冲区阻塞;当  $CCR$  为负值时,表示缓冲区输出件数大于输入件数,引起缓冲区容量不断变大,最终导致缓冲区空置。

##### 2) 决策目标函数

维修决策目标通常与使用费用或可用度相关,而可用度也可表示为停机费用的形式。对于实际生产中的设备,期望通过有效的维修安排实现经济效益的最大化,因此本文将费用和可用度目标综合为一个费用目标函数,具体表达式如下:

$$V = P - M \quad (2)$$

其中: $V$  为费用目标函数; $P$  为生产利润; $M$  为维修费用。以上目标函数根据不同的应用案例有不同的表示形式,从而可以计算不同维修策略产生的经济效益。

#### 2.3 评估框架

通过离散事件仿真来评估维修策略的效益,需要已知生产系统中各组成设备的故障概率,建立系统运行的仿真模型,从而根据决策目标函数来量化维修策略效益。具体评估流程如图 1 所示。

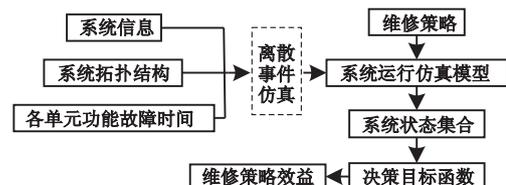


图1 维修策略效益评估基本框架

图 1 构建的评估框架中,关键是建立系统运行的仿真模型,从而根据预先设置的各单元功能故障时间分布,仿真生产过程中出现的停机、故障和维修等事件,并且在某个单元故障修理期间,所造成的产品生产中断或积压也需要在仿真模型中体现,最终通过设置仿真终止条件(如生产一定数量的产品或运转时间)进行多次仿真,根据决策目标函数获得统计意义上实施不同维修策略能够产生的效益。

### 3 案例应用

#### 3.1 案例描述

本文选择一个加工生产线为应用对象,分别评估事后维修、定期维修和 CBM 策略产生的效益。生产线总共包含 10 台设备,如图 2 所示。生产线中任何一台设备故障都会导致产品生产率下降,某些设备故障还会使整个生产线停机,从而影响产能,造成生产利润下降。

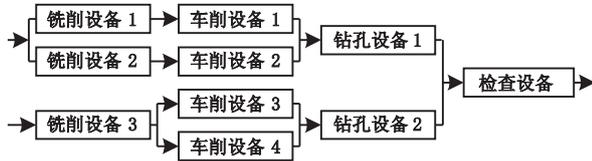


图2 生产线布局

根据每个设备故障时间分布函数和对应故障后维修时间分布函数,可以计算每个设备的故障间隔时间 (time between failure, TBF) 和修复时间 (time to repair, TTR), 其中,设备故障时间分布函数可由预测方法确定。由于本文研究的重点为维修策略效益评估,因此假设 TBF 和 TTR 服从已知的分布函数形式,具体分布参数和每个设备加工时间如表 2 所示。

表 2 设备仿真建模参数

设备名称	加工时间	TBF	TBF 方差	TTR	TTR 方差
铣削设备 1	0.8	12 000	56	72	12
铣削设备 2	0.8	12 000	56	72	12
铣削设备 3	0.6	6 000	60	60	12
车削设备 1	0.8	8 000	16	120	12
车削设备 2	0.8	8 000	16	120	12
车削设备 3	1.2	8 400	60	60	12
车削设备 4	1.2	8 400	60	60	12
钻孔设备 1	0.4	6 000	40	60	12
钻孔设备 2	0.6	9 000	90	120	12
检查设备	0.24	4 800	48	0.5	12

#### 3.2 系统仿真建模

为了在计算机上模拟上述生产线的运转情况,使用 ExtendSim 可视化仿真软件包建立仿真模型<sup>[9]</sup>。ExtendSim 仿真软件采用 C 语言开发,对离散系统进行仿真时具有较高的灵活性和可扩展性,目前已经应用到制造业、物流业、银行、金融、交通和军事等领域<sup>[10-12]</sup>。本案例使用 ExtendSim 构建的仿真模型如图 3 所示,左上角时钟形状的控制件用于调度事件发生,最上面一排和最下面一排控制件用于设置生产线所包含设备的故障时间以及相应的维修停机时间,中间的控制件构成生产线的仿真模型。

#### 3.3 决策目标函数

根据仿真模型产生的结果,构建评估维修策略效益的目标函数如下:

$$B = N \times P - (C_s \times M_s + C_u \times M_u) \quad (3)$$

其中: $N$  表示产品数量; $P$  表示生产一个产品获得的利润; $M_s$  表示实施计划维修的总时间; $C_s$  表示实施计划维修的单位时间费用; $M_u$  表示实施非计划维修的总时间; $C_u$  表示实施非计划维修的单位时间费用。计划维修指按照预定的计划在设备故障前实施的维修;非计划维修指除计划维修之外实施的维修。

#### 3.4 案例设计

为全面评估维修策略效益,通过改变目标函数中参数值和生产线结构,设计三个不同的案例。这三个案例中费用参数值设置相同,具体为  $P = 1, C_s = 100, C_u = 1000$ ;区别体现在:在案例 1 的基础上,案例 2 中非计划维修与计划维修条件下的修复时间存在差异,即实施非计划维修需要的时间比计划维修需要的时间多 50%,案例 3 中的生产线结构如图 4 所示。

#### 3.5 仿真结果

三个案例中,设定每生产 20 万个产品完成一次仿真。通过仿真可以获得 10 个设备各自维修总时间的均值和标准差,例如案例 1 中维修总时间的均值和标准差(表 3),而后依次将三个案例中仿真得出的维修总时间代入决策目标函数,计算出不同维修策略下的收益(表 4)。

表 3 案例 1 中设备维修总时间的均值和标准差

设备	均值/min	标准差/min	设备	均值/min	标准差/min
铣削设备 1	274.462 8	23.440 9	车削设备 3	297.204 1	32.021 6
铣削设备 2	291.859 3	25.180 0	车削设备 4	299.323 0	31.547 2
铣削设备 3	488.786 5	37.991 1	钻孔设备 1	472.037 5	38.337 6
车削设备 1	718.704 0	28.345 9	钻孔设备 2	595.884 6	26.854 6
车削设备 2	708.285 3	22.548 7	检查设备	293.992 4	41.838 0

表 4 不同维修策略对应的生产收益

案例	维修策略	生产收益/万元		
		均值	标准差	增加比率/%
1	事后维修	12.599 1	0.136 0	
	定期维修	18.939 0	0.153 1	50.32
	CBM	19.256 0	0.013 6	52.84
2	事后维修	8.824 9	0.118 3	
	定期维修	19.038 1	0.100 6	115.73
	CBM	19.256 0	0.013 6	118.20
3	事后维修	12.118 1	0.163 1	
	定期维修	18.855 6	0.160 3	55.60
	CBM	19.211 8	0.016 3	58.54

#### 3.6 结果分析

以上三个案例中,通过比较不同维修策略的收益可以看出,实施 CBM 策略时的效益最大,从而验证 CBM 相对于事后维修和定期维修的优势。由于设定非计划维修单位时间费用比计划维修单位时间费用高出 10 倍,而事后维修策略下产生的维修费用全为非计划维修费用,定期维修策略下的维修费用包括计划维修费用和非计划维修费用,CBM 策略下只产生计划维修费用,所以案例 1 体现了不同维修策略产生的维修费用对生产收益的影响;案例 2 中设定非计划维修时间比计划维修时间多 50%,进一步凸显计划维修的优势,因此,定期维修和 CBM 的效益均比事后维修高出一倍;案例 3 中将两个并行的车削设备合并(如图 4 所示),在新的生产布局中,车削设备 1 成为整个生产线的瓶颈,直接影响整个生产线的效益,通过与案例 1 比较可以得出三种维修策略的效益都在减少。因为在生产 20 万个产品过程中,除钻孔设备 1 外,其他生产设备故障次数都在增加,造成维修费用明显增加,因此对这些关键设备采用 CBM 更加合理。

在整个仿真过程中,定期维修和 CBM 产生的效益相差不多,主要是没有考虑维修人员数量的限制问题,即设备故障后立即能够修理,不存在维修等待时间,从而没有突出 CBM 能够根据设备状态提前安排维修的优势,这也是下一步仿真建模中需要研究的问题,即便如此,CBM 产生的效益还是最大。

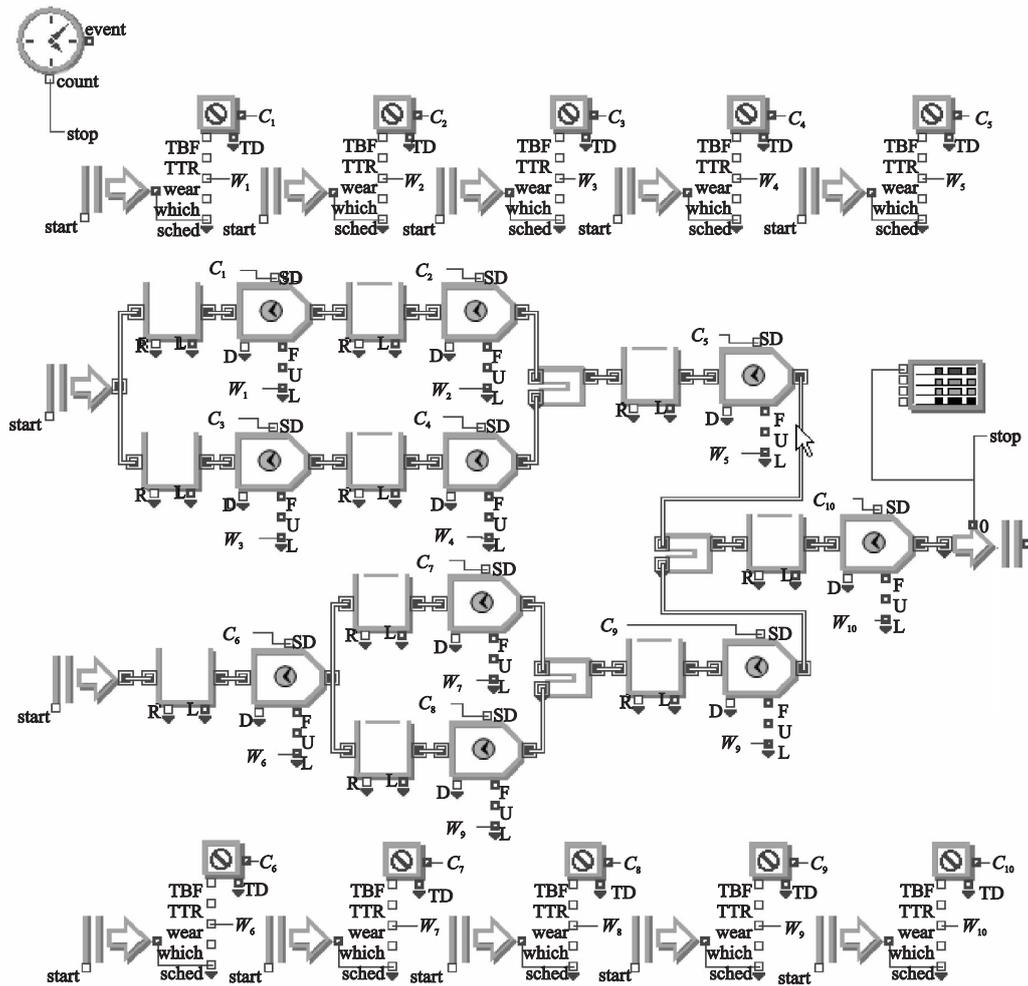


图3 生产线仿真模型

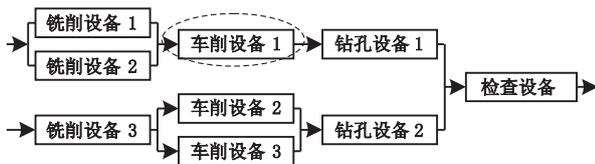


图4 案例3中的生产线布局

### 4 结束语

CBM 作为一种先进的维修策略,能够避免设备故障后的严重后果和降低设备的使用维护费用。为量化 CBM 策略产生的经济效益,本文针对实际生产过程中的设备,根据预测的设备功能故障时间,构建维修策略效益评估框架,利用 ExtendSim 可视化仿真软件包建立生产线的仿真模型,在理想情况下实现事后维修、定期维修和 CBM 三种维修策略效益的定量评估,评估结果突出了 CBM 策略的优势,从而为生产过程中最优维修策略的选择提供依据。由于本文构建的仿真模型只考虑了理想情况,即没有考虑 CBM 实施所需的初始投资(如安装传感器、监测设备等所需的费用)以及维修资源的限制(如维修人员的数量和替换备件等待时间等),这些都需要在未来的研究中加以考虑。

#### 参考文献:

[1] 甘茂治,康建设,高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京:国防工业出版社,2005.  
 [2] CAMCI F. System maintenance scheduling with prognostics information using genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Reliability, 2009,

58(3): 539-552.

[3] 陈丽.基于状态的维修模型及应用研究[D].石家庄:军械工程学院,2009.  
 [4] 桂林,武小悦. 基于离散 HSM 的故障预测模型[J]. 计算机应用研究,2008,25(11):3320-3322,3327.  
 [5] JARDINE A K S, LIN Da-ming, BANJEVIC D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2006,20(7): 1483-1510.  
 [6] BEVILACQUA M, BRAGLIA M, GABBRIELLI R. Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant[J]. Quality and Reliability Engineering International,2000,16(4): 313-324.  
 [7] BERTOLINI M, BEVILACQUA M, MASSINI R. FMECA approach to product traceability in the food industry[J]. Food Control,2006,17(2): 137-145.  
 [8] CAMCI F, BERDINYAZ A, SEVKLI B, et al. Economic analysis of condition based maintenance[J]. International Journal of Industrial Engineering,2011,18(8): 386-403.  
 [9] 秦天保,王岩峰. 面向应用的仿真建模与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2009.  
 [10] 熊健,陈英武,王栋. 武器装备体系结构可执行模型[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(5):966-970.  
 [11] 赵业清,朱道飞,王华,等. 基于分层时延 CPN 的轧钢物流系统建模[J]. 计算机工程,2011,37(1):229-231.  
 [12] 罗述全,彭锋,徐林伟. 船用柴油机部件生产线的仿真研究[J]. 船舶工程,2010,32(3):69-71.