

控制与决策

Control and Decision

基于延迟时间理论的n中取k系统检测区间模型

刘学娟, 赵斐

引用本文:

刘学娟, 赵斐. 基于延迟时间理论的n中取k系统检测区间模型[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1469–1475.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1395>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑多维修台异步多重休假的温贮备冗余系统可靠性模型

Reliability analysis for warm standby redundancy system considering multiple asynchronous vacations of multiple maintenance stations

控制与决策. 2020, 35(4): 973–984 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0946>

带启动时间和可修服务台的M/M/1/N工作休假排队系统

Analysis of M/M/1/N working vacation queuing system with setup times and repairable service station

控制与决策. 2020, 35(2): 319–328 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0762>

考虑老化因素的串联系统不完全维修决策优化

Optimal maintenance policies for series systems under imperfect repair considering aging factor

控制与决策. 2019, 34(4): 827–833 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1375>

考虑维修优先权的多状态温贮备系统可靠性模型

Reliability analysis for multi-state warm standby system with repair priority

控制与决策. 2018, 33(11): 2029–2036 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0718>

考虑劣化状态的单机调度与维修决策集成模型

Integrated model of single-machine scheduling and maintenance decision for degrading state systems

控制与决策. 2016(3): 513–520 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1861>

基于延迟时间理论的 n 中取 k 系统检测区间模型

刘学娟^{1†}, 赵 斐²

(1. 北京科技大学 东凌经济管理学院, 北京 100083; 2. 东北大学秦皇岛分校 管理学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 延迟时间理论广泛应用于系统维修领域,能够更为细致和准确地反映系统的运行状态. 不同于一般维修理论只用一个阶段描述系统的故障过程,该理论将系统的故障过程分为两个阶段:正常阶段和缺陷运行阶段. 系统部件的状态有正常、缺陷和故障 3 种情况. 延迟时间理论主要应用于单部件系统和串联系统的维修和检测,目前尚未应用于 n 中取 k 系统. 对此,运用延迟时间理论确定 n 中取 k 系统的最优维修检测区间,分别针对两种情况进行分析:一种是系统中部件的初始缺陷发生时间服从指数分布的情况,一种是其服从非指数分布的情况. 建立单位时间维修费用模型和设计仿真过程,以单位时间维修费用最小为目标进行优化,求解系统的最优维修检测区间. 最后通过数值案例表明所提出方法的有效性.

关键词: n 中取 k 系统; 延迟时间; 预防性维修; 更新理论; 仿真; 检测周期

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A

Delay-time-based inspection model for k -out-of- n systems

LIU Xue-juan^{1†}, ZHAO Fei²

(1. Donlinks School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Management, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The delay-time concept has been extensively applied in the field of maintenance. Unlike traditional maintenance policy only considers one-stage system failure process, the delay-time concept defines a two-stage system failure process: the normal stage from new to an initial defect and the following delay-time stage from this defective point to failure. Previous works using delay-time concept have mainly focused on single-component systems and multi-component systems with a series configuration, however, have not been applied to k -out-of- n systems. Therefore, this paper proposes a delay-time-based inspection model for k -out-of- n systems and study the optimal inspection interval that minimizes the long-term expected cost per unit time. Both exponential and non-exponential distributions for the time-to-defect of the components are considered. Numerical examples are presented to illustrate the effectiveness of the proposed model.

Keywords: k -out-of- n system; delay time; preventive maintenance; renewal theory; simulation; inspection interval

0 引 言

企业的生产运作过程中,预防性维修是设备健康管理的一个重要组成部分,即设备维修人员定期或不定期地对设备进行检测、维护或维修以保障其正常运转^[1]. 其中检测活动是预防性维修管理中的重要内容,即通过对设备的状态进行检查进而为维修提供决策支持. 有研究表明,预防性维修活动中约 80% 的任务都是由检测识别并解决的,由于检测区间过长或者过短都会引起维修不足或过度维修等不良影响,确定合理的检测区间对设备的维护及企业的良好运营都有着至关重要的作用^[2-3]. 延迟时间理论

在确定设备的检测区间方面应用广泛,其概念由英国 Salford 大学的 Christer 教授在 1973 年提出^[4]. 延迟时间理论把系统的故障过程分为两个阶段:正常使用阶段,从部件的最初使用时间来部件发生缺陷;缺陷运行阶段,从部件的初始缺陷点到部件发生故障,此阶段时间长度为延迟时间. 在这两个阶段中,部件共有 3 种状态:正常状态、缺陷状态和故障状态. 如果在延迟时间阶段对部件进行检测,则部件的缺陷会被发现并进行维修或更换,避免故障的发生^[4-5]. 目前,延迟时间理论在系统检测方面的运用主要集中于两类系统:单部件系统^[6-7]和由多个部件组成的串联系

收稿日期: 2018-10-14; 修回日期: 2019-01-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71601019, 71701038); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-BD-18-009A, FRF-TP-18-006A2).

责任编辑: 刘民.

[†]通讯作者. E-mail: liuxj@ustb.edu.cn.

统^[8-10]. 而 n 中取 k 系统在实际中也是存在的^[11], 如冗余机器人系统^[12]等. 运用延迟时间理论确定 n 中取 k 系统的检测周期仅见 Lu 等^[13]对 2 中取 1 冷备份系统进行了分析, 但该研究从建模到案例运算, 限制了系统为 2 中取 1 的冷备份系统, 系统部件一个运行一个冷备份, 没有扩展到任意部件个数, 且与本文所研究的 n 中取 k 系统不是一类系统.

本文所研究的 n 中取 k 系统由 Kontoleon 于 1980 年首次提出, 并用于对石油管道、电信系统、计算机环网络和空间中继站系统进行建模^[14]. 该系统由 n 个相同部件按照线性或环形方式组成, 如果系统中至少 k 个部件正常运转(或发生故障), 则系统正常运转(或发生故障). 目前, 关于 n 中取 k 系统的研究主要集中在可靠性计算的领域^[15-16], 而关于 n 中取 k 系统预防性检测维修的研究则较少. 如 Sheu 等^[17]以最小化单位维修时间为目标, 对 n 中取 k 系统建立了基于役龄更换的维修策略模型. Ushakumari 等^[18]基于 $\max(N, T)$ 策略建立了 n 中取 k 系统的维修策略模型, 即系统役龄到达 T 且失效部件数达到 N 时, 开始对失效部件进行更新. 王莹等^[19]针对 n 中取 k 系统故障率和维护成本随年龄增加而增加的现象, 提出了两阶段维护策略: 在第 1 阶段, 对发生的一切故障采用最小维护处理; 在第 2 阶段, 对第 1 类故障不做处理, 当发生第 2 类故障时通过替换使系统恢复正常, 若到达预防维护周期时仍无第 2 类故障发生, 则对系统进行预防性维护. 不同于延迟时间理论中两阶段故障过程的描述, 以上研究对于系统中部件故障过程的描述都是单阶段的, 即部件只有正常和故障两种状态.

本文对 n 中取 k 系统的维修检测区间进行研究, 运用延迟时间理论描述系统中部件的故障过程, 分别针对两种情况展开分析: 一种是系统中部件的初始缺陷发生时间服从指数分布的情况, 这种情况下系统有故障更新和检测更新, 即当系统中有 $n - k + 1$ 个部件发生故障时会导致系统故障, 需要对系统进行更新, 检测更新是基于指数分布的无记忆性, 在检测点检测时, 对缺陷和故障部件进行更新, 则系统更新, 此时, 部件故障数小于 $n - k + 1$; 另一种是系统中部件的初始缺陷发生时间服从非指数分布的情况, 当系统中有 $n - k + 1$ 个部件发生故障时仍对系统进行故障更新, 但检测更新是在检测到部件的故障和缺陷数量大于等于 $n - k + 1$ 时进行, 此时, 部件故障数小于 $n - k + 1$. 针对以上两种情况, 运用更新回报定理, 分别建立单位时间维修费用模型和设计模拟仿真流程, 以单位时间维修费用最小为目标, 求得对 n 中取 k 系

统的最优维修检测周期.

综上所述, 在以往的相关研究中, 尚未见到延迟时间理论在 n 中取 k 系统中的应用. 本文的创新点在于: 运用延迟时间理论分两阶段描述 n 中取 k 系统中部件的故障过程, 并确定 n 中取 k 系统的最优维修检测区间, 同时建立仿真流程进行模拟. 最后通过数值案例说明本文方法的具体应用.

1 主要符号说明及假设条件

1.1 主要符号说明

- n : 系统中部件数量;
- U : 部件的缺陷发生时间;
- H : 延迟时间;
- $X = U + H$: 部件发生故障的时间;
- $g(u)$: 缺陷发生时间的概率密度函数;
- $F(h)$: 延迟时间的累积分布函数;
- T : 检测区间长度;
- k : 系统运行所需最少的非故障部件数量;
- $f(h)$: 延迟时间的概率密度函数;
- C_s : 单部件检测费用;
- C_d : 单部件缺陷更新费用;
- C_f : 单部件故障更新费用;
- C_m : 系统故障停机的处理费用.

1.2 假设条件

- 1) 系统中各部件之间独立同分布;
- 2) 检测是周期性的且完美的, 即在检测时如果部件有缺陷或故障则一定能被发现;
- 3) 部件的缺陷或故障一旦被检测到, 就会通过更换和维修进行更新;
- 4) 检测是针对系统的, 即各个部件的检测时间相同;
- 5) 检测可以在系统运行中进行, 而部件的维修或更换需在系统停机时进行;
- 6) 如果在两次相邻的检测之间, 即某一检测区间内, 有 $n - k + 1$ 个部件同时或相继发生故障, 则系统发生故障并停机(多于 $n - k + 1$ 个部件同时或相继发生故障的情况不存在).

注 1 假设条件 1)~假设条件 3) 常用在系统维修及可靠性研究中, 具有普适性. 其中: 假设条件 1) 也可根据研究问题的需要进行非独立性质的扩充; 关于假设条件 2), 周期性的检测在相关研究以及实际中是常见的, 易于对系统进行管理, 检测有完美及不完美的情况, 本文选择完美的情况进行研究. 假设条件 4) 是常见的一种整体式的(block-based)检测方式; 假设条件 5) 与实际情况相符合; 假设条件 6) 是基于本文 n 中取 k 系统的性质而设定的.

2 模型及仿真

2.1 情况1: 部件的缺陷发生时间服从指数分布

指数分布具有“无记忆性”特点,在系统的可靠性研究以及文中所涉及的延迟时间理论研究中较为常见.在实际中,有些部件或者系统在正常运行的状态下无法或者很难检测出其所处于什么样的退化状态,除非发生了缺陷或者故障才会被发现并更换^[4],尤其是电子元器件的检测方面,如冗余电源系统、磁盘阵列系统等,其部件的缺陷发生时间运用指数分布进行描述比较合理.

当部件的缺陷发生时间服从指数分布时,基于

其“无记忆性”的特点及假设条件3)可知,所有的部件在检测时就会更新,即系统更新,检测周期为 T . 在检测时,系统及部件所有可能的状态如表1所示.其中: n_1 表示正常部件的数量, n_2 表示缺陷部件的数量, n_3 表示故障部件的数量.当系统中有 $n - k + 1$ 个部件发生故障时,系统将故障停机,需要对系统进行更新,系统中部件的故障数量大于 $n - k + 1$ 的情况不存在;其他情况为对系统进行检测更新,状态数量部分是用3个组合相乘的形式进行描述,3个组合分别对应系统的正常、缺陷和故障几种状态,组合乘积表示系统的状态数量.

表1 系统和部件在检测点的状态组合

更新状态	系统状态	n_1 (正常)	n_2 (缺陷)	n_3 (故障)	状态数量
	系统有0个部件故障	n	0	0	$C_n^n C_0^0 C_0^0$
		$n-1$	1	0	$C_n^{n-1} C_1^1 C_0^0$
		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
		0	n	0	$C_n^0 C_n^n C_0^0$
检测更新	系统有1个部件故障	$n-1$	0	1	$C_n^{n-1} C_0^0 C_1^1$
		$n-2$	1	1	$C_n^{n-2} C_2^2 C_1^1$
		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
		0	$n-1$	1	$C_n^0 C_{n-1}^{n-1} C_1^1$
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	系统有 $(n - k)$ 个部件故障	k	0	$n - k$	$C_n^k C_{n-k}^0 C_{n-k}^{n-k}$
		$k-1$	1	$n - k$	$C_n^{k-1} C_{n-(k-1)}^1 C_{n-k}^{n-k}$
		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
		0	k	$n - k$	$C_n^0 C_n^k C_{n-k}^{n-k}$
故障更新	系统有 $n - k + 1$ 个部件故障, 系统故障停机	$k-1$	0	$n - k + 1$	$C_n^{k-1} C_{n-(k-1)}^0 C_{n-(k-1)}^{n-(k-1)}$
		$k-2$	1	$n - k + 1$	$C_n^{k-2} C_{n-(k-2)}^1 C_{n-(k-1)}^{n-(k-1)}$
		\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
		0	$k-1$	$n - k + 1$	$C_n^0 C_n^{k-1} C_{n-(k-1)}^{n-(k-1)}$

由延迟时间理论可知,部件在检测点 T 被检测到处于正常状态的概率为 $P(U \geq T) = \int_T^\infty g(u)du$, 被检测到处于缺陷状态的概率为 $P(U < T \cap X \geq T) = \int_0^T g(u)[1 - F(T - u)]du$, 而在检测区间 $(0, T]$ 内部件发生故障的概率为 $P(X < T) = \int_0^T g(u) \times F(T - u)du$ ^[4]. 所以,结合表1可知,检测更新情况下的期望周期费用为

$$E(C_1) = \sum (n C_S + n_2 C_d + n_3 C_f) C_n^{n_1} C_{n-n_1}^{n_2} C_{n_3}^{n_3} \times \left[\int_T^\infty g(u)du \right]^{n_1} \left[\int_0^T g(u)[1 - F(T - u)]du \right]^{n_2} \times \left[\int_0^T g(u)F(T - u)du \right]^{n_3} \quad (1)$$

其中:“ \sum ”满足 $n_1 + n_2 + n_3 = n, n_3 \leq n - k$. 故障更新情况下的期望周期费用为

$$E(C_2) =$$

$$\sum_{i=1}^k [(i-1)C_d + (n-k+1)C_f + C_m] \times C_n^{k-i} C_{n-(k-i)}^{i-1} C_{n-(k-1)}^{n-(k-1)} \left[\int_0^T g(u)[1 - F(T - u)]du \right]^{(i-1)} \left[\int_T^\infty g(u)du \right]^{(k-i)} \left[\int_0^T g(u)F(T - u)du \right]^{(n-k+1)} \quad (2)$$

所以,系统更新总的期望周期费用为

$$E(C) = E(C_1) + E(C_2) \quad (3)$$

由式(1)可得检测更新情况下的期望更新周期长度为

$$E(L_1) = \sum T C_n^{n_1} C_{n-n_1}^{n_2} C_{n_3}^{n_3} \times \left[\int_T^\infty g(u)du \right]^{n_1} \left[\int_0^T g(u)[1 - F(T - u)]du \right]^{n_2} \times$$

$$\left[\int_0^T g(u)F(T-u)du \right]^{n_3}. \tag{4}$$

故障更新情况下,更新时刻不一定为 T 时刻,应为检测区间 $(0, T)$ 内的某个时刻,记为 t .由式(2),令

$$P(t) = \left[\int_t^\infty g(u)du \right]^{(k-i)} \left[\int_0^t g(u)[1-F(t-u)]du \right]^{(i-1)} \times \left[\int_0^t g(u)F(t-u)du \right]^{(n-k+1)},$$

可知故障更新情况下的期望更新周期长度为

$$E(L_2) = \sum_{i=1}^k C_n^{k-i} C_{n-(k-i)}^{i-1} C_{n-(k-1)}^{n-(k-1)} \times \left(TP(T) - \int_0^T P(t)dt \right), \tag{5}$$

其中

$$\begin{aligned} & \left(TP(T) - \int_0^T P(t)dt \right) = \\ & T \left[\int_T^\infty g(u)du \right]^{(k-i)} \left[\int_0^T g(u)[1-F(t-u)]du \right]^{(i-1)} \left[\int_0^T g(u)F(t-u)du \right]^{(n-k+1)} - \\ & \int_0^T \left(\left[\int_t^\infty g(u)du \right]^{(k-i)} \left[\int_0^t g(u)[1-F(t-u)]du \right]^{(i-1)} \left[\int_0^t g(u)F(t-u)du \right]^{(n-k+1)} \right) dt. \end{aligned}$$

所以,系统更新总的期望周期长度为

$$E(L) = E(L_1) + E(L_2). \tag{6}$$

综上,由更新回报定理^[20]可知,当部件的缺陷发生时间服从指数分布时,系统的单位时间期望维修费用为

$$C(T) = \frac{E(C)}{E(L)}. \tag{7}$$

2.2 情况2: 部件的缺陷发生时间服从非指数分布

部件缺陷发生时间服从非指数分布的情况在实际中比较常见,主要应用于能够检测到部件退化状态的系统中.如:炼钢厂的转炉除尘风机系统,通过检测风机转子的振幅情况,可以了解转子是否需要更换;文献[21]中案例部分的水泵系统,通过检测齿轮的振动可以掌握水泵所处的状态并制定相应的维修措施.

当系统中部件的缺陷发生时间服从非指数分布时,系统也有故障更新和检测更新两种情况.系统的故障更新同样是当系统中有 $n-k+1$ 个部件发生故障时,系统故障停机;系统的检测更新本文假设当在某个检测点发现缺陷和故障的部件数量大于等于 $n-k+1$ 时进行,此时,系统并未因故障停机,部件的故障数小于 $n-k+1$,但为了避免系统故障停机的发生,应对系统进行预防性维修使其更新.

本节非指数分布的情况相对于2.1节中指数分

布的情况要复杂得多,非指数分布不再具有无记忆性,即使在检测时发现部件正常运转,部件也已经不处于更新状态,所以,系统的更新可能要经过若干个检测周期.如图1是一个系统检测更新的例子,有 $n-k+1$ 个部件在 iT 时刻检测时处于缺陷或者故障状态,其他部件正常,此时,需要在 iT 时刻对系统进行更新.而在 iT 时刻之前,系统未发生故障,每次检测时缺陷和故障的部件总数小于 $n-k+1$,但每个部件都可能发生了若干次故障以及被检测到有缺陷而被更新,各种可能的情况数量庞大,达到指数级,此时,已不适合建立模型求解系统的最优检测间隔区间.所以,对于系统中部件的缺陷发生时间服从非指数分布的情况,本文运用模拟仿真的方法对最优检测间隔区间进行分析.

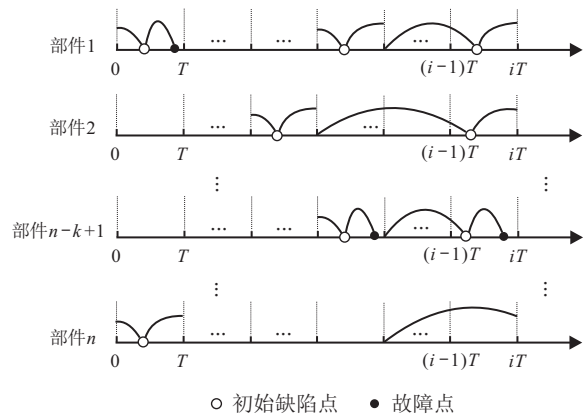


图1 系统检测更新举例

根据系统故障更新和检测更新的规则,设计系统检测的模拟流程,见图2,主要步骤如下.

step 1: 初始设置(见图2(a)).

- 1) 对系统进行初始化并输入相关参数值;
- 2) 设置检测区间 T 合理的取值范围;
- 3) 对于每个 T 值,都进行 J 次模拟;
- 4) 每次模拟之初,维修总费用 C_T 和系统更新总长度 L 设置为0.

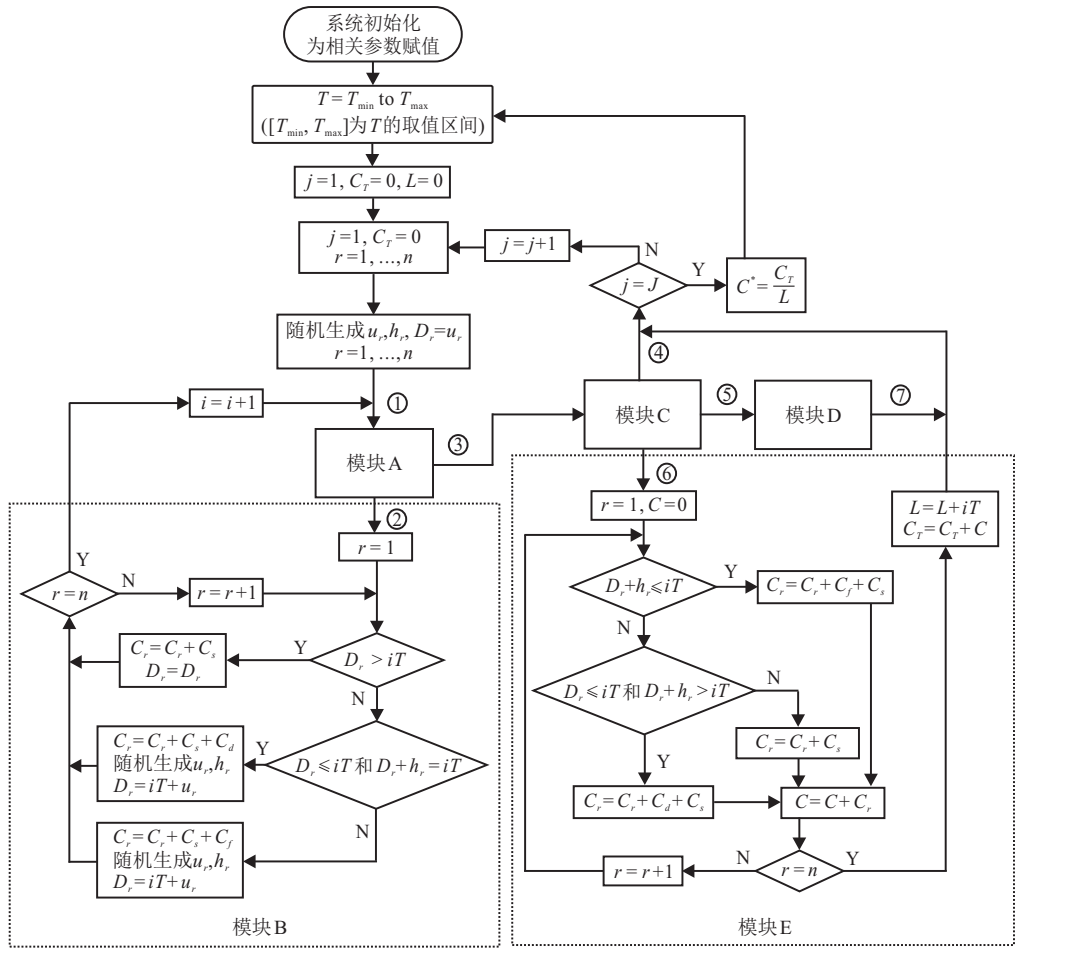
step 2: 开始模拟.

1) 每次模拟对每个部件均按相关分布及参数随机生成初始缺陷点 u 和延迟时间 h .

2) 通过模块A判断初始缺陷点 u 落入 iT 内的数量 N_1 是否大于等于 $n-k+1$,见图2(b).若否,则说明系统还未达到需要进行故障或者检测更新的状态,通过模块B继续下一个检测时点的判断;若是,则说明系统达到了需要更新的状态,转入模块C.

step 3: 系统更新方式判断.

模块C用来判断系统需要进行哪种更新,见图2(c).



(a) 主流程

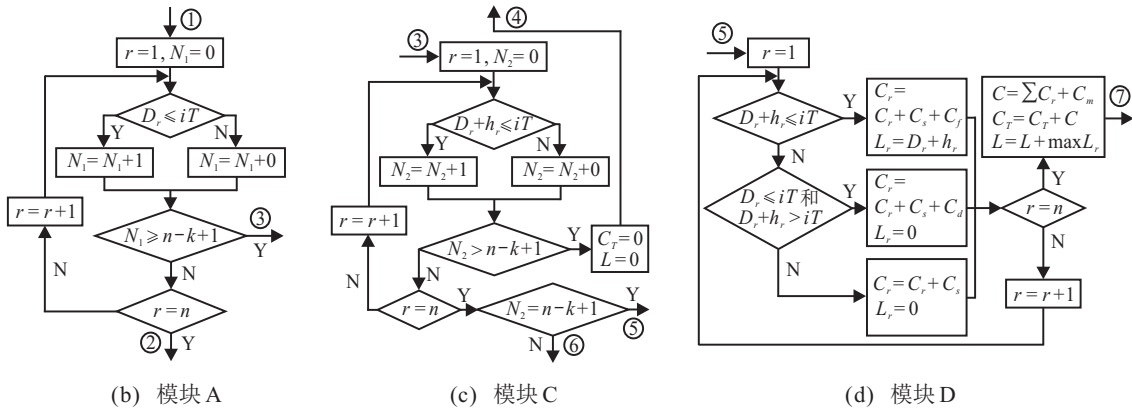


图2 系统检测模拟流程

1) 将实际中不存在的情况剔除,即故障的部件数量大于 $n - k + 1$ 的情况,此时,不计算维修费用和系统更新长度。

2) 判断系统需要故障更新还是检测更新,如果满足故障更新条件,即故障部件数量为 $n - k + 1$,则转入模块D; 否则为检测更新情况,转入模块E。

step 4: 故障更新情况。

见图2(d), 模块D中对每个部件计算检测费用和系统更新长度,并将费用合并为总费用,选择最后故障部件的故障点为系统更新点,得出系统更新长度。

step 5: 检测更新情况。

模块E对应于系统检测更新的情形,对每个部件计算相关的检测费用并对费用进行合并,而系统更新的长度为 iT 。

step 6: 模拟完成。

无论是故障更新还是检测更新,通过模块D或者模块E完成一次更新后,记录 C_T 和 L ,一次模拟完成。如果还未达到设定的模拟次数,则进行下一次模拟。当所有模拟完成后,分别得到加总后的每次模拟的 C_T 和 L ,进而可得到单位时间维修费用,而最小的

单位时间维修费用所对应的 T 即为最优检测区间。

3 数值案例

本节以3中取2系统为例,即对于 $n = 3$ 个部件的系统,至少需要 $k = 2$ 个部件运转系统才能运转,如果两个部件故障,则系统故障,并假设部件的延迟时间服从指数分布,此假设已被实际数据证明了其合理性^[4,8]。

文中案例选择Matlab软件进行计算,由于所建立模型的复杂性,无法求得解析解,基于在实际应用中,维修检测区间长度有限,可以结合所分析的系统,给定一个可能的检测区间的取值范围以及时间单位,在此范围内,遍历各个检测区间取值并求解相应的单位时间期望费用,选取最小的单位时间期望费用所对应的检测区间为最优检测区间。这种数值求解方法不仅仅适用于本案例,具有普适性。

3.1 数值案例1——部件的初始缺陷发生时间服从指数分布

设3中取2系统中部件的初始缺陷发生时间服从参数为 λ_u 的指数分布,延迟时间服从参数为 λ_h 的指数分布,费用单位为“元”,时间单位为“天”,相关参数取值如表2所示。

表2 相关参数取值

λ_u	λ_h	C_s	C_d	C_f	C_m
0.015	0.03	50	200	200	1000

取检测区间 T 的长度为15~35,步长为1,由式(1)~(7)和表2中的参数取值,计算得出单位时间期望维修费用,如图3所示。可见,当检测区间长度为22天时,单位时间期望维修费最小,为8.715元,所以,最优解为 $C(22) = 8.715$ 。即每隔22个单位时间对系统进行检测并实施预防性维修为最优策略。

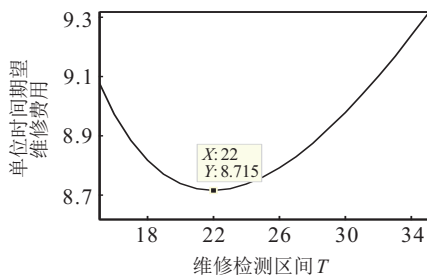


图3 数值案例1计算结果

最优检测区间的结果会受到参数值大小的影响,当参数值变动时,最优检测区间 T 值也会发生变化。以 C_m 为例进行敏感性分析,其他参数值不变,结果如图4所示。当 C_m 取值分别为600、800、1000、1200和1400时,检测区间 T 的最优解分别为 $C(25)$

$= 8.507, C(23) = 8.619, C(22) = 8.715, C(21) = 8.8, C(20) = 8.878$,可见最优检测区间随着 C_m 的增大而变小,说明随着系统故障处理费用的增加,需要相应缩短检测区间的长度才能更好地保障系统的运行以及减少系统故障带来的损失。

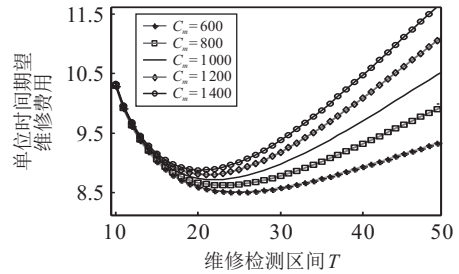


图4 对 C_m 进行敏感性分析的结果

3.2 数值案例2——部件的初始缺陷发生时间服从非指数分布

由于威布尔分布具有较好的拟合性,在延迟时间理论中得到广泛的应用^[21-22]。设3中取2系统中部件的初始缺陷发生时间服从威布尔分布,威布尔分布的概率密度函数如下式所示:

$$f(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha\beta(\alpha x)^{(\beta-1)}e^{-(\alpha x)^\beta}, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

其中: x 为随机变量, α 和 β 为威布尔分布的参数。

分别设 $\alpha = 0.04$ 和 $\beta = 1.42$,延迟时间及费用参数见表2,取模拟次数 $J = 50000$,检测区间 T 的取值范围为10~30,运用2.2节的模拟流程进行运算,可得模拟结果如图5所示,最优检测区间及费用为 $C(18) = 11.1$ 。

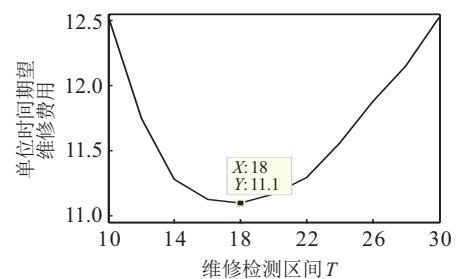


图5 数值案例2模拟结果

4 结论

运用延迟时间理论分别针对两种情况确定 n 中取 k 系统的最优维修检测区间:一种情况是系统的初始缺陷时间服从指数分布,基于更新回报原理建立了单位时间维修费用模型;一种是非指数分布的情况,鉴于其复杂性,设计了计算单位时间维修费用的模拟仿真流程。最后分别针对两种情况进行数值运算,得出了系统的最优维修检测区间,并运用灵敏度分析表明了相关参数变动对结果的影响。文中的模型和仿

真流程为使用 n 中取 k 系统的企业提供了一种新的确定检测区间的方法,也使延迟时间理论有了更进一步的运用.当然,文中假设系统中各部件是相互独立的.进一步的研究需要放松此假设,各部件之间不再相互独立,如单个部件的故障可以增加其他运行部件的故障率等等.

参考文献(References)

- [1] Wang W. Models of inspection, routine Service, and replacement for a serviceable one-component system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 116(8): 57-63.
- [2] 刘学娟, 赵斐, 马晓洋. 考虑生产率调整的多产品EPQ与设备维修整合模型[J]. 系统工程学报, 2018, 33(1): 136-144.
(Liu X J, Zhao F, Ma X Y. Integrated EPQ and maintenance model for a multi-product production system with varying production rate[J]. Journal of Systems Engineering, 2018, 33(1): 136-144.)
- [3] 吕文元, 郑睿. 基于时间延迟的维修类型组合优化模型及案例分析[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(7): 1654-1660.
(Lv W Y, Zheng R. Delay-time-based model of optimization grouping maintenance type and case study[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(7): 1654-1660.)
- [4] Wang W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modeling[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2012, 106(1): 165-178.
- [5] Liu X, Wang W, Peng R, et al. A delay-time-based inspection model for parallel systems[J]. Journal of Risk and Reliability, 2015, 229(6): 556-567.
- [6] 王文彬, 赵斐, 彭锐. 基于三阶段故障过程的多重点检策略优化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(1): 223-232.
(Wang W B, Zhao F, Peng R. Modeling of the optimal multiple inspection policy based on a three-stage failure process[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(1): 223-232.)
- [7] Zhao Fei, Liu Xue-juan, Peng Rui. Inspection-based policy considering human errors for three-stage delay time degradation systems[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2018, 23(5): 702-706.
- [8] Wang W, Banjevic D. Ergodicity of forward times of the renewal process in a block-based inspection model using the delay time concept[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2012, 100(1): 1-7.
- [9] Liu X, Wang W, Peng R. An integrated production, inventory and preventive maintenance model for a multi-product production system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 137(1): 76-86.
- [10] 刘学娟, 赵斐, 马晓洋. 多产品生产计划与非周期预防性维修整合优化模型[J]. 中国管理科学, 2017, 25(11): 189-196.
(Liu X J, Zhao F, Ma X Y. Joint optimal multi-product production and non-cyclical preventive maintenance planning model[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(11): 189-196.)
- [11] 杨光红, 张志慧. 基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 769-781.
(Yang G H, Zhang Z H. Review if interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 769-781.)
- [12] 王连圭, 马保离. 冗余机器人系统的自运动控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 199-202.
(Wang L G, Ma B L. Self-motion control of redundant manipulators[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 199-202.)
- [13] Lu X, Wang W, Yang H, et al. Optimizing the periodic inspection interval for a 1-out-of-2 cold standby system using the delay-time concept[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2012, 28(6): 648-662.
- [14] Papastavridis S G, Koutras M V. Consecutive k -out-of- n systems with maintenance[J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 1992, 44(4): 605-612.
- [15] Yuan L, Cui Z. Reliability analysis for the consecutive k -out-of- n : F system with repairmen taking multiple vacations[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(7): 4685-4697.
- [16] Salehi E T, Asadi M, Eryilmaz S. Reliability analysis of consecutive k -out-of- n systems with non-identical components lifetimes[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2011, 141(8): 2920-2932.
- [17] Sheu S H, Chien Y H. Optimal age-replacement policy of a system subject to shocks with random lead-time[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 159(1): 132-144.
- [18] Ushakumari P V, Krishnamoorthy A. k -out-of- n system with repair: The max (N, T) policy[J]. Performance Evaluation, 2004, 57(1): 221-234.
- [19] 王莹, 潘尔顺, 王凯. 面向 k -out-of- n : F 系统的两阶段周期维护策略研究[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(1): 70-73.
(Wang Y, Pan E S, Wang K. Two-phase maintenance periodic policy research based on k -out-of- n : F system[J]. Industrial Engineering and Management, 2011, 16(1): 70-73.)
- [20] Ross S M. Introduction to probability models[M]. Burlington: Elsevier, 2007: 439-446.
- [21] Wang W. An inspection model based on three-stage failure process[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96(7): 838-848.
- [22] Murthy D N P, Xie M, Jiang R. Weibull models[M]. New Jersey: Wiley, 2004: 9-15.

作者简介

刘学娟(1982—),女,讲师,博士,从事设备可靠性、设备维修、寿命预测的研究, E-mail: liuxj@ustb.edu.cn;

赵斐(1984—),女,副教授,博士,从事设备可靠性、设备维修与备件管理等研究, E-mail: zhaofei@neuq.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)