

交通装备售后绩效保障系统控制策略研究

刘基良¹, 刘名武², 张旭²

(1. 西南民族大学 预科教育学院, 成都 610041; 2. 重庆交通大学 管理学院, 重庆 400074)

摘要: 针对装备售后保障逐渐向绩效保障模式转变的趋势, 文章研究绩效模式下的交通装备售后保障系统控制策略, 分析部件损耗特征并给出不同模拟情境下的最优控制策略; 首先, 从仓库备件库存出发推导出备件库存水平状态概率分布, 并获得如可用度等系统绩效性能指标, 然后, 建立绩效约束的保障系统优化模型并设计出有效的遗传算法; 最后, 进行数值实验; 结果表明, 平均故障间隔时间对保障系统控制策略的影响大, 而备件可修复率对保障系统控制策略的影响较小。

关键词: 交通装备; 绩效保障; 遗传算法; 备件

Control Polices on After-sale Performance-based Support System for Transportation Equipment

Liu Jiliang¹, Liu Mingwu², Zhang Xu²

(1. Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China; 2. China School of Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: After-sales support of equipments has the trend of shifting to the performance-based support pattern gradually. This paper studies control polices on transportation equipment support system under performance-based contract, analyzes the spare parts loss characteristics and presents the optimal control polices in different simulation situations. Firstly, the steady-state probability distributions of inventory level at spare parts warehouse are derived and several important performance measures are obtained, such as system availability. Then an optimization model with performance constrained is setup and an efficient genetic algorithm is proposed. Finally, several numerical experiments are performed. The results shown that the average time between failures has much more effect on the optimal control strategy than the repair rate of the spare parts.

Keywords: transportation equipment; performance-based contract; genetic algorithm; spare parts

0 引言

近年来, 我国轨道交通发展迅速, 交通装备保有量迅速增长, 相应的检修、维修更换等保障工作成为轨道交通发展面临的重要问题。交通装备属于典型的资本、技术密集型产品, 其构成复杂, 单个部件价格高昂, 维修技术难度大, 且部件故障呈现随机性特点。一旦关键部件发生故障, 就会导致整个装备系统停止工作, 造成重要损失。备件储备量和维修能力都关系到保障能力。传统的装备保障侧重于备件管理和维修调度研究^[1-2], 但缺乏对保障服务供应商的有效激励^[3]。装备的售后保障模式已经逐渐转向绩效保障^[4]。针对这一发展趋势, 本文研究绩效保障下的部件损耗特征对交通装备保障系统的影响, 揭示不同情境下的保障系统控制策略。

1 模型描述与分析

有 N 套独立装备, 其中核心部件故障部分可修。当部件发生故障时, 立即进行更换, 将更换下的故障部件进行检测, 检测结果为可修和不可修两类。可修的故障部件送至维修站进

修复, 如果故障部件不可修复, 立即采购新部件进行补充, 采购的新部件和修复的部件均存入仓库备用。如图 1 所示。1) N 套装备的核心部件故障发生时相互独立的, 且服从参数为 λ 的 Poisson 分布; 2) 故障部件更换和检测时间相对于采购新部件或修复来说较短, 可忽略不计; 3) 故障部件可修复概率为 α , 备件损耗率为 $1-\alpha$; 4) 维修站设有一个维修台, 可修复的故障部件修复时间服从参数为 u_1 的负指数分布, 当故障部件进入维修站时, 维修工作台如果空闲, 则立即进行修复, 否则按先后顺序进行排队; 5) 新部件采购前置时间服从参数为 u_2 的 Poisson 分布; 6) 仓库的初始备件库存量为 s , 备件在存储期间不会发生故障。令 μ 表示仓库备件到达强度, 则 $\mu = \alpha u_1 + (1-\alpha)u_2, (0 \leq \alpha \leq 1)$ 。

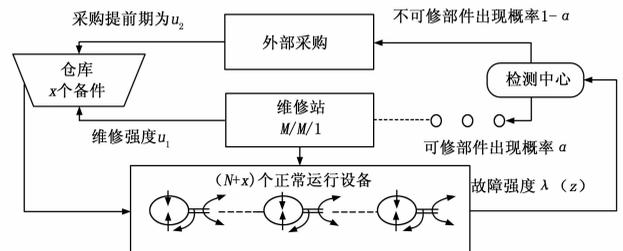


图 1 交通装备保障系统

用 $x(-N \leq x \leq s)$ 表示仓库的备件库存水平。其中, x 取负值表示的是当前仓库备件缺货的数量。用 y 来表示维修车间

收稿日期:2014-04-09; 修回日期:2014-05-30。

基金项目:中国博士后科学基金(2013M542269);西南民族大学中央高校专项资金(13NZYTD21);国家社科基金(13CGL151)。

作者简介:刘基良(1977-),男,讲师,主要从事随机系统建模方向的研究。

刘名武(1979-),男,博士,副教授,主要从事运筹学方向的研究。

内故障备件数量, 当仓库备件库存水平为 x 时, 故障部件 $y = s - x$ 。用 z 表示正在运行的系统数量, 则部件故障强度为 λz 。平稳状态下, 备件库存水平状态空间为 $E = \{-N, -N + 1, \dots, 0, 1, \dots, s - 1, s\}$ 。令 $N(t)$ 表示在时刻 t 系统所处的状态, 则有:

$$p_{i,i-1}(\Delta t) = P\{N(t + \Delta t) = i - 1 \mid N(t) = i\} = (N + i)\lambda\Delta t + o(\Delta t), (i = -1, \dots, -N + 1) \quad (1)$$

$$p_{i,i-1}(\Delta t) = P\{N(t + \Delta t) = i - 1 \mid N(t) = i\} = N\Delta t + o(\Delta t), (i = 0, 1, 2, \dots, s) \quad (2)$$

$$p_{i,i+1}(\Delta t) = P\{N(t + \Delta t) = i + 1 \mid N(t) = i\} = \mu\Delta t + o(\Delta t), (i = -N, 1, 2, \dots, s - 1) \quad (3)$$

$$p_{i,j}(\Delta t) = P\{N(t + \Delta t) = j \mid N(t) = i\} = o(\Delta t), (|i - j| \geq 2) \quad (4)$$

其状态转移如图 2 所示。

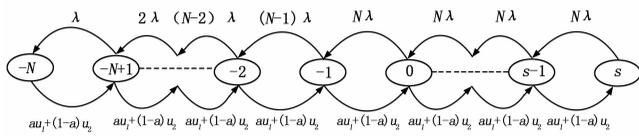


图 2 备件库存水平状态转移图

2 系统稳态指标

2.1 备件库存水平稳态概率分布

记 $P_x (x = -N, \dots, s)$ 为长期平稳状态下的备件库存水平状态概率分布。定理 1 给出了备件库存水平稳态概率分布。

定理 1: 长期平稳状态下, 备件库存水平状态的稳态概率分布为:

$$P_{-N} = [1 + \sum_{x=-N+1}^{-1} \varphi^{(N+x)} / (N+x)! + \sum_{x=0}^s \varphi^{(N+x)} / N! N^x]^{-1} \quad (5)$$

$$P_x = [\varphi^{(N+x)} / (N+x)!] P_{-N}, (x = -N + 1, \dots, -1) \quad (6)$$

$$P_x = [\varphi^{(N+x)} / N! N^x] P_{-N}, (x = 0, \dots, s) \quad (7)$$

其中: $\varphi = \mu / \lambda$ 。

证明: 根据备件库存转移可建立如下平衡方程:

$$\mu P_{-N} = \lambda P_{-N+1} \quad (8)$$

$$[(N+x)\lambda + \mu] P_x = \mu P_{x-1} + (N+x+1)\lambda P_{x+1}, (x = -N + 1, \dots, -1) \quad (9)$$

$$(N\lambda + \mu) P_x = \mu P_{x-1} + N\lambda P_{x+1}, (x = 0, \dots, s - 1) \quad (10)$$

$$N\lambda P_s = \mu P_{s-1} \quad (11)$$

方程 (8) ~ (11) 是根据 Markov 过程状态“转入”等于“转出”而建立的。例如方程 (9), 当备件库存水平 $x = -N + 1, \dots, -1$ 时, 状态 x 可从状态 $x + 1$ 以强度 $(x + N + 1)\lambda$ 转来或者从状态 $x - 1$ 以强度 μ 而转来, 分别对应着故障一个部件或修复一个部件。同时, 状态 x 以强度 $(x + N)\lambda$ 转到状态 $x - 1$ 或以强度 μ 转到状态 $x + 1$ 。从方程 (8) 开始逐步采用递推算法, 并结合归一化条件 $\sum_{x=-N}^s P_x = 1$, 可推导出 (5) ~ (7)。证毕。

2.2 保障系统绩效指标

从定理 1 给出的备件库存水平状态稳态概率分布, 可以导出备件平均缺货水平 $E(B)$ 、装备系统可用度 A 、单位时间平均采购数量 Q_{AP} 、备件平均库存水平 $E(I)$ 、备件库存平均利用率 R_I 。这些指标的计算分别如下:

1) 备件平均缺货水平 $E(B)$, 即为平均故障的装备系统套数, 则有:

$$E(B) = \sum_{x=-N}^{-1} -x P_x \quad (12)$$

2) 系统可用度 A , 指的是正常运行的装备系统套数占装备系统总套数的比值, 则有:

$$A = 1 - \frac{E(B)}{N} \quad (13)$$

3) 单位时间平均采购数量 Q_{AP} , 即为平均单位时间外购补充备件数量, 即在单位时间内损坏无法修复的备件数量, 则有:

$$Q_{AP} = (1 - \alpha) AN\lambda \quad (14)$$

4) 平均库存水平 $E(I)$, 是指仓库中平均包有的备件数量, 则有:

$$E(I) = \sum_{x=1}^s x P_x \quad (15)$$

5) 备件库存平均利用率 R_I , 是指仓库中备件平均使用比率, 则有:

$$R_I = 1 - \frac{E(I)}{s} \quad (16)$$

这些指标中, 可用度是最常用的保障绩效指标, 可将其看成是保障绩效指标。

3 保障系统控制策略

3.1 系统费用结构

系统费用包括仓库初始备件投入费、废弃部件购置费、仓库备件保管费、故障部件补给服务费, 本文所考虑的基于绩效的交通装备保障系统涉及的费用具体如下。

1) 仓库初始备件投入费: 仓库初始购置 s 件单价为 c 的备件, 费用为 cs ;

2) 废弃部件购置费: 单位时间平均购买备件数量为 Q_{AP} , 费用为 cQ_{AP} ;

3) 故障部件服务费: 主要包括修复和运输服务, 设为 μd ;

4) 仓库备件保管费: 单位备件单位时间的保管费率为 h , 平均备件库存量为 $E(I)$, 单位时间保管费用为 $hE(I)$ 。

则系统总费用 TC 如下:

$$TC = cs + cQ_{AP} + \mu d + hE(I) = cs + c(1 - \alpha) AN\lambda + \mu d + h(\sum_{x=1}^s x P_x) \quad (17)$$

3.2 可用度绩效约束的保障系统优化控制模型

绩效保障模式下的优化目标是在保证系统可用度目标 A_0 的前提下实现总费用 TC 最小:

$$\begin{aligned} \text{Min}_{(u_1, \dots, s)} \{ & cs + c(1 - \alpha) AN\lambda + [au_1 + (1 - \alpha) u_2] l + \\ & h(\sum_{x=1}^s x P_x) \} \\ \text{s.t. } & \begin{cases} A \geq A_0 \\ u_1 \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

模型中 s 为正整数, $A \geq A_0$ 为非线性约束, 该问题属于混合整数非线性约束问题。本文采用遗传算法, 算法具体步骤如下。

步骤 1: 给每个变量一个特定集合, 各个参数取值对应不同集合, 对集合进行二进制编码, 对整数变量和非整数变量用不同方式解码, 将每个变量的集合组合在一起, 长度不同的用 0 补足, 形成一个矩阵;

步骤 2: 随机产生 0~1 数组, 满足约束的被认为是个体保留, 共产生 N 个个体;

步骤 3: 采用单点交叉法且交叉点随机;

步骤 4: 将产生的新种群和初始种群合并, 从中筛选出满足约束的 N 个个体, 再选出最优个体作为新种群, 如果个体少于 N , 则重复步骤 1, 产生新个体, 补充新种群规模至 N ;

步骤 5: 对个体的每一基因座按变异概率随机选择变异点, 在进行变异操作后分别检查个体是否满足所给的非线性约束条件, 满足的保留, 不满足的仍保持变异前的值;

步骤 6: 重复步骤 4~6 直到达到所设定的迭代次数;

步骤 7: 从每次迭代记录的最优值中选择适应度最好的作为整个函数的最优值。

4 数值仿真实验

本节实验的目的是探究故障部件可修概率 (α)、平均故障间隔时间 (λ^{-1}) 对交通装备保障系统控制策略的影响。若某轨道交通公司有 N 辆轨道列车, 列车关键部件损坏后可修概率为 α 。新备件采购提前期为 1 单位时间。故障备件可修概率高低由备件设计水平和制造工艺决定, 备件平均故障间隔时间长度 λ^{-1} 则受到系统工作强度、工作环境以及维护频率决定。通过数值实验对图 3 所示的情景进行分析。

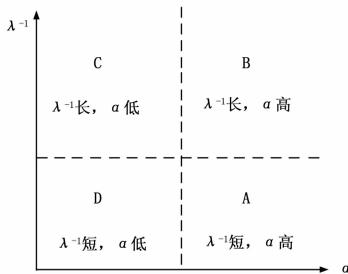


图 3 实验模拟情景

理想情景 O: 与情景 A、B、C、D 作对照的理想状态, 即所有故障部件都可以修复; 系统工作强度低且工作环境特别有助于设备运行, 备件平均故障间隔时间 λ^{-1} 非常长。

情景 A: 备件设计完善且生产工艺先进, 备件故障后可修概率 α 高; 系统连续工作时间较长且工作强度高, 工作环境不利于设备运行, 日常维护频率低, 平均故障间隔时间 λ^{-1} 短;

情景 B: 备件设计完善且生产工艺先进, 备件故障后可修概率 α 高; 系统连续工作时间较短且工作强度低, 工作环境有利于设备运行, 日常维护频率高, 平均故障间隔时间 λ^{-1} 长;

情景 C: 备件设计有缺陷且生产工艺落后, 故障备件可修概率 α 低; 系统连续工作时间较短且工作强度低, 工作环境有利于设备运行, 日常维护频率高, 平均故障间隔时间 λ^{-1} 长;

情景 D: 备件设计有缺陷且生产工艺落后, 故障备件可修概率 α 低; 系统连续工作时间较长且工作强度高, 工作环境不利于设备运行, 日常维护频率低, 平均故障间隔时间 λ^{-1} 短;

表 1 列出仿真实验中的参数值, 采用遗传算法计算上述情景进行模型计算, 结果如表 2 所示。

表 1 系统仿真实验参数

N (个)	$A_0\%$	u_i^{-1} /天	c /元	h /元	l /元
50	99	1	10 000	100	50 000

表 2 平均故障间隔时间和备件可修概率变化表

编号	λ^{-1}	α	u_i^*	s^*	TC	$R_1/\%$
O	30	1.0	2.49	3	154 660	6.35
A	15	0.9	4.81	5	294 110	1.81
B	30	0.9	2.65	3	164 330	5.91
C	30	0.5	3.43	5	230 110	2.64
D	15	0.5	7.10	8	452 120	0.75

通过 O 组与其他 4 组保障策略比较可以看出, 备件可修复率和修复能力影响保障系统控制策略。备件可修率降低或平均故障间隔时间缩短都会导致保障费用增加。情景 A 则采用最优控制策略为 (4.81, 5), 情景 B 则采用最优控制策略为 (2.65, 3), 情景 C 则采用最优控制策略为 (3.43, 5), 情景 D 则采用最优控制策略为 (7.10, 8)。当备件可修率小幅度降低时, 仅通过提高维修效率就可以保证系统最优; 当备件可修率大幅度降低时, 为保证系统最优, 不仅要提高维修效率, 也要适当提高备件库存水平; 当备件故障次数增多, 必须从提高维修效率和增加备件库存量, 才能保证系统最优。备件可修复率和平均故障间隔时间影响系统控制策略, 平均故障间隔时间对系统影响更大。因此, 加强备件日常维护保养, 降低工作强度, 改善工作环境对于提高交通装备系统稳定安全十分重要, 备件日常维护应该值得交通运营部门的关注。

5 结束语

随着我国轨道交通的迅速发展, 装备保障模式及保障系统运营管理成为重要的实现问题。装备系统的绩效保障模式可以实现装备使用客户与保障服务供应商的共赢。本文利用排队技术建立绩效约束的交通装备可修备件保障系统, 推导出系统各项性能指标并构建可用度约束的系统控制模型, 考查了备件部分可修与备件完全可修情况下的保障系统控制策略。研究结果有利于交通装备保障策略的制定。

参考文献:

[1] Sherbrooke C C. METRIC: A multi-echelon technique for recoverable item control [J]. Operations Research, 1968, 16 (1): 122-141.

[2] Axsäter S. A heuristic for triggering emergency orders in an inventory system [J]. European journal of operational research, 2007, 176 (2): 880-891.

[3] 盛天文, 陈晓慧, 易树平. 寿命型设备的预防维修策略研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15 (3): 598-603.

[4] Phillips E. H. Performance based logistics; a whole new approach [J]. Aviation Week and Space Technology, 2005, 163 (17): 52-55.