

装备备件库存管理动态建模与决策研究

吴 凡, 周永涛, 李博文
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对传统备件管理过程采购不科学和库存控制不合理等问题, 结合小规模装备备件仓库的实际, 提出了一种针对小规模备件库存管理的离散动态模型, 利用迭代最小二乘法辨识模型参数, 进而针对优化指标提出最优决策算法。实例结果表明: 该方法可对备件库存数量进行动态调整, 明显降低采购和运维成本。

关键词: 备件库存管理; 离散系统建模; 最小二乘法; 最优控制

中图分类号: F273.4

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-088-006

Dynamic Modeling and Decision-making Method for Equipment Spare Parts Inventory Management

WU Fan, ZHOU Yongtao, LI Bowen

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To solve the traditional problems of spare parts management such as unscientific procurement and unreasonable inventory control, a discrete dynamic model for small scale spare parts inventory management was proposed with the consideration of the insufficient volume of small scale equipment spare parts warehouse. In the proposed method, the iterative least square method was used to identify the parameters. Furthermore, the optimal decision-making method for the optimized indexes was put forward. Results of case study showed that the proposed method can adjust the inventory amount dynamically and reduce procurement and management cost significantly.

KEYWORDS: spare parts inventory management; discrete system modeling; least square method; optimal control

随着科技发展, 各种机器设备的地位日益重要, 工厂、医院、高校等单位都设有各种装备备件仓库, 装备备件数量增加、管理规模扩大, 备件管理信息化保障方案在装备系统全生命周期中的作用和意义更加凸显^[1], 备件管理信息化理论研究也逐步发展^[2-5]。在备件管理的不断发展过程中, 其目的始终在于考虑使用最少的备件资金、合理的库存储备、有效的修废利旧, 保证设备的正常运行需要, 不断提高设备的可靠性、维修性、

经济性及安全性。王东海等^[6]将整理、整顿、清扫、清洁、素养、安全(6S)6个方面的管理技术引入军事仓储管理, 借助信息化手段, 如RFID技术等, 实现优化仓库布局、提高空间利用率、确保物资有序存放等目标, 从而减少寻找物资的时间, 提高工作效率, 降低出错率。徐立等^[7]使用平均寿命近似方法构建设备失效模型, 并据此计算备件需求量, 为解决备件存储信息化问题提供了一种新的解决方案。

收稿日期: 2024-04-02

第一作者: 吴凡(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事装备管理决策研究。E-mail: 346739576@qq.com

引用格式: 吴凡, 周永涛, 李博文. 装备备件库存管理动态建模与决策研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(3): 88-93.

目前, 很多小规模备件仓库仍然采用人工识别、手动登记的管理模式, 存在备件采购过程不科学、库存控制不合理等问题。针对小规模备件仓库管理, 董正琼等^[8]利用多智能体技术, 测算各部件的剩余寿命概然函数, 使用蒙特卡洛方法反复进行仿真测试, 最终实现对备件存储方案的优化, 提升有限存储空间下装备的保障能力; 董正琼等^[9]又引入禁忌搜索方法, 建立了一套用于解决装备保障需求较高而备件存储空间有限这一矛盾的仿真运行模型, 对备件配置方案进行优化。王先芳等^[10]采用随机过程方法分析计算设备的维修周期及设备备件消耗量, 设计相应的维修换件策略和备件储存方案。

综上, 本文将备件管理决策优化问题转化为最优控制问题, 提出了一种针对备件仓库管理的动态建模与决策方法。

1 装备备件库存管理系统动态建模

为研究装备备件库存管理系统各参数的动态特性及演化趋势, 首先分析装备备件库存管理系统的信息获取渠道以及目标功能, 从而确定建模方法, 实现装备备件库存管理系统的数学模型。在此基础上, 选取合理的参数估计方法, 通过输入输出数据对模型参数进行在线辨识, 从而提高模型的实用性。

1.1 装备备件库存管理动态模型功能

备件管理系统能够通过统计等方式获取如下信息:

(1) 存储信息, 包括备件名称、简称、规格型号、计量单位、生产厂家、是否装备实体、使用特性、物资备件分类等;

(2) 入库信息, 包括名称、库位、型号、入库单位、计量单位、入库时间、备件来源等;

(3) 出库信息, 包括名称、库位、规格型号/图号、出库数量、计量单位、出库时间、收物单位等。

备件管理动态模型具备如下功能: 机理分析功能、模型预测功能、优化管理功能。

1.2 装备备件库存管理过程动态模型

由于备件具有采购周期、出库周期等特点, 并且要求模型在反映系统机理的基础上, 具备趋势预测与优化管理等功能。因此, 采用离散动态模型来对系统进行动态建模。

装备备件管理过程可以用如下离散动态方程描述

$$\begin{aligned} z(k) = & A_1 z(k-1) + A_2 z(k-2) + \cdots + \\ & A_h z(k-h) + B_1 u(k-1) + \\ & B_2 u(k-2) + \cdots + B_h u(k-h) + \\ & C_1 e(k-1) + C_2 e(k-2) + \cdots + \\ & C_h e(k-h) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $z(k) = [z_1(k), z_2(k), \cdots, z_n(k)]^T$ 表示第 k 周 n 种备件的数量; $u(k) = [u_1(k), u_2(k), \cdots, u_n(k)]^T$ 表示第 k 周 n 种备件的入库数量; $e(k) = [e_1(k), e_2(k), \cdots, e_n(k)]^T$ 表示第 k 周 n 种备件的出库数量; $A_1, A_2, \cdots, A_h$ 为仓储系数, 表示当前周 n 种备件的备件数量与历史上数周 n 种备件的备件数量的权重; $B_1, B_2, \cdots, B_h$ 为入库系数, 表示当前周 n 种备件的入库数量与历史上数周 n 种备件的入库数量的权重; $C_1, C_2, \cdots, C_h$ 为出库系数, 表示当前周 n 种备件的出库数量与历史上数周 n 种备件的出库数量的权重。

1.3 基于参数分析的备件管理系统评估

在装备备件管理系统离散动态模型中, 部分参数 (例如仓储系数 $A_1, A_2, \cdots, A_h$) 能够反映系统的存储状态, 从而对仓储系统管理健康状态进行评估。

本文采用迭代最小二乘法进行参数辨识。迭代最小二乘法可较大幅度地降低异常值的影响, 从而达到更稳健的估计结果。

迭代最小二乘法的主要思想是: 将线性回归问题转化为一个加权最小二乘问题, 并通过迭代来逐步求解参数。迭代最小二乘法中, 假设数据满足高斯分布, 然后根据最大似然估计的思想, 将线性回归转化为一个极大似然估计问题。

用于参数辨识的通用模型一般描述为

$$\begin{cases} z = Hx + v \\ z \in \mathbb{R}^p, x \in \mathbb{R}^n \end{cases} \quad (2)$$

式中: v 是 p 维噪声矩阵, 期望满足

$$\begin{cases} E[v] = 0 \\ E[vv^T] = R \end{cases}$$

式中: 0 是零向量, R 是实数向量。

结合式 (2), 可将式 (1) 改写为式 (3) 的形式。

通过已知的当前存储数据和历史存储数据、备件的出库和入库量, 辨识仓储向量 x , 进而求解仓储系数 $A_1, A_2, \cdots, A_h$ 。

$$\begin{cases} z = z(k) \\ x = [\text{diag } A_1 \quad \text{diag } A_2 \quad \cdots \quad \text{diag } A_h]^T \\ H = [z(k-1) \quad z(k-2) \quad \cdots \quad z(k-h)] \\ v = B_1 u(k-1) + B_2 u(k-2) + \cdots + \\ \quad B_h u(k-h) + C_1 e(k-1) + C_2 e(k-2) + \cdots + \\ \quad C_h e(k-h) \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 是仓储向量, 由仓储系数矩阵的对角线元素组成; H 为量测矩阵, 由历史存储量 $z(k-h)$ 组成。

z 可测量, H 已知, 对 x 的估计 $\hat{x}$ 可以描述为

$$\hat{x} = E[x|z]$$

定义预测协方差阵 M 为

$$M = E[(\bar{x} - x)(\bar{x} - x)^T]$$

式中: $\bar{x}$ 是 x 的预测值。考虑测量和先验知识对 x 进行估计, 有

$$x = E[x|z, \bar{x}]$$

估计性能指标为

$$J(\hat{x}) = \frac{1}{2} [(\hat{x} - \bar{x})^T M^{-1}(\hat{x} - \bar{x}) + (z - H\hat{x})^T T^{-1}(z - H\hat{x})]$$

式中: T 为实数向量。

由此, 给出如下最优估计问题

$$\begin{cases} \bar{x} = \arg \min J \\ \text{s.t. } z, M, H \end{cases}$$

求得估计值为

$$\hat{x} = \bar{x} + (M^{-1} + H^T T^{-1} H)^{-1} H^T T^{-1} (z - H\bar{x})$$

利用基于迭代最小二乘法的参数辨识方法, 结合备件管理过程离散动态模型式 (3), 从而求解仓储系数 $A_1, A_2, \cdots, A_h$ 。

迭代最小二乘法能够有效地计算仓储系数, 从而对库存状态进行评估。当求解的仓储系数显示库存量逐渐减少时, 备件可出库率越高, 表明实际仓库管理健康状态越高。

2 装备备件库存管理优化策略

本研究将装备备件管理决策优化问题转换为最优控制问题, 采用基于二次型优化的离散系统有限时间状态调节算法, 该算法是典型的最优控制算法。

在执行装备备件库存管理策略后, 应达到如下效果: 无论下一时间阶段有哪些出库需求, 当前库存量与当前时间阶段入库量都能满足库存出

库要求; 合理平衡当前库存量和进货量, 从而降低运行管理成本、存储成本和进库成本; 管理策略所需的输入信息简单易得, 利于在实际系统中实现。

2.1 备件管理决策模型优化指标

为实现备件管理决策功能, 进行如下简化:

(1) 第 $k+1$ 周 n 种备件的备件数量主要与第 k 周 n 种备件的备件数量有关; (2) 仅考虑第 k 周 n 种备件的备件入库数量对第 $k+1$ 周 n 种备件的备件数量的影响; (3) 仅考虑第 k 周 n 种备件的出库数量对第 $k+1$ 周 n 种备件的备件数量的影响。

简化的 $k+1$ 周备件变化趋势可以用如下离散动态系统来描述:

$$z(k+1) = A_1(k) z(k) + B_1(k) u(k) + C_1(k) e(k) \quad (4)$$

定义

$$B_1(k) u(k) + C_1(k) e(k) = M_1(k) w(k)$$

式中: $M(k)$ 为净入库系数, $w(k)$ 为净入库量。由于 $B_1(k)$ 、 $C_1(k)$ 和 $e(k)$ 精确可知, 则入库量可以描述为

$$u(k) = B_1(k)^{-1} [M_1(k) w(k) - C_1(k) e(k)] \quad (5)$$

将优化指标构造为同时反映存储量及入库量的指标, 优化性能指标可以描述为

$$J = J_1 + J_2 \quad (6)$$

式中: J_1 为反映存储量的指标, J_2 为反映入库量的指标。将优化指标构造为二次型的形式:

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{1}{2} z^T(N) P(N) z(N) + \\ &\quad \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} [z^T(k) Q(k) z(k)] \\ J_2 &= \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} [w^T(k) G(k) w(k)] \end{aligned}$$

式中: $P(N)$ 、 $Q(k)$ 、 $G(k)$ 中的元素均为非零正数。

当优化指标取得最小值时, 求解获得最优进货备件种类与数量, 此时入库数量和存储数量最小, 入库和存储的成本最低, 即为最优决策。

2.2 备件管理决策模型求解

为实现式 (6) 指标的优化, 采用离散系统有限时间状态调节算法求解。

$$w^*(k) = -[G + M^T K M]^{-1} M^T K A x(k)$$

由式 (5) 可得

$$u(k) = B_1(k)^{-1} [-M_1(k) [G + M^T K M]^{-1} M^T K A z(k) - C_1(k) e(k)]$$

式中: K 为系统参数。

该式给出了各项备件的入库策略。求得 $u(k) = [u_1(k), u_2(k), \dots, u_n(k)]^T$ 后, 可获得第 k 周 n 种备件的建议入库数量。

3 装备备件管理决策模型性能测试

3.1 测试条件

为了测试本文设计的装备备件库存管理系统的性能, 以某小型装备备件仓库为例进行验证。选取一年时间为采集样本, 并收集上年度未使用备件管理系统的数据作为对比, 分析备件管理系统部署后对备件管理能力的提升效果。需要说明的是, 为了展示备件管理系统的数据累加效果, 将购买备件的周期设置为 1 个月, 实际使用中可设置为 1 年。

3.2 备件采购量

随机选择压力开关、柴油粗滤芯和温度传感器 (分别用备件 A、B、C 表示) 3 种备件, 分别展示出库数量、入库数量、库存数量的演化趋势, 并对甲、乙两组数据进行对比分析。其中, 甲组未使用备件管理系统, 而乙组使用了该系统。

3.2.1 甲组

根据日常备件管理中的实际需求, 甲组 3 种备件 A、B、C 的全年出库数量随时间变化关系如图 1 所示。

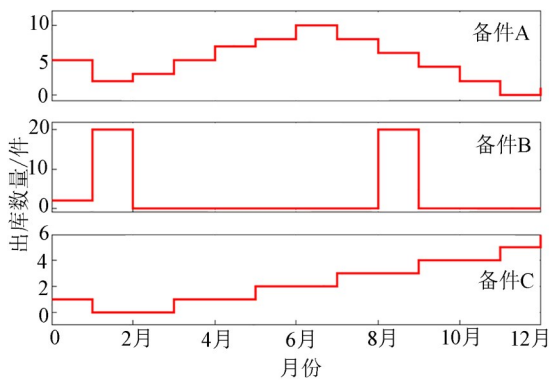


图 1 甲组 3 种备件的出库数量与时间关系

Fig. 1 Relationship between the outbound quantity and time of three kinds of spare parts in the first group

为保障一年所需备件的供应需求, 在年初 1 月份集中入库大量的备件, 其他月份不再入库。1 月

份, 3 种备件 A、B、C 的入库量分别为 50 件、30 件和 20 件。可得甲组的库存数量与时间关系如图 2 所示。

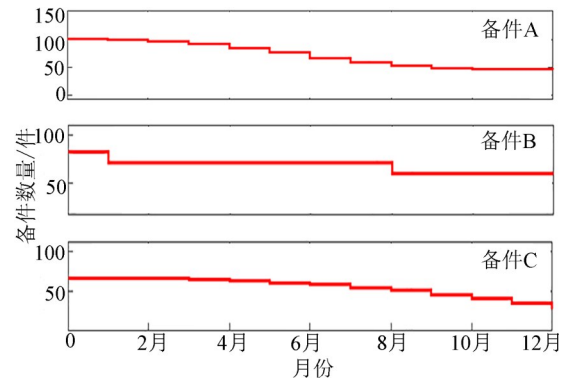


图 2 甲组 3 种备件的库存数量与时间关系

Fig. 2 Relationship between the storage quantity and time of three kinds of spare parts in the first group

由于 1 月份后不再入库, 从图 2 不难看出, 各备件的库存数量整体呈现衰减的趋势。由于存储完好率较高, 衰减缓慢, 仓库长期存储大量备件, 会导致经济成本的提高、部分更新周期较长的备件会出现闲置浪费甚至损坏等问题。此外, 过多的闲置备件也给库房的管理带来压力。

3.2.2 乙组

乙组在备件出库数量与种类方面与甲组一致, 即乙组 3 种备件的出库数量如图 1 所示。

根据库存数量和需求, 使用备件管理系统优化决策后, 3 种备件 A、B、C 的入库数量与时间关系如图 3 所示。

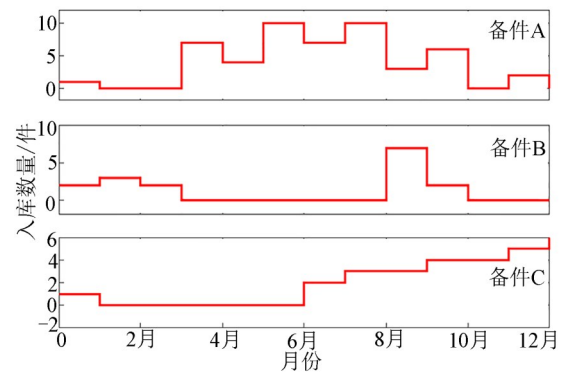


图 3 乙组 3 种备件的入库数量与时间关系

Fig. 3 Relationship between the inbound quantity and time of three kinds of spare parts in the second group

由图 3 可知, 3 种备件的入库量分别为 50、16 和 18 件。经过备件与甲组相比, 管理系统优化后, 所需备件 B、C 的数量减少。

图 4 为乙组的库存数量与时间关系。可以看出，各备件仓库存储数量显著降低，3 种备件 A、B、C 的库存量分别稳定在 50 件、50 件以及 40 件附近。

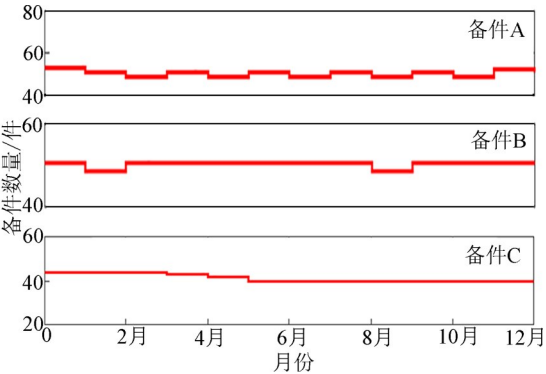


图 4 乙组 3 种备件的库存数量与时间关系

Fig. 4 Relationship between the storage quantity and time of three kinds of spare parts in the second group

3.3 采购与运维成本

甲组 3 种备件的采购数量分别为 50、30、20，乙组 3 种备件的采购数量分别为 50、16、18，3 种备件单价分别为 800、1 377、805 元/件，计算以上备件的总价，结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 12 个月甲组备件采购数量及其费用

Tab. 1 Spare parts purchase quantity and price of the first group in 12 months

品种	采购数量/件	单价/(元·件 ⁻¹)	总价/元
A(压力开关)	50	800	40 000
B(柴油粗滤芯)	30	1 377	41 310
C(温度传感器)	20	805	16 100
合计	100	—	97 410

表 2 12 个月乙组备件采购数量及其费用

Tab. 2 Spare parts purchase quantity and price of the second group in 12 months

品种	采购数量/件	单价/(元·件 ⁻¹)	总价/元
A(压力开关)	50	800	40 000
B(柴油粗滤芯)	16	1 377	22 032
C(温度传感器)	18	805	14 490
合计	84	—	76 522

通过对比可以发现，12 个月内乙组 3 种备件采购总价比甲组低了 20 888 元，采购成本降低了 21.4%。

对比图 2 和图 4 可以看出，在这次实验中 12 个月的备件存储数量减少，运维成本明显降低，约降低 16.2%。系统能够结合历史数据为采购提供辅助决策，在提高保障科学性的同时显著降低仓库日常运维的成本。

5 结论

本文设计了一种用于小规模装备备件管理的决策模型，实例表明该模型在备件采购量和仓库运维成本方面的优化效果明显。同时，在使用方面存在以下问题：由于厂家会出现分单发货的情况，实际入库时不同批次之间的零件交叉入库，导致确认订单完成情况和售后问题工作量增加。

参考文献：

[1] LIU S R, SHEN B, LI W Z, et al. Spare parts scheme for electronic equipment system with limited resources[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2569(1): 1-8.

[2] 何珮洋, 李昆鹏, 李文莉. 智能制造环境下的备件生产与运输协同调度问题研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(8): 93-100.

HE P Y, LI K P, LI W L. Integrated production and transportation scheduling problem for spare parts in intelligent manufacturing environment[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(8): 93-100.

[3] 赵斐, 康建设, 王雷震, 等. 考虑非周期检测的视情维修与备件订购联合策略优化[J]. 运筹与管理, 2021, 30(9): 31-37.

ZHAO F, KANG J S, WANG L Z, et al. Joint policy optimization of condition-based maintenance and spare ordering considering non-periodic inspection[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(9): 31-37.

[4] 任喜, 张晓斐. 基于灰色关联度的备件模型确定方法[J]. 兵工自动化, 2022, 41(4): 34-37.

REN X, ZHANG X F. Determination method of spare parts model based on grey correlation degree[J]. Ordnance Industry Automation, 2022, 41(4): 34-37.

[5] 王俊龙, 楼京俊, 阮旻智, 等. 面向满足率与利用率的通用备件优化配置方法[J]. 航空学报, 2022, 43(5): 391-398.

WANG J L, LOU J J, RUAN M Z, et al. Optimization configuration method of common spares

- fill rate and utilization rate[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(5): 391-398.
- [6] 王东海, 王付鹏. 6S管理在军事仓储中的推行与运作[J]. *中国储运*, 2020(3): 143-144.
- [7] 徐立, 阮旻智, 李华. 对数正态型通用备件满足率评估及需求量计算方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(4): 1417-1423.
- XU L, RUAN M Z, LI H. Method of fill rate evaluate and demand calculation for lognormal component commonality[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(4): 1417-1423.
- [8] 董正琼, 唐少康, 李晨阳, 等. 基于多智能体技术的舰炮备品备件配置方法[J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(4): 228-234.
- DONG Z Q, TANG S K, LI C Y, et al. Configuration method of naval gun equipment spare parts based on multiagent simulation[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(4): 228-234.
- [9] 董正琼, 唐少康, 周向东, 等. 基于禁忌搜索的随舰备件优化配置方法[J]. *船舶工程*, 2023, 45(5): 138-143.
- DONG Z Q, TANG S K, ZHOU X D, et al. Optimization configuration method of shipboard spare parts based on tabu search[J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(5): 138-143.
- [10] 王先芳, 王利辉, 叶鹏, 等. 基于预防性维修的装备维修备件消耗规律[J]. *军事交通学报*, 2022, 1(12): 17-21.
- WANG X F, WANG L H, YE P, et al. Consumption Rules of Equipment spare parts based on preventive maintenance[J]. *Journal of Military Transportation*, 2022, 1(12): 17-21.