

隧道大型掘进装备备件库存优化策略的管理逻辑探析

郭 威

中铁隧道股份有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：本文从管理逻辑视角出发，系统分析了大型掘进装备备件库存的特殊性及其管理困境，阐述了基于设备可靠性、维修策略与备件关键性分类的库存优化理论框架。在此基础上，提出了“需求分级预测—差异化库存策略—动态调整机制”三位一体的优化管理逻辑，涵盖备件 ABC-XYZ 联合分类法、基于故障分布的需求预测模型、多级库存配置策略以及库存与维修计划的协同机制。研究指出，有效的备件库存优化并非单纯追求成本最小化，而是在保障施工连续性前提下的风险—成本均衡，其管理逻辑的核心是从被动响应转向主动预防与动态适配。

关键词：隧道掘进装备；备件库存；库存优化；管理逻辑；分类策略

引言

隧道大型掘进装备，包括盾构机、硬岩隧道掘进机（TBM）、顶管机等，是现代地下交通、水利及市政工程建设不可或缺的核心装备。这类装备造价动辄数千万元乃至数亿元，施工过程连续性强，一旦因关键备件缺失导致停机，不仅造成巨大的直接经济损失，还可能引发工期延误、地质风险上升等一系列连锁反应。因此，备件库存管理成为掘进装备全生命周期管理中的关键环节。然而，大型掘进装备的备件库存具有鲜明的特殊性：备件种类繁多（一台盾构机涉及数万种零部件）；专用件比例高，供应商依赖性强；采购提前期长（进口件可达数月）；需求不确定性强，故障往往具有突发性；存储成本高（大型备件需专用仓储）；同时，施工环境的恶劣性加剧了设备的随机故障概率。传统以经济订货批量（EOQ）和安全库存为核心方法的库存管理模型，建立在需求相对稳定、补货周期固定、缺货成本可量化等假设之上，难以直接应用于掘进装备场景。

1 大型掘进装备备件库存管理的特征与困境

1.1 备件需求的不确定性特征

掘进装备备件需求的不确定性来源于多个方面。首先是故障模式的不确定性。掘进过程中，刀具磨损、密封系统失效、液压元件损坏等故障的发生时间和严重程度受地质条件（岩石硬度、含水量、磨蚀性）、操作参数及设备状态等多因素交互影响，难以精确预测。其次是需求时点的随机性。不同于生产线设备的计划性维护，掘进装备在地下狭小空间作业，许多故障只有在出现异常工况后才能被发现，需求触发具有突发性。再次是需求量的脉冲性。某些关键备件（如主轴密封、刀

盘驱动减速机）虽然故障概率低，但一旦损坏需要整套更换，单次需求量呈现“零或一”的脉冲特征。这种多源不确定性使基于历史平均需求的传统预测方法失效。

1.2 备件的专用性与供应链脆弱性

大型掘进装备制造高度集中，大量核心备件为定制化设计，通用性极低。这意味着备件供应商数量有限，部分关键部件甚至为单一来源供应。供应链的脆弱性体现在：采购周期长（进口件运输加清关通常需要2至6个月）；议价能力不对称（使用方处于被动地位）；紧急采购难度大（定制件无法从现货市场获得）。此外，掘进工程往往位于偏远地区，最后一公里物流条件受限，进一步放大了供应链风险^[1]。这种脆弱性迫使库存管理不得不采用更高的安全库存水平以对冲供应中断风险，但高库存又会带来资金占用和仓储压力。

1.3 停机成本的极端敏感性

掘进装备停机的经济后果极为严重。以直径15米的泥水盾构为例，单日综合成本（设备折旧、人工、管理、资金利息等）可达数十万元。若发生在关键节点（如穿越既有铁路或建筑物期间），安全风险与社会影响更难以用金钱衡量。在这种成本结构下，缺货成本的量级远超持有成本。传统库存管理追求总成本最小化，需要平衡订货成本、持有成本和缺货成本。但在掘进装备场景中，缺货成本的估值一旦大幅高于持有成本，最优策略将导向极高的服务水平（接近100%），这实质上削弱了优化模型的经济约束力。因此，管理逻辑必须从“成本最小化”转向“风险可接受条件下的保障最优化”。

1.4 库存管理面临的现实约束

除上述特征外,施工现场还面临多重现实约束。仓储空间有限:隧道施工现场狭窄,大型备件存放区域受限,且需要防潮、防尘等特殊条件。资金预算约束:备件库存占用的流动资金可能影响项目现金流。人员专业能力:现场仓管人员往往缺乏专业的库存管理知识。信息管理基础:部分项目备件台账仍依赖手工记录,实时库存状态不透明。这些约束使得理论上最优的库存策略可能无法落地,管理逻辑必须融入对实施可行性的考量。

2 备件库存优化的理论基础与逻辑转向

2.1 传统库存管理理论的适用性边界

经典库存管理理论,包括经济订货批量模型、报童模型、(s,S)策略等,建立在若干核心假设之上:需求分布已知且平稳;补货提前期固定或已知分布;缺货成本可量化;订货、持有与缺货成本之间存在明确的数量关系。在掘进装备备件场景中,这些假设多数被违反。需求分布不仅非平稳,而且缺乏足够的历史数据来拟合参数;补货提前期受供应商排产、清关、运输等多环节影响,波动较大;缺货成本不仅难以精确量化(涉及工程延期罚款、信誉损失等),而且往往是非线性的(一次缺货可能引发连锁反应)。因此,直接套用传统模型会导致策略失当。正确的管理逻辑应当是:以传统理论为分析框架,但对其假设条件和输出结果进行批判性审视,引入工程判断和风险偏好进行修正。

2.2 基于可靠性的维修策略与备件需求的关联

备件需求与设备维修策略之间存在内在耦合关系。按照维修策略的不同,备件需求可分为三类:预防性维修需求(按计划更换的易损件,如刀具、密封圈)、预测性维修需求(基于状态监测触发更换,如齿轮箱油、滤芯)、纠正性维修需求(故障后更换,如轴承、电机)^[2]。预防性维修需求具有一定的周期性,可预测性较高;预测性维修需求依赖于监测数据的准确解读;纠正性维修需求则完全随机。合理的库存优化逻辑应当将备件分类与维修策略联动:对于采用定时更换策略的备件,可采用时间序列预测;对于采用状态维修的备件,需建立监测参数与剩余寿命的关联模型;对于纠正性维修备件,则需要基于故障率数据进行风险分析。三种策略的备件库存水平设定逻辑截然不同。

2.3 从成本最优到风险—成本均衡的逻辑转向

前文已述,极端的高缺货成本使得单纯成本最小化的逻辑失去实践意义。更为合理的管理逻辑是“风险—成本均衡”,即在可接受的风险水平下,寻求库

存成本的最小化;或在给定成本约束下,寻求风险的最小化。这一逻辑转向要求管理决策者首先明确风险偏好:何种程度的停机风险是可以接受的?这取决于工程的关键性、地质风险等级、合同条款中的工期罚则以及企业的风险承受能力。在此基础上,将风险转化为约束条件(如“关键备件现货满足率不低于99%”),再求解满足约束的最低成本库存方案。这种逻辑类似于金融投资中的风险调整后收益理念,强调库存策略不是脱离现实的纯粹经济计算,而是与工程风险管理一体化的决策过程。

2.4 系统观下的库存优化思维

掘进装备备件库存不是孤立的管理对象,而是整个设备维护保障体系中的一个子系统。系统观要求将库存策略与设备运行计划、维修排程、采购合同、物流方案乃至施工组织进行统筹考虑。例如,通过优化维修排程,将多项维修活动集中进行,可以减少备件库存中的品种;通过与供应商签订框架协议或寄售协议,可以将部分库存压力前移至供应链上游;通过共享邻近项目的备件库存(区域联储),可以降低单一项目的库存水平。系统观的本质是以整体效能最优替代局部最优,这要求库存管理逻辑从“自给自足”转向“内外协同”。

3 备件库存优化的策略逻辑框架

3.1 备件分类的多维逻辑

有效的库存优化始于科学的备件分类。针对掘进装备备件的特殊性,单一的ABC分类法(基于资金占用)无法反映关键性差异,需要引入多维分类逻辑。本文提出“ABC-XYZ-关键性”三维联合分类法。第一维度是ABC价值分析,按年度消耗金额将备件分为A类(高价值)、B类(中价值)、C类(低价值)。第二维度是XYZ需求波动分析,X类需求稳定(变异系数小于0.3),Y类需求波动中等(0.3~0.7),Z类需求高度不稳定(大于0.7)。第三维度是关键性评级,分为K1(缺货将直接导致长时间停机且无替代方案)、K2(缺货导致停机但存在短期应急措施)、K3(缺货不影响连续性,可等待采购)^[3]。三个维度组合形成不同的管理策略:如A类+K1+Z类备件,应采取最高级别的库存保障(如设置冗余库存、与供应商签订紧急供货协议);C类+K3+X类备件,则可采取低库存甚至零库存策略,按需采购。这一分类逻辑的核心是引导管理者将有限资源聚焦于高风险、高价值、高波动备件。

3.2 需求预测的逻辑方法选择

备件需求的需求预测逻辑应因类而异。对于预防性维修

类备件（如盾构刀具），其消耗与掘进里程、地质磨蚀性指数存在明确的物理关系，可采用基于工程参数的定额预测法，而非依赖历史消耗数据。对于有长期运行记录的重复性备件（如液压油滤芯），可采用时间序列方法（指数平滑或 ARIMA）捕捉趋势与季节性。对于故障数据稀疏的高价值备件，可采用可靠性工程中的 Weibull 分析，基于同类设备的历史故障率数据推断失效率函数，进而计算期望需求。对于完全没有数据的新型备件，则需采用专家判断法与模糊综合评价相结合的方式。预测逻辑的核心不在于方法的复杂程度，而在于预测不确定性的量化——即提供需求预测值的同时，给出置信区间或概率分布，为后续库存策略提供风险输入。

3.3 差异化库存策略的设计逻辑

基于分类和预测结果，设计差异化的库存控制策略。对于关键性高、需求波动大的备件（K1+Z 类），不宜采用常规的 (s,S) 策略，而应设计“风险缓冲库存”策略：以工程剩余工期内的最大可能需求量（如一定置信水平下的分位数）作为目标库存水平，而非经济最优值。对于可预测性较好的 X 类备件，可实施定期补货策略（T 策略），简化管理。对于低价值、非关键的 C 类备件，可采用双堆法或目视化管理，无需纳入系统精细控制^[4]。此外，对于体积大、价值高、但可预测的备件（如整环管片模具），可采用“零库存+准时制”策略，与供应商锁定排产计划，使备件按施工进度直接送达现场。

3.4 多级库存与横向协同的逻辑

在大型施工企业或项目集群场景下，单一项目的库存优化需纳入多级库存框架。企业层面的中心仓库与项目现场仓库构成两级库存体系。逻辑原则是：将长提前期、通用性强的备件存放于中心仓库，通过内部调拨响应各项目需求；将专用性强、紧急度高的备件存放于项目现场。两级之间设定合理的补货规则（如中心仓库采用 (Q,R) 策略，现场仓库采用库存上限策略）。此外，相邻项目之间的横向备件共享是降低整体库存水平的有效逻辑：建立区域备件联储协议，设置共享库存和快速调拨机制，每个项目仅持有保障自身紧急需求的最小库存，将非紧急需求依托共享池满足。这种协同逻辑要求

突破“各自为政”的管理惯性，建立信任与契约约束。

3.5 动态调整与闭环反馈的逻辑

掘进工程的施工阶段、地质条件和设备状态是动态变化的，库存策略必须随之调整。动态逻辑包括三个环节。一是触发机制：设定关键事件（如进入高磨蚀地层、设备出现某种故障先兆）或定期（每月、每季度）触发库存策略评审。二是调整规则：根据最新信息更新需求预测参数、调整安全库存系数、修订分类。三是闭环反馈：将实际消耗数据与预测值进行对比，持续校准预测模型；将缺货事件记录归因分析，反推分类合理性。这一闭环使库存系统具备学习能力，避免策略僵化。

4 结语

隧道掘进装备备件库存优化不同于传统制造业，面临需求高度不确定、供应链脆弱及停机成本极高三大挑战，亟需从“成本最小化”转向“风险—成本均衡”的管理逻辑。本文构建了“需求分级预测—差异化库存策略—动态调整机制”三位一体的优化框架，提出多维分类、因类预测、多级协同与闭环反馈等核心策略，并从组织、信息、绩效和供应商关系四方面设计支撑机制。其本质是在不确定性中实现资源的动态平衡，关键在于建立可执行、可适应的决策规则体系，而非追求静态最优解。未来，随着物联网与预测性维护技术发展，库存逻辑将由“统计事后应对”迈向“状态实时适配”。施工企业应系统积累故障与维修数据，构建企业级备件知识库，为管理逻辑持续演进提供支撑。

参考文献

- [1] 张迪, 杨华勇, 龚国芳. 盾构掘进装备关键备件库存管理研究综述 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 284-296.
- [2] 李华, 刘飞, 曹华军. 面向复杂装备维修的备件协同保障机制研究 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(15): 1825-1833.
- [3] 周晓光, 张强, 宋元涛. 基于故障率分析的地铁盾构备件需求预测方法 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1621-1628.
- [4] 马士华, 陈铁, 杨威. 供应中断风险下关键备件库存策略研究 [J]. 管理科学学报, 2019, 22(8): 87-99.