

# 装备器材消耗预测研究综述

李东京<sup>1</sup>,秦智勇<sup>2</sup>,王兵<sup>1</sup>,薛驰<sup>1</sup>

(陆军装甲兵学院,北京 100071)

**[摘要]**引入流程管理理念,将器材消耗预测流程分为明确器材类型、收集分析数据和信息、预测方法选择与建模、模型求解、分析评估预测结果和应用6个阶段,对每个流程的研究现状进行系统梳理和总结,找出当前器材消耗预测研究的热点和薄弱环节,并在此基础上指出下一步发展方向,为装备器材保障工作提供参考。

**[关键词]**流程管理;装备器材;消耗预测

**[中图分类号]**F252

**[文献标识码]**A

**[文章编号]**1005-152X(2021)11-0147-06

## Review of Literature on Forecasting Method of Equipment Supplies Consumption

LI Dongjing<sup>1</sup>, QIN Zhiyong<sup>2</sup>, WANG Bing<sup>1</sup>, XUE Chi<sup>1</sup>

(Ground Force Armored Force Engineering Institute, Beijing 100071, China)

**Abstract:** In this paper, we introduced in the concept of process management, and divided the supplies consumption forecasting process into six links, namely defining supplies type, collecting and analyzing data and information, forecasting method selection and modeling, model solving, analysis and evaluation of forecast results, and application. Then, by systematically sorting out and summarizing the research status of each link, we identified the hotspots and weak points in the current researches on equipment supplies consumption forecasting, and on this basis, projected the next stage of development in this field.

**Keywords:** process management; equipment supplies; consumption forecasting

## 0 引言

装备器材(简称器材)是用于装备维修所需的各种备件和原材料的总称,是实施装备维修的重要物质基础。装备器材消耗预测,是根据装备器材故障规律、器材特性以及各单位动用计划、维修能力和使用环境等,结合历史消耗数据综合分析,运用各种预测方法,对各单位下一阶段的器材消耗种类和数量进行推断的过程。掌握器材消耗规律,实现对器材消耗的精准预测,对解决部队当前存在的器材库存“超欠储”问题<sup>[1]</sup>,提高器材保障能力具有重要意义。

诸多学者对装备器材消耗预测方法进行了研究。王宏焰,等<sup>[2]</sup>从全寿命角度出发,将装备器材分

为研制和使用两个阶段,对消耗预测方法进行了研究;Bacchetti,等<sup>[3]</sup>对备件进行分类后将消耗预测方法分为传统的基于时间序列及其改进方法、Cronston及其改进方法、Bootstrap方法、需求聚类/分类分析方法、可靠性分析方法、神经网络以及贝叶斯方法等;黄照协,等<sup>[4]</sup>根据器材消耗规律将器材消耗类型分为连续型和间断型两种,对器材消耗预测方法进行研究,具有一定参考意义。

上述研究基于不同角度,对器材的消耗预测方法进行了分类梳理,但并未对器材消耗预测的全过程进行系统分析和总结。本文引入流程管理理念,将器材消耗预测流程分为明确器材类型、收集分析数据和信息、预测方法选择与建模、模型求解、分析

**[收稿日期]**2021-06-27

**[基金项目]**军内科研项目

**[作者简介]**李东京(1997-),男,山东聊城人,硕士研究生,研究方向:物流与供应链管理;秦智勇(1984-),男,黑龙江拜泉人,助理工程师,研究方向:装备保障;王兵(1975-),男,湖南岳阳人,硕士,副教授,研究方向:物流与供应链管理;薛驰(1991-),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,研究方向:军事采购。

评估预测结果和应用6个阶段,系统分析和总结器材消耗预测的相关文献,为装备器材进行合理筹措、供应和储备工作提供参考。

## 1 器材消耗预测流程管理概述

流程管理是一种以规范化构造端到端的卓越业务流程为中心,以持续提高组织业务绩效为目的的系统化方法<sup>[9]</sup>。流程管理聚焦业务重要流程,便于发现每个流程的价值与各个环节的问题,有利于管理者提高业务效率和认清下一步工作重点和方向,在企业管理中得到广泛应用。本文梳理器材消耗预测流程,旨在对器材消耗预测方法的相关文献进行系统梳理和总结,找出当前研究的热点和薄弱环节。

## 2 器材消耗预测全过程

通过梳理分析和总结,本文将器材消耗预测流程分为6个阶段,如图1所示。

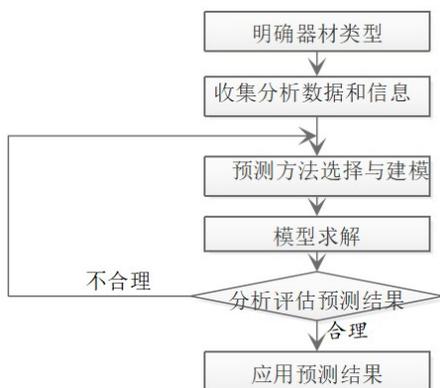


图1 器材消耗预测流程

### 2.1 明确器材类型

明确器材类型是进行装备器材消耗预测的前提。器材种类繁多多样,只有明确器材类型,充分了解器材特性和影响器材消耗的因素,才能实现器材消耗的精准预测。

首先是对器材进行分类。当前,ABC分类法<sup>[6]</sup>应用最为广泛,其根据库存器材的经济指标将器材分为重要、一般和不重要三个等级,反映了器材的重要性程度,但由于成本分配不合理、评价维度单一等因素限制了其实际应用价值;文献[7][8]考虑多个影响

因素对ABC分类法进行了一定优化;杨学强,等<sup>[9]</sup>从装甲器材价值和供应风险维度提出了基于Kraljic模型的装甲器材分类方法,将装甲器材分为关键器材、重要器材、一般器材和稀缺器材;吴龙涛,等<sup>[10]</sup>根据器材的消耗特点,采用灰色聚类算法对器材进行了分类,具有一定参考意义。

其次根据器材分类明确预测器材的种类。杨帆,等<sup>[11]</sup>根据装备器材的可靠性,将器材分为指数型器材、威布尔型器材和正态分布型器材,并据此对威布尔型器材进行了需求预测研究;吴雯雯,等<sup>[12]</sup>在王纵虎<sup>[13]</sup>和Nguyen,等<sup>[14]</sup>研究的基础上,提出了蒙特卡洛K-means聚类算法,利用器材的消耗波动性对舰船器材进行分类,并对舰船器材的消耗预测问题进行了研究。

### 2.2 收集分析数据和信息

收集分析数据和信息是在明确器材类型后,对器材的历史消耗数据、使用环境、使用强度以及使用者水平等有关影响器材消耗的因素信息进行收集、分析和处理。针对具有大样本数据的器材,杨帆,等<sup>[11,15,16]</sup>通过分析部队执行演习、阅兵等任务的器材消耗数据,提出了基于任务的器材需求预测模型;沐爱勤,等<sup>[17]</sup>结合器材历史消耗数据,运用Monte Carlo仿真的方法对高原环境下航空器材的消耗预测进行了研究。而针对装备初始列装阶段没有历史消耗数据的小样本数据器材,主要通过相似器材的相关数据确定器材故障分布、可靠性参数等,采用模型计算法、相似产品法进行消耗预测。Kurt,等<sup>[18]</sup>基于马尔科夫过程理论对初始备件确定进行了研究;董骁雄,等<sup>[19]</sup>利用粗糙集方法,建立了不完备信息的初始器材品种确定模型。

### 2.3 预测方法选择与建模

通过对数据的分析和总结,选择适当的预测方法进行建模是整个流程的关键。当前器材消耗预测方法主要包括定性预测法、定量预测法和组合预测法。

2.3.1 定性预测法。定性预测方法<sup>[20]</sup>是以预测者的

经验为基础,判断发展趋势、探讨发展变化规律的方法。它适用于缺乏数据资料的情况下对事物的预测,优点是方法简便、灵活。实践中,有时即使有充足的数量资料,也采用定性预测方法,其原因是把定性预测的结论与定量预测的结果相比较可以提高预测的准确性。常用的定性预测技术包括德尔菲法、主观概论法和交叉概论法。古平,等<sup>[21]</sup>采用相似产品法对典型器材消耗进行了预测;贾锐,等<sup>[22]</sup>提出了基于案例的新型舰船器材需求预测模型。

**2.3.2 定量预测法。**定量预测法是利用已掌握的比较完备的历史统计数据或因素变量来预测消耗的方法。主要包括基于时间序列的预测方法和基于机器学习算法的预测方法。

时间序列预测法<sup>[23]</sup>是依据以往的时间序列数据预测事物未来的演变趋势,包括移动平均法、指数平滑法、季节性分析法和平衡随机序列分析法等。1972年Croston<sup>[24]</sup>提出的基于时间序列的Croston(CR)模型,将数量少、间断性需求的备件数据拆成了非零需求区间和零需求区间两个序列,再利用指数平滑法进行预测,在工业上得到广泛应用。但其也存在局限性:在需求为零后,它不会更新预测。因此,不少学者对其进行了改进,其中Syntetos,等<sup>[25]</sup>提出的Syntetos Boylan Approximation(SBA)预测模型和Teunter,等<sup>[26]</sup>通过将需求大小的估计值乘以具有非零需求的概率建立Teunter Syntetos Babai(TSB)预测模型得到了较广认可。

基于机器学习算法的预测法是通过现代机器学习算法和理论,研究变量之间相关关系,对样本数据进行数理统计分析和训练拟合,建立消耗预测模型的方法,主要包括线性回归、Bootstrap、神经网络、支持向量机和灰色预测法等。Yang,等<sup>[27]</sup>提出了基于线性回归的航空器材消耗预测模型;徐廷学<sup>[28]</sup>利用灰色预测法对军械维修器材消耗规律进行了研究;刘长新,等<sup>[29]</sup>通过研究航材消耗的影响因素,建立了基于BP神经网络的消耗预测模型;吴龙涛,等<sup>[30]</sup>基于贝叶斯方法建立了威布尔型器材需求预测模型,并利用蒙特卡洛仿真方法进行了求解;Hasni,等<sup>[31]</sup>基于

Bootstrap方法对备件的消耗预测进行了研究,均取得了较好效果。

**2.3.3 组合预测法。**组合预测法是通过综合利用各种方法所提供的信息,以尽可能地提高预测精度为目的,对同一个问题采用两种以上不同预测方法进行预测的方法。它既可是几种定量方法的组合,也可是几种定性的方法的组合,但实践中更多的则是利用定性方法与定量方法的组合。周浩,等<sup>[32]</sup>首先利用灰色预测法GM(1,1)模型得到预测序列,然后根据预测序列建立马尔科夫模型来计算预测值,最后发现灰色马尔科夫模型优于GM(1,1)模型;贾琦,等<sup>[33]</sup>结合灰色模型和LS-SVM模型的优势,建立灰色LS-SVM模型,提高预测的准确性和稳定性;Huang,等<sup>[34]</sup>运用灰色关联分析计算出器材消耗和其影响因素间的灰色关联度,然后选择主要影响因素作为支持向量机的输入变量来预测消耗数量,并对比GM(1,1)模型和BP神经网络模型的预测结果,发现基于灰色关联分析和支持向量机组合预测的结果误差更小。组合预测法逐渐成为消耗预测领域的研究热点。

## 2.4 模型求解

模型求解是针对建立的各种预测模型进行求解,主要包括解析法、仿真法和智能算法求解三种方法。

解析法通常将器材的可靠性、寿命分布以及相关特征等已知的概率和参数为约束条件,通过构造目标函数和解析式,对未来一段时间器材消耗的数量进行预测的方法。刘慎洋,等<sup>[35]</sup>运用可靠性理论和随机过程方法对可维修器材的使用寿命规律建立解析式,并直接进行求解来预测器材消耗数量,具有一定参考意义。

仿真是通过对建立的各种预测模型进行大量仿真模拟实验,对比得出的仿真数据,不断修改和优化相关参数进行求解的方法。曹军海,等<sup>[36]</sup>根据基于时间序列的指数平滑法建立了装甲器材消耗预测模型后,利用Anylogic仿真平台对该模型的平滑指数进行仿真实验,得出了相对精确的平滑指数后对器材消耗进行了预测。

智能算法求解是通过各种现代优化算法,对建立的预测模型进行求解的方法,主要包括模拟退火算法、遗传算法、神经网络算法等。Song,等<sup>[37]</sup>通过灰色预测法建立了备件消耗预测模型后,利用神经网络算法对模型进行求解,并得到了较好效果。

## 2.5 评估预测结果与应用

为了验证所提出的器材消耗预测模型的可靠性需要对预测结果进行评估,主要评估方法有示例分析验证法和对比分析验证法。示例分析验证法即选取器材真实消耗数据进行试验,计算预测误差来判断模型是否可靠,适用于样本数据多、连续消耗的器材,文献[27-29],文献[36]均采用此法验证。对比分析验证法是通过对其他方法预测结果进行对比分析,比较预测误差来判断是否可靠,适用于无样本数据、间断消耗的器材,文献[25][26][38]均采用此法验证。

当前,美军主要采用相似产品法和METRIC(可修件控制的多级技术)模型<sup>[39]</sup>及其改进方法对初始器材的消耗进行预测,利用移动平均法、指数平滑法、二阶指数平滑法、线性回归法以及组合预测方法对后续使用阶段器材的进行消耗预测<sup>[40]</sup>,并建立相应的预测系统来不断提高其预测精度。在实际应用中,基于时间序列的预测方法因器材消耗数据容易获取、预测模型简单、精确而使用广泛,基于机器学习算法的预测方法是当前研究的热点,但由于模型相对复杂、不易操作而应用较少。

## 3 下一步研究展望

通过对器材消耗预测全过程中的每个环节进行研究,发现诸多学者对装备器材消耗预测进行了广泛而深入的探索,针对不同类型的器材利用不同的方法建立了不同的预测模型,并取得了良好效果。但仍然存在一些问题:

(1)目前在器材消耗预测研究中,多是对器材消耗数量的预测,很少涉及器材消耗品种的预测研究。明确器材品种是进行器材消耗数量预测的前提,传统的器材消耗品种预测方法主要包括价值系

数法<sup>[41]</sup>、逻辑决断法<sup>[42]</sup>、主成分分析法<sup>[43]</sup>、粗糙集法<sup>[44]</sup>等,但主观性较强且准确率不高,因此下一步应注重器材消耗种类预测研究。

(2)器材的寿命分布、故障率以及器材消耗的历史数据是进行消耗预测的基础,进一步收集和分析研究影响器材消耗的各种因素,必须建立装备器材信息系统,实时的获取器材信息和消耗数据,以便进行器材消耗预测。

(3)当前预测模型大多仅考虑一种或几种影响因素,预测精度还有待提高。组合预测是当前研究的热点,但大多是定性定量组合预测或多种定量方法组合预测,基于整个供应链的协同预测研究较少。舒彤,等<sup>[45]</sup>提出了基于影响因子的供应链协同预测模型;董绍辉,等<sup>[46]</sup>对供应链协同预测机制进行了研究;丁春光<sup>[47]</sup>基于供应链CPFR理论构建了协同预测模型。协同预测有利于降低供应链中的牛鞭效应,提高预测精度,为下一步器材消耗预测研究提供了思路。

(4)预测方法众多,如何选择最佳方法成为研究重点。Hemeimat,等<sup>[48]</sup>分别利用均方误差(MSE)、平均绝对偏差(MAD)和平均误差(ME)三种统计方法比较了移动平均法(MA)、指数平滑法(ES)、CR、SBA和TSB五种预测方法,并研究使用跟踪信号方法(Tracking Signal, TS)来寻找最佳预测方法和参数,具有一定参考意义。

## 4 结语

装备器材消耗预测是确定器材需求、制定器材申请计划的基础,对于装备器材筹措、供应和储备工作至关重要。本文引入流程管理理念,将器材消耗预测流程分为明确器材类型、收集分析数据和信息、预测方法选择与建模、模型求解、结果评估和应用6个阶段,通过对整个器材消耗预测过程中每个步骤的相关文献进行梳理和分析,总结当前器材消耗预测中的热点和薄弱环节,并在此基础上提出了下一步研究展望,为开展器材消耗预测研究工作打下基础。

## [参考文献]

- [1] 王铁宁,可荣博,于双双. 装甲装备器材库存超(欠)储状态分析与程度评价[J]. 装甲兵工程学院学报,2014,28(4):13-18.
- [2] 王宏焰,高崎,王家鹏. 装备维修器材消耗预测综述[J]. 四川兵工学报,2008(5):92-94.
- [3] BACCETTI A,SACCANI N.Spare parts classification and demand forecasting for stock control:Investigating the gap between research and practice[J].Omega,2012,40(6):722-737.
- [4] 黄照协,李前会,孙思浩,等. 备件消耗预测方法研究现状及发展[J]. 舰船电子工程,2015,35(1):14-18.
- [5] 黄艾舟,梅绍祖. 超越BPR:流程管理的管理思想研究[J]. 科学学与科学技术管理,2002(12):105-107.
- [6] 奚丽波,孟凡芹,王占武. 后勤装备维修器材储备模式与分类方法研究[J]. 物流技术,2011,30(15):131-133.
- [7] 熊君星,夏芳臣,涂海宁. 基于BP神经网络的备件ABC分类模型[J]. 机械设计与制造,2008(2):215-217.
- [8] 肖依永,常文兵,郭伟宏. 基于关联规则的ABC库存分类方法[J]. 系统工程,2008(6):10-15.
- [9] 杨学强,李文俊. 基于Kraljic模型的装甲器材分类研究[J]. 中国物流与采购,2015(4):68-69.
- [10] 吴龙涛,王铁宁,朱域. 基于改进灰色聚类的装备器材库存分类方法[J]. 火力与指挥控制,2017,42(12):76-80.
- [11] 杨帆,王铁宁,吴龙涛,等. 基于任务的装备器材非稳态需求预测[J]. 系统工程与电子技术,2019,41(12):2 796-2 801.
- [12] 吴雯雯,陈振林. 基于蒙特卡洛k-means聚类算法的舰船器材分类研究[J]. 计算机测量与控制, 2020,28(4):222-226.
- [13] 王纵虎. 聚类分析优化关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [14] NGUYEN T T,KRISHNAKUMARI P,CALVERT S C,et al.Feature extraction and clustering analysis of highway congestion[J].Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2019,100:238-258.
- [15] 王铁宁,杨帆,吴龙涛,等. 基于任务的装甲装备器材需求预测[J]. 火力与指挥控制,2018,43(7):71-75.
- [16] 杨帆,王铁宁,高晟. 面向任务的装备器材需求预测[J]. 火力与指挥控制,2021,46(4):48-53.
- [17] 沐爱勤,刘信斌,杜加刚,等. 基于矩估计的高原航空备件消耗规律研究[J]. 火力与指挥控制,2017,42(9):180-182.
- [18] KURT M,KHAROUFEH J P.Optimally maintaining a Markovian deteriorating system with limited imperfect repairs[J].European Journal of Operational Research,2010, 205(2):368-380.
- [19] 董晓雄,陈云翔,蔡忠义,等. 基于不完备信息的粗糙集初始备件品种确定方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018,40(3):590-594.
- [20] 蒋长兵,代应. 库存控制:模型、技术与仿真[M]. 北京:中国物资出版社,2010.
- [21] 古平,辛光,刘慎洋,等. 典型装备备件消耗规律研究[J]. 装备环境工程,2016,13(5):166-169.
- [22] 贾锐,宋志宏,秦传锋. 基于案例的新型舰船备件需求量的预测模型[J]. 船海工程,2006(2):70-72.
- [23] 雷斌,赵蕊,王卫红,等. 库存需求预测方法研究综述[J]. 统计与决策,2021,37(3):58-62.
- [24] CROSTON J D.Forecasting and stock control for intermittent demands[J].Journal of the Operational Research Society,1972,23(3):289-303.
- [25] SYNTETOS A A,BOYLAN J E.On the bias of intermittent demand estimates[J].International Journal of Production Economics,2001,71(1).
- [26] TEUNTER R H,SYNTETOS A A,BABAI M Z.Intermittent demand:Linking forecasting to inventory obsolescence[J].European Journal of Operational Research,2011, 214(3).
- [27] YANG Y,SUN L,GUO C.Aero-material consumption prediction based on linear regression model[J].Procedia Computer Science,2018,131:825-831.
- [28] 徐廷学. 基于灰色预测法的军械维修器材消耗规律[J]. 火力与指挥控制,2011,36(11):163-167.
- [29] 刘长新,熊励,王伟,等. 基于BP神经网络的航空器材消耗预测[C]//中国优选法统筹法与经济数学研究会,第十二届中国管理科学学术年会论文集,北京,2010.
- [30] 吴龙涛,王铁宁,杨帆. 基于贝叶斯法和蒙特卡洛仿真的威布尔型装备器材需求预测[J]. 兵工学报,2017,38(12):2 447-2 454.
- [31] Hasni M,Aguir M S,Babai M Z,et al.Spare parts demand forecasting:a review on bootstrapping methods[J].International Journal of Production Research,2019,57(15-16):4 791-4 804.
- [32] 周浩,黄善忠. 基于GM(1,1)和灰色马尔可夫模型的器材

- 消耗预测[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015,39(6):1 166-1 168.
- [33] 贾琦,杨帆,王铁宁. 基于灰色LS-SVM的装备器材需求预测模型[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(4):170-174.
- [34] HUANG Y,WANG H,XING G,et al.A hybrid grey relational analysis and support vector machines approach for forecasting consumption of spare parts[C]//2010 International Conference on Artificial Intelligence and Education (ICAIE),Hang zhou,2010.
- [35] 刘慎洋,高崎,李志伟,等. 基于使用寿命的装备备件消耗预测模型[J]. 装甲兵工程学院学报,2015,29(4):27-30.
- [36] 曹军海,杜海东,陈小龙,等. 基于平滑指数仿真优化的装甲装备器材消耗预测[J]. 系统仿真学报,2013,25(8):1 961-1 965.
- [37] SONG H,ZHANG C,LIU G,et al.Equipment spare parts demand forecasting model based on grey neural network:[C]// The Proceedings of 2012 International Conference on Quality,Reliability,Risk,Maintenance,and Safety Engineering and the3rd International Conference on Maintenance Engineering:Vol III.Chengdu,2012.
- [38] NEVES G,DIALLO M,LUSTOSA L J.Initial electronic spare parts stock and consumption forecasting[J].Inves-tigacao Operacional, 2008,28(1):45-58.
- [39] SHERBROOKE C C.Metric:A Multi-echelon technique for recoverable item control[J].Operations Research,1968, 16(1).
- [40] 张连武,赵方庚,陈学军. 美军装备备件需求预测应用现状及启示[J]. 兵工自动化,2013,32(7):34-37.
- [41] 孙立军,花兴来,张衡. 用价值工程理论确定雷达备件品种[J]. 空军雷达学院学报,2004(4):71-73.
- [42] REN Xi,ZHAO Jian-jun,YANG Li-bin.Spare Parts Varieties Level Configuration Based on Grey Situation Decision:第26届中国控制与决策会议论文集,长沙,2014.
- [43] 张闯,刘福胜,单志伟,等. 一体化装备保障备件品种确定方法[J]. 装甲兵工程学院学报,2018,32(3):30-34.
- [44] 董骁雄,陈云翔,蔡忠义,等. 基于不完备信息的粗糙集初始备件品种确定方法[J]. 系统工程与电子技术,2018,40(3): 590-594.
- [45] 舒彤,陈收,汪寿阳,等. 基于影响因子的供应链协同预测方法[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(8):1 363-1 370.
- [46] 董绍辉,张志清,西宝. 供应链协同需求预测机制研究[J]. 运筹与管理,2010,19(5):66-70.
- [47] 丁春光. 基于CPFR的协同预测模型及其系统构建研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.
- [48] HEMEIMAT R,AL-QATAWNEH L,ARAFEH M,et al.Fore-casting spare parts demand using statistical analysis[J]. American Journal of Operations Research,2016,6(2).

(上接第133页)统一体式储存装置进行物料搬运时的工作受力等状况,分析得到使用此类装置进行搬运时对工人具有一定的损伤,并根据得到的数据提出改良方案。研究确定的便携式折叠改良可以很好的改善工人的下脊柱受力情况,有效的改善了工人的工作环境。

#### [参考文献]

- [1] 陈善广,李志忠,葛列众,张宜静,王春慧. 人因工程研究进展及发展建议[J]. 中国科学基金,2021,35(2):203-212.
- [2] Sundin A,R rtengren,H Sj berg.Proactive Human Fac-

tors Engineering Analysis in Space Station Design Using the Computer Manikin Jack[C].Digital Human Modeling for Design & Engineering Conference & Exposition,2000.

- [3] 刘坚,蒲海蓉,于文恺,李震. 手工搬举作业的人因工程量化评估与改进研究[J]. 工业工程与管理,2010,15(1):103-107.
- [4] 刘慧军,张相宁,王会艳. 基于Jack的城际列车人机工程仿真研究[J]. 中国高新技术企业,2016(26):19-21.
- [5] 于文恺,蒲海蓉. 基于JACK的人因工程优化研究[J]. 科技创新导报,2009(2):10-11.