

12-13-2019

Decision-making Method for Formulating Spares Reserve Scheme Based on Deep Neural Network

Yunjing Zhang

Information Engineering University, PLA Strategic Support Force, Henan, Zhengzhou 450001, China;

Guangming Tang

Information Engineering University, PLA Strategic Support Force, Henan, Zhengzhou 450001, China;

Xiaoyu Xu

Information Engineering University, PLA Strategic Support Force, Henan, Zhengzhou 450001, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Decision-making Method for Formulating Spares Reserve Scheme Based on Deep Neural Network

Abstract

Abstract: Spare parts classification is important for spare parts storage and is a key part of spare parts decision-making activities. This paper analyzes the factors affecting the reserve scheme of wartime spares. Then by analyzing the inherent attributes of wartime spares, *two methods of spare parts classification are proposed to determine the variety and quantity of wartime spares based on deep neural network: (1) Ranks wartime spares according to their importance. A relatively simple deep neural network is used to analyze every attribute of the wartime spares in turn; (2) Inputs all the attributes of wartime spares into a relatively complex deep neural network to make the decision.* The experimental results show the advantages of the two methods in terms of efficiency and accuracy for formulating the reserve scheme of wartime spares.

Keywords

spare parts, reserve scheme, deep neural network, attribute analysis, decision making

Recommended Citation

Zhang Yunjing, Tang Guangming, Xu Xiaoyu. Decision-making Method for Formulating Spares Reserve Scheme Based on Deep Neural Network[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2238-2246.

基于深度神经网络的备件储备方案决策方法

张云景, 汤光明, 徐潇雨

(中国人民解放军战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450001)

摘要: 备件分类对于备件储备具有重要意义, 是备件决策活动的关键环节。分析了影响备件储备选择的因素, 提出了基于深度神经网络的备件储备品种和数量决策方法。对备件属性进行梳理, 按照属性影响因素分析, 提出 2 种备件分类方法: (1) 将备件属性重要性展开, 对备件属性重要性进行排序, 使用一个结构相对简单的深度神经网络依次对各属性实施判决, “不确定储备”的品种将再通下一属性判决; (2) 将备件的全部属性输入一个结构相对复杂的深度神经网络, 深度神经网络依据备件的全属性实施判决。实验证明 2 种方法分别在时间效率和决策准确性上具有优势, 能够为备件储备工作提供决策支撑。

关键词: 备件; 储备方案; 深度神经网络; 属性分析; 决策

中图分类号: TP182 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 11-2238-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0390

Decision-making Method for Formulating Spares Reserve Scheme Based on Deep Neural Network

Zhang Yunjing, Tang Guangming, Xu Xiaoyu

(Information Engineering University, PLA Strategic Support Force, Henan, Zhengzhou 450001, China)

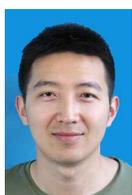
Abstract: Spare parts classification is important for spare parts storage and is a key part of spare parts decision-making activities. This paper analyzes the factors affecting the reserve scheme of wartime spares. Then by analyzing the inherent attributes of wartime spares, two methods of spare parts classification are proposed to determine the variety and quantity of wartime spares based on deep neural network: (1) Ranks wartime spares according to their importance. A relatively simple deep neural network is used to analyze every attribute of the wartime spares in turn; (2) Inputs all the attributes of wartime spares into a relatively complex deep neural network to make the decision. The experimental results show the advantages of the two methods in terms of efficiency and accuracy for formulating the reserve scheme of wartime spares.

Keywords: spare parts; reserve scheme; deep neural network; attribute analysis; decision making

引言

备件是实施装备维修过程中必不可少的物质资源。现在, 大型装备集成化、复杂化程度较高,

出现故障, 多采用换件修理的方式。因此, 备件作为重要的资源其地位十分重要。当装备故障发生后, 实施应急维修保障任务能否成功取决于其备件储备, 能否有效地完成抢修和保障任务很大程度上取决于库存部门储备备件品种和数量。然而, 当前在备件储备领域存在着以下问题: 哪些备件品种需要储备, 哪些备件是不必要储备, 哪些备件是不确定储备, 上述问题实际上是备件品种分类和数量的



收稿日期: 2019-05-20 修回日期: 2019-07-31;
基金项目: 国家社科基金军事学(13GJ003-066);
作者简介: 张云景(1983-), 男, 河南南阳, 博士生, 工程师, 研究方向为军事信息装备保障与评估; 汤光明(1963-), 女, 湖南常德, 博士, 教授, 研究方向为数据挖掘、信息安全; 徐潇雨(1993-), 男, 江苏连云港, 博士生, 研究方向为数据挖掘。

<http://www.china-simulation.com>

• 2238 •

确定问题。储备备件品种和数量过少, 将造成装备损坏后无法换件修理; 备件储备种类过多, 会造成大量冗余储存, 给备件的库存、运输保障增加额外负担。

目前, 各国军队都在对备件品种和数量决策的问题进行研究和预测, 但是预测结果与实际需求有较大的偏差。在外军演习过程中, 曾出现了需要的备件没有列入储备清单, 储备的备件大部分没有使用到的现象^[1]。在近年来发生几场信息化条件下的高技术局部战争中, 备件储备不合理、库存的短缺的现象更加凸显。根据规定, 美国空军、海军和海军陆战队的 F-16, F-18, F-22 和 F-35 战斗机联队需达到 80% 的任务准备度, 但是由于备件储备不足, 国防部甚至要求退役一些旧飞机, 拆除零部件补充备件供应。根据美国政府问责署发布的报告, 在 2018 年 5~11 月期间, 由于零部件短缺, 约 29.7% 的 F-35 战斗机无法执行任务。

在考虑故障率、备件易损程度、使用频率等因素的情况下, 建立战时备件储备标准, 制定备件储备清单, 储备品种齐全、规模合理的备件, 能够有效避免部件损坏后无法更换的情况, 并能够降低维修费用, 提高备件利用率。

目前, 学术界对备件分类和需求预测问题进行了深入的研究^[2-4], 使用的方法有价值工程法、模糊综合评判法、相似性方法等^[5]。已有方法中, 对影响战时备件储备的因素分析不够紧密, 常储备了不属于战时所需的备件, 缺乏实际应用, 具有一定的局限性。

当前, 备件库存部门使用较多的方法是 ABC 分类法^[6], 该方法按照某个标准将备件分为 A 类、B 类和 C 类, 分别对应为重要、次要和一般 3 种类别。该方法计算较为简单, 具有一定的适用性。但是, 随着装备使用情况的变化, 备件实际分类出现了与理论值之间的差异的情况, 备件分类需要作出一定调整, 因此 ABC 分类方法很难现实需求。

此外, 备件品种多、数量大、易混淆、使用频率差别大等特点, 使用单一的分类方法无法顾及到

备件的多样性。备件分类需要综合考虑影响因素, 针对多方面指标, 更新分类策略。

本文对备件库存的影响因素进行了归纳和总结, 以备件分类中的 5 个主要因素为核心, 提出了基于属性分析的储备方案决策, 通过深度神经网络对属性进行判别, 形成决策建议。

随着计算机计算性能的提升和大数据时代的到来, 深度神经网络^[7]已在诸多领域得到突破性的应用^[8-10]。卷积神经网络^[9]是深度神经网络的典型代表, 其结构由若干卷积层、正则化层、非线性激活层、池化层、全连接层构成^[11]。本文主要运用卷积神经网络对数据承载的内容进行迭代分析, 在对历史数据的挖掘基础上, 通过属性融合、超参数调整等方式得到备件分类和预测结果。

1 备件储备方案影响因素及属性分析法

备件是为了在装备使用、保养和维修过程, 更换相应部件、组件、零件和消耗件而储备的资源。

确定备件储备方案的过程的实质是基于备件属性进行决策的过程^[12]。装备维护活动中, 存在很多意外事件, 存在比平时更多的影响备件消耗因素, 如某一品种的备件是重要件, 则使用寿命短, 必须在特定时间或寿命更换, 且该备件具备维修更换条件。此时, 就应该作为应急备件进行储备。应急备件储备的是重要部件、进口部件和专用部件, 其具有采购周期长、价格较高的特点。本文将备件储备方案决策的主要影响因素分为关键性、可替换性、获取难度、脆弱性和经济性^[13-14]。

(1) 关键性: 指备件在整个装备中所占的地位和作用, 或者其发挥的价值。关键性备件的缺失, 将会给装备系统运行带来较大影响。在应急条件下, 备件保障应当优先保障使装备能在短时间内得以正常运行的部件。

(2) 可替换性: 是指在制定维修级别上, 备件能够被拆卸和更换的特性。可替换性强的备件, 不需要作出改动即可替换其他装备实体同类备件。需

强调的是，应急情况下，可替换性也存在约束，假如其备件替换修理工时超过 24 h，对其修理不再对目前的战斗具有意义^[15]。

(3) 获取难度：指备件在应急条件获取的方式的难易程度，该属性与装备生产工艺、制造厂商、材料等密切相关。就军事装备而言，大部分备件属于非标准件，需要提前订货。

(4) 脆弱性：包括平时装备运行过程中备件脆弱和特殊时期的脆弱性，平时指备件失效可能性的大小或消耗数量的多少；特殊时期损伤性，指在特殊或应急条件下部件失效可能性的大小和消耗数量，特殊时期备件脆弱性差于平时。如特殊时期装备运行时间长、环境恶劣，一些不容易出现故障的备件将随之发生变化，短时间内出现较大损耗。

(5) 经济性：指备件在订购、运输、存储、折旧、报废等过程中所消耗的费用总和的大小程度。采购费用越高，库存费用升高，储存难度越高的部件经济性越差^[16]。

备件分类考虑的因素按照以上 5 个方面分解，考虑单机安装数、是否进口、储运成本、提前期、

是否标准件、温度要求、是否特殊包装等具体备件属性，分解如图 1 所示。

属性分析法其原理是将备件输入一个决策树，根据备件的主要影响因素分析，通过逐步判别，输出决策结果，将备件分为储备、不储备和不确定储备三类，在此基础上在对备件储备数量进行预测和估算^[17-18]。在影响备件决策的五种属性里面，最重要的是关键性，其次是可更换性。部分备件，国际关系、市场限制等客观情况影响较大，尤其是在特殊时期采购渠道可能被关闭、市场采购可能性为零。因此其获取难度属性比脆弱性更重要。特殊时期备件储备关注的是备件储存保障能否完成其任务的价值，其大部分为专用品，管理部门一般关注的是有无库存，经济性属性较低。

备件储备方案决策属性分析法按照属性重要性的排序，如在应急情况下可按照关键性、可替换性、获取难度、脆弱性和经济性的序列，形成属性重要性序列，对考察品种进行逐个分类，确定备件品种是否储备，其流程如图 2 所示。

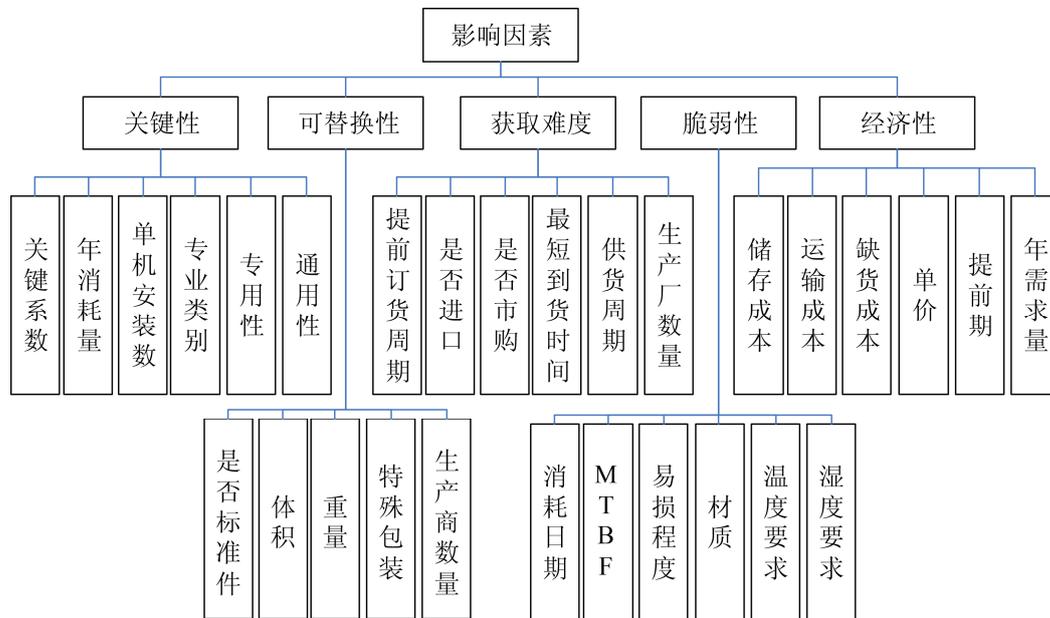


图 1 备件分类影响因素分解

Fig. 1 Decomposition of influencing factor of spare parts classification

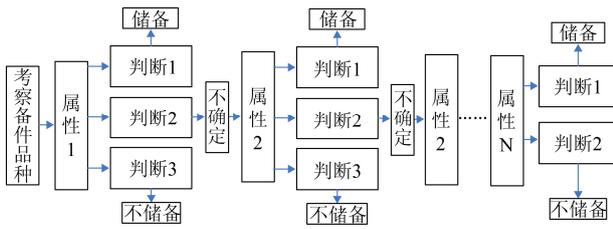


图 2 属性分析法的分析流程

Fig. 2 Analysis flow of attribute analysis method

2 基于卷积神经网络的备件储备方案决策

备件储备方案决策是基于关键性、可替换性、获取难度、脆弱性和经济性五个备件属性形成的序列基础上实施的决策, 上述每个备件属性均被表示为一个 D 维向量(以下称为属性向量), 以备件 A 为例, f_1^A 是一个 D 维向量, 表示备件 A 的关键性; f_2^A 是一个 D 维向量, 表示备件 A 的可替换性; f_3^A 是一个 D 维向量, 表示备件 A 的获得难度; f_4^A 是一个 D 维向量, 表示备件 A 的易损性; f_5^A 是一个 D 维向量, 表示备件 A 的经济性, 即 f_i^A 表示备件 A 的第 i 个决策依据属性。

为便于属性向量输入卷积神经网络, 须将 1 维的属性向量 f 转化为 2 维属性矩阵 X , 处理如图 3 所示, 具体过程为: 取属性向量 f 中的前 m 个元素依次排列组成属性矩阵 X 的第一行 l_1 , 在属性向量 f 中接着取第二组 m 个元素构成属性矩阵 X 的第 2 行 l_2 , 以此类推直至将属性向量 f 中的全部元素都填充到属性矩阵 X 。属性矩阵 X 将作为卷积神经网络的输入, 从而得到参与卷积运算的特征映射图。

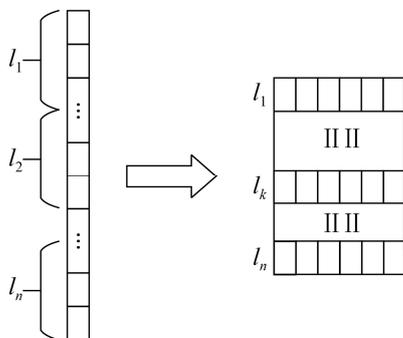


图 3 一维属性向量转为二维属性矩阵

Fig. 3 Transformation of a one-dimensional attribute vector into a two-dimensional attribute matrix

基于卷积神经网络, 本文提出两种战时备件储备方案决策方法, 即属性重要性顺次决策方法和多属性融合决策方法。

2.1 属性重要性顺次决策方法

该方案的流程图如图 4 所示。

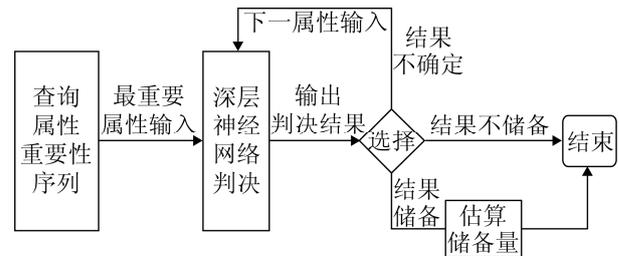
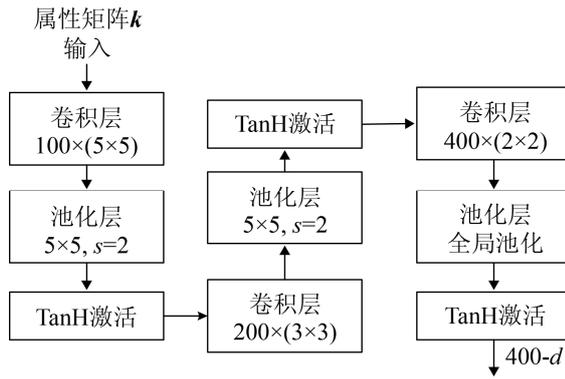


图 4 属性重要性顺次决策方法流程图

Fig. 4 Flow chart of sequential decision method for attribute importance

step 1: 依据备件类型将该备件的不同属性按重要性降序排序。在备件储备实际工作中, 发现型号不同的备件其属性重要性序列是不相同的。例如, 某备件在实际使用中关键性属性评级较低, 同时脆弱性评级较高, 在该备件的属性重要性序列中, 脆弱性地位应排在关键性之前; 另一备件在实际使用中关键性评级较低, 同时脆弱性评级也较低, 在该备件的属性重要性序列中, 脆弱性应位于关键性之后。备件的属性重要性序列并非备件的固有属性, 备件的属性重要性序列随环境的变化而变化, 备件属性重要性序列都应当储存于备件自身数据库, 备件序列需要根据情况作出实时调整和更新。

step 2: 依据待判决备件的属性重要性序列, 将该备件的属性依次输入经训练的深层神经网络, 得到判决结果“储备”、“不储备”或“不确定”。当且仅当当前属性被判决为“不确定”时, 才进行下一个属性的判决, 直至某个属性的判决结果为“储备”或“不储备”为止。判决某一属性所使用的网络结果如图 5 所示。

图 8 第 k 个单属性处理模块Fig. 8 K -th single attribute processing module

对已判定为“储备”的装备，确定经验系数 x ，用于估算其储备量。储备量的估算公式与属性重要性顺次决策方法中的相同，如式(1)所示。显然，对属性重要性序列不同的备件，估算储备量使用的经验系数 x 应不同。

易知多属性融合决策方法，因其对某种备件的判决以多种属性矩阵作为输入，输入神经网络的数据维数较大，且神经网络的结构较为复杂、权值参数数量相对多，所以其实施决策的计算量大、运行时间长、效率低。而因其以多种属性作为判决依据，考虑了全部属性对判决结果的影响，其判决结果的准确性(合理性)表现较好。

3 实验结果与分析

3.1 实验设置

为了验证上述 2 种战时备件储备方案决策的实际性能，进行如下实验：

由历史数据库中备件储备数据构成实验所需的数据集(N 组数据)，如表 1 所示。该组数据用于训练深层卷积神经网络、测试所提方法的决策性能，训练和测试中使用的标签是人类专家的人为决策结果。按两个不同的方案将数据集划分为训练集和测试集，方法如下：

- (1) 将 N 组数据中的前 $N-t$ 组作为训练集，剩余的 t 组数据作为测试集；
- (2) 对已有的 N 组数据，由每组数据中随机取 m 种装备的信息，共同构成训练集。每组数据中未被取出的装备信息共同构成测试集。

上述 2 种训练集和测试集的划分方法均能用来检验和测试本文所提出算法的有效性，区别在于：第 1 种划分方法可用于测试未来战时备件储备保障方案备件品种和数量方案决策准确性和时效性；第 2 种划分方法可用于测试未知备件(某新装备)的备件储备方案决策的准确性和时效性。

实验采用了配备了 Nvidia Tesla K80 的工作站，Tensorflow1.4 深度学习框架。实验参与随机梯度下降算法(SGD)取得最佳实验结果所使用的超参数如表 2 所示。

表 1 备件储备历史数据集

Tab. 1 History data set of spare parts reserve

序号	名称	型号	年消耗量/部	单价/元	提前期/月	年需求量/部	订货费/元	...	是否储备
1	油泵	422A	48	1 212.43	14	4	314.2	...	Y
2	变流机	506362	23	620.35	36	2	253.5	...	Y
3	地平表	BDP-2B	36	287.46	15	17	215.2	...	N
4	气压高度表	BG-6	31	265.50	4	30	312.1	...	N
5	指示器	BZH-1	14	687.80	9	11	575.6	...	N
6	高度表	265	25	568.45	5	12	432.7	...	N
7	623 组件	623	27	642.80	2	11	253.8	...	N
8	空速表组件	BK400-1A	30	374.89	2	10	235.6	...	N
9	启动发电机	QF-4.8	22	653.70	3	15	564.7	...	N
10	航向陀螺	TC-4	17	667.56	3	10	335.4	...	Y
...
N	罗盘接收机	WL-7-6	23	743.70	5	13	528.4	...	Y

表 2 属性重要性顺次决策方法中取得最佳实验结果的超参数

Tab. 2 Hyper-parameters for optimal experimental results using the sequential decision method

超参数组序号	Base learning rate	Weight decay	Batch size	Momentum	Gamma	Stepsize
1	0.010	0.000 5	25	0.9	0.1	1 000
2	0.010	0.000 5	25	0.9	0.1	1 000
3	0.012	0.000 5	50	0.9	0.1	500
4	0.012	0.000 5	100	0.9	0.1	250

表 2 中, 超参数组序号 1 表示在属性重要性顺次决策方法(划分方法 1)中取得最佳实验结果的超参数组。序号 2 表示在属性重要性顺次决策方法(划分方法 2)中取得最佳实验结果的超参数组。序号 3 表示在多属性融合决策方法(划分方法 1)中取得最佳实验结果的超参数组。序号 4 表示在多属性融合决策方法(划分方法 2)中取得最佳实验结果的超参数组。

3.2 实验结果

属性重要性顺次决策方法和多属性融合决策方法的备件分类准确性, 即将某备件分类为“储备”或“不储备”的准确性, 如表 3 所示。表 3 划分方法 1 所示为第 1 种训练集和测试集划分方法下的实验结果; 划分方法 2 为第 2 种训练集和测试集划分方法下的实验结果。备件分类准确性 C 计算公式为:

$$C = N_c / N_T \quad (3)$$

式中: N_c 为分类正确的备件数量; N_T 为测试集中备件总数。

表 3 所提方法备件分类准确性

Tab. 3 Classification accuracy by the proposed methods /%

划分方法	属性重要性 顺次决策方法	多属性融合 决策方法
1	95.6	96.3
2	91.2	92.7

属性重要性顺次决策方法和多属性融合决策方法的备件分类平均判决时间如表 4 所示, 该判决时间仅为将某备件分类为“储备”或“不储备”所用的平均时间, 未计算进一步实施储备量估算所用的时间。

表 4 所提方法备件分类平均判决时间

Tab. 4 Average decision time of spares classification

方法	1	2
时间/s	0.027 46	0.075 88

备件储备量估算准确性指标 Q 的计算方法如公式(4)所示:

$$Q = \frac{\sum_{t=1}^T (1 - \frac{|S_R^t - S_L^t|}{S_L^t})}{T} \quad (4)$$

式中: T 为测试集中样本总数; S_R^t 为储备量估算值; S_L^t 为储备量标签值。

属性重要性顺次决策方法和多属性融合决策方法的备件储备量估算准确性, 如表 5 所示。

表 5 所提方法备件储备量估算准确性

Tab. 5 Spare reserve estimation accuracy /%

划分方法	属性重要性 顺次决策方法	多属性融合 决策方法
1	85.4	88.6
2	83.4	87.1

由实验数据可知, 属性重要性顺次决策方法和多属性融合决策方法在备件分类中均取得了超过目前保障部门中使用的 ABC 分类方法的准确性, 在备件储备量估算中均取得了超过依靠专家和历史记录估算备件数量方法。两种方法相比, 属性重要性顺次决策方法的判决时间效率高于多属性融合决策方法, 而多属性融合决策方法的决策准确性高于属性重要性顺次决策方法。上述实验结果表明, 本文所述的深层神经网络模型可作为战时备件存储订购的有力工具。

3.3 部分超参数分析

不同基学习率下, 备件分类准确性结果见表 6。

表 6 所提各种方法在不同学习率下的分类准确性
Tab. 6 Classification accuracy under different learning rates
by sequential decision-making method /%

方法	0.005	0.008	0.010	0.012	0.015	0.020
1	91.1	90.3	92.7	89.3	90.2	91.1
2	93.7	91.5	91.1	90.9	92.3	94.2
3	82.4	88.3	84.1	90.6	87.3	83.2
4	85.5	89.2	87.1	86.4	88.1	91.7

表 6 中,方法 1 为属性重要性顺次决策方法(划分方法 1)在不同学习率下的备件分类准确性,方法 2 为属性重要性顺次决策方法(划分方法 2),方法 3 为多属性融合决策方法(划分方法 1),方法 4 为多属性融合决策方法(划分方法 2)。由于储备量估算的准确性与分类准确性正相关,因此储备量估算准确性与超参数选择的关系在此不做分析。

4 结论

本文提出的基于深度神经网络的战时备件储备方案决策方法,解决了以往使用的模糊综合评价、灰色评估、层次分析等方法中主观因素过多,受评价人员自身影响较大的问题,使机器作为客观评价的标准。

然而所提方法也存在不足之处:

(1) 存储备件属性重要性序列的备件信息数据库须要人工维护,使得本文所提方法尚不能完全脱离人工;

(2) 在深度神经网络的训练中,以人类专家的决策结果作为训练样本的标签,目的是使深度神经网络的决策结果近似人类专家,如何使深度神经网络取得较人类专家更合理的决策结果有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 程力. 装备战场抢修备件品种的优化确定模型[J]. 航空维修与工程, 2006, 14(4): 55-57.
Cheng Li. Optimization and determination model of spares variety for equipment battlefield repair [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2006, 14(4): 55-57.
- [2] 金正, 张志华, 应新雅, 等. 舰船装备限寿备件满足率

- 评估模型[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(4): 130-133.
Jin Zheng, Zhang Zhihua, Ying Xinya, et al. Satisfaction Rate Assessment Model of Limited Life Spare Parts for Ship Equipment [J]. Command Control and Simulation, 2015, 37(4): 130-133.
- [3] 闫红伟, 康建设, 赵纳新, 等. 战时装备维修备件重要度模糊综合评定方法[J]. 兵工自动化, 2007, 26(2): 16-17.
Yan Hongwei, Kang Jianshe, Zhao Naxin, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for the Importance of Wartime Equipment Maintenance Spare Parts [J]. Ordnance Industry Automation, 2007, 26(2): 16-17.
- [4] 孙强, 岳继光. 基于不确定性的故障预测方法综述[J]. 控制与决策, 2014, 29(5): 769-776.
Sun Qiang, Yue Jiguang. Overview of fault prediction methods based on uncertainty [J]. Control and Decision-making, 2014, 29(5): 769-776.
- [5] 张柳, 聂成龙, 张伟, 等. 装备作战单元维修保障建模与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 124-132.
Zhang Liu, Nie Chenglong, Zhang Wei, et al. Modeling and Simulation of maintenance support for equipment combat unit [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 124-132.
- [6] 胡丹. 平战结合下大型服务系统应急备品备件库存管理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 20-21.
Hu Dan. Research on emergency spare parts inventory management of large-scale service system under the combination of peacetime and wartime [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 20-21.
- [7] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. Nature (S0028-0836), 2015, 521(7553): 436.
- [8] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks [C]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012: 1097-1105.
- [9] Girshick R. Fast R-CNN [C]. IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 2015:1440-1448.
- [10] Taigman Y, Yang M, Ranzato M A, et al. Deepface: Closing the gap to human-level performance in face verification [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. USA: IEEE, 2014: 1701-1708.
- [11] Lecun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE(S0018-9219), 1998, 86(11): 2278-2324.
- [12] 高学东, 丁军. 一种新的信息系统属性约简算法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(1): 131-136.

- Gao Xuedong, Ding Jun. A New Attribute Reduction Algorithms for Information Systems [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2007, 27(1): 131-136.
- [13] 张帅, 唐金国, 俞金松, 等. 基于属性的舰载机航材备件品种确定方法[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(7): 87-91.
- Zhang Shuai, Tang Jinguo, Yu Jinsong, et al. Attribute-based method for determining the types of spare parts for shipboard aircraft [J]. Firepower and Command Control, 2015, 40(7): 87-91.
- [14] 张仕念, 刘春和, 刘雪峰, 等. 战储备件储备品种选择的属性分析法[J]. 系统工程理论与实践, 2010(10): 118-123.
- Zhang Shinian, Liu Chunhe, Liu Xuefeng, et al. Attribute Analysis Method for Selection of Warfare Reserve Varieties [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2010(10): 118-123.
- [15] 可荣博, 王铁宁, 宋宁波. 基于遗传 BP 神经网络的装甲装备器材需求预测[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(6): 99-102.
- Ke Rongbo, Wang Tiening, Song Ningbo. Armored equipment demand forecasting based on genetic BP neural network [J]. Firepower and Command Control, 2015, 40(6): 99-102.
- [16] 夏国清, 陈红召, 栾添添. 有限维修渠道下两级维修供应系统性能评估模型[J]. 系统工程理论与实践, 2015: 116-118.
- Xia Guoqing, Chen Hongzhao, Luan Tiantian. Performance evaluation model of two-level maintenance supply system under limited maintenance channels [J]. System engineering theory and practice, 2015: 116-118.
- [17] 李华, 邵松世, 张光宇, 等. 备件保障的工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 5-11.
- Li Hua, Shao Songshi, Zhang Guangyu, et al. Engineering practice of spare parts support [M]. Beijing: Science Press, 2016: 5-11.
- [18] 赵建忠, 徐廷学, 尹延涛, 等. 基于改进 GM(1,1)模型的导弹备件消耗预测[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 48-51.
- Zhao Jianzhong, Xu Tingxue, Yin Yantao, et al. Missile spare parts consumption prediction based on improved GM(1,1) model [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 48-51.
- [19] Lecun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE(S0018-9219), 1998, 86(11): 2278-2324.
- [20] 边肇祺. 模式识别 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- Bian Zhaoqi. Pattern Recognition [M]. 2 nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.