

基于区块链的装备维修支持系统设计与开发

袁晓静¹, 罗伟蓬¹, 张宏强², 侯根良¹, 张 泽¹

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025;

2. 火箭军装备部南京军代局, 江苏 南京 210008)

摘 要: 为了提高装备保障资源的调配效率, 解决现有装备维修管理信息系统容易被修改、数据共享水平低的问题, 开发了一种基于区块链的装备维修支持平台。通过分析装备维修保障需求及所面临的挑战, 详细设计了该装备维修支持平台的系统模型, 给出了该系统的业务结构、功能模块、系统架构和算法模型。采用以太坊作为底层架构, 通过智能合约、分布式账本, 实现对装备维修保障数据的上链, 确保维修工时真实有效、维修器材消耗准确清晰、维修质量全域可追溯、维修成本真实可控、维修经费结算准确。试验结果表明: 该系统运行良好, 节点区块计算平均时间为 46.6 ms, 节点数据调阅平均响应时间为 1.3 s。该系统可有效提升装备维修保障数据的管理效率。

关键词: 区块链; 装备保障; 分布式账本; 管理系统

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)01-054-10

Design and Development of Equipment Maintenance Support System Based on Blockchain

YUAN Xiaojing¹, LUO Weipeng¹, ZHANG Hongqiang²,
HOU Genliang¹, ZHANG Ze¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi;

2. Nanjing Military Representative Bureau of Rocket Force Armament Department, Nanjing 210008, Jiangsu)

ABSTRACT: To improve the efficiency of equipment support resources allocation and address defects of the existing equipment maintenance management information system such as susceptibility to be tampered with and low data sharing level, an equipment maintenance support platform was constructed based on blockchain. By analyzing the requirements and challenges of equipment maintenance support, the system model of the equipment maintenance support platform was elaborately designed. Simultaneously, the business structure, function modules, the system architecture and algorithm model were given. Using Ethereum as the underlying architecture, the link of equipment maintenance support data was realized through intelligent contract and distributed ledger. Consequently, it ensured real and effective maintenance working hours, accurate and clear consumption of maintenance equipment, whole-domain traceability of maintenance quality, real and controllable maintenance costs and accurate settlement of maintenance funds. Test results showed that the system works well, the average calculation time of node blocks is 46.6 ms and

收稿日期: 2023-12-04

第一作者: 袁晓静 (1979—), 男, 教授, 主要从事装备维修、表面技术研究。E-mail: 731218791@qq.com

引用格式: 袁晓静, 罗伟蓬, 张宏强, 等. 基于区块链的装备维修支持系统设计分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (1): 54-63.

the average response time of node data retrieval is 1.3 s. It indicated that the constructed system could effectively improve equipment maintenance support data management efficiency.

KEYWORDS: blockchain; equipment maintenance; distributed ledger; management system

随着现代战争信息化、智能化程度不断加深, 装备保障资源的高效利用与装备性能的快速恢复成为装备维修保障的核心问题。而现有的装备维修管理信息系统高度依赖人为操作, 数据信息不真实, 共享水平低, 急需开发新的装备维修管理系统提高数据的可靠性, 进而保证装备保障资源的高效调配和智能化保障能力。

为了提高武器装备的智能化保障水平, 国内外进行了广泛研究。一种方法是采用现代信息化手段, 通过在线或离线的状态监控、信息采集, 运用大数据和智能学习等技术不断积累和完善对于故障的诊断和分析技术, 实现对装备整体健康状况进行实时评估与预测, 为装备维修管理工作的科学决策提供参考依据^[1-2]。樊辉锦等^[3]通过引入基于状态维修模型, 提高维修时机精确性、降低维修成本。邱群先等^[4]通过引入隶属度函数, 实现定性描述与定量描述的转换, 但是隶属度函数的确定依赖经验, 其科学性有待提高。连云峰等^[5]通过引入云模型, 提高装备状态评估与预测的科学性。这些装备信息管理系统通过使用物理数据与虚拟数据进行评估与预测, 缺乏信息与实际装备的一致性与同步性, 导致其分析结果的实时性与置信性不足。另一种方法是采用基于数字孪生的维修保障管理系统, 以数字化的方式建立物理实体仿真模型, 实时采集、动态分析保障系统各要素状态, 仿真分析各项活动数字规律, 为装备维修保障分析与预测提供依据^[6-8]。王帅等^[9]构建了自行火炮维修保障系统数字孪生体仿真模型, 通过仿真模型进行维修资源预测。基于数字孪生的装备信息管理系统可以提高数据采集的实时性与置信性, 但是如果系统受到攻击或者信息被修改, 将会导致严重的问题。

近年来, 区块链 (Blockchain) 凭借去中心化、数据不可修改等特点, 吸引了许多国家政府部门、金融机构及互联网巨头公司的广泛关注, 成为当前学术界和产业界的热点课题。目前已延伸到物联网、智能制造、供应链管理、数字资产交易等多个领域。如 GE (General Electric Company) 航空集团和 MTU (Motoren und Turbinen-Union Frindrichshafen GmbH) 航空发动机维

修公司正在推进基于区块链的零件跟踪系统^[10]。潘永洪等^[11]将区块链引入军事指挥控制系统当中, 依托智能合约建立了应急响应机制, 实现了弱中心或无中心指挥节点场景下的动态指控。李子源等^[12]开发了基于以太坊的装备全寿命数据管理平台, 实现对武器装备全寿命周期的可控访问、全程审计与状态跟踪。基于区块链的装备维修管理系统, 其优点在于数据信息无法删除或修改, 使用者可以确保这些信息是最原始的资料, 实现更准确、更广泛的预测维修。此外, 分布式账本意味着可以更迅速地向监管机构反映其装备结构影响程度, 使监管机构及时掌握装备服役状态。

为有效监控维修工时、追溯器材消耗、提高装备维修保障的质量与效率, 本文利用区块链的分布式、不可修改、防伪等重要特征, 设计了一种基于区块链的装备维修支持平台, 将装备维修数据上链, 确保维修工时真实有效, 维修器材消耗准确清晰、维修质量全域可追溯、维修成本真实可控, 维修经费结算准确。从而提高装备维修资源的利用效率, 提升装备维修管理水平、提升装备作战应用效能。

1 装备维修保障对区块链的需求分析

武器装备从立项论证、研制生产、交付服役到退役报废, 需要对全寿命周期内包括设计方案、试验结果、技术状态等大量数据资料进行记录备案, 数据的真实性对于任务的后期评估以及任务前的保障需求测算至关重要。虚假的数据会导致保障资源的错误配置, 进而影响战争的进程。然而, 现行的武器装备数据记录方式, 通常为纸质或电子媒介备案, 这种传统方式记录的数据容易被人为修改, 存在数据安全难以保障、数据监管困难等缺陷。

区块链技术作为新一代的颠覆性技术, 通过分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等技术, 可有效解决传统数据管理系统的数据造假问题, 构建真实可信的数据管理系统。因此, 在武器装备管理中引入区块链技术, 让上级主管部门、武器装备管理部门和武器装备使用方,

甚至武器装备科研单位和生产厂家都参与到武器装备战技状态的更新与维护环节中, 形成一个分布的、受监督的武器装备档案登记网络, 以及分布式维修账本, 可实现维修过程全程留痕, 可信地记录装备维修工时、维修器材、维修工艺、维修检验等区块数据, 从而精确地核算维修成本、结算维修经费, 为装备的后期评估以及任务前的保障需求测算提供支撑。

1.1 精确维修工时

工时代表着生产力, 是装备维修成本核算的重要依据, 传统维修工时比较粗略地计算维修所消耗的人力资源, 往往忽略了维修计划、经费保障、器材请购等活动所消耗的人力资源, 缺乏有效工时的计算。使用区块链技术, 则可使记录涵盖装备大中修计划、故障发现、装备交接、维修方案、物料请领、故障诊断、维修作业、维修检验、修竣交装等维修节点和链条的活动, 能更精确计算维修工时, 为有效缩短维修工期、节约人力资源提供支撑。

1.2 明确器材消耗

装备维修每年投入了大量维修经费, 订购了大量的维修器材, 但粗犷的维修作业登记使维修器材消耗不明, 紧缺物料可能无法得到保障, 仓储呆滞器材较多, 无法支撑维修器材的需要。应用区块链技术, 将机关经费预算、器材订购、仓储运输、维修更换件、报废处理等上链, 可有效明确装备消耗、提高维修物资周转效率、减少呆滞物资, 节约维修经费。

1.3 维修质量追溯

维修质量决定装备寿命的保持情况以及装备战斗力的恢复情况, 是修理机构的生命线。当装备发生重大事故时, 现有技术很难对装备质量进行追溯。应用区块链技术, 将装备动用和维修过程数据上链, 特别是外协和军民融合维修数据一起上链, 能够可靠记录维修工艺、维修更换器件、软件升级、维修人员、维修环境等各种文字、表格、图像、音频、视频等信息, 能为质量追踪提供器材、责任人、维修工艺追溯, 从而找出影响维修质量的症结, 进行针对性改善, 提高修理部队的维修能力。

1.4 结算单据防伪

维修经费结算涉及修理机构、使用部队、仓储单位、器材生产厂家, 结算金额合理性和结算经费有效性都面临着考验, 维修工时是否准确、

维修消耗是否明确、维修质量是否达到延寿要求等, 需为经费合理和有效性结算提供依据。将维修过程、修理工艺、维修消耗等上链, 能有效识别结算经费含金量, 统一核算规则和算法, 可提高维修经费准确性。

基于装备维修的现状, 亟须研究基于区块链的维修保障系统, 搭建区块链维修系统的典型软硬件应用环境, 构建一种不可被破解的完整监控、管理和控制系统, 以进一步提高武器装备管理的安全性、便利性和可信度。

2 基于区块链的装备维修保障支持系统设计

2.1 设计原则

维修支持系统建设应用区块链技术, 以构建更加科学合理的维修管理手段。基于区块链信息不可修改、可追溯性的特征, 实现维修质量的可追溯、维修成本管控, 以提高设备维修质量, 提升修理结构的修理能力, 增强维修资源的利用率。系统建设应遵循以下原则。

(1) 融入现有装备管理系统, 基于区块链建立维修支持系统。系统建设应基于设备大中小修管理流程和设备维修作业规程, 在原有装备管理系统基础之上, 应用区块链技术建设维修支持系统, 实现设备维修全过程全周期的数据采集、数据存证等, 以更好地达到积累维修经验和追溯维修质量的目的。

(2) 实用适用, 安全可靠。应用场景设计方面, 要充分考虑维修场所和维修人员的特点, 保障系统实用、适用; 安全保密方面, 要充分考虑行业的特性和网络安全要素, 利用区块链加密技术和数据安全技术, 确保系统的稳定运行及数据的安全可靠。

(3) 技术开放、兼容扩展。体系架构采用“云”加“端”的技术架构, 硬件设备采用“软件定义”的总体思路, 构建统一存储和应用管理平台, 按照全军装备数据标准, 规范化采集、管理装备业务数据。

(4) 关键技术自主可控, 周边技术兼容适配。综合考虑国产软硬件的成熟度和生态发展, 软件关键系统自主, 中间件兼容适配, 硬件核心器件全部替换, 周边件兼容使用, 实现核心、关键技术的自主可控。

2.2 设计方案

区块链维修系统采用云+网+端系统结构, 如图1所示。

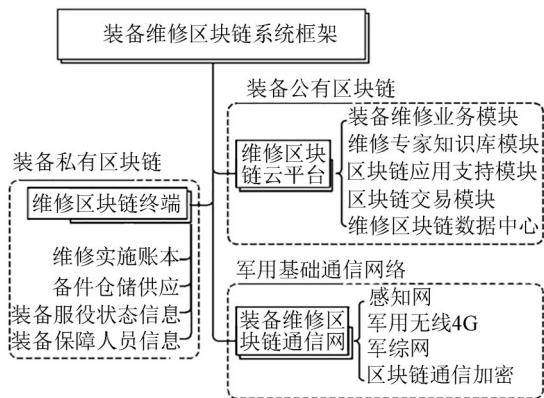


图1 装备维修区块链系统框架

Fig. 1 Framework of equipment maintenance blockchain system

云上主要基于虚拟化技术, 接入现有的设备维修管理系统, 部署区块链维修业务模块、维修专家知识库模块、区块链应用支持模块、区块链交易模块和维修区块链数据中心, 构建基于智能合约、共识机制、挖矿机制的信息中心。端上建立维修实施账本、备件器材仓储供应信息、装备服役状态和装备保障人员信息, 是智能合约、共识机制与挖矿机制的参与者。运用感知网、军用无线4G、有线军综网, 采用区块链通信加密技术, 实现云集中网络数据传输及点对点数据传输。该系统有效覆盖设备管理、维修执行、仓储作业等设备保障活动。

2.2.1 区块链维修系统业务结构

区块链业务结构的核心思想主要包括以下方面: 一是借鉴“比特币挖矿”思想, 维修人员不断挖掘和贡献维修经验, 引入竞争机制赚取的“维修币”, 允许维修币交易和晋升消耗, 从而丰富维修知识库, 调动维修人员的积极性; 二是借鉴“区块链溯源”的特征, 追溯器材消耗和设备维修质量, 确保维修质量可信可靠, 有利于设备寿命的保持和延寿, 从而节约设备经费, 提高设备提供战斗力; 三是借鉴“区块链信用评价”共识机制, 精确核算设备维修有效工时, 明确器材消耗, 准确结算维修经费, 节约维修成本, 提高资源的利用率。

区块链维修业务架构是在现有维修业务的基础上, 构建维修区块链电子账本, 其业务结构如

图2所示。区块链维修系统以设备寿命保持和延寿为核心, 基于维修管理、维修执行、维修评价等现有业务, 应用区块链技术, 研究覆盖故障报修、送修交接、维修方案拟制、故障诊断、器材请领、器材更换、质量检验、修竣交付、使用评价、经费结算等全过程的分布式电子维修账本建设, 评估区块链技术对提升维修能力、核算维修成本、溯源维修质量等的应用价值。

2.2.2 区块链维修系统功能模块

区块链维修系统基于维修管理、维修执行、维修评价等现有业务, 应用区块链技术, 研究覆盖故障报修、送修交接、维修方案拟制、故障诊断、器材请领、器材更换、质量检验、修竣交付、使用评价等全过程的分布式电子维修账本构建, 按照应用场景分为模型算法库、数据中心、交易中心、应用中心、维修区块链综合管控装置、维修区块链平板终端、维修区块链穿戴终端等7个软件配置项。组成模块如图3所示。

(1) 模型算法库。利用加解密、Merkle树、时间戳、哈希值等算法以及相应数据结构, 结合虚拟维修币、维修算力、智能合约、自主交换等机制, 实现维修工时、维修器材消耗、维修经验分享、维修成本计算等链式存储结构及其算法模型实现和管理。

(2) 数据中心。是维修全过程全周期数据的存证中心, 主要是将设备维修的过程描述、器材消耗、维修工时、设备系统工时、器材消耗、质量追溯和成本核算等数据区块链数据持久化, 实现维修数据、维修账目数据的区块链存储。为交易中心、模型算法库、应用中心、维修全过程等提供数据支撑。

(3) 交易中心。是维修虚拟币的发行和交易中心, 维修虚拟币是衡量维修服务所付出的劳动的虚拟货币, 维修人员可以通过完成维修任务, 撰写维修专家知识库、评论维修案例等活动赚取维修虚拟币, 虚拟货币为维修人员技术等级评级、职务晋升等提供一种虚拟参考依据。

(4) 应用中心。实现应用程序、设备固件、算法模块等区块链软件包和技术文档资料的应用管理, 包括应用发布、应用审核、应用上架、资料管理、分类管理、应用搜索、下载更新、积分兑换、积分下载、评论推送、应用下架、数据分析等模块。

(5) 维修综合管控装置。实现汇总设备交接、

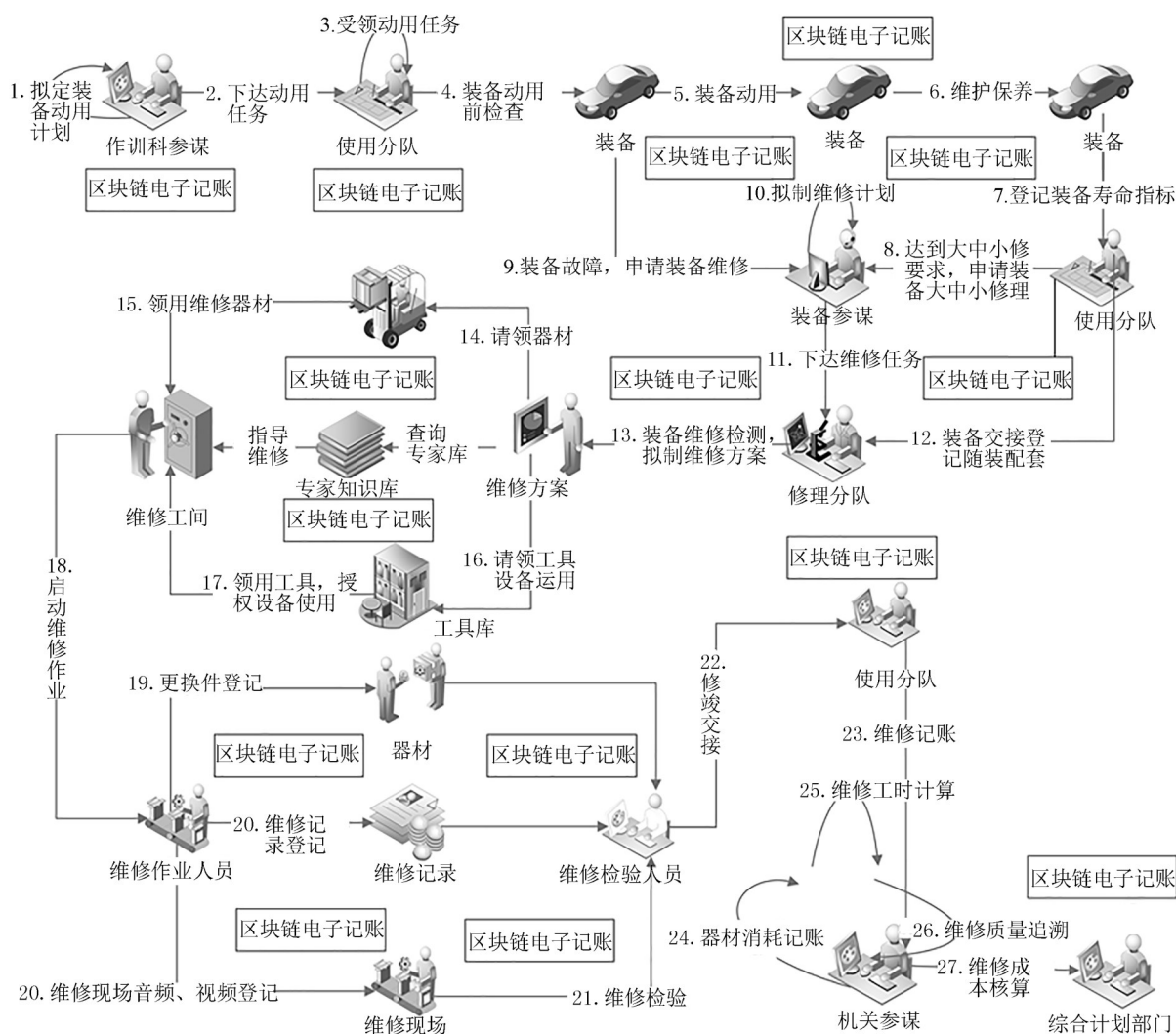


图 2 维修业务架构

Fig. 2 Architecture of maintenance issues

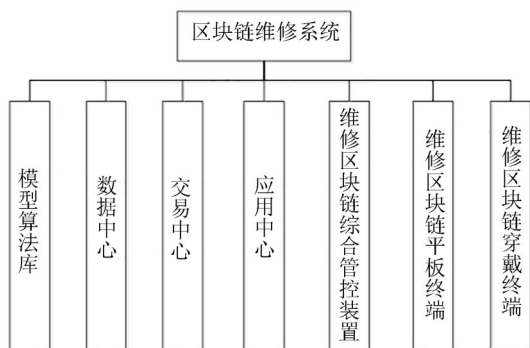


图 3 系统功能模块组成

Fig. 3 Constitution of system function blocks

维修作业、器材申请消耗、技术检查等维修业务,通过交换机与云端服务器连接并进行区块链数据交互。综合管控装置主要实现应用程序、设备固件、算法模块等区块链软件包和技术文档资料的

应用管理,包括应用发布、应用审核、应用上架、资料管理、分类管理、应用搜索、下载更新、积分兑换、积分下载、评论推送、应用下架、数据分析等模块。

(6) 维修终端。维修终端软件提供设备系统交接、维修作业、器材申领消耗、设备系统技术检查、维修质量检验等功能,实现设备系统维修的数据采集、故障诊断和流程引导。具备设备系统维修工程中业务表单的创建、更新和流转等功能;具备设备系统交接、维修作业、器材申领消耗、设备系统技术检查、维修质量检验等设备系统维修业务,实现设备系统维修过程数据登记、数据存证、时间戳留证等功能;支持维修质量检验、设备系统技术检查、维修故障诊断等作业流程的辅助引导和信号检查;支持设备系统维修进

度跟踪监控和节点提醒;支持维修方案查询推荐、流程工艺图纸调阅;支持维修音频和视频监控、温湿度监控等维修现场的安全管控。

2.2.3 区块链维修系统架构

区块链维修系统采用分层的架构,易于扩展,方便部署和测试,解耦伸缩性强,区块链维修系统从下往上分别是基础设施层、区块链层、平台层和应用层。如图4所示。

(1) 基础设施层。提供区块链及设备维修信息化的基础硬件设施,由高性能的云服务器和维修作业控制及执行终端组成,云服务器采用虚拟化容器技术,便于区块链维修系统研发环境的搭建和部署,既能实现与现有设备管理系统和仓储器材系统的无缝衔接,又能有效利用现有的计算资源,节约硬件成本。区块链维修终端部署在维修现场,支持维修现场作业、辅助设备技术检查、引导设备故障定位等管理,可信采集维修全过程

的图文、音视频数据,具备总线采集、标识标印、图像语音识别、安全认证和本地加密存储等功能。

(2) 区块链层。区块链层是一个具有智能合约功能的平台,通过其专用加密维修币提供去中心化的虚拟机来处理点对点合约,主要包括数据层、网络层、共识层、激励层和智能合约。数据层以区块链的形式全量存储所有的交易记录,含交易数据包信息,数据信息加密算法等。网络层使用点对点的网络传输,确保每个节点都有所有记录的拷贝。共识层主要解决拜占庭将军问题、工作量证明机制、双花问题和51%攻击问题等。激励层包括发行机制、激励机制、激励来源。智能合约提供合约注册、合约触发、合约执行、合约注销等管理功能。

(3) 平台层。平台层是维修支持系统建设的核心,调用区块链层的智能合约,采用共识机制、分布式点对点传输和区块链数据结构,构建区含



图4 区块链维修系统架构

Fig. 4 Architecture of blockchain-based maintenance system

模型算法库、应用中心、交易中心和数据中心等板块的块链维修支持系统平台,实现维修决策算法模型管理和调度,应用发布、上下架、评论、下载和更新,维修虚拟币的发行、交换、汇兑,以及维修管理数据、作业数据、设备基础数据、区块链数据存储等服务。

(4) 应用层。应用层提供维修业务管理、维修作业管理、区块链维修决策支持。对接现有的设备维修管理系统、调用平台数据管理、模型算法、应用管理和交易管理,实现维修全过程全周期的管理,支持维修现场作业、辅助设备技术检查、引导设备故障定位、可信采集维修数据。

2.2.4 算法模型

(1) 维修工时算法模型

维修工时采集环节如图 5 所示。每步维修流程的时间 T 可以通过维修电子账本的结束时间戳减去开始时间戳,再使用维修现场提供的音视频数据佐证维修工时。

$$T = T_{\text{end}} - T_{\text{begin}} \quad (1)$$

式中: T 是每个步骤的维修时间; T_{end} 是每个步骤区块链结束节点的时间戳; T_{begin} 是每个步骤区块链开始节点的时间戳。

维修工时算法依据设备的修理类型及其维修工艺流程和流程分解工步工序,单次设备维修工时 S_T 由设备维修准备工时、维修作业工时、转运工时和停滞工时组成,其计算公式为

$$S_T = T_p + T_l + T_r + T_l \quad (2)$$

式中: T_p 为设备维修准备工时; T_l 为设备维修作业工时; T_r 为设备维修转运工时; T_l 为设备维修停滞工时。

$$u_{\text{占比}} = f(x) = \frac{T_x}{S_T} \times 100\%, x \in (P, t, r, l)$$

式中: $u_{\text{占比}}$ 为各工时与维修工时的占比,通过历史数据的工时占比,可以有效判断各工时的合理性和科学性。

以便携式红外发射率检测仪为例,该设备型号为 GXL D-HW-C1,故障为“发动机转轴动力不足”,在故障维修、大修、中修、小修 4 个修理等级中选择“故障维修”。设备维修工时统计及占比计算见表 1。

表 1 维修工时计算及判定

Tab. 1 Calculation and determination of maintenance working hours

工时类型	数量/h	占比区间/%	占比/%	是否在正常区间
维修准备	93.00	0~10	8.57	是
维修作业	500.00	50~70	35.71	是
维修转运	600.00	10~20	42.86	否
维修停滞	180.00	0~5	12.86	否
合计	1 400.00	\	100.00	是

利用区块链技术,全时域地记录设备维修过程,从故障发现、送修交装、编制方案、物料请

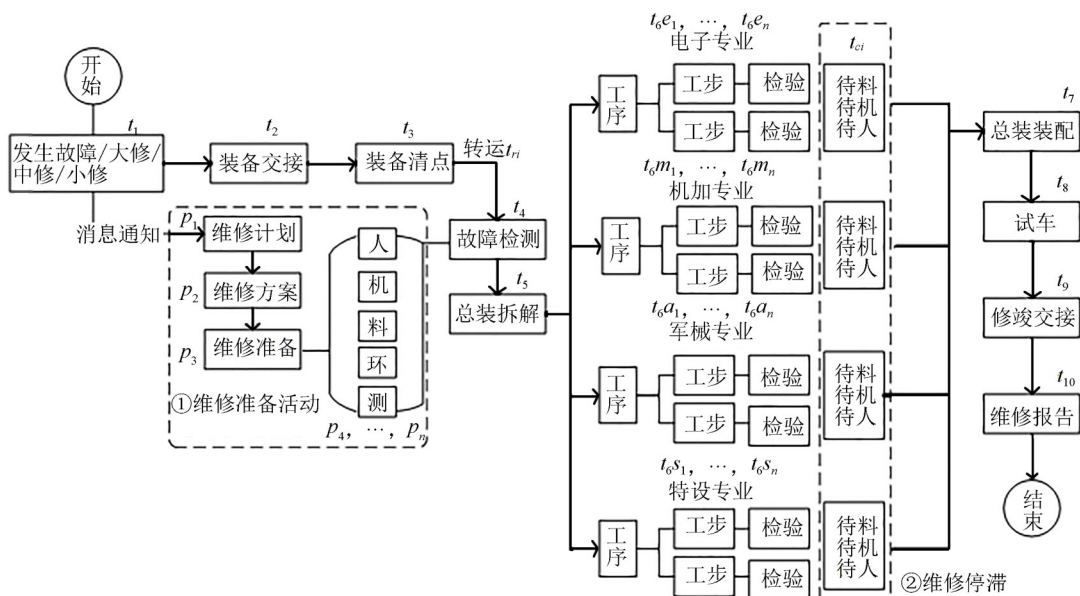


图 5 维修工时采集环节

Fig. 5 Flow chart of maintenance working hours acquisition

领、故障诊断、故障定位、故障排除、维修检验、修竣交接等维修活动构建私有链, 利用区块链时间戳记录计算设备的维修工时, 方便管理机构核算维修工时, 可有效缩短设备的维修工期、节约维修人力资源、统筹维修计划。

(2) 器材消耗算法模型

设备维修器材管理按照设备维修工艺涉及到器材需求, 包括必换件和维修更换件、维修器材请领、发货转运、维修更换(消耗)、更换件回收、器材转级、报废处置等业务流程。其采集环节如图6所示。

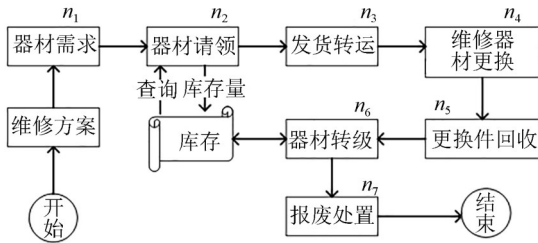


图6 维修器材采集环节

Fig. 6 Flow chart of maintenance equipment acquisition

维修人员围绕设备维修计划和维修任务, 拟制维修方案, 依据维修方案和修理工艺流程要求, 提出设备维修器材需求(需求数量 n_1), 维修人员依据器材需求进行器材请领(请领数量 n_2), 维修器材间收到请领申请后发货转运到维修车间(转运数量 n_3), 维修人员作业时更换维修器材(更换数量 n_4), 维修更换完成后回收器材(回收数量 n_5), 仓库保管员按照器材存储年限、维修更换等要求, 定期对仓储器材进行质量转级(转级数量 n_6), 转级为废品时可对其进行报废处置(报废处置 n_7)。

通过分析维修器材管理业务流程, 器材数据关系如图7所示。

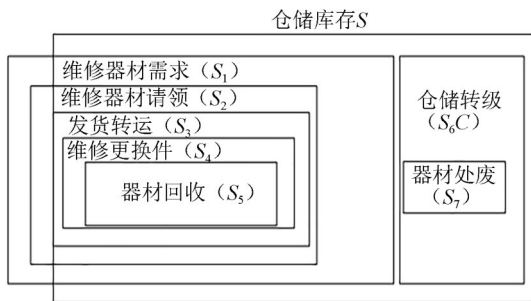


图7 维修器材数据关系

Fig. 7 Relations of maintenance equipment data

维修仓储器材统计 S 是按照器材编码(x)分

类统计器材数量(C), 即

$$S = \sum_{x=1}^n C_x$$

式中: x 为仓储的器材编码; $C_x(C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n)$ 为 x 编码的器材数量。

1) 维修器材需求算法。维修器材需求 S_1 算法是分类统计每次维修计划活动申请的所有器材需求数量。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n (\sum_{x=1}^n C_{需求x}) i$$

式中: i 为维修计划活动编码; $C_{需求x}(C_{需求1}, C_{需求2}, \dots, C_{需求i}, \dots, C_{需求n})$ 为 i 次维修方案拟制中 x 编码的器材需求数量。

2) 维修器材请领算法。维修请领数量 S_2 统计是分类统计每次维修请领活动(i)所提出的所有器材(x)的数量。

$$S_2 = \sum_{i=1}^n (\sum_{x=1}^n C_{请领x}) i$$

式中: i 为维修请领活动编码; $C_{请领x}(C_{请领1}, C_{请领2}, \dots, C_{请领i}, \dots, C_{请领n})$ 为 i 次维修器材请领的 x 编码的器材数量。

3) 维修器材转运算法。维修器材发货转运数量 S_3 是采用分类统计每次发货活动(i)所转运到的所有器材(x)的数量。

$$S_3 = \sum_{i=1}^n (\sum_{x=1}^n C_{转运x}) i$$

式中: i 为维修转运活动编码; $C_{请领x}(C_{请领1}, C_{请领2}, \dots, C_{请领i}, \dots, C_{请领n})$ 为 i 次维修转运活动中 x 编码的器材数量。

4) 维修器材更换件算法。维修器材更换件数量 S_4 是分类统计每个设备(e)维修作业更换器材(x)的数量。

$$S_4 = \sum_{i=1}^n (\sum_{x=1}^n C_{更换x}) e$$

式中: x 为更换件器材编码; e 为维修设备编码; $C_{更换x}(C_{更换1}, C_{更换2}, \dots, C_{更换i}, \dots, C_{更换n})$ 为维修设备 e 更换的 x 编码的器材数量。

在维修器材业务管理过程中, 建立维修器材区块链电子账本, 利用物联网技术, 对器材进行射频识别(RFID)和二维赋码, 应用维修区块链终端感知和采集器材信息, 按照区块链存储结构将器材信息的器材编码、器材数量、活动等信息打包到区块链节点的头部, 把包括规格型号、单位、质量等级, 责任人、库房等信息打包到区块

链节点体，可以有效明确装备消耗，提高维修物资周转效率，减少呆滞物资，节约维修经费。

2.2.5 维修保障支持终端

装备维修保障支持终端由区块链维修控制终端、维修区块链平板终端、维修区块链手持终端、维修区块链穿戴终端等组成。维修区块链终端扩展了北斗通信、军用长期演进技术（LTE）通信、军用保密模块，内置了SHA-256、MD5、哈希散列和AI等硬件处理函数，为区块链计算和数据防伪、分布存储等提供支撑。

（1）维修区块链平板终端。维修区块链平板终端采集功能包括视频/音频/图像、特高频射频识别（UHFRFID）、条形码/二维码和指纹等信息采集；通信功能包括以太网、USB等接口通信。设备数据采集中，提供设备日常使用信息登记、现场修理信息采集、故障案例库查询等功能，可在维修区块链综合管控装置之间进行数据交换。

（2）维修区块链穿戴终端。穿戴终端是一款基于国产处理器和国产操作系统的便携式加固型数据处理终端，提供通用计算机接口，佩戴于手臂上，用于现场数据收发及处理，提供维修寻呼、辅助维修质量检测作业、检测时间戳取证等信息收发功能。

3 区块链维修保障支持系统的试验

以Solidity语言编写智能合约后端程序，以Python下的Django开发模板实现本平台的网页前端网页视图开发，通过Ganache和Truffle等仿真软件实现以太坊私链的本地化。前端采用Single-Spa构建微组件，每个应用都通过路由快速定位服务，实现前端的模块化、低耦合，提高模块化应用能力。后端基于JarsLink的类隔离技术，可随意组装服务，灵活构建服务应用，提高服务运用的灵活性和扩展性。底层采用MinIO文件服务器、达梦关系型数据库，数据库支持在3 s以内存储100万行数据。实验运行在一台配备飞腾2000处理器和8 GB内存的台式机上，其界面如图8所示。

本平台的性能评估通过区块链节点存储时间和区块链节点数据调阅响应时间2个指标进行体现。区块链的共识机制要求每一份新上链的数据都要在所有节点上同步保存，这给通信带宽和存储容量带来了额外压力。因此，在Solidity的设计中，每一次存储都会引起带宽的占用。实验人员

记录了调用不同合约函数并登记新数据时的相应时间，如表2所示。可以看出，区块链节点存储的平均响应时间为46.6 ms，区块链节点数据调阅平均响应时间为1.3 s。

区块链维修支持系统数据中心									
区块数据展示		用户数据： 请输入用户名 查询 重置							
序号	用户名	上传维修方案个数	下载维修方案个数	上传维修案例个数	下载维修案例个数	上传申请记录个数	下载申请记录个数	维修总工时	
1	zhongsi	3	0	0	0	2	0	100	
2	tangwenhao	0	1	0	1	0	3	50	
3	adun	1	0	2	0	5	0	0	
4	rongxing	0	0	0	1	0	5	200	
5	oushiyuan	0	0	1	0	1	0	30	
6	yangtingwei	0	1	0	0	0	2	50	
7	xiaojing	0	0	0	2	0	0	70	
8	rongjiao	0	0	3	0	0	0	20	
9	feunang	0	1	0	0	0	2	30	
10	jingliqing	0	0	0	0	4	0	80	

图 8 区块链维修支持系统界面
Fig. 8 Interface of blockchain-based maintenance support system

表 2 装备维修保障系统响应时间指标
Tab. 2 Index of equipment maintenance support system response time

序号	节点区块计算及存储时间/ms	节点数据调阅响应时间/ms
1	41	1 241
2	47	1 247
3	46	1 346
4	52	1 152
5	47	1 589
平均响应时间	46.6	1 315

4 结论

传统的装备维修保障系统数据依靠人为输入，同时需要相关监督部门严格审计。本文通过研究装备维修保障平台的数据准确、管理高效的需求，结合区块链去中心化、不可修改的特点，搭建了基于区块链的装备维修保障支持系统，通过维修保障支持终端实现了装备数据的可靠获取上链；通过数据分析处理，实现了维修工时真实有效、维修器材消耗准确清晰、维修质量全域可追溯、维修成本真实可控、维修经费结算准确。试验证明，该系统运行良好，节点区块计算平均时间为46.6 ms，节点数据调阅平均响应时间为1.3 s。该系统可以有效提升装备维修保障数据的管理效率，具备良好的应用前景。

参考文献：
[1] 吴文友，唐海龙，盘其华. 智能化战争装备维修保障

- 体系构建[J]. 军事交通学报, 2022, 1(8): 43-47.
- WU W Y, TANG H L, PAN Q H, Construction of intelligent war equipment maintenance support system[J]. Journal of Military Transportation, 2022, 1(8): 43-47.
- [2] 韩海坤. 舰船装备维修保障系统及其全寿命过程分析[J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(8): 78-80.
- HAN H K, Warship equipment maintenance support system and analysis of its whole-life process[J]. Marine Equipment / Materials & Marketing, 2022, 30(8): 78-80.
- [3] 樊辉锦, 欧阳中辉, 陈青华, 等. 基于CBM的通用特种车辆维修保障系统设计[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(3): 10-13.
- FAN H J, OUYANG Z H, CHEN Q H, et al. Research on structure of special vehicle maintenance support management system based on CBM[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(3): 10-13.
- [4] 邱群先, 李翔, 高博, 等. 国外大口径舰炮舰上弹药储运总体技术研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(3): 149-152.
- QIU Q X, LI X, GAO B, et al. Research on the development tendency of ammunition magazine synthesis technology on warship of overseas large caliber navy gun[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(3): 149-152.
- [5] 连云峰, 代冬升, 李会杰, 等. 基于云模型的装备维修保障系统评估[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 8-12, 28.
- LIAN Y F, DAI D S, LI H J, et al. Equipment maintenance support system assessment based on cloud model[J]. Ordnance Industry Automation, 2021, 40(2): 8-12, 28.
- [6] 王帅, 王亚彬, 王金帼, 等. 陆军合成旅典型装备保障系统数字孪生模型[J]. 现代防御技术, 2023, 51(1): 96-106.
- WANG S, WANG Y B, WANG J G, et al. Digital twin model of typical equipment support system of army synthetic brigade[J]. Modern Defence Technology, 2023, 51(1): 96-106.
- [7] 方伟光, 聂兆伟, 刘宸宁, 等. 数字孪生驱动的武器装备智能保障技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(4): 1247-1260.
- FANG W G, NIE Z W, LIU C N, et al. Research on digital twin driven intelligent weaponry support technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(4): 1247-1260.
- [8] 王亚彬, 王帅, 王金帼. 数字孪生应用于维修器材保障的SWOT 战略分析[J]. 国防科技, 2022, 43(3): 1-8.
- WANG Y B, WANG S, WANG J G, et al. SWOT analysis of the use of digital twin technology for maintenance material support[J]. National Defense Technology, 2022, 43(3): 1-8.
- [9] 王帅, 王亚彬, 岳帅, 等. 自行火炮维修保障系统数字孪生体仿真模型[J]. 火炮发射与控制学报, 2023, 44(2): 8-13, 45.
- WANG S, WANG Y B, YUE S, et al. A digital twin simulation model of the self-propelled artillery maintenance support system[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2023, 44(2): 8-13, 45.
- [10] 赵树峰, 付达, 赵振华. 区块链技术在航空发动机外场综合保障中的应用[J]. 航空动力, 2022(5): 83-86.
- ZHAO S F, FU D, ZHAO Z H, et al. Blockchain technology for aero engine integrated support in field[J]. Aerospace Power, 2022(5): 83-86.
- [11] 潘永淇, 魏巍, 刘毅, 等. 基于区块链的动态指控方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(9): 2817-2825.
- PAN Y Q, WEI W, LIU Y, et al. Blockchain based method of doynamic command and contro[J]. System Engineering and Electronics, 2022, 44(9): 2817-2825.
- [12] 李子源, 李贺冰, 刘建, 等. 基于以太坊的装备全寿命数据管理平台设计[J]. 国防科技, 2021, 42(5): 34-39.
- LI Z Y, LI H B, LIU J, et al. Whole-life data management platform for weaponry based on Ethereum[J]. National Defense Technology, 2021, 42(5): 34-39.