

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.04.016

基于区块链技术的航空装备质量溯源系统

侯德飞¹, 张永红¹, 李守伟^{2,3}, 田德红²

(1. 东南大学网络空间安全学院, 南京 211189; 2. 东南大学系统与信息工程研究发展中心, 南京 211189;
3. 区块链应用监管教育部工程研究中心, 南京 211189)

摘要: 航空装备质量信息管理是航空装备制造业的关键环节, 直接影响航空装备的安全性与稳定性。为了解决航空装备质量信息溯源的难题, 本文基于区块链技术, 设计了航空装备质量全生命周期溯源机制以及航空装备质量管理的联盟链网络结构, 实现了航空装备质量信息的安全存储和信息共享。同时, 采用信息技术数据溯源描述 (Provenance vocabulary, ProVOC) 模型构建了航空装备质量全生命周期信息链, 记录了航空装备在设计、生产、运输、维修、使用以及报废各个阶段的质量信息。最后, 设计基于区块链技术的航空装备质量溯源系统架构以及溯源操作流程。本研究为航空装备质量信息管理提供了一种新的解决方案, 有助于提升航空装备质量管理水平, 增强航空装备的性能和可靠性。

关键词: 区块链; 航空装备; 质量溯源; 溯源描述模型; 全生命周期

中图分类号: F416.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)04-0731-10

An Aviation Equipment Quality Traceability System Based on Blockchain Technology

HOU Defei¹, ZHANG Yonghong¹, LI Shouwei^{2,3}, TIAN Dehong²

(1. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Research and Development Center for System and Information Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. Engineering Research Center of Blockchain Application, Supervision and Management, Ministry of Education, Nanjing 211189, China)

Abstract: The quality information management of aviation equipment is a key link in the aviation equipment manufacturing industry, which directly affects the safety and stability of aviation equipment. In order to solve the problem of traceability of aviation equipment quality information, this paper designs a full lifecycle traceability mechanism for aviation equipment quality and an alliance chain network structure for aviation equipment quality management based on blockchain technology. This study intends to achieve secure storage and information sharing of aviation equipment quality information. The provenance vocabulary (ProVOC) model is used to construct the full life cycle information chain of aviation equipment quality, recording the quality information of aviation equipment at various stages of design, production, inspection, and transportation. Finally, an aviation equipment quality traceability architecture and a traceability operation process based on blockchain technology are designed. This paper provides a new solution for the quality information management of aviation equipment, which helps to improve the level of aviation equipment quality management and enhance the performance and reliability of aviation equipment.

Key words: blockchain; aviation equipment; quality traceability; provenance vocabulary (ProVOC) model; full life cycle

基金项目: 国家自然科学基金 (71671037; 71971055)。

收稿日期: 2023-09-21; **修订日期:** 2024-05-07

通信作者: 李守伟, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: lishouwei@seu.edu.cn。

引用格式: 侯德飞, 张永红, 李守伟, 等. 基于区块链技术的航空装备质量溯源系统 [J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56 (4): 731-740. HOU Defei, ZHANG Yonghong, LI Shouwei, et al. An aviation equipment quality traceability system based on blockchain technology [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(4): 731-740.

航空装备制造业,包括航空装备整机和航空部件制造,具有工艺复杂、系统性强、附加值高等显著特点,是航空装备产业链的关键环节。在“十三五”和“十四五”期间,为了推动中国航空装备制造的智能化与自主化,中国相继出台政策,如在2020年发布《关于扩大战略性新兴产业投资培育壮大新增长点增长极的指导意见》,提出推进航空装备等高端装备生产,加快新材料在高端装备领域的应用;在2021年发布《“十四五”民用航空发展规划》,提出推动航空零部件等产业化应用,助力国产航空产品国际合作。在政策利好和自主研发能力不断提升的背景下,中国航空装备行业呈现出持续增长的稳定态势。

随着航空装备产业的不断发展,加强航空装备质量管理体系建设,确保航空装备性能的可靠性是亟需解决的主要问题。《航空行业航空装备科研及生产组织质量管理体系要求》等法规为航空装备质量提供了制度保障与要求,但还需要管理与技术等多方面的支持。首先,航空装备质量管理需要多次迭代分析需求、设计架构、生成零件、验证实物以及确认交付等过程,在这一系列过程中,需要记录透明且完整的技术状态和过程质量以保证装备的实物质量和过程质量^[1],从而保证制造工程的重复性成功。其次,航空装备质量管理还需要建立制造过程质量责任追究制度,通过提高相关人员的责任意识,在最大程度上避免人为差错,这需要可追溯技术作为支撑。最后,装备制造领域的发展需要在技术与人才等方面大量积累,加大建立装备改进改型、组织过程资产、人才梯队培养等多方面工作的力度^[2],可追溯性管理是推动相关工作建设的有力保障。因此,随着航空装备制造从仿制到自主开发的过度以及质量责任制度的建设,航空装备质量数据的安全性和可追溯性越来越重要。

当前中国的航空装备质量管理平台建设还不完善,相关的质量保障与管理问题也在不断增加。首先,装备质量管理系统的建设涉及多专业与多部门,但各方所持数据都具有保密性,加上有效验证手段的缺少,致使各主体之间难以信任,无法形成一致的信息共享体系^[3-4]。其次,当前的装备质量数据不仅录入场景复杂、传输环节多、集中程度高,而且缺少容灾备份与转移备份机制。数据中心一旦遭遇自然灾害或恶意攻击,数据极易被破坏、泄露与篡改^[5]。最后,供应链上各部门内部自有自成体系的数据管理系统,缺乏统一的数据标准,导致跨部门的管理流程无法准确衔接^[6],再加上缺乏统一的数据归口管理组织致使管理职责混乱,更新周期长,难以建立完整且及时的数据追溯链,使装

备质量信息追溯精度和效率更加低下。

随着公众对航空装备质量管理的关注度越来越高,学者们对航空装备质量溯源系统开展了一系列研究。甘波等^[7]基于联盟链和射频识别(Radio frequency identification, RFID)技术,设计了5层装备管理框架,可以有效地管控装备的生产、周转以及故障情况,但未考虑到数据的不同部门数据的异构性问题,这会极大影响数据的溯源效率。蒋敏等^[3]设计了面向航空协同制造的工业互联网架构研究与应用,并探讨了涉及的关键技术和应用场景,但忽略了航空装备数据在采集和存储过程中存在被篡改的可能性。马智聪等^[8]提出了综合化航空电子装备软硬件技术状态管理信息系统研制方案,并构建了信息化管理系统,但忽略信息系统数据遭受攻击和篡改等安全性问题。曹鹏勇等^[9]针对航空供应链存在着监管不足和信息不透明等问题,设计了基于区块链的供应商数据管理平台,但其仅局限于对供应商产品制造阶段,未涉及航空装备全生命周期阶段的信息溯源。宋云雪和吕杰^[10]对航空器维修任务发布过程进行了研究。在对现有任务发布系统进行分析的基础上,他们提出了一个基于区块链的航空器维修任务发布系统。然而,这个系统仅局限于维修阶段,未能与其他部门进行协同质量管理。

本文设计基于区块链的航空装备全生命周期质量溯源系统。首先,利用区块链的不可篡改特性确保了链上的航空装备质量数据不受恶意篡改或操控。其次,采用链上和链下存储方式,有助于有效缓解系统压力,并结合信息技术数据溯源描述(Provenance vocabulary, ProVOC)模型对溯源信息进行标准化,使得信息溯源更便捷高效。最后,利用区块链的公开透明性成功打破航空装备产业各部门之间的信息壁垒,实现了协同管理,促进了产业内部的高效协作。本文旨在提升航空装备各部门的协同管理能力,确保在质量面临问题时能够准确、迅速地追溯到根源,这对航空装备质量信息溯源体系的建设具有重要的现实意义。

1 相关研究现状

区块链是一种分布式的账本技术,该技术整合了分布式数据存储、共识机制、去中心化数据传输以及加密算法等多种技术^[11]。在近十几年的发展历程中,区块链从以比特币为代表的1.0时代,以太坊为代表的2.0时代,发展到应用于社会领域下的各种场景,开发落地服务的区块链3.0时代。区块链按去中心化的程度分为公有链、联盟链以及私

有链这3种类型。公有链去中心化程度最高,对网络中所有节点赋予平等的权力,可以自由地进入和退出网络以及参与账本的维护;私有链的去中心化程度最低,完全不对外开放,只允许内部人员参与账本的维护;联盟链的去中心化程度介于两者之间,对部分节点或组织赋予一定的权限。联盟链兼顾公有链去中心化特征以及私有链高效性特征,更符合中国监管和发展的要求,目前已在食品^[12-14]、服务贸易^[15-17]、能源^[18-19]、军事^[20-21]和医疗^[22-23]等领域得到广泛的应用。

随着航空装备的研制与批产对制造精度、加工质量的要求越来越高^[24],众多学者提出基于区块链和人工智能算法^[25]实现航空装备质量的精细化管理。Ho等^[26]提出了基于区块链技术的飞机备件可追溯系统,该系统在物流和运营组织之间建立了一个可信的数据共享平台,通过分布式共识机制,提高供应链内备件质量数据的共享性和可追溯性。Mandola等^[27]基于区块链技术,对飞机行业中增材制造(Additive manufacturing, AM)的数字孪生构建进行了理论和实际分析,同时还强调利用区块链技术建立一个安全和连接的制造基础设施,以确保过程的可追溯性、遵从性、真实性和质量的控制。Rolinck等^[28]提出基于区块链技术的数据管理系统方法,通过智能合约并结合全生命周期数据自动计算全生命周期评估值(Life cycle assessment, LCA)值,促进更有效和更广泛的航空装备生命周期评价。此外,在航空装备维护、维修和大修(Maintenance, repair, and operations, MRO)中的应用领域, Efthymiou等^[29]认为区块链可以为MRO的管理员、检查员和决策者提供及时准确的信息,同时还能有效地解决航空业内部的记录放置错误或损坏的问题。Schyga等^[30]利用原型化方法来更深入地研究将区块链技术应用用于飞机MRO的潜在问题和提出的解决方案。Andrei等^[5]为改进飞机维护可追溯性,为航空领域的区块链应用创建概念证明,同时开发一个去中心化区块链应用程序,并存储维护记录和相关参数,以便在一系列相互连接的区块中跟踪飞机的寿命。吴莹等^[31]结合遗传算法提出了一种面向任务的装备维修保障资源配置模型,解决装备维修的任务和资源配置问题。

综上所述,在基于区块链的航空装备质量管理研究方面,研究成果大部分集中于航空装备的全周期中某些环节研究,鲜有研究将装备产业链所有环节考虑在内,缺少基于区块链的装备质量数据从研制到使用的全链条的系统性研究。此外,大部分学者仅是进行理论性、概念性分析,并没有结合航空

装备产业链的实际情况,设计具体的基于区块链技术的航空装备质量溯源方案。因此,本研究的主要贡献如下:(1)针对航空装备从研制到使用全过程的需求,围绕产业链上涉及的参与主体,结合区块链技术的优势特性,设计航空装备研制到使用全生命周期的区块链溯源机制和流通管理的联盟链网络结构,打通航空装备设计研发、生产制造、物流运输、整備维修以及用户使用等各个环节,完成了航空装备质量数据的全面监管;(2)采用ProVOC模型对航空装备质量数据的溯源信息进行结构化存储,保证航空装备质量数据在不同部门间的结构统一性与存储高效性,实现航空装备质量全生命周期信息溯源;(3)设计具体的基于区块链的航空装备系统架构和溯源流程,以确保航空装备的全生命周期质量数据的安全性、可追溯性和高效性。

2 航空装备质量溯源体系构建

2.1 区块链溯源机制设计

协调连贯的航空装备全周期管理是航空装备质量信息化溯源的根本。航空装备质量管理涉及设计、制造、运输、维修和使用等多个环节,涵盖了航空装备设计部门、制造部门、运输部门、维修部门和使用部门等主体,如图1所示。各个主体分别承担制造过程中的关键环节,任何主体在其环节的装备质量疏漏会造成安全隐患。区块链的全部航空装备质量管理记录都将以信息交换的形式打包成区块存储在区块链中,环节之间的信息交换都需要对应主体私钥签名,并附上公钥用于下次验证,通过数字签名和验证的方式将航空装备产业相关主体之间相互链接,产生职责链条,进一步确保安全、高效地传输装备质量信息。

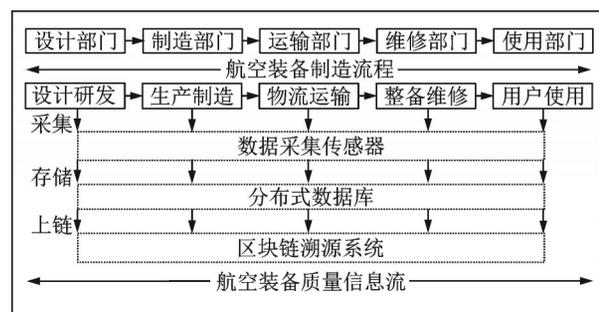


图1 航空装备质量溯源机制

Fig.1 Quality traceability mechanism for aviation equipment

航空装备制造的每个环节都会设置物联网传感器采集航空装备信息,并使用射频识别技术标记装备溯源码。利用溯源码能够用来方便地记录航空装备质量的相关信息,提高装备质量数据传输的

自动化程度。由于航空装备质量数据量庞大,种类繁多,为缓解区块链的存储压力,将具体的航空装备质量数据存储于分布式数据库中,航空装备质量数据的关键描述性信息打包成区块存储在区块链上。该存储方式能够有效提升区块链节点的存储能力,增强区块链网络的性能,同时也避免单个数据库遭受网络攻击后造成数据流失,保护航空装备质量信息安全。此外,区块链技术的智能合约能将相关的质量管理体系要求、型号产品保证等程序化。系统监测到异常数据,会触发智能合约,自动警告相关主体,提高装备质量管理的自动化程度。

2.2 航空装备质量管理的联盟链网络结构设计

由于航空装备质量管理必须遵守集中统一的原则,需要中心节点统筹协调,而且管理系统中各级职能不同,上下级间有严格的运行机制,因此区块链采取去中心化分布式存储的联盟链架构,链上节点相互独立,通过共识机制实现节点上数据信息的同步改动与记录,保证各节点的账本数据一致。外界意图篡改、删除数据信息需要同时获取超过51%的节点授权。上述特点既有效地解决了航空装备质量管理多主体间交互的信任问题,又极大地提高了外部攻击篡改数据信息的成本。网络结构如图2所示。在航空装备质量管理过程中,由装备设计部门、制造部门、运输部门、维修部门、使用部门和监管部门等实体共同组成航空装备质量管理联盟,实现航空装备质量保障。

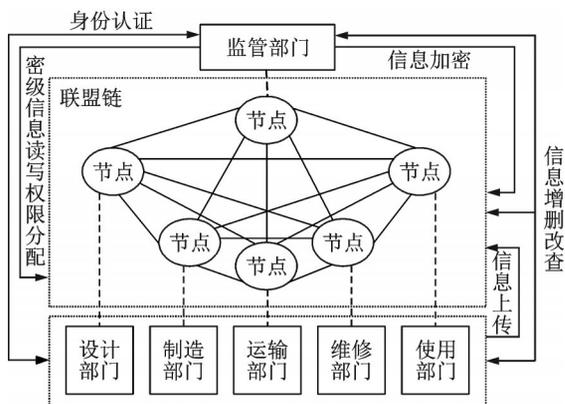


图2 航空装备质量溯源联盟链网络结构

Fig.2 Network structure of aviation equipment quality traceability alliance chain

联盟链网络架构对节点的准入许可与权限分配做出明确规定。在准入许可方面,某部门只有通过航空装备监管部门的审核与验证,才能以实体身份加入区块链网络,并得到系统颁发的数字签名证书。区块链中各节点借助数字签名证书完成认证,实现网络系统的可信性。

航空装备质量管理体系中的不同实体具有各

自的分工,因此需要详细确定各节点的权限分配。针对自身工作流程中产生的信息,链上节点将相关事务信息上传至区块链中,监管部门对上传信息的实体进行监督,并对上传数据的完整性与有效性进行验证。此外,监管部门为加密信息设置密钥,根据具体业务为联盟成员设置密级信息读写权限等级,并对符合要求的节点发放密钥,防止恶意节点对保密信息的窃取。

2.3 航空装备全生命周期信息链设计

航空装备质量管理涉及多个部门,涉及的数据庞大,不同装备之间存在紧密联系。然而,各参与主体各自致力于信息建设,却缺乏整体规划和统一指导,这导致各部门采用了各自独立的数据标准,造成了数据异构性。为了更好地适应航空装备的制造和维护流程,全面详实地记录航空装备溯源信息,需要可靠且通用的数据溯源模型,以满足不同参与主体的需求。ProVOC模型是中国在2018年5月提出的数据溯源描述模型。该模型结合了国内外各个领域的数据溯源模型的优点,通过利用构件的描述信息以及构件之间的关系,详实地描述装备在各个环节的流转记录,具有较好的通用性和灵活性。本文决定采用ProVOC数据溯源模型,有序存储航空装备质量溯源信息,有助于协调不同部门之间的工作,提高数据协同性和整体质量管理水平。

ProVOC溯源模型包括4个主要构件:执行实体、活动、数据和关系。如图3所示,在航空装备质量溯源信息的应用中,数据构件用于描述航空装备质量溯源信息的具体细节,包括文件名字、文件类型、文件ID以及存储位置等关键信息。执行实体构件包括系统监管者、各业务部门或其组织成员以及装备使用者等,代表参与航空装备质量管理的各个角色和部门。活动构件表示执行实体发起并执行的一系列动作。在航空装备质量溯源中,这些活动可能包括设计、制造、运输、使用、维修等多个环节。关系构件用于记录数据、执行实体和活动之间

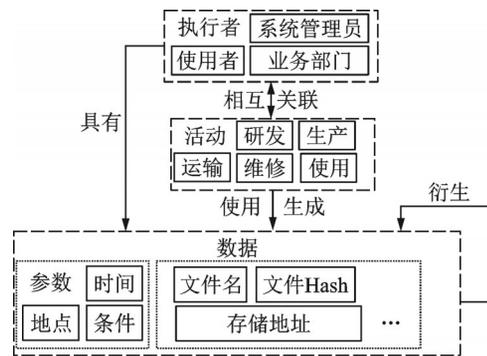


图3 航空装备溯源信息的ProVOC模型结构

Fig.3 ProVOC model structure for traceability information of aviation equipment

的关系。这些关系构件连接不同构件,构建起航空装备质量管理的全生命周期信息链。通过关系构件,可以清晰地展示数据的流动和关联。

图4显示了溯源信息的上链过程。航空装备在各部门的流转记录以ProVOC模型进行描述之后形成溯源信息凭证,会打包形成区块上传至区块链中,

而具体的航空装备质量数据将以附件的形式存储于分布式数据库中。以ProVOC模型存储的溯源信息具有关系构件,可以与上一阶段的溯源信息相联,形成设计研发、生产制造、物流运输、整備维修以及用户使用的全生命周期信息链,并存储于区块链网络中,实现航空装备全生命周期信息上链。

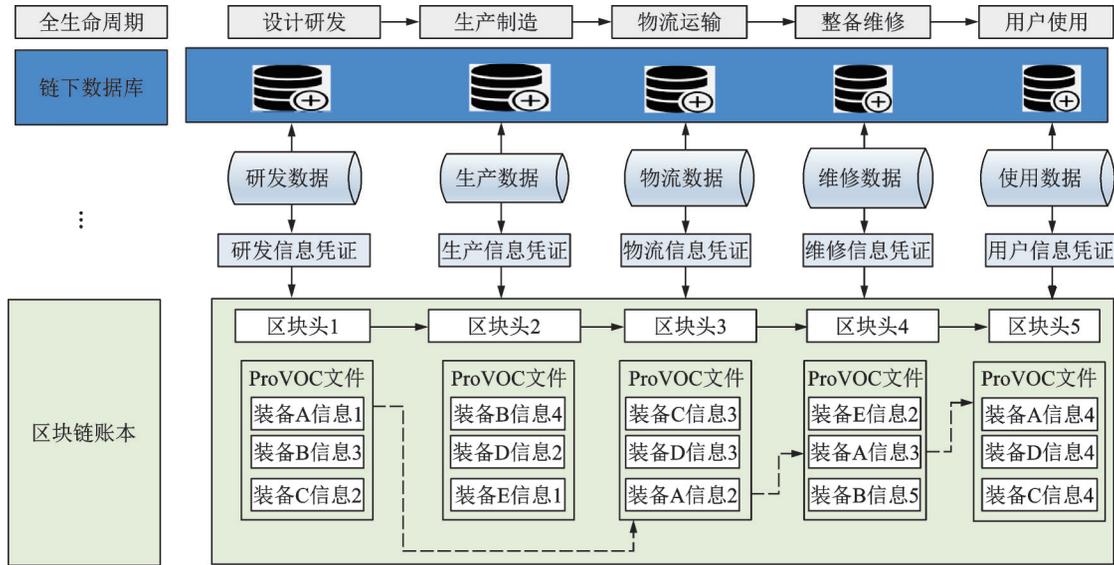


图4 航空装备全生命周期信息上链流程

Fig.4 Uploading process of aviation equipment full life cycle information

3 系统设计

3.1 区块链系统功能设计

根据航空装备质量溯源系统架构与溯源流程中各环节的实际应用场景,将航空装备质量溯源系统的用户划分为系统管理人员、业务人员和使用人员。通过对不同类型的用户进行需求分析,根据航空装备质量溯源的总体需求以及系统正常运转的基本功能需求设计系统总体功能,主要包括系统基本功能模块和业务处理功能模块,如图5所示。

系统基本功能模块主要包括用户管理和系统监管两类功能:利用用户管理功能,管理人员可以完成用户身份注册,并分配各用户对应的权限;利用系统监管功能,用户可检验区块链溯源网络中各节点是否功能正常,并验证组织功能的完整性。业务处理功能模块包括信息管理与信息溯源两类功能:通过数据信息管理功能,用户将航空装备信息保存上链,并对涉密信息进行加密,以确保数据的结构完整性、有效性和安全性;用户可以通过数据信息溯源功能精准查找对应航空装备,并基于航空装备的全生命周期信息对溯源行为和维修数据进行统计。

3.2 区块链系统架构搭建

结合航空装备全产业链研制、生产和使用等过

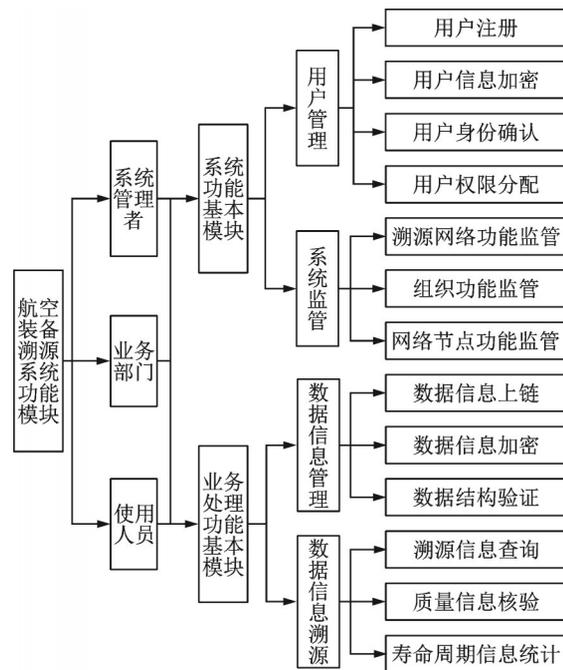


图5 航空装备溯源系统功能图

Fig.5 Functional diagram of aviation equipment traceability system

程和航空装备质量共享性、安全性和可追溯性等需求,设计的系统整体架构如图6所示。航空装备质量溯源系统共分为以下5层进行研究,包括采集层、数据存储层、网络溯源层、接口层和应用层。(1)

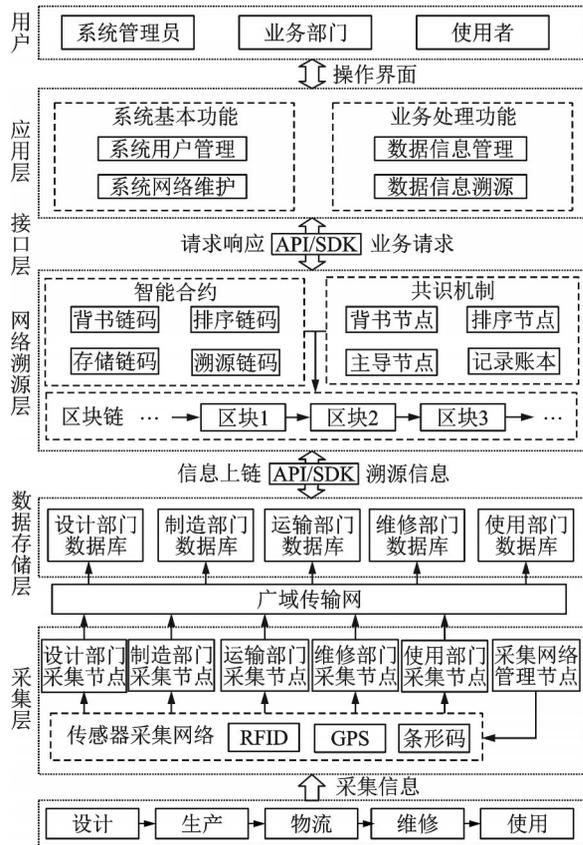


图6 基于区块链的航空装备质量溯源系统架构

Fig.6 Architecture of aviation equipment quality traceability system based on blockchain

采集层是由部署于制造流程中各个环节的采集节点组成的物联网。通过在每个采集节点配备传感器、RFID、GPS和条形码,构建分布式数据采集传感器网络,同时结合实地环境,实现对溯源数据的精确采集和高效上传。(2)数据存储层包括区块链和非关系数据库。其中区块链以Merkel树形式存储相关事务信息,如图7所示。事务信息涵盖了航空装备质量数据在各部门之间流转记录,包括研发、生产、运输、维修和使用等溯源信息凭证,以及溯源信息凭证的上传、查询、更新、删除等相关操作记录。非关系数据库NoSQL存储具体的航空装备质量数据,按保密级别分为公开文件和不同层次的机密文件。(3)网络溯源层由分布在不同服务器

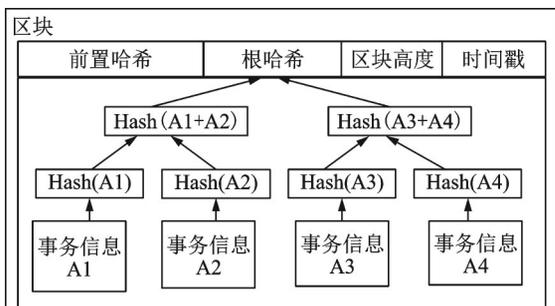


图7 区块链数据结构

Fig.7 Data structure of blockchain

中的节点、共识机制和智能合约所构成。共识机制基于拜占庭容错算法而构建,促使航空装备产业各组织内部节点对相同事务处理达成统一的共识。在实际的场景中,各种合约协议,结合航空装备质量管理体系要求、型号产品保证要求等以智能合约的形式程序化,部署在区块链网络节点中。(4)接口层是基于go语言 SDK搭建的开发环境,以及根据场景需求所调用的API,将区块链网络分别与客户端和非关系数据库进行连接。客户端的业务提案和数据库的质量信息均通过API传递至区块链网络并广播至网络中的所有节点,区块链网络对业务提案的执行结果也通过API反馈至客户端。(5)应用层为区块链用户提供与溯源系统交互的操作界面,满足用户需求。

3.3 装备质量溯源系统操作流程

各业务部门的采集节点使用分布式数据采集传感器网络,收集各自所在环节的装备制造过程数据并生成对应装备的溯源码,通过网络传输服务接口将上述信息上传至所在部门的分布式数据库中,并与其他部门同步更新。根据信息敏感程度的不同,将装备信息分为公开信息和保密信息。将溯源信息凭证以及相关事务信息上传至区块链网络中,经过网络各节点达成共识之后打包成区块保存在各自的区块链账本上。如图8所示,用户在客户端的溯源操作界面输入装备溯源码,通过溯源接口向区块链网络节点提交溯源请求以及用户的身份信息。背书节点对用户身份验证审核通过后,由排序节点将请求记录排序打包并广播至网络中各个节点。在区块链网络上各节点将区块上链后,系统调用溯源链码,在链上找到用户所需溯源文件的标识

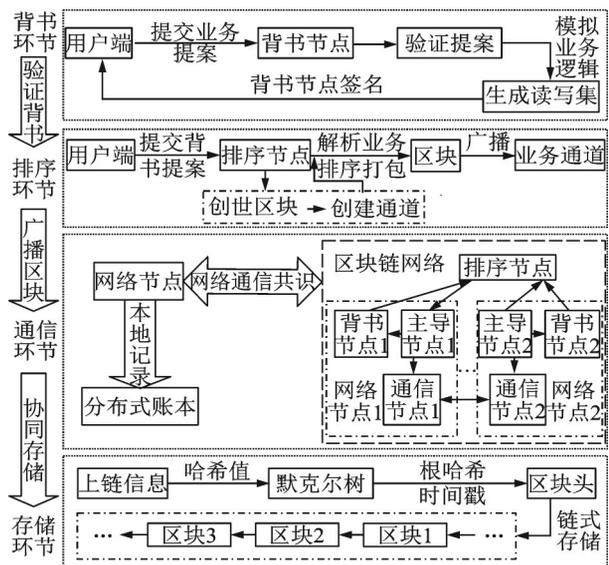


图8 基于区块链的航空装备质量溯源运行流程

Fig.8 Operation process of aviation equipment quality traceability based on blockchain

符,然后链接到链下文件,从分布式数据库下载溯源文件,并将检索结果通过溯源接口返回至客户端。

当用户想通过装备质量溯源系统溯源查询该装备的全生命周期信息文件时,用户在得到系统背书的前提下,根据该装备的溯源码,通过智能合约获取区块链中与该装备对应的所有 ProVOC 数据文件。例如,若用户要找出某装备 A 的全生命周期信息,可以根据该装备当前 ProVOC 日志中的关系构件,找出上一个阶段的该装备 A 的溯源信息,依次查找并汇总,形成该装备的全生命周期信息链。用户通过执行智能合约,根据该装备的全生命周期信息,对该装备的溯源记录、维修数据和使用数据进行统计,实现对该装备质量数据的监管。

4 溯源系统溯源实现与测试

本文设计一种基于区块链的航空装备质量溯源系统,下面选择开源的长安链平台进行区块链开发。本文选择长安链搭建一个稳定的联盟链网络,其中涉及到的开发工具包括智能合约、go 语言 SDK、以及与区块链互动的 API 接口。软件配置如表 1 所示。

表 1 软件配置

Table 1 Software configuration

软件名称	说明
Centos	版本 7.9, 64 bit
长安链 (ChainMaker)	版本 v2.3.1
Dokcer	容器引擎, 版本 24.0.5
Docker-compose	容器编排软件
Golang	版本 v2.2.2

本文基于长安链在实验室服务器上搭建联盟链网络,该网络中使用 docker 容器对网络中的节点进行模拟。联盟链网络由 6 个组织组成,代表着航空装备涉及到的 6 个部门,分别是设计部门、制造、运输、维修、使用以及监管部门。本文对每个组织设置 2 个节点,每个组织中第 1 个节点同时担任管理员和共识节点角色,第 2 个节点同时担任用户和同步节点的角色。每个组织都有独立 CA 证书颁发结构。所有的节点都在各自的 Docker 容器中运行。

在部署长安链平台的联盟链之前,首先需配置所需软件依赖,包括 Git、Gcc、Golang 等。首先,通过 Git 从长安链官方代码仓库获取长安链源码 chainmaker-go 以及证书工具 chainmaker-cryptogen。其次,在 chainmaker-go 目录中执行 prepare.sh 脚本,生成联盟链网络的配置文件。随后将配置文件

打包并编译 chainmaker-go 模块。最后,通过运行 start.sh 脚本,启动配置好的联盟链网络。

联盟链网络搭建完成之后,将各项溯源业务将以代码的形式写入智能合约,并部署到长安链管理平台。航空装备质量溯源智能合约在长安链测试网测试成功之后,会打包上传至长安链管理平台进行合约部署,随后各部门会对该事务进行验证和投票。

智能合约被成功部署在区块链上之后,调用智能合约进行溯源信息的存储。在航空装备质量溯源系统中,用户登录后选择智能合约的“save”函数,填写装备质量溯源凭证信息并确认。系统将提案发送至区块链网络,经共识节点达成共识后存储在区块链上。

若用户要查找装备“民航雷达 C1”的全生命周期溯源信息,根据该装备的溯源码,将查询请求发送至区块链系统中,系统调用智能合约进行查询操作。系统将查询到溯源记录按逻辑顺序排列,一并返回给用户。这包括“民航雷达 C1”当前版本之前的相关流转记录,如图 9 所示。用户可进一步了解装备的详细信息,通过溯源信息凭证中的对应网址“file_url”进行详细数据下载,然后通过比较下载数据的哈希与区块链上存储的哈希值来验证数据完整性。

#	Key	Value
1	fact_bytes#LeidaC1116ce5ebfde3c5a2d6219e6b83b49917431015cb9119b033d1fb45f40ebf034	{\"organization\": \"研发部门\", \"Established_time\": \"2020年1月\", \"address\": \"A省X市\", \"file_hash\": \"LeidaC1116ce5ebfde3c5a2d6219e6b83b49917431015cb9119b033d1fb45f40ebf034\", \"file_key\": \"民航雷达C1\", \"file_id\": \"leidaC1\", \"file_url\": \"https://leidaC11.com/\"}
2	fact_bytes#LeidaC12c9d31f292e01f6a71e83c6da930f04916e35873e6e33721e76c9c1c5fa2f5358	{\"organization\": \"生产部门\", \"Established_time\": \"2019年10月\", \"address\": \"B省X市\", \"file_hash\": \"LeidaC12c9d31f292e01f6a71e83c6da930f04916e35873e6e33721e76c9c1c5fa2f5358\", \"file_key\": \"民航雷达C1\", \"file_id\": \"leidaC1\", \"file_url\": \"https://leidaC12.com/\"}
3	fact_bytes#LeidaC13d3a0c4df5cadab994da1f9af9ec74efdf2d8418c4dd161f5667cde43f30be80	{\"organization\": \"物流部门\", \"Established_time\": \"2019年12月\", \"address\": \"A省Y市\", \"file_hash\": \"LeidaC13d3a0c4df5cadab994da1f9af9ec74efdf2d8418c4dd161f5667cde43f30be80\", \"file_key\": \"民航雷达C1\", \"file_id\": \"leidaC1\", \"file_url\": \"https://leidaC13.com/\"}

图 9 民航雷达 C1 全生命周期信息溯源

Fig.9 Full life cycle information traceability of civil aviation radar C1

为了进一步验证该系统的溯源效果,本文还对溯源信息查询功能的吞吐量和平均响应时间进行了测试。实验设置每秒请求数分别为 1 000、5 000、10 000、15 000、20 000,以观察吞吐量和平均响应时间随每秒请求数增加的变化趋势。如图 10 和 11 所示,溯源信息查询功能的吞吐量随着每秒请求数的增加呈现先快速增加后缓慢下降的趋势。在每秒请求数为 10 000 时,吞吐量达到顶峰,为 337 tx/s(这里 tx 为 transaction 的简写)。同时,溯源信息查询功能的平均响应时间随着每秒请求

数的增加而增加,在每秒请求数为5 000时,平均响应时间为1.02 s,之后平均响应时间缓慢增加。表2显示了溯源查询功能运行的报错情况:在每秒请求数为15 000之前,溯源查询功能的错误率均为0;在每秒请求数为15 000和20 000时,错误率有所波动,但基本上都在0.5%以内。由此可见本文提出的溯源系统能够基本上满足高负载条件下的性能需求。

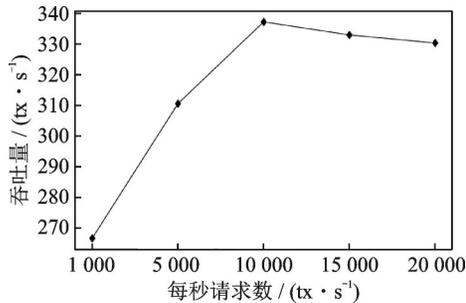


图10 溯源信息查询功能的吞吐量

Fig.10 Throughput of traceability information query function

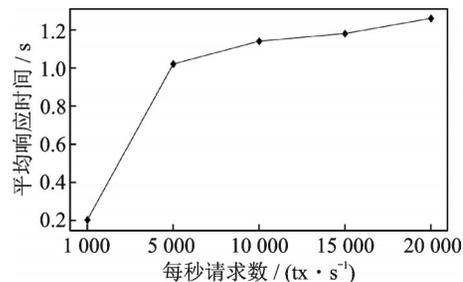


图11 溯源信息查询功能的平均响应时间

Fig.11 Average response time of traceability information query function

表2 溯源信息查询操作的错误率

Table 2 Error rate of traceability information query operation

每秒请求数 / (tx · s ⁻¹)	1 000	5 000	10 000	15 000	20 000
错误率 / %	0	0	0	0.33	0.005

5 结 论

本研究结合区块链技术的特征和优势设计了基于区块链的航空装备质量溯源系统,实现对航空装备质量的全生命周期管理。该系统的主要优势体现在以下几个方面:(1)航空装备联盟链网络的构建能够实现航空装备产业各主体之间的装备质量信息共享,促使航空装备质量信息能够及时反馈;(2)区块链技术能保障航空装备数据存储的安全性和稳定性,有效地防止航空装备数据的篡改和丢失;(3)基于ProVOC模型的航空装备的全生命周期信息链,能够有精准地追踪装备质量信息的来

源和去向,为装备质量信息的及时追溯创造条件,实现航空装备质量的全生命周期信息监管。本研究有利于进一步推动区块链技术在航空装备质量溯源场景应用,保障航空装备的良好性能,提高我国航空装备质量管理水平。

下一步工作将深入研究基于区块链航空装备质量溯源系统的关键技术,如隐私保护和授权机制、溯源算法、共识算法的优化和扩展,以及如何通过跨链技术实现不同航空企业、供应商和监管机构之间的信息互操作性等,以确保系统在面对复杂环境和实际应用时表现出更卓越的性能,进一步推动基于区块链的航空装备质量溯源系统的发展。

参考文献:

- [1] 朱芳,黄雄飞,叶宝玉.航空零件制造质量控制方法研究[J].制造技术与机床,2017(7):81-86.
ZHU Fang, HUANG Xiongfei, YE Baoyu. Study on the quality control method for aircraft part manufacturing processes[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(7): 81-86.
- [2] 白松,要晶晶,苏永前.装备研制生产可追溯性的设计与管理[J].兵器装备工程学报,2018,39(7):50-55.
BAI Song, YAO Jingjing, SU Yongqian. Design and management research on traceability of equipment development and production[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(7): 50-55.
- [3] 蒋敏,郑力.面向航空协同制造的工业互联网架构研究与应用[J].中国科学:技术科学,2022,52(1):3-13.
JIANG Min, ZHENG Li. Industrial internet architecture for collaborative manufacturing of aviation equipment[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(1): 3-13.
- [4] 杨波,赵闯,康玲,等.面向协同制造云平台的航空装备数字模型构建[J].航空制造技术,2022,65(19):56-65,73.
YANG Bo, ZHAO Chuang, KANG Ling, et al. Digital model construction of aviation equipment for collaborative manufacturing cloud platform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 56-65,73.
- [5] ANDREI A G, BALASA R, COSTEA M L, et al. Building a blockchain for aviation maintenance records [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1781(1): 012067.
- [6] 魏巍,王宇飞,陶永.基于云制造的产品协同设计平台架构研究[J].中国工程科学,2020,22(4):34-41.
WEI Wei, WANG Yufei, TAO Yong. The Architecture of a product collaborative design platform based on cloud manufacturing[J]. Strategic Study of CAE,

- 2020, 22(4): 34-41.
- [7] 甘波, 吴启武, 高志强. 基于联盟区块链的RFID装备管控框架设计[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(6): 303-308.
GAN Bo, WU Qiwu, GAO Zhiqiang. Design of RFID equipment management and control framework based on alliance blockchain[J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(6): 303-308.
- [8] 马智聰, 杨斌, 张晓. 航空电子装备技术状态管理系统设计与实现[J]. 电讯技术, 2020, 60(9): 1043-1047.
MA Zhicong, YANG Bin, ZHANG Xiao. Design and implementation of an avionics technical state management system[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(9): 1043-1047.
- [9] 曹鹏勇, 段桂江, 阳祥贵. 区块链下航空供应商质量数据管理平台设计[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(7): 2223-2231.
CAO Pengyong, DUAN Guijiang, YANG Xiangui. Design of aviation supplier quality data management platform based on blockchain[J]. Computer Engineering and Design, 2023, 44(7): 2223-2231.
- [10] 宋云, 吕杰. 基于区块链的航空器维修任务发布系统[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(8): 50-53, 57.
SONG Yun, LYU Jie. Aircraft maintenance task release system based on blockchain[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(8): 50-53, 57.
- [11] 李剑, 易兰, 肖瑶. 信息不对称下基于区块链驱动的供应链减排信息共享机制研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(10): 131-139.
LI Jian, YI Lan, XIAO Yao. Research on information sharing mechanism of emission reduction in supply chain based on blockchain under information asymmetry[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(10): 131-139.
- [12] 刘如意, 李金保, 李旭东. 区块链在农产品流通中的应用模式与实施[J]. 中国流通经济, 2020, 34(3): 43-54.
LIU Ruyi, LI Jinbao, LI Xudong. Application mode and implementation of blockchain in circulation of agricultural products[J]. China Business and Market, 2020, 34(3): 43-54.
- [13] 生吉萍, 莫际仙, 于滨铜, 等. 区块链技术何以赋能农业协同创新发展: 功能特征、增效机理与管理机制[J]. 中国农村经济, 2021(12): 22-43.
SHENG Jiping, MO Jixian, YU Bintong, et al. Blockchain technology enabling agricultural collaborative innovation and development: Functional characteristics, synergistic mechanism and management mechanism[J]. China Rural Economy, 2021(12): 22-43.
- [14] 刘鸿超, 王晓伟, 陈卫洪. 基于区块链技术的农产品安全生产机制研究[J]. 农业经济问题, 2021(11): 66-76.
LIU Hongchao, WANG Xiaowei, CHEN Weihong. Research on agricultural product safety production mechanism based on blockchain technology[J]. Agricultural Economic Issues, 2021(11): 66-76.
- [15] 匡增杰, 于侗. 区块链技术视角下我国跨境电商海关监管创新研究[J]. 国际贸易, 2021(11): 51-59.
KUANG Zengjie, YU Ti. Research on innovation in China's cross border e-commerce customs supervision from the perspective of blockchain technology[J]. International Trade, 2021(11): 51-59.
- [16] 曹慧平, 王欣. 智能合约驱动传统跨境贸易模式变革研究[J]. 国际贸易, 2021(5): 90-96.
CAO Huiping, WANG Xin. Research on the transformation of traditional cross border trade models driven by smart contracts[J]. International Trade, 2021(5): 90-96.
- [17] 陈淑梅. 基于区块链技术构建全球治理视角的高质量自贸区网络[J]. 国际贸易, 2020(12): 41-47.
CHEN Shumei. Building a high-quality free trade zone network from a global governance perspective based on blockchain technology[J]. International Trade, 2020(12): 41-47.
- [18] 时坤, 周勇, 张启亮, 等. 基于联盟链的能源交易数据隐私保护方案[J]. 计算机科学, 2022, 49(11): 335-344.
SHI Kun, ZHOU Yong, ZHANG Qiliang, et al. Energy transaction data privacy protection scheme based on alliance chain[J]. Computer Science, 2022, 49(11): 335-344.
- [19] 王宇倩, 李军祥, 徐敏. 区块链框架下基于前景理论的微网分布式能源协同优化[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(9): 2551-2564.
WANG Yuqian, LI Junxiang, XU Min. Collaborative optimization of microgrid distributed energy based on prospect theory in the blockchain framework[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2022, 42(9): 2551-2564.
- [20] 吴诗平, 陈谋, 朱荣刚, 等. 基于区块链的多先进战机协同作战资源自适应调度[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1021-1029.
WU Shiping, CHEN Mou, ZHU Ronggang, et al. Blockchain based adaptive scheduling of multi advanced fighter aircraft collaborative combat resources [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1021-1029.
- [21] 王宇晨, 齐文慧, 徐立臻. 基于区块链的无人机集群安全协作[J]. 计算机科学, 2021, 48(S2): 528-532, 546.
WAHG Yuchen, QI Wenhui, XU Lizhen. Blockchain based unmanned aerial vehicle cluster security collaboration[J]. Computer Science, 2021, 48(S2):

- 528-532, 546.
- [22] 李洪晨, 马捷, 胡漠. 面向健康医疗大数据安全保护的医疗区块链模型构建[J]. 图书情报工作, 2021, 65(2): 37-44.
LI Hongchen, MA Jie, HU Mo. Construction of a medical blockchain model for health and medical big data security protection[J]. Library and Information Service, 2021, 65(2): 37-44.
- [23] 史雅妮, 陈嘉曼, 李晨瑜, 等. 破解电子病历信息共享困境: 区块链的转型干预作用[J]. 图书情报知识, 2022, 39(6): 20-34.
SHI Yani, CHEN Jiaman, LI Chenyu, et al. Breaking the dilemma of electronic medical record information sharing: The transformation intervention role of blockchain[J]. Documentation, Information & Knowledge, 2022, 39(6): 20-34.
- [24] 田威, 焦嘉琛, 李波, 等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 341-352.
TIAN Wei, JIAO Jiachen, LI bo, et al. High precision robot operation equipment and technology in aerospace manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 341-352.
- [25] 郭忠义, 李永华, 李关辉, 等. 装备系统剩余使用寿命预测技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 341-364.
GUO Zhongyi, LI Yonghua, LI Guanhui, et al. Research progress on remaining useful life prediction technology of equipment systems[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 341-364.
- [26] HO G T S, TANG Y M, TSANG K Y, et al. A blockchain-based system to enhance aircraft parts traceability and trackability for inventory management[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 179: 115101.
- [27] MANDOLLA C, PETRUZZELLI A M, PERCOCO G, et al. Building a digital twin for additive manufacturing through the exploitation of blockchain: A case analysis of the aircraft industry. Computers in Industry[J]. Computers in Industry, 2019, 109: 134-152.
- [28] ROLINCK M, GELLRICH S, BODE C, et al. A concept for blockchain-based LCA and its application in the context of aircraft MRO[J]. Procedia CIRP, 2021, 98: 394-399.
- [29] EFTHYMIOU M, MCCARTHY K, MARKOU C, et al. An exploratory research on blockchain in aviation: The case of maintenance, repair and overhaul (MRO) organizations[J]. Sustainability, 2022, 14(5): 2643.
- [30] SCHYGA J, HINCKELDEYN J, KREUTZFELDT J. Prototype for a permissioned blockchain in aircraft MRO[C]//Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL). [S.l.]: Epubli GmbH, 2019: 469-505.
- [31] 吴莹, 彭轶轩, 郑婉文, 等. 面向任务的装备维修保障资源配置研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 455-462.
WU Ying, PENG Yixuan, ZHENG Wanwen, et al. Task-oriented equipment maintenance support resource allocation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 455-462.

(编辑:张蓓)