

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)10-0153-06

# 基于多层架构的地铁运行设备资产管理系统设计

葛 健<sup>1</sup>, 洪学钊<sup>1,2</sup>

(1. 合肥市轨道交通集团有限公司, 合肥 230000; 2. 广州市品高软件股份有限公司, 广州 510663)

**摘 要:**随着互联网的快速发展,网络通信技术逐渐成为地铁运行设备资产管理领域中的主要运行平行和关键技术支撑,地铁运行设备资产的管理效果将直接影响企业运营战略的转变,如何安全且高效地管理地铁运行设备资产成为了当前资产管理研究的热点问题之一。因此,本文设计地铁运行设备资产的多层架构系统,设计了资产信息模块、设备作业模块、故障预警模块、维修检测模块和数据库等模块,功能模块之间协调配合,提升资产管理效率、降低企业运营成本。设置非对称加密,构建资产管理数据加密程序,连接数据库服务器与云计算数据中心,按照连接的组合顺序对地铁运行设备资产数据进行排列,提高资产管理安全性,增强资产管理效果。实验结果表明,地铁运行设备资产的多层架构系统能够准确地完成设备状态信息管理测试、工器具管理测试和监视管理测试,具有实际应用价值。

**关键词:**地铁运行设备;资产管理;多层架构;B/S 架构;模块设计;非对称加密

**中图分类号:** TP309.7;U231<sup>+</sup>.92

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-7241(2026)10-0153-06

## Design of subway operation equipment asset management system based on multi-layer architecture

Ge Jian<sup>1</sup>, Hong Xueqian<sup>1,2</sup>

(1. Hefei rail transit Group Co., Ltd., Hefei 230000, China;

2. Guangzhou Pingao Software Co., Ltd., Guangzhou 510663, China )

**Abstract:** With the rapid development of Internet, network communication technology has gradually become the main way in the field of metro operation equipment asset management, the subway operation effect of the equipment asset management will directly affect the transformation of business strategy, how to safely and efficiently manage the subway operation equipment assets become one of the hot issues of the current asset management research. Therefore, this paper designs design of subway operation equipment asset management system based on multi-layer architecture. The hardware structure includes asset information module, equipment operation module, fault warning module, maintenance detection module and database module. The coordination and cooperation among functional modules can improve the efficiency of asset management and reduce the operating cost of enterprises. In the software part, asymmetric encryption is set, the asset management data encryption program is constructed, the database server is connected to the cloud computing data center, and the asset data of subway operation equipment is arranged according to the combination order of connection, so as to improve the security of asset management and enhance the effect of asset management. The experimental results show that design of subway operation equipment asset management system based on multi-layer architecture can accurately complete the equipment status information management test, tool management test and monitoring management test, and has practical application value.

**Keywords:** subway operation equipment; asset management; multi-layer architecture; B/S architecture; module design; asymmetric encryption

随着网络通信技术的发展,我国各大城市的交通系统逐渐形成信息化发展模式,通过计算机技术提高交通运输系统的管理效果<sup>[1]</sup>。地铁运行设备资产管理影响着企业的稳定发展,地铁运行设备资产中存在的资产价值数量巨大且资产较为密集<sup>[2]</sup>,因此需要对地铁资产进行信息化建设管理。多层架构扩展性较强,可以实现不同层面的转换,降低层与层之间的依赖,同时架构中存在明确的层级分类,数据访问和管理过程中只能由固定层访问其他层,

因此安全性较高。文献[3]提出基于自偿率在城市轨道交通项目运作中的应用,从理论和应用两方面对地铁资产合理性、准确性进行分析,建立新的自偿率模型,降低成本。但是,该方法可视化程度较低,在一定程度上会影响地铁的运营管理。文献[4]提出地铁资产数据管理系统设计与应用,对系统资产管理软件和信息采集存储软件的技术路线进行分析,设计了相关模块流程,完成了地铁资产的管理。但是,该方法主要是从 Web 端管理入手,架构

收稿日期:2025-11-03;录用日期:2025-12-30

作者简介:葛 健(1982—),男,硕士研究生,信息系统监理师,研究方向为信息化管理(资产一体化)。

引用本文:葛健,洪学钊.基于多层架构的地铁运行设备资产管理系统设计[J].自动化技术与应用,2026,45(10):153-158.(Ge Jian,Hong Xueqian. Design of subway operation equipment asset management system based on multi-layer architecture[J].Techniques of Automation and Applications,2026,45(10):153-158.)

模式较为单一,智能化程度较差。为了确保地铁的安全持续存在和运行,文献[5]对现有地铁运行设备资产管理方法进行回顾,利用共享多学科数据标准化方法,证实地铁资产定性分析的必要性。但是,在设计系统结构时没有采用多层架构,系统缺乏一定的交互性。为了解决上述方法存在的问题,设计地铁运行设备资产管理的多层架构系统。

系统通过构建三层功能层对地铁运行设备资产进行有效管理。构建资产信息模块和设备作业模块,建档地铁设备资产管理具体信息和操作流程;通过故障预警模块和维修检测模块完成地铁运行设备动态故障检测和诊断服务;利用数据库模块实现地铁企业可视化管理,提高管理效率;依托非对称加密设计资产管理数据加密程序,增强资产管理安全性。实验结果表明,设计的地铁运行设备资产管理的多层架构系统安全性、可靠性和效率性较高,可以有效降低企业运营成本,具有初步应用价值。

1 系统总体框架设计

对系统总体构架进行分析,构建由客户端、Web 服务

器和数据库服务器所组成的三层功能层模式<sup>[6]</sup>,利用客户端获取可视化的运行设备数据,通过手动操作方式向 Web 服务器发送具体管理请求,依托数据库服务器储存数据信息,确保地铁运行设备资产的有效管理。

本文选择浏览器/服务器 (browser/server, B/S) 架构作为多层架构模式的具体实现<sup>[7]</sup>,在客户端中实现可视化信息管理,在 Web 服务器的基础上满足信息安全、大范围使用、操作简单等要求,同时在数据库服务器中可以实现远程操作。系统包括 3 个功能层:用户层、数据层和服务层<sup>[8]</sup>,以此完成对地铁运行设备资产数据采集、维护、储存等。三层功能层中,用户层负责管理员和系统之间的交互任务,主要包含资产信息模块和设备作业模块,通过调用中间层的可视化数据将管理请求传输至数据层。数据层主要执行监管、维修等地铁运行设备资源管理任务,向服务层组件提出数据或其他资源请求,主要依托故障预警模块和维修检测模块实现。服务层承担着对地铁运行设备资产的物理存储及安全性管控,并通过数据库模块依托非对称加密设计资产管理数据加密程序,为管理员提供特定的设备数据。系统总体设计构架如图 1 所示。

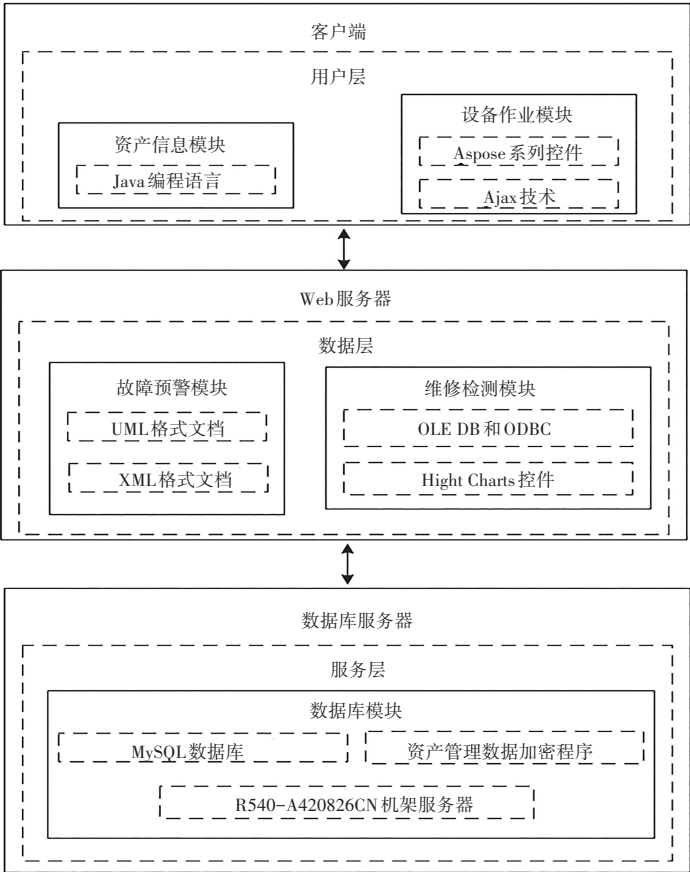


图 1 系统总体设计构架

Fig. 1 Overall system design framework

2 功能模块设计

通过功能模块,对每个地铁设备资产进行建档;在设备作业模块中衔接采购、库存、维修、保养等资产管理流

程;根据故障预警模块提供的地铁运行设备动态数据,完成数据关联管理;利用维修检测模块实现在线地铁设备诊断和能效分析服务;通过数据库模块,采集、存储地铁运行设备数据,在 Maximo 系统中将资产数据进行串联起来,通

过密钥方式提高信息管理安全性。

### 2.1 资产信息模块设计

地铁企业的资产涉及范围较广,其中主要资产是运行设备,设备管理的内容通常包括设备的基本信息、设备的位置及运行状态、设备的履历信息等,因此需要设计资产信息功能模块,建档每个地铁运行设备资产。通过 Java 编程语言<sup>[9-11]</sup>设计资产信息管理登录界面用户名和密码验证程序,保证数据库信息安全性。

#### 1) 设备基本信息。

设备图片信息、功能描述信息、组成部件信息、维护信息和购进信息等都属于设备基本信息。地铁运行设备在客户端中完成更新,并在该平台中上传交易信息和采购合同等。完成可视化信息操作。

#### 2) 设备位置信息。

位置描述是设备具体使用和安装的组织或地点,构成设备的零部件一般都是通用且可以更换的,位置信息中只包含设备的安装点,因此设备资产管理可以通过对零部件进行编码实现。

#### 3) 设备履历信息。

对设备维修、变更、进货成本以及设备运行状态等基础性信息进行标注,其中设备管理中状态情况包括报废信息登记、运行状态信息和位置更新信息等。

管理员在登录系统资产管理界面时,需要对设备资产基础性信息进行更新,同时将资产信息请求发送至 Web 服务器,并填写地铁运行设备信息登记表,基础信息添加完毕后在数据库中存储相关资产信息。

### 2.2 设备作业模块设计

地铁运行设备资产管理涉及多个部门协同工作,因此为了减少准备工作的出错率,提高管理效率,需要制定设备作业计划,通过 Aspose 系列控件实现采购过程、库存记录、维修情况、保养程度等资产信息多样化的报表设计及输出,结合 Ajax 技术<sup>[12]</sup>为资产管理提供相关服务和数

据。在设备工作过程中,通过设定危险等级、风险预防措施和风险隔离措施,降低设备运行和维护的风险。为了加强地铁运行设备资产管理工作的安全性,可以通过客户端显示设备运行情况,根据可视化的资产信息,快速了解设备的数量、运行状态等情况,便于安全管理地铁设备。

管理员可以在地铁运行设备资产管理系统中查询设备相关的运行信息,根据获取的实际作业信息更新设备作业标准,在数据库中对添加的设备作业标准信息信息进行更新并保存。

### 2.3 故障预警模块设计

地铁运行设备在作业过程中发生故障时,需要通过设备动态数据关联设备故障信息,以此完成故障解析。当设备发生故障情况时,客户端会通过报警方式提醒管理员,同时能够可视化地显示设备故障后可能影响的范围,预估影响情况。通过划分故障等级,维调、环调、电调故障信息,将获取的故障信息上传至地系统数据库。相关人员根据数据库中存在的故障信息对运行设备进行调度管理。在地铁资产工单管理和故障处理等设备检修过程中,需要分析并统计引起设备故障的原因,并构建故障预警体系,在之后的维修检测工作中提供研判依据。设备出现故障的位置、出现故障时的现象以及产生故障的原因都可以通过 UML 格式文档转换成 XML 格式文档<sup>[13]</sup>,最终生成故障代码上传至数据库服务器中,便于制定维修策略、分析产生故障原因、获取故障现象特征和统一管理地铁运行设备,以此降低故障发生概率、为设备安全运行和后期维修提供保障。

管理员可以将用户名和对应的密码输入至系统中,故障报修人员即可登录地铁运行设备故障页面,跟踪并检查设备的运行状况,记录故障特征,并上传到数据库中申请报修,对地铁运行设备资产进行有效管理。地铁运行设备故障报修操作过程如图 2 所示。

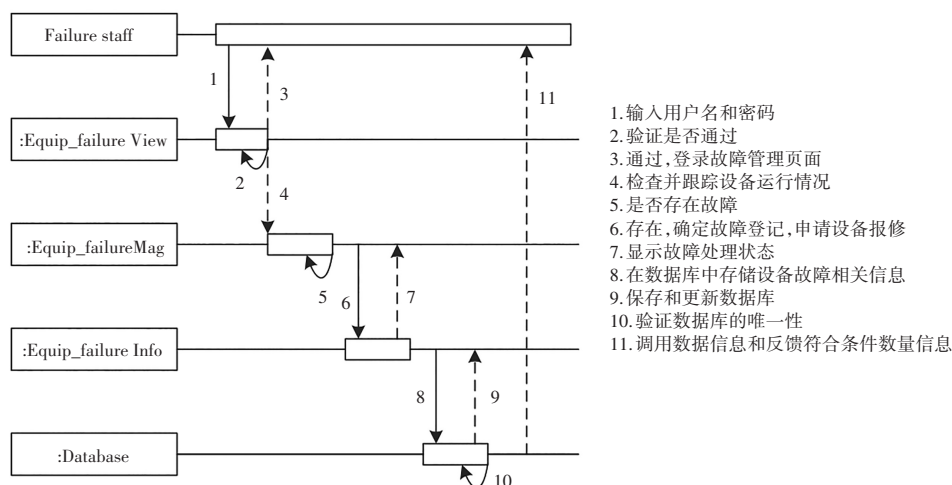


图 2 地铁运行设备故障报修操作过程

Fig. 2 Operation process of fault reporting for subway operation equipment

## 2.4 维修检测模块设计

维修检测功能模块在地铁运行设备资产管理系统中的主要功能是管理地铁运行设备的工作状态、管理设备的维修工作和检查工作、管理设备运行路线等,通过 OLE DB 和 ODBC 实现在线地铁设备诊断和能效分析服务,完成资产安全管理。检测分析地铁运行设备的状态,根据分析结果对设备资产的质量进行监控,为维修、维护设备提供数据支撑。通过预防性维修管理的方式,降低设备资产管理的工作时间,提高设备的运行可靠性,使用 Hight Charts 控件<sup>[14]</sup>自动生成设备维修工单,同时采用 Web 服务器报修,能够有效调整设备检修周期,避免地铁运行设备维护过程中存在过度维修现象,降低资产管理成本。

地铁运行设备资产管理系统利用动静态结合的方式对基础设施进行检查,包括地铁运行路线和车辆保养情况等信息,并将检测结果输入数据库中,为设备维修和管理提供依据。

## 2.5 数据库模块设计

数据库功能模块可以有效采集、存储地铁运行设备数据,在 Maximo 系统中构建 MySQL 数据库<sup>[15]</sup>将地铁运行设备资产数据进行串联。通过数据库对地铁运行设备故障进行预警,以维修检测的方式预处理地铁运行设备资产。数据库模块选择戴尔 R540-A420826CN 机架服务器作为系统的数据存储设备,将处理后的地铁运行结果同步存储其中。根据地铁运行设备资产管理需求,设定实时数据缓存周期,及时更新资产信息,保障资产管理效率。

在数据库功能模块中,利用非对称加密实现地铁运行设备资产管理数据加密程序,通过不同功能层属性的公钥和群公钥对数据库进行加密<sup>[16-17]</sup>,完成系统安全访问设置。管理员可以通过更新密钥清单的方式,改变密钥与数据库之间的相互关系,对数据库中的资产管理信息进行加密保护,同时密钥属性特点确保其只能在单一的数据库中进行资产管理,因此可以有效保护资产信息,避免产生信息丢失或遗漏等问题,以此确保地铁运行设备资产管理安全性和可靠性。

## 3 算法设计

为了提高地铁运行设备资产管理的安全性,设置非对称加密算法,建立资产管理数据加密程序。动态组件按照连接的组合顺序对设备资产数据进行排列,制定功能模块与算法之间的接口协议,以此提高资产管理安全性,增强资产管理效果。

### 3.1 非对称加密

地铁运行设备资产管理的多层架构系统在服务层中进行数据存储,提高资产管理过程的安全性。服务层在本质上可理解为由集合  $Q = \{Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n\}$  构成的网络,  $n$  为服务层总节点数量。其中包含 DUP 与 DAP 两重身份,可实现地铁运行设备资产管理的上传与访问功能,

保证数据传输的安全性。B/S 架构服务层中,对不同管理节点的非对称加密,完成无可信中心的数字签名模式生成密钥与签名。基于  $Q_i$  内不同管理节点生成密钥。

$$Q_i = \frac{U_i \times O_i}{\varepsilon} + R_i \quad (1)$$

式中,  $i$  为服务层内第  $i$  个资产管理节点的序号;  $Q_i$  为服务层第  $i$  号管理节点;  $U_i$  为第  $i$  个节点的公钥;  $O_i$  第  $i$  个节点所属群组的群公钥;  $R_i$  为第  $i$  个节点的私钥,  $\varepsilon$  表示数据链路速率。  $Q_i$  将访问请求发送至其他数据节点,数据节点接收访问请求后生成子签名,产生随机对称密钥。当管理设备资产时,数据节点  $\varphi$  将原始访问请求报文  $E$  发送至服务层,管理节点  $Q_i$  查看  $E$  后生成随机数  $d_i$ ,并使用公钥对称密钥进行加密。加密后的对称密钥通过转换为群公钥的方式,将  $E$  的请求发送至数据层,同意  $\varphi$  的节点通过私钥实现非对称式加密,与不同数据节点接收的签名原始参数  $\zeta$  构建子签名  $G_i$ ,其可通过下式描述。

$$G_i = \varphi + d_i [\gcd(R_i, U_i)] \zeta \quad (2)$$

式中,  $G_i$  为第  $i$  个节点生成的子签名;  $\gcd$  为最大公约数函数;  $Q_i$  生成子签名后,确定符合  $\gcd(R_i, U_i) = 1$  要求的任意数,利用式(3)确定  $R_i$ 。

$$R_i = E \bmod \varphi(u_i) \quad (3)$$

式中,  $\bmod$  为取模运算;  $\varphi(u_i)$  为  $u_i$  的欧拉函数值。在此条件下,  $Q_i$  完成管理节点的密文通信设定。系统服务层可以验证不同数据节点群签名的准确性,若通过验证即可在用户层、数据层、服务层存储访问请求,极大程度提高了数据信息安全性。

### 3.2 资产管理数据加密程序

在服务层的数据库模块中连接数据库服务器与云计算数据中心,按照连接的组合顺序进行数据节点排列,调整符合系统操纵区间的数据节点。经过上述操作后,对数据库中的数据节点进行过滤,实时记录过滤后的数据节点状况,并及时更新数据节点信息。在实现数据记录操作后,标定过滤数据节点内容,连接云计算数据中心的网络数据,在底层链路数据达到顶层链路前对系统通道进行拓展,保证数据的流通性。根据流通数据节点间的对应关系对数据进行加密编号,将编号相近的数据进行数据节点集合编录操作,扩大信号信息覆盖范围,加强内部系统的管理安全性,确保数据处于系统正常管控范围内。资产管理数据加密程序如图3所示。

通过上述操作,利用资产管理数据加密程序完成地铁运行设备资产管理,采用非对称加密完成不同数据节点群签名,提高三层功能层之间的交互性。利用资产管理数据加密程序完成数据节点自动布局,由此实现对系统算法设计,至此完成地铁运行设备资产管理的多层架构系统设计。

## 4 实验与分析

为了验证所提地铁运行设备资产管理的多层架构系统的整体有效性,进行实验分析。测试通过 MatlabR 2019 b

仿真实验进行地铁运行设备资产管理效能分析。选择某市轨道交通 1 号线、轨道交通 2 号线、轨道交通 3 号线和轨道交通 5 号作为测试对象,随机选取设备资产管理信息数据 5 000 个,迭代次数为 800 次。实验过程中,以设备状态信息管理、工器具管理和监视管理作为测试指标对系统可行性进行验证。本次测试的硬件参数如表 1 所示。

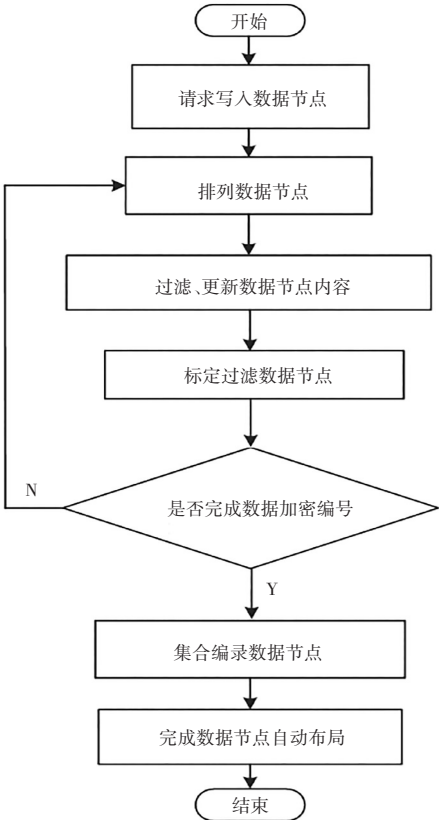


图 3 资产管理数据加密程序  
Fig. 3 Asset management data encryption program

表 1 测试硬件参数

| Tab. 1 Test hardware parameters |        |                 |               |
|---------------------------------|--------|-----------------|---------------|
| 三层构架                            | 硬盘     | IP 地址           | 内存            |
| 客户端                             | 500 GB | 10. 61. 24. 100 | 8 GB ECC DDR3 |
| WEB 服务器                         | 500 GB | 10. 61. 24. 2   | 8 GB ECC DDR3 |
| 数据库服务器                          | 2 TB   | 10. 61. 24. 1   | 8 GB ECC DDR4 |

4.1 基准测试

测试地铁运行设备资产管理的多层架构系统基本功能,对单一线路进行功能点的反复测试,对系统中的 4 条轨道交通线路各项功能点进行 800 次测试,平均响应时间低于 0. 50 s 即为满足需求指标。测试结果如表 2 所示,根据表 2 中的数据可知,地铁运行设备资产管理系统平均响应时间均符合需求指标,且测试成功率均在 96% 以上,表明系统通过基准测试。

4.2 设备状态信息管理测试

4 条轨道交通设备台账信息管理测试结果如表 3 所示,分析表中的数据可知,系统的平均响应时间都满足需求指标,成功率在 97% 以上,表明系统通过测试。

表 2 基准测试结果

| Tab. 2 Benchmark test results |     |     |          |
|-------------------------------|-----|-----|----------|
| 测试点                           | 成功数 | 失败数 | 平均响应时间/s |
| 启动流程实例                        | 797 | 3   | 0. 14    |
| 系统登录                          | 800 | 0   | 0. 28    |
| 登录管理主页                        | 800 | 0   | 0. 12    |
| 查看设备作业流程                      | 798 | 2   | 0. 30    |
| 查询设备故障信息                      | 800 | 0   | 0. 41    |
| 审核故障维修工单                      | 800 | 0   | 0. 37    |
| 常用功能链接                        | 796 | 4   | 0. 25    |
| 更新资产信息                        | 799 | 1   | 0. 24    |

表 3 设备台账信息测试结果

| Tab. 3 Equipment asset information test results |     |     |        |
|-------------------------------------------------|-----|-----|--------|
| 测试点                                             | 成功数 | 失败数 | 响应时间/s |
| 查看设备关联信息                                        | 797 | 3   | 0. 25  |
| 查看设备台账信息                                        | 800 | 0   | 0. 31  |
| 登录设备台站信息                                        | 799 | 1   | 0. 37  |

4.3 工器具管理测试

对系统中的工器具管理功能进行测试。分析表 4 可知,平均响应时间满足系统设定的管理需求指标,成功率均在 98% 以上,测试结果表明地铁资产管理系统的工器具管理通过测试。

表 4 工器具管理功能测试结果

| Tab. 4 Tool management function test results |     |     |        |
|----------------------------------------------|-----|-----|--------|
| 测试点                                          | 成功数 | 失败数 | 响应时间/s |
| 查看工器具归还信息                                    | 800 | 0   | 0. 34  |
| 查看工器具借用信息                                    | 800 | 0   | 0. 28  |
| 查看工器具类型信息                                    | 798 | 2   | 0. 17  |

4.4 监视管理测试

对地铁运行设备资产管理的系统的监视管理功能进行测试。由表 5 和表 6 中的数据可知,平均响应时间满足地铁资产管理系统设定的需求指标,成功率均在 96% 以上,表明系统的监视管理功能通过测试。

表 5 实时检测状态测试结果

| Tab. 5 Real-time detection status test results |     |     |        |
|------------------------------------------------|-----|-----|--------|
| 测试点                                            | 成功数 | 失败数 | 响应时间/s |
| 查看实时设备功能点信息                                    | 800 | 0   | 0. 41  |
| 查看设备类型索引树                                      | 796 | 4   | 0. 33  |

表 6 设备故障信息监视测试结果

| Tab. 6 Equipment fault information monitoring test results |     |     |        |
|------------------------------------------------------------|-----|-----|--------|
| 测试点                                                        | 成功数 | 失败数 | 响应时间/s |
| 取消过滤条件                                                     | 800 | 0   | 0. 24  |
| 选择查询条件, 过滤故障预警                                             | 798 | 2   | 0. 37  |
| 查看设备故障信息                                                   | 800 | 0   | 0. 21  |

## 5 结论

地铁随着城市轨道交通的不断发展,逐渐向网络化和多元化方向发展。为了保障地铁企业健康发展,需要对地铁运行设备资产进行有效管理,设计基于多层架构的地铁运行设备资产管理的系统,以期提高资产管理效率、降低运营成本、提高资源利用率。通过构建实验及分析证明系统,所提方法,设备状态信息管理测试、工器具管理测试和监视管理测试成功率均在96%以上,系统实用性强,为地铁企业的运行设备资产管理提供了保障。

## 参考文献

- [1] 林浩,李雷孝,王慧. 支持向量机在智能交通系统中的研究应用综述[J]. 计算机科学与探索,2020,14(6):901-917.
- [2] 张霞,张竹青,孙有为,等. 轨道交通设备资产管理及其信息化[J]. 技术与市场,2021,28(7):166-167.
- [3] 李红昌,崔金丽,聂琼,等. 自偿率在城市轨道交通PPP项目运作中的应用[J]. 长安大学学报(社会科学版),2020,22(2):71-82.
- [4] 张红星,刘超,宋君君,等. 地铁列车远程数据管理系统设计与应用[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(3):34-37.
- [5] Darroch N, Beecroft M, Nelson J D. A qualitative analysis of the interfaces between urban underground metro infrastructure and its environment in London[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021,14(8):103930.
- [6] 赵瑞莲,郭小红,王微微,等. 面向Web服务器端敏感路径的客户端扩展有限状态机测试生成[J]. 哈尔滨工程大学学报,2020,41(6):884-891.
- [7] 陈君. 基于B/S结构的异构数据库加密算法仿真[J]. 计算机仿真,2021,38(4):236-239,262.
- [8] 李国和,袁长安,冯峥,等. 基于B/S结构的网络异常数据实时监测方法研究[J]. 计算技术与自动化,2021,40(2):71-75.
- [9] 容秀婵,邹湘军,张胜,等. 基于B/S模式的设备管理信息系统设计与实现[J]. 现代电子技术,2021,44(12):78-82.
- [10] 冯亮,南天,吴璇. 基于电力企业B/S架构的仓储与运输一体化物流系统设计[J]. 自动化技术与应用,2025,44(8):57-61.
- [11] 阴西龙,刘君,刘小双,等. 基于B/S架构和Unity3D的电力巡检无人机虚拟培训系统[J]. 自动化技术与应用,2024,43(8):42-45.
- [12] 罗明皓,李伟. 决策树算法用于动态决策服务器推送机制的可行性研究与分析[J]. 计算机与数字工程,2020,48(4):899-904.
- [13] Hajjamy O E, Khallouki H, Alaoui L, et al. Semantic integration of traditional and heterogeneous data sources (UML, XML and RDB) in OWL2 triplestore[J]. International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies,2021,13(1-2):36-58.
- [14] 张书俊,苏天宝,丁力,等. 智慧电梯云平台监控系统设计与实现[J]. 工业控制计算机,2020,33(10):110-112,115.
- [15] 张俊,廖雪花,余旭玲,等. 关系型数据库内存化存储模型研究[J]. 计算机工程与应用,2021,57(19):123-128.
- [16] 陈良英. 基于属性加密的计算机数据库安全检测工具的设计与运用[J]. 信息技术与网络安全,2020,39(4):30-35.
- [17] 刘晓红,黄欣沂,程朝辉,等. 基于SM9的密钥策略属性基加密及快速解密[J]. 计算机学报,2024,47(5):971-986.
- [D]. 西安:西安电子科技大学,2022.
- [11] 赵万生,苗群,王蕊,等. 基于传感器和现场总线技术的轴承压装线自动控制系统[J]. 自动化技术与应用,2024,43(5):35-38,162.
- [12] 李晓林,贾祖琛,田卫,等. 一种模拟边界扫描的FPGA高可靠自更新方法[J]. 电子与封装,2024,24(10):97-101.
- [13] 邓怡兴,傅佳烨,胡中泽. MCU模拟JTAG的FPGA在线升级设计[J]. 集成电路与嵌入式系统,2024,24(6):71-76.
- [14] 覃文键. FPGA远程配置系统的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [15] 刘丁柯. 基于车联网的数据采集系统及定位技术研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2020.
- [16] 吕思宇,王传宇,刘伟,等. 基于LTC2945的电源监控电路FPGA开发[J]. 自动化技术与应用,2025,44(4):89-93.
- [1] 林浩,李雷孝,王慧. 支持向量机在智能交通系统中的研究应用综述[J]. 计算机科学与探索,2020,14(6):901-917.
- [2] 张霞,张竹青,孙有为,等. 轨道交通设备资产管理及其信息化[J]. 技术与市场,2021,28(7):166-167.
- [3] 李红昌,崔金丽,聂琼,等. 自偿率在城市轨道交通PPP项目运作中的应用[J]. 长安大学学报(社会科学版),2020,22(2):71-82.
- [4] 张红星,刘超,宋君君,等. 地铁列车远程数据管理系统设计与应用[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(3):34-37.
- [5] Darroch N, Beecroft M, Nelson J D. A qualitative analysis of the interfaces between urban underground metro infrastructure and its environment in London[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021,14(8):103930.

(上接第139页)

- [4] 舒鹏飞,苏敏,李岚. 利用以太网实现FPGA的远程快速升级[J]. 电子信息对抗技术,2020,35(5):89-92.
- [5] 官剑,钱雪磊,韩留军,等. 基于以太网的FPGA远程调试系统设计[J]. 电子技术应用,2023,49(2):115-120.
- [6] 刘帅,张磊. 基于32位MCU的FPGA远程调试和固化系统设计[J]. 微处理机,2024,45(3):9-12,46.
- [7] 洪泽,张柳,陈振娇. 基于STM32F407的Ethernet-CAN总线转换器设计[J]. 电子设计工程,2023,31(14):46-50.
- [8] 刘文政,刘剑. 用于通用处理平台的FPGA模块的远程调试与更新设计[J]. 舰船电子对抗,2020,43(4):103-106.
- [9] 赵赞. 一种基于XVC协议的FPGA调试模块设计[J]. 舰船电子对抗,2019,42(4):109-112.
- [10] 黄倩倩. 基于硬件仿真加速器的JTAG虚拟调试系统的设计与实现