

罗朝云, 王国庆, 黄一览, 等. 自主可控的工程机械控制器软件开发平台研究[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(2): 112-117.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.25010804

自主可控的工程机械控制器软件开发平台研究

罗朝云, 王国庆, 黄一览, 杨逸, 张延明, 王若辰, 熊振, EBRAHIM AHMED HUSSEIN SAAD
(长安大学 工程机械学院, 西安 710064)

摘要: 目前, 工程机械控制器系统的软件开发工作都有着高门槛、周期长等问题。如何加快这一过程, 降低开发门槛是重要的研究方向。针对此问题, 通过在嵌入式控制器中建立软件快速开发框架是一个有效的解决方案。基于 IEC61499 标准和 QP (Quantum Platform) 框架对工程机械控制器软件快速开发平台总体架构进行了设计, 并且分析了其中的工业互联网协议驱动库技术、自主安全监控传输协议技术、嵌入式数据库技术以及状态机与操作系统任务混合开发模式技术, 对其中的代码编辑器进行了实验验证, 证明其能完成软件代码的生成任务。

关键词: 嵌入式; 工程机械控制器; 快速开发平台; 工业互联网

中图分类号: TP271.4; TP271.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)02-0112-06

Research on the platform for independently controllable construction machinery controller software

LUO Chaoyun, WANG Guoqing, HUANG Yilan, YANG Yi, ZHANG Yanming, WANG Ruochen, XIONG Zhen,

EBRAHIM AHMED HUSSEIN SAAD

(College of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The software development for construction machinery controller systems currently faces issues such as high barriers to entry and long development cycles. Addressing how to expedite this process and lower the development threshold is important research direction. To address this issue, establishing a rapid software development framework within embedded controllers is an effective solution. This paper designs the overall architecture of a rapid software development platform for construction machinery controller software based on the IEC61499 standard and the Quantum Platform (QP) framework. After that, the paper also analyzes the technologies involved, including industrial Internet protocol driver library technology, autonomous safety monitoring and transmission protocol technology, embedded database technology, and the hybrid development model of state machines and operating system tasks. An experimental validation of the code editor has been conducted, proving its capability to generate software code.

Key words: embedded; engineering machinery controller; rapid development platform; industrial IoT

0 引言

CODESYS 是一个独立于硬件平台且能满足可重构需求的开放式全集成化的软件开发平台^[1], 在工业自动化控制领域的可视化编程和开发效率上有巨大的优势^[2], 但考虑到版权问题, 在本次研究中,

采用了嵌入式控制器构建多核异构分布式^[3]控制器系统, 开发了自主可控的控制器软件开发平台, 其中 IEC 61499 标准和 QP (Quantum Platform) 状态机框架为此提供了有力的支持, 基于 IEC61499 标准和 QP 框架自主开发的软件平台符合国际标准, 具有国际通用性。

基金项目: 陕西省科技计划项目(2024GX-YBXM-154)。

作者简介: 罗朝云(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 设备的信息化与智能化。Email: 864172732@qq.com; 王国庆(1972—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 动态仿真, 机器人控制系统; 黄一览(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 设备的信息化与智能化; 杨逸(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 设备的信息化与智能化; 张延明(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 设备的信息化与智能化; 王若辰(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 设备的信息化与智能化; 熊振(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 设备的信息化与智能化; EBRAHIM AHMED HUSSEIN SAAD(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 设备的信息化与智能化。

收稿日期: 2025-01-08

IEC 61499 是国际电工委员会 (IEC) 针对分布式工业过程提出的测控系统 (IPMCS) 标准^[4-5], 该标准定义了一种特定领域的建模语言, 用于开发分布式工业控制解决方案^[6]。IEC 61499 通过改进软件组件的封装, 提高了可重用性^[7], 并提供了与供应商无关的格式, 简化了控制器间通信的支持^[8], 可将此标准用于构建多核异构系统。这一标准在石油化工^[9]、食品生产^[10]、制药^[11]、建筑^[12]、数控系统^[13-14] 等多个领域发挥着重要作用。

QP 框架是一个基于事件驱动的并发模型 (活动对象) 的轻量级实时嵌入式框架^[15], 结合了层次式状态机和活动对象^[16], 提供了可重用的软件架构。QP 框架在机器人运动规划、平衡控制等领域的控制器系统设计开发中得到了应用^[17]。

针对工程机械软件开发更复杂的控制需求以及快速的开发要求^[18-20], 基于对 IEC61499 标准和 QP 框架的分析, 提出了工程机械控制器软件快速开发平台的总体架构, 对其中的关键技术进行了分析, 并通过实验验证了该架构的软件编辑器能完成软件代码的生成任务。

1 软件快速开发平台架构设计需求

控制器快速开发平台设计需求和解决方案如图 1 所示。由图 1 可知, 工程机械控制器快速开发平台的设计需求可分为 3 个部分: 工业互联型需求、工程机械的特殊化需求和快速开发需求。

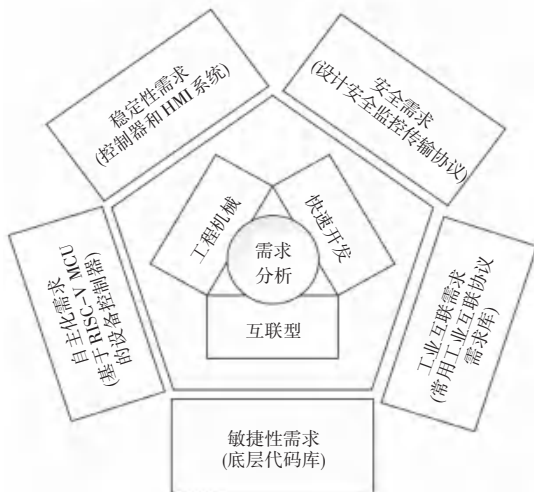


图 1 控制器快速开发平台设计需求和解决方案图

Fig. 1 Controller rapid development platform design requirements and solution diagram

(1) 工业互联需求。为了实现互联型工程机械控制器与各类设备、系统及工具之间的数据交互、通信和协同工作, 需要设计一套通用的工业互联协议

驱动库。开发者只需调用这些协议驱动库, 并设置一些参数, 便能迅速完成工业互联协议的开发工作。

(2) 安全性需求。在开发工程机械控制器的过程中, 对控制器的数据保护、软件防护和硬件防护提出了更为严格的标准。

(3) 自主化需求。自主化是针对工程机械控制器在地缘政治影响下提出的特定设计要求。为了响应这一需求, 快速开发平台以“基于 RISC-V MCU 的工程机械控制器”为核心进行开发。RISC-V 这一开源微控制器架构有助于增强开发流程的自主性, 有效防止因技术依赖而出现的“卡脖子”问题。

(4) 稳定性需求。稳定性是工程机械控制器快速开发平台的核心设计要素。为此, 研发设计了一套能够实时向开发者提供精确监控数据的控制器监控 HMI 系统, 以确保开发流程的稳定性和可靠性。

(5) 敏捷性需求。在快速开发平台的设计中, 集成了状态机与操作系统任务混合开发模块以及硬件资源配置器等辅助工具, 这些工具旨在减少开发者直接编写代码的工作量, 从而提升系统的灵活性和响应速度。

2 IEC 61499 标准和 QP 框架分析

2.1 IEC 61499 标准

IEC 61499 标准是控制技术过渡到数字技术和功能分布化阶段后应运而生的。作为新型工业标准, IEC 61499 定义了一整套设计模型化、可重用、分布式工业测控系统的基本概念和思想。

IEC 61499 标准中定义了应用模型、系统模型、设备模型、资源模型和功能块模型。功能块 (FB) 模型 (如图 2 所示) 是 IEC 61499 中最基本的模型。3 种功能块模型如图 3 所示, 是 IEC 61499 标准体系结构定义的 3 种功能块, 分别是: 基础功能块、复合功能块和服务接口功能块。

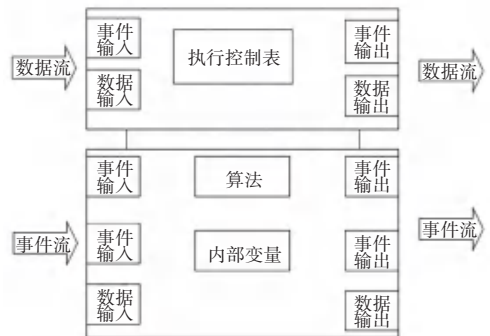


图 2 基本功能块模型

Fig. 2 The basic function block model

基于 IEC 61499 标准的抽象化模型架构与封装

了控制算法的功能块,系统开发人员则无需了解具体的算法实现,只需根据控制功能选择所需功能块并将相应的输入输出进行连接,就可以构建完整的多核异构控制应用,大幅缩短了系统的开发周期。IEC 61499 标准的主要目标即为允许在各种设备上部署控制应用程序(功能块)。

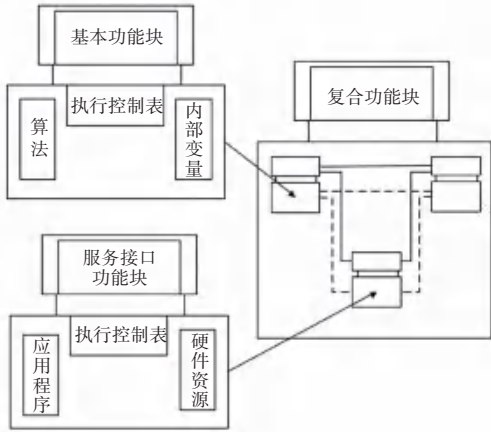


图3 3种功能块模型

Fig. 3 Three function block models

IEC 61499 标准软件架构的功能块化的设计方法,能够降低快速开发平台系统设计的复杂性,且可以在一定程度上隔离硬件资源对软件程序的绑定。

IEC 61499 基于事件驱动的逻辑控制方法,也使得快速开发平台的业务逻辑设计更加简洁清晰。

2.2 QP 框架

QP(Quantum Platform)是一个基于活动对象(Active Objects)和层次状态(Hierarchical State Machines)的开源实时嵌入式框架和运行环境。

在QP框架下,编程模型以状态机为核心,采用事件驱动编程方法。该框架依托操作系统对底层任务和状态(活动对象)进行调度和管理,使得开发的嵌入式系统应用程序结构更加清晰,且以事件驱动为特点。

2.3 基于IEC61499标准和QP的快速开发平台总体架构设计

快速开发平台架构如图4所示,快速开发平台的整体架构由软件和硬件两大部分组成。其中,硬件部分分为目标控制器硬件和调试监控器硬件。软件架构则由4个主要功能模块构成,具体包括:1个基础模块,即快速开发代码库;1个服务接口模块,即自主安全监控传输协议;2个复合功能模块,状态机与操作系统任务混合快速开发模式和工程机械控制器监控HMI系统。

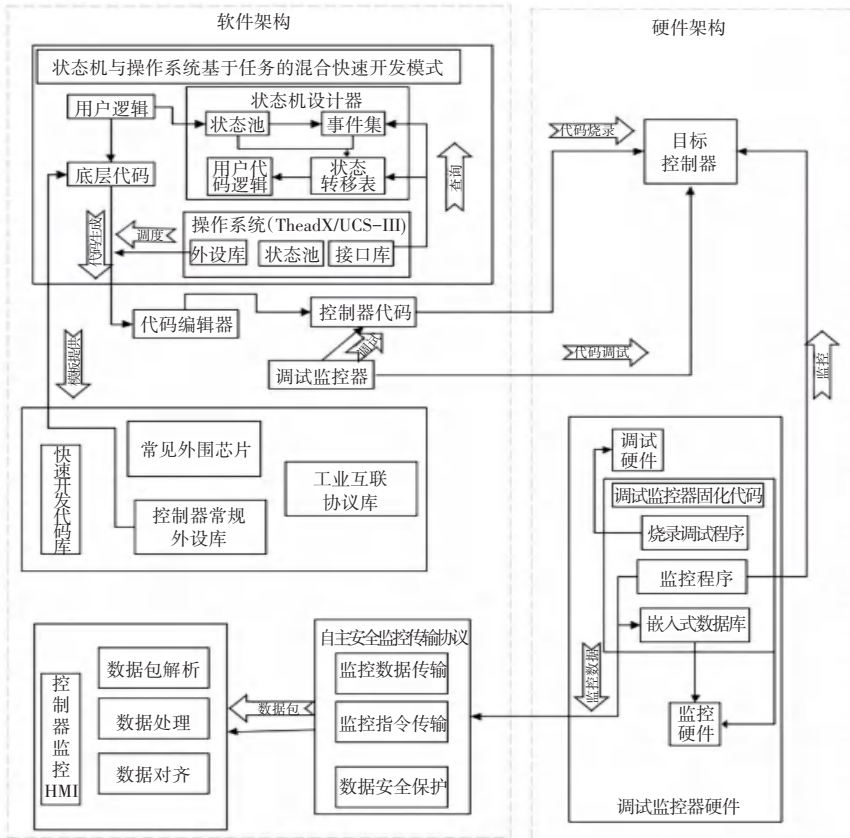


图4 快速开发平台架构

Fig. 4 Diagram of rapid development platform architecture

基础功能块“快速开发代码库”构成了软件架构的基石,包含 3 个主要部分:工程机械控制器的常规外设库、工业互联协议库以及常见外围芯片驱动库。其中,常规外设库向硬件资源配置器提供代码模板,辅助用户迅速生成工程机械控制器的任务层代码,特别是外设任务。工业互联协议库可为代码编辑器中的互联协议快速开发工具箱提供模板,以使用户快速编写工程机械控制器的驱动层和操作系统层代码,例如 RTOS 系统和 MQTT 等互联协议。常见外围芯片驱动库则集成了一些常用芯片的驱动代码,使用户能够利用代码编辑器中的芯片驱动库工具箱,便捷地生成特定芯片的驱动代码。

服务接口功能块“自主安全监控传输协议”旨在确保快速开发平台中工程机械控制器的数据安全。该协议涵盖了三大核心功能:监控数据传输、监控指令传输以及数据安全保护。其中,监控数据传输功能负责将调试监控器收集的监控数据安全上传至 HMI 系统;监控指令传输功能即负责将 HMI 系统的监控指令安全下载至调试监控器;而数据安全保护功能则确保在数据上传和下载过程中,通过加密等安全措施来保护数据包,防止数据泄露或被篡改。

2.4 关键技术分析

2.4.1 工业互联协议驱动库技术分析

常用工业互联协议库的建立能有效地帮助用户完成互联型工程控制器的开发,这一关键技术的软件功能模块如图 5 所示。

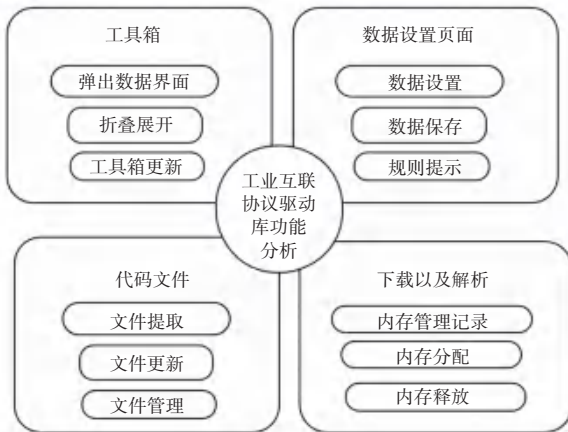


图 5 工业互联协议驱动库功能分析

Fig. 5 Functional analysis of engineering interconnection protocol driver library

- (1)功能可划分为 4 个模块,工具箱模块是调用工业互联协议驱动库的接口。
- (2)数据设置模块是互联协议参数配置页面,用

户可以自定义工业互联协议代码动态参数。

(3)代码文件模块是工业互联协议代码文件,是存储代码封装库文件的底层模块,是整个工业互联协议库的基础。

(4)下载及解析模块是互联协议用户参数下载解析,是同步用户参数和底层代码文件的桥梁。

2.4.2 自主安全监控传输协议技术分析

自主安全传输协议技术分析如图 6 所示。通过对自主安全监控传输协议这一关键技术的分析可知,主要包括功能与服务模型、数据传输模型以及传输安全模型。

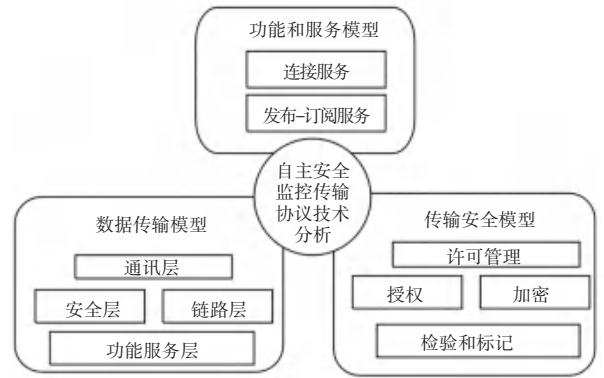


图 6 自主安全传输协议技术分析图

Fig. 6 Technical analysis diagram of autonomous secure transport protocol

2.4.3 嵌入式数据库技术分析

图 7 为嵌入式数据库技术支持的功能模型及各模块的主要功能。

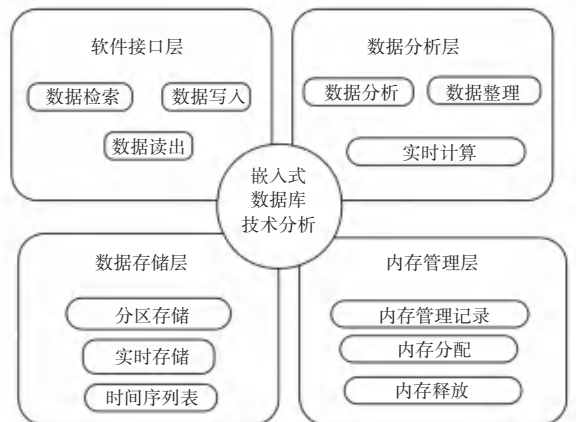


图 7 嵌入式数据库技术分析图

Fig. 7 Embedded database technology analysis diagram

嵌入式数据库可分为 4 层架构:软件接口层、数据分析层、数据存储层和内存管理层。

- 2.4.4 状态机与操作系统任务混合开发模式技术分析
快速开发平台 IDE 系统模型如图 8 所示。快速

开发平台 IDE 系统模型可被划分为 5 个模组:硬件资源配置、互联网协议快速开发、状态机与操作系统任务混合开发、代码编辑器、调试监控。其中,基于状态机与操作系统任务的混合开发模式是 IDE 系统模型中最关键的技术,该模块承担了将用户通过状态机设计器输入的软件逻辑和底层操作系统基于任务的封装库结合、并生成用户逻辑代码的重要工作。

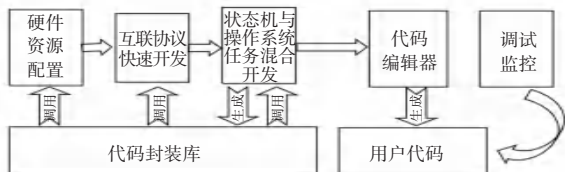


图 8 快速开发平台 IDE 系统模型图

Fig. 8 Rapid development platform IDE system model diagram

图 9 给出了状态机与操作系统任务混合开发模式的技术模型分析。

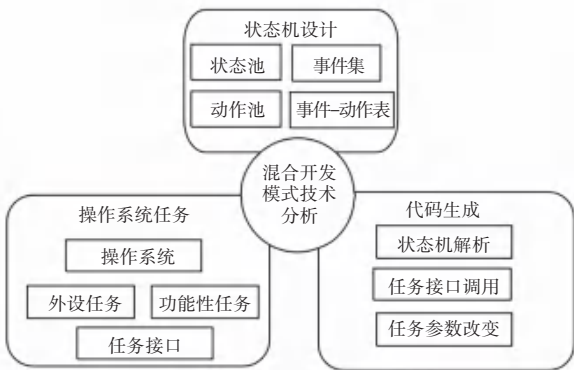


图 9 基于状态机与操作系统的混合开发模式技术分析

Fig. 9 Technical analysis of hybrid development mode based on state machine and operating system

基于状态机与操作系统任务的混合开发模式技术可以分解成 3 层:状态机设计层、操作系统任务层、代码生成层。

3 测试结果展示

对代码编辑器进行测试,以一个串口收发的开发为例。通过从快速开发工具箱中拖拽想要使用的代码工具和输入自定义的参数,图 10 展示了在代码编辑器主界面中的测试结果。代码编辑器软件原型的主界面一共包括 6 个主要区域。其中,最上方的区域 1 是菜单栏;区域 2 是工具栏;左侧的区域 3 是快速开发工具箱;中间的区域 4 是代码编辑区;右侧的区域 5 是工程管理器部分;最下方的区域 6 是输出窗口。



图 10 代码编辑器主界面

Fig. 10 Main interface of the code editor

4 结束语

为解决工程机械快速开发平台高门槛长周期的问题,采用 QP 框架和 IEC 61499 协议设计了工业互联网协议快速开发平台的总体架构,就此框架下所涉及的关键技术进行了分析,并对代码编辑器进行了测试,测试结果证明能完成软件代码的生成任务。

参考文献

- [1] 孟兴, 黄磊, 梁海华, 等. 基于 CoDeSys 的通用控制器的实现 [J]. 建筑机械, 2024(4): 71-73.
- [2] 许志明, 王明昕, 卢斌. 基于 CoDeSys 的 PLC 远程组件扩展系统设计与实现 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(2): 19-20.
- [3] 左志军. 嵌入式控制系统在汽车自动化生产线的研究与应用 [J]. 自动化博览, 2023, 40(5): 68-73.
- [4] 赵鑫圉. 基于 IEC61499 的分布式智能物流仓储控制系统设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [5] 董靓. 基于 IEC61499 标准的控制系统仿真平台开发及应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [6] 许泰峰, 王彦波, 孙一鸣, 等. 基于 IEC 61499 标准的分布式配网光伏逆变器层级控制与联合仿真实现 [J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 150-157.
- [7] 王越. 基于 IEC 61499 的嵌入式软 PLC 设计与应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [8] 陈昊. 基于计算机通信技术的配电网容错控制方法研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(14): 78-80.
- [9] GARCIA C A, CASTELLANOS E X, BUELE J, et al. MPC under IEC-61499 using low-cost devices for oil pipeline system [C]// Proceedings of 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 659-664.
- [10] SOROURI M, VYATKIN V. Intelligent product and mechatronic software components enabling masscustomisation in advanced production systems [J]. Service Oriented Computing and Applications, 2018, 12: 73-86.
- [11] WAN Jiafu, TANG Shenglong, LI Di, et al. Reconfigurable smart factory for drug packing in healthcare industry 4.0 [J].

- IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 507-516.
- [12] 谭宝. 基于 IEC 61499 的分布式智能楼宇控制系统设计与开发[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [13] 赵鑫, 郭永生, 简珣, 等. 基于 IEC 61499 的工业人工智能分析与控制平台[J]. 自动化博览, 2022, 39(10): 58-63.
- [14] HARBS E H, NEGRI G, JARENTCHUK G, et al. CNC-C2 : An ISO14649 and IEC61499 Compliant Controller [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2021, 34(6): 621-640.
- [15] 李丹慧. 基于 QP 框架的两轮自平衡小车的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [16] 张长江, 陈根, 朱立国, 等. 基于层次状态机的嵌入式软件设计[J]. 中国仪器仪表, 2023(5): 37-40.
- [17] 陈思远. 基于神经动力学的冗余度机器人混合优化策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [18] 沈佳明. 基于快速原型的无人机仿真系统设计与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [19] 闫丹丹. 基于低代码的管理系统模板库的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [20] 石晓华. 嵌入式控制器软硬件快速开发平台研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.