

基于共轨单缸柴油机的数字孪生系统设计研究

王贺春*, 谷鑫, 李互财, 王银燕, 杨传雷

(哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 随着工业化和城市化进程的加快, 传统柴油逐渐向智能化发展, 柴油机数字孪生技术也随之兴起, 并逐渐成为人们研究的焦点, 但与此同时, 也有许多问题亟待解决。本文基于“物联网+工业+云平台”的模式, 依托某单缸共轨柴油机为真实物理模型, 结合数字孪生技术进行软件设计, 使用 CCP 协议获取柴油机运行数据, 通过 MQTT 协议与阿里云服务器进行数据传输, 并采用 Python 语言开发人机交互界面, 构建了远程监测柴油机运行情况的数字孪生模型。研究结果为柴油机智能化发展提供了思路, 为数字孪生系统的研究提供了有价值的参考。

关键词: 柴油机; 数字孪生; 云平台; 远程通讯; CCP 协议; MQTT 协议

Design of Digital Twin System Based on Common Rail Single Cylinder Diesel Engine

WangHechun, GuXin, LiHucai, WangYinyan, YangChuanlei

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 15001, Heilongjiang, China)

Abstract: With the acceleration of industrialization and urbanization, the traditional diesel engine is gradually developing to intelligentize, and the Digital Twin technology of diesel engine is also rising, and has gradually become the focus of people's research, there are also many problems need to be solved. Based on the model of "Internet of Things + Industry + Cloud Platform", the software design is carried out by using a single cylinder common rail diesel engine as a real physical model and combining with digital twinning technology, the CCP protocol is used to get the running data of diesel engine, and the MQTT protocol is used to transmit the data to Ali Cloud server, and Python language is used to develop human-computer interaction interface, a Digital Twin model for remote monitoring of diesel engine is established. The research results provide a train of thought for the development of intelligent diesel engine and a valuable reference for the research of digital twin system.

Key words: Diesel Engine; Digital Twin; Cloud Platform; CCP Protocol; MQTT Protocol

柴油机作为一种重要的能量转换装置, 具有热效率高、使用寿命长以及功率范围广等特点, 广泛应用于汽车、船舶、发电机组等领域。伴随着社会发展, 尤其在环保、能源安全等领域对内燃机不断提出新的能力需求, 所需要达到的技术指标不断提升, 造成了系统复杂程度的显著提高, 内燃机内部系统多学科耦合、交联耦合也越来越复杂, 控制优化难度不断增大^[1]。经过多年的发展, 内燃机的设计开发过程也已经迈入数字化的大门, 模型仿真与分析、数字样机等数字化手段已经成为常态, 在工作状态方面的优化调整同样面向自动化、智能化靠近。纵向来看, 过往的发展为内燃机面向数字孪生化打下了坚实的基础^[2-4]。面对发展的瓶颈, 需要一种新的理念来对内燃机进行全新的突破升级。数字孪生技术作为一种新的技术理念与应用^[5], 必将助力内燃机实现新的发展里程。

数字孪生的出现不是偶然现象。随着物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术的发展，信息交互处理手段不断增强，社会发展进入信息化阶段。新的经济结构重塑产业结构，数据不再是产品生产的副产物，而是转变为新的生产资料^[6-7]。内燃机数字孪生作为一项专用型综合技术，强调利用“虚实交互”来服务物理实体，包含两个空间，即物理空间和虚拟空间。物理空间是物理实体的柴油机在运行工况下工作，可以通过传感器等手段测量状态参数及其变化过程、监测性能状态、功能状态以及结构强度相关的特性（振动，变形，疲劳度）是否维持健康状态；在虚拟空间中，建立相应的镜像模型，通过仿真、算法等手段展开模拟分析，将得到的结果与物理空间中的数据进行动态交互以支持决策。两个空间中存在高度的联系实时性、交互性与一致性。

数字孪生存在三个典型特征：数据是基础，模型是核心，软件是载体。数据是对整体的运行基础，是构建数字孪生体的基石；模型是核心，根据功能需求可以构建出几何模型、燃烧化学模型、液固换热模型、故障诊断模型等，用于对内燃机开展模拟分析；软件是载体，保证数字孪生的各项预测和分析能够高效完成，并准确呈现分析结果，这需要软件集成平台的支持^[8-10]。内燃机数字孪生技术强调利用两空间的动态交互和以模型为基础的仿真分析来服务于物理实体，从实现功能维度上可以划分为四个阶段：镜像、诊断、预测、决策。镜像是对内燃机的状态进行准确的描述，是将内燃机投影到虚拟空间，进行精确的功能分割，建立不同的功能模型，进而实现总体的精准把握；诊断是对内燃机在异常状态时能够快速且精准的找到故障原因以及故障部件；预测是对内燃机未来运行状态的把握，尤其是对故障状态进行预警，这需要大量的故障诊断数据支持；决策是最高功能等级，是在前面功能基础上实现对内燃机的高度闭环控制，实现了内燃机与其数字孪生体之间的“共生”。

1 数字孪生模型构建方案

本文设计数字孪生系统以某单缸共轨柴油机为依托，综合参考船舶柴油机特点以设计总体架构。船舶柴油机作为船舶动力系统的重要组成部分，是影响船舶整体状态的一个重要因素，及时的发现船舶动力机组的健康状态对于船舶的经济性和安全性是一个重要保障，尤其对于智能无人类型船舶在离岸环境下面对未知性因素所引起的动力系统故障，及时的健康状态检测能够挽回重大损失。从架构功能上分析，这要实现状态监测功能。对于一些特殊场景下的状态检测，除了机控室监测外，一些场景下需要将数据远程传输到其他场所作为远程监测或数据安全备份，这就涉及到数据远距离传输的应用。所设计系统重点在于实时获取柴油机运行工况数据，然后经由远程传输至服务端孪生模型中，进行远程监测、在线模型分析、

可视化及数据管理等功能的实现。根据设计需求以及相关文献，提出“物联网+工业+云平台”模式的柴油机数字孪生总体架构模型，如图 1 所示。

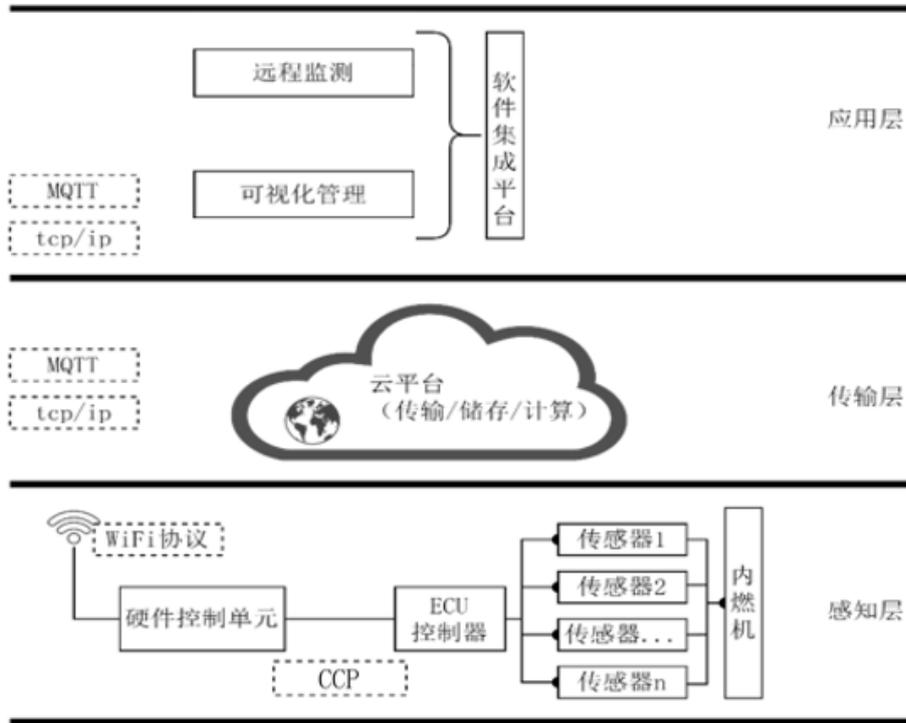


图 1 内燃机数字孪生系统架构

系统总体架构分为三层，即感知层、传输层与应用层。感知层是系统中的底层层次，其主要任务是通过传感器采集现实世界中的数据，并转换为计算机能够处理的信号。本文中单缸共轨柴油机为真实物理模型，通过各种传感器采集数据，并通过电子控制单元（ECU）收集处理数据。ECU 即为感知层获取数据的接口数据，数据传输的方式为 CCP 协议，一种基于 CAN 总线的标定协议。

传输层是介于感知层和应用层之间的层次，其主要任务是将感知层采集到的数据进行传输和处理后，传递给应用层。传输层需要具备高效、可靠的数据传输，数据格式转换及编解码等功能。本文中传输层依托阿里云服务器部署的数据传输系统，数据传输采用基于 TCP 协议的 MQTT 协议方式实现系统的软连接。

应用层是系统中最高的层次，其主要任务是利用传输层提供的数据支持，为用户提供应用服务，如数据可视化、分析、处理等。本文中应用层为采用 Python 语言开发的软件应用平台。

2 数据传输功能设计

2.1 感知层设计

CAN 总线技术是一种采用串行通信方式进行数据传输的实时通讯协议，其最高传输速率可以达到 1Mbps 或更高，具有可靠性强、通信稳定和抗干扰性强的特点，可以支持实时控制数据的传输^[11-12]。

CAN 协议报文格式分为标准帧和扩展帧。标准帧的标识符长度为 11 位，扩展帧的标识符长度为 29 位，见图 2。在原始数据段前面加上帧起始场、仲裁场和控制场，在数据尾端加上 CRC 校验场、应答场以及帧结束标签，将这些内容按照特定格式组合就成为一个完整的 CAN 报文，根据用途 CAN 报文的类型，又可分为 5 类，如表 1 所示。

表 1 CAN 报文类型

帧类型	用途
数据帧	节点向外传输数据
遥控帧	向节点请求数据
过载帧	向节点通知尚未做好接收准备
错误帧	向节点通知校验错误，请求重新发送上一个数据
帧间隔	用于将数据帧及遥控帧与前面的帧分隔开

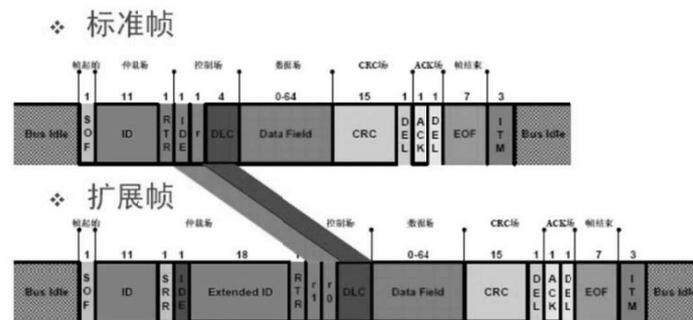


图 2 标准帧和数据帧

感知层数据接口采用标准帧数据格式。发送的标准数据帧结构如表 2 所示。标准标识符，数据范围在 0 到 0x7FF 之间，由于采用标准数据帧，Extended Id 段、IDE 段、RTR 段设置为 0。DLC 段由传输数据的长度决定，按照 CAN 协议标准，字节流最大传输长度不超过 8，要发送的数据以数组形式确定，发送内容要符合 CCP 协议命令。

表 2 CAN 发送报文结构

标识符(u32)	Extended Id(u32)	IDE(u8)	RTR(u8)	DLC(u8)	DATA[8](u8)
0x02	0x00	0x00000000	0x00000000	len	msg

CCP 协议由于基于 CAN 协议基础上开发，在标定通讯时采用 CAN 传输进行命令应答和功能实现^[13]。CCP 协议使用 CAN 的数据帧来传输命令，CCP 协议的实现则依赖于命令接收对象(CRO)和数据传输对象 (DTO)两种报文，报文均为 8 字节，包括命令、数据、数据长度、地址等信息^[14]。感知层数据接口中所涉及到的 CCP 命令，如表 3 所示。

表 2 常用的 CCP 命令

报文命令名称	报文功能	报文代码
CONNECT	连接	0x01
SET_MTA	设置内存传输地址	0x02
DNLOAD	数据下载	0x03
UPLOAD	数据上传	0x04
DISCONNECT	断开连接	0x07
UNLOCK	解锁保护	0x13
GET_SEED	秘钥获取	0x12

首先要与 ECU 建立连接，才能获得 ECU 的数据，而通讯报文要同样需要符合 CCP 协议规范和 CAN 协议报文要求。初始过程根据 CCP 命令完成 CONNECT、GEET_SEED、UNLOCK、GEET_SEED、UNLOCK 等命令指令发送，将指令行存储于 DATA[8]发送至 ECU，完成秘钥获取和秘钥解锁。解锁完成后的 ECU 根据所需参数的对应的地址，发送 CCP 命令 SET_MTA、UPLOAD、DNLOAD 获取关键数据。CCP 命令仍对应储存于 DATA[8]数组中，地址遵循小端序列规则，使用串口通讯助手监测 CCP 报文状态，如图 3 所示。然后通过 WiFi 无线传输技术，借助路由器实现与网络的连接。



图 3 CAN 通信接收调试界面

的部署区域和架构模式。通过平台的专属云服务器，在服务器上布置 Ubuntu18 操作系统，然后进行云服务器的安全组设置，主要包括设置安全连接类型和安全端口等。

表 3MQTT 报文类型

名称	值	描述
CONNECT	1	客户端请求连接服务端
CONNACK	2	连接报文确认
PUBLISH	3	发布消息
PUBACK	4	QoS 1 发布消息确认收到
PUBREC	5	发布收到
PUBREL	6	发布释放
PUBCOMP	7	QoS 2 消息发布完成
SUBSCRIBE	8	客户端订阅请求
SUBACK	9	订阅请求报文确认
UNSUBSCRIBE	10	客户端取消订阅请求
UNSUBACK	11	取消订阅报文确认
PINGREQ	12	心跳请求
PINGRESP	13	心跳响应
DISCONNECT	14	客户端断开连接

选择开源产品 EMQ X 作为 MQTT 消息代理器。EMQ X 是基于 Erlang/OTP 平台开发的开源物联网 MQTT 消息服务器，支持分布式节点集群的快速低延时的 1000 万规模消息路由，支持定制安全认证，支持后端数据库系统，支持完整物联网协议支持等。在云端部署 EMQ X 选择 FinalShell 软件。该软件是一体化的服务器和网络管理软件，具备强大的功能支持，可以根据 EMQ X 的 Linux 指令，在软件上远程控制安装云服务器上的软件。

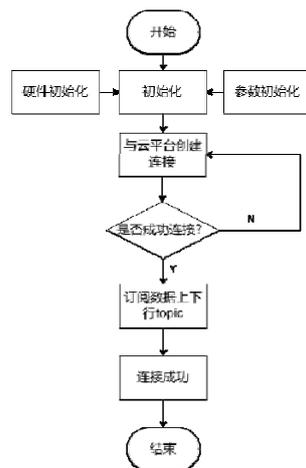


图 6 云服务器连接流程图

云端代理部署完成后，使用 MQTT 协议，为硬件控制单元和云平台建立连接。在硬

件系统进行初始化功能后，初始化数据在云平台上下行的 topic、传输数据的发送间隔变量、指向云平台返回数据的指针、上传数据的数组和连接路由器的用户名和密码等参数变量，然后不断通过云平台连接函数与平台尝试连接，并判断是否稳定连接，连接成功后订阅数据传输 topic，由此建立一条可以稳定传输数据的通道，逻辑框图如图 6 所示。选用 Mqtt.fx 客户端软件，监测 MQTT 消息传输发布和订阅的状态通讯状态如图 7 所示。

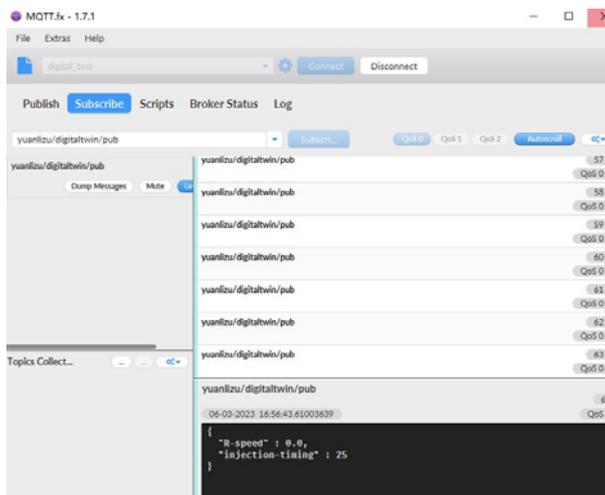


图 7 MQTT 通信接收调试界面

3 应用平台设计

3.1 应用层设计

Python 语言是近年来发展最快的解释型语言之一，语言简洁明了，代码可读性强，适合快速开发原型和实现复杂的应用编程，支持面向对象编程和过程式等多种编程范式。应用层使用基于 Python 语言的 Qt 程序开发，所使用的 PyQt 开发库是 Python 语言和 Qt 库成功融合的典范。

软件应用平台以数据传输事件驱动各个功能模块，包括数据信息模块、动画模拟显示模块、实时曲线监测模块、按钮事件功能模块等，如图 8 所示。其中数据信息包括动态数据监测模块、静态信息显示模块和分析数据显示模块。

利用 Python 语言的 paho.mqtt.client 功能库搭建数据传输驱动模块，实现通过 MQTT 协议从云平台获取实时数据，并驱动其他功能模块的应用。使用 PyQt 开发库中的 Qt 组件搭建动态数据监测模块、静态信息显示模块、动画模拟现实模块、曲线实时监控模块和按钮事件模块。动态数据监测模块用于反应监测状态的变化，监测的状态量通过对应的 LCD 显示，通过交互页面解释 LCD 的显示内容。动态数据监测模块监测内容是动态数据变化，通过添加定时器、设置刷新频率，实现实时数据的动态显示。静态信息显示模块用于数字孪生

体静态信息说明。静态信息显示模块没有动态更新的需求，所以不必添加定时器以动态执行事件。实时曲线监测模块以动态曲线的形式监测对应的状态变量。曲线监测模块需要定义 Y 轴的范围，并将实时时刻显示为 X 轴，同时需要添加定时器、设置刷新频率，实现曲线动态显示的效果。动画模拟显示模块用于丰富人机交互界面内容，提高视觉效果展示，该模块由仪表动画模拟和图像动画模拟两部分。仪表动画模拟需要在私有属性中定义仪表盘的大小，主刻度数、小刻度数、数据范围、数据比例等参数，同时还需添加定时器、设置刷新频率，实现动态显示的效果。图像动画模拟动画的本源理论是帧动画的控制播放，一系列的帧动画根据不同的频率设置不同的播放速度显示出快慢变化。按钮事件功能模块主要用于事件触发，主要执行外部触发的事件。

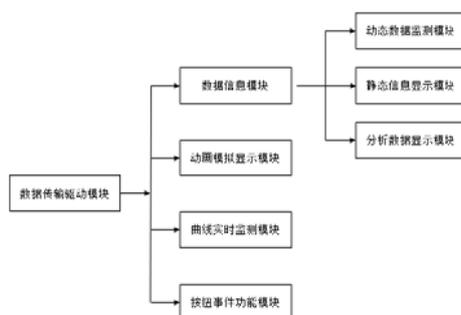


图 8 软件功能结构图

在实验室条件下，将各个功能模块进行整合，完成用户界面的搭建，如图 9 所示。

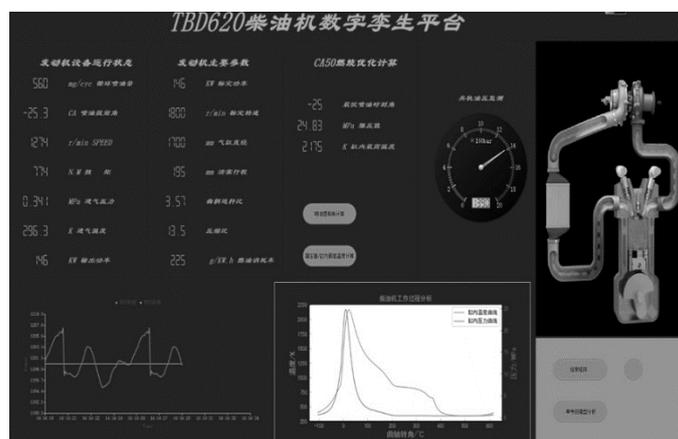


图 9 软件界面窗口

3.2 数字孪生平台功能验证

选择在小型电机控制台架，通过不同的 PWM 波改变电机的转速，来模拟柴油机不同工况下的转速变动，由此验证图形用户界面功能能否满足需求。

将电机转速接收后完成解析，数据连接到动态数据曲线的 API，可以看到对应的电机转速变化，通过电机硬件控制单元进行电机急停后启动、电机保持稳定速度运转、间隔增加电

机转速等操作，可以看到电机转速在实时曲线监测模块产生的对应实时曲线，横坐标为时间刻度，单位为秒，纵坐标刻度为转速，范围为 500r/min 到 1500r/min，曲线完整的反应了电机转速的变化，结果如图 10 所示。

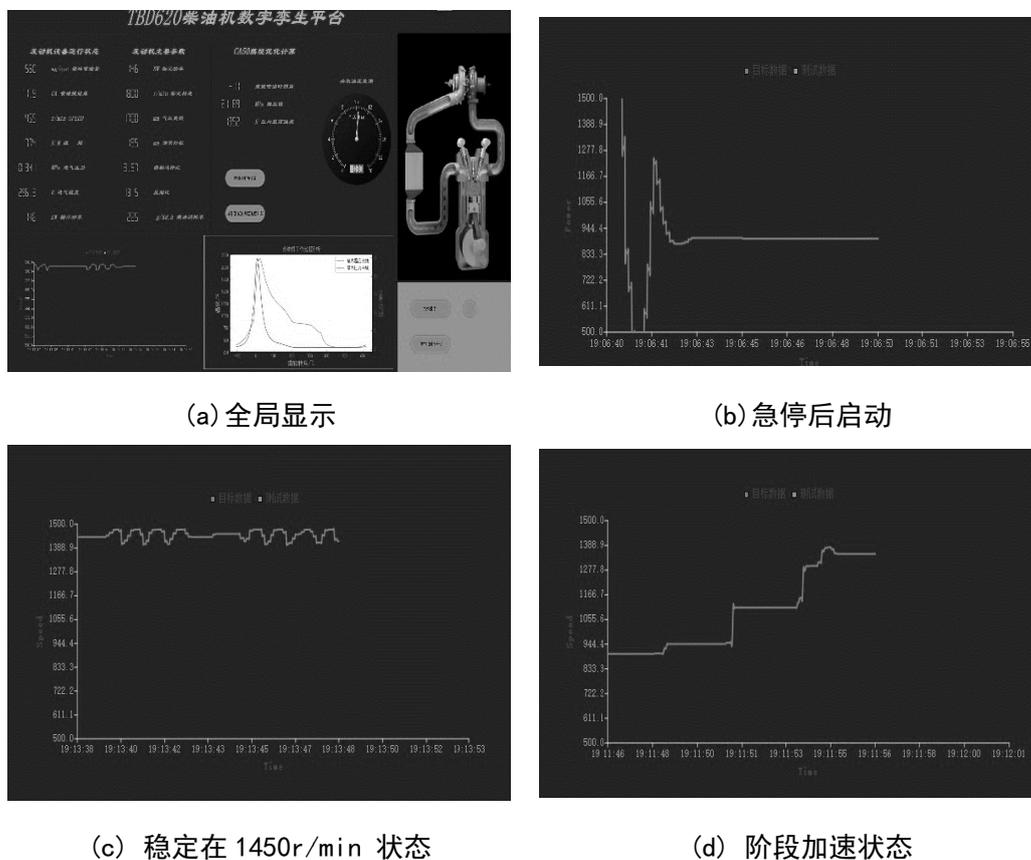


图 10 电机各种状态下的转速监测

经过测试，软件平台稳定运行，系统数据传输功能按照预定设计实现了数据的正确流向，软件平台的数据接收和解析功能正常，数据显示模块正常工作，系统各个模块间能够实现预定的各项目标功能。

4 结论

为解决传统远程监测系统中实时性较差的问题，本文结合数字孪生技术，基于“物联网+”模式提出了的柴油机远程监测方法，。用户通过网络终端接入便可以实时访问到硬件终端上传到云平台的柴油机运行状况数据，可以远距离对柴油机进行运行状态监测和运行数据管理，为柴油机数字孪生体系统的深入研究打下良好的基础。

参考文献

- [1] Di LIU, Hong CHEN, Jinwu GAO. Predictive coordinated control of fuel consumption and emissions for diesel engine vehicles under intelligent network environments[J]. Science China(Information Sciences), 2021, No.64:255-257..

- [2] 刘劲松.高档数控机床数字孪生关键技术研究与应用[D].中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所),2022.
- [3] WENWEN WANG, JUN WANG, JINPENG TIAN, et al. Application of Digital Twin in Smart Battery Management Systems[J]. 中国机械工程学报,2021,34(4):1-19..
- [4] 周宏根,魏凯,窦振寰等.基于数字孪生的船用柴油机整机性能评估方法[J].船舶工程,2022,44(05):82-89.
- [5] Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison[J]. 工程 (英文) ,2019,5(4):653-661..
- [6] 李洪阳,魏慕恒,黄洁等.信息物理系统技术综述[J].自动化学报,2019,45(01):37-50.
- [7] ZHENG L H, SUN Y C, ZHANG H H, et al. Modeling and analysis of production logistics spatio-temporal graph network driven by digital twin[J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2022, 39(5): 461-474.
- [8] HAN YIFAN, FENG TAO, LIU XIAOKAI, et al. Edge-cloud collaborative intelligent production scheduling based on digital twin[J]. 中国邮电高校学报 (英文版) ,2022,29(2):108-120.
- [9] 沈沉,曹仟妮,贾孟硕等.电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J].中国电机工程学报,2022,42(02):487-499.
- [10] 李鹏,习伟,蔡田田等.数字电网的理念、架构与关键技术[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5002-5017.
- [11] 王立国,李国清,宋吉江.CAN总线技术在模拟器信号采集中的应用[J].系统仿真学报,2006(S2):808-810+813.
- [12] 任勇毛,唐海娜,李俊等.高速长距离网络传输协议[J].软件学报,2010,21(07):1576-1588.
- [13] 郑太雄,郭文浩,岑明,等.基于CCP协议的ABS标定系统[J].汽车技术,2009(2):42-45.
- [14] 汪春华,刘洪飞,白稳峰,等.基于CCP协议的纯电动车整车控制器标定研究[J].汽车工程,2020,42(3):286-291.
- [15] 孔垂跃,陈羽,赵乾名.基于MQTT协议的配电物联网云边通信映射研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(08):168-176.