

系统仿真学报
Journal of System Simulation
ISSN 1004-731X, CN 11-3092/V

《系统仿真学报》网络首发论文

题目：复杂控制系统快速控制原型与硬件在环技术综述
作者：周萌，董哲，王昶
DOI：10.16182/j.issn1004731x.joss.26-0600
收稿日期：2026-06-15
网络首发日期：2026-09-16
引用格式：周萌，董哲，王昶. 复杂控制系统快速控制原型与硬件在环技术综述[J/OL]. 系统仿真学报. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.26-0600>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

复杂控制系统快速控制原型与硬件在环技术综述

周萌¹, 董哲¹, 王昶²

(1. 北方工业大学电气与控制工程学院, 北京 100144; 2. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

摘要：快速控制原型（Rapid Control Prototyping, RCP）与硬件在环（Hardware-in-the-Loop, HIL）连接控制算法设计、实时仿真、自动代码生成与工程验证，是复杂控制系统开展半实物仿真、危险工况复现和可信测试的重要手段。首先阐述 RCP/HIL 在 V 型开发流程和 XiL 分层验证体系中的技术定位；其次，综述模型驱动开发、自动代码生成、实时仿真、虚实交互、在线监测标定及测试评价等关键技术；再次，比较典型领域的验证对象、实时性要求与应用差异；最后，讨论高可信实时建模、系统稳定性、测试覆盖和数字孪生融合等发展趋势，为复杂控制系统的分层验证、高可信开发和工程化部署提供参考。

关键词：快速控制原型；硬件在环；模型驱动开发；实时仿真；半实物仿真

中图分类号：TP391.9 文献标志码：A

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss. 26-0600

A Review of Rapid Control Prototyping and Hardware-in-the-Loop Technologies for Complex Control Systems

Meng Zhou¹, Zhe Dong¹, Chang Wang²

(1. School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing, 100144, China; 2. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

Abstract: Rapid control prototyping (RCP) and hardware-in-the-loop (HIL) integrate control algorithm design, real-time modeling and simulation, automatic code generation, and engineering verification and validation. They are important approaches in HIL simulation, safe and repeatable testing of hazardous operating conditions, and high-assurance verification of complex control systems. First, the roles of RCP/HIL within the V-model development and the hierarchical X-in-the-loop (XiL) verification framework are clarified. Then, key technologies are examined and compared, including model-based development, automatic code generation, real-time simulation, hardware interfacing and real-time communication, online monitoring and parameter calibration, and testing, fault injection and coverage assessment. Furthermore, the verification objects, real-time constraints, and domain-specific requirements of RCP/HIL technologies are compared across representative engineering applications. Finally, future directions are discussed, with emphasis on real-time model fidelity and computational efficiency, numerical stability, closed-loop interface stability, test coverage, and digital twin integration. This review provides methodological and technical guidance for hierarchical verification, high-assurance development,

收稿日期：2026-06-15 修回日期：2026-07-17

基金项目：北方工业大学毓秀创新项目资助(2024NCUTYXCX107)

第一作者：周萌(1988-), 女, 教授, 博士, 研究方向为复杂系统故障诊断、控制与优化。

通讯作者：董哲(1981-), 男, 教授, 博士, 研究方向为网络化控制、嵌入式系统与物联网控制。

and practical deployment of complex control systems.

Keywords: rapid control prototyping; hardware-in-the-loop; model-based development; real-time simulation; semi-physical simulation

0 引言

复杂控制系统已由传统单一机电设备扩展至智能汽车、无人系统、新能源装备、工业机器人、智能电网和复杂工业过程等形态。与此相对应, 控制系统开发呈现出软件规模扩大、硬件平台异构、实时约束增强、功能安全要求提高以及运行场景复杂多变等特征。控制算法需要处理的对象也由低维、线性、慢时变系统逐渐转向非线性强耦合、多源扰动、网络化交互和多约束并存的复杂动态系统。在这类系统中, 控制性能不仅取决于算法本身, 还受到传感器噪声、执行器约束、通信延迟、任务调度、故障扰动和安全边界等因素的共同影响。传统“离线仿真—手工编码—实物调试”的开发方式难以充分支撑复杂控制系统的快速迭代与安全验证, 常见问题包括: 模型与代码不一致、调试周期长、危险工况难以复现、测试覆盖不足以及实物试验成本和风险较高等^[1-2]。因此, 亟需构建能够贯穿建模、代码生成、实时仿真和半实物仿真全过程的新型开发与测试体系。

为克服传统串行开发模式的局限, 现代控制系统研发通常采用模型驱动开发与逐级验证相结合的 V 型开发流程。该流程强调需求、模型、代码、硬件和测试之间的对应关系, 使控制算法能够在不同真实度层级下递进式验证^[3]。其中, RCP 与 HIL 位于模型仿真与实物试验之间, 是连接控制算法设计、实时部署和系统级验证的关键环节^[1,4-7], 不仅能够提高复杂控制系统开发效率, 还能够降低实物测试风险、增强验证覆盖度和提升工程可信性, 成为复杂控制系统研发和验证中的重要支撑技术^[9]。

从系统仿真角度看, RCP/HIL 的核心并非单纯将控制器接入仿真平台, 而是在固定采样周期约束下构建可信的实时闭环仿真系统。其关键问题包括: 实时模型能否准确表征被控对象的主要动态特

性, 仿真步长是否满足对象快慢动态和控制周期要求, 数值求解过程是否稳定, 虚拟模型与真实硬件之间的 I/O 交互是否具有足够的时序一致性, 故障注入和测试场景是否具有充分覆盖度, 以及仿真结果能否为工程验证和安全评估提供可信依据。因此, RCP/HIL 既是控制系统开发工具, 也是复杂系统半实物仿真、虚实交互验证和仿真可信评价的重要研究对象。

为系统梳理 RCP/HIL 在复杂系统开发与验证中的作用, 本文按照“技术内涵—关键技术—应用差异—挑战趋势”的逻辑展开。首先, 明确 RCP/HIL 在 V 型开发流程和 XiL 分层验证体系中的技术定位; 其次, 归纳模型驱动开发、自动代码生成、实时仿真、硬件接口、在线监测标定和故障注入等关键技术, 并分析其适用条件和主要瓶颈; 再次, 比较 RCP/HIL 在汽车电子、电力电子、新能源装备、航空航天、机器人和工业过程控制等领域中的验证对象、技术需求和应用差异; 最后, 从模型可信度、实时计算、虚实接口、测试覆盖、功能安全、数字孪生融合和开放标准化平台等方面总结发展趋势。

1. RCP/HIL 相关研究的文献检索

本文以 Web of Science、IEEE Xplore、ScienceDirect、CNKI 和万方为主要文献检索来源, 检索时间范围为 2003 年至 2026 年, 检索字段主要包括题名、摘要和关键词。针对不同数据库的语言及收录特点, 英文数据库采用 Rapid Control Prototyping、Hardware in the Loop、Software in the Loop、Power Hardware in the Loop、Real Time Simulation 和 Automatic Code Generation 等检索词, 中文数据库采用快速控制原型、硬件在环、控制器硬件在环、功率硬件在环、软件在环、实时仿真、半实物仿真和自动代码生成等检索词。各组同类术

语采用“OR”连接,并根据数据库的检索规则调整字段和表达形式。

设置文献纳入标准为:1) 研究内容与 RCP、HIL、CHIL、PHIL、XiL、实时仿真、自动代码生成或半实物仿真直接相关;2) 面向复杂控制系统、嵌入式控制、电力电子、新能源、智能汽车、机器人、航空航天或工业过程等应用场景;3) 能够提供理论方法、平台架构、关键技术、工程案例或综述性分析。文献排除标准为:1) 仅提及相关术语但与 RCP/HIL 技术无实质关联的文献;2) 重复发表、会议摘要、新闻报道、产品宣传资料和无法获取完整信息的资料;3) 与控制系统实时仿真和半实物仿真关系较弱的文献。

接下来,分别对各数据库的检索结果进行重复项识别和数据清洗,共获得 83205 条有效记录,其中 CNKI 为 22756 条,占 27.35%; ScienceDirect 为 20382 条,占 24.50%; IEEE Xplore 为 18480 条,占 22.21%; Web of Science 为 14027 条,占 16.86%; 万方为 7560 条,占 9.09%。按各数据库原始文献类型标签统一归类,期刊论文 45901 条,占 55.17%; 会议论文 20707 条,占 24.89%; 学位论文 11920 条,占 14.33%; 专利 2487 条,占 2.99%; 其他类型 2190 条,占 2.63%。

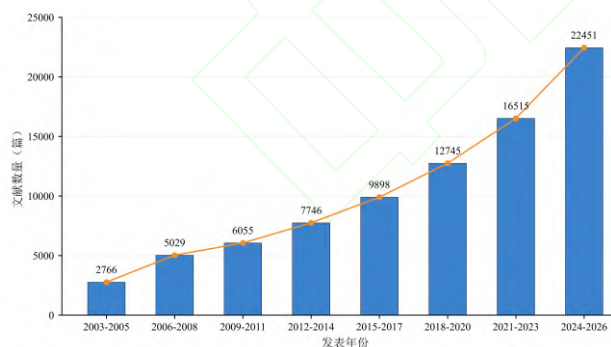


图 1 RCP/HIL 相关文献年度发表数量分布

Fig. 1 Temporal distribution of publications on RCP/HIL technologies

图 1 基于上述 83205 条有效记录统计年度发表数量,横轴为发表年份,纵轴为相应年份的文献数量。结果表明,RCP/HIL 相关研究总体呈增长趋势,反映出该技术在复杂控制系统实时仿真、模型驱动

开发和工程验证中的研究关注度不断提高。需要说明的是,2026 年数据仅统计至检索截止日期,不代表完整年度的发表数量。

为分析 RCP/HIL 研究的主题分布,本文从 83205 条有效记录中采用不放回简单随机抽样方法抽取 5000 条记录,并使用 ITGInsight 对关键词进行提取、清洗和规范化处理。在合并缩写与全称、统一单复数和术语表达后,选取词频排名前 21 位的关键词构建共现网络,并采用 K-means 算法进行聚类。图 2 中,节点大小表示关键词出现频次,连线表示关键词在同一文献中的共同出现关系,连线粗细反映共现强度。聚类结果包括“模型构建与实时计算”、“在环平台与虚实交互”、“测试验证与稳定性分析”三个主题,分别以蓝色、红色和青绿色表示。

如图 2 所示,Real-Time Systems 具有较高的出现频次和连接度,并与 Computational Modeling、Mathematical Model、Simulation、FPGA 及 Hardware-in-the-Loop Simulation 等关键词形成较强的共现关系,说明实时建模、仿真计算和硬件实现是该领域相互关联的研究内容。不同聚类之间存在多条跨类连接,其中,在环平台与功率设备的闭环集成以实时模型和计算部署为基础,相关测试结果又需要通过精度与稳定性分析加以评价。由此可见,RCP/HIL 研究已形成涵盖模型构建、实时部署、虚实交互和测试评价的技术脉络。

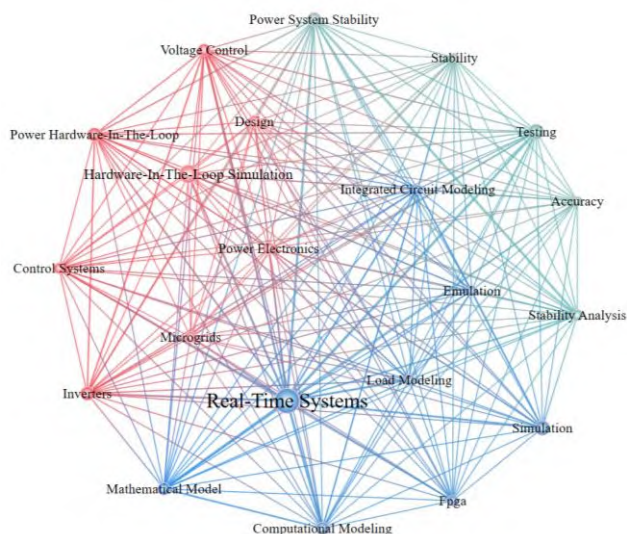


图2 RCP/HIL 相关研究关键词共现网络

Fig. 2 Keyword co-occurrence network of RCP/HIL research

2. RCP/HIL 技术内涵与典型平台

2.1 V 型开发流程与 RCP/HIL 的基本概念

从总体趋势看, RCP/HIL 技术的演进经历了从“实物试验与手工调试”到“模型驱动开发与在环验证”,再到“实时仿真、功率硬件交互和数字孪生融合”的过程。如图3所示,早期控制系统开发主要依赖数学建模、经验整定、手工编程和实物试验,控制算法与目标硬件平台紧密耦合,系统修改、重复测试和极端工况验证成本较高。随着数字控制器、实时计算平台、图形化建模工具和自动代码生成技术的发展,控制系统开发逐渐形成以模型为中心、以闭环验证为支撑的工程流程。

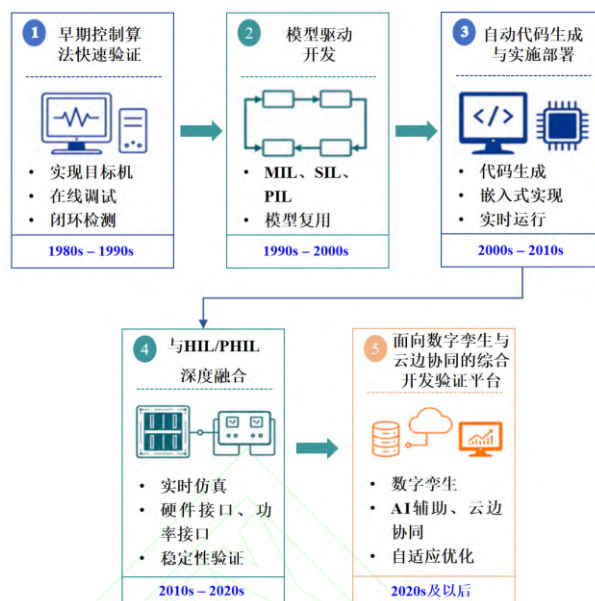


图3 快速控制原型技术演进

Fig. 3 Evolution of RCP/HIL technologies

上述技术演进表明, RCP/HIL 并非孤立的仿真测试工具,而是复杂控制系统向模型驱动、分层验证转型的产物。随着系统复杂度提升,后期实物试验已难以兼顾效率、安全性与可靠性。为此, V 型开发流程将需求、模型、代码、硬件及系统功能与各层级验证活动对应,成为复杂控制系统开发的重要框架。

如图4所示,该流程使控制系统能够沿着模型、代码、处理器、原型控制器、真实控制器和功率硬件逐级验证,避免由离线仿真直接进入高风险实物试验。这一递进式验证体系通常被概括为 XiL (X-in-the-Loop) 方法。其中,“X”表示被置于闭环测试系统中的验证对象,可以是控制算法模型、自动生成代码、目标处理器、控制器硬件,也可以是功率变换器、电机、负载、电网接口等真实功率设备。

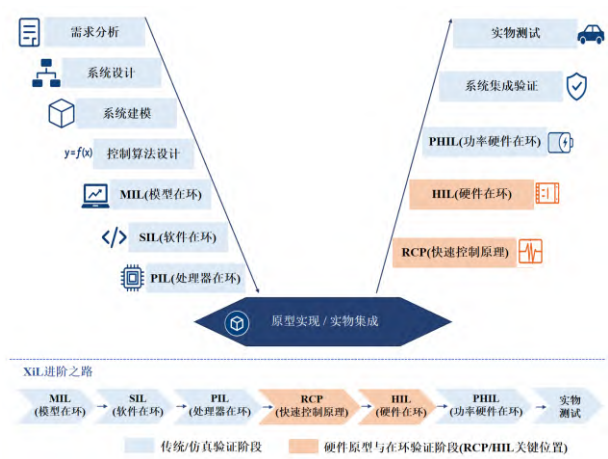


图 4 复杂控制系统 V 型开发流程

Fig. 4 V-model development and verification process of complex control systems

根据闭环测试对象不同, XiL 可细分为模型在环 (Model-in-the-Loop, MIL)、软件在环 (Software-in-the-Loop, SIL)、处理器在环 (Processor-in-the-Loop, PIL)、快速控制原型 (Rapid Control Prototyping, RCP)、硬件在环 (Hardware-in-the-Loop, HIL)、控制器硬件在环 (Controller Hardware-in-the-Loop, CHIL)和功率硬件在环 (Power Hardware-in-the-Loop, PHIL)等形式。MIL、SIL、PIL、RCP、HIL 和 PHIL 共同构成了从纯模型仿真到实物试验之间的分层验证链条, 表 1 从真实部分、虚拟部分和主要目的三个方面对其进行对比。

表 1 XiL 分层验证方法及其功能定位
Table 1 Functional roles of hierarchical X-in-the-Loop verification approaches

方法	真实部分	虚拟部分	主要目的
MIL	无真实硬件	控制器模型与对象模型	算法逻辑和性能初步验证
SIL	控制软件代码	对象模型与仿真环境	代码逻辑与模型行为一致性验证
PIL	目标处理器 /MCU/DSP	对象模型	处理器执行时间、资源占用和定点误差验证
RCP	原型控制器、真实或半真实对象	可执行控制模型	快速验证和标定控制算法

广义 HIL	真实硬件组件	实时对象模型、接口模型和环境模型	硬件在环验证体系的广义概念
	真实 ECU/PLC/DSP /FPGA 控制器	实时对象模型和传感器/执行器模型	控制器功能、接口和故障响应验证
CHIL	真实功率设备和功率放大器	实时电网、负载或系统模型	功率级动态交互、保护和稳定性验证
PHIL			

基于表 1, 本文对 XiL 中 RCP、HIL、CHIL 和 PHIL 的内涵作如下界定: RCP 侧重于将控制算法或自动生成代码部署于实时目标机, 与实际对象或实时模型构成闭环, 重点验证算法的实时性能与工程实现可行性。HIL 则将真实硬件接入实时仿真环境, 根据被测对象可分为 CHIL 和 PHIL, 其中 CHIL 面向真实控制器, 主要验证其功能、接口、通信时序及故障响应; PHIL 面向真实功率设备, 涉及能量交互, 重点考察接口稳定性、延迟影响与安全保护。

2.2 RCP/HIL 工具链构成与选型原则

RCP/HIL 工具链通常由实时计算、I/O 接口、模型与代码开发、测试管理及数据采集标定等模块组成, 其选型应与验证对象和任务相匹配。RCP 侧重模型修改、快速部署和在线标定; CHIL 侧重控制器接口、通信时序和故障响应; PHIL 涉及功率交互, 应重点关注接口带宽、闭环延迟、阻抗特性、稳定性与安全保护。此外, 工具链选型时还需结合模型规模、求解器、I/O 与任务调度评估实时性能, 并考察开发环境兼容性及模型、代码和测试脚本的可复用性, 具体技术问题将在第 2 节进一步讨论。

基于上述考虑, 表 2 从功能定位、实时性实现条件、I/O 与通信接口、实时计算架构、测试管理功能和工程适用范围等方面, 对代表性 RCP/HIL 工具链进行归纳。表中平台用于说明不同类型工具链的功能侧重, 不作为商业产品的性能排序。具体选型仍应在统一模型、相同接口规模和一致测试条件下开展基准试验, 判断工具链能否满足实时运

行、接口一致性、故障复现和结果追溯等要求。

表 2 代表性 RCP/HIL 工具链的功能定位与适用范围
Table 2 Functional positioning and application scope of representative RCP/HIL toolchains

平台/ 工具 链	主要定位	典型实时性需求与 实现条件	典型 I/O 接 口	通信协议	实时计算与 FPGA 扩展方 式	测试与数据 管理功能	主要适用场 景
dSPA CE SCAL EXIO	HIL、 CHIL 及 ECU 系统 级测试	毫秒级及部分更小 步长的实时测试需 求；实际执行能力 取决于模型规模、 处理单元和 I/O 配 置	AIO、DIO、 PWM、编码 器及传感器 与执行器仿 真接口	CAN、LIN、 FlexRay、 Automotive Ethernet、 EtherCAT 等	可配置专用 I/O 与实时处 理模块，FPGA 功能由具体模 块确定	支持测试配 置、故障注 入、数据记 录和自动化 测试	汽车电子、 动力系统、 智能驾驶及 复杂 ECU 测试
dSPA CE Micro LabBo x II	RCP 及实 验室小型 HIL 验证	适用于毫秒级及亚 毫秒级控制任务， 实际步长受到控制 模型、I/O 任务和 通信负载影响	AIO、DIO、 PWM、编码 器和 CAN 接口等	CAN、LIN 及 部分以太网 通信，取决于 接口配置	以实时控制和 I/O 扩展为主， FPGA 功能取 决于具体硬件 配置	支持模型部 署、在线调 试、参数标 定和数据记 录	控制算法验 证、机电系 统、电机控 制、实验教 学及小型原 型开发
Speed goat/S imulin k Real-T ime	模型驱动 的 RCP、 HIL 与实 时目标机 部署	可根据对象动态和 控制周期配置实时 任务；高速 I/O 和 小步长任务需结合 相应硬件模块	AIO、DIO、 PWM、编码 器、高速数 据采集及定 制 I/O	CAN、 EtherCAT、 Ethernet 及串 行通信等，取 决于 I/O 模块	可配置 FPGA I/O 模块，并 结合 HDL 工 作流实现高速 接口和并行任 务	支持 Simulink 模 型部署、在 线监测、参 数调节、数 据记录和测 试脚本	控制算法、 机器人、电 机驱动、信 号处理及科 研实验
OPAL -RT	电力系 统、电力 电子 CHIL 及 PHIL 实 时仿真	实时步长由模型类 型、系统规模、求 解方式和软硬件分 区共同决定；电力 电子模型通常需要 更小步长	AIO、DIO、 PWM、保护 装置接口及 功率接口	EtherCAT、 IEC 61850、 DNP3、CAN 等，取决于平 台配置	可根据平台配 置采用 CPU、 FPGA 及 CPU - FPGA 异构 计算方式	支持实时仿 真、数据记 录、故障注 入和测试流 程配置	电力系统、 电力电子、 微电网、新 能源并网及 电动汽车
Typho on HIL	电力电子 控制器与 数字电源 CHIL 测 试	面向具有较高实时 性要求的电力电子 控制器闭环测试， 实际运行能力取决 于开关模型、系统 规模和硬件配置	AIO、DIO、 PWM 及电 力电子控制 器接口	CAN、 Modbus、 Ethernet 等， 取决于型号 和配置	可利用专用实 时计算资源执 行电力电子模 型，具体随平 台配置变化	支持测试脚 本、故障注 入、数据记 录和报告生 成	逆变器、数 字电源、微 电网、电机 驱动、储能 及充电设备
RTDS	电力系统 实时数字 仿真、保 护装置测 试及 PHIL 验 证	实时步长由电磁暂 态模型、网络规模、 模型分区和并行计 算配置决定	AIO、DIO、 保护装置接 口及功率接 口	IEC 61850、 GOOSE、SV、 DNP3 等电力 系统通信协 议	采用专用实时 处理与并行仿 真架构，扩展 方式取决于相 应硬件模块	支持故障设 置、保护测 试、数据记 录和电力系 统试验流程	继电保护、 HVDC、 FACTS、新 能源并网及 智能电网
NI PXI/C	模块化 HIL、测试	实时性取决于控制 任务、数据采集速	AIO、DIO、 PWM、计数	CAN、LIN、 EtherCAT、	CompactRIO 及部分 PXI 模	支持测试配 置、故障注	工业控制、 航空航天、

ompac tRIO/ VeriSt and	测量、数 据采集及 嵌入式控 制	率和模块组合; 部 分高速任务可由 FPGA 承担	器、编码器、 DAQ 及高 速采集接口	Ethernet 及串 行通信等, 具 体取决于模 块配置	块可结合 LabVIEW FPGA 实现定 制化实时任务	入、数据记 录和自动化 测试	机电系统、 定制化 HIL 及测试测量
Vector CANo e/CA Nape	车载网络 仿真、 ECU 通信 测试、测 量与标定	主要面向通信时序 和 ECU 测试, 不以 复杂对象模型的最 小实时步长作为主 要评价指标	车载总线、 ECU 通信、 测量与标定 接口	CAN、LIN、 FlexRay、 Automotive Ethernet 等	主要用于网 络、诊断和标 定测试, 通常 需要与实时对 象仿真平台协 同工作	支持节点仿 真、总线测 试、诊断、 数据记录、 标定和测试 自动化	汽车电子、 车载网络、 ECU 通信、 诊断与标定

注: AIO 为模拟量输入/输出, DIO 为数字量输入/输出, PWM 为脉宽调制, CAN 为控制器局域网, LIN 为局域互联网络, ECU 为电子控制单元, FPGA 为现场可编程门阵列。表中内容依据公开文献及公开技术资料归纳, 仅用于比较不同工具链的功能定位和典型适用范围。平台实际实时性能受模型复杂度、求解器、硬件配置、I/O 规模及任务调度等因素影响, 不同工具链之间不宜依据标称参数直接比较。

3. RCP/HIL 关键技术

本节从工程实现角度梳理 RCP/HIL 的关键支撑技术。与离线仿真不同, RCP/HIL 需在固定采样周期内实现控制算法、实时模型、硬件接口与测试环境的闭环交互。本节围绕模型精度、实时计算、虚实接口、通信时序和测试评价, 将其关键技术归纳为以下六个方面。

3.1 模型驱动开发

模型驱动开发为 RCP/HIL 提供贯穿需求分析、控制算法设计、对象建模、代码生成、实时部署和测试管理的统一工程载体。与普通离线仿真不同, RCP/HIL 中的模型不仅要准确描述系统动态, 还需在 MIL、SIL、PIL、RCP 和 HIL 等验证阶段保持语义一致, 并满足固定步长计算和虚实接口交互要求。因此, 其作用可从系统描述、异构建模和控制实现三个层次进行分析。

系统描述一般关注需求、模型、代码和验证活动之间的一致性, 将物理过程、计算任务和通信行为纳入统一框架^[2,8], 有助于建立开发过程的可追溯关系, 但要求不同阶段采用明确的模型接口和语义映射规则。若模型转换过程中变量含义、采样机制或边界条件发生变化, 即使各阶段能够独立运行, 也可能出现模型与代码行为不一致的问题。

异构建模则用于描述连续动态、离散事件、状态切换和多物理域耦合。Ptolemy II 框架通过组合不同计算模型描述异构行为, 适合研究通信、控制和离散事件并存的系统。Modelica 3.3 采用基于方程的面向对象建模方式, 便于机械、电气、热和液压子系统的组合。连续系统与混合系统仿真理论则为模型离散化、事件处理和求解器配置提供基础^[9-11]。前两类方法侧重模型组织、接口连接和组件复用, 后者更关注数值求解。将这些方法用于实时闭环测试时, 还需处理固定步长、代数环、刚性动态和密集事件等问题。

控制实现主要考察算法在实时目标机上的可执行性。以模型预测控制为例, 其约束处理能力适合复杂控制任务, 但在线优化时间会随预测时域、模型规模和约束数量增加^[12-14]。因此, 离线仿真性能较好的控制器由此未必能够直接部署至 RCP 平台, 还需在目标采样周期下考察最坏执行时间、求解超时、数值误差和闭环性能变化。必要时可通过模型简化、优化问题重构或显式求解等方式降低计算负荷, 但应核查这些处理是否改变原有控制目标和约束边界^[13-16]。

综上所述, RCP/HIL 建模需要在动态保真度、实时可计算性和验证有效性之间取得平衡。模型评价不应局限于离线仿真误差, 还应结合参数有效范围、数值稳定性、任务超时率、接口延迟敏感性以

及边界与故障工况复现能力,明确实时模型能够支撑的验证任务及其适用范围。

3.2 自动代码生成

自动代码生成承担控制模型由设计环境向实时运行平台迁移的任务。传统流程通常先在 MATLAB/Simulink、Modelica 等环境中完成算法设计,再将模型手工转换为 C/C++、PLC 程序或嵌入式代码。由于模型和代码由不同人员、不同工具分别维护,变量含义、采样周期、参数版本和数值实现可能发生偏差。自动代码生成通过预定义规则将控制模型、对象模型或测试模型转换为目标平台可执行代码,减少重复编码工作,并缩短算法设计、嵌入式实现与实时验证之间的转换过程。

按平台适配方式划分,现有方法可分为通用模型转换和面向特定平台的定制生成。通用方法强调模型到标准程序语言或嵌入式代码的规则映射,便于在不同目标机之间迁移,但生成结果通常还需针对处理器架构、存储资源和实时任务进行优化。定制方法则通过代码模板、配置向导和硬件资源封装完成接口映射与工程构建,适合软硬件结构相对固定的 RCP/HIL 系统,部署效率较高,但对特定平台和开发环境的依赖也更明显^[5]。两类方法分别侧重可移植性和部署效率,选用时应结合硬件稳定程度、模型复用需求和后续维护成本加以权衡。

代码生成过程不仅包括程序转换,还涉及模型检查、离散化、求解器配置、任务划分、交叉编译、下载运行和接口配置等。如连续控制模型需要明确固定步长、采样周期和多速率任务关系;电机控制与电力电子系统还要处理 PWM 同步、定点化、中断调度及 A/D、D/A 映射;面向 FPGA 的实现则需将算法转化为可综合的硬件逻辑,并考虑流水线结构、并行度、资源占用和时序收敛。由此可见,不同目标平台面对的转换问题并不相同:CPU 实现更关注执行时间与任务调度,FPGA 实现侧重资源映射和确定性时序,CPU-FPGA 异构平台还需解决软硬件功能划分和数据同步。

生成代码能否用于实时闭环测试,需要经过 SIL、PIL 和 RCP 逐级检验。其中,SIL 主要比较代码与原始模型的输入输出行为,识别转换规则、数据类型和数值运算引入的偏差;PIL 将代码运行在目标处理器上,考察执行时间、存储占用、定点误差和处理器相关行为;RCP 进一步引入实时对象与硬件接口,验证代码在采样延迟、I/O 约束和外部扰动下的闭环性能。三者关注点不同,不能相互替代。对于安全关键系统,还需按照 ISO 26262、DO-178C 和 IEC 61508 等标准要求,将代码生成纳入需求、模型、实现、验证和配置管理相互关联的开发流程^[3,17-20]。

随着控制软件规模扩大,自动代码生成的对象正由单一控制算法扩展至软件组件、运行时环境、通信服务和基础软件。如汽车软件架构的相关研究表明,模型与软件组件之间的标准化映射有利于支持多控制器协同和量产软件集成,但也增加了接口一致性、版本管理和跨平台验证的难度^[21]。因此,评价自动代码生成技术不能只考察代码生成速度,还应关注模型—代码一致性、目标平台实时性、接口适配能力以及验证记录的完整性。

3.3 实时仿真与目标机部署

实时仿真与目标机部署是 RCP/HIL 区别于离线仿真的关键环节。除保证模型与控制逻辑正确外,模型求解、I/O 采样、控制输出和通信交互还需在规定周期内完成。任务超时、时间抖动或通信延迟均可能导致闭环响应失真,甚至影响 HIL/PHIL 系统的稳定性。因此,平台实时性不能仅以平均计算时间衡量,还应综合考察最坏执行时间、任务超时率、时间抖动和通信延迟^[22-25]。

固定步长求解有利于保持任务周期的确定性,但步长选择受到数值稳定性和模型动态范围的共同制约。刚性系统、高频开关系统和多物理域耦合过程通常需要较小步长才能保留关键动态;步长过大可能造成暂态失真或数值振荡,步长过小则会增加处理器负荷和任务超时风险。多速率方法通过对

快、慢子系统采用不同更新周期降低整体计算量, 但需要处理子系统之间的数据同步、插值误差和接口延迟。变步长求解器虽然适合离线精细分析, 其执行时间具有不确定性, 通常难以直接用于严格固定周期的闭环测试。

针对高频开关、电磁暂态和多时间尺度耦合特征的系统, 现有实时化方法主要包括模型简化、计算加速和软硬件协同三类。平均模型、等效模型和模型降阶能够减少状态数量与开关事件, 适合系统级控制和能量管理验证, 但可能弱化器件暂态及故障信息。小步长建模、状态空间节点法和矩阵求解优化能够保留更多动态细节, 其计算负荷随模型规模增加较快^[15,26]。并行计算进一步利用多核处理器或 FPGA 分解网络求解、器件更新和 I/O 任务, 为继电保护、功率变换器和电磁暂态闭环测试提供了实现基础^[27-32]。这些方法并不存在脱离验证目标的绝对优劣, 模型中需要保留哪些动态, 应由控制器、保护装置或故障测试的关注对象决定。

从硬件计算架构看, CPU、FPGA 及 CPU-FPGA 异构架构具有不同的适用范围。CPU 平台开发灵活、调试方便, 适合车辆、机器人和工业过程等毫秒级或亚毫秒级任务, 但处理高频开关和超小步长模型的能力有限; FPGA 具有并行计算和确定性时序优势, 适用于微秒级强实时仿真, 但开发与调试复杂; CPU-FPGA 架构可分别承担系统调度和高速计算任务, 在模型规模、实时步长与保真度之间取得折中, 但需解决任务划分、数据同步和软硬件协同问题。

国内相关研究主要围绕牵引传动、STATCOM、并网逆变器及新型电力系统电磁暂态等对象展开^[33-35]。由于不同研究的模型规模、硬件配置和接口条件存在差异, 平台性能不能仅依据仿真步长比较, 而应在统一测试条件下综合评价计算时间、数值误差、资源占用和接口延迟。

总体而言, RCP/HIL 实时仿真需同时满足数值与时间要求; PHIL 还应进一步考察功率接口动态、闭环稳定裕度和安全保护。

3.4 虚实接口交互与通信

虚实接口负责实时模型与真实硬件之间的信息和能量传递, 其转换误差、传输延迟及时间偏差会改变闭环动态, 直接影响 RCP/HIL 测试的有效性。按照交互形式, 虚实接口可分为信号接口、通信接口和功率接口。

信号接口包括模拟量、数字量、PWM、编码器及传感器和执行器仿真接口, 需要保证量程、采样频率、信号方向和动态带宽与真实硬件匹配。A/D 与 D/A 转换、采样保持及信号调理会引入量化误差和附加延迟, 在快速运动控制和电力电子系统中可能显著影响闭环响应。

通信接口用于连接控制器、实时仿真机和外部设备, 其评价重点由单一报文能否传输转向通信时序能否满足闭环要求。如汽车电子主要采用 CAN/CAN FD、LIN、FlexRay 和车载以太网, 关注多控制器协同、传感器数据注入和报文故障; 机器人与工业控制系统常使用 EtherCAT、PROFINET、Modbus TCP 和 OPC UA, 更重视周期通信、设备同步及上位监控; 电力系统则涉及 IEC 61850 及其相关报文机制, 通信延迟会影响保护动作、同步测量和广域控制。对于多节点实时网络, IEEE 802.1AS 等时间同步规范为统一时基提供了基础, 但同步精度还会受到交换设备、网络负载和本地时钟误差影响^[36]。因此, 接口模型应包含通信周期、报文异常、节点状态和故障处理逻辑, 而非仅描述理想数据传输^[37]。

PHIL 进一步涉及实时仿真器、功率放大器和真实功率设备之间的能量交互, 接口误差可能引发闭环失稳。理想变压器、阻尼阻抗和部分电路复制等接口方法在实现复杂度、动态精度与稳定性方面各有特点^[38-39], 需结合放大器带宽、系统阻抗、仿真步长和功率流方向进行选择; 多端口接入还需考虑端口耦合和平台同步问题。

虚实接口应从静态精度、动态响应和闭环影响三个层面进行评价。静态精度主要考察量程、偏置、

量化和信号调理误差；动态响应需要分析接口带宽、采样延迟、通信抖动、丢包和时间同步偏差；闭环影响则关注上述误差是否改变系统稳定性、保护动作或控制性能。对于 PHIL，还应增加功率放大器动态、能量一致性和稳定裕度等指标。由此，虚实接口不只是连接平台与硬件的辅助模块，而是 RCP/HIL 可信评价中需要单独建模、测试和记录的组成部分。

3.5 在线监测与参数标定

在线监测与参数标定直接影响 RCP/HIL 的调试效率和结果可追溯性。RCP 侧重系统状态、控制量和通信数据的实时观测与参数调整，HIL 则更关注控制器响应、接口时序、异常工况及故障恢复过程的记录与回放。因此，监测与标定不仅用于控制器调试，也是测试复现和结果评价的重要基础。

监测与标定过程主要包括数据采集、状态观测、事件触发、参数调整和结果留存。数据采集应覆盖控制输入、系统状态、执行器输出、通信变量和故障标志，并保持统一时间基准；事件触发用于截取工况切换、约束激活和故障发生前后的数据；在线调参用于修改控制器增益、滤波参数或约束边界；试验结束后还需保存模型配置、参数版本、触发条件和原始记录，以区分性能变化的具体来源。

不同应用对监测与标定的关注点存在差异，如机器人和外骨骼系统主要观测轨迹误差、交互力和执行器状态，以保证参数调整不会破坏运动稳定性和接触安全；风电、混合动力车辆和电机驱动系统涉及多工况及多目标协调，标定过程需要在动态响应、能量效率和约束满足之间进行权衡；轨道交通和电力系统则更重视故障前后数据、接口时序和保护动作的完整记录^[4,40,43]。工业过程控制需要将在线监测与 SCADA、OPC UA 及历史数据库衔接，以支持长周期运行分析和异常工况回放。

具体而言，在线监测已由变量显示扩展至参数管理、故障复现和验证证据留存。工程中应保证采样频率、时间同步、数据完整性及版本一致性，并

关联模型、参数、测试工况与结果，为控制器调试和测试复核提供依据。

3.6 测试验证、故障注入与覆盖度评价

测试验证与故障注入是 RCP/HIL 由功能调试走向可信验证的关键。对于汽车、航空航天、电力系统等安全关键系统，测试不仅要覆盖标称工况，还应包括边界、异常、故障和极端场景。HIL/PHIL 能够在可控条件下重复复现上述工况，用于检验控制逻辑、保护策略和故障响应。

RCP/HIL 测试主要包括场景构建、故障注入、判据设置和结果记录。场景构建确定正常、边界及极端工况；故障注入描述故障对象、幅值、持续时间和触发方式；测试判据用于评价控制器响应、保护动作和安全约束；结果记录则关联测试用例、模型版本、接口配置与运行数据。随着在环真实硬件比例提高，测试环境更接近实际系统，但接口误差、试验成本和安全风险也相应增加^[44]。

按照测试用例生成方式，现有方法可分为规则驱动、模型驱动和搜索驱动。规则驱动方法适合验证已知故障和保护逻辑，但对未知风险覆盖有限；模型驱动方法依据状态空间、约束边界或稳定性条件生成工况，其有效性取决于模型准确性；搜索驱动方法通过优化、随机采样或对抗策略发现控制器薄弱区域，适用于开放环境和 AI 控制器，但需排除无物理意义的场景^[41]。工程中可综合采用三类方法，以兼顾基本功能、边界条件和未知风险。

功能安全标准强调验证活动与系统风险之间的对应关系。ISO 26262、DO-178C 和 IEC 61508 等功能安全标准对需求追踪、配置管理和测试覆盖提出了要求^[3]。RCP/HIL 可以为边界工况复现、故障响应分析和验证数据留存提供条件，但不能替代危害分析、安全论证及认证试验，能够将部分高风险测试前移，并形成能够回溯至具体需求、模型版本和测试配置的验证记录。不同应用领域的测试重点也有所差异：如智能车辆侧重传感器退化、通信异常和复杂交通交互，应关注场景代表性及边界风

险覆盖^[45-46], 电力系统和电力电子则重点测试短路、电压跌落、逆变器故障及保护动作, 并评价功率接口精度、暂态响应、稳定裕度和实验安全^[6-7,38-39,47-49]。

国内已面向牵引传动、新型电力系统和电磁暂态等对象展开研究, 实现故障及极端工况的闭环复现^[40,50], 但不同平台的故障参数和评价指标尚不统一。为提高结果的可比性, 应规范记录故障位置、发生时刻、幅值、持续时间、恢复方式及测试判据, 并说明模型与接口的适用范围。同时, 测试覆盖度不应简单以用例数量衡量, 而应综合考察正常、边界与极端工况, 设备与通信故障, 接口延迟、丢包和量化误差, 以及安全边界。评价时还需结合模型可信度、接口误差和结果可追溯性, 避免将失真或无效场景计入覆盖范围。

基于上述分析, 表 3 从实时模型可信度、仿真步长与实时性、数值稳定性、虚实交互、故障注入、测试覆盖和结果追溯等方面归纳 RCP/HIL 系统的可信评价指标, 用于评价平台运行稳定性及其结果对控制器验证和工程决策的支撑能力。

表 3 RCP/HIL 系统仿真可信评价指标
Table 3 Credibility assessment criteria for RCP/HIL system simulation

评价维度	主要含义	可关注指标
实时模型可信度	评价实时模型对真实对象动态特性的表征能力	时域误差、频域响应误差、关键变量误差、参数有效范围、模型适用边界
仿真步长与实时性	评价模型能否在固定采样周期内稳定运行	固定步长、任务超时率、实时因子、计算负荷、时间抖动
数值稳定性	评价离散化、求解器和接口耦合是否导致数值失真	数值振荡、发散风险、刚性处理能力、多速率同步误差
虚实交互一致性	评价真实硬件与实时模型之间的信号或功率交互质量	I/O 延迟、A/D 与 D/A 误差、通信抖动、时间同步误差、接口带宽
故障注入能力	评价异常工况和故障模式的可控复现能力	故障类型数量、故障注入位置、故障持续时间、重复性、安全隔离能力
测试覆盖	评价测试场景对正	工况覆盖率、故障覆盖

盖度	常、边界和危险工况的覆盖程度	率、接口异常覆盖率、安全边界覆盖率
仿真结果追溯	评价仿真结果能否支撑控制器验证和工程决策	结果可重复性、误差可解释性、日志完整性、版本可追溯性、人工复核依据

3.7 关键技术路线比较与选型原则

前述分析表明, RCP、CHIL 和 PHIL 在验证对象、实时性、接口复杂度及工程风险等方面存在明显差异。RCP 侧重控制算法的快速迭代与原型验证, CHIL 侧重真实控制器的功能、接口及时序测试, PHIL 则涉及真实功率设备与实时模型之间的能量交互, 对接口稳定性和安全保护要求更高。因此, 技术选型应综合考虑开发阶段、被测对象、实时步长、模型保真度、接口复杂度、风险等级及认证需求。接下来, 表 4 对各类方法的验证目标、技术要求 and 适用条件进行比较。

表 4 RCP、CHIL 与 PHIL 技术路线比较
Table 4 Comparison of RCP, CHIL and PHIL

比较维度	RCP	CHIL	PHIL
主要真实对象	原型控制器、实时目标机、部分真实对象	真实 ECU、PLC、DSP、FPGA 控制器	真实功率设备、功率放大器、逆变器、电机、负载
主要虚拟对象	控制算法模型、半实物对象或实时对象模型	实时被控对象模型、传感器/执行器模型	实时电网、负载、电机、系统模型
主要验证目标	控制算法快速实现、参数整定、原型验证	控制器功能、接口逻辑、故障响应和实时性验证	功率级动态交互、并网特性、保护动作和稳定性验证
实时步长要求	通常为毫秒级至亚毫秒级, 取决于对象动态	毫秒级至微秒级, 取决于对象模型和控制周期	要求微秒级或更小步长, 尤其在电力电子场景中
模型保真度要求	中等, 重点是控制效果和实时闭环响应	较高, 模型误差会影响控制器测试可信度	高, 模型误差和接口误差会影响功率交互稳定性
I/O 延	中等, 主要	较高, 影响控	极高, 接口延

迟敏 感性	影响闭环控 制性能	制器输入输 出时序一致 性	迟可能破坏 闭环稳定性
接口 稳定 性要 求	关注信号采 集、控制输 出和在线标 定	关注传感器/ 执行器信号 一致性和总 线通信	关注功率接 口、阻抗匹 配、放大器带 宽和保护机 制
测试 覆盖 率	适合算法参 数和典型工 况快速迭代	适合正常、边 界、故障工况 批量测试	适合功率扰 动、保护动作 和极端电气 工况测试
工具 链开 放性	通常较高， 便于模型修 改和快速部 署	中等，受真实 控制器接口 和平台生态 约束	较低，依赖专 用实时仿真 器和功率接 口设备
成本 与风 险	成本较低， 风险较低	成本中等，风 险可控	成本高，风险 高，需要严格 安全保护
安全 认证 支撑	可支持早期 算法验证， 但不能替代 认证测试	可支撑控制 器级功能安 全验证	可支撑功率 级验证，但安 全风险和测 试要求更高
主要 局限	与最终量产 控制器仍有 差异	依赖实时模 型和接口仿 真精度	成本高、稳定 性难、测试风 险高

从完整验证链条看，实时模型、计算平台、虚实接口和测试场景相互耦合：提高模型保真度和场景复杂度会增加计算及验证负担，并行计算又可能

引入通信与调度延迟。因此，RCP/HIL 系统设计需要在模型精度、实时性、接口一致性、测试覆盖度和实验风险之间进行权衡。

4. RCP/HIL 典型工程应用

RCP/HIL 已广泛应用于汽车电子、电力电子与新能源、航空航天与无人系统、机器人与智能制造以及工业过程控制等领域。上述系统普遍具有软硬件耦合强、实物试验成本高、异常工况难以复现和安全约束严格等特点，需要构建可控、可重复且可追溯的半实物闭环验证环境。

如表 5 所示，不同领域的验证重点存在明显差异：汽车电子、运动控制和无人系统关注控制器功能、通信时序与任务安全；电力电子与电力系统强调实时步长、暂态响应及功率接口稳定性；工业过程控制侧重逻辑正确性、报警响应和异常处置。因此，RCP/HIL 的技术效果应结合被测对象、在环形式、接口层级和测试目标综合评价。由于不同研究的平台配置、模型复杂度和评价口径不同，表 5 中参数不宜用于平台性能的直接比较。

表 5 RCP/HIL 典型工程应用及其评价指标

Table 5 Verification characteristics and evaluation metrics of representative RCP/HIL engineering applications

应用领域	典型工程案例	验证对象	在环形式	关键参数或接口	主要测试内容	评价指标
汽车电子 与新能源 汽车	混合动力车 辆 HIL 测试 系统	整车控制器、 能量管理策 略、车辆动力 学模型	CHIL/HI L	CAN/CAN FD、 AI/AO、DI/DO、车 辆动力学实时模型	能量管理、制动回 收、控制器闭环响 应、故障工况复现	控制响应时间、测试重 复性、故障响应正确 率、策略调试周期
电力电子 与新能源 并网	逆变器或 STATCOM 控制器实时 仿真	逆变器控制 器、功率变换 器模型、并网 控制策略	CHIL; PHIL (接 入真实功 率设备 时)	PWM、AIO/DIO、 微秒级实时仿真、 功率接口	并网扰动、故障穿 越、保护动作、控 制器稳定性	仿真步长、稳态误差、 暂态响应时间、保护动 作正确率
电力系统 保护与智 能电网	RTDS 继电 保护测试	保护装置、输 电线路、电网 暂态模型	CHIL/HI L	IEC 61850、 GOOSE、AIO/DIO、 实时电磁暂态模型	短路故障、保护动 作、通信延迟、并 网扰动	保护动作时间、误动/ 拒动情况、故障定位误 差、通信时延
航空航天	无人机指令	飞控计算机、	CHIL/HI	IMU/GPS 仿真、执	姿态控制、导航控	姿态跟踪误差、闭环稳

与无人系统	意图识别与半实物仿真	传感器模型、执行机构模型	L	行机构接口、实时飞行动力学模型	制、传感器异常、执行器故障	定性、故障响应时间、任务完成率
机器人与智能制造	上肢外骨骼 RCP/HIL 验证	运动控制算法、伺服驱动器、机器人动力学模型	RCP/CHIL	EtherCAT、编码器、PWM、实时动力学模型	轨迹跟踪、力控交互、传感器—执行器闭环一致性	轨迹误差、控制周期、通信抖动、碰撞/异常响应
工业过程控制与复杂装备	城市固废焚烧过程回路控制半实物仿真	PLC/DCS 控制逻辑、过程对象模型、操作员界面	CHIL/HIL	OPC UA、Modbus、PROFINET、过程动态模型	连锁保护、异常情况演练、操作员培训、控制逻辑验证	报警响应时间、控制逻辑正确率、异常处置成功率

4.1 汽车电子与新能源汽车

汽车电子是 RCP/HIL 应用较早且工程化程度较高的领域,验证对象已由发动机、转向和制动等单一控制器,扩展至动力系统、多控制器网络及自动驾驶域控制器。针对控制器数量多、总线交互复杂以及部分危险工况难以通过实车试验复现等问题,HIL 通过车辆动力学模型、真实控制器与测试环境构成闭环,可在实车试验前验证控制逻辑、接口时序、故障响应及能量管理等功能。

新能源汽车的发展使验证对象由单一 ECU 转向动力系统协同。电池管理、电机控制、制动能量回收和热管理之间存在较强的状态关联,仅分别测试各控制器难以发现总线延迟、状态估计偏差和控制指令冲突。相较于单控制器 CHIL,多控制器和整车级 HIL 能够保留控制器之间的通信关系,但模型规模、接口数量和测试场景也随之增加。此类测试除关注控制性能外,还需考察能量流协调、通信时序、保护逻辑和故障传播过程。

软件定义汽车和集中式电子电气架构进一步改变了 HIL 的验证边界。AUTOSAR Classic Platform 主要面向具有确定性实时需求的嵌入式控制功能,Adaptive Platform 则服务于计算资源需求较高、可动态部署的应用。相关研究推动模型、软件组件、运行时环境和通信服务之间形成标准化映射,使 HIL 由硬件接口测试延伸至软件组件集成和多控制器协同验证^[21]。与此同时,域控制器和中央计算平台增加了软件版本、资源调度和跨域通信对整车行为的影响,传统按 ECU 划分的测试方法需

要向软硬件联合验证转变。

智能驾驶系统还需要将车辆动力学、环境感知、决策规划和执行机构纳入同一闭环。虚拟场景能够安全复现遮挡、恶劣天气、传感器退化和交通参与者异常行为,车辆在环测试则可进一步保留真实车辆或执行机构动态^[51]。然而,场景数量多并不等同于风险覆盖充分。面向智能驾驶的 RCP/HIL 测试需要将场景生成、传感器数据注入、车载网络仿真、故障注入和结果分析结合起来,并说明测试场景与功能安全目标之间的对应关系。

综上,汽车电子 RCP/HIL 评价应与验证层级相匹配:控制器级关注实时响应、接口和故障处理,整车级关注通信时延、状态一致性与功能协同,智能驾驶还需考察风险场景覆盖、感知决策失效和安全接管。各层级均应保证测试的可重复性、数据完整性和配置可追溯性。

4.2 电力电子、新能源与智能电网

电力电子、新能源和智能电网是 RCP/HIL 的重要应用领域。风电、光伏、储能、电机驱动和微电网等系统具有功率器件快速开关、控制器离散采样与电网慢动态并存的多时间尺度特征。离线仿真难以充分反映控制器执行时间、PWM 同步、I/O 延迟、保护逻辑和通信交互,尤其在故障穿越、模式切换及弱电网条件下,需要通过 CHIL 或 PHIL 检验闭环暂态响应。

该领域的实时模型可按动态细节分为平均值模型、开关级模型和器件级模型。平均值模型计算量较低,适合系统级控制、能量管理和长时间尺度

运行分析,但难以描述开关暂态与器件故障;开关级模型能够保留脉宽调制及拓扑切换过程,适用于控制器和保护逻辑测试,对实时步长和计算资源要求更高;器件级模型进一步考虑导通、关断及电热特性,通常需要专用求解和并行计算支持^[15,26,29-31]。但模型并非越精细越好,而应保留与验证目标相关的动态。

CHIL 与 PHIL 对应不同的验证深度。CHIL 将真实控制器接入实时运行的电网、变换器、电机或负载模型,重点检查控制算法、采样同步、通信接口和保护逻辑,试验风险相对可控。PHIL 进一步引入真实逆变器、储能装置、电机驱动器或其他功率设备,能够反映功率器件、滤波环节和保护装置的实际动态,但功率放大器带宽、回路延迟和系统阻抗会影响闭环稳定性。因而,CHIL 适合控制与通信功能测试,PHIL 则用于确有功率交互需求的验证场景。

国内已在风电控制、牵引传动、STATCOM、并网逆变器和电磁暂态仿真等方向形成多种 RCP/HIL 方案^[33-35,40,43,52]。随着多变换器和多控制器接入规模扩大,研究重点正由单台装置测试转向设备耦合、通信延迟传播和系统级稳定性验证。

该领域的 RCP/HIL 评价应同时考虑实时模型、控制器响应和功率接口。CHIL 测试重点考察仿真步长、暂态误差、采样同步、通信延迟和保护动作正确性;PHIL 需评价功率接口精度、闭环稳定裕度、能量交换一致性和安全保护状态。故障测试则应说明故障类型、注入条件、持续时间和恢复方式。只有在明确模型适用范围与接口误差的基础上,相关结果才能用于控制器验证和并网安全分析。

4.3 航空航天与无人系统

航空航天与无人系统具有安全要求高、实物试验成本大和任务链路复杂等特点。RCP/HIL 主要用于地面验证飞控计算机、导航制导算法、传感器接口和执行机构动态,并可重复复现极端姿态、传感器异常、执行机构故障及通信中断等高风险工况。

DO-178C 强调航空软件需求、设计、编码、验证和配置管理之间的可追溯性,因而 HIL 测试不仅需要给出控制性能,还应保存模型版本、硬件配置、测试用例和运行数据等验证证据。

无人系统的验证对象正在由飞行控制扩展至感知、决策和任务执行。姿态稳定与航迹跟踪主要关注控制周期、跟踪误差和执行机构响应,通常利用确定性场景开展闭环测试;视觉导航、多机协同和任务规划则受到环境感知、通信网络和任务状态变化的共同影响,需要引入三维场景、传感器数据注入和任务级判据。面向低资源无人机的半实物仿真研究表明,机载硬件、任务环境和轻量化算法可以在同一闭环中联合验证^[53]。这说明 RCP/HIL 正在由单一飞控律测试向任务链路验证发展,但场景复杂度增加后,测试覆盖和结果复现也更加困难。

该领域的主要瓶颈在于飞行动力学模型、嵌入式软件、传感器模型和任务场景之间的一致性。模型过度简化会掩盖气动不确定性、执行机构饱和和传感器退化带来的风险;场景过于复杂又会增加实时计算负荷,并使失效原因难以定位。后续研究需要按验证目标划分模型和场景层级:控制器级测试重点考察实时性、稳定性和故障响应,任务级测试还应关注场景覆盖、通信中断、任务完成率和安全回退能力。对于航空安全关键系统,测试结果还需与需求条目、软件版本和认证流程建立对应关系。

4.4 机器人与智能制造

机器人与智能制造是 RCP/HIL 快速拓展的应用领域。工业机器人、移动机器人、外骨骼、协作机器人和智能生产线通常涉及多自由度耦合、伺服驱动、传感反馈及安全约束,直接开展实物调试可能引发碰撞、过载或设备损坏。RCP/HIL 通过连接真实控制器、驱动器、对象模型和虚拟环境,可降低调试风险并提高算法迭代效率。

该领域的应用可分为机器人运动控制验证和生产系统虚拟调试两类。前者针对轨迹跟踪、柔顺控制、力位混合控制和人机交互,将控制算法、伺

服驱动器与机器人动力学模型构成实时闭环。其优势是能够在实物试验前调整控制参数并检验异常响应, 适合人体参与或接触风险较高的系统^[4]。但由于接触、摩擦、结构柔性和人体动力学难以准确建模, 仿真结果与真实交互之间仍可能存在差异。因此, RCP/HIL 可以降低早期调试风险, 但不能完全替代受控条件下的实物验证。

生产系统虚拟调试更关注 PLC 程序、设备状态、运动控制和通信接口之间的协调。通过将真实 PLC 或运动控制器接入虚拟生产线, 可在设备安装和现场联调前检查顺序逻辑、互锁条件、节拍冲突与通信异常。模型集成机电系统研究为控制逻辑、设备模型和通信接口的统一描述提供了基础^[37]。与机器人运动控制相比, 生产线验证不一定要求很小的实时步长, 但对离散事件顺序、设备状态一致性和网络时序更加敏感。

此外, 机器人运动控制应重点评价控制周期、轨迹误差、交互力和异常响应; 生产线虚拟调试则关注逻辑正确性、互锁覆盖、状态一致性、通信时序和节拍偏差。人机协作及安全关键环节还应记录碰撞、超限和安全停机事件。

4.5 工业过程控制与复杂装备

工业过程控制与复杂装备也是 RCP/HIL 的重要应用场景, 典型对象包括石化过程、污水处理、冶金生产、能源装备、轨道交通牵引系统、大型机电装备和复杂生产装置等。此类系统通常具有大惯性、强耦合、非线性、扰动不确定、运行周期长和停机成本高等特点。与电力电子和高速运动系统相比, 该领域一般不追求微秒级实时步长, 而更关注过程模型的长期有效性、扰动与故障复现以及控制逻辑的完整性。RCP 主要用于模型预测控制、自适应控制和优化控制算法的快速验证, HIL 则更适合 DCS/PLC 程序、联锁保护和异常处置流程的闭环测试。

该领域的模型选择需要在动态精度与可维护性之间权衡。高精度机理模型能够反映过程耦合关

系, 但参数辨识和长期维护成本较高; 数据驱动模型便于利用历史运行数据更新, 却可能在工况变化后失效; 混合模型可以兼顾物理约束和数据适应性, 但模型更新后的验证范围需要重新确定。城市固废焚烧过程的半实物仿真表明, 过程模型、控制回路和监控系统可以在统一环境中开展控制逻辑与异常工况验证^[54]。

工业过程 HIL 的主要瓶颈并非计算速度, 而是过程模型与真实装置长期运行状态的一致性。原料变化、设备老化和工况切换会使模型逐渐偏离真实过程, 故障数据不足又限制了异常模型的验证。评价此类平台时, 应关注控制逻辑正确率、报警响应时间、联锁覆盖度、异常处置成功率和模型参数有效期, 并记录模型更新对已有测试结论的影响。

4.6 国内外研究特点与工程瓶颈

从工具链覆盖范围、标准衔接、测试资产复用和验证证据管理等维度看, 国内外 RCP/HIL 研究呈现出不同的发展特点。国外 RCP/HIL 技术在汽车电子、航空航天和电力系统等领域起步较早, 已由单一控制器测试拓展至模型管理、自动化测试、场景生成和验证证据追踪, 并逐步与功能安全及系统认证衔接, 但仍存在商业工具依赖强、跨平台迁移成本高等问题。

国内研究更多由装备和行业需求牵引, 在新能源并网、电力电子、轨道交通和工业过程等领域形成了较多专用方案, 并在小步长求解、FPGA 并行计算和故障复现方面积累了工程经验, 但模型库复用、统一场景描述及验证证据管理仍需完善。

总体而言, 国内外差异主要体现在工具链完整性、标准衔接和测试资产复用程度, 而非单项计算性能。实时模型可信度、虚实接口误差及验证证据的可复现性仍是共同瓶颈, 需要通过模型、接口、场景和证据链的协同设计加以解决。

5. 挑战与发展趋势

当前, RCP/HIL 面临的主要问题已由单项计算

能力不足,转向模型、计算、接口、测试和验证证据之间的系统协调。未来研究应重点关注实时模型可信度、HIL/PHIL 接口稳定性、全链路追踪、AI 控制器验证、数字孪生融合及工具链开放标准化。

5.1 实时模型可信度与异构计算

前文已经讨论了模型简化、多速率求解和异构计算等实时化方法,但实时模型的关键并非细节越多越好,而是能否在计算约束下保留与验证目标相关的动态。同一模型在标称工况下可能具有较小的整体误差,但在故障切换、接触冲击、开关暂态或约束激活时,仍可能遗漏决定控制器响应的局部特征。因此,实时模型不能仅依据平均拟合误差评价,还应围绕具体测试目标考察关键状态、频率范围、事件时刻和故障过程的动态一致性,并明确模型能够支持的验证任务及其适用边界。

模型误差、离散步长、任务超时和接口延迟会沿闭环共同作用,单独评价任一因素难以解释最终偏差。如,模型降阶造成的动态缺失可能被采样与接口延迟进一步放大,多速率子系统之间的同步误差也可能改变保护动作或控制模式切换时刻。后续研究需要建立从模型近似、数值求解和计算调度到闭环性能的误差传播关系,给出关键输出误差、稳定裕度和验证结论对各类误差的敏感性。对于 CPU-FPGA 异构平台,除计算加速效果外,还应报告任务划分、数据交换和同步等待带来的额外开销,避免以局部计算时间代替系统级实时性能。

面向复杂工况,可进一步研究可验证的模型降阶、自适应保真度切换和在线可信度监测。带误差界的降阶方法用于说明模型简化后仍可保留哪些动态;自适应模型可根据运行状态在不同保真度和时间尺度之间切换,但需保证切换过程不会引入数值不连续或闭环扰动;在线监测则可利用残差、参数漂移和超时记录识别模型是否超出有效范围。与此同时,还应建立统一的基准模型、工况集合和评价口径,在相同硬件与接口条件下比较不同实时化方法。只有将模型有效范围、计算状态和闭环误差

纳入同一评价框架,实时仿真结果才能形成可解释、可复核的验证依据。

5.2 接口稳定性与测试可信度

接口误差会通过闭环传播并改变系统动态。尤其在 PHIL 中,延迟、功率放大器动态和系统阻抗相互作用,可能将局部误差放大为闭环振荡。因此,接口评价应由静态精度拓展至误差传播、稳定裕度及测试结论有效性。

现有 PHIL 接口方法主要通过算法选择、阻尼引入和延迟补偿在精度与稳定性之间进行权衡[38-39,44]。减小接口延迟有助于提高动态一致性,但受到实时仿真步长、通信链路和功率放大器带宽的共同限制;增加虚拟阻尼或调整等效阻抗可以改善稳定性,却可能改变原系统的幅频特性。已有研究多在给定设备、单一端口或确定阻抗条件下验证接口方法,其结论难以直接推广到多设备、多端口和运行条件变化较大的系统。数模混合仿真研究还表明,多平台协同时需要同时处理时间基准、模型分区和数据交换问题[50]。

后续研究应由单一接口算法优化转向接口、模型与硬件的联合设计。一方面,需要建立接口延迟、放大器动态、模型误差和系统阻抗之间的误差传播模型,给出不同运行条件下的闭环稳定边界;另一方面,应将稳定性分析与在线监测结合,在接口特性或设备状态发生变化时及时识别稳定裕度下降。对于多端口 PHIL 系统,还需研究端口间耦合、能量一致性和保护协调,并在统一测试条件下评价接口精度、稳定裕度及结果重复性,从而明确测试结论的可信范围。

5.3 全链路追踪与验证证据管理

随着 RCP/HIL 由算法调试转向系统级验证,需要建立贯穿需求、模型、代码、测试配置、故障注入、运行数据和验证结论的追踪机制。通过关联模型版本、控制程序、接口配置和测试脚本,可明确试验结果所对应的需求与运行条件,并为验证结

论提供可核查依据。

现有模型化工程和自动代码生成方法为上述关联提供了基础^[5,8], 但自动生成代码并不意味着验证证据可以同步自动形成。模型修改可能引起代码、接口和测试脚本连锁变化, 而局部参数调整也可能改变已有测试结果的适用范围。ISO 26262、DO-178C 和 IEC 61508 虽然面向不同安全关键领域, 但均要求验证活动能够回溯至相应需求, 并保留软件版本、测试条件和结果记录^[3]。

未来工具链需要为需求、模型、代码、硬件配置和测试数据建立统一标识, 并在模型更新、代码重新生成或接口调整后识别受影响的测试项。模型检查、静态分析、SIL/PIL/HIL 验证、故障注入和覆盖度评价可以继续由不同工具完成, 但其输入、版本和输出应按照统一的数据结构保存。对于自动代码生成和模型复用程度较高的系统, 还需加强工具版本管理、测试脚本迁移和数据格式转换, 避免工具链变化破坏原有证据关系。最终目标不是将所有开发活动集中到同一平台, 而是形成能够从验证结论反向追溯到测试数据、运行配置、代码版本、模型组件和原始需求的证据链。

5.4 AI 控制器在环验证与功能安全

强化学习、神经网络控制和数据驱动 MPC 的行为依赖训练数据、模型结构和运行环境, 难以获得覆盖全部工作域的解析安全保证。分布外输入、传感器退化、对抗扰动和极端工况下的闭环风险, 也难以通过离线测试集上的平均性能充分反映。因此, AI 控制器的验证重点应由模型输出精度转向控制器与环境交互后的闭环行为。

AI 控制器验证主要包括场景驱动、搜索驱动和形式化分析。场景驱动方法可复现复杂环境, 但依赖场景库的代表性^[45-46]。搜索驱动方法能够主动发现控制器薄弱区域, 但生成场景可能缺乏物理合理性, 且未发现失效不能证明系统安全^[41]。形式化方法能够针对给定模型和边界条件验证安全属性, 但在高维神经网络、连续环境和长时序决策中面临

计算规模与模型抽象问题^[42]。

三类方法各有侧重, 单独使用均难以覆盖 AI 控制器的全部风险。RCP/HIL 可将三类方法集成于统一的闭环环境: 利用基础场景覆盖正常工况和已知风险, 通过搜索定位潜在失效区域, 并以形式化方法检验关键安全属性。高风险场景可在 HIL 环境中重复测试, 结合运行时监测和安全接管机制评价系统的约束保持能力。

AI 控制器的评价除预测误差和任务成功率外, 还应包括约束违反率、最小安全裕度、失效场景覆盖、异常检测时间、安全接管成功率和结果重复性。模型或控制器更新后, 还需对相关风险场景进行回归测试。

5.5 数字孪生在环与云边协同验证

数字孪生可将 RCP/HIL 由部署前验证延伸至运行阶段的持续复核。RCP/HIL 侧重在可控环境中验证控制行为, 数字孪生则利用运行数据持续更新虚拟对象^[55-56]。二者结合可形成“运行数据更新模型—历史工况复现—控制策略闭环测试—验证结果反馈运行”的循环。其中, 运行数据可用于修正模型参数、边界条件和故障模式, 更新后的模型则用于重放历史事件、评估控制器版本或验证维护方案。可实验数字孪生进一步将虚拟模型转化为能够与真实控制器和设备交互的试验对象, 使模型更新与 HIL 测试在同一验证链条中衔接^[57], 有助于将 RCP/HIL 由部署前测试延伸至运行期复核, 但每次模型更新都可能改变已有验证结论的适用范围。近年来, 随着人工智能和数据驱动方法进入控制系统开发, 在线监测数据还可进一步用于参数辨识、异常检测、控制器训练、场景回放和策略优化。

数字孪生在环仍面临数据质量、模型更新和实时部署三方面约束。首先, 缺失、延迟或偏置数据可能造成模型漂移, 需要记录数据来源并评价更新结果; 其次, 应建立虚实一致性指标, 明确模型在不同工况和时间尺度下的有效范围; 再次, 云边协同应根据任务的实时性和安全等级进行划分。大规

模仿真、场景管理和历史数据分析可部署在云端，闭环控制、现场接口和安全保护应保留在边缘端。云端更新结果进入实时闭环前，还需经过版本管理和安全验证，避免网络延迟或未经验证的模型更新影响现场系统。

5.6 开放工具链与标准化平台建设

现有平台在模型格式、代码接口、I/O 配置、测试脚本和数据组织方面存在差异，导致模型和测试资产跨平台迁移成本较高。开放化的核心不是简单开放软硬件资源，而是降低模型、接口及测试用例对特定平台的依赖，提高工具链的互操作性和可复用性。

开放 RCP/HIL 平台可基于实时 Linux、开源中间件、ROS 2、EtherCAT、TSN、国产控制器和开放 I/O 模块构建，具有硬件配置灵活、接口易扩展等特点，适用于教学科研、算法原型和定制试验。但此类平台仍需解决驱动适配、实时任务配置、通信集成和测试管理等问题，其实时性与稳定性也需结合具体模型和硬件验证。

标准化是提高开放工具链工程可用性的基础。模型接口应统一变量含义、物理单位、数据类型、采样周期和通信方式；测试用例应记录运行条件、故障参数、触发逻辑和判定规则；试验数据则需关联模型、代码及软硬件版本。安全关键应用还应具备访问控制、运行监测、异常隔离和配置审计机制。

开放工具链应综合评价实时性、互操作性、可复现性和维护成本。未来应重点推进统一模型接口、平台无关的测试描述和标准化数据组织，提升模型与测试资产的跨平台迁移、复现和核查能力。

6. 总结

本文围绕复杂控制系统快速迭代与可信验证需求，对 RCP/HIL 的技术内涵、关键技术、应用差异和发展趋势进行了综述。总体来看，RCP/HIL 已由早期控制算法快速调试工具发展为连接模型、代码、实时目标机、真实控制器、功率设备和测试

管理流程的分层验证体系。其核心价值在于将危险工况、边界工况和复杂交互过程前移到可控的半实物仿真环境中，从而降低实物测试风险并提高验证覆盖度。未来，RCP/HIL 应进一步围绕模型可信度、代码一致性、虚实接口稳定性、故障覆盖率、功能安全和运行数据闭环构建系统化验证能力，以支撑复杂控制系统的高可信开发与工程部署。

参考文献:

- [1] Fagcang J A, Stobart R, Steffen T. A review of component-in-the-loop: Cyber-physical experiments for rapid system development and integration[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2022, 14(6): 1-25.
- [2] Michael J, Cleophas L, Zschaler S, et al. Model-driven engineering for digital twins: opportunities and challenges[J]. *Systems Engineering*, 2025, 28(5): 659-670.
- [3] International Organization for Standardization. ISO 26262:2018 Road vehicles-Functional safety[S]. Geneva: ISO, 2018.
- [4] Bodo G, Martini E, Tucci V, et al. A rapid control prototyping and hardware-in-the-loop approach for upper-limb robotic exoskeletons control[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(5): 2017.
- [5] 刘紫寒, 侯凌霄, 李杨, 等. 基于自定义向导的通用实时半实物仿真代码自动生成方法[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(10): 2279-2287.
Liu Zihan, Hou Lingxiao, Li Yang, et al. A universal real-time semi-physical simulation code automatic generation method based on a custom wizard [J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(10): 2279-2287.
- [6] Garc ía-Mart ínez E, Sanz J F, Muñoz-Cruzado J, et al. A review of PHIL testing for smart grids: Selection guide, classification and online database analysis[J]. *Electronics*, 2020, 9(3): 382.
- [7] Von Jouanne A, Yang X, Rachidi S, et al. Power hardware-in-the-loop (PHIL): A review to advance smart inverter-based grid-edge solutions[J]. *Energies*, 2023, 16(2): 916.
- [8] Chui K T, Gupta B B, Liu J, et al. A survey of internet of things and cyber-physical systems: Standards, algorithms, applications, security, challenges, and future directions[J]. *Information*, 2023, 14(7): 388.
- [9] Ptolemaeus C. System design, modeling, and simulation using Ptolemy II[M]. Berkeley: Ptolemy.org, 2014.

- [10] Fritzson P. Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3: a cyber-physical approach[M]. John Wiley & Sons, 2015.
- [11] Cellier F E, Kofman E. Continuous system simulation[M]. Boston, MA: Springer US, 2006.
- [12] Schwenzer M, Ay M, Bergs T, et al. Review on model predictive control: An engineering perspective[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(5): 1327-1349.
- [13] Rawlings J B, Mayne D Q, Diehl M. Model predictive control: Theory, computation, and design[M]. 2nd ed. Madison: Nob Hill Publishing, 2017.
- [14] Berberich J, Allgöwer F. An overview of systems-theoretic guarantees in data-driven model predictive control[J]. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2025, 8(1): 77-100.
- [15] Li F, Wang Y, Wu F, et al. Review of real-time simulation of power electronics[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(4): 796-808.
- [16] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.
- Guo Qi, Lu Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation for new power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.
- [17] Zhao G, Yao J, Edson C P, Sun Z. Design, modeling, and control of a hardware-in-the-loop testbed for off-road vehicles[J]. ASME Letters in Dynamic Systems and Control, 2024, 4(4): 041003.
- [18] Goeke F, Blank M, Lohmann A, et al. Hardware-in-the-Loop testing for low-inertia grids[J]. e+i Elektrotechnik und Informationstechnik, 2025, 142: 76-83.
- [19] Rosales-Valladares V R, Salgado-Herrera N M, et al. Power hardware in the loop methodology applied in the integration of wind energy conversion system under fluctuations: a case study[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2024, 46(1): 2767-2791.
- [20] Stürmer I, Conrad M, Dörr H, Pepper P. Systematic testing of model-based code generators[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2007, 33(9): 622-634.
- [21] Zhang M, Teng Y, Kong H, et al. Automatic modelling and verification of Autosar architectures[J]. Journal of Systems and Software, 2023, 201: 111675.
- [22] Akesson B, Nasri M, Nelissen G, et al. A comprehensive survey of industry practice in real-time systems[J]. Real-Time Systems, 2022, 58(3): 358-398.
- [23] Zou A, Li J, Gill C D, et al. RTGPU: Real-time GPU scheduling of hard deadline parallel tasks with fine-grain utilization[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2023, 34(5): 1450-1465.
- [24] Salamun K, Pavić I, Džapo H, et al. Weakly hard real-time model for control systems: A survey[J]. Sensors, 2023, 23(10): 4652.
- [25] Lu Z, Guo G. Control and communication scheduling co-design for networked control systems: A survey[J]. International Journal of Systems Science, 2023, 54(1): 189-203.
- [26] Sun Z, Wang G, Li Z, et al. Real-time simulation method for power electronic converters with low resource consumption[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 40(4): 4695-4700.
- [27] McLaren P G, Kuffel R, Wierckx R, et al. A real-time digital simulator for testing relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 207-213.
- [28] Ma X, Yang C, Zhang X P, et al. Real-time simulation of power system electromagnetic transients on FPGA using adaptive mixed-precision calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3683-3693.
- [29] Bai H, Luo H, Liu C, et al. A device-level transient modeling approach for the FPGA-based real-time simulation of power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(2): 1282-1292.
- [30] Bai H, Liu C, Rathore A K, et al. An FPGA-based IGBT behavioral model with high transient resolution for real-time simulation of power electronic circuits[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(8): 6581-6591.
- [31] Hadizadeh A, Hashemi M, Labbaf M, et al. A matrix-inversion technique for FPGA-based real-time EMT simulation of power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 1224-1234.
- [32] Li Z, Xu J, Wang K, et al. FPGA-based real-time simulation for EV station with multiple high-frequency chargers based on C-EMTP algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 1-11.
- [33] 朱建鑫, 胡海兵, 陆道荣, 等. 应用于级联 STATCOM 的高精度低成本全 FPGA 实时仿真模型研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 777-785.
- Zhu Jianxin, Hu Haibing, Lu Daorong, et al. Research on

- high-precision, low-cost full-FPGA real-time simulation model applied to cascaded STATCOM [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 777-785.
- [34] 赵浩然, 孟铃涵, 江艺宝, 李冰. 面向新型电力系统的实时仿真平台综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4611-4626.
Zhao Haoran, Meng Linghan, Jiang Yibao, Li Bing. Overview and prospects of real-time simulation platforms for new-type power systems [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4611-4626.
- [35] 江艺宝, 于佳乐, 赵浩然, 等. 新型电力系统电磁暂态并行仿真关键技术及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 3145-3160.
Jiang Yibao, Yu Jiale, Zhao Haoran, et al. Key technologies and outlook for parallel simulation of electromagnetic transients in new power systems [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3145-3160.
- [36] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Timing and Synchronization for Time Sensitive Applications: IEEE Std 802.1AS-2020[S]. New York: IEEE, 2020.
- [37] Thramboulidis K. Model-integrated mechatronics-Toward a new paradigm in the development of manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2005, 1(1): 54-61.
- [38] Ren W, Steurer M, Baldwin T L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(4): 1286-1294.
- [39] Lauss G, Strunz K. Accurate and stable hardware-in-the-loop (HIL) real-time simulation of integrated power electronics and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10920-10932.
- [40] 孙鹏琨, 葛琼璇, 王晓新, 等. 基于硬件在环实时仿真平台的高速磁悬浮列车牵引控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(16): 3426-3435.
Sun Pengkun, Ge Qiongquan, Wang Xiaoxin, et al. High-speed maglev train traction control strategy based on hardware-in-the-loop real-time simulation platform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16): 3426-3435.
- [41] Tuncali C E, Fainekos G, Ito H, et al. Simulation-based adversarial test generation for autonomous vehicles with machine learning components[C]//2018 IEEE intelligent vehicles symposium (IV). IEEE, 2018: 1555-1562.
- [42] Huang X, Kroening D, Ruan W, et al. A survey of safety and trustworthiness of deep neural networks: Verification, testing, adversarial attack and defence, and interpretability[J]. Computer Science Review, 2020, 37: 100270.
- [43] 吴爱华, 赵不赓, 茅靖峰, 等. 基于快速控制原型的风力发电半实物仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(3): 482-491.
Wu Aihua, Zhao Buhui, Mao Jingfeng, et al. Semi-physical simulation system for wind power generation based on rapid control prototype [J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(3): 482-491.
- [44] Núñez Gutiérrez C. Power-hardware-in-the-loop simulation for applied science, a review to highlight its merits and challenges[J]. Inventions, 2025, 10(1): 19.
- [45] Cao X, Chen H, Gelbal S Y, Aksun-Guvenc B, Guvenc L. Vehicle-in-Virtual-Environment (VVE) method for autonomous driving system development, evaluation and demonstration[J]. Sensors, 2023, 23(11): 5088.
- [46] Ding W, Xu C, Arief M, et al. A survey on safety-critical driving scenario generation - A methodological perspective[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(7): 6971-6988.
- [47] Farrokhhabadi M, Canizares C A, Simpson-Porco J W, et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 13-29.
- [48] Qaisar M W, Fang J. Grid-forming converters for renewable generation: A comprehensive review[J]. Energies, 2025, 18(17): 4565.
- [49] Xiong L, Liu X, Liu Y, et al. Modeling and stability issues of voltage-source converter-dominated power systems: A review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 8(6): 1530-1549.
- [50] 张树卿, 童陆园, 薛巍, 等. 基于数字计算机和 RTDS 的实时混合仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 61-66.
Zhang Shuqing, Tong Luyuan, Xue Wei, et al. Real-time hybrid simulation based on digital computers and RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 61-66.
- [51] Alemayehu H, Sargolzaei A. Testing and verification of connected and autonomous vehicles: A review[J]. Electronics, 2025, 14(3): 600.
- [52] 李子润, 徐晋, 汪可友, 吴盼, 李国杰. 电力电子换流器离散小步合成实时仿真模型[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5267-5277.

- Li Zirun, Xu Jin, Wang Keyou, Wu Pan, Li Guojie. Real-time simulation model of discrete small-step synthesis for power electronic converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5267-5277.
- [53] 刘鸿福, 付雅晶, 张万鹏, 张虎. 面向低资源的无人机指令意图识别算法及半实物仿真[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(12): 2894-2905.
- Liu Hongfu, Fu Yajing, Zhang Wanpeng, Zhang Hu. Low-resource drone command intent recognition algorithm and semi-physical simulation [J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(12): 2894-2905.
- [54] 王天峥, 汤健, 夏恒, 乔俊飞. 城市固废焚烧过程的回路控制半实物仿真平台[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(2): 241-253.
- Wang Tianzheng, Tang Jian, Xia Heng, Qiao Junfei. A hardware-in-the-loop simulation platform for loop control in urban solid waste incineration processes [J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(2): 241-253.
- [55] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4): 2405-2415.
- [56] Rasheed A, San O, Kvamsdal T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective[J]. IEEE Access, 2020, 8: 21980-22012.
- [57] Schluse M, Priggemeyer M, Atorf L, Rossmann J. Experimentable digital twins-Streamlining simulation-based systems engineering for Industry 4.0[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1722-1731.