

团体标准

T/ITS0323-202X

智能汽车信息物理系统多类别模型融合方法技术指南

Technical Guide for Multi-category Model Fusion Method of Intelligent Vehicle Cyber-Physical Systems

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国智能交通产业联盟发布

目 次

1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	2
5 总体要求	3
6 IVCPS 多类别模型接入要求	3
7 IVCPS 多类别模型融合系统要求	4
8 IVCPS 多类别模型融合系统运行环境要求	7
参考文献	错误! 未定义书签。

前 言

本文件按照GB/T1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起。请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国智能交通产业联盟（C-ITS）提出并归口。

本文件主要起草单位：交通运输部公路科学研究所、重庆大学、浙江清华长三角研究院、国汽（北京）智能网联汽车研究院有限公司、北京卓视智通科技有限责任公司、特路（北京）科技有限公司。

本文件主要起草人员：邓蓉蓉、李小燕、赵敏、孙棣华、袁宏、钱越、汪林、彭礼平、黄开胜、赵静、王勇、李磊、尉彦鹏、杨爱艳、肖雅月、刘锐。

中国智能交通产业联盟

智能汽车信息物理系统多类别模型融合方法技术指南

1 范围

本文件规定了智能汽车信息物理系统多类别模型融合的总体要求、模型接入要求、系统要求及运行环境要求，界定了相关术语、缩略语及技术边界。

本文件适用于智能汽车信息物理系统多类别模型融合方法的设计与智能汽车信息物理系统多类别模型融合系统的实现，其他领域模型融合可参考本指南进行设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T40021-2021 信息物理系统 术语

GB/T44373-2024 智能网联汽车 术语

Modelica Association. Functional Mock-Up Interface Specification, Version 3.0[S/OL]. 2021. <https://fmi-standard.org/docs/3.0/>.

MathWorks Inc. MATLAB MEX File API Specification[S/OL].2025. <https://www.mathworks.com/help/matlab/mex-files.html>.

MathWorks Inc. Simulink C/MEX S-Function Specification[S/OL].2025. <https://www.mathworks.com/help/simulink/s-functions.html>,

RFC 791:1981, 网际协议 (Internet Protocol) [S/OL]. IETF, 1981. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc791>.

RFC 9293:2022, 传输控制协议 (Transmission Control Protocol) [S/OL]. IETF, 2022. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9293>.

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

智能汽车信息物理系统 intelligentvehiclecyber-physicalsystem

以智能汽车为核心载体，集成先进感知、计算、通信、控制等信息技术与自动控制技术，构建的物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的信息物理系统。

[参考：GB/T40021-2021、GB/T44373-2024]

3.2

融合建模 fusionmodeling

在统一集成环境下，整合多尺度、多领域异构模型，明确异构模型核心特性与行为规则，通过多种语法或模型形式表征系统信息，实现多异构模型无缝交互与协同构建，以达成异构模型同步计算融合为核心目标的建模方法与架构搭建过程。

3.3

融合接口 fusioninterface

在统一集成环境下，为实现多尺度、多领域异构模型无缝交互与同步计算所建立的标准化交互通道，是保障异构模型特性协同、架构适配的核心技术组件。

3.4

通信步长 communicationstepsize

智能汽车信息物理系统多类别模型融合系统主节点与从节点进行数据交互的离散时间间隔，需与从节点求解步长、数据实时性需求（如车辆控制、V2X 通信）适配，是实现主从节点时钟同步与同步计算融合的核心参数。

3.5

求解步长 solutionstepsize

模型融合过程中异构模型每一次完成步进求解所跨越的时间长度，需与模型求解器类型（显式/隐式）、精度需求、通信步长适配，是保障同步计算融合正确性的关键参数。

3.6

步进求解 step-by-step solution

通过逐步推进的方式进行模型求解，模型依据前一步求解结果和已知边界条件/初始条件，计算当前步解，并将该解作为下一步计算或其他异构模型计算输入的求解方式。

3.7

时钟同步 clock synchronization

若两个异构模型具备相同的求解时间轴，且任意时刻求解的时间差异不超过规定不确定度，保证求解数据在时间上的一致性，则称这两个异构模型在该规定不确定度下实现时钟同步。

3.8

解耦集成 white-box integration

允许建模工程师根据系统内部逻辑和结构，对复杂系统多学科异构模型进行设计、调试与运行的集成方法，支持模型模块的独立升级与维护。

3.9

主节点 master node

智能汽车信息物理系统多类别模型融合系统中，负责仿真调度、数据交互、同步计算等核心任务执行的节点，是保障系统协同运行的核心枢纽。

3.10

从节点 slave node

智能汽车信息物理系统多类别模型融合系统中，部署于异构模型所在平台，负责异构模型与主节点通信、启动异构模型求解计算的节点。

3.11

功能模型单元 Functional Mock-Up Unit

符合功能模型接口规范，可实现跨平台模型交互与集成的功能模块单元，以压缩包形式封装模型描述文件、代码、动态链接库及资源文件。

4 缩略语

IVCPS: 智能汽车信息物理系统 (Intelligent Vehicle Cyber-Physical System)

BS: 浏览器/服务器模式 (Browser-Server)

CS: 客户端/服务器模式 (Client-Server)

FMI: 功能模型接口 (Functional Mock-Up Interface)

FMU: 功能模型单元 (Functional Mock-Up Unit)

HTTP: 超文本传输协议 (HyperTextTransferProtocol)

IP: 互联网协议 (InternetProtocol)

S-Function: 系统函数 (SystemFunction)

TCP/IP : 传输控制协议 / 因特网互联协议
(TransmissionControlProtocol/InternetProtocol)

5 总体要求

5.1 基本原则

IVCPS多类别模型融合方法设计应结合“分层解耦、跨域共用”技术特点,遵循学科互通、尺度互通、虚实互通的设计目标,按照“解耦集成、松耦弱连、并序求解、高效融合”的原则构建,确保系统具备兼容性、互操作性和可扩展性。

5.2 一般规定

IVCPS多类别模型融合方法设计的一般规定:

- a) 应采用多学科异构模型解耦集成技术,实现各类异构平台的可视化建模、调试与运行,支撑IVCPS多学科间接统一建模;
- b) 参与解耦集成的各异构平台应依托自身运行环境求解器进行求解,通过数据互通实现平台间的融合建模,保障模型求解的独立性与兼容性;
- c) 应采用多学科异构模型快速接入技术,导出松耦合、弱连接的高效融合接口,支持异构平台多学科模型的盲插即用与动态扩展;
- d) 应采用多学科异构模型并行求解技术,兼顾不同运行效率与求解步长的异构模型,统一异构模型的积分求解轴,保证并行求解环境下的求解正确性;
- e) 应采用模型高效融合技术,构建模型同步求解、高效交互、数据分发的中转枢纽,实现大规模复杂模型的高效融合;
- f) 应包含多学科异构平台的仿真调度、数据交互与同步求解等技术,通过分布式架构技术合理利用各平台计算资源,高效处理复杂大规模模型的同步融合。

6 IVCPS 多类别模型接入要求

6.1 模型与建模平台分类

IVCPS多类别模型指采用支持FMU、支持S-Function、支持代码集成三类建模平台构建的模型,它们的范围如下:

- a) 基于FMU的建模平台指支持FMI协议并可导入FMU文件的建模平台,典型平台包括OpenModelica、MWorks、AMESim、SimulationX等;
- b) 基于S-Function的建模平台指Simulink及可通过Simulink实现接入的建模平台,典型平台包括Carsim、Trucksim、PreScan等;
- c) 基于代码集成的建模平台指可通过Python、C/C++语言实现接入的建模平台,典型平台包括Sumo、Carla等。

6.1.1 接入方法

接入方法应充分考虑IVCPS多类别模型的异构特性,发挥高精度模型在各异构平台上的建模优势,依托异构模型所在平台的求解资源实现模型融合,提升IVCPS复杂系统的计算能力。

6.1.2 融合接口

应构建与三类建模平台对应的融合接口,实现三类IVCPS多学科建模平台的全覆盖接入,支撑异构多类别模型的融合建模,保障接口的兼容性与互操作性。

6.2 基于 FMU 的建模平台模型融合技术

6.2.1 文件格式

融合接口应采用FMU文件格式，符合ModelicaAssociation发布的《FunctionalMock-UpInterfaceSpecification》Version3.0通用要求，以压缩包形式封装，包含模型描述文件、模型代码、动态链接库及资源文件。

[来源：FunctionalMock-UpInterfaceSpecification]

6.2.2 封装方法

融合接口封装可采用平台导出或自行编译两种方式：

a) 平台导出：在支持FMI协议的仿真平台上直接导出FMU文件；

b) 自行编译：编写C代码实现FMI应用编程C语言接口头文件中定义的函数，满足FMI3.0版本的文件结构、接口函数及数据交互要求，通过C/C++编译器封装为.dll或.so文件，组成完整FMU封装单元。

6.3 基于S-Function的建模平台模型融合技术

6.3.1 文件格式

融合接口文件格式应采用MEX文件格式，符合MathWorks发布的《Simulink C/MEXS-Function》通用要求，为C/C++/Fortran代码编译生成的动态链接库，且包含专属MATLAB入口函数。

[来源：Simulink C/MEXS-Function]

6.3.2 封装方法

融合接口封装应通过MATLAB的mex命令将源代码编译为MEX文件，满足MathWorks相关规范中文件类型、文件命名、入口函数定义与编译的要求，确保接口的标准化与可用性。

6.4 基于代码集成的建模平台模型融合技术

6.4.1 文件格式

融合接口文件格式为.h或.py文件：.h文件为C/C++语言编写的融合接口库(.dll/.so形式)的头文件；.py文件为Python语言编写的融合接口库的实现文件。

6.4.2 封装方法

融合接口封装应通过编写C/C++或Python代码，实现接口文件中定义的函数；C/C++代码应通过编译器封装为.dll或.so文件，Python代码无需封装，保障接口的轻量化与易用性。

7 IVCP多类别模型融合系统要求

7.1 系统架构要求

7.1.1 总体技术架构

系统应采用分布式主从架构，主节点负责仿真调度、数据交互与同步计算等任务执行；从节点负责异构模型与主节点的通信，启动从节点异构模型的求解计算，形成“主节点统筹-从节点执行”的协同模式，如图1所示。

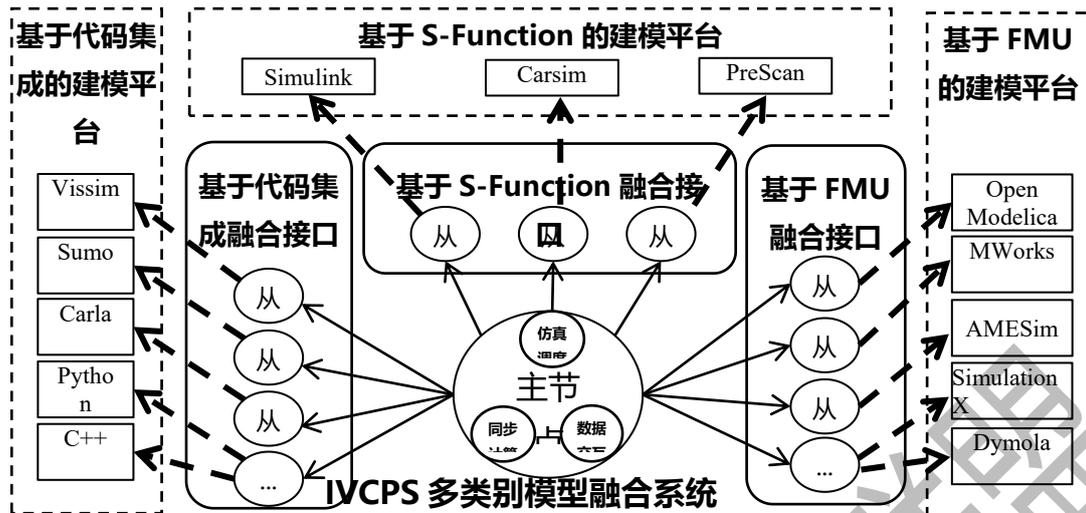


图1 IVCPS多类别模型融合系统总体技术架构

7.1.2 主节点架构

主节点应具备仿真调度、数据交互与同步计算能力，由应用层、业务层、功能层、应用支撑层、基础支撑层五层组成，各层功能要求如下：

- 应用层：实现视图操作、工程管理、数据分析、融合接口配置、模型融合功能，遵循直观、高效、用户友好的设计原则；
- 业务层：实现工程架构视图管理、融合接口模块生成、融合接口任务执行业务，保障业务流程的标准化与可追溯性；
- 功能层：提供架构管理、数据存储、数据管理、数据交互、仿真启动、仿真调度、时钟同步、性能统计、模型接口融合、模型接口配置功能，支撑核心业务落地；
- 应用支撑层：采用解耦集成、时钟同步策略、分布式架构，解决异构模型高耦合问题，提升系统运行效率；
- 基础支撑层：部署应用程序开发环境、数据库、通信协议、FMI协议标准库，为系统运行提供基础保障。

7.1.3 从节点架构

从节点应部署在异构模型所在建模与仿真平台，作为异构模型与主节点的通信桥梁，由功能层、应用支撑层、基础支撑层三层组成，各层功能要求如下：

- 功能层：实现仿真启动、数据交互功能，支撑主节点业务流程；
- 应用支撑层：支持解耦集成和分布式架构，实现异构模型与主节点的高效融合；
- 基础支撑层：配置与主节点匹配的通信协议，按需部署FMI协议标准库，保障通信与模型解析能力。

7.2 系统功能要求

7.2.1 主节点功能

主节点应包含以下功能：

- 架构管理功能：应提供融合建模架构管理环境，具备架构设计、导出与保存、导入与复用能力，支持图形化建模和模型参数配置，可对模型名称、标识、平台类型、IP地址、端口号等参数进行配置，保障架构的可扩展性与复用性；
- 数据存储功能：应具备数据实时存储、实时数据展示、历史数据存储与导出能力，存储融合交互数据、节点求解耗时数据，支撑仿真结果分析与性能评估；
- 数据管理功能：应具备历史数据导入、数据查看、数据筛选与查询能力，展示融合建模工程历史结果曲线数据，支撑融合建模正确性评估。

d) 数据交互功能：应具备分布式节点协同通信、数据同步、数据缓冲池功能，实现从节点间求解数据的接收与转发，保证数据交互的及时性与准确性；

e) 仿真启动功能：应具备仿真启动、终止功能，可创建通信连接并向各从节点并行发送启动指令，支持手动终止和接收从节点终止指令自动终止仿真；

f) 仿真调度功能：应具备仿真调度配置、双调度模式（虚拟时间/系统时间）、步进求解功能，可配置仿真时长、数据交互步长等参数，按通信步长推进步进求解任务；

g) 时钟同步功能：应具备步进状态获取、步进状态更新功能，采用“死等”机制，确保所有从节点完成当前步长求解后再推进下一步，统一各异构模型积分求解轴；

h) 性能统计功能：应具备单节点耗时统计、求解效率对比统计功能，通过曲线图、柱状图、饼状图展示统计结果，支撑模型调试与效率优化；

i) 融合接口生成与配置功能：应能根据架构视图信息生成即插即用的融合接口，适配异构平台频繁迭代；基于三类异构平台特点，实现异构模型输入输出接口的动态配置。

7.2.2 从节点功能

从节点应包含以下功能：

a) 数据交互功能：应具备分布式节点协同通信、数据封装与解析能力，可接收并转发异构模型求解数据，实现与主节点及其他从节点的数据交互；

b) 仿真启动功能：应具备仿真启动、终止功能，接收主节点启动指令后自动运行，完成单步求解后等待主节点指令，完成所有求解后向主节点反馈仿真状态并终止仿真。

7.3 系统数据结构要求

7.3.1 主节点架构管理功能数据

架构数据应采用.xml文件格式存储，仿真时长保留至小数点后4位，仿真步长（单位：秒）保留至小数点后5位，确保数据精度与规范性。架构数据应包含视图配置信息、主节点配置信息、从节点配置信息：

a) 视图配置信息：接口连线方式、线型、起止点名称/标识/坐标等；

b) 主节点配置信息：IP地址、端口号、仿真时长、仿真步长、数据库文件路径等；

c) 从节点配置信息：接口名称/标识/平台类型、客户端IP地址/端口号、发送/接收数据映射名称等。

7.3.2 主节点数据存储功能数据

存储数据应采用*.db或其他数据库文件格式，仿真时间与耗时（单位：秒）保留至小数点后2位，接口输入输出数据至少保留6位有效数字。存储数据应包含主节点交互数据、从节点交互数据：

a) 主节点交互数据：数据顺序、仿真时间、仿真耗时；

b) 从节点交互数据：接口输入数据、接口输出数据。

7.4 系统性能要求

系统在开发效率、调试效率、运行效率、快速响应能力、稳定性与可扩展性上应做如下要求：

a) 开发效率：将点对点协同方式转变为主从协同方式，当异构平台节点数量大于4时，开发效率较原始点对点协同方式提升至少16.7%；

b) 调试效率：支持异构平台在原有可视化环境下进行迭代更新与运行调试，调试效率较传统封装集成方式提升至少25%；

c) 运行效率：采用分布式架构，模型融合效率较原有集中式架构提升10%以上；支持通信步长设置在50ms以下并维持系统性能，兼顾采样精度与求解效率；

d) 快速响应：单机条件下，模型间通信延迟平均不大于5ms；系统整体响应时间不大于1.0s；分布式架构下应根据网络、硬件等因素设置合理的从节点间通信延迟；

e) 稳定性：制定明确的数据传输协议和交互实现方式，降低数据丢包率，保证数据交互的稳定性与完整性，确保系统在复杂环境下连续可靠运行；

f) 可扩展性: 主节点架构与融合接口设计应充分考虑未来从节点扩容需求, 支持新增异构建模平台的便捷接入, 具备前瞻兼容性。

7.5 系统软件体系结构

系统软件体系结构应采用CS(客户端/服务器)架构, 满足融合建模与同步融合任务对实时性和灵活性的高要求, 主节点作为服务器完成异构模型同步融合与快速响应, 从节点作为客户端在自身运行环境中完成模型求解计算。

7.6 系统打包与安装要求

系统打包与安装应符合如下要求:

- a) 主节点应用程序打包时, 应将必要的依赖项和库文件一同封装, 保证软件独立安装运行; 应用程序应封装为可执行文件, 支持双击或命令行输入完成安装;
- b) 主节点应定期提供系统更新补丁, 适配异构建模平台的版本迭代与功能升级。
- c) 从节点应提供基础支撑层所需依赖项与库文件的专用安装程序, 支持双击或命令行输入完成安装, 保证与主节点的兼容性。

8 IVCPS 多类别模型融合系统运行环境要求

8.1 硬件环境

8.1.1 主节点硬件环境

主节点硬件配置应满足以下最低要求:

- a) 内存容量: 1GB及以上;
- b) 硬盘容量: 2GB及以上;
- c) 屏幕分辨率: 1360×768及以上。

8.1.2 从节点硬件环境

从节点硬件配置应满足所在平台运行异构模型的硬件要求, 包括处理器、内存容量、硬盘容量、显卡等, 应与异构模型的求解需求相匹配。

8.2 系统环境

主节点应部署在Windows7(SP1)及以上版本的操作系统。8.2.2从节点应部署与所在建模平台相兼容的操作系统, 满足异构模型的运行与求解需求。

8.3 网络环境

系统应在如下网络环境中运行:

- a) 系统应在局域网环境下运行, 支持有线网络、无线网络两种组网方式;
- b) 应保证系统所用端口的通信畅通, 保障网络通信的稳定性与可靠性;
- c) 主从节点间的数据传输应具备足够的网络带宽, 满足实时数据交互的传输需求;
- d) 主从节点间的通信应遵循RFC791、RFC9293规定的TCP/IP规范, 优先采用TCP协议保障数据传输的可靠性。

[参考: RFC 791:1981、RFC 9293:2022]

中国智能交通产业联盟

中国智能交通产业联盟

T/ITS0323-202X

中国智能交通产业联盟

中国智能交通产业联盟

标准

智能汽车信息物理系统多类别模型融合方法技术指南

T/ITS 0323-202x

北京市海淀区西土城路 8 号 (100088)

中国智能交通产业联盟印刷

网址: <http://www.c-its.org.cn>

202X 年 XX 月第一版 202X 年 XX 月第一次印刷