

ICS XXXX

CCS XXXX

T 团 体 标 准

T/SCGS XXXXXX—XXXX

面向多内核兼容的几何建模接口规范 (征求意见稿)

Multi-Kernel Compatible Geometry Modeling Interface Specification

XXXX-XX-XX发布

XXXX-XX-XX实施

中国图学学会 发布

目 次

前 言 II

引 言 III

1. 范围 1

2. 规范性引用文件 1

3. 术语和定义 1

4. 总体要求 2

 4.1. 接口设计要求 2

 4.2. 基本数据类型要求 3

 4.3. 拓扑和几何对象要求 3

 4.4. 数学精度和容差要求 3

 4.5. 一致性要求 4

 4.6. 接口能力覆盖要求 4

5. 多内核几何建模接口体系架构 5

 5.1. 总体架构 5

 5.2. 分层架构运行机制 5

 5.3. 多内核切换策略 6

 5.4. 算法工厂 6

 5.5. 调用流程 7

6. 双向接口体系 8

 6.1. 双向接口体系总体要求 8

 6.2. 向下兼容内核的适配接口要求 8

 6.3. 向上提供给 CAD 业务的统一接口要求 9

 6.4. 接口能力分类与能力声明 10

 6.5. 一致性评价与符合性验证 10

 6.6. 不同内核差异处理 11

7. 应用示例 12

 7.1. 示例背景 12

 7.2. 示例对象与建模任务 13

 7.3. 统一接口调用流程 14

7.4. 多内核切换过程 14

7.5. 能力声明与降级处理 15

7.6. 一致性验证结果 15

附录 A（资料性） 几何内核多引擎切换机制图 17

前 言

本文件按照GB/T 1.1—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》的规定起草。

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这些专利的责任。

本文件由中国船舶集团海舟系统技术有限公司提出。

本文件由中国图学学会归口。

本文件起草单位：中国船舶集团海舟系统技术有限公司、北京数码大方科技股份有限公司。

本文件主要起草人：陈彦如、高德朋、赵中枢、王耀、李修安、李勇、高超、朱道云。

本文件为首次发布。

引 言

在三维CAD/CAE/CAM工业软件研发及船舶数字化设计系统建设等领域，几何建模内核是核心基础组件，目前行业内存在多种异构几何建模内核，各内核在数学表达、拓扑结构、接口定义、算法实现等方面存在底层差异，导致上层CAD软件、业务逻辑与特定内核深度绑定，内核迁移成本高、软件资产重用困难、跨内核适配繁琐等问题突出。为解决上述行业痛点，规范多内核兼容的几何建模接口设计、实现与应用，搭建底层内核屏蔽+上层应用适配的双向统一抽象接口架构，实现上层CAD软件、业务逻辑与几何计算引擎的彻底解耦，支撑底层内核的无感切换、跨内核业务的平滑迁移及上层CAD软件与多内核的无缝适配，制定本文件。

本文件规定的多内核几何建模接口体系，确立了“一次封装，多核适配”的技术路线，通过统一的分层架构、算法工厂模式及标准化接口定义，屏蔽不同内核的底层差异，统一上层CAD业务的调用标准，为三维CAD/CAE/CAM工业软件研发、三维图形平台建设提供通用、规范的技术依据，助力工业软件国产化发展过程中多内核协同架构的工程化落地。

本文件的制定立足国内产业需求，自主创新设计多内核切换与统一适配体系，与国内现有几何建模相关标准形成互补衔接，完善工业软件几何建模标准体系，同时与国际上构建异构CAD融合平台的前沿研究方向相呼应，具有前瞻性和实用性。

面向多内核兼容的几何建模接口规范

1 范围

本文件规定了多内核兼容几何建模接口的技术要求，包括基础数据类型、拓扑对象、几何对象、容差体系、内核适配接口、统一业务接口、内核切换机制、能力声明、错误处理、验证评价等内容。

本文件适用于三维CAD/CAE/CAM平台、三维图形平台、船舶数字化设计平台及其他需要集成、封装或切换几何建模内核的软件系统，可作为开源或商用几何建模内核进行接口适配、能力封装、统一调用和兼容性验证的技术依据。

本文件面向几何建模内核适配与接口封装，重点规定多类几何建模内核在统一接口层下的数据表达、接口组织、调用约束、能力声明和验证方法，不直接规定CAD软件的具体业务功能、交互流程和行业应用逻辑，也不规定具体几何建模内核内部算法的实现方法。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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/T 11457-2006 信息技术 软件工程术语

GB/T 17304-2009 CAD通用技术规范

SJ/T 12257-2026 工业软件 几何建模引擎应用程序接口规范

3 术语和定义

GB/T 11457-2006、GB/T 17304-2009界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1. 几何建模内核 **geometric modeling kernel**

实现几何形体的数学表达、拓扑构造、几何计算及特征建模的核心软件组件，是三维CAD/CAE/CAM软件的底层基础，本文件中统称异构的几何建模内核为内核A、内核B、内核C等。

3.2. 多内核兼容 **multi-kernel compatible**

指上层CAD软件、业务逻辑通过标准化接口，能够与不同几何建模内核实现无缝对接，且在内核切换时无需修改上层代码，实现底层内核的无感切换。

3.3. 几何建模接口 **geometric modeling interface**

连接几何建模内核与上层CAD软件、业务逻辑的标准化交互通道，包括数据接口、算法接口、调度接口等，是实现多内核兼容的核心载体。

3.4. 算法工厂 algorithm factory

基于工厂设计模式构建的几何引擎加载与管理模块，负责不同几何建模内核的动态链接、实例化及算法对象的创建与分发。

3.5. 抽象接口 abstract interface

屏蔽不同几何建模内核底层差异，统一定义的通用接口规范，是上层调用与底层实现之间的中间层，包括数据抽象接口和算法抽象接口。

3.6. 适配层 adaptation layer

实现抽象接口与具体几何建模内核底层接口映射的中间层，负责将标准化的抽象接口调用转换为对应内核的原生接口调用。

3.7. 内核实现层 kernel implementation layer

由具体几何建模内核及其原生数据结构、原生接口、算法实现、运行库和相关资源组成的底层实现部分。内核实现层负责执行实际几何计算和模型构造，并通过适配层向抽象接口层提供能力，不直接面向上层CAD/CAE/CAM业务开放。

3.8. 一致性评价 conformance evaluation

针对同一输入、同一容差和同一接口调用条件下，不同几何建模内核返回结果在几何形状、拓扑结构、属性信息、错误状态和业务语义等方面是否满足规定要求所开展的检查、验证和判定活动。

4 总体要求

4.1. 接口设计要求

4.1.1. 解耦性要求

几何建模接口应实现上层CAD软件/业务逻辑与底层几何建模内核的彻底解耦，上层代码仅依赖标准化的抽象接口，不直接调用任何内核的原生接口，底层内核的变更不影响上层代码的正常运行。

4.1.2. 统一性要求

接口设计应统一不同内核的数学表达、拓扑结构、算法入参/出参定义及调用方式，消除多内核在接口层面的歧义，确保上层CAD软件通过统一的API即可实现对不同内核的调用。

4.1.3. 兼容性要求

接口应兼容行业内主流几何建模内核（内核A、内核B、内核C等）。

4.1.4. 可扩展性要求

接口架构应具备良好的可扩展性，新增几何建模内核时，仅需实现对应的适配层接口，无需修改抽象接口及上层调用代码，支持内核的按需扩展与接入。

4.1.5. 鲁棒性要求

多内核切换过程中，接口应保证几何计算结果的一致性、数据传输的完整性及算法调用的稳定性，明确错误处理机制，对内核接入、切换、调用过程中的异常进行统一管控。

4.2. 基本数据类型要求

为消除不同内核在数学数据表达上的底层差异，本文件规定多内核兼容几何建模接口的基础数学类型统一定义规范，所有几何计算与接口交互均基于本规范的数学类型实现，具体包括：

- a) 点：规定二维点、三维点的坐标表达格式，采用笛卡尔直角坐标系，坐标值为双精度浮点数，定义点的创建、赋值、坐标获取等基础操作接口；
- b) 向量：规定二维向量、三维向量的分量表达格式，定义向量的创建、归一化、点乘、叉乘、模长计算等基础操作接口；
- c) 矩阵：规定 2×2 、 3×3 、 4×4 矩阵的元素表达格式，主要用于几何变换，定义矩阵的创建、乘法、求逆、转置、单位矩阵生成等基础操作接口；
- d) 坐标系：规定全局坐标系、局部坐标系的定义规范，包括原点、坐标轴方向的统一表达，定义坐标系的创建、变换、坐标转换等基础操作接口；
- e) 标量：规定几何计算中通用标量的数值类型为双精度浮点数，明确数值范围与精度要求。
- f) 参数区间：应表达曲线参数区间和曲面 u/v 参数区间，支持闭区间、半开区间、周期区间、裁剪区间和区间有效性检查。
- g) 包围盒：应支持二维和三维轴对齐包围盒，宜提供创建、扩展、合并、相交、包含、距离估计和有效性检查接口。
- h) 变换矩阵：应表达平移、旋转、缩放、镜像、复合变换及坐标系间变换，并应明确对点、向量、曲线、曲面、拓扑对象的作用规则。

以上基础数学类型为抽象数据类型，独立于任何具体内核的原生数学类型，适配层负责实现抽象数学类型与各内核原生数学类型的双向映射与转换。

4.3. 拓扑和几何对象要求

为消除不同内核在拓扑结构定义上的底层差异，本文件规定多内核兼容几何建模接口的拓扑和几何对象统一抽象定义规范，明确各对象的层级关系、核心属性及基础操作，具体包括：

- a) 顶点：几何形体的最基本拓扑单元，对应三维空间中的一个点，定义顶点的唯一标识、坐标属性、关联边等核心属性及基础操作接口；
- b) 边：连接两个顶点的一维拓扑单元，由曲线构成，定义边的唯一标识、关联顶点、几何曲线、方向等核心属性及基础操作接口；
- c) 环：由一组首尾相连的边构成的闭合拓扑单元，定义环的唯一标识、关联边、闭合性等核心属性及基础操作接口；
- d) 面：由一个外环和若干内环界定的二维拓扑单元，定义面的唯一标识、关联环、几何曲面、法向等核心属性及基础操作接口；
- e) 体：由一组相互连接的面构成的三维拓扑单元，是几何建模的核心对象，定义体的唯一标识、关联面等核心属性及基础操作接口。

以上拓扑和几何对象为抽象对象，独立于任何具体内核的原生拓扑/几何对象，各对象的核心属性为所有内核的通用属性，适配层负责实现抽象拓扑/几何对象与各内核原生拓扑/几何对象的双向映射、属性提取与同步。

4.4. 数学精度和容差要求

为保证多内核环境下几何计算结果的一致性，本文件规定多内核兼容几何建模接口的数学精度和容差统一规范，作为所有几何计算、数值比较、拓扑判断的基准，具体包括：

a) 数值比较精度：规定几何计算中浮点数比较的绝对精度和相对精度阈值，消除不同内核在数值比较上的差异；

b) 几何计算容差：规定点重合容差核心几何容差的阈值，作为几何构造、几何查询、拓扑操作的统一基准；

c) 容差传递规则：规定几何操作过程中容差的传递方式，明确复合操作的容差计算原则，保证多步骤几何计算的精度一致性；

d) 精度适配要求：适配层应实现本文件规定的统一容差与各内核原生容差的映射与转换，确保上层统一容差设置在底层内核中有效执行。

所有几何算法接口的实现，均应遵循本文件规定的数学精度和容差规范，确保不同内核在相同输入条件下的计算结果满足一致性要求。

4.5. 一致性要求

多内核兼容接口不要求不同内核的计算结果在二进制层面完全一致，但应在统一容差、统一输入和统一业务语义下满足几何等价、拓扑合法、属性可比和失败状态可解释的要求。

顶点、边、面等具有底层几何支撑的拓扑对象，应在统一容差下比较其几何位置、参数范围、方向、关联属性和必要的几何量。

环和体等复合拓扑对象，应优先比较其关联的顶点、边、面集合及连接关系，并结合对象属性、方向关系和闭合性进行一致性判断。

对于同一输入在不同内核中产生等价但拓扑分裂方式不同的结果，应结合业务语义和容差规则判定，不应简单以对象数量完全相同作为唯一依据。

对于算法失败、部分成功或降级成功的情况，应返回统一状态，并说明失败原因、降级策略和可继续处理的结果范围。

4.6. 接口能力覆盖要求

多内核适配不应以少数示例接口替代完整能力体系。各内核适配模块应提供能力声明表，说明基础能力、推荐能力和扩展能力的支持情况。能力状态至少应包括完全支持、不支持、部分支持、降级支持和不适用。

基础能力项应覆盖基础数据类型、基础拓扑对象、基础几何对象、基本体创建、基础查询、基础曲线曲面、基础布尔和基础容差控制。推荐能力项宜覆盖圆角、倒角、抽壳、偏置、扫掠、放样、缝合、修复和曲面分析。扩展能力项可覆盖高级特征、行业专用特征、复杂曲面、大模型轻量化、网格与B-Rep混合建模等能力。

5 多内核几何建模接口体系架构

5.1. 总体架构

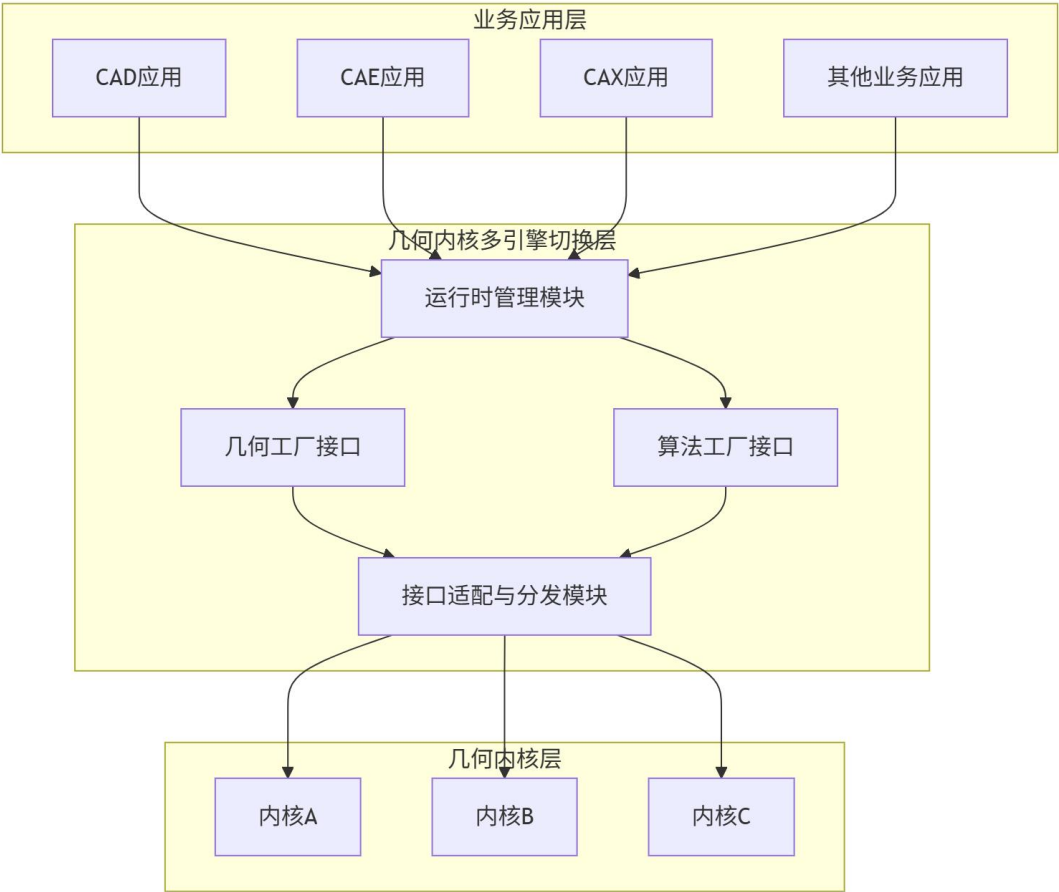


图 1 几何内核多引擎切换机制在 CAX 系统中的位置示意图

本文件规定的多内核兼容几何建模接口采用“抽象接口层、适配层、内核实现层”三层架构。该架构面向上层CAD/CAE/CAM业务提供统一接口，向下通过适配层连接开源内核以及其他国产或商用几何建模内核，实现“一次封装，多核适配”的目标。

总体架构应包含上层业务、统一业务接口、抽象接口层、运行时调度与工厂、适配层和内核实现层。其中，上层业务只面向统一业务接口；抽象接口层定义通用对象和算法接口；运行时调度与工厂负责接口实例获取和算法对象创建；适配层负责数据、对象和算法的双向转换；内核实现层负责实际几何计算。

5.2. 分层架构运行机制

5.2.1. 抽象接口层

抽象接口层是多内核兼容架构的上层统一规范层，独立于任何具体几何建模内核，负责定义抽象数据类型、抽象拓扑对象、抽象几何对象、抽象算法接口、统一错误码和核心调度接口。

抽象接口层应作为上层CAD/CAE/CAM业务的唯一调用入口。

抽象接口层不应包含具体内核原生实现，不应依赖具体内核头文件、动态库或原生数据结构。

抽象接口层应保持接口语义稳定，接口发布后不宜改变既有入参、出参和错误语义。

抽象接口层应通过能力查询机制识别当前内核是否支持某项接口能力。

5.2.2. 适配层

适配层位于抽象接口层和内核实现层之间，是实现多内核兼容的核心中间层。每个接入内核应具有相对独立的适配模块，负责完成抽象接口与目标内核原生接口之间的数据转换、对象转换、算法调用和结果回填。

适配层应实现抽象数据类型与内核原生数据类型的双向转换。

适配层应实现抽象拓扑/几何对象与内核原生对象的双向映射、属性同步和生命周期管理。

适配层应封装目标内核原生算法差异，将统一算法调用转换为目标内核可执行的接口调用。

适配层应处理目标内核的容差、异常、错误码、能力缺失和专有对象转换问题。

5.2.3. 内核实现层

内核实现层由具体几何建模内核及其运行库、原生数据结构、原生接口和算法实现组成，是几何计算的实际执行层。内核实现层不得直接暴露给上层业务，应通过适配层接受调用并返回结果。

当内核版本升级、接口变化或算法行为变化时，应优先通过更新对应适配模块处理，不应要求上层业务直接修改调用逻辑。

5.3. 多内核切换策略

多内核切换应在不改变上层业务代码的前提下完成。对于内核需求固定、部署环境明确的场景，宜采用编译时或部署配置阶段确定目标内核的方式完成内核选型和接口绑定；对于需要统一入口管理的场景，可通过全局调度管理模块提供工厂获取、能力查询和当前内核标识管理。

5.3.1. 编译时切换策略

在编译配置中通过宏定义、构建选项或配置文件指定目标内核。编译或链接阶段引入对应内核的适配模块、头文件依赖和动态库引用。程序初始化阶段根据配置创建对应内核的具体工厂实例，并绑定到抽象工厂接口。上层调用统一接口时，通过抽象接口和工厂获得算法对象，不需要感知当前底层内核。

5.3.2. 调度管理要求

调度管理模块应提供全局统一的接口实例获取入口，避免上层业务直接创建内核适配对象。调度管理模块应维护当前内核标识、已加载工厂实例、能力声明和错误状态。调度管理模块不应改变抽象接口语义，不应将内核专有作为默认通用能力暴露。当目标内核不支持某项能力时，应依据能力声明返回不支持、部分支持或降级支持状态。

5.4. 算法工厂

算法工厂用于统一管理几何对象和几何算法对象的创建过程，避免上层业务直接依赖具体内核实现类。算法工厂应分为几何对象工厂和几何算法工厂，也可根据工程实现合并为统一工厂接口。

5.4.1. 算法工厂核心设计要求

抽象算法工厂应独立于具体内核，仅定义统一工厂接口。具体算法工厂应由各内核适配模块实现，并负责目标内核原生资源加载、对象创建和算法实例创建。工厂创建的对象应以抽象对象或抽象算法接口形式返回，不应向上层返回内核原生对象。工厂应支持能力查询和降级策略查询，便于上层业务在调用前判断能力可用性。

5.4.2. 几何对象工厂

几何对象工厂负责抽象拓扑和几何对象的实例化，宜提CreateVertex、CreateEdge、CreateWire、CreateFace、CreateBody、CreateCurve、CreateSurface等接口。各内核具体对象工厂应将抽象对象创建请求转换为目标内核原生对象创建操作，并建立原生对象与抽象对象之间的映射关系。

5.4.3. 几何算法工厂

几何算法工厂负责抽象几何算法对象的实例化，宜提CreateDistanceAlgo、CreateFeatureAlgo、CreateIntersectionAlgo、CreateBooleanAlgo、CreateRepairAlgo等接口。各内核具体算法工厂应根据目标内核能力创建对应算法实例，并通过适配层完成入参转换、原生算法调用和出参转换。

5.5. 调用流程

统一接口调用流程应为：上层业务发起请求，经统一业务接口进入抽象接口层；抽象接口层通过调度管理模块获得当前内核对应的工厂实例；工厂创建对象或算法实例；适配层将抽象入参转换为内核原生入参；内核实现层执行计算；适配层将结果转换为抽象对象、抽象数据或标准状态；统一接口将结果返回上层业务。

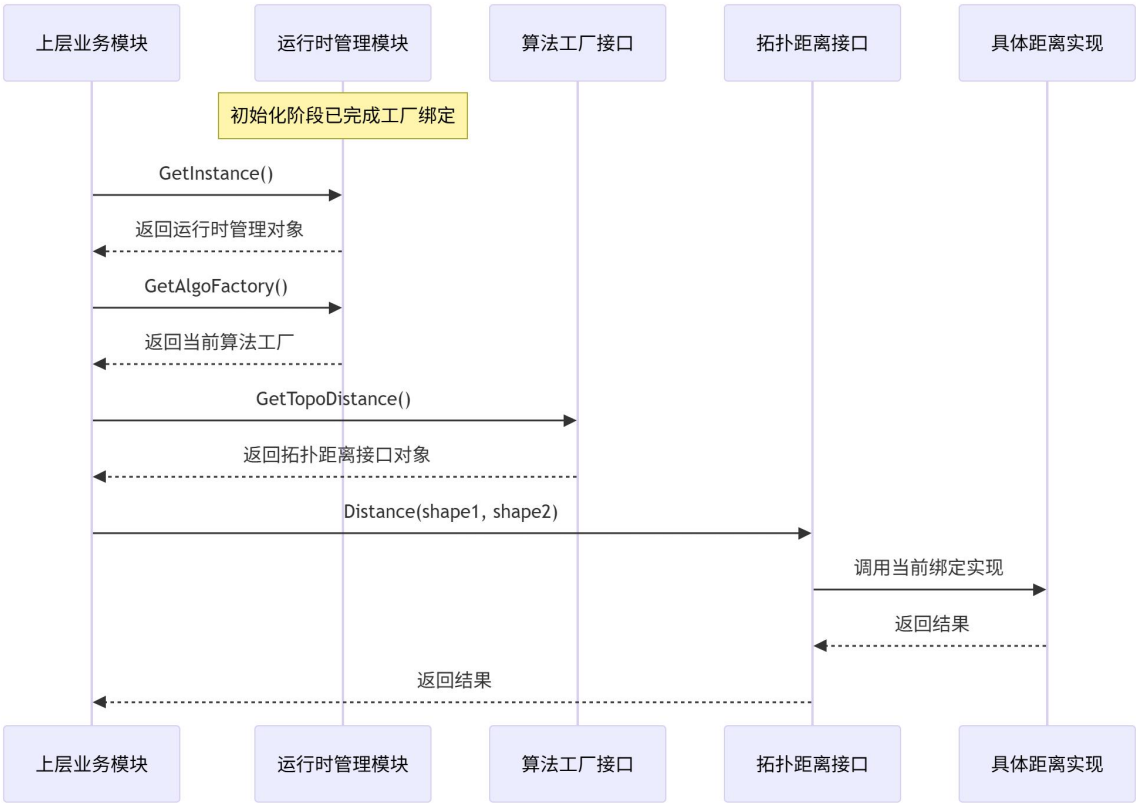


图 2 拓扑距离计算调用时序示意图

6 双向接口体系

6.1. 双向接口体系总体要求

双向接口体系包括向下兼容内核的适配接口和向上提供给CAD业务的统一接口。向下接口负责屏蔽不同内核的底层差异，向上接口负责向CAD/CAE/CAM业务提供统一、稳定、易用的几何建模能力。

6.2. 向下兼容内核的适配接口要求

向下兼容内核的适配接口应覆盖数据类型适配、拓扑对象适配、几何对象适配、算法适配和内核差异处理。适配接口应实现抽象接口层与内核实现层之间的双向映射，确保数据、对象、算法和状态信息能够在两层之间一致传递。

6.2.1. 适配接口设计原则

- a) 一对一映射：抽象接口层中应适配的抽象数据类型、对象类型和算法接口，在适配层应具有明确映射关系；
- b) 双向转换：适配接口应支持抽象类型到内核原生类型、内核原生类型到抽象类型的转换；
- c) 一致性保证：转换过程中应保持几何特征、拓扑关系、对象属性、容差信息和错误状态一致；
- d) 隔离性要求：各内核适配模块之间应相互独立，某一内核适配实现的变化不应影响其他内核适配模块。

6.2.2. 数据类型适配接口

应为每个抽象数学类型提供与目标内核原生数学类型之间的适配接口，包括类型创建、属性赋值、属性提取、类型转换等，示例如下：

- a) PointAdapter：实现抽象 Point 与多内核点类型的双向转换；
- b) VectorAdapter：实现抽象 Vector 与多内核向量类型的双向转换；
- c) MatrixAdapter：实现抽象 Matrix 与多内核矩阵类型的双向转换。

6.2.3. 拓扑对象适配接口

应为每个抽象拓扑对象提供与目标内核原生拓扑对象之间的适配接口，包括对象创建、属性映射、关联关系同步、对象转换等，示例如下：

- a) VertexAdapter：实现抽象 Vertex 与多内核顶点类型的双向转换，同步坐标、唯一标识等核心属性；
- b) EdgeAdapter：实现抽象 Edge 与多内核边类型的双向转换，同步关联顶点、几何曲线等核心属性；
- c) BodyAdapter：实现抽象 Body 与多内核原生体类型的双向转换，同步关联面、拓扑类型等核心属性。

6.2.4. 几何对象适配接口

应为每个几何对象提供与目标内核原生几何对象之间的适配接口，应明确参数域、周期性、方向、求值和导数语义的映射规则。示例如下：

- a) CurveAdapter：实现抽象 Curve 与多内核原生曲线基类的双向转换，同步参数域定义、点求值和一阶、二阶导数计算语义；
- b) SurfaceAdapter：实现抽象 Surface 与多内核原生曲面基类的双向转换，同步 u/v 参数域定义、法向计算、点求值和一阶、二阶导数计算语义。

6.2.5. 算法适配接口

应为每个抽象算法接口实现与目标内核原生算法接口之间的适配接口，包括算法实例创建、入参转换、出参转换、容差设置、算法调用等。典型算法适配接口包括距离查询、相交查询、布尔运算、圆角倒角、抽壳、偏置、扫掠、放样、缝合和修复等。示例如下：

- a) DistanceAlgoAdapter：实现抽象距离算法接口与多内核距离算法接口的适配，完成入参几何对象的转换、原生算法调用、出参结果的转换；
- b) BooleanAlgoAdapter：实现抽象布尔运算算法接口与多内核原生布尔运算算法接口的适配，完成入参几何对象的转换、原生算法调用、出参结果的转换。

6.3. 向上提供给 CAD 业务的统一接口要求

向上提供给CAD业务的统一接口是抽象接口层的核心接口，负责为上层CAD软件、业务逻辑提供标准化、统一化的几何建模调用入口，屏蔽所有底层内核的差异。应以业务可理解、调用一致、语义稳定为原则，覆盖基础建模、曲线曲面、特征建模、修改性算法、查询分析和数据交换等能力。

本文件规定的向上统一接口的基础定义、参数规范、调用约定和能力范围应符合SJ/T 12257-2026相关要求。在此基础上，针对多内核兼容场景，补充以下统一要求：

- a) 所有向上接口的入参和出参必须统一基础数据类型和统一抽象拓扑/几何对象，不得直接使用内核原生数据类型和对象；
- b) 接口应统一返回本文件规定的标准化状态码和错误信息，包括成功、失败、部分成功、降级成功、不支持、不适用等。

向上统一接口应覆盖以下核心能力域，各能力域的具体接口定义应遵循SJ/T 12257-2026的对应章节：

- a) 基础几何接口：包括点、线、圆、圆弧、椭圆、平面、球面、圆柱面、圆锥面、圆环面、样条曲线、样条曲面等基础几何对象的创建、获取、编辑、评估、变换、参数化和外部数据交互等，具体要求见 SJ/T 12257-2026 附录 A.7；
- b) 高级曲线曲面接口：包括曲线曲面操作、几何相交处理、几何构造与生成、几何修复与优化、几何变换与调整、裁剪曲面输出等，用于支持 CAD 层对复杂曲线曲面对象的构造、求交、裁剪、拼接和优化处理，具体要求见 SJ/T 12257-2026 附录 A.8；
- c) 拓扑与欧拉操作接口：包括顶点、边、环、面、壳、块、体等拓扑结构的查询、创建、分裂、合并、连接关系判断和低层欧拉编辑操作，用于支撑 CAD 层的精确拓扑建模与拓扑重建，具体要求见 SJ/T 12257-2026 附录 A.9、A.10；
- d) 模型分析与查询接口：包括几何分析、模型验证与检查、空间位置关系查询、高级计算、体/面/边/点的分类、距离、包围盒、相交、自交、合法性检查等，用于 CAD 层完成模型质量检查、拾取判断、空间查询和几何分析，具体要求见 SJ/T 12257-2026 附录 A.11；
- e) 模型修复接口：包括几何删除、体修复、面/边修复、曲面修复、冗余处理、自交修复、退化修复等，用于 CAD 层对导入模型、异常模型和布尔失败模型进行修补与恢复，具体要求见 SJ/T 12257-2026 附录 A.12；
- f) 模型修改与特征建模接口：包括布尔操作、倒角/圆角、放样与扫掠、偏移、抽壳、拔模、旋转、拉伸、几何变换、压印、投影、截面、切割及高级特征操作等，用于 CAD 层实现参数化建模和直接建模中的核心修改性算法，具体要求见 SJ/T 12257-2026 附录 A.13；
- g) 体素创建与基础构造接口：包括线框体构造、面体构造、基本实体构造、曲面驱动实体构造和

拓扑构造等，用于 CAD 层创建标准基本体、片体、线体以及由曲线曲面驱动生成的实体模型，具体要求见 SJ/T 12257-2026 附录 A. 14。

6.4. 接口能力分类与能力声明

6.4.1. 接口能力分类原则

接口能力应按照基础能力、推荐能力和扩展能力进行分类。基础能力是支撑几何建模内核接入的最小能力集合；推荐能力是支撑常见CAD建模流程的建议能力集合；扩展能力是根据行业场景、内核特长和业务需求可选实现的能力集合。

6.4.2. 基础能力集

基础能力集应包括基础数据类型、基础拓扑对象、基础几何对象、基本体创建、基础查询、基础曲线曲面、基础布尔和基础容差控制。原则上，作为几何建模内核适配对象的内核应支持基础能力集；确有缺失时，应在能力声明表中明确说明。

6.4.3. 推荐能力集

推荐能力集宜包括圆角、倒角、抽壳、偏置、扫掠、放样、缝合、修复和曲面分析等能力。推荐能力可根据目标业务场景选择实现，但应在能力声明表中说明支持程度和降级策略。

6.4.4. 扩展能力集

扩展能力集可包括高级特征、行业专用特征、复杂曲面、大模型轻量化、网格与B-Rep混合建模、模型简化、可制造性分析和行业专用检查等能力。

6.4.5. 能力声明表

每个内核适配模块应提供能力声明表，至少包含能力项、能力分类、支持状态、降级策略、验证方法和备注。能力声明表示例如表1所示。

表 1 能力声明表示例

能力项	能力分类	A 内核	B 内核	其它内核	支持状态	降级策略	验证方法
拉伸	基础能力	支持	支持	待声明	完全支持	无	示例模型验证
圆角	推荐能力	部分支持	支持	待声明	部分支持	复杂场景返回降级状态	容差与拓扑检查
抽壳	推荐能力	不支持/受限	支持	待声明	部分支持	失败返回错误码	失败可诊断
大模型轻量化	扩展能力	待声明	部分支持	待声明	部分支持	按离散精度降级	性能与误差验证

6.5. 一致性评价与符合性验证

6.5.1. 一致性评价原则

一致性评价应以几何等价、拓扑合法、容差范围内一致、业务语义一致和失败状态可解释为基本原则。不同内核的结果不要求二进制完全一致，但应满足统一接口规定的输入输出语义和容差要求。

6.5.2. 几何一致性评价

几何一致性评价宜包括点距误差、曲线偏差、曲面偏差、面积误差、体积误差、包围盒误差和法向一致性。评价时应记录输入模型、调用接口、容差设置、输出对象和误差计算方法。

6.5.3. 拓扑一致性评价

拓扑一致性评价宜包括顶点、边、环、面、体数量，连通关系，内外环关系，面方向，非流形检查，自交检查和闭合性检查。对于拓扑分裂方式不同但几何和业务语义等价的结果，应结合容差和语义进行判定。

6.5.4. 语义一致性评价

语义一致性评价宜包括特征语义、参数语义、操作语义、错误语义和降级语义。例如，倒角结果应保持被倒角边的业务语义，布尔结果应保持并、交、差操作语义，失败结果应能说明失败原因和后续处理建议。

6.5.5. 测试模型集要求

符合性验证宜建立测试模型集，至少覆盖基本体、曲面特征、圆角/倒角、布尔、薄壁、小边小面、退化几何、非流形或近非流形情况以及导入模型。

6.5.6. 符合性判定

符合性判定结果可分为通过、有条件通过、部分通过、不通过和不适用。判定结论应说明适用能力范围、测试模型范围、容差条件、失败用例和整改建议。

6.6. 不同内核差异处理

不同几何建模内核在几何表达、拓扑组织、容差控制、算法返回机制及专有对象支持能力等方面可能存在差异。为保证多内核兼容接口体系在不同内核之间具有一致的调用语义和可解释的执行结果，适配层应对不同内核的差异进行统一识别、转换、封装和声明。

首先，对于同一几何概念在不同内核中的表达差异，适配层应建立统一的抽象表达模型。例如，同一类曲线、曲面、拓扑边、拓扑面或实体对象，在不同内核中可能具有不同的数据结构、参数域定义、方向约定、周期性表达方式或边界表示方式。适配层应将各内核的原生对象转换为本文档规定的统一抽象对象，并保证几何属性、拓扑关系、方向信息、参数范围及关联关系在转换过程中保持一致。对于存在多种等价表达方式的对象，应明确标准化转换规则，避免同一对象在不同内核下产生接口语义不一致的问题。

其次，对于同一算法在不同内核中的默认容差差异，适配层应以本文档规定的统一容差体系为基准，对各内核原生算法的容差参数进行映射和控制。不同内核在点重合判断、边界识别、曲面求交、布尔运算、缝合修复等算法中可能采用不同的默认容差、相对容差或局部容差策略。适配层应在调用原生算法前完成统一容差到内核容差的转换，并在算法返回后对结果进行必要的一致性校验，确保不同内核在相同输入条件下的结果满足统一的精度和容差要求。

再次，对于同一失败场景下不同内核的返回差异，适配层应建立统一的错误码、状态码和诊断信息机制。不同内核在算法失败、输入非法、对象退化、拓扑不合法、计算不收敛、容差不足或功能不支持等情况下，可能返回空对象、异常、布尔值、错误码或部分结果。适配层应将这些原生返回形式统一转换为标准化的接口返回状态，并给出可解释的失败原因、失败阶段和建议处理方式，避免上层业务直接依赖具体内核的错误表达方式。

对于内核专有对象，适配层应优先判断其是否能够映射为本文档规定的通用抽象对象。若内核专有对象能够通过几何等价、拓扑等价或语义等价方式转换为通用对象，则应按照统一抽象对象进行封装，

并保留必要的属性信息。若该对象仅能部分转换，例如只能保留几何形状而无法完整保留参数特征、历史特征或内核专有语义，则应在转换结果中明确标记为“部分支持”，并说明被保留和丢失的信息范围。

对于不可转换对象或当前接口体系无法完整表达的内核专有能力和语义，适配层不应强行转换为不准确的通用对象，而应返回“不可支持”状态，并提供明确的能力声明和错误说明。能力声明中应区分“完全支持”“部分支持”“降级支持”和“不可支持”等状态。其中，完全支持表示该能力可通过统一接口完整表达和执行；部分支持表示部分几何、拓扑或语义信息可被保留；降级支持表示可通过替代算法或简化表达完成近似处理；不可支持表示当前内核能力或统一接口体系无法完成该对象或算法的可靠转换与调用。

通过上述差异处理机制，双向接口体系能够在屏蔽底层内核差异的同时，保证接口行为的一致性、算法结果的可解释性和能力边界的透明性，从而支撑上层 CAD/CAE/CAM 业务在多内核环境下的稳定迁移和统一调用。

7 应用示例

7.1. 示例背景

为说明本文件规定的多内核兼容几何建模接口在实际建模过程中的应用方式，本章以一个带孔支座类零件为例，说明上层CAD业务如何通过统一接口完成基础体创建、布尔并、布尔差、圆角处理、模型查询和一致性验证等操作。

本示例不限定具体CAD软件，也不限定具体几何建模内核。示例中的“内核A”“内核B”分别代表不同来源、不同实现方式的几何建模内核。上层CAD业务仅调用统一抽象接口，不直接调用任何具体内核的原生接口，也不直接依赖具体内核的原生数据类型和原生拓扑对象。

通过本示例，应能够验证以下内容：

- a) 上层业务可通过统一接口完成典型实体建模流程；
- b) 同一建模流程可在不同几何建模内核之间切换执行；
- c) 适配层可完成抽象对象与内核原生对象之间的双向转换；
- d) 布尔运算、圆角等核心建模能力可通过能力声明进行统一管理；
- e) 不同内核生成的模型结果应满足统一的几何、拓扑和业务语义一致性要求。

7.2. 示例对象与建模任务

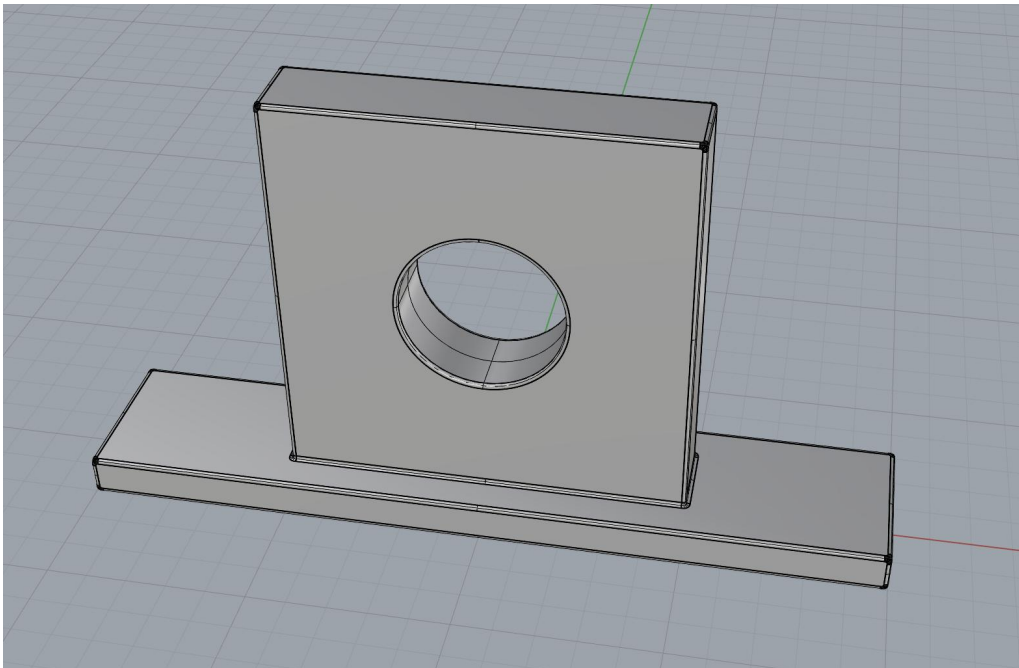


图 3 带孔支座类零件

本示例构建一个带孔支座类零件。该零件由上部立板、底座、贯穿圆孔和小半径圆角组成。建模过程包括两个长方体的布尔并、圆柱体刀具体的布尔差，以及对模型边界进行圆角处理。

示例零件的建模任务包括：

- a) 创建上部长方体，尺寸为 10×2×10；
- b) 创建底座长方体，尺寸为 15×4×1；
- c) 对上部长方体和底座长方体执行布尔并操作，形成支架主体；
- d) 创建圆柱体刀具体，圆柱半径为 2，高度为 8，位于上部长方体中心区域；
- e) 使用支架主体减去圆柱体刀具体，形成贯穿圆孔；
- f) 对模型指定边执行半径为 0.01 的圆角操作；
- g) 对生成结果进行几何属性查询、拓扑属性查询和模型合法性检查；
- h) 在不同几何建模内核下重复执行相同流程，并比较结果一致性。

示例中的几何参数可采用表 2 所示参数。

表 2 带孔支座类零件应用示例

参数项	示例取值	说明
上部长方体长度	10mm	沿 X 方向
上部长方体宽度	2mm	沿 Y 方向
上部长方体高度	10mm	沿 Z 方向
底座长度	15mm	沿 X 方向
底座宽度	4mm	沿 Y 方向

底座厚度	1mm	沿 Z 方向
圆柱半径	2mm	用作布尔差刀具体
圆柱高度	8mm	贯穿上部长方体
圆角半径	0.01mm	用于边界圆角处理
建模容差	按接口统一容差设置	用于几何判断和一致性验证

为便于描述，可将底座放置在模型下部，上部长方体放置在底座中部上方，圆柱体位于上部长方体中心区域，并沿上部长方体厚度方向贯穿。实际应用中，坐标位置和方向可由上层业务根据建模坐标系统一指定。

7.3. 统一接口调用流程

上层 CAD 业务应通过统一抽象接口完成本示例的建模流程。典型调用步骤如下：

- a) 获取运行时管理模块实例；
- b) 指定或查询当前激活的几何建模内核；
- c) 查询当前内核的能力声明，确认其是否支持基础体创建、布尔并、布尔差和圆角操作；
- d) 设置统一建模容差；
- e) 调用基础体创建接口，创建尺寸为 $10 \times 2 \times 10$ 的上部长方体；
- f) 调用基础体创建接口，创建尺寸为 $15 \times 4 \times 1$ 的底座长方体；
- g) 调用布尔并接口，对两个长方体执行布尔并操作，得到支架主体；
- h) 调用圆柱体创建接口，创建半径为 2、高度为 8 的圆柱体刀具体；
- i) 调用布尔差接口，使用支架主体减去圆柱体刀具体，得到带孔支架模型；
- j) 调用圆角接口，对指定边执行半径为 0.01 的圆角处理；
- k) 调用几何属性查询接口，获取模型体积、面积、包围盒等信息；
- l) 调用拓扑属性查询接口，获取顶点、边、环、面、体等拓扑数量及关联关系；
- m) 调用模型合法性检查接口，判断结果模型是否为合法实体；
- n) 输出统一抽象 Body 对象，供上层业务继续使用。

上述流程中，上层 CAD 业务仅使用统一接口，例如 CreateBox、CreateCylinder、BooleanUnion、BooleanCut、Fillet、GetBoundingBox、GetVolume、CheckValidity 等。不同几何建模内核之间的对象表达差异、接口差异和容差差异均由适配层负责处理。若底层内核发生切换，上层业务调用流程保持不变。

7.4. 多内核切换过程

本示例可用于验证同一建模流程在不同几何建模内核下的执行一致性。上层 CAD 业务在执行建模任务前，可通过运行时或编译时管理模块指定目标内核。运行时管理模块根据目标内核标识加载对应的适配模块，并绑定相应的几何对象工厂和几何算法工厂。

多内核切换过程应满足以下要求：

- a) 上层 CAD 业务代码不因内核切换而修改；
- b) 统一接口名称、入参类型和出参类型不因内核切换而变化；
- c) 适配层负责将统一抽象对象转换为当前内核的原生对象；

- d) 当前内核执行具体几何计算后，适配层负责将原生结果转换回统一抽象对象；
- e) 切换后的建模结果应满足本文件规定的一致性要求。

例如，当目标内核为内核 A 时，CreateBox、CreateCylinder、BooleanUnion、BooleanCut、Fillet 等统一接口由内核 A 的适配模块映射到其原生建模接口；当目标内核切换为内核 B 时，上述统一接口保持不变，但由内核 B 的适配模块映射到内核 B 的原生建模接口。上层 CAD 业务不需要感知具体映射过程。

7.5. 能力声明与降级处理

在执行示例建模流程前，上层 CAD 业务应查询当前内核的能力声明。能力声明应至少包括基础体创建、布尔运算、倒角、圆角、属性查询、合法性检查等能力项。
示例能力声明如表 3 所示。

表 3 示例能力说明

能力项	能力分类	内核 A	内核 B	支持状态	处理方式
长方体创建	基础能力	支持	支持	完全支持	直接调用
圆柱体创建	基础能力	支持	支持	完全支持	直接调用
布尔并	基础能力	支持	支持	完全支持	直接调用
布尔差	基础能力	支持	支持	完全支持	直接调用
圆角	推荐能力	部分支持	支持	部分支持	复杂或小半径场景返回降级状态
几何属性查询	基础能力	支持	支持	完全支持	直接调用
拓扑属性查询	基础能力	支持	支持	完全支持	直接调用
模型合法性检查	基础能力	支持	支持	完全支持	直接调用

本示例中的圆角半径为 0.01，属于小半径圆角操作。不同内核在小半径圆角、近退化边、短边、窄面等场景下可能存在不同的处理能力。若某一内核无法稳定完成该圆角操作，适配层不应直接返回不可解释的失败结果，而应返回统一状态信息。

状态信息宜包括：

- a) 接口调用是否成功；
- b) 当前能力支持状态；
- c) 失败或降级发生的算法阶段；
- d) 失败原因或诊断信息；
- e) 是否返回未圆角模型或部分圆角模型；
- f) 建议的后续处理方式。

例如，当圆角半径过小导致某一内核圆角失败时，适配层可返回“部分支持”或“不可支持”状态，并说明失败边、失败原因及建议处理方式。上层 CAD 业务可根据返回状态选择保留原始模型、调整圆角半径，或切换至其他内核重新执行圆角操作。

7.6. 一致性验证结果

同一示例模型在不同内核中完成建模后，应对结果进行一致性验证。验证内容包括几何一致性、拓扑一致性和业务语义一致性。

几何一致性验证包括：

- a) 上部长方体、底座、圆柱孔和圆角的关键尺寸是否满足输入参数要求；
- b) 模型整体包围盒尺寸是否在统一容差范围内一致；
- c) 模型体积、面积等几何属性是否在允许误差范围内一致；
- d) 圆孔的位置、半径和贯穿方向是否符合建模语义；
- e) 圆角半径是否满足 0.01 的输入要求，或是否返回可解释的降级状态。

拓扑一致性验证包括：

- a) 模型是否为合法实体；
- b) 顶点、边、环、面、体之间的连接关系是否正确；
- c) 布尔并后两个长方体是否形成统一体对象；
- d) 布尔差后圆孔边界是否完整；
- e) 圆角操作后新增面、边的拓扑关系是否合理；
- f) 模型是否存在开缝、自交、重复面、悬挂边等异常。

一致性验证结果可采用表 4 进行记录。

表 4 一致性验证结果

验证项	判定要求	判顶结果
长方体创建	尺寸满足 $10 \times 2 \times 1$ 和 $15 \times 4 \times 1$	通过
布尔并	两个长方体形成统一实体	通过
圆柱体创建	半径为 2，高度为 8	通过
布尔差	形成贯穿圆孔	通过
圆角	半径为 0.01，或返回可解释状态	通过/有条件通过
模型合法性	应为合法实体	通过
包围盒尺寸	与输入尺寸一致或在容差范围内一致	通过
拓扑关系	无开缝、无自交、无重复面	通过
结果语义	保持带孔支架结构语义	通过

通过本示例可见，本文件规定的多内核兼容几何建模接口能够支撑简化支架类实体零件在不同几何建模内核之间的统一建模和一致性验证。上层业务在不修改建模逻辑的前提下，可通过统一接口完成基础体创建、布尔并、布尔差、小半径圆角、几何查询和模型检查等操作。

该示例虽然结构简单，但覆盖了多内核兼容接口体系中的典型关键能力，包括基础对象创建、修改性算法调用、能力声明、失败诊断、结果转换和一致性验证。当不同内核在布尔运算或小半径圆角等场景下存在实现差异时，适配层应通过统一的状态码、能力声明和降级策略向上层业务透明反馈能力边界，从而保证多内核环境下 CAD 业务调用的稳定性、可解释性和可扩展性。

附录 A 几何内核多引擎切换机制图

A.1 几何内核多引擎切换机制在 CAX 系统中的位置示意图

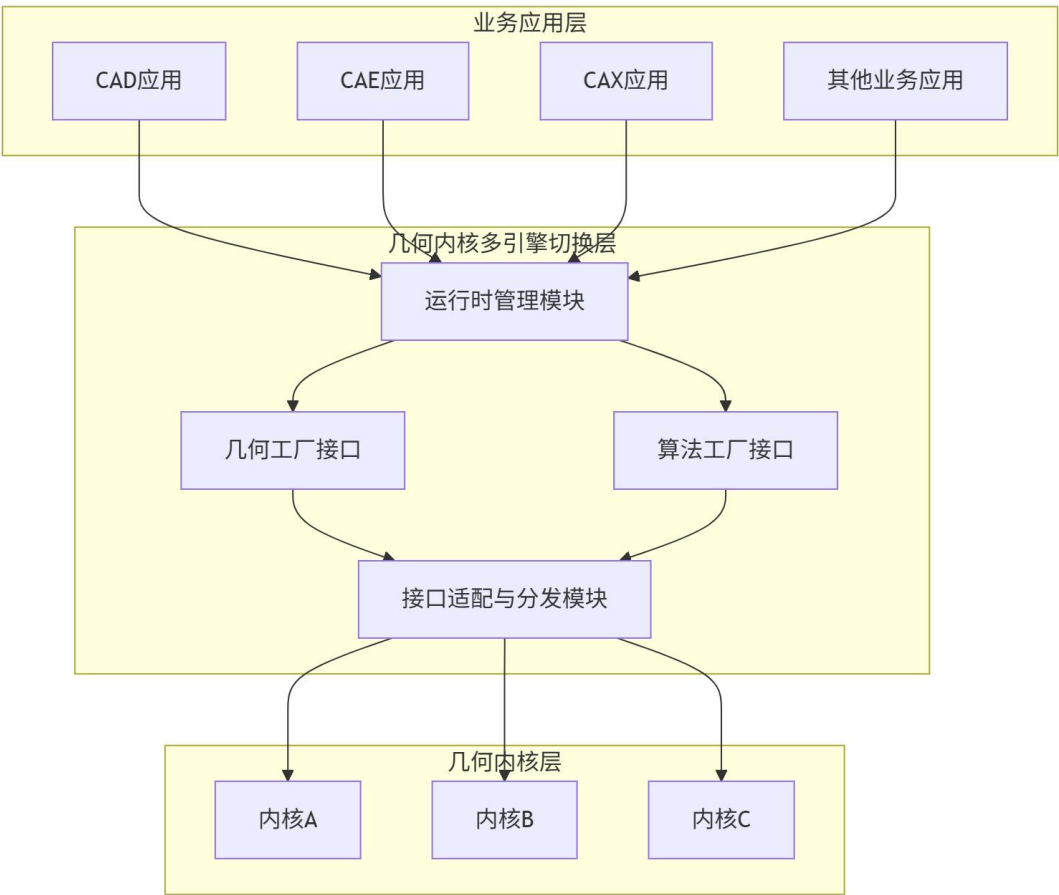


图 1 几何内核多引擎切换机制在 CAX 系统中的位置示意图

A.2 拓扑距离计算的多引擎切换流程示意图

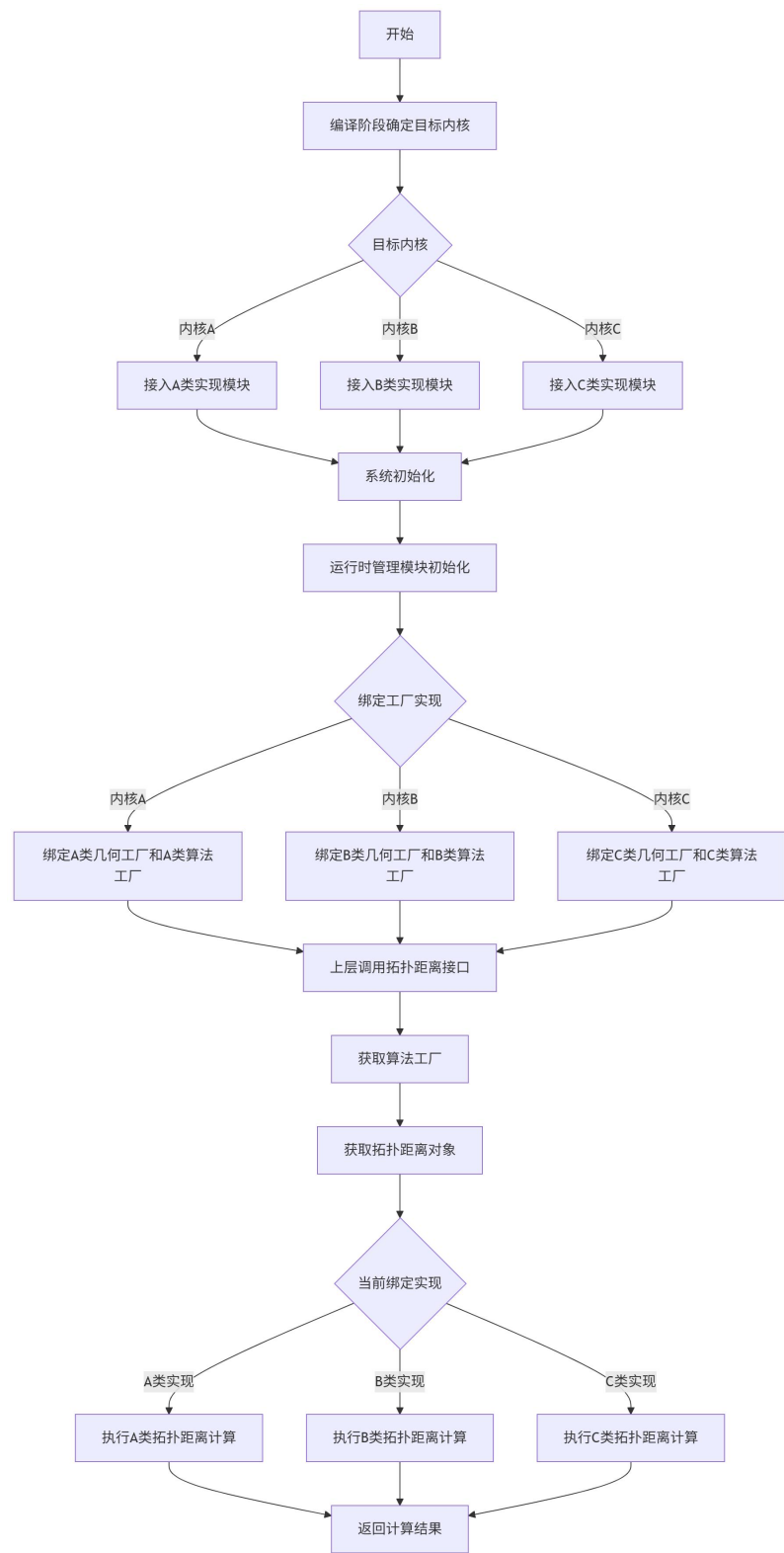


图 2 拓扑距离计算的多引擎切换流程示意图

A.3 拓扑距离计算调用时序示意图

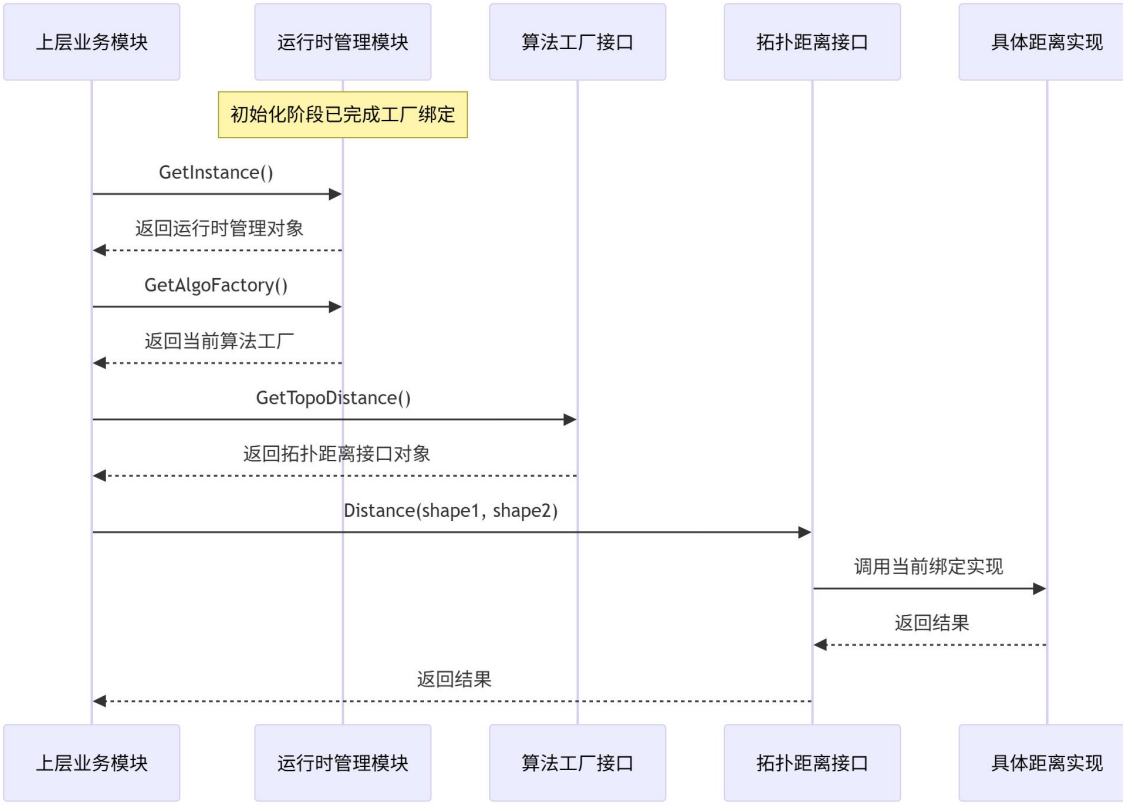


图 3 拓扑距离计算调用时序示意图