

ICS 01.100.27
CCS J 00

DB32

江 苏 省 地 方 标 准

DB32/T 5203.3—2025

民用雷达数字化设计和工艺仿真规范
第3部分：结构建模与仿真规范

Specification for digital design and process simulation of civil radar—Part 3:
Structure modeling and simulation specification

2025-09-10发布

2025-10-10实施

江苏省市场监督管理局 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	1
5 一般要求	2
6 设计模型建模	3
7 分析模型建模与仿真	8
附录 A(资料性) 三维线缆建模流程	17
附录 B(资料性) 某雷达天馈伺系统力学分析模型协同建模要求示例	18

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。

本文件是 DB32/T 5203《民用雷达数字化设计和工艺仿真规范》的第3部分。DB32/T 5203 已经发布了以下5个部分：

- 第1部分：总体要求；
- 第2部分：电讯建模与仿真规范；
- 第3部分：结构建模与仿真规范；
- 第4部分：三维装配工艺规划和仿真规范；
- 第5部分：信息集成要求。

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。

本文件由江苏省工业和信息化厅提出并组织实施。

本文件由江苏省工业互联网标准化技术委员会(JS/TC 67)归口。

本文件起草单位：中国电子科技集团公司第十四研究所、南京国睿防务系统有限公司。

本文件主要起草人：吴敬凯、胡长明、彭迪、刘炳辉、王干、程亚龙、梅启元、陈振宇、徐玉芳、童赞平。

引　　言

民用雷达智能制造面向产品全生命周期,贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节,每个环节都需要大量的标准来支撑,DB32/T 5203《民用雷达数字化设计和工艺仿真规范》聚焦于数字化设计、工艺及信息集成,制定基于模型的设计和仿真信息集成标准并推广应用,以期达到民用雷达行业智能制造发展的引领、示范和带动作用。DB32/T 5203 分为以下 5 个部分。

- 第 1 部分:总体要求。目的在于确立适用民用雷达数字化设计和工艺仿真需要遵循的通用要求及各组成模块的流程与交互等要求。
- 第 2 部分:电讯建模与仿真规范。目的在于为民用雷达电讯专业开展建模和仿真确立需遵循的模型要求和仿真方法。
- 第 3 部分:结构建模与仿真规范。目的在于为民用雷达结构专业开展建模和仿真确立需遵循的相关流程和要求。
- 第 4 部分:三维装配工艺规划和仿真规范。目的在于为民用雷达工艺专业开展三维装配工艺和仿真确立遵循的相关流程和要求。
- 第 5 部分:信息集成要求。目的在于为民用雷达电讯、结构、工艺各专业开展专业内、间信息集成工作需遵循的相关流程和要求。

民用雷达数字化设计和工艺仿真规范

第3部分：结构建模与仿真规范

1 范围

本文件规定了民用雷达数字化设计和工艺仿真中结构建模与仿真的一般要求及结构设计模型建模、分析模型建模与仿真要求。

本文件适用于民用雷达数字化设计和工艺仿真，其他民用电子装备参照使用。

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 3100 国际单位制及其应用

GB/T 18780.1 产品几何量技术规范 几何要素 第1部分：基本术语与定义

GB/T 24734.1 技术产品文件 数字化产品定义数据通则 第1部分：术语和定义

GB/T 24734.5 技术产品文件 数字化产品定义数据通则 第5部分：产品定义数据通用要求

GB/T 26099.2 机械产品三维建模通用规则 第2部分：零件建模

GB/T 26099.3—2010 机械产品三维建模通用规则 第3部分：装配建模

GB/T 33582—2017 机械产品结构有限元力学分析通则

SJ 21314—2018 电子装备热仿真分析通用要求

3 术语和定义

GB/T 18780.1、GB/T 24734.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

骨架模型 skeleton model

进行结构协同设计时传递信息的一种有效载体，用于描述参与装配设计的各零部件或子装配的位置、空间、运动关系及几何接口等相关信息。

注：主要由基准面、轴、坐标系和点、线、曲面等组成。

[来源：GB/T 26099.3—2010, 3.4, 有修改]

3.2

自顶向下设计 top-down design

由总体、分系统、模块到部件零件的一种自上而下、逐步细化的设计过程。

注：自顶向下设计符合大部分产品的实际设计流程，特别是民用雷达的设计。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

MBD: 基于模型的定义(model based definition)

5 一般要求

5.1 结构模型类型

民用雷达数字化设计与仿真用结构模型一般分为:

- a) 设计模型: 可细分为零件模型、装配模型和线缆模型等;
- b) 分析(仿真)模型: 可细分为力学分析模型和热学分析模型等。

5.2 结构模型建模规则

结构模型建模一般遵循下列规则。

- a) 宜采用基于 MBD 的三维自顶向下设计建模。
- b) 应根据产品功能需求及电讯数据确定结构模型系统布局。
- c) 建立系统结构骨架模型后, 按层级下发给分系统、子系统, 下一层级按照分配的骨架要求设计本系统的详细三维模型, 并将各零部件从底向上组装到系统模型。
- d) 装配模型所用零、组、部件模型等均应为最新有效版本。
- e) 结构模型应能完成各层次结构数字化样机的所有组件和部件的虚拟拆装。
- f) 提交具备多种运动状态的模型时, 应设置快照, 可迅速提取需要的运动状态。
- g) 结构模型应具有相应的属性值和必要的标注, 如面向制造的模型应包括必要标注与属性信息, 仿真模型应具有完整的工程参数等。
- h) 结构模型与实物一般应保持 1:1 的比例关系。
- i) 优先选择国际单位制, 量、单位及符号选择按 GB 3100 执行。
- j) 模型坐标系分为全局坐标系和局部坐标系。系统设计模型采用全局坐标系, 除特殊要求外, 仿真结果一般在全局坐标系下给出, 模型中加载、约束或装配可采用局部坐标系, 用户自定义坐标系可采用局部坐标系。

5.3 建模与仿真协同要求

结构建模与仿真协同工作流程如图 1 所示, 具体要求如下:

- a) 结构建模和仿真采用自顶向下设计, 基于 MBD 的三维模型为协同信息表达和传递的主要载体, 设计模型和分析模型均分层级开展协同建模;
- b) 建模与仿真分析实现专业内集成、协同工作, 基于设计模型开展分析模型的建模与仿真, 可进行迭代;
- c) 建模与仿真的协同层级一般包括系统级、分系统级、子系统/模块级三个层级。

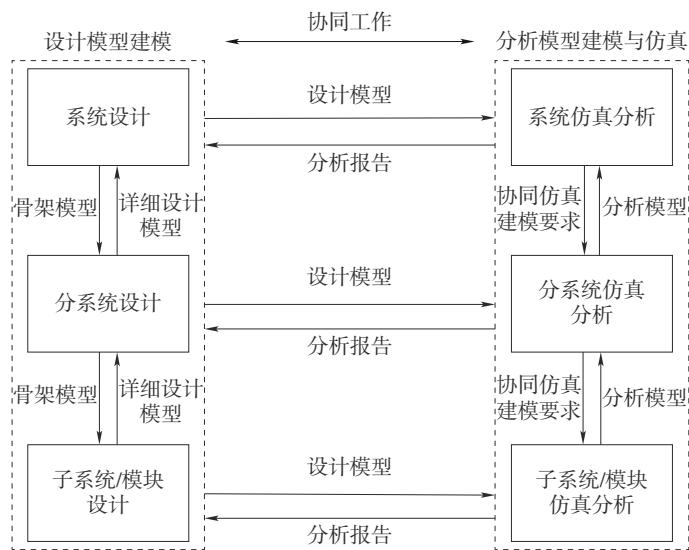


图 1 结构建模与仿真协同工作流程图

6 设计模型建模

6.1 建模流程

民用雷达结构设计模型建模流程如图 2 所示,具体流程如下:

- 概念设计:根据研制需求,确定雷达功能和设备组成,形成概念设计方案;
- 系统骨架模型:根据概念设计方案,确定分系统组成及布局,建立系统骨架模型,并发布给各分系统;
- 分系统详细设计与装配:分系统接收总体下发现的系统骨架模型,建立分系统级装配及分系统级骨架模型,同时开展分系统详细设计;也可向下一级模块下发骨架模型,实现与模块之间的设计协同;
- 子系统/模块详细设计与装配:子系统/模块接收上级下发现的骨架模型,开展详细设计和模型装配;
- 系统详细模型装配:分系统设计完成后,对分系统设计模型向上装配,形成系统总装配模型;
- 详细设计:根据自顶向下协同建模,形成详细设计报告。

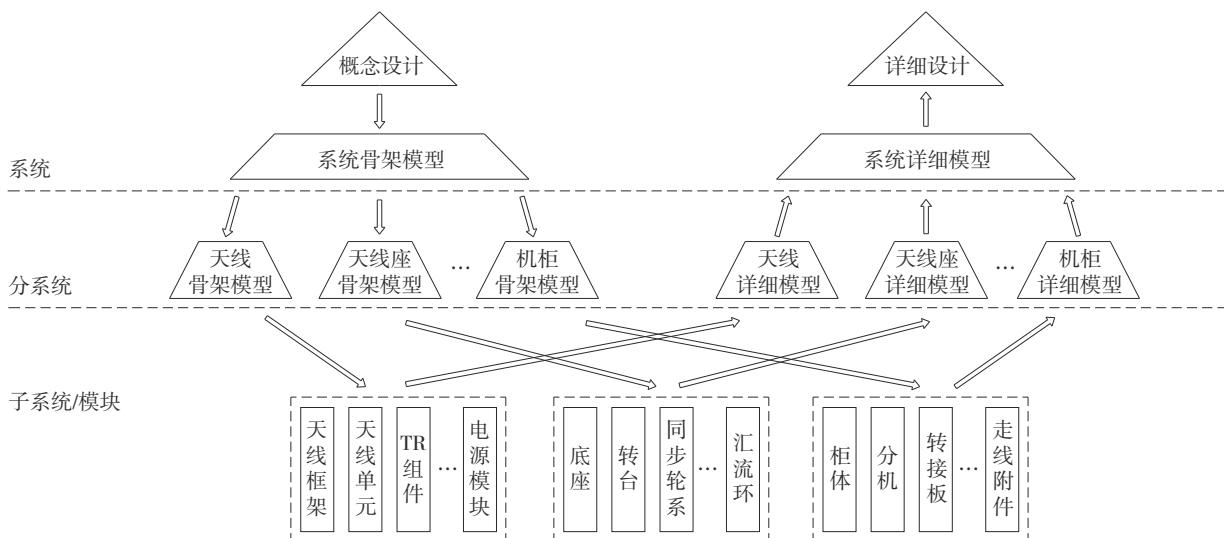


图 2 设计模型自顶向下设计建模流程图

6.2 建模要求

6.2.1 骨架模型建模

骨架模型建模要求如下：

- a) 骨架模型内的特征应用点、线、面形成，不准许有实体特征出现；
- b) 骨架模型重量应为零；
- c) 骨架模型宜选择坐标系、基准面、轴等稳定参照，少用边、点参照；
- d) 骨架模型应逐级细化，避免所有的信息集中在同一个骨架模型上，便于修改；
- e) 骨架模型中的特征应按规范命名，提高骨架模型的可读性和可修改性；
- f) 骨架模型经发布后，不应轻易删除骨架模型中的信息，修改骨架时多用替换。

6.2.2 三维线缆模型建模

有电缆的电装需求的整件，应开展三维布线设计，三维线缆模型建模流程参见附录 A。

三维线缆模型建模要求如下。

- a) 线缆类型按功能分类，如：电源线、地线、高频线、低频线、馈线、控制线、光纤等，并以不同颜色区分。
- b) 线缆模型应包含必要的属性信息，如代号、直径、芯数、转弯半径、长度、颜色、线缆类型等。
- c) 线缆模型应包括布线参考模型、走线路径、线轴、三维标注及技术要求等。
 - 1) 参考模型：布线参考模型可以使用骨架、收缩包络或两者结合的方法创建，推荐采用骨架模型的方法创建。
 - 2) 走线路径：走线路径可采用草绘、曲线等多种方法创建，路径两端均为坐标系，布线坐标系应有统一的命名和方向规定。
 - 3) 线轴：线轴主要指定义线缆的直径、转弯半径、颜色等，应针对常用的线缆品种制定线轴库。根据接线表的线缆品种，可自动从线轴库中选择并创建线轴。
 - 4) 三维标注及技术要求：走线路径及布线的具体要求应通过三维标注和技术要求明确表达，每束线都应标明线束内的线缆图号或线缆代号。

6.2.3 三维标注要求

三维标注要素包括尺寸、标注基准、尺寸公差、形位公差、粗糙度、涂覆、技术要求等。三维标注的具体要求按 GB/T 24734.5 执行。

6.2.4 视图要求

采用三维设计的模型应创建视图，要求如下：

- a) 首个视图的视角应能展现模型的各种主要特征；
- b) 技术要求应放在首个视图；
- c) 视图中标注的尺寸应完整，不应出现尺寸重叠或部分遮挡的情况；
- d) 空腔内部尺寸应通过剖视图表达，避免遮挡；
- e) 孔、槽、小凸台等微小特征应采用局部放大视图突出表示；
- f) 视图的命名应与视图展示的对象具有关联性，并用方便理解的文字简要命名。

6.2.5 零件建模

零件建模的基本要求按 GB/T 26099.2 执行。

6.2.6 装配建模

装配建模的基本要求按 GB/T 26099.3 执行。

6.2.7 标准件与外购件建模

标准件与外购件建模要求如下：

- 标准件、外购件应建立数据库,方便管理与检索;
- 标准件、外购件模型优先采用具有参数化特点的系列方法建立,如族表(用电子表格来管理相似零部件模型数据)等;
- 标准件、外购件模型的几何属性(各特征定义)和非几何属性(如代号、名称、重量、材料等)应符合企业建模标准;
- 标准件、外购件模型应进行简化处理,如螺纹、插针、倒角、减轻孔、加强筋等,简化后模型的重量、重心位置、外形尺寸、安装接口等应真实。

6.2.8 模型轻量化

模型轻量化要求如下：

- 轻量化模型的非几何属性,如名称、材料、重量、重心位置的信息应与原始模型一致;
- 轻量化模型的几何属性,如机械接口、电气接口、外形尺寸、安装坐标系等应与原始模型一致;
- 对大量重复出现的设备,可以采用典型位置安装的不完全装配模型来轻量化;
- 原始模型更改后,轻量化模型应相应进行更新。

6.2.9 模型状态与更改

模型状态与更改要求如下：

- 已发布的模型应处于完全约束的稳定状态;
- 具有运动副的多种运动状态的模型应采用机构装配;
- 具备多种运动状态时,应设置快照,可迅速提取需要的运动状态;
- 模型的更改应尽量不影响上级装配,若更改影响上级装配,如参照丢失、装配失败等,上级装配也应更改;
- 对发生更改的尺寸及尺寸公差、几何公差、注释和技术要求等应进行标识,如特定颜色等;
- 每一个版本的模型更改标识,只记录与上一版本的差异,不标识更低版本的更改内容。模型多次更改时,应消除上一版本模型中的更改标识。

6.3 模型简化与轻量化

结构设计模型简化要求如下：

- 建立约束各层级设计模型简化的统一规定;
- 可通过排除原始模型内部细节、不完全装配、简化的替代模型、转换模型或文件格式等措施,实现设计模型的轻量化;
- 简化后的设计模型应包括必要的信息参数,如模型外形尺寸、接口尺寸、重量、重心等;
- 简化后的设计模型应能进行模型装配和干涉检查;
- 简化后的设计模型应能适应标准级模型的修改自动更新;
- 简化后的设计模型应充分考虑工艺设计的需求,实际装配过程中需进行拆装的零部件,原则上不能进行简化处理。

6.4 各层级模型建模

6.4.1 系统级模型建模

6.4.1.1 模型分类

系统级模型分为天馈伺总装、机房、方舱总装等设计模型。

6.4.1.2 建模要求

系统级建模要求如下：

- a) 系统级模型采用自顶向下设计建模方式,建立系统总装骨架模型,如天馈伺总装骨架模型、机房、方舱总装骨架模型等;
- b) 系统级骨架模型中应明确各分系统的结构要素信息(含空间布局、外形尺寸、安装接口、安装坐标系等);
- c) 系统与分系统之间宜采用坐标系装配,安装坐标系的位置、方向应明确。安装坐标系以分系统名称命名,如天线安装坐标系、天线座安装坐标系等;
- d) 各分系统发布包中参照应全部来自总体骨架模型,发布包之间不许相互参照;
- e) 需布线的总装模型,骨架中应包含电缆出入口坐标系等布线信息;
- f) 系统骨架模型可不断完善,发布包内容更新后,分系统应及时更新。

6.4.2 分系统级模型建模

6.4.2.1 模型分类

分系统级模型分为天线、天线座、天线罩、机柜/机箱等设计模型。

6.4.2.2 建模要求

6.4.2.2.1 通用要求

分系统级模型建模通用要求如下：

- a) 分系统骨架模型应从分系统发布包中复制需要的几何信息,作为分系统设计的边界条件;
- b) 分系统之间的骨架和模型不能相互引用、参照;
- c) 分系统骨架模型与系统骨架模型中同一特征命名应一致;
- d) 建立分系统骨架时,需考虑分系统是否具有模块化通用性。如模块化设计,则单独建立分系统的骨架模型,与系统骨架无复制几何关系;否则,参照系统骨架模型,使用发布几何进行数据传递。

6.4.2.2.2 天线罩建模

天线罩建模要求如下：

- a) 天线罩采用三维模型二维工程图相结合的方式建模;
- b) 三维模型表达天线罩的外形尺寸、安装接口、重量等信息,供上级装配使用;
- c) 二维工程图表达夹层形式、性能要求、铺层要求、涂覆要求、检验要求等设计意图,作为生产加工的依据。

6.4.2.2.3 天线阵面建模

天线阵面分为平面类和抛物面类,建模要求如下:

- a) 天线阵面分系统接收总体下发的发布包,建立天线阵面分系统级骨架模型,明确天线框架、天线单元等设备的结构要素,建立天线框架、天线单元等设备的发布包下发;
- b) 平面类天线一般采用有厚度的实体方式建模,抛物面类天线一般采用无厚度的曲面方式建模;
- c) 抛物面类天线根据电讯仿真数据拟合成反射面曲面模型,根据反射面曲面模型建立骨架骨架模型;
- d) 对于阵面中大量重复出现的装配,如天线单元、T/R组件等,可采用不完整装配的方式进行简化处理,并在技术要求中说明;
- e) 对于阵面中大量重复出现的布线区域,可以用典型区域布线代替完整布线;
- f) 对于零件模型中大量重复出现的孔、加强筋等建模特征,可用典型区域代替完整模型。

6.4.2.2.4 天线座建模

天线座建模要求如下:

- a) 天线座分系统接收总体下发的发布包,建立天线座分系统级骨架模型,明确底座、转台、轴承、汇流环、同步轮系等子系统的结构要素信息,并建立发布包下发;
- b) 轴承、减速机、电机等外购件的模型建模要求参照5.2.7要求;
- c) 齿轮建模采用带齿廓形状的真实零件建立,齿轮参数信息以表的形式标注在技术要求中;
- d) 若天线座存在多种状态,如运输状态和工作状态,应采用机构装配建模。

6.4.2.2.5 机柜/机箱建模

机柜/机箱建模要求如下。

- a) 机柜/机箱一般不需要接收上级下发的骨架模型,但自身应采用自顶向下设计的建模方式。依据机柜设备布局,建立机柜/机箱分系统骨架模型,明确柜体/箱体、分机或插箱、转接板等设备的结构要素信息,根据需要建立发布包下发。
- b) 机柜/机箱的安装坐标系位置、方向应有统一的规定。
- c) 布线模型参照机柜/机箱分系统骨架模型建立。

6.4.3 子系统/模块级模型建模

6.4.3.1 模型分类

子系统/模块级模型分为T/R组件模块、电源模块、射频模块、处理模块等模型。

6.4.3.2 建模要求

子系统/模块建模要求如下:

- a) 子系统/模块既可接收上级下发的骨架模型,继续采用自顶向下设计的建模方式开展子系统详细设计,也可以采用自下向上的建模方式,具体可结合产品实际确定;
- b) 子系统/模块的安装坐标系的位置、方向应有统一的规定。

6.5 模型检查

6.5.1 规范性完整性检查

设计模型的规范性、完整性检查要求如下:

- a) 模型属性,如模型代号、名称、材料等的规范性和完整性;
- b) 几何信息,如建模特征、标注特征的规范性和完整性,基准建立、使用、命名的规范性,公差尺寸、

- 几何公差等标注的规范性；
- c) 装配约束的规范性,无约束不足或者多余约束；
 - d) 模型简化、轻量化的规范性；
 - e) 二维工程图模型与三维模型的一致性。

6.5.2 干涉检查

设计模型的干涉检查要求如下：

- a) 模型发布前,应进行静态干涉检查,有运动特征的装配,应进行运动干涉检查；
- b) 已发布的模型,修改后应重新进行干涉检查；
- c) 干涉检查只检查本级零部件装配的干涉情况,下级部件干涉由下级部件负责检查,以此类推；
- d) 干涉检查可采用软件自动检查和人工审查相结合的方式,优先采用软件自动检查；
- e) 对于大型装配模型,可将模型划分为多个区域,分别对每个区域进行干涉检查；也可建立简化装配进行干涉检查,提高提高干涉检查速度；对于绝对不会与其他零部件发生干涉的零部件,可快速排除且不参与干涉检查。

7 分析模型建模与仿真

7.1 力学建模与仿真

7.1.1 力学仿真项目

民用雷达结构应开展的力学仿真项目分为静力学分析和动力学分析两类,要求如下。

- a) 静力学分析包含风载荷、惯性载荷、冰雪载荷和温度载荷等静态载荷作用下的力学分析。其中,风载荷及冰雪载荷分析对象主要针对户外露天设备。
- b) 动力学分析包含模态分析、瞬态动力学分析、谱分析等。对于车载平台设备一般要完成模态分析、瞬态动力学分析和谱分析,非车载平台设备要完成运输状态下的谱分析。
- c) 不同层级对象应开展的仿真项目根据产品规范和环境条件要求确定。

7.1.2 层级间仿真模型的信息传递

力学建模与仿真宜采用自顶向下建模方式,以实现不同层级模型信息的传递与协同,信息传递的内容如下:

- a) 系统给分系统发布协同建模要求,规范分系统建模的一致性。分系统可进一步下发协同建模要求给子系统/模块；
- b) 子系统/模块与分系统按协同建模要求完成分析模型建模,并向上传递给系统,完成系统模型装配；
- c) 协同建模要求包含各分系统或模块仿真工作开展的仿真软件、单位制、安装坐标系、模型简化要求、网格划分要求、网格质量要求、载荷条件要求及结果输出要求等,协同建模要求示例见附录B。

7.1.3 建模与仿真流程

力学建模与仿真的流程如图 3 所示,主要包括下列环节:

- a) 几何模型导入/构建；
- b) 几何模型简化；
- c) 网格划分；

- d) 材料属性设置；
- e) 模型检查；
- f) 载荷与约束边界条件施加；
- g) 求解分析；
- h) 结果输出、评估与验证。

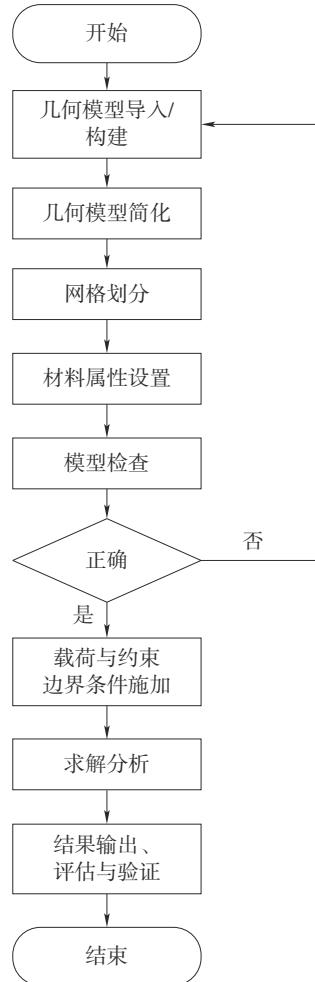


图 3 力学建模与仿真流程图

7.1.4 建模与仿真要求

7.1.4.1 几何模型导入/构建

几何模型导入/构建要求如下：

- a) 几何模型一般在三维建模软件构建后导入到有限元分析软件中，也可采用有限元分析软件直接构建；
- b) 对于薄壳结构，可先在有限元分析软件中导入实体后进行中面提取；
- c) 对于杆梁结构，可先在有限元分析软件中导入实体后选取中间轴线构建线几何；
- d) 如果模型具有对称性，也可以对称原则简化建模。

7.1.4.2 几何模型简化

几何模型简化要求如下：

- a) 在保证精度要求下进行模型简化,例如远离传力路径的结构或则对于传力路径特征尺寸很小的结构,包括棱角、小凸台、小孔等模型细节特征;
- b) 模型简化后的边界约束应能准确表达结构真实的约束状态;
- c) 模型简化后应不影响原结构的重量、质心位置和转动惯量等质量特性。

7.1.4.3 网格划分

7.1.4.3.1 单元类型选择

单元类型的选择应能反映不同部件的结构形式,要求如下:

- a) 刚度较大且不关心其受力情况的结构可采用零维质量单元,如电机、减速机、风扇、T/R组件、馈源、水接头、旋变、汇流环等;
- b) 杆、梁等结构可采用一维杆/梁单元,如天线楼框架、液压杆、天线阵面背板骨架等;
- c) 板、壳结构可采用二维板/壳单元,如天线罩、天线阵面静压腔、天线阵面反射面、机箱盖板、印制板等;
- d) 不适合采用零维、一维、二维单元的结构采用三维实体单元,如机箱主体、天线座转台、天线座底座、轴承、齿轮等。

7.1.4.3.2 网格疏密控制

网格疏密控制要求如下。

- a) 对于静力学分析,如果仅关注结构的位移响应,网格可以疏一些。如需关注应力分布状态,应增加网格的数量。
- b) 对于动力学分析,由于被激发的振型对网格规模比较敏感,网格密度应该能够充分反映出需关注的振型。
- c) 焊接边、面、体处应划分两排以上网格。
- d) 对于实体单元,在结构厚度方向上网格应确保3层以上。

7.1.4.4 材料属性设置

材料属性设置要求如下。

- a) 常用的材料力学参数有弹性模量、泊松比、密度等。对于动力学分析,应设置阻尼参数;对于温度载荷分析,应设置热膨胀系数。
- b) 材料属性单位应与几何模型单位一致。
- c) 经过试验验证的材料属性信息宜作为数据积累,为材料属性设置作参考。

7.1.4.5 载荷及约束边界条件施加

载荷及约束边界条件施加要求如下:

- a) 根据仿真项目需求选择相应载荷类型,载荷的作用区域、大小、方向应与实际承载状态一致;
- b) 边界约束条件应符合实际安装条件,根据约束类型选择施加方式;
- c) 载荷与约束施加区域应避免集中在单个或少量节点上,以防止应力集中。

7.1.4.6 模型检查

- 分析模型建模完成后,应对模型的网格质量、质量特性、连接关系、工程特性等进行检查,要求如下:
- 网格质量检查。对网格单元的长宽比、翘曲度、偏斜度、内角等参数进行检查,参数量化数值要求按GB/T 33582—2017表B.3执行,建议网格单元不合格比例不超过5%。
 - 质量特性检查。对网格单元各装配模型的质量分布、质心位置、惯性矩,以及总装模型的总质量等参数进行检查,确认模型质量特性与实际情况一致。
 - 连接关系检查。对螺接、焊接、销接、齿轮连接、轴承连接以及不同类型单元之间的连接等连接关系进行检查,确认连接关系正确,连接单元设置合理。
 - 工程特性检查。对材料参数、载荷及边界约束进行检查,确认模型工程特性设置与实际情况一致。

7.1.4.7 求解分析

根据分析类型进行求解器设置,并开展求解分析,要求如下:

- 静力学分析计算时采用默认求解器设置;
- 模态分析根据需要设置合理的模态阶数和模态上限;
- 冲击分析计算时宜采用直接积分法,当计算效率低时,可采用模态叠加法;
- 谱分析采用模态叠加法计算时,提取的模态数应包括关注频段内对振动响应有贡献的所有模态。

7.1.4.8 结果输出、评估与验证

7.1.4.8.1 结果输出

不同分析类型的结果输出包含以下内容。

a) 静力学分析结果

静力分析输出结果应包含关注部位的应力、应变和变形云图的全部或部分内容。

b) 模态分析结果

模态输出结果应包含关注频段内的固有频率、模态振型的全部或部分内容。

c) 冲击分析结果

冲击分析输出结果应符合以下要求:

- 根据结构关注区域典型位置节点的冲击响应时间历程曲线的极值确定应重点关注的冲击响应的时间点;
- 冲击分析输出的结果应包含结构关注测点的位移、速度、加速度、应力等变量的时间历程曲线,典型时间点的结构变形、应力、应变云图。

d) 谱分析结果

谱分析输出结果应符合以下要求:

- 显示或输出结果前应先读取关注频率点的计算结果;
- 结果的输出应包含结构 3σ 位移、加速度、应力云图和关注点的功率谱密度(power spectral density, PSD)响应曲线。

7.1.4.8.2 结果评估与验证

对输出结果进行评估与验证,内容如下:

- 评估应力集中位置的合理性;

- b) 评估结构变形的合理性；
- c) 评估结构固有频率和振型的合理性，根据振型结果判断部件单元连接是否正确；
- d) 根据结构振动响应曲线和模态分析结果，评估振动响应曲线的合理性；
- e) 评估结构刚强度、动态响应(应力和加速度)、阵面形变平面度等指标是否满足设计要求；
- f) 对有试验测试数据的模型，应开展仿真结果与试验结果的对比分析/验证，根据试验结果对仿真模型进行修正，以提高仿真模型置信度。

7.1.5 输出交付物

输出交付物应包含力学分析模型文件、力学分析报告等。其中，力学分析报告应包含以下内容。

- a) 分析任务来源。
- b) 分析对象与目的。
- c) 有限元建模与求解。
 - 1) 单位及坐标系；
 - 2) 网格划分；
 - 3) 材料参数设置；
 - 4) 载荷和边界施加；
 - 5) 模型检查；
 - 6) 求解分析设置。
- d) 结果分析。
- e) 结论与建议。

7.2 热学建模与仿真

7.2.1 热学仿真项目

民用雷达结构热学仿真项目主要有温度分析、湿度分析、流场分析、压力场分析等，不同层级分析对象应开展的仿真项目要求如下：

- a) 系统级：包括天线罩内、方舱等，应开展温度分析、湿度分析、流场分析和压力场分析；
- b) 分系统级：包括天线阵面、机箱/机柜等，应开展温度分析、流场分析和压力场分析；
- c) 模块级：包括 T/R 组件、电源模块、处理模块、频率源等，应开展温度分析、流场分析和压力场分析。

7.2.2 层级间仿真模型的信息传递

热学建模与仿真宜采用自顶向下建模方式，以实现不同层级模型信息的传递与协同，信息传递的内容如下：

- a) 边界信息传递：系统模型完成仿真后，提取装入的简化抽象模型的边界信息，传递给分系统或子系统开展详细仿真；
- b) 简化抽象模型：分系统或子系统通过详细仿真得到简化抽象模型，包含整体的几何特征以及热阻、流阻等热学特征，并装入系统模型中开展仿真。

7.2.3 建模与仿真流程

热学建模与仿真流程如图 4 所示，主要包括下列环节：

- a) 几何模型构建与简化；
- b) 分析模型建立；

- c) 网格划分；
- d) 模型检查；
- e) 求解分析；
- f) 结果输出、评估与验证。

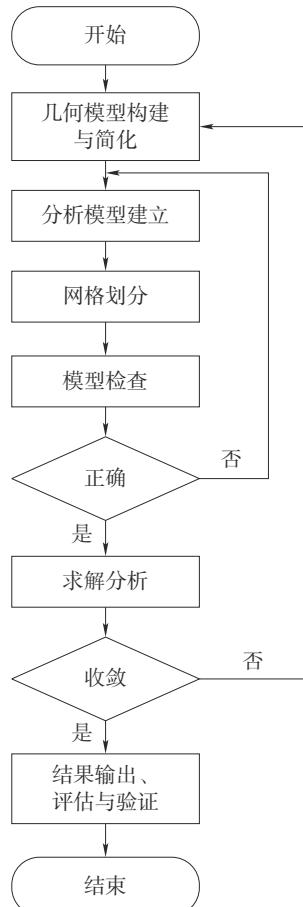


图 4 热学建模与仿真流程图

7.2.4 建模与仿真要求

7.2.4.1 几何模型构建与简化

7.2.4.1.1 几何模型构建

几何模型构建要求：

- a) 几何模型一般在三维建模软件构建后导入到热分析软件中，也可采用热分析软件直接构建；
- b) 对仿真结果精度影响较小的结构，可不建立对应的几何特征或模型。

7.2.4.1.2 几何模型简化

几何模型简化要求：

- a) 模型简化对象应远离传热路径的结构或者相对于传热路径特征尺寸很小的结构；
- b) 瞬态仿真情况，模型简化应遵循“等质量、等热容”原则；
- c) 如果模型具有对称性，也可以对称原则简化建模。

7.2.4.2 分析模型建立

7.2.4.2.1 概述

分析模型建立是将几何模型转化为仿真分析模型,一般包含求解域设置,简化抽象模型,初始边界条件、接触热阻、热源条件设置等。

7.2.4.2.2 求解域设置

求解域设置应符合以下要求。

a) 强迫对流求解域设置

- 1) 内部强迫对流换热,求解域宜等于模型实体大小;
- 2) 外部强迫对流换热,求解域应大于模型实体大小,并超过外部流动边界层的厚度。

b) 自然对流散热求解域设置

- 1) 求解域的高度一般建议为实体最大高度尺寸的3.5倍;
- 2) 求解域的宽度和深度宜为实体对应宽度和深度的2倍;
- 3) 实体下边界距离求解域边界宜为实体最大尺寸的0.5倍。

7.2.4.2.3 简化抽象模型

在上一级分析中包含的下一级模型宜使用简化抽象模型。简化抽象模型应符合以下要求。

a) 流阻型简化模型:

- 1) 入口、出口大小应和实际截面一致;
 - 2) 流阻曲线应通过详细模型在数值风洞中模拟或实测得到;
- b) 热-流阻型简化模型:
- 1) 关注整体温度时,可将热源作为体热源;
 - 2) 关注局部温度时,可将热源作为面热源。

7.2.4.2.4 初始条件和边界条件设置

初始条件和边界条件设置应符合以下要求:

- a) 条件参数设定尽量模拟实际情况;
- b) 边界条件的约束区域与实际区域相当,以防流动不准确。

7.2.4.2.5 接触热阻设置

接触热阻设置应符合以下要求:

- a) 给两个接触面中较小面积的表面赋接触热阻值;
- b) 当接触热阻不能完全确定时,一般按较大的热阻值予以设定,即考虑最恶劣工况设定。

7.2.4.3 网格划分

网格划分应符合以下要求:

- a) 对热流密度高或者温度梯度大的地方应进行网格加密,如发热芯片等热源表面附近、导热系数小的材料附近、几何尺寸较小等区域;
- b) 对于对流换热的热仿真分析,流速变化大的地方应进行网格加密,如流道中的进出口区域、收缩段、扩张段、台阶段等区域;
- c) 最小网格不应超过物理场的最小特征尺寸;

d) 网格的最大长宽比应控制在 20 以内, 不宜超过 100。

其他要求按 SJ 21314—2018 中 5.4 的要求执行。

7.2.4.4 模型检查

分析模型建模完成后, 应对模型的网格质量、初始参数、边界条件、热源等进行检查, 要求如下。

- a) 网格质量检查。确认网格划分质量是否满足 7.2.4.3 的要求。
- b) 初始参数检查。对计算域、流体域、材料参数等参数进行检查, 确认与实际情况一致。
- c) 边界条件检查。对进出口流量(速度)、环境压力、进出口热动力参数、湿度参数等进行检查, 确认与实际情况一致。
- d) 热源检查。确认热源的大小、位置、发热方式等是否与实际情况一致。

7.2.4.5 求解分析

求解分析应符合以下要求。

- a) 求解参数的设置按照推荐参数或经验确定, 对于不好判定的参数(如风扇的阻尼比)选取, 应采用多次试算比较或与前期试验结果比较的方式判断是否合理。
- b) 物理模型的选择根据热分析的需要确定。
- c) 热-流耦合仿真时, 为提高收敛性能和降低计算时间, 强迫流动可以采用先进行流场仿真, 固化流场再进行热仿真, 对于自然流动不应采用该方法。
- d) 合理设置收敛判据。通过在关注区设置监测点并增加人工判据准则, 可以明显提高收敛速度。
- e) 应合理控制求解的计算量和存贮量, 如网格量、时间步长、输出结果设置等均会对计算量和存贮量有较大影响。
- f) 应根据分析目的和求解的具体情况选择合理的求解方法。

7.2.4.6 结果输出、评估与验证

7.2.4.6.1 结果输出

结果输出应包含以下内容:

- a) 表面温度分布应体现所关注的功率器件的最高温度;
- b) 温度切面应处于所关注器件的中间位置, 体现热流主要传递路径上的温度变化;
- c) 应结合速度场和压力场分布, 给出阻力的主要区域、大小, 指导下一步优化分析;
- d) 应给出分析对象的热阻曲线, 以及改善热阻的措施防范, 指导下一步的优化方向;
- e) 应将计算的结果和应表达的主要内容以图片、数据表格和动画等形式表现出来。

7.2.4.6.2 结果评估与验证

仿真分析结束后, 应对仿真结果进行评估与验证, 内容如下:

- a) 分析温度场、压力场、速度场等主要仿真结果, 判断结果合理性;
- b) 对有试验测试数据的模型, 应开展仿真结果与试验结果的对比分析/验证, 根据试验结果对仿真模型进行修正, 以提高仿真模型置信度。

7.2.5 输出交付物

输出交付物应包含热学分析模型文件、热学分析报告等。其中, 热学分析报告应包含以下内容:

- a) 分析任务来源;
- b) 分析对象与目的;

- c) 分析模型建立与求解：
 - 1) 单位及坐标系，
 - 2) 几何模型建立与简化过程，
 - 3) 分析模型建立过程,含求解域设置、初始条件和边界条件设置等，
 - 4) 网格划分，
 - 5) 模型检查，
 - 6) 求解分析；
- d) 结果分析；
- e) 结论与建议。

附录 A
(资料性)
三维线缆建模流程

三维线缆模型建模流程如图 A.1 所示。

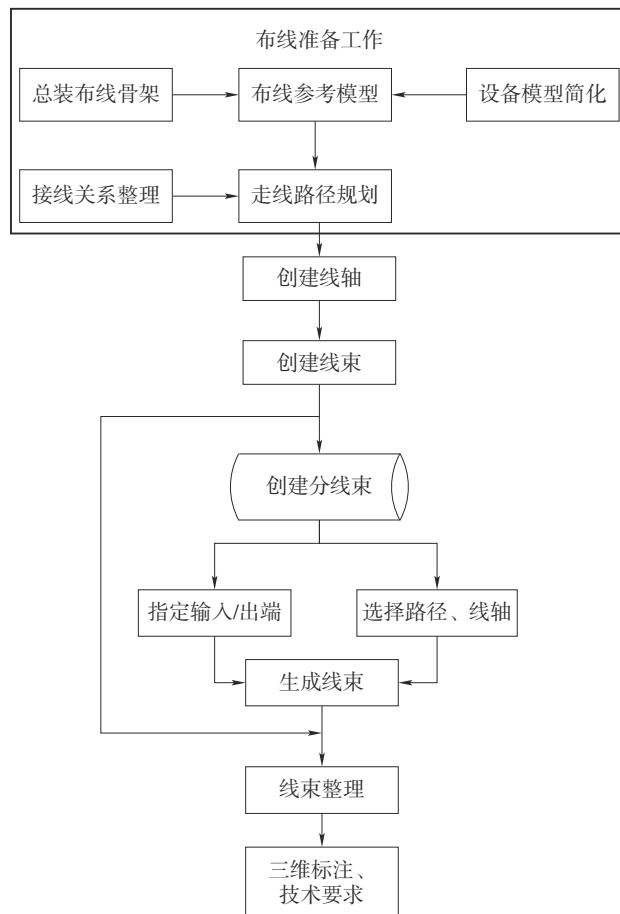


图 A.1 三维线缆建模流程图

附录 B

(资料性)

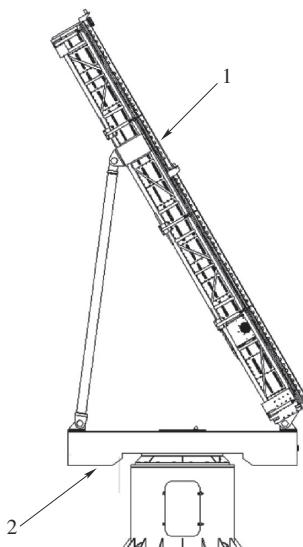
某雷达天馈伺系统力学分析模型协同建模要求示例

B.1 概述

本示例规定了某雷达天馈伺系统力学分析模型协同建模的一些基本要求,用于规范分系统与系统级力学分析模型建模的一致性,提升仿真置信度。

B.2 系统结构组成

大型民用雷达天馈伺系统由天线阵面和天线座两个分系统组成,如图 B.1 所示。



标引序号说明:

1——天线阵面;

2——天线座。

图 B.1 系统结构组成

B.3 协同建模项目

根据系统结构组成,各负责人完成表 B.1 要求的分析模型协同建模项目。

表 B.1 协同建模项目

序号	建模项目	建模软件	负责人	完成时间
1	天线阵面分系统建模	×××	×××	×××
2	天线座分系统建模	×××	×××	×××
3	天馈伺系统建模	×××	×××	×××
注:天馈伺系统建模在分系统建模完成后开展。				

B.4 单位制和坐标系要求

B.4.1 单位制

计算单位采用毫米制,如表B.2所示。

表 B.2 建模单位

物理量	单位名称	单位符号
位移	毫米	mm
质量	吨	t
力	牛	N
应力	兆帕	MPa
时间	秒	s

B.4.2 坐标系

在系统的全局坐标系中开展建模工作。

B.5 几何模型简化要求

几何模型简化具体要求:

- a) 在保证精度要求下进行模型简化,例如远离传力路径的结构或则对于传力路径特征尺寸很小的结构,包括棱角、小凸台、小孔等模型细节特征;
- b) 模型简化后的边界约束应能准确表达结构真实的约束状态;
- c) 模型简化后应不影响原结构的重量、质心位置和转动惯量等质量特性。

B.6 网格划分要求

B.6.1 单元类型

配重、汇流环、电机、T/R组件采用质量单元;天线桁架、支撑杆采用一维梁单元;箱体盖板采用二维壳单元;天线座底座、转台、轴承、机箱箱体采用三维实体单元。其他结构的单元类型要求参见本文件7.1.4.3.1规定。

B.6.2 网格密度

单元网格平均尺寸为20 mm,对于应力大的区域,如天线阵面与天线座的连接支座处,网格可适当加密。

B.6.3 模型检查

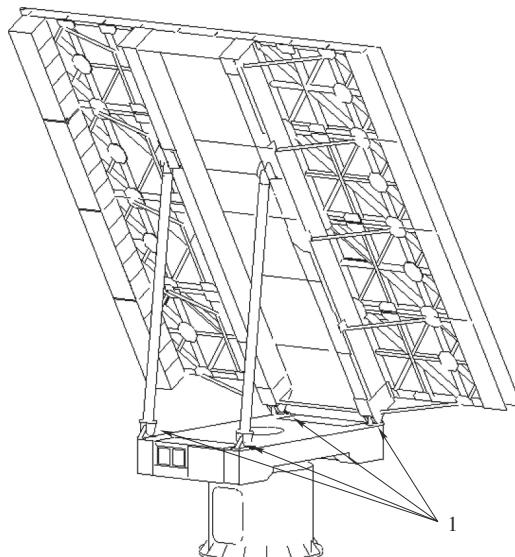
完成网格建模后,参考表B.3模型检查项目要求进行模型检查。

表 B.3 模型检查项目

序号	检查项目	具体内容	合格判据
1	网格质量	自由边、重复单元、雅可比、外观比、翘曲度、偏斜度、内角	建议不合格比例不超过5%
2	连接关系	螺栓连接、焊接、不同类型单元之间的连接等	连接关系正确,重要区域的连接无遗漏,无自由单元、重复单元,不同单元间连接节点自由度应匹配
3	约束条件	约束区域、自由度个数	约束条件正确、约束自由度合理、约束区域大小合理、无冲突
4	质量元	位置、质量、质心、转动惯量等	质量元连接在刚度较大的部件上、质量、质心、转动惯量等与实体模型匹配
	模型规模	单元数量、节点数量及各类约束数量	根据仿真使用的计算机的配置,合理规划,使仿真过程能够在可接受的时间内顺利进行
	模型重量重心	各部件及整体结构的重量重心	部件及整体结构的重量重心与几何模型一致

B.7 分系统连接接口要求

天线阵面与天线座通过4个支座实现连接固定。分系统建模负责人完成建模归档后向系统级传递模型,系统建模负责人在4个支座处建立多节点约束实现模型总装,如图B.2所示。



标引序号说明:

1——分系统连接接口。

图 B.2 分系统连接接口位置

B.8 载荷工况要求

负责人完成建模后,应根据以下载荷工况要求开展仿真分析。

a) 天线阵面分系统分析工况要求见表B.4。

表 B.4 天线阵面分系统分析工况要求

工况编号	阵面姿态及约束情况描述	载荷	结果需求
1	阵面水平吊装	自重	位移、应力、螺栓力
2	阵面垂直吊装	自重	位移、应力、螺栓力
3	阵面倾斜 60°吊装	自重	位移、应力、螺栓力
4	阵面平躺	自重	位移、应力、螺栓力
5	阵面 8 级风载工作	自重、2 r/min、风载	位移、应力、螺栓力

b) 天线座分系统分析工况要求见表 B.5。

表 B.5 天线座分系统分析工况要求

工况编号	阵面姿态及约束情况描述	载荷	结果需求
1	阵面 8 级风载工作	自重、2 r/min、风载	位移、应力、螺栓力

c) 天馈伺系统分析工况要求见表 B.6。

表 B.6 天馈伺系统分析工况要求

工况编号	阵面姿态及约束情况描述	载荷	结果需求
1	阵面 8 级风载工作	自重、2 r/min、风载	位移、应力、螺栓力

B.9 交付物要求

交付物包含以下内容：

- a) ×××分系统网格模型文件；
- b) ×××分系统建模与仿真分析报告；
- c) ×××系统网格模型文件；
- d) ×××系统建模与仿真分析报告。