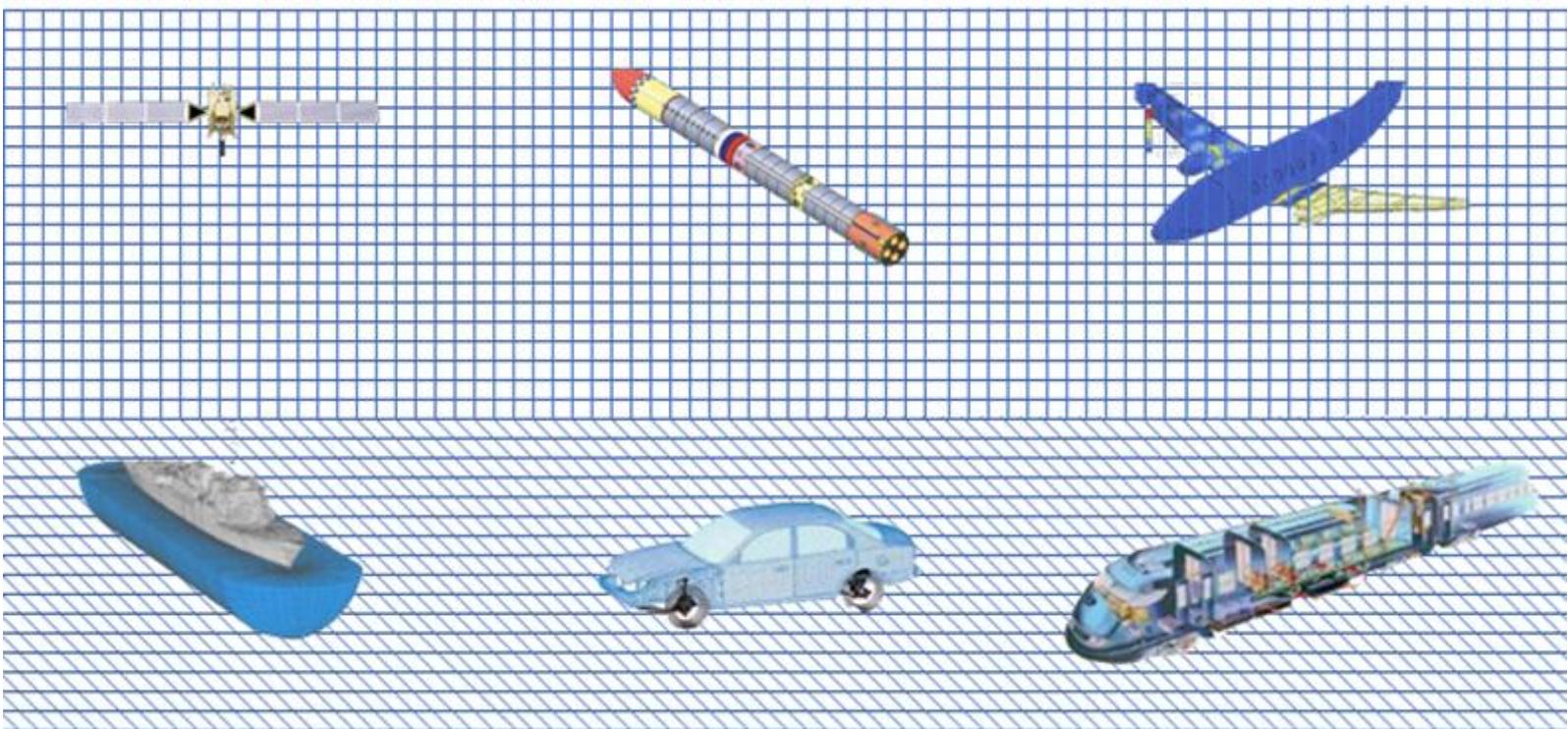




仿真分析规范编制指南 (V1.0 版)



中国数字仿真联盟
安世亚太科技股份有限公司
北京安怀信科技股份有限公司

二零二零年四月

序

2018年,中国数字仿真联盟(Chinese Alliance for Simulation-based Engineering and Science, CASES)在北京应运而生。联盟由国内从事数值仿真、数字化设计与制造、智能化技术及软件开发、新型材料成型、数字化工厂等相关行业的科研机构、高等院校、相关企业等单位组成。其宗旨是以国家相关产业政策为指导,以中国制造2025、国家数字化、智能化发展相关政策为依托,以市场发展和产业数字化转型需要为导向,在数字化及其相关领域,整合汇聚行业资源和力量,搭建产、学、研、用交流大平台,推动成员单位的研究开发、技术拓展、行业应用与产品创新水平的提升,促进联盟成员交流、发展与共赢。有效推进中国数字仿真各领域的协调、健康发展,增强中国在该领域的创新能力和核心竞争力。

制定《仿真分析规范编制指南》是联盟的重要工作之一。指南的核心工作是在数值仿真中具体实现与收敛性有关的三个定义,即完备性、稳定性和一致性。完备性是指函数空间存在这样的极限,使得一些基本函数的集合逼近一个函数;稳定性是通过仿真得到物理问题的真实解答;一致性是指误差具有网格尺寸的量级,对于时间相关问题,误差将是时间步长和单元尺寸的函数,并且时间和空间离散化的截断误差必须趋近于零。事实证明真正能让仿真指导设计的关键是要解决仿真的精确度和收敛性问题。

在我国数值化仿真领域中,本指南的问世是具有里程碑意义的工作,它提供给仿真用户一套如何做好数值仿真技术的指导性文件。由于计算机仿真技术的发展,使我们能够瞬抚四海、纵揽古今、驰骋宇宙时空之间,而有限元等计算软件的作用正是使我们顺利到达彼岸的工具和桥梁。计算机仿真软件是仿真工程与科学研究的重要工具,如何应用计算机软件做好仿真工作,“工欲善其事,必先利其器”,《仿真分析规范指南》可以提供有益的帮助。

本指南由中国数字仿真联盟提出并归口。由安世亚太科技股份有限公司和北京安怀信科技股份有限公司合作编著。安世亚太科技股份公司高级副总裁、北京市综合仿真实验室主任田锋先生和北京安怀信科技股份有限公司总经理李焕先生撰写了编者按。在此,我代表中国数字仿真联盟对他们带领两个团队为本指南问世做出的高水平工作和杰出贡献表示衷心的感谢!

庄茁
中国数字仿真联盟理事长
2020年3月19日

编者按（一）

“要么仿真，要么被打败！”这是仿真界的旧口号。那时候，仿真价值还很少人知道。

“是否仿真已不是问题，怎么仿才是！”这是仿真界的新口号。仿真具有价值已经成为中国企业共识，但我们必须承认，中国企业的仿真应用效益远没达到引入时的初衷。中国企业仿真缺钙，主要是缺乏仿真标准、规范、人才这样的软实力，而不是软件和硬件这样的硬能力。软实力中尤其以仿真标准为甚，这一点，中国多数企业还没有认识到，总是误认为建立仿真能力就是买软件，标准是附属品。我想，作为中国数字仿真联盟的一项重要工程，本项目的首要任务应该是纠正人们这一错误观念，然后才是如何建立仿真标准。本项目的成果侧重在后者，但前者却更重要，是后者发挥作用的前提。所以，我借本文来完成这一任务。

在企业调研时，多家企业讲了同一个现象。我们把这个现象称为“大拿的困惑”：

- 1) 对同一个问题，使用同一款仿真软件，两个大拿做出来的结果不同！
- 2) 同一个大拿，用不同的软件，做出来的结果不同！
- 3) 用试验进行验证，发现这个两个仿真结果与试验都不同！

面对这些“怪现象”，如果没有合理解释，那企业最终得到结论肯定就是“仿真无法作为设计依据”。这基本上是对仿真判了死刑。这些怪现象的产生有体系性的原因，其中最重要的原因就是企业缺乏仿真标准。如果没有一份文件告诉我们仿真该怎么做，怎么做才是对的，我们何以指望仿真具有稳定结论？仿真是对真实世界的近似，有偏差是常态，无偏差是巧合。偏差并不是问题，弄清楚偏差多少才是关键。只要这种偏差是可度量的、稳定的和可预测的，偏差就不是误差，因为它并不会带来困惑，不会引起决策困难。仿真标准的目的、意义和价值正在于此！

仿真标准的根本目的是“保障计算结果的一致性”。只要遵守同一个标准，对同一个问题，不同的人、不同的软件，仿真结论都是一致的。标准所约定的未必是最优的，但其计算结果是可重现的。可被重现和追溯的结果才是可靠的。我们没必要追求仿真结果与试验结果完全相同，但只要仿真标准让我们获得的计算结果是稳定的，和试验的偏差始终如一，那这种有偏差的结果其实就是“精确解”，因为我们总可以依据这个稳定偏差来修正结果。

因此，建立仿真标准，是企业做好仿真唯一正确的道路。但仿真标准是严重依赖于企业、专业和产品的，没有一个放之四海皆准的仿真标准。所以，本项目的目标并不是有人误解的那样——我们要做一套仿真标准，而是想提供给企业一套如何做好本企业仿真标准的指南。我们认为，没有一个放之四海皆准的标准，但可以有一套放之四海皆准的仿真标准建设指南。这就是本项目的预期成果。当然即便是指南，也不能一篇指南包打天下。针对不同的专业，仍然有不同的指南。所以，本项目将会是长期工程，因为仿真学科之下的专业实在不少。本次项目是第一期工程，完成了结构静强度、结构模态、气动、散热、天线电磁等仿真标准的编写指南，并包含一篇范例——《汽车碰撞仿真分析规范样例》。

希望本项目成果对读者有所帮助，这将是我们的继续此项目的动力。

田锋
安世亚太科技股份公司高级副总裁
北京市综合仿真实验室主任
数字孪生体实验室主任
2020年3月17日

编者按（二）

“即使是巨匠，也必须在严格的规范中才能施展他的创造才能”，这句话指出了专家与规范之间的共生关系。我在 25 年前踏入 CAE 仿真这个领域时，整个行业都在强调软件的出身，是否是 NASA 或者某个著名研究机构的御用软件，以此来判断软件分析结果是否精确有效。20 世纪 90 年代以来，随着并行计算机体系的成熟和高性能计算（HPC）技术的发展，CAE 行业掀起了网格加密热潮，各软件厂商相继推出了 8-16-32-64-128-256-1024 核甚至更高 CPU 的并行计算版本；用户的模型网格规模也开始从几十万、几百万到几千万甚至上亿的规模发展，似乎网格数就代表着模型的精确度。进入 21 世纪后，随着软件升级速度加剧及更多种 CAE 软件不断涌入中国，使得中国 CAE 技术得到了飞跃的发展，但由于仿真精度和一致性的问题始终没有被解决，中国的 CAE 仿真也因此一直没有进入到企业的研发核心流程当中去，始终在作为一个辅助的验证手段被使用，我个人一直深深参与其中，也曾被各种风潮和宣传主导过想法，但事实证明真正能让仿真指导设计的关键还是首先得解决仿真精度和一致性的问题。

2010 年，一直从事航空航天军工产品仿真咨询的我，偶然的参观国内、外几家汽车企业，当我看到这些企业里上百人集中在一起从事仿真分析工作的场景时，被深深地震撼了。在大多军工企业里，仿真一直被认为是最高端、最复杂的工作，大都是由博士、硕士组成的小团队在从事，而汽车这种“平民化”的做法颠覆了我的认知，我知道一定有什么地方不对。为此，我花了几个月的时间去和所有能找到的汽车行业的仿真专家，包括和国内外的专家去沟通、去交流，到底汽车行业与军工有什么不同，最后，我终于获得了答案，那就是仿真规范上的差异。汽车行业里的仿真规范不仅按照学科、车体部件分解种类繁多，而且还分为企业内部、合作伙伴以及供应商等不同的版本，是企业的最高核心机密技术之一。我们所看到的百人同时仿真的场景，正是因为有了这么一份神奇的仿真规范，使得我们一直认为最高大上，最飘忽不定的东西，变成了两周培训就可以开始工作的“流水线式”简单工种。

2012 年我创立了安怀信，我们公司选择的方向是 V&V（Verification & Validation）仿真模型验证与确认，公司的初衷是通过开发仿真验模工具软件，对仿真模型的精度进行验证，逐步获得精度较高的仿真模型和建模方法，并最终梳理出企业自己的仿真规范，帮助企业能够真正将 CAE 的价值发挥到最大。从事仿真验模工作 8 年来，从入门到逐步精通，以 2017 年安怀信被美国 ASME 的 V&V 年度会议邀请为分会场主席为标志，安怀信在仿真验证和规范创建这个领域逐步得到了世界最高水平的认可。

近些年来，安怀信一方面在帮助越来越多的企业实现仿真模型的验证确认工作，另一方面也萌生了一个想法，就是怎样把我们的经验知识传递出去，让中国的企业都能够认识到仿真规范的重要性，并且有机会做出适合企业自己的仿真规范，为中国制造业的发展助力，也让中国不再满足于做一个世界工厂的代工商，而是真正有设计能力的创造者。2019 年，这个想法终于在中国数字仿真联盟的推动下开始成型，同时与国内著名 CAE 咨询商安世亚太的田锋副总裁一拍即合，双方都认为此事对促进 CAE 事业在国内发展，以及促进中国制造业崛起都有推动作用，因此，在双方的共同努力下编制了这版《仿真规范编制指南》，即规范的规范。如能对我中华民族的崛起必须走制造业崛起之路起到一分助力，则是我们这些老 CAE 人之大幸！

李焕

北京安怀信科技股份有限公司总经理

2020 年 3 月 17 日

前言

中国数字仿真联盟（Chinese Alliance for Simulation-based Engineering and Science，简称“CASES”），由国内从事数字仿真、数字设计与制造、智能化技术及软件开发、新型材料微观与宏观成型、数字化工厂等相关行业的科研机构、高等院校、相关企业及学会和协会单位在自愿、平等、互利、合作、共赢的基础上组成，为非营利性机构。

目前，中国正处于制造业转型升级时期，而仿真技术为中国制造业升级提供了创新利器。但是，由于种种原因，中国仿真技术应用水平与制造业先进国家还有很大差距，如企业缺乏仿真技术应用的人才梯队，缺乏仿真分析规范和仿真数据库等，致使仿真技术在中国的应用并不广泛和深入，仿真技术大都只是作为一种设计验证手段存在。

“质量提升，标准先行”，仿真分析规范是企业仿真技术水平的重要体现，要推进中国仿真技术的协调、健康发展，首当其冲要加强技术标准基础研究和制定工作，加强其在仿真领域或其他相关领域的认可和推广。而仿真联盟的宗旨是以中国制造、国家数字化、智能化发展相关政策为依托，整合汇聚行业资源和力量，有效推进中国数字仿真各领域的协调、健康发展，增强中国在仿真领域的创新能力和核心竞争力，其有义务和责任引领并推广数字仿真领域行业规范标准的制定工作。

为此，仿真联盟在第一届第二次会议上进行了仿真规范的工作部署，并成立了“中国数字仿真联盟仿真规范编制小组”，其目标并不是为企业制定仿真分析规范，而是建立在对国内外行业标杆企业的仿真分析规范研究的基础上，通过制定“仿真分析规范编制指南”的方式，为企业提供制定仿真分析规范的方法论，让企业能够知道如何才能建立一个完整的、有效的、先进的仿真分析规范。

同时，由于仿真学科之下专业众多，不可能制定出一个放之四海皆准的仿真分析规范，也不可能一个规范适用于不同专业。因此，仿真分析规范编制指南工作是一个长期发展、循环迭代的工程，本册指南属于仿真分析规范编制指南第一期工程，其编制了结构静强度、结构模态、气动、散热、天线电磁等仿真规范编制指南，并编制一篇仿真分析规范范例——《汽车碰撞仿真分析规范样例》，其它学科和专业的仿真分析规范指南，将在后续工作中逐步补充完善。

本册仿真分析规范编制指南由中国数字仿真联盟提出并归口。

本册仿真分析规范编制指南由安世亚太科技股份有限公司和北京安怀信科技股份有限公司合作主编，北京新能源汽车技术创新中心有限公司，中国空空导弹研究院、北京超算科技有限公司、元计算(北京)科技服务有限公司、北京清力行科技有限公司、北京云道智造科技有限公司、北京宇泽创新科技有限公司、等参与编制和校对。

本册仿真分析规范编制指南主要起草、编制及校对人员：田锋、李焕、陈奕荣、杨军永、喻强、杨振亚、李世阳、袁胜万、王永康、潘沙、张晓亮、王祥等。

其中：

通则部分内容，由李焕、杨军永、袁胜万、张晓亮等人编制和校对；

结构静强度计算仿真分析规范指南，由李焕、杨军永、袁胜万、张晓亮等人编制和校对；

结构模态计算仿真分析规范指南，由李焕、杨军永、喻强、袁胜万等人编制和校对；

气动计算仿真分析规范指南，由田锋、杨振亚、潘沙、杨军永等人编制和校对；

散热计算仿真分析规范指南，由田锋、王永康、杨军永等人编制和校对；

天线电磁计算仿真分析规范指南，由田锋、李世阳、杨军永等人编制和校对；

汽车碰撞仿真分析规范样例，由李焕、陈奕荣、杨军永、王祥等人编制和校对。

其他参与编制和校对人员包括：关清芳，钱华山，辛雨，杨小军，丁来军，杨建英，郑亮，高原，周永发，唐滨，李建周等。

中国数字仿真联盟标准规范部

2020年3月19日

目录

序	II
编者按（一）	III
编者按（二）	错误!未定义书签。
前言	V
目录	VI
第一部分：通则	1
第一章：概述	1
1 引言	1
2 仿真分析规范指南目标	2
3 仿真分析规范制定方法	2
第二章：仿真分析规范内容	2
1 基础通用内容	2
2 具体业务内容	4
第三章：仿真分析规范制定流程和原则	10
1 规范编制团队建立	10
2 仿真分析规范制定基本原则	11
3 规范修订与完善	11
参考文献	11
第二部分：仿真分析规范编制指南	12
第一章：结构静强度仿真分析规范指南	13
1 目标	13
2 范围	13
3 规范性引用文件	13
4 术语和定义	13
5 通用规则	13
6 工作流程	17
7 前处理建模	17
8 求解设置	22
9 结果后处理	22
10 结果评估	23
11 模型修正	23
12 计算报告	24
第二章：结构模态仿真分析规范指南	25
1 目标	25
2 范围	25
3 规范性引用文件	25
4 术语和定义	25

5	通用规则	26
6	工作流程	28
7	前处理建模	28
8	求解设置	32
9	结果后处理	32
10	结果评估	33
11	模型修正	33
12	计算报告	34
	第三章：气动计算仿真分析规范指南	36
1	目标	36
2	范围	36
3	规范性引用文件	36
4	术语和定义	36
5	通用规则	37
6	交付物	37
7	工作流程	37
8	前处理建模	38
9	提交求解	39
10	结果后处理	39
11	结果评估	40
12	模型修正	40
13	计算报告	40
	第四章：散热计算仿真分析规范指南	41
1	目标	41
2	范围	41
3	规范性引用文件	41
4	术语和定义	41
5	通用规则	42
6	交付物	44
7	工作流程	44
8	前处理建模	44
9	提交求解	46
10	结果后处理	47
11	结果评估	47
12	模型修正	47
13	计算报告	48
	第五章：天线电磁计算仿真分析规范指南	50
1	目标	50
2	范围	50

3	规范性引用文件	50
4	术语和定义	50
5	通用规则	51
6	交付物	53
7	工作流程	54
8	前处理建模	54
9	求解设置与提交求解	57
10	结果后处理	58
11	结果评估	58
12	模型修正	58
13	计算报告	59
	第六章：汽车碰撞仿真分析规范样例	60
1	目标	60
2	范围	60
3	规范性引用文件	60
4	术语和定义	60
5	通用规则	60
6	交付物	65
7	工作流程	66
8	整车模型建立	68
9	碰撞模型建立	81
10	初始条件及边界条件	81
11	求解设置	81
12	结果后处理分析	83
13	计算报告	84
	第三部分：后序	85
	附录 A 参考性附表	86
	附录 B 参考性附图	90

第一部分：通则

第一章：概述

1 引言

CAE 的英文全称为“Computer Aided Engineering”，中文意为“计算机辅助工程”，是指以计算数学、计算力学及相关工程科学为基础的针对复杂工程或产品进行数学建模、计算分析、行为模拟与优化设计的计算机信息处理技术。其中，“相关工程科学”涉及机械、电子、建筑、交通、气象、地质、海洋、生物、医药等极为广阔的应用领域，由此形成了众多的 CAE 技术应用分支。而计算数学与计算力学则渗透于各个应用分支，为具体工程问题的建模与求解提供相应的数学工具，从而构成相关 CAE 软件的核心计算方法。

CAE 是一个很广的概念，从字面上讲可以包括工程和制造业信息化的所有方面。但是，传统的 CAE 主要指用计算机对工程和产品进行性能和安全可靠分析，对其未来的工作状态和运行行为进行模拟，及早发现设计缺陷，并证实未来工程、产品功能和性能的可用性与可靠性^[1]。可见，CAE 是一项综合性的应用技术，它以解决具体工程问题为出发点，借助于计算机信息处理手段，集成应用计算数学、计算力学等“单元”技术，形成系统化的技术解决方案以支持复杂工程或产品的优化设计^[2]。

CAE 的理论基础起源于 20 世纪 40 年代，国外在 20 世纪 50 年代末 60 年代初开始投入大量人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序；在 20 世纪 70~80 年代 CAE 软件得到了蓬勃发展，尤其至 20 世纪 90 年代以来，CAE 开发商对软件的功能、性能、可用性和可靠性以及运行环境的适应性等方面进行了改进，使得 CAE 仿真的功能和计算精度都有很大提高，各种基于产品数字建模的 CAE 工具应运而生，现已成为工程和产品结构分析中（如航空、航天、机械、土木结构等领域）必不可少的数值计算工具，在帮助企业缩短产品设计周期，降低产品设计成本方面起到了重要的作用。

而我国 CAE 软件的形成和应用从 20 世纪 70 年代开始的。近 40 多年来，我国在 CAE 理论研究和软件自主开发方面的努力始终没有停止过，也有一些拥有自主知识产权的软件系统脱颖而出。20 世纪 90 年代以来，开放力度加大，大批国外软件涌入中国市场，加速了 CAE 技术在中国的推广，提高了我国装备制造制造业的设计水平。与此同时，我国自主开发的软件受到严峻挑战，特别是盗版的国外软件，对我国自主开发的 CAE 软件打击很大，甚至一些优秀的软件基本退出了国内 CAE 市场。作为工业大国，中国不可能长期依赖引进国外的技术和产品，培植自己的 CAE 软件产业，以应用为牵引，提升工业设计软件和仿真分析软件的应用水平，缩短设计周期，提高产品竞争力和企业核心竞争能力，推动国产 CAE 软件在工业企业的应用普及，成为当务之急。

同时，随着 CAE 仿真分析工作在企业的开展，大量的工程师参与到 CAE 仿真分析工作中去，不同的分析工程师在分析过程中，由于自身掌握的相关专业知识、软件掌握能力以及对产品本身的理解程度，往往在模型简化、网格划分、边界条件的处理上各不相同，具有较大的随意性，这就造成了不同的分析人员对于同一问题分析结果有一定差异，从而导致产品设计者对于分析结果的怀疑，在这种情况下要对此分析结果反复校核，浪费大量人力物力。

为了更好的发挥 CAE 仿真分析在企业研发过程中的作用，需要建立仿真分析规范对产品设计的各个阶段进行规范指导。最近几年，这方面的规范建立在国外非常流行，国内各家汽车供应商也都进行了仿真分析规范的实施，并取得了很好的应用成果，对企业的研发带来了很大的益处。基于以上原因，重视新产品研发的企业迫切需要建立自己的 CAE 仿真分析规范，用来解决目前 CAE 仿真存在的各种问题。通过 CAE 仿真分析规范的建立，一方面可以用以指导、规范仿真分析工作；另一方面可以形成自身的知识积累，便于其他分析人员快速进入到规范的工作流程中，使企业的 CAE 仿真工作高效、快捷、准确的进行，为产品研发提供强有力的保障。

2 仿真分析规范指南目标

仿真分析规范是基于企业的产品特点，总结以往的仿真分析经验、参照试验数据、借鉴其它行业的相关标准，以理论为指导，制定出一套规范化作业流程。由于仿真分析规范具有强烈的行业和企业特点，需要企业投入大量的人力物力进行制定和完成，制定的主导权一定在企业自身。

因此，仿真分析规范指南的目标不是为企业制定仿真分析规范，而是建立在对国内外行业标杆企业的仿真分析规范了解的基础上，为企业提供制定仿真分析规范的方法论，让企业能够知道如何才能建立一个完整的、有效的、先进的仿真分析规范。

3 仿真分析规范制定方法

通常，企业会以研发的主要产品为研究对象，建立相应的仿真分析规范，用以规范企业的仿真分析过程。仿真分析规范的建立与 CAD 设计和试验密切相关，一般 CAE 仿真分析规范建立的步骤如下：

- a) 明确产品的性能要求，一个产品具有不同种类的性能要求，首先确定哪些性能指标需要进行仿真分析验证；
- b) 确定性能指标的评价标准，这需要在对同类产品进行大量试验测试、计算分析、质量事故统计、参考相关标准的基础上形成；
- c) 制定仿真建模标准，重点内容是网格质量标准、边界条件与载荷标准，材料数据、连接模拟标准（比如螺栓、点焊、缝焊等），这需要在大量试验测试结果与计算结果相互校对的基础上形成；
- d) 确定计算结果的处理方法，最终的计算结果可能需要在已有的计算输出中进行进一步的数据处理，才能与试验测试结果和评价指标进行比对。

第二章：仿真分析规范内容

CAE 仿真分析规范通常包括两部分，即仿真分析规范基础通用内容与具体业务内容两大部分：

基础通用内容：指的是对于企业通常进行 CAE 仿真总体的工作内容，指导如何进行 CAE 仿真分析及管理，可以根据企业的具体业务来分类和梳理；

具体业务内容：企业根据自身的产品分类来进行梳理、规划，对其研发的具体产品进行某一类型仿真分析规范内容的制定。比如某类型结构强度分析规范，包括从模型的导入、几何清理简化、网格生成、材料属性赋予、边界载荷设定、分析提交、结果处理、评价及报告编写等，形成一套作业指导书，仿真分析工程师按照作业指导书进行结构的强度分析，从而提升工作效率、保证精度。

1 基础通用内容

1.1 目标

仿真分析规范中应对制定规范的目标进行描述，如：

为了规范 XXX 结构静强度（或动力学、流场、电磁等）有限元分析过程，特制订本规范。通过规范的制定，使得不同工程师在参考本文件进行 XXX 结构静强度有限元分析时，得出的有限元分析结果具有高度的一致性，并保证仿真分析结果具有较高的分析精度。

1.2 范围

仿真分析规范中应对规范的适用范围进行明确，如：

本规范规定了 XXX 结构静强度有限元分析的分析依据、分析流程、分析要求、分析类型、建模原则、结果评估、模型修正、结果输出、数据处理、报告编写等内容，适用于应用 XXX 有限元分析软件进行 XXX 结构静强度和刚度分析。

1.3 规范性引用文件

仿真分析规范中应对引用的文件进行描述，如：

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注明日期的引用文件，仅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）适用于本标准。

GB/T31054-2014 机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语；
GB/T33582-2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则；
GB/T4797.4-2006 电工电子产品自然环境条件太阳辐射与温度
GJB150.7A-2009 军用装备实验室环境测试方法第7部分：太阳辐射试验
SJ20590-96 军用微型计算机热设计技术要求
SJ20743-1999 散热器手册第1部分热阻曲线集
GB3100-1993 国际单位制及应用；
GB3101-1993 有关量、单位和符号的一般原则；
ASME V&V10-2006 Guide for Verification and Validation in Computation Solid Mechanics；
ASME V&V10.1-2012 An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics。

1.4 术语和定义

仿真分析规范中应对规范中使用的主要术语进行描述和定义，如：

下列术语和定义适用于本文件。

有限元建模 (finite element modeling)：构建有限元模型的过程，包括几何模型构建及处理、材料属性定义、网格划分、边界（载荷）条件施加、求解参数设置等步骤；

几何模型 (geometry)：使用几何概念描述物理或者数学物体形状，一般包括点、线、面、体等元素构成集合；

材料属性 (material property)：用于描述机械结构所用材料物理特性的数据集合；

边界条件 (boundary condition)：用于描述机械结构在给定工况下，求解域边界上几何以及物理条件，如力、温度、速度、位移等约束和载荷信息；

网格划分 (mesh)：把几何模型分成很多小的单元，作为具有几何、物理属性的最小的求解域；

坐标系 (Coordinate System)：规定仿真中使用何种坐标系，一般情况下，建议使用直角笛卡尔坐标系，也可以根据分析需要，定以其它局部坐标系，包括笛卡尔坐标系、柱坐标系、球坐标系等；

单元 (element)：具有几何、物理属性的最小求解域；

节点 (node)：单元之间的铰接点；

零维单元 (zero dimensional element)：变现形式为点的单元，如质量单元等；

一维单元 (one dimensional element)：表现形式为线段的单元，如刚性单元、杆单元、梁单元等；

二维单元 (two dimensional element)：表现形式为平面片的单元，如矩形单元（四边形单元）、三角形单元等；

三维单元 (three dimensional element)：表现形式为实体的单元，如四面体单元、六面体单元等；

质量单元 (mass element)：表征只具备质量属性的单元；

弹簧单元 (spring element)：表征结构之间具有弹簧约束作用的单元；

杆 (bar)：一类长度远大于其他方向尺寸的构件；

梁 (beam)：一类承受横向载荷，以弯曲变形为主的杆结构；

板/壳 (plane/shell)：一类厚度方向尺寸远小于长度和宽度方向的结构；

实体 (solid body)：由曲面或棱边构成封闭体积的三维几何体；

低阶单元 (low order element)：使用一次函数描述边界的单元；

高阶单元 (high order element)：使用二次或更高次函数描述边界的单元；

约束 (constraint)：减少自由度的各种限制条件；

载荷 (load)：施加在物体上或系统上的作用力系；

强度 (strength)：描述结构抵抗破坏的能力；

位移 (displacement)：表征物体上一点相对于参考系的位置变化的时间变量；

长宽比 (aspectratio)：描述二维或三维单元最长边与最短边之比的量；

细长比 (slenderness)：杆件的计算长度与杆件截面的回转半径之比；

翘曲度 (warpage)：单元偏离平面的程度，用于检查单元的翘曲；

偏斜度 (skew)：描述单元的扭曲程度的数学量；

内角 (interior angle)：指三角形单元或四边形单元的夹角的值，常用于描述单元的最大内角或者最小内角的数学量。

1.5 坐标系

仿真分析规范中应对有限元建模采用的坐标系进行描述，坐标系由右手定则来确定，宜采用笛卡尔坐标系直角坐标系，必要时可选用柱坐标系或球坐标系。

有限元分析建模时应定义全局坐标系，当模型载荷、约束或结果显示需求与全局坐标系不一致时，可增加局部坐标系。

1.6 单位制

仿真分析规范应规定仿真分析中使用的单位制，单位制应该统一且简洁。一般情况下，工程上建议使用常用单位制，如附表 1 和附表 2。

1.7 计算程序

仿真分析规范中需要根据分析任务要求对使用的建模方式、单元类型、单元阶次、求解设置、结果处理方式等进行说明，而不同的计算程序在处理上述问题时的设置方式会有所差异。因此，建议仿真分析规范中对规范适用的计算机程序进行说明，必要时对规范适用软件的版本号也要进行说明，参考如下：

本规范适用以下软件工具进行 XXX 进行仿真计算分析。

a) 前处理软件：SimSoft1，软件版本号不低于 XX 版本；

b) 求解器软件：SimSoft2。

其它计算软件工具或版本，可参考使用。

1.8 交付物

仿真分析规范应明确有限元分析过程中需要提交的数据和模型，有限元分析过程中一般需要提交的文件如下：

- a) 有限元几何模型文件；
- b) 有限元网格模型文件；
- c) 载荷边界文件；
- d) 材料信息文件；
- e) 求解结果模型文件；
- f) 后处理及报告文件等。

2 具体业务内容

2.1 工作流程

仿真分析规范中应对仿真分析的过程进行规范，一般可采用流程图的方式表示，如附图 1。

2.2 几何建模处理方式

仿真分析几何建模一般有两种方式，一是将 CAD 设计模型导入有限元分析前处理软件进行建模，称之为“几何导入法”；一种是在有限元分析前处理软件直接建模，称之为“直接建模法”，两种建模方式的对比如表 1。

表1. 几何建模方式对比

建模方式	定义	优点	缺点
直接建模法	直接在 CAE 软件前处理模块中进行建模的方式，现有 CAE 软件基本上都具有前处理建模功能。	使用数据量较小，便于模型参数化，适合简单模型建模。	建模效率低，对于复杂模型建模比较困难。

几何模型导入法	通过 CAD 建模软件建立几何模型，然后再导入 CAE 软件中进行建模处理的方式。	可以建立复杂仿真模型。	需要对 CAD 模型进行简化，模型特征可能会有丢失，模型参数化不方便。
---------	---	-------------	-------------------------------------

无论采用何种建模方式，都需要根据结构特征、分析目的、采用的单元类型等因素，对几何模型进行适度简化，几何模型简化不应改变结构的基本特征、传力路径、刚度、质量分布等，对于有多个零部件组成的复杂结构，根据分析目标和要求，不同零部件的模型简化也可能采用不同简化规则，详细的模型简化规则可根据企业专有标准/规范处理，也可通过 CAD/CAE 工具并结合二次开发实现特征简化及高效处理。

在进行几何特征清理时，可基于以下几个方面考虑：

- a) 几何特征所属零部件在总装配的重要程度；
- a) 几何特征与重点分析区域的相关程度；
- b) 几何特征尺寸与网格平均尺寸的对比。

2.3 网格划分设置方式

2.3.1 单元类型选择

不同仿真分析软件所使用的单元类型和名称有所差异，规范中应对使用单元类型和名称进行说明。通常情况下，仿真分析中使用的单元类型包括零维单元（如质量单元）、一维单元（如刚性单元、杆单元、梁单元等）、二维单元（如壳单元、板单元、面单元等）、三维单元（如体单元）及其它单元等。

仿真分析规范中应根据结构和分析要求指定合适的单元类型，单元类型的选择应能反映不同部件的结构形式，在满足分析要求的前提下，单元类型选择一般遵循以下编制原则：

- a) 选用形状规则的单元；
- b) 选用满足精度要求的单元；
- c) 选用计算效率快的单元；
- d) 线性四面体单元、楔形单元仅用于网格过渡或几何拓扑需要的局部区；
- e) 选用的单元类型要基于 V&V 理论（Verification & Validation，模型验证和确认，简称 V&V，详见 ASME V&V 相关标准）进行精度验证。

2.3.2 单元阶次选择

有限元单元可分为低阶单元和高阶单元，使用一次函数描述边界的单元称为低阶单元，采用二次或更高次函数描述边界的称为高阶单元。仿真分析规范中应根据结构和分析要求指定合适的单元阶次，单元阶次选择一般遵循以下编制原则：

- a) 对于结构形状不规则、变形和应力分布复杂时宜选用高阶单元；
- b) 计算精度要求高的区域宜选用高阶单元，精度要求低时可选用低阶单元；
- c) 不同阶次单元的连接位置应使用过渡单元或多点约束等。

2.3.3 网格尺寸选择

对于有限元这样一种数值分析方法，在单元类型确定之后，当单元网格划分越来越细时，数值近似解将收敛于精确解，通过增加网格数量和密度，计算精度一般也会随之提高。但是，如果盲目地增加网格数量，将会大大增加单元网格划分时间及求解时间，有时还会因计算的累积误差反而会降低计算精度。所以，在实际工作中，如何划分网格才能既保证计算结果有较高的精度，又不致使计算量太大，一直是困扰仿真分析工程师的难点。

为此，在仿真分析规范中应根据分析目的、计算规模、效率、硬件承受能力等综合因素，明确网格划分时选择网格尺寸（网格密度），如附表 3。

网格尺寸控制一般遵循以下基本原则：

- a) 应对结构变化大、曲面曲率变化大、载荷变化大或不同材料连接的部位进行细化；
- b) 单元尺寸过渡平滑，粗细网格之间应有足够的单元进行过渡，避免相邻单元的质量和刚度差别太大；

c) 对于实体单元网格，在结构厚度上应确保不少于三层。

网格尺寸的选取可基于 V&V (Verification 和 Validation, 验证和确认, 简称 V&V, 详见 ASME V&V 相关标准) 理论进行验证, 并推荐采 GCI (Grid Convergence Index, 网格收敛指标, 简称“GCI”) 方法进行网格无关性分析, 进而选取合适的网格尺寸。

GCI 方法实质是基于 Richardson 外推法进行网格收敛误差分析的方法, 其认为真实解与数值解之间的关系如公式 (1) 所示:

$$\omega_{exact} = \omega_h + A \cdot h^p + \text{H.O.T as } h \rightarrow 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

ω_{exact} ——精确解;

ω_h ——网格尺寸为 h 时的数值解;

h ——网格尺寸;

p ——数值算法的精度阶;

A ——常量;

H. O. T ——高阶项, 当 h 趋于零时, 其趋于零的速度比最低阶误差项快。

公式 (1) 认为, 在网格尺寸足够小时, 以至于与最低阶误差项相比, H. O. T. 可以忽略不计, 在这种情况下, 数值解渐近收敛于真实解。

假设有 h_1 (细尺寸网格)、 h_2 (中间尺寸网格) 和 h_3 (粗尺寸网格) 三种网格尺寸, 其对应的数值分析结果分别为 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 , 忽略公式 (1) 高阶项, 则有:

$$\begin{aligned} \omega_{exact} &= \omega_1 + A \cdot h_1^p \\ \omega_{exact} &= \omega_2 + A \cdot h_2^p \\ \omega_{exact} &= \omega_3 + A \cdot h_3^p \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

将公式 (2) 消元 ω_{exact} 和 A 可得:

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_3 - \omega_2} = \frac{h_1^p - h_2^p}{h_2^p - h_3^p} \quad \dots\dots\dots (3)$$

公式 (3) 是一个超越方程, 可以通过合适的数值方法求解 p 。通常为了简化求解精度阶 p , 可以将网格尺寸变化比率设置成常数, 即设置:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_2} = r \quad \dots\dots\dots (4)$$

将公式 (4) 带入公式 (3) 可求得精度阶 p :

$$p = \ln \left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_3 - \omega_2} \right) / \ln(r) \quad \dots\dots\dots (5)$$

取公式 (2) 中的两个较细网格尺寸方程, 可得 A :

$$A = \frac{\omega_2 - \omega_1}{h_1^p - h_2^p} \dots\dots\dots (6)$$

将公式 (6) 带入公式 (2) 中细网格方程可得:

$$\omega_{exact} = \omega_1 + \frac{\omega_2 - \omega_1}{h_1^p - h_2^p} \cdot h_1^p = \omega_1 + \frac{\omega_2 - \omega_1}{(h_1/h_2)^p - 1} \dots\dots\dots (7)$$

将公式 (7) 进行转换, 可得网格尺寸 h_1 的数值与真实解之间的绝对误差:

$$\omega_{exact} - \omega_1 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{(h_1/h_2)^p - 1} \dots\dots\dots (8)$$

令 $\varepsilon = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_1$, 则公式 (8) 可变为:

$$\omega_{exact} - \omega_1 = \frac{\varepsilon}{(h_1/h_2)^p - 1} \cdot \omega_1 \dots\dots\dots (9)$$

由公式 (9) 得出基于 Richardson 外推法的 GCI 网格收敛指标算法如下:

$$GCI = Fs \cdot \frac{|\varepsilon|}{(h_2/h_1)^p - 1} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

Fs ——安全系数, 基于 3 种网格尺寸的离散误差估计方法中, Richardson 推荐取值为 1.25;

GCI ——网格相对最优解收敛误差的无量纲指标, 具体而言, 当其乘以指定网格尺寸下的数值解时, 得出一个误差带, 精确解就位于这个误差带范围之内, 以细网格尺寸 h_1 为例, 精确解为:

$$\omega_{exact} \in \omega_1 \cdot (1 \pm GCI) \dots\dots\dots (11)$$

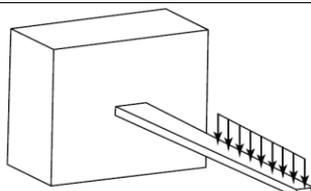
在 GCI 因子计算过程中乘了一个安全系数 Fs, 是因为在公式 (2) 中忽略了高阶项的影响, 实际情况是高阶项的影响也是不可忽略的, 而乘以安全系数并不能保证精确解将完全落在公式 (11) 范围内, 只是可能性比较高而已。

GCI 方法适用于任何离散方法的任何阶空间收敛问题, 其唯一特别要求是网格尺寸 $h_1 <$ 网格尺寸 h_2 ,

且推荐的网格细化比率应大于 1.3, 即 $h_2/h_1 > 1.3$ 。

以某悬臂梁结构为例, 其结构特征 (示意) 及对应的网格尺寸和数值计算结果如表 2 所示。

表2. 网格尺寸与数值解

模型示意	网格参数		数值计算结果	
	网格尺寸类型	网格尺寸 (mm)	数值解类型	数值解 (mm)
	粗网格尺寸 (h_3)	500	粗网格数值解 (ω_3)	13.098739
	中网格尺寸 (h_2)	250	中网格数值解 (ω_2)	13.008367
	细网格尺寸 (h_1)	166.667	细网格数值解 (ω_1)	12.991657
	精确解			12.978342

将表 2 中数据代入上述公式可以得出：

$$\begin{aligned} p &= 2.00256154 \\ \varepsilon &= 0.00128621 \\ \text{GCI} &= 0.00128381 \end{aligned} \dots\dots\dots (12)$$

从公式 (12) 可以看出，网格尺寸 h_1 下 $\text{GCI}=0.00128381$ ，即数值解与精确解之间的误差 $<0.13\%$ 。

基于该 GCI 值得出 h_1 网格尺寸下精确解 ω_{exact} ：

$$\omega_{exact} \in (12.9750, 13.0083) \dots\dots\dots (13)$$

从表 2 和公式 (13) 看出，本案例的真实解为 12.978342mm，在 (12.9750, 13.0083) 范围之内，网格尺寸 h_1 的数值解与精确解之间的误差为 $0.1\% < \text{GCI} = 0.13\%$ 。

基于 GCI 进行网格无关性分析方法详见 ASME V&V10.1-2012 《An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics》。

2.3.4 网格划分要求

选择合适的单元类型和网格尺寸后，有限元网格划分多由前处理软件自动并结合手工干预的方式生成，有限元网格划分一般应遵循以下要求：

- a) 网格划分时应保留主要的几何轮廓线，网格应与几何轮廓保持基本一致；
- b) 网格密度应能真实反映结构基本几何形状特征；
- c) 网格形状应尽可能规则，面网格尽量划分为四边形，体网格尽量划分为六面体；
- d) 网格特征应能满足网格质量检查要求；
- e) 对称结构可采用对称网格。

2.3.5 网格质量检查

网格划分完后，需要对网格划分质量进行检查，控制网格质量参数在合理范围内，网格中不应存在畸变网格，网格检查的主要参数包括：单元方向、翘曲度、偏斜度、内角等；保证结构重点关注区域的单元质量高，非关注区域的单元质量可适当降低。

一般情况下，网格质量检查内容参考附表 4。

2.4 连接设置

对于复杂装配体结构，规范中还需要明确不同零部件装配之间的连接建模处理关系，包括共节点连接、螺栓连接、铆钉连接、焊接、法兰连接、接触连接、刚性单元连接、胶粘连接等。

2.5 材料性能设置

根据仿真分析任务要求，对仿真分析中所用到的材料属性信息和设置方式进行说明。

2.6 边界条件设置

2.6.1 约束

对参与仿真分析计算的所有约束进行分析，一般考虑以下要求：

- a) 约束施加应符合实际安装条件；
- b) 约束区域应能准确反映实际约束情况；
- c) 避免单点约束，避免应力集中；
- d) 明确约束的位置、自由度和方向。

2.6.2 载荷

对参与仿真分析计算的所有载荷进行分析，一般考虑以下要求：

- a) 按照载荷输入条件及安全系数要求，分析全部给定工况的载荷；

- b) 考虑不同工况同一时刻各项载荷的联合作用；
- c) 明确载荷的位置、大小和方向。

2.6.3 前处理模型检查

有限元模型在提交求解前应进行充分的质量检查，确保模型网格质量，输入参数的正确性，边界条件、连接接触关系的合理性等，模型质量检查主要包括：

- a) 单位制检查，检查模型单位制是否统一，不应存在单位冲突情况；
- b) 单元特征检查，主要包括单元节点的重复性、单元的连续性、单元最小尺寸、单元方向、自由边、单元形状评价指标检查以及多点约束的主、从节点冲突性检查等；
- c) 属性特征检查，主要包括单元几何属性、材料属性、材料方向及模型质量属性检查等；
- d) 载荷及边界条件检查，主要包括载荷大小、方向及边界条件的正确性。

2.7 求解设置

仿真分析规范中应根据仿真分析任务和目标要求，明确求解器的类型及设置参数，如静强度分析中明确求解器类型和计算时间步长等，模态分析中明确模态分析方法、模态阶数、频率上下限等，流体分析中明确求解器类型、求解收敛参数、初场定义方式等。

2.8 结果后处理

有限元法计算结果需按照有关准则进行数值分析和图形显示，而不同后处理方式将对结果产生很大影响。因此，仿真规范中应明确后处理结果类型、表现形式和结果后处理方式。

2.8.1 结果类型

结果类型包括应力、应变、位移、速度、加速度、压强、支反力、螺栓力、接触力、屈曲系数、模态频率、阻力系数、升力系数、激波位置、电流密度、电压分布等。

2.8.2 结果表现形式

仿真分析结果以云图、矢量图、剖面图、列表、数值、曲线等形式表现。

2.8.3 后处理方式

由于有限元直接计算出来的结果在单元边界处不连续且整体精度不高，需要借助有限元后处理工具进行后处理加工来提高精度，而不同的后处理技术在结果上也有所差异，规范中需要明确采用的后处理工具和采用的技术方式，常采用后处理技术方式有平均和局部插值技术、整体投影技术、外推技术等。

2.9 结果评估

理论上，基于仿真规范建模得出的计算结果应具有满足规范要求的精度，但实际工作中不可避免会有纰漏存在。

为此，仿真分析完之后对结果的正确性、求解的精度等进行评价，评价方法一般分为表象评估法和数值评估法。

2.9.1 表象评估法

通过结果表象进行定性评估，具体原则如下：

- a) 检查模型的收敛性，包括求解收敛性和网格收敛性；
- b) 分析关注位置结果的合理性；
- c) 根据云图或曲线的连续性。

2.9.2 数值评估法

多次试算调整模型的边界条件和模型参数，数值评估分析结果的可靠性。

2.10 模型修正

在完成仿真分析之后，如有试验数据结果，可采用一致性算法对仿真结果与试验结果之间的误差进行分析，当仿真结果和试验结果之间的误差大于某一限定值时，需要对仿真模型进行修正。

仿真模型修正可以基于模型 V&V 的理论与方法，开展仿真模型的验模研究和应用，利用试验数据量化仿真模型的精度，并基于模型修正的方法进行仿真精度的提升，模型修正流程如附图 2。

a) 仿真结果精度评估

由于有限元仿真分析带有大量的假设条件以及不确定的建模参数,所以仿真分析结果与试验结果之间必然存在一定误差,通过误差相关性分析算法或工具可以量化仿真模型的精度。如静强度分析可以采用位移、应力、应变、静刚度等相关误差作为仿真结果精度评价;动力学分析可以采用模态频率、模态振型相关性、模态置信准则、坐标模态置信准则等相关误差作为仿真结果精度评价。

b) 仿真建模的误差源分析

通过 DOE 试验设计、参数灵敏度分析等方法对影响仿真结果的因素进行分析,包括:有限元建模误差(如结合面连接刚度、材料属性偏差、结构阻尼等建模误差)、网格离散误差、求解器误差、分析误差等因素进行分析,判断仿真误差主要来源,从而指导对有限元模型改进和精度提升。

c) 仿真模型修正

基于模型 V&V 的方法进行有限元模型参数修正。首先通过灵敏度分析方法进行参数的重要度分析,筛选出对仿真结果有重要影响的高灵敏度参数,将这些重要参数作为修正变量。然后利用模型修正算法进行自动参数修正,提升仿真和试验结果的吻合度。

2.11 报告编制

在完成仿真分析之后,应针对具体分析对象、分析目的、分析问题编写有限元分析报告,报告编写内容至少应包括以下方面:

- a) 任务概述;
- b) 分析过程;
- c) 分析结论
- d) 优化和建议。

仿真报告模板可参考内容如附表 7。

2.11.1 任务概述

应对分析问题进行一定的背景介绍,并说明本报告所采取的分析类型和拟关注的分析结果。

2.11.2 分析过程

应对仿真分析的过程进行描述,包括模型简化、网格划分、材料模型、边界条件、载荷和求解方式等。

2.11.3 分析和结论

应给出典型的图表结果,如应力/应变云图、模态振型、温度场云图、辐射方向图等。图表应简明、易懂,图表中不应有无关的信息。

根据给出的图表结果,总结分析结论,并给出客观、综合评定。

2.11.4 优化和建议

应根据分析结果,给出优化建议和设计改良方案。

第三章：仿真分析规范制定流程和原则

1 规范编制团队建立

规范编制团队包括评审委员会成员、相关领域专家、相关领域工程人员、仿真人员,编写人员等。

1.1 规范大纲的讨论和确立

规范大纲界定了仿真规范的总体性、纲领性的框架结构和内容章节,规范的创建应首先确立规范大纲的主要内容。

1.2 定期召开会议讨论进度及问题

根据工作节点,定期召开会议讨论规范创建进展,分析解决存在的难点与问题,会议可以邀请相关领域专家或工程应用仿真人员参与。

1.3 组织专家考核和评审

对规范的每一项内容、章节、条目的创建、更新和变化均需相关领域的专家进行考核评审，对规范的适用范围、可操作性及应用效果等进行案例考核和结论评审，并对考核评审过程和结论进行书面记录。

1.4 形成初稿送审

经过专家考核评审确认过的规范，可以形成规范初稿，送对应的评审委员会评审，形成终稿，以便发布。

2 仿真分析规范制定基本原则

2.1 清晰性

制定的仿真分析规范应规定明确且无歧义的条款，以便让不同水平的仿真工程师参考和使用，为此，仿真分析规范应遵循以下编制原则：

- a) 所规定的范围、内容应力求完整；
- b) 内容应力求清楚和准确；
- c) 规范内容应充分考虑最新技术水平；
- d) 规范能被未参加标准或规范编制的专业人员所理解。

2.2 统一性

规范或系列规范（或一项规范的不同部分）内，规范的文体和术语应保持一致。

- a) 系列规范的每项规范（或一项规范的不同部分）的结构及其章节的编号应尽可能相同；
- b) 类似的条款应使用类似的措辞起来表述，相同的条款应使用相同的措辞来表述；
- c) 每项规范或系列规范（或一项规范的不同部分）内，对于同一个概念应使用同一个术语，对于已定义的概念应避免使用同义词，每个选用的术语应尽可能只有唯一含义。

2.3 一致性

如果有相应的国家、行业等标准文件，起草仿真分析规范时应以其为基础并尽可能与其保持一致。

2.4 适用性

规范的内容应当便于实施，并且易于被其他的标准规范或文件参考或引用。

3 规范修订与完善

CAE 仿真分析规范的建立不是一蹴而就的，而是一个逐步发展的过程，可以从最基本、最有把握的学科和专业开始，这些专业和学科一般有较为丰富的试验测试数据、计算分析数据、质量事故统计数据，产品设计也趋于成熟，因此，对仿真分析业务内容把握更可靠，在此基础上制定 CAE 规范，并用规范指导分析就更可信。

CAE 仿真分析规范的建立也不是一成不变的，而是一个不断完善的过程，随着计算机和仿真技术的发展，当制定的仿真分析规范不再适应新的技术要求时，需要找出原来规范的不足和缺陷，并对仿真分析规范进行修订与完善。

参考文献

- [1] 崔俊芝. 计算机辅助工程 (CAE) 的现在和未来. 计算机辅助设计与制造[J], 2000 (6): 3-7.
- [2] 丁渭平. 汽车 CAE 技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.

第二部分：仿真分析规范编制指南

仿真分析规范是企业的仿真技术水平的重要体现，需要企业投入大量的人力物力进行制定和完成；但同时仿真分析规范具有强烈的行业和企业特点，规范制定的主体和主导权一定在企业自身。因此，本指南的目标并非为企业制定具体的仿真分析规范条款，而是为企业提供制定仿真分析规范的方法论。该方法论建立在仿真分析行业国内外标杆企业规范建立及演进历史研究基础之上，可为企业建立完整的、有效的、先进的仿真分析规范提供指导。

同时，仿真分析行业之下细分专业学科众多，并无一个规范可适用于所有专业学科；即使同一学科，因采用不同仿真软件计算，因需要分析的具体对象存在的差别，也不存在同一规范放之四海而皆准的可能。由此可知，本仿真分析规范编制指南的撰写虽然已进行了大量的总结、归纳和提炼，但仍需要进行长期研究、循环迭代和提升。本册指南属于仿真指南编制工作第一期工程，包括结构静强度、结构模态、气动、散热、天线电磁等不同专业学科章节内容，并包含一篇仿真分析规范范例——《汽车碰撞仿真分析规范样例》。其它学科和专业，将在后续工作中继续补充完善。

第一章：结构静强度仿真分析规范指南

1 目标

编制原则：

对编写或制定标准/规范的目标进行描述。

参考格式：

为了规范 XXX 结构静强度有限元分析过程，特制订本规范。通过规范的制定，使得不同工程师在参考本文件进行 XXX 结构静强度有限元分析时，得出的有限元分析结果具有高度的一致性，并保证仿真分析结果具有较高的分析精度。

2 范围

编制原则：

对标准/规范的适用范围进行明确。

参考格式：

本规范/标准规定了 XXX 结构静强度有限元分析的分析依据、分析流程、分析要求、分析类型、建模原则、结果评估、模型修正、结果输出、数据处理、报告编写等内容。

本规范/标准适用于应用 XXX 有限元分析软件进行 XXX 结构静强度和刚度分析。

3 规范性引用文件

编制原则：

将标准中引用的文件进行描述。

参考格式：

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注明日期的引用文件，仅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）适用于本标准。

GB/T31054-2014 机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语；

GB/T33582-2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则；

GB3100-1993 国际单位制及应用；

GB3101-1993 有关量、单位和符号的一般原则；

ASME V&V 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics；

ASME V&V 10.1-2012 An Illustration of the Concepts of Verification and Validation

In Computational Solid Mechanics。

4 术语和定义

编制原则：

对仿真分析规范中使用的主要术语进行描述和定义。

参考格式：

规定仿真分析规范中使用的主要术语，这些术语应该符合当前主流的仿真分析要求，部分术语如下所示。

结构静力学分析 (structural static analysis)：在静态或可近似静态载荷作用下，不考虑时间参数影响的结构响应分析；

有限元建模 (finite element modeling)：构建有限元模型的过程，包括几何模型构建及处理、材料属性定义、网格划分、边界（载荷）条件施加、求解参数设置等步骤；

其它定义和术语参见本指南通则部分内容。

5 通用规则

5.1 坐标系

对有限元建模采用的坐标系进行描述，坐标系由右手定则来确定，宜采用笛卡尔坐标系直角坐标系，必要时可选用柱坐标系或球坐标系。

有限元分析建模时应定义全局坐标系，当模型载荷、约束或结果显示需求与全局坐标系不一致时，可增加局部坐标系。

5.2 单位制

编制原则：

规定仿真分析规范中使用的单位制，单位制应该统一且简洁。一般情况下，工程上建议使用常用单位制，如附表 1、附表 2。

5.3 材料要素

编制原则：

对仿真计算中所用到的材料进行说明。

5.3.1 金属材料

编制原则/参考格式：

对分析中所涉及的金属材料的要素进行说明。

金属材料一般需要考虑的要素包括：

- a) 按各向同性材料考虑；
- b) 材料进入屈服要考虑塑性；
- c) 常用材料性能，包括密度、弹性模量、剪切模量、泊松比、屈服极限、极限强度和延伸率等；
- d) 热环境条件下应考虑材料线膨胀系数及温度对材料性能的影响；
- e) 注意材料热处理状态，及不同状态下的材料性能。

5.3.1.1 弹性性能

金属材料选择各向同性材料 (Isotropic)，弹性性能应定义弹性模量 E 、剪切模量 G 、泊松比 ν 。金属材料参数应满足公式 (1) 的约束条件。

$$\begin{cases} E, G > 0 \\ G = E / (2(1 + \nu)) \\ 0 < \nu < 0.5 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

E ——各向同性材料弹性模量的数值，单位为帕 (Pa)；

G ——各向同性材料剪切模量的数值，单位为帕 (Pa)；

ν ——各向同性材料泊松比。

5.3.1.2 塑性性能

塑性性能定义屈服极限 σ_s 、极限强度 σ_b 及其对应的应变值。塑性性能一般采用双线性模型。塑性应力/应变为工程应力/应变时，对于延伸率大于 5% 的材料一般按公式 (2) 折算为真实应力/应变。

$$\begin{cases} \varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \\ \sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

ε_{true} ——真实应变；

ε_{nom} ——工程应变 (又称名义应变)；

σ_{true} ——真实应力的数值，单位为帕 (Pa)；

σ_{nom} ——工程应力 (又称名义应力)，单位为帕 (Pa)。

5.3.1.3 密度

考虑重力或惯性加速度时，应定义材料的密度。

5.3.1.4 热膨胀系数

有温度载荷时，应定义材料的热膨胀系数。

5.3.2 层合复合材料

5.3.2.1 定义方式

层合复合材料通过输入单向板的材料性能及铺层，计算复合结构的性能。

5.3.2.2 单向板材料性能

单向板材料性能六个参数：纵向弹性模量 E_1 、横向弹性模量 E_2 、面内剪切模量 G_{12} 、纵向剪切模量 G_{13} 、横向剪切模量 G_{23} 及主泊松比 ν_{12} 。

5.3.2.3 二维正交各向异性材料 (2D Orthotropic)

当结构采用壳单元模拟时，选择二维正交各向异性材料。应输入单向板材料性能的 6 个参数，二维正交各向异性材料的参数应满足公式 (3) 的约束条件。

$$\begin{cases} E_1, E_2, G_{12} > 0 \\ \nu_{12}^2 < E_1 / E_2 \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

E_1 —— 二维正交各向异性材料 1 主方向的弹性模量的数值，单位为帕 (Pa)；

E_2 —— 二维正交各向异性材料 2 主方向的弹性模量的数值，单位为帕 (Pa)；

G_{12} —— 二维正交各向异性材料 1-2 平面的剪切模量的数值，单位为帕 (Pa)；

ν_{12} —— 二维正交各向异性材料主泊松比，表示单轴应力在 1 向作用时 2 向产生的横向应变与 1 向的纵向应变之比。

5.3.2.4 三维正交各向异性材料 (3D Orthotropic)

当结构采用体单元模拟时，选择三维正交各向异性材料，应定义三向弹性模量 E_1 、 E_2 、 E_3 ，剪切模量 G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 及泊松比 ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 共九个参数。三维正交各向异性材料的参数应满足公式 (4) 的约束条件。

$$\begin{cases} E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23} > 0 \\ \nu_{ij} / \nu_{ji} < E_i / E_j \\ \nu_{ij}^2 < E_i / E_j \\ 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{12}\nu_{23}\nu_{13} > 0 \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$E_i (i=1,2,3)$ —— 各向异性材料 1、2、3 主方向的弹性模量的数值，单位为帕 (Pa)；

$G_{ij} (i, j=1,2,3)$ —— 各向异性材料 i - j 平面的剪切模量的数值，单位为帕 (Pa)；

$\nu_{ij} (i, j=1,2,3)$ —— 各向异性材料主泊松比，表示单轴应力在 i 向作用时 j 向产生的横向应变与 i 向的纵向应变之比。

5.3.2.5 定义材料的其他要求

定义材料的其他要求主要包括：

- a) 有层合板结构实测性能时，应对单向板的性能进行适当修正；
- b) 测试数据中一般同时提供拉伸和压缩强度、弹性模量数据，计算时可根据结构主要受载情况来选取。当难以分清，而两者数据又差别不大时，应选取较小的数据；
- c) 剪切破坏是复合材料主要失效模式之一，剪切性能应真实；
- d) 定义复合材料密度时，应根据实际产品结构质量进行修正；
- e) 各向异性材料要根据实际结构定义材料方向。

5.3.3 夹层复合材料

5.3.3.1 赋予方式

根据几何简化处理方式不同进行如下处理：

- a) 夹层壳方式根据上下面板、夹芯三层结构的材料性能及铺层情况，计算夹层结构整体性能后赋予壳；
- b) 实体加壳方式把面板性能赋予壳，夹芯性能赋予实体。

5.3.3.2 面板性能

面板性能按 5.3.1 或 5.3.2 定义。

5.3.3.3 泡沫夹芯性能

泡沫夹芯选择各向同性材料，输入弹性模量、泊松比、剪切模量及材料密度。

5.3.3.4 蜂窝夹芯性能

蜂窝夹芯常用的为六边形，一般简化处理为正交各向异性材料，应输入三个方向的弹性模量、泊松比和剪切模量共 9 个参数。蜂窝夹芯材料的参数应满足公式（4）的约束条件。实测数据一般仅提供平压模量 E_3 ，1-3 平面剪切模量 G_{13} 、2-3 平面剪切模量 G_{23} 。 E_1 、 E_2 和 E_3 相比为相对小量，比 E_3 小几个数量级，对计算结果影响较小，可将 1、2 方向简单处理为各向同性，并按公式（5）、公式（6）估算其数值。

$$E_1 = E_2 = 1.50r^3 E_s \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$r = (2/\sqrt{3})t / l \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

r ——蜂窝芯子与蜂窝箔材密度之比（相对密度）；

E_s ——蜂窝箔材的弹性模量，单位为帕（Pa）；

t ——蜂窝箔材的厚度，单位为毫米（mm）；

l ——六边形蜂格的边长，单位为毫米（mm）。

泊松比 ν_{12} 取 0.3， G_{12} 按公式（7）计算。

$$G_{12} = E_1 / [2(1 + \nu_{12})] \quad \dots\dots\dots (7)$$

注： $\nu_{13} = \nu_{23}$ ，一般小于 0.1。

5.4 计算程序

编制原则：

对 XXX 结构静强度计算使用的计算程序及版本号进行说明。

参考格式：

本规范适用以下软件工具进行 XXX 结构静强度计算分析。

- a) 前处理软件: SimSoft1, 软件版本号不低于 XX 版本;
- b) 求解器软件: SimSoft2, 软件版本号不低于 XX 版本;
- c) 后处理软件: SimSoft3。

其它计算软件工具或版本, 可参考使用。

5.5 命名/编号规则

编制原则:

为了规范模型, 并便于模型的管理、查找及模型之间的装配等, 可以对模型命名和编号进行规范化处理, 包括: 部件(Component)、零件(Part)、材料(material)、组(group)、集合(set)、节点(node)、单元(element)、接触(Contact)、坐标(coordinate)、曲线(curve)等。

参考格式:

以 XXX 结构其零件、单元、节点编号为例, 其编号规则如附表 5。

5.6 仿真目标

编制原则/参考格式:

定义仿真目标就是要列出仿真最终要达到什么结果, 或者要解决哪些问题。静强度计算的一般目标包括结构的应力、应变、位移量、支反力和支反力矩、刚度等求解结果, 如果关心强度, 就需要评估结构应力是否达到材料许用应力, 结构是否满足强度设计要求, 如果关注刚度需要评估结构变形是否满足刚度设计要求。

仿真目标可能有多个, 一要细化仿真目标, 二要按重要性排序。在后续模型建立和设置中, 要优先考虑重点的仿真目标。

5.7 交付物

编制原则/参考格式:

仿真规范中应明确有限元分析过程中需要提交的数据和模型文件, 结构静强度有限元分析过程中一般需要提交的文件如下:

- a) 有限元几何模型文件;
- b) 有限元网格模型文件;
- c) 载荷边界文件;
- d) 材料信息文件;
- e) 求解结果模型文件;
- f) 后处理及报告文件等。

6 工作流程

编制原则:

对 XXX 结构静强度有限元分析过程进行规范, 一般可采用流程图的方式表示。同时建议对整个分析过程进行管控, 一般用表格进行流程管控。

参考格式:

XXX 结构静强度有限元分析流程如附图 1。

同时, 为了对整个有限元分析过程进行管控, 建议采用附表 6 的方式对有限元分析过程进行管控。

7 前处理建模

7.1 几何建模处理

编制原则:

常用的建模方式有两种, 直接建模法和几何模型导入法(详见本指南通则部分), 可根据实际需要选择合适的建模方式进行描述。

参考格式:

XXX 结构静强度分析采用几何导入法建模，即通过将基于 XX 软件创建的 CAD 软件导入前处理软件 SimSoft1 的方法进行建模。导入的几何模型需要进行适度简化，模型简化原则如下：

- a) 几何模型简化不应改变结构的基本特征、传力路径、刚度、质量分布等；
- b) 对于厚度方向尺寸小于其他方向尺寸的结构，采用板壳结构建模，几何取结构中面；
- c) 对夹层复合材料，有夹层壳和实体加壳两种处理方式：
 - 1) 夹层壳为将上下面板和夹芯采用层合壳单元模拟，几何取夹层中面；
 - 2) 实体加壳为面板用壳、夹芯用实体，几何取面板中心线间的实体，并在上下面附一层壳。
- d) 对规则截面的细长结构，如：桁条、大梁、杆系、管路、螺栓等，采用梁单元、杆单元建模，相应的几何模型取特征交线或中心线；
- e) 对于 XXX 接头等承受局部载荷的集中力结构，采用实体单元建模；
- f) 对于 XXX 设备使用质量单元模拟，几何取质心位置。

7.2 网格划分处理

7.2.1 单元类型选择

编制原则/参考格式：

有限元单元类型包括零维单元（如质量单元）、一维单元（如刚性单元、杆单元、梁单元等）、二维单元（如壳单元）、三维单元（如实体单元）及其它单元等。单元类型的选择应能反映不同部件的结构形式，能满足分析要求的前提下，单元类型选择一般遵循以下编制原则：

- a) 选用形状规则的单元；
- b) 选用满足精度要求的单元；
- c) 选用计算效率快的单元；
- d) 选用的单元类型要基于 V&V（仿真模型验证和确认，简称 V&V）理论进行精度验证。

7.2.1.1 体单元

编制原则/参考格式：

体单元类型选择遵循以下编制原则：

- a) 体单元应能给出三方向的正应力/应变和剪应力/应变；
- b) 常用的体单元为六面体和四面体单元，优先选用六面体单元；
- c) 六面体线性单元优先选用非协调元，二次单元优先选用缩减积分单元，用在接触面上选用线性单元，以 SimSoft2 为例，推荐一阶单元可选用 Solid Type1，二阶单元可选用 Solid Type2；
- d) 四面体单元优先选用二次单元，用在接触面上选用二次修正单元，以 SimSoft2 为例，一阶单元可选用 Solid Type3，二阶单元可选用 Solid Type4；
- e) 线性四面体单元、楔形单元仅用于网格过渡或几何拓扑需要的局部区。

7.2.1.2 壳单元

编制原则/参考格式：

壳单元类型选择遵循以下编制原则：

- a) 壳单元能给出上下表面和中性面的正应力/应变、剪应力/应变；
- b) 常用的壳单元为三角形和四边形单元，优先选用四边形单元；
- c) 四边形线性单元中，可以选用缩减积分和完全积分单元，以 SimSoft2 为例，推荐一阶单元可选用 Shell Type1，二阶单元可选用 Shell Type2；
- d) 线性三角形单元仅用于网格过渡或几何拓扑需要的局部区域，且三角形单元优先选用二次单元。

7.2.1.3 梁单元

编制原则/参考格式：

梁和杆单元类型选择遵循以下编制原则：

- a) 梁单元能给出拉压、弯曲、扭转应力/应变；

- b) 考虑横向剪切效应的梁单元还能给出横向剪应力/应变;
- c) 以 SimSoft2 为例, 梁单元一阶单元可选用 Beam Type1, 二阶单元可选用 Beam Type2。

7.2.1.4 其它单元

编制原则/参考格式:

以 SimSoft2 为例, 其他单元类型选择遵循以下编制原则:

- a) 集中质量用点单元 Mass Type1 模拟;
- b) 刚度可调的连接点用弹簧元 Spring Type1 模拟;
- c) 刚性单元用 RBE Type1 单元。

7.2.2 单元阶次选择

编制原则/参考格式:

单元分为低阶单元和高阶单元, 使用一次函数描述边界的单元称为低阶单元, 采用二次或更高次数描述边界的称为高阶单元, 单元阶次选择一般遵循以下编制原则:

- a) 对于结构形状不规则、变形和应力分布复杂时宜选用高阶单元;
- b) 计算精度要求高的区域宜选用高阶单元, 精度要求低时可选用低阶单元;
- c) 不同阶次单元的连接位置应使用过渡单元或多点约束等;
- d) 单元阶次选择要基于 V&V 理论进行精度验证。

7.2.3 网格划分

7.2.3.1 网格划分要求

编制原则/参考格式:

有限元模型网格由一系列单元、节点组成, 完整的网格一般应满足以下要求:

- a) 网格划分时应保留主要的几何轮廓线, 网格应与几何轮廓保持基本一致;
- b) 网格密度应能真实反映结构基本几何形状特征;
- c) 网格密度应能反映结构真实传力路径及力的分配;
- d) 网格密度应能反映结构真实变形形状;
- e) 网格形状应尽可能规则, 面网格尽量划分为四边形, 体网格尽量划分为六面体;
- f) 网格特征应能满足网格质量检查要求;
- g) 网格单元节点应力梯度应能满足工程使用精度要求;
- h) 对称结构可采用对称网格。

7.2.3.2 网格尺寸设置

编制原则/参考格式:

网格密度(网格尺寸)应考虑分析目的、计算规模、效率、硬件承受能力等综合因素, 网格密度控制一般遵循以下基本编制原则:

- a) 应对结构变化大、曲面曲率变化大、载荷变化大或不同材料连接的部位进行细化;
- b) 单元尺寸过渡平滑, 粗细网格之间应有足够的单元进行过渡, 避免相邻单元的质量和刚度差别太大;
- c) 应力响应关注区域的网格密度应大于位移响应关注区域的网格密度;
- d) 主承力方向的单元尺寸应较小, 垂直于该方向的单元在满足质量要求时可将尺寸稍作加大;
- e) 对于实体单元网格, 在结构厚度上应确保不少于三层;
- f) 网格尺寸选取要经过理论进行网格收敛验证, 推进采用 GCI(网格收敛因子)方法网格无关性分析, 进而选取合适的网格尺寸。

参考格式:

经过 V&V 理论验证, 并满足网格收敛精度要求的网格尺寸参数, 应该写进仿真分析规范, 以某结构为例, 其网格划分尺寸参数见附表 3。

推荐实现方式:

网格尺寸的选取可基于 V&V (Verification 和 Validation, 验证和确认, 简称 V&V, 详见 ASME V&V 相关标准) 理论进行验证, 并推荐采用 GCI (网格收敛因子) 方法进行网格无关性分析, 进而选取合适的网格尺寸。

基于 GCI 进行网格无关性分析方法参见通则, 具体细节内容可参见 ASME V&V10.1-2012 《An Illustration of the Concepts of Verification and Validation in Computational Solid Mechanics》。

基于 V&V 理论和采用 GCI 方法进行网格收敛验证, 需要开展大量验证分析工作, 直接基于通用有限元分析软件开展相关工作很难取得实际有效结果, 可通过定制开发的方式辅助实现网格无关性验证分析工作; 也可以借助专业的验模分析软件进行网格收敛性分析。

7.2.3.3 单元属性设置

编制原则/参考格式:

单元属性可以赋给几何或单元, 一般应进行以下定义:

- a) 指定单元的材料, 各向异性材料应在单元属性中定义材料参考坐标系;
- b) 壳单元定义厚度及其偏置信息等;
- c) 梁单元定义截面形状尺寸 (或直接定义截面面积、转动惯性矩)、偏置信息及梁的方向等;
- d) 集中质量单元定义质量大小、转动惯量及参考坐标系;
- e) 弹簧单元定义弹簧刚度、方向及阻尼。

7.2.4 网格质量检查

编制原则:

网格划分完后, 需要对网格划分质量进行检查, 控制网格质量参数在合理范围内, 具体检查内容及要求如下: 网格中不应存在畸变网格, 网格检查的主要参数包括: 单元方向、翘曲度、偏斜度、内角等; 保证结构重点关注区域的单元质量高, 非关注区域的单元质量可适当降低。

参考格式:

XXX 结构网格质量具体检查项内容如附表 4。

7.3 连接定义

编制原则/参考格式:

仿真模型连接形式包括: 点焊、铆钉、焊接、螺栓、法兰连接、接触连接、刚性单元连接等。

7.3.1 焊接

根据焊接形式, 焊接连接可分为点焊、T 型焊、搭接焊、对接焊、断焊等, 不同的焊接形式, 其建模方式有所差异, 对其建模方式需要分别说明。

7.3.2 螺栓连接

对螺栓连接的建模方式进行明确, 是否考虑预紧力、摩擦力、接触力的影响。

7.3.3 接触连接

规范中需要对接触进行定义, 包括: 接触类型、属性、时间步、初始条件等。接触定义时常需要注意的问题如下:

- a) 在零件中事先建立好接触需要的面或组;
- b) 定义接触关系对, 包括接触类型, 主接触面、从接触面;
- c) 定义接触属性, 一般只需要定义切向摩擦系数,
- d) 定义求解过程中的一些控制选项。

7.3.4 粘接

模型中的粘接应进行以下定义:

- a) 在零件中事先建立好粘接需要的面或组;
- b) 定义粘接关系对, 包括主、从粘接面;

c) 定义求解过程中的一些控制选项。

7.3.5 多点约束

多点约束应进行以下定义：

- a) 在零件中事先建立好多点约束需要的点、线、面或组；
- b) 定义多点约束关系对，包括多点约束类型，主控制点、从属点、线或面；
- c) 定义多点约束自由度、参考坐标系。

7.4 边界条件设置

7.4.1 约束

编制原则：

规范中应对参与仿真分析计算的约束情况进行分析，一般考虑以下要求：

- a) 有限元模型约束施加应符合实际安装条件；
- b) 约束区域应能准确反映实际约束情况，根据约束类型选取合适的施加方式，如固支应选择自由度全部约束，铰支选择平动自由约束，对称结构选择对称或反对称约束；
- c) 避免单点约束，避免应力集中；
- d) 明确约束的位置、自由度和方向。

参考格式：

XXX 产品静强度分析时，其约束方式如下：

- a) 约束 C1：在 XXX 结构下端施加纵向、横向、垂向约束（UX、UY、UZ）；
- b) 约束 C2：在 XXX 结构垫板上施加垂向约束（UZ），在 XXX 结构上施加横向（UX）和纵向（UY）约束。

7.4.2 载荷

编制原则：

仿真规范中应对参与仿真分析计算的载荷进行分析，一般考虑以下要求：

- a) 按实际载荷选择载荷类型，静强度分析中常用的载荷包括重力载荷、加速度载荷、位移载荷、集中载荷、均布载荷、温度载荷等；
- b) 载荷应能覆盖结构设计可能的所有失效模式，并按照载荷输入条件及安全系数要求；
- c) 明确载荷的位置、大小和方向。

参考格式：

XXX 产品静强度分析时，需要考虑的载荷如下：

- a) 载荷 F1：XXX 装置两端分别施加 XXXkN 的纵向压缩载荷，载荷方向为 X 轴正方向；
- b) 载荷 F2：在 XXX 结构根部施加 XXXkN 的均布载荷，载荷方向为 X 轴正方向；
- c) 载荷 F3：在 XXX 结构中部分施加 XXXkN 的均布载荷，载荷方向为 X 轴负方向；
- d) 载荷 F4：当 XXX 结构安置在标准支座上施加施加 XXXkN 的均布载荷，方向为 Z 轴负方向。

7.4.3 载荷工况组合

编制原则：

在进行结构静强度分析时，有些结构承受多个载荷、或在不在同时刻承受不同载荷的情况，为此，分析载荷工况应能覆盖结构设计载荷及可能的所有失效模式。

参考格式：

实际分析中，工况多是不同约束和载荷的组合，为此，载荷工况组合可用表格形式表示，如表 1 所示。

表1. 载荷组合工况表

工况序号	参与载荷	参与约束	备注
工况 1	F1	C1	考虑重力加速的影响

工况序号	参与载荷	参与约束	备注
工况 2	F2	C1	考虑重力加速的影响
工况 3	F3	C1	考虑重力加速的影响
工况 4	F4	C1	考虑重力加速的影响
工况 5	F1, F3	C2	
工况 6	F2, F4	C2	

7.5 前处理模型检查

编制原则/参考格式:

有限元模型在提交求解前应进行充分的质量检查,确保模型网格质量,输入参数的正确性,边界条件、连接接触关系的合理性等,模型质量检查主要包括:

- 单位制检查,检查模型单位制是否统一,不应存在单位冲突情况;
- 单元特征检查,主要包括单元节点的重复性、单元的连续性、单元最小尺寸、单元方向、自由边、单元形状评价指标检查以及多点约束的主、从节点冲突性检查等;
- 属性特征检查,主要包括单元几何属性、材料属性、材料方向及模型质量属性检查等;
- 载荷及边界条件检查,主要包括载荷大小、方向及边界条件的正确性。

8 求解设置

编制原则:

提交求解之前应对求解器类型、载荷工况、分析类型、输出内容等进行设置和检查确认,对于涉及大变形或非线性分析还需要对步长、算法、收敛判据等相关内容进行设置和检查确认。

参考格式:

以 SimSoft2 为例,求解前需要对载荷工况和接触关系进行设置和检查确认,并对求解器的基本选项、求解器选项、非线性选项及高级 NL 选项进行设置,具体需要设置的参数如下:

- 忽略大变形效应影响;
- 考虑预应力效应影响;
- 时间步长默认;
- 子步数和时间步长;
- 默认输出控制。

9 结果后处理

编制原则/参考格式:

由于不同的后处理软件在后处理技术和方式上有所差异,致使即使相同的求解结果文件基于不同后处理软件在分析结果时也可能存在差异。为此,规范中需要明确采用的后处理工具和后处理方式,如,XXX 结构后处理结果采用 SimSoft3 查看等。

9.1 结果类型

XXX 结构静强度分析结果类型包括应力、应变、位移、速度、加速度、压强、支反力、螺栓力、接触力等。

9.2 结果表现形式

XXX 结构静强度分析的结果表现形式包括云图、矢量图、剖面图、列表、数值、曲线等。

9.3 后处理方式

以 SimSoft3 软件作为 XXX 结构静强度分析计算结果的后处理工具,其结果后处理要求如下:

- 不同材料共节点的应力应分别查看;
- 各向异性材料应查看节点材料主方向的应力/应变;
- 壳单元应分别查看上下表面的应力/应变结果;
- 节点处应力/应变采用 XXX 法进行平均。

10 结果评估

10.1 强度准则

对分析中所涉及的强度评判准则进行说明。

10.1.1 金属材料

金属材料一般采用第一、第二和第四强度理论分析极限强度，具体如下：

- a) 第一强度理论要求结构最大主应力在材料许用应力范围内；
- b) 第二强度理论要求结构最大主应变在材料许用应变范围内；
- c) 第四强度理论要求结构最大 Mises 应力在材料许用应力范围内。

10.1.2 层合复合材料

层和复合材料一般采用最大主应变准则或层合板强度准则，具体如下：

- a) 最大主应变准则要求拉伸、压缩应变在许用应变范围内；
- b) 层合板强度准则要求纵横向拉伸、压缩及剪切强度在许用强度范围内。

10.2 强度判据

编制原则：

对分析中所涉及的强度评判准则进行说明。

参考格式：

XXX 结构静强度满足设计载荷要求判据：

- a) 结构应力/应变在材料许用应力/应变范围；
- b) 结构总体失稳载荷大于设计载荷；
- c) 结构刚度满足总体刚度要求；
- d) 局部失稳载荷满足总体要求。

10.3 失效方式

编制原则：

对 XXX 结构的失效形式进行说明。

参考格式：

XXX 结构可能的失效模式包括：

- a) 局部强度破坏；
- b) 总体强度破坏；
- c) 结构变形过大；
- d) 局部失稳；
- e) 总体失稳。

11 模型修正

编制原则：

在完成结构静强度仿真计算后，如有试验数据结果，可采用一致性算法对仿真结果与试验结果之间的误差进行分析，当仿真结果和试验结果之间的误差大于某一限定值时，需要对仿真模型进行修正。

参考格式：

在完成仿真分析之后，如有试验数据结果，可采用一致性算法对仿真结果与试验结果之间的误差进行分析，当仿真结果和试验结果之间的误差大于某一限定值时，需要对仿真模型进行修正。

仿真模型修正可以基于模型 V&V 的理论与方法，开展仿真模型的验模研究和应用，利用试验数据量化仿真模型的精度，并基于模型修正的方法进行仿真精度的提升，模型修正流程如附图 2。

- a) 仿真结果精度评估

由于有限元仿真分析带有大量的假设条件以及不确定的建模参数,所以仿真分析结果与试验结果之间必然存在一定误差,通过仿真-试验误差对比分析,静强度分析可以采用位移、应力、应变、静刚度等相关误差作为仿真结果精度评价,通过误差相关性分析算法或工具可以量化仿真模型的精度。

b) 仿真建模的误差源分析

通过 DOE 试验设计、参数灵敏度分析等方法对影响仿真结果的因素进行分析,包括:有限元建模误差(如结合面连接刚度、材料属性偏差、结构阻尼等建模误差)、网格离散误差、求解器误差、分析误差等因素进行分析,判断仿真误差主要来源,从而指导对有限元模型改进和精度提升。

c) 仿真模型修正

基于模型 V&V 的方法进行有限元模型参数修正。首先通过灵敏度分析方法进行参数的重要度分析,筛选出对仿真结果有重要影响的高灵敏度参数,将这些重要参数作为修正变量。然后利用模型修正算法进行自动参数修正,提升仿真和试验结果的吻合度。

12 计算报告

在完成仿真分析之后,应针对具体分析对象、分析目的、分析问题编写有限元分析报告,报告编写内容至少应包括以下方面:

- a) 任务概述;
- b) 分析过程;
- c) 分析结论;
- d) 优化及建议。

仿真报告模板可参考内容如附表 7。

12.1 任务概述

应对分析问题进行一定的背景介绍,并说明本报告所采取的分析类型和关注的分析结果。

12.2 分析过程

应对仿真分析的过程进行描述,包括模型简化、网格划分、材料模型、边界条件、载荷和求解方式等。

12.3 结果分析和结论

应给出典型的图表结果,如计算结果、应力云图、应变云图、位移云图等。图表应简明、易懂,图表中不应有无关的信息。

根据给出的图表结果,总结分析结论,并给出客观、综合评定。

12.4 优化及建议

报告中应根据分析结果,给出优化建议和设计改良方案。

第二章：结构模态仿真分析规范指南

1 目标

编制原则：

对编写或制定规范的目标进行描述。

参考格式：

为了规范 XXX 结构模态有限元分析过程，特制订本规范。通过规范的制定，使得不同工程师在参考本文件进行 XXX 结构模态有限元分析时，得出的有限元分析结果具有高度的一致性，并保证仿真分析结果具有较高的分析精度。

2 范围

本规范规定了通用机械结构模态计算的基本数据、计算方法、模型简化、边界的处理、计算结果的评判以及计算报告的内容等。

本规范适用于通用机械结构件（以下简称结构件）模态仿真计算。

3 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/T31054-2014 机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语；

GB/T33582-2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则；

GB3100-1993 国际单位制及应用；

GB3101-1993 有关量、单位和符号的一般原则；

ASME V&V 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics；

ASME V&V 10.1-2012 An Illustration of the Concepts of Verification and Validation In Computational Solid Mechanics。

4 术语和定义

编制原则：

对仿真分析规范中使用的主要术语进行描述和定义。

参考格式：

规定仿真分析规范中使用的主要术语，这些术语应该符合当前主流的仿真分析要求，部分术语如下所示。

有限元建模 (finite element modeling)：构建有限元模型的过程，包括几何模型构建和处理、材料属性定义、网格划分、边界（载荷）条件施加、求解参数设置等步骤；

几何模型 (Geometry)：使用几何概念描述物理或者数学物体形状，一般包括点、线、面、体等元素构成集合；

材料属性 (material property)：用于描述机械结构所用材料物理特性的数据集合；

边界条件 (boundary condition)：用于描述机械结构在给定工况下，求解域边界上几何以及物理条件，如力、温度、速度、位移等约束及载荷信息；

网格划分 (mesh)：把几何模型分成很多小的单元，作为具有几何、物理属性的最小的求解域；

坐标系 (Coordinate Syetem)：规定仿真中使用何种坐标系，一般情况下，建议使用直角笛卡尔坐标系，也可以根据分析需要，定以其它局部坐标系，包括笛卡尔坐标系、柱坐标系、球坐标系等。

单元 (element)：具有几何、物理属性的最小求解域；

节点 (node)：单元之间的铰接点；

零维单元 (zero dimensional element)：表现形式为点的单元，如质量单元等；

一维单元 (one dimensional element) : 表现形式为线段的单元, 如刚性单元、杆单元、梁单元等;

二维单元 (two dimensional element) : 表现形式为平面片的单元, 如矩形单元 (四边形单元)、三角形单元等;

三维单元 (three dimensional element) : 表现形式为实体的单元, 如四面体单元、六面体单元等;

质量单元 (mass element) : 表征只具备质量属性的单元;

弹簧单元 (spring element) : 表征结构之间具有弹簧约束作用的单元;

杆 (bar) : 一类长度远大于其他方向尺寸的构件;

梁 (beam) : 一类承受横向载荷, 以弯曲变形为主的杆结构;

板/壳 (plane/shell) : 一类厚度方向尺寸远小于长度和宽度方向的结构;

实体 (solid body) : 由曲面或棱边构成封闭体积的三维几何体;

低阶单元 (low order element) : 使用一次函数描述边界的单元;

高阶单元 (high order element) : 使用二次或更高次函数描述边界的单元;

约束 (constraint) : 减少自由度的各种限制条件;

模态分析 (modal analysis) : 基于叠加原理的振动分析方法, 用复杂结构系统自身的振动模态, 即固有频率、模态阻尼和模态振型来表示其振动特性;

结构阻尼 (structural damping) : 结构系统内部摩擦引起的结构内的能量耗散;

位移 (displacement) : 表征物体上一点相对于参考系的位置变化的时间变量;

长宽比 (aspect ratio) : 描述二维或三维单元最长边与最短边之比的量;

细长比 (slenderness) : 杆件的计算长度与杆件截面的回转半径之比;

翘曲度 (warpage) : 单元偏离平面的程度, 用于检查单元的翘曲;

偏斜度 (skew) : 描述单元的扭曲程度的数学量;

内角 (interior angle) : 指三角形单元或四边形单元的夹角的值, 常用于描述单元的最大内角或者最小内角的数学量。

5 通用规则

5.1 坐标系

对有限元建模采用的坐标系进行描述, 坐标系由右手定则来确定, 宜采用笛卡尔坐标系直角坐标系, 必要时可选用柱坐标系或球坐标系。

有限元分析建模时应定义全局坐标系, 当模型载荷、约束或结果显示需求与全局坐标系不一致时, 可增加局部坐标系。

5.2 单位制

编制原则:

规定仿真分析规范中使用的单位制, 单位制应该统一且简洁。一般情况下, 工程上建议使用常用单位制, 如附表 1、附表 2。

5.3 材料要素

编制原则:

对仿真计算中所用到的材料进行说明。

5.3.1 金属材料

编制原则/参考格式:

对分析中所涉及的金属材料的要素进行说明。金属材料一般需要考虑的要素包括:

- a) 按各向同性材料考虑;
- b) 材料进入屈服要考虑塑性;
- c) 常用材料性能, 包括密度、弹性模量、剪切模量、泊松比、屈服极限、极限强度和延伸率等;

- d) 热环境条件下应考虑材料线膨胀系数及温度对材料性能的影响;
- e) 考虑重力或惯性加速度时, 应定义材料的密度;
- f) 注意材料热处理状态, 及不同状态下的材料性能。

5.3.2 层合复合材料

层合复合材料通过输入单向板的材料性能及铺层, 计算复合结构的性能。当结构采用壳单元模拟时, 选择二维正交各向异性材料; 当结构采用体单元模拟时, 选择三维正交各向异性材料。

定义层合复合材料的其他要求主要包括:

- a) 有层合板结构实测性能时, 应对单向板的性能进行适当修正;
- b) 测试数据中一般同时提供拉伸和压缩强度、弹性模量数据, 计算时可根据结构主要受载情况来选取。当难以分清, 而两者数据又差别不大时, 应选取较小的数据;
- c) 剪切破坏是复合材料主要失效模式之一, 剪切性能应真实;
- d) 定义复合材料密度时, 应根据实际产品结构质量进行修正;
- e) 各向异性材料要根据实际结构定义材料方向。

5.3.3 夹层复合材料

对于夹层复合材料, 根据几何简化处理方式不同进行如下处理:

- a) 夹层壳方式根据上下面板、夹芯三层结构的材料性能及铺层情况, 计算夹层结构整体性能后赋予壳;
- b) 实体加壳方式把面板性能赋予壳, 夹芯性能赋予实体;
- c) 泡沫夹芯复合材料选择各向同性材料, 需要定义弹性模量、泊松比、剪切模量及材料密度;
- d) 蜂窝夹芯复合材料常用的为六边形, 一般简化处理为正交各向异性材料, 需要定义三个方向的弹性模量、泊松比和剪切模量共 9 个参数。

5.4 计算程序

编制原则:

对 XXX 结构模态计算使用的计算程序及版本号进行说明。

参考格式:

本规范适用以下软件工具进行 XXX 结构静强度计算分析。

- a) 前处理软件: SimSoft1;
- b) 求解器软件: SimSoft2。

其它计算软件工具, 可参考使用。

5.5 命名/编号规则

编制原则:

为了规范模型, 并便于模型的管理、查找及模型之间的装配等, 可以对模型命名和编号进行规范化处理, 包括: 部件(Component)、零件(Part)、材料(material)、组(group)、集合(set)、节点(node)、单元(element)、接触(Contact)、坐标(coordinate)、曲线(curve)等。

参考格式:

以 XXX 结构其零件、单元、节点编号为例, 其编号规则如附表 5。

5.6 仿真目标

编制原则/参考格式:

定义仿真目标就是要列出仿真最终要达到什么结果, 或者要解决哪些问题。模态计算的一般目标包括所关心的频率范围内的结构的频率、振型等。

仿真目标可能有多个, 一要细化仿真目标, 二要按重要性排序。在后续模型建立和设置中, 要优先考虑重点的仿真目标。

5.7 交付物

编制原则/参考格式:

明确有限元分析过程中需要提交的数据和模型，结构模态有限元分析过程中一般需要提交的文件如下：

- a) 有限元几何模型文件；
- b) 有限元网格模型文件；
- c) 边界文件；
- d) 材料信息文件；
- e) 求解结果模型文件；
- f) 后处理及报告文件等。

6 工作流程

编制原则：

对 XXX 结构模态有限元分析过程进行规范，一般可采用流程图的方式表示。同时建议对整个分析过程进行管控，一般用表格进行流程管控。

参考格式：

结构模态有限元分析流程如附图 1。

同时，为对整个有限元分析过程进行管控，可采用附表 6 的方式对有限元分析过程进行管控。

7 前处理建模

7.1 几何建模处理

7.1.1 建模方式

编制原则：

可根据实际需要对合适的建模方式进行描述。

参考格式：

几何建模一般有两种方式，一是将 CAD 设计模型导入有限元分析前处理软件进行建模，称之为“几何导入法”；一种是在有限元分析前处理软件直接建模，称之为“直接建模法”。

7.1.2 直接建模法

编制原则：

直接建模是直接在 CAE 软件前处理模块中进行建模，现有 CAE 基本都支持直接建模，使用数据量较小，便于模型参数化，适合简单模型建模，但建模效率低，对于复杂模型建模比较困难。

直接建模时，需要根据结构特征、分析目的、采用的单元类型等，对不同结构类型的建模方式进行详细说明。

参考格式：

XXX 结构进行直接建模的一般原则如下：

- a) 对于厚度方向尺寸小于其他方向尺寸的结构，采用板壳结构建模，几何取结构的中面；
- b) 对夹层复合材料，有夹层壳和实体加壳两种处理方式：
 - 1) 夹层壳为将上下面板和夹芯采用层合壳单元模拟，几何取夹层中面；
 - 2) 实体加壳为面板用壳、夹芯用实体，几何取面板中心线间的实体，并在上下面附一层壳。
- c) 对规则截面的细长结构，如：端框、桁条、大梁、杆系、管路、螺栓等，可根据需要采用梁单元、杆单元等，相应的几何模型取特征交线或中心线。
- d) 加强接头等承受局部载荷的集中力结构，一般采用实体单元。
- e) 集中质量使用质量单元模拟，几何取质心位置。

7.1.3 几何模型导入法

通过 CAD 建模软件建立几何模型后再导入有限元软件中进行分析处理，可以建立复杂仿真模型，但需要进行模型简化及特征处理，模型特征可能会有丢失，模型参数化不方便。

外部导入的几何模型需要进行适度简化，几何模型简化不应改变结构的基本特征、传力路径、刚度、质量分布等，对于有多个零部件组成的复杂结构，根据分析目标和要求，不同零部件的模型简化也可能采用不同简化规则，详细的模型简化规则可根据企业专有标准/规范进行简化处理，也可以通过CAD/CAE工具并结合二次开发实现特征简化和高效处理。

在进行几何特征清理时，可基于以下几个方面考虑：

- a) 几何特征所属零部件在总装配的重要程度；
- b) 几何特征与重点分析区域的相关程度；
- c) 几何特征尺寸与网格平均尺寸的比例。

7.2 网格划分处理

7.2.1 单元类型选择

编制原则/参考格式：

有限元单元类型包括零维单元（如质量单元）、一维单元（如刚性单元、杆单元、梁单元等）、二维单元（如壳单元）、三维单元（如实体单元）及其它单元等。单元类型的选择应能反映不同部件的结构形式，能满足分析要求的前提下，单元类型选择一般遵循以下编制原则：

- a) 选用形状规则的单元；
- b) 选用满足精度要求的单元；
- c) 选用计算效率快的单元；
- d) 选用的单元类型要基于 V&V（仿真模型验证和确认，简称 V&V）理论进行精度验证。

7.2.1.1 体单元

编制原则/参考格式：

体单元类型选择遵循以下编制原则：

- a) 体单元能给出三方向的正应力/应变和剪应力/应变；
- b) 常用的体单元为六面体和四面体单元，优先选用六面体单元；
- c) 六面体线性单元优先选用非协调元，二次单元优先选用缩减积分单元，用在接触面上选用线性单元，以 SimSoft2 为例，推荐一阶单元可选用 Solid Type1，二阶单元可选用 Solid Type2；
- d) 四面体单元优先选用二次单元，用在接触面上选用二次修正单元，以 SimSoft2 为例，一阶单元可选用 Solid Type3，二阶单元可选用 Solid Type4；
- e) 线性四面体单元、楔形单元仅用于网格过渡或几何拓扑需要的局部区。

7.2.1.2 壳单元

编制原则/参考格式：

壳单元类型选择遵循以下编制原则：

- a) 壳单元能给出上下表面和中性面的正应力/应变、剪应力/应变；
- b) 常用的壳单元为三角形和四边形单元，优先选用四边形单元；
- c) 四边形线性单元中，可以选用缩减积分和完全积分单元，以 SimSoft2 为例，推荐一阶单元可选用 Shell Type1，二阶单元可选用 Shell Type2；
- d) 线性三角形单元仅用于网格过渡或几何拓扑需要的局部区域，且三角形单元优先选用二次单元。

7.2.1.3 梁单元

编制原则/参考格式：

梁和杆单元类型选择遵循以下编制原则：

- a) 梁单元能给出拉压、弯曲、扭转应力/应变；
- b) 考虑横向剪切效应的梁单元还能给出横向剪应力/应变；
- c) 以 SimSoft2 为例，梁单元一阶单元可选用 Beam Type1，二阶单元可选用 Beam Type2。

7.2.1.4 其它单元

编制原则/参考格式:

以 SimSoft2 为例, 其他单元类型选择遵循以下编制原则:

- a) 集中质量用点单元 Mass Type1 模拟;
- b) 刚度可调的连接点用弹簧元 Spring Type1 模拟;
- c) 刚性单元用 RBE Type1 单元。

7.2.2 单元阶次选择

编制原则/参考格式:

单元分为低阶单元和高阶单元, 使用一次函数描述边界的单元称为低阶单元, 采用二次或更高次函数描述边界的称为高阶单元, 单元阶次选择一般遵循以下编制原则:

- a) 对于结构形状不规则、变形和应力分布复杂时宜选用高阶单元;
- b) 计算精度要求高的区域宜选用高阶单元, 精度要求低时可选用低阶单元;
- c) 不同阶次单元的连接位置应使用过渡单元或多点约束等;
- d) 单元阶次选择要基于 V&V 理论进行精度验证。

7.2.3 网格划分

7.2.3.1 网格划分要求

编制原则/参考格式:

有限元模型网格由一系列单元、节点组成, 完整的网格一般应满足以下要求:

- a) 网格划分时应保留主要的几何轮廓线, 网格应与几何轮廓保持基本一致;
- b) 网格密度应能真实反映结构基本几何形状特征;
- c) 网格密度应能反映结构真实传力路径及力的分配;
- d) 网格密度应能反映结构真实变形形状;
- e) 网格形状应尽可能规则, 面网格尽量划分为四边形, 体网格尽量划分为六面体;
- f) 网格特征应能满足网格质量检查要求;
- g) 网格单元节点应力梯度应能满足工程使用精度要求。

7.2.3.2 网格密度控制

编制原则/参考格式:

网格密度(网格尺寸)应考虑分析目的、计算规模、效率、硬件承受能力等综合因素, 网格密度控制一般遵循以下基本编制原则:

- a) 应对结构变化大、曲面曲率变化大、载荷变化大或不同材料连接的部位进行细化;
- b) 单元尺寸过渡平滑, 粗细网格之间应有足够的单元进行过渡, 避免相邻单元的质量和刚度差别太大;
- c) 应力响应关注区域的网格密度应大于位移响应关注区域的网格密度;
- d) 主承力方向的单元尺寸应较小, 垂直于该方向的单元在满足质量要求时可将尺寸稍作加大;
- e) 对于实体单元网格, 在结构厚度上应确保三层以上;
- f) 网格尺寸选取要经过理论进行网格收敛验证, 推进采用 GCI(网格收敛因子)方法网格无关性分析, 进而选取合适的网格尺寸。

参考格式:

经过 V&V 理论验证, 并满足网格收敛精度要求的网格尺寸参数, 应该写进仿真分析规范, 以某结构为例, 其网格划分尺寸参数见附表 3。

推荐实现方式:

在仿真分析规范编制过程中,应对关键结构及管件部位的网格尺寸要分别基于 V&V 理论进行网格收敛验证,并推荐采用理查德森外推法进行网格收敛性分析,进而选取合适的网格尺寸。也可以借助专业的验模分析软件进行网格收敛性分析。

7.2.3.3 单元属性设置

编制原则/参考格式:

单元属性可以赋给几何或单元,一般应进行以下定义:

- a) 指定单元的材料,各向异性材料应在单元属性中定义材料参考坐标系;
- b) 壳单元定义厚度及其偏置信息等;
- c) 梁单元定义截面形状尺寸(或直接定义截面面积、转动惯性矩)、偏置信息及梁的方向等;
- d) 集中质量单元定义质量大小、转动惯量及参考坐标系;
- e) 弹簧元定义弹簧刚度、方向及阻尼。

7.2.4 网格质量检查

编制原则:

网格划分完后,需要对网格划分质量进行检查,控制网格质量参数在合理范围内,具体检查内容及要求如下:网格中不应存在畸变网格,网格检查的主要参数包括:单元方向、翘曲度、偏斜度、内角等;保证结构重点关注区域的单元质量高,非关注区域的单元质量可适当降低。

参考格式:

XXX 结构网格质量具体检查项内容如附表 4。

7.3 连接定义

编制原则/参考格式:

仿真模型连接形式包括:点焊、铆钉、焊接、螺栓、法兰连接、接触连接、刚性单元连接等。

7.3.1 焊接

根据焊接形式,焊接连接可分为点焊、T 型焊、搭接焊、对接焊、断焊等,不同的焊接形式,其建模方式有所差异,对其建模方式需要分别说明。

7.3.2 螺栓连接

对螺栓连接的建模方式进行明确,是否考虑预紧力、摩擦力、接触力的影响。

7.3.3 接触连接

规范中需要对接触进行定义,包括:接触类型、属性、时间步、初始条件等。接触定义时常需要注意的问题如下:

- a) 在零件中事先建立好接触需要的面或组;
- b) 定义接触关系对,包括接触类型,主接触面、从接触面;
- c) 定义接触属性,一般只需要定义切向摩擦系数;
- d) 定义求解过程中的一些控制选项。

7.3.4 粘接

粘接应进行以下定义:

- a) 在零件中事先建立好粘接需要的面或组;
- b) 定义粘接关系对,包括主、从粘接面;
- c) 定义求解过程中的一些控制选项。

7.3.5 多点约束

多点约束应进行以下定义:

- a) 在零件中事先建立好多点约束需要的点、线、面或组;
- b) 定义多点约束关系对,包括多点约束类型,主控制点、从属点、线或面;
- c) 定义多点约束自由度、参考坐标系。

7.4 边界工况

约束施加需要注意以下几点内容：

- a) 有限元模型约束施加应符合实际安装条件；
- b) 约束区域应能准确反映实际约束情况。
- c) 避免单点约束，避免应力集中；
- d) 若局部约束区域小于一个单元时，应对局部区域进行网格细化等。

结构模态计算时，常见的约束边界条件包括：自由边界、按照实际物理结构定义的约束边界。

7.5 前处理模型检查

有限元模型在提交求解前应进行充分的质量检查，确保模型网格质量，输入参数的正确性，边界条件、连接接触关系的合理性等，模型质量检查主要包括：

- a) 单位制检查，检查模型单位制是否统一，不应存在单位冲突情况；
- b) 单元特征检查，主要包括单元节点的重复性、单元的连续性、单元最小尺寸、单元方向、自由边、单元形状评价指标检查以及多点约束的主、从节点冲突性检查等；
- c) 属性特征检查，主要包括单元几何属性、材料属性、材料方向及模型质量属性检查等；
- d) 边界条件检查，主要包括约束位置、约束自由度、约束刚度等正确性。

8 求解设置

(1) 求解方法选择

常用的模态提取方法如下：

- Block Lanczos 法
- 子空间法
- Power Dynamics 法
- 缩减法
- 阻尼法

编制原则：使用何种模态提取方法主要取决于模型大小和具体的计算场合。

- Block Lanczos 法：可以在大多数场合使用，需要较高的内存；
- 子空间法：比较适合到提取中型到大型模型的较少振型（ <40 ），需要较少内存；
- Power Dynamics 法：适用于提取大模型（100,000 个自由度以上）的较少振型，效率高，但需要很大的内存；
- 缩减法：如果模型中集中质量不会引起局部振动，例如像梁和杆那样，可以使用此方法，该方法是所有方法中最快的，需要较少的内存和硬盘空间；
- 阻尼法：模态分析中一般忽略阻尼，但如果阻尼的效果比较明显，就要使用阻尼法。

(2) 模态阶数

定义在关心的频段内需要提取的模态的阶数。

(3) 提取模态频率范围设置

定义需要在哪个频率范围内提取结构的模态参数。设置频率上限、频率下限。

(4) 求解器控制选项

是否考虑阻尼。如果选择需要考虑阻尼，则需要进一步定义阻尼系数。

9 结果后处理

编制原则/参考格式：

结果后处理一般要求查看如下内容：

- a) 模态频率列表；
- b) 各阶模态振型；

10 结果评估

编制原则/参考格式:

- a) 计算得到的各阶模态频率数据, 是否合理;
- b) 各阶模态振型是否合理。

11 模型修正

编制原则:

完成结构模态仿真计算后, 需要对仿真结果的精度进行评估。

可以基于模型 V&V 的理论与方法, 开展仿真模型的验模研究和应用, 利用试验数据量化仿真模型的精度, 并基于模型修正的方法进行仿真精度的提升。

a) 仿真和试验的相关性分析

由于有限元仿真分析带有大量的假设条件以及不确定的建模参数, 所以仿真分析结果与试验结果之间必然存在一定误差, 通过进行结构仿真模型和试验模型的相关性分析, 可以量化各阶仿真模型和试验模型的频率误差, 以及计算模态置信准则 (MAC)。

b) 参数灵敏度分析

对所有可以识别到的不确定的建模参数, 进行参数灵敏度分析。并按照参数灵敏度的大小进行排序。计算的参数灵敏度系数, 将作为后续模型参数修正的权重系数。

c) 结构模态参数修正

如果仿真和试验模型的频率误差太大, 模态置信准则 (MAC) 太低, 可以利用专业的模型修正算法, 对识别出的高灵敏度参数进行修正, 提高仿真和试验模型结果的吻合度。

结构模态模型修正流程参考图 1 所示。

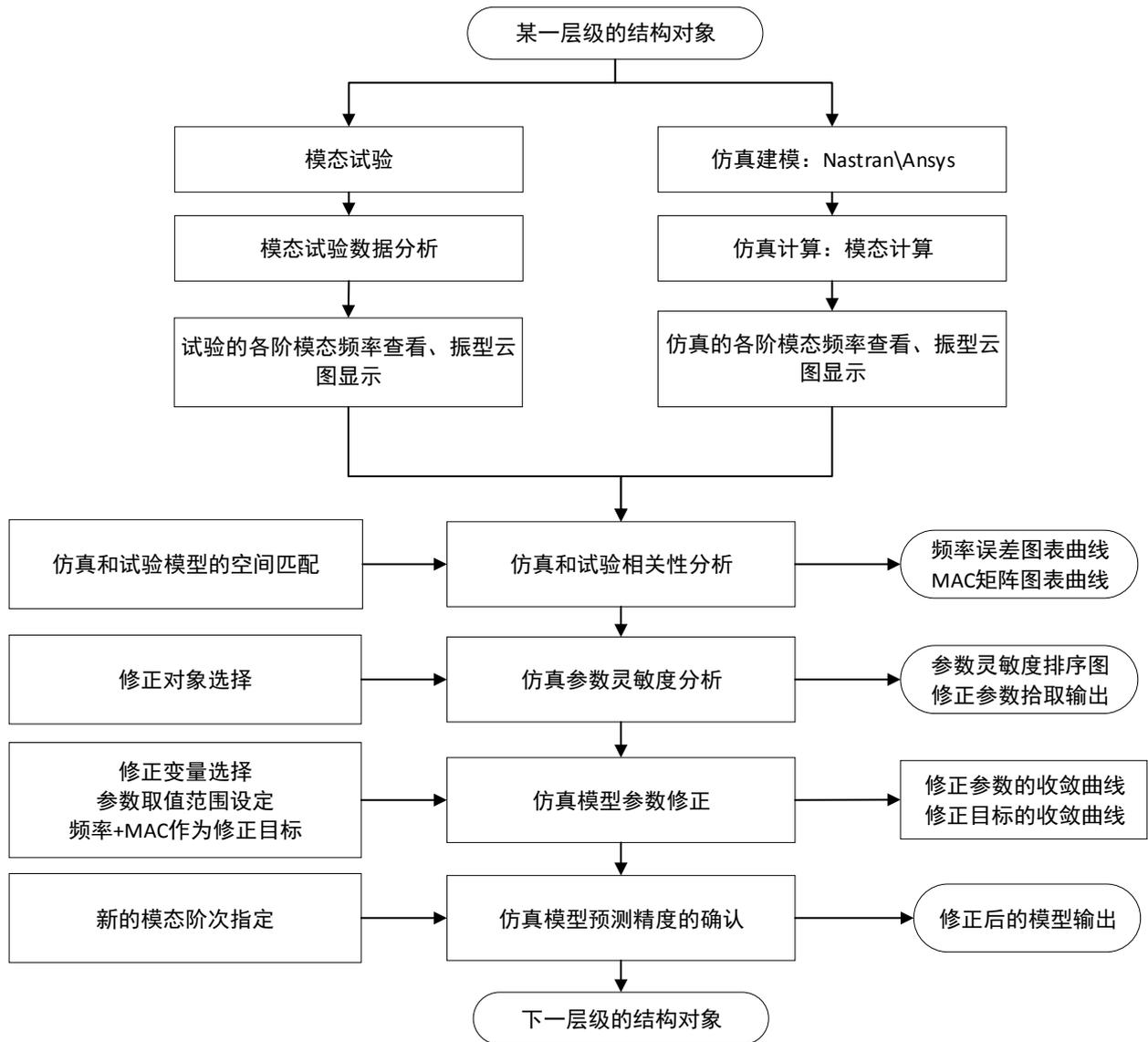


图1. 结构模态仿真模型修正流程图

12 计算报告

在完成仿真分析之后，应针对具体分析对象、分析目的、分析问题编写有限元分析报告，报告编写内容至少应包括以下方面：

- a) 任务概述；
- b) 分析过程；
- c) 分析结论；
- d) 优化和建议。

仿真报告模板可参考内容如附表 7。

12.1 任务概述

应对分析问题进行一定的背景介绍，并说明本报告所采取的分析类型和拟关注的分析结果。

12.2 分析过程

应对仿真分析的过程进行描述，包括模型简化、网格划分、材料模型、边界条件、载荷和求解方式等。

12.3 分析和结论

应给出典型的图表结果，如模态频率计算结果、振型云图等。图表应简明、易懂，图表中不应有无关的信息。

根据给出的图表结果，总结分析结论，并给出客观、综合评定。

12.4 优化和建议

报告中应根据分析结果，给出优化建议和设计改良方案。

第三章：气动计算仿真分析规范指南

1 目标

编制原则：

对编写或制定标准/规范的目标进行描述。

参考格式：

在利用 CFD 软件对飞行器进行气动仿真时，有多个环节需要使用者根据经验进行设置。这就导致了一个问题，经验不同的使用者，对同一仿真任务，会得到不同的仿真结果。有时候这个仿真结果差异还比较大。因此，气动仿真结果的可信度和一致性，就是仿真人员首先要考虑的重要问题，对经验较少的初级仿真人员来说，这个问题尤其重要。

本规范的目标是减少气动仿真过程中的不确定性，提升仿真结果的一致性。在规范中，梳理了影响气动仿真的主要内容，指出了针对每一项内容需要考虑的模型设置或参数选取原则，并对仿真结果验证的方法论和验证工具进行了说明。按照本规范进行的气动仿真，会在不同程度上提高结果的一致性。

2 范围

编制原则：

对标准/规范的适用范围进行明确。

参考格式：

本规范/标准规定了各类航空航天飞行器的气动仿真技术分析的分析依据、分析流程、分析要求、分析类型、建模原则、结果评估、模型修正、结果输出、数据处理、报告编写等内容。

本规范/标准适用于应用 XXX 仿真分析软件进行气动仿真分析。

3 规范性引用文件

编制原则：

将标准中引用的文件进行描述。

参考格式：

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡标注日期的引用文件，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。

GB3100-1993 国际单位制及应用

GB3101-1993 有关量、单位和符号的一般原则

GB/T16638.1-2008 空气动力学概念、量和符号第 1 部分：空气动力学常用术语

GB/T16638.2-2008 空气动力学概念、量和符号第 2 部分：坐标轴系和飞机运动状态量

GB/T16638.3-2008 空气动力学概念、量和符号第 3 部分：飞行器几何特性

GB/T16638.4-2008 空气动力学概念、量和符号第 4 部分：飞机的空气动力、力矩及其系数和导数。

AIAA G-077-1998 Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations;

ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer.

4 术语和定义

编制原则：

对仿真分析规范中使用的主要术语进行描述和定义。

参考格式：

规定仿真分析规范中使用的主要术语，这些术语应该符合当前主流的仿真分析要求，部分术语如下所示。

几何模型 (Geometry)：使用几何概念描述物理或者数学物体形状，一般包括点、线、面、体等元素构成集合；

转捩 (Transition)：从层流到湍流的过渡；

相 (Phase)：指不同物态或同一物态的不同物理性质或力学状态；

升力系数 (Lift Coefficient)：物体所受到的力或力矩与参考气动参数或参考面积的乘积之比。

5 通用规则

5.1 坐标系

编制原则/参考格式：

建模采用合适的坐标系进行描述，坐标系由右手定则来确定，宜采用笛卡尔直角坐标系，必要时可選用柱坐标系或球坐标系。

分析建模时应定义全局坐标系，当模型载荷、约束或结果显示需求与全局坐标系不一致时，可增加局部坐标系。

5.2 单位制

规定仿真分析规范中使用的单位制，单位制应该统一且简洁。一般情况下，工程上建议使用常用单位制，如附表 1 和附表 2。

5.3 计算程序

编制原则：

对气动仿真计算使用的计算程序及版本号进行说明。

参考格式：

本规范适用以下软件工具进行气动仿真计算分析。

CFD 软件：SimSoft1。

其它计算软件工具，可参考使用。

5.4 仿真目标

编制原则/参考格式：

定义仿真目标，就是要列出仿真最终要达到什么结果，或者要解决哪些问题。气动计算的一般目标包括飞行器的气动力（升力、阻力、侧向力）和力矩（俯仰力矩、滚转力矩、偏航力矩），以及重要部件的压力系数分布（如机翼的压力系数分布）。

仿真目标可能有多个，一要细化仿真目标，二要按重要性排序。在后续模型建立和设置中，要优先考虑重点的仿真目标。

6 交付物

编制原则/参考格式：

明确气动分析过程中需要提交的数据和模型，气动仿真分析过程中一般需要提交的文件如下：

- a) 气动仿真的几何模型文件；
- b) 气动仿真的网格模型文件；
- c) 前处理设置文件；
- d) 求解结果文件；
- e) 后处理报告文件等。

7 工作流程

编制原则：

对气动的仿真计算过程进行规范，一般可采用流程图的方式表示。同时建议对整个分析过程进行管控，一般用表格进行流程管控。

参考格式：

气动仿真分析流程如附图 1 所示。

8 前处理建模

8.1 几何建模处理

编制原则:

可根据实际需要对合适的建模方式进行描述。

参考格式:

气动计算的几何建模一般是将 CAD 设计的模型导入气动仿真分析软件进行建模。真实的几何模型包含着所有的特征,在气动计算时,不需要考虑所有的几何细节特征,可以对几何模型进行适度简化处理,以节省计算工作量,简化前提是不能对模型气动特性产生影响。例如:对主要仿真目标影响不大的几何细节可以忽略,几何建模时不用考虑;如原始的 CAD 模型已经有该细节特征,可对这些细节做清除处理。

8.2 网格划分处理

8.2.1 网格尺寸

a) 网格疏密程度

编制原则:

在流场变化平缓的位置,可以采用较疏的网格。在流场变化剧烈的位置,需要采用较密的网格(例如边界层和激波位置)

参考格式:

在气动仿真过程中,空间的离散化通过空间网格来实现,网格疏密分布对计算结果会带来很大的影响。在仿真分析规范中,应该对网格的疏密分布给出具体的规定。

b) 边界层网格

编制原则:

如果硬件资源允许,气动计算的边界层网格建议采用递进的分布方式,边界层 Y^+ 取值在 1 附近。

参考格式:

在气动计算中,由于边界层的特殊性,即在很薄的空间里垂直于边界层的流体速度变化很大,因此,为了获得较为准确的气动力,需要对边界层进行精确捕捉。

c) 激波位置的网格

编制原则:

一般情况需要在激波附近加密网格,对于提前无法预判激波位置的仿真,建议采用自适应网格加密来捕捉激波。

参考格式:

气动计算中常常会出现激波现象,在激波位置处,很薄的空间里速度、压力等变量变化剧烈,为了捕捉激波,并仿真出激波的形状和位置,激波附近的网格需要特别注意。

d) 网格无关性验证

编制原则:

网格无关性验证的基本原则是逐渐加密网格,直至继续加密后计算结果不再变化。在实际操作时,需要设置合理的网格加密方案,节省无关性验证的计算成本。

参考格式:

对于气动计算,为了保证计算结果的一致性,还必须进行网格无关性验证。网格无关性验证是为了评估或排除仿真中的网格离散误差。在气动仿真分析规范中,要对网格无关性验证的具体步骤做出操作说明。

较为通用的作法是 ASME 中推荐的 Richardson 外推法,推断“网格无限加密、网格间距趋于零时”理论上的仿真“精确解”。也可以借助专业的流体验模软件进行网格离散误差评估。

8.2.2 网格质量检查

网格生成后,应对网格质量进行检查。网格质量直接影响仿真精度,甚至导致发散,直接决定计算能否取得成功。网格质量检查需要包括并不限于以下指标:

- a) 偏斜度
- b) 增长率
- c) 长宽比

8.3 边界工况

编制原则/参考格式:

对气动仿真，边界一般考虑以下要求:

- a) 来流压力、温度、马赫数;
- b) 出口环境压力;
- c) 壁面的粗糙度。

8.4 前处理模型检查

编制原则/参考格式:

气动模型在提交求解前应进行充分的质量检查，确保模型网格质量，输入参数的正确性，边界条件的合理性等，模型质量检查主要包括:

- a) 单位制检查，检查模型单位制是否统一，不应存在单位冲突情况;
- b) 物理模型的检查，如物性、湍流模型、可压缩设置等情况;
- c) 边界条件的检查，如入口出口的压力、温度、速度、湍流量等;
- d) 求解设置的检查，如初场、求解器选择、时间步长等。

9 提交求解

编制原则/参考格式:

- a) 求解器

编制原则/参考格式: 标准中应该规定每种求解器的主要参数选取范围。在气动计算中优先建议选取密度基求解器。

- b) 求解收敛参数。

气动问题的求解，可以选择密度基求解器和压力基求解器。有的情况下，气动计算会常常发散。通过调节求解控制参数，可以促进求解过程的收敛。

要获得好的收敛曲线，可以选择小的CFL数或松弛因子或时间步长。标准中可以根据实际情况规范具体的选择范围。

- c) 初场定义

初场对气动问题的收敛影响较大，有些初场甚至会导致计算发散，对初场的适当定义应该在气动计算标准中进行规范。

建议尽可能给一个接近终场的初场。在有些情况下，可以用低精度格式或欧拉方程先计算一个初场。

- d) 求解过程监测

对于气动计算，在求解过程中，应该监测升力系数、阻力系数等关键参数。

选取的监测参数和仿真目标要有关联性。重点监测这些相关参数的变化规律。

- e) 收敛的判断。

可以根据残差的量级和关键气动参数的波动范围来判断收敛。

一般情况下，如果关键气动参数变化小于一定范围，同时残差达到一定等级，即可认为收敛。

仿真中要求得到收敛的结果，需要对迭代收敛误差进行评估和量化。可以通过手动比较来计算收敛误差，也可以借助专业的流体验模软件进行分析评估。

10 结果后处理

编制原则/参考格式:

结果后处理一般要求查看如下内容:

- a) 速度云图;
- b) 压力系数云图;

- c) 速度矢量云图;
- d) 流线;
- e) 阻力系数;
- f) 升力系数;
- g) 激波位置。

11 结果评估

编制原则/参考格式:

- a) 查看飞行器表面的压力分布;
- b) 查看空间截面的速度或马赫数、压力、密度分布;
- c) 查看激波位置是否合理;
- d) 升力系数、阻力系数是否合理。

12 模型修正

编制原则/参考格式:

可以通过修正算法计算实验与仿真值偏差最小时的仿真模型输入量,最终给出满足精度要求的仿真模型输入参数取值。

仿真模型中的一些经验参数或可变参数的设置具有很大的经验性,通过模型修正,可以找到最符合工程实际的模型参数,可以提高仿真结果与实验数据的一致性。

对少量的参数修正可以基于工程经验人工试算调整;对修正参数较多的情况,可以先采用灵敏度分析方法找到关键参数,进行模型降维,再采用专业的 CFD 模型修正工具进行参数的自动修正。

基于实验标模测试的数据,对仿真模型进行修正;对 CFD 软件中的概念模型进行反设计,对模型中的参数进行校准优化。

13 计算报告

计算报告内容应当包括:

a) 报告一般要求

根据分析对象及分析内容,制定分析报告的名称、编号、分析标准、报告编写人员信息。

b) 仿真分析模型

对仿真分析模型的算例信息进行说明,如记录算例数据的版本、几何外形、来流条件、实验条件等。

c) 仿真分析软件

记录仿真软件的名称、版本信息、软件类型。

d) 仿真任务概述

对分析任务进行背景介绍,并说明本报告分析的内容及拟关注的分析结果。

e) 仿真分析过程

对案例数模信息、模型简化、模型状态、边界条件、求解方式逐个进行必要的说明。

f) 结果分析与结论

分析结果应至少输出气动六分力系数关键仿真目标信息如来流速度、参考面积;根据仿真后处理结果,总结分析结论;对分析对象的空气动力学性能给出客观、综合评定。

g) 优化和建议

报告中应根据分析结果,给出优化建议和设计改良方案。

仿真报告模板可参考内容如附表 7。

第四章：散热计算仿真分析规范指南

1 目标

编制原则：

对编写或制定标准/规范的目标进行描述。

参考格式：

为了规范各类电子产品及其他工业品的散热仿真分析过程，特制订本规范。通过规范的制定，使得不同工程师在参考本文件进行工业品散热仿真分析时，得出的分析结果具有高度的一致性，并保证仿真分析结果具有较高的分析精度。

2 范围

编制原则：

对标准/规范的适用范围进行明确。

参考格式：

本规范/标准规定了各类电子产品及其他工业品分析的分析依据、分析流程、分析要求、分析类型、建模原则、结果评估、模型修正、结果输出、数据处理、报告编写等内容。

本规范/标准适用于应用 SimSoft1 散热仿真分析软件进行热力学散热分析。

3 规范性引用文件

编制原则：

将标准中引用的文件进行描述。

参考格式：

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注明日期的引用文件，仅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）适用于本规范。

GB3100-1993 国际单位制及应用

GB3101-1993 有关量、单位和符号的一般原则

GB/T4797.4-2006 电工电子产品自然环境条件太阳辐射与温度

GJB150.7A-2009 军用装备实验室环境测试方法第7部分：太阳辐射试验

SJ20590-96 军用微型计算机热设计技术要求

SJ20743-1999 散热器手册第1部分热阻曲线集

《AdvancedThermalDesignofElectronicEquipment》，InternationalThomsonPress.1997.

《ThermalDesignofElectronicEquipment》，TechnicalPress.2001.

4 术语和定义

编制原则：

对仿真分析规范中使用的主要术语进行描述和定义。

参考格式：

规定仿真分析规范中使用的主要术语，这些术语应该符合当前主流的仿真分析要求，部分术语如下所示。

面热流密度 (Area Heat Flux)：指单位面积的热流量；

体积热流密度 (Volumetric Heat Flux)：指单位体积的热流量；

热阻 (Thermal Resistance)：指热量在传热路径上的阻力；表示传递 1w 热量所引起的温升；

导热系数 (Thermal Conductivity)：指表示物体导热能力的物理参数，主要是指单位时间内，单位长度温度降低 1℃时，单位面积导热传递的热量；

稳态/瞬态 (Steady/Transient)：也称为定常，即系统内任何一点的压力、速度、密度、温度等变量均不随时间进行变化，称为稳态；反之，如果这些变量随着时间进行变化，称之为瞬态，也称为非定常；

温度场 (Thermal Field)：指系统或模块内空间的温度分布，称为温度场；

接触热阻 (Contact Thermal Resistance)：指在实际电子散热模拟中，由于两个固体壁面的接触只发生在某些点上，其余狭小空间均为空气，由于空气的导热系数较小，在此传热路径上会产生比较大的热阻。通常主要是在两个面上涂抹导热硅脂或者填充导热垫片来减小空气导致的接触热阻；

对流换热系数 (Convective Heat Transfer Coefficient)：指反映流体与固体壁面之间对流换热过程的强弱，表示当流体与壁面的温差为 1°C 时，在单位时间通过单位面积的散热量，单位为 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 或 $\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ；

雷诺数 (Reynolds Number)：指其大小反应流体流动时惯性力和粘滞力的相对大小，是说明流体流态的一个准则。

流阻 (Flow Resistance)：反应热系统中流过某一通道或者整体空间时，流体进出口所产生的压差，单位为 pa ；

角系数 (View Factor)： F_{12} 表示表面 1 到表面 2 的角系数，即表面 1 向空间发射的热辐射，落到表面 2 上的热耗占表面 1 整体热辐射的百分数；

黑体 (Black Body)：落在物体表面上的所有热辐射均能被全部吸收，这类物体称为黑体；

发射率 (Emissivity)：实际物体表面的辐射力和同温度下黑体的辐射力之比，其数值在 0-1 之间；

灰体 (Gray Body)：将实际物体的发射率和吸收率看成与波长无关的物体，称为灰体，即吸收率与波长无关。在热射线范围内，绝大多数材料均可近似当作灰体处理，其发射率等于吸收率；

结至空气热阻 (R_{ja} , Thermal Resistance Junction To Ambient)：元器件的热源结点 (Junction) 与环境空气的热阻；

结至壳热阻 (R_{jc} , Thermal Resistance Junction To Case)：元器件的热源结点至封装外壳的热阻；

结至板热阻 (R_{jb} , Thermal Resistance Junction To Board)：元器件的热源结点至 PCB 板间的热阻；

风机的特性曲线 (Fan Characteristic Curve)：指风机在某一固定转速下，静压随风量变化的关系曲线，当风机出口被堵住时，风量为 0，静压最高；当风机不与任何系统连接时，静压为 0，风量最大。

5 通用规则

5.1 坐标系

编制原则/参考格式：

建模采用的坐标系进行描述，坐标系由右手定则来确定，宜采用笛卡尔坐标系直角坐标系，必要时可选用柱坐标系或球坐标系。

有限元分析建模时应定义全局坐标系，当模型载荷、约束或结果显示需求与全局坐标系不一致时，可增加局部坐标系。

5.2 单位制

规定仿真分析规范中使用的单位制，单位制应该统一且简洁。一般情况下，工程上建议使用常用单位制，如附表 1 和附表 2

5.3 材料要素

编制原则：

对仿真计算中所用到的材料进行说明，包括固体材料、液体材料、气体材料等，需要分别说明。

对分析中所涉及的金属材料的要素进行说明。

金属/非金属材料一般需要考虑的要素包括材料的密度、热容、导热率；而流体材料一般需要考虑的要素包括材料的密度、热容、导热率、膨胀系数、粘度、扩散系数。

参考格式：

散热分析中常用的金属材料属性如表 1。

表1. 散热常用金属材料属性

材料	密度 (kg/m ³)	热容 (J/kg. k)	导热率 (w/m. k)
铝	2720	900	225
铜	8970	397	381
铁	7870	452	72
铝合金	2660	900	156
钢	7850	460	55
不锈钢	7850	450	14

5.4 计算程序

编制原则：

对散热仿真计算使用的计算程序及版本号进行说明。

参考格式：

本规范适用以下软件工具进行散热仿真计算分析。

求解器软件：SimSoft1；

其它计算软件工具，可参考使用。

5.5 命名/编号规则

编制原则：

为了规范模型，并便于模型的管理、查找及模型之间的装配等，可以对模型命名和编号进行规范化处理，包括：部件(Component)、零件(Part)、材料(material)、组(group)、集合(set)、节点(node)、单元(element)等。

参考格式：

以某 PCB 板及其零件、单元、节点编号为例，其编号规则见表 2。

表2. 某 PCB 板建模编号规则

名称	ID 区间		
	零件	节点	单元
PCB 板	1	1-9999	1-9999
芯片	2-10	10000-49999	10000-49999
T0200 芯片	11-99	50000-99999	50000-99999
电容	100-199	100000-199999	100000-199999
内存条	200-299	200000-299999	200000-299999
散热器	300-399	300000-399999	300000-399999
二极管	400-499	400000-499999	400000-499999
连接器	500-999	500000-999999	500000-999999

5.6 仿真目标

编制原则/参考格式：

定义仿真目标，就是要列出仿真最终要达到什么结果，或者要解决哪些问题。散热计算的一般目标包括各个电子产品的表面温度、芯片封装 Die 结温、PCB 板各向异性导热率分布、轴流风机和离心风机

的工作点、不同方向的速度矢量流场分布、压力分布、导体的电流电压分布、焦耳热分布、器件表面的换热系数、散热器的热阻以及不同区域的流量（质量流量、体积流量）分布。

仿真目标可能有多个，一要细化仿真目标，二要按重要性排序。在后续的模型建立和设置中，要优先考虑重点的仿真目标；同时需要考虑仿真目标的可行性。

6 交付物

编制原则/参考格式：

明确散热分析过程中需要提交的数据和模型，散热仿真分析过程中一般需要提交的文件如下：

- a) 热仿真的几何模型文件；
- b) 热仿真的网格模型文件；
- c) 边界条件文件；
- d) 材料信息文件；
- e) 求解结果模型文件；
- f) 后处理及报告文件等。

7 工作流程

编制原则：

对电子产品的散热仿真计算过程进行规范，一般可采用流程图的方式表示。同时建议对整个分析过程进行管控，一般用表格进行流程管控。

参考格式：

散热仿真分析流程如附图 1 所示。

8 前处理建模

8.1 几何建模处理

8.1.1 建模方式

编制原则：

可根据实际需要对合适的建模方式进行描述。

参考格式：

几何建模一般有两种方式，一是将 CAD 设计模型导入散热仿真分析软件进行建模，称之为“几何导入法”；一种是在散热仿真分析软件中直接建模，通过方块、圆柱体、球体等等模型的拼接，建立最终的热仿真模型，称之为“直接建模法”。

8.1.2 直接建模法

编制原则：

直接建模是直接在散热软件模块中进行建模，现有 CAE 软件基本都支持直接建模，使用数据量较小，便于模型参数化，适合简单模型建模，但建模效率低，对于复杂模型建模比较困难。

直接建模时，需要根据结构特征、分析目的、采用的单元类型等，对不同结构类型的建模方式进行详细说明。

参考格式：

电子产品散热仿真进行直接建模的一般原则如下：

- a) 对于薄壳的几何体，通常建立薄 Thin 板模型，在热模型中输入其有效厚度，但并不建立薄壳的真实几何厚度；
- b) 使用 Block 来拼接建立电子产品热模型，并输入其正确的热阻参数；
- c) 直接点击风扇 fan、Blower 来建立轴流风机、离心风机模型；
- d) 直接点击 PCB 板来建立电路板热模型；
- e) 直接点击散热器，并输入散热器正确的尺寸信息，完成散热器模型的建立；
- f) 最终通过在散热仿真软件中得到电子产品完整的热仿真模型。

8.1.3 几何模型导入法

编制原则:

对主要仿真目标影响不大的几何细节可以忽略,几何建模时不用考虑,比如倒角、安装孔、连接器的针脚等等细节特征。如原始的 CAD 模型已经有该细节特征,可以清除或简化处理。但是务必保留影响气流流动的大尺寸几何结构,比如导流板、PCB 板连接器等结构件。

通过 CAD 建模软件建立几何模型后再导入散热软件中进行分析处理,可以建立复杂仿真模型,但需要进行模型简化及特征处理,模型特征可能会有丢失,模型参数化不方便。真实的几何模型包含着所有的特征,在散热计算时,不需要考虑所有的几何细节特征,可以根据下述原则进行简化处理,以节省计算工作量。

参考格式:

外部导入的几何模型需要进行适度简化,几何模型简化不应改变散热传热的基本特征、传力路径等,对于有多个零部件组成的复杂结构,根据分析目标和要求,不同零部件的模型简化也可能采用不同简化规则,详细的模型简化规则可根据企业专有标准/规范进行简化处理,也可以通过 CAD/CAE 工具并结合二次开发实现特征简化高效处理。

8.2 网格划分处理

8.2.1 网格尺寸

a) 网格疏密程度

编制原则/参考格式:

在流场变化平缓的位置,可以采用较疏的网格。在流场变化剧烈的位置,需要采用较密的网格。

在散热仿真过程中,空间的离散化通过空间网格来实现,网格疏密分布对计算结果会带来很大的影响。在仿真分析规范中,应该对网格的疏密分布给出具体的规定。

b) 背景区域网格

编制原则/参考格式:

背景区域的网格应该能够足以捕捉背景区域流场的变化情况。

散热计算中需要对局部区域进行网格局部细化,细化区域以外空间的网格尺寸,通常至少设置为整体计算区域的 1/30。

c) 器件的网格

编制原则/参考格式:

在散热计算中,务必保证热源各个边至少有 4 个网格;而 PCB 板的厚度方向,至少应该有 3 个网格;在流体的通道内部,尤其是散热器翅片之间,至少应该布置 3 层网格;散热器翅片的高度方向至少布置 4-8 个网格,散热器基板的厚度方向至少布置 3 层网格。

d) 风机的网格

编制原则/参考格式:

对于散热计算而言,热模型中通常有轴流风机、离心风机、开口、2 维阻尼等流动模型,此类热模型每个边至少要有 4-6 个网格。

e) 网格无关性验证

编制原则/参考格式:

对于散热计算,为了保证计算结果的一致性及计算的精度,还必须进行网格无关性验证。网格无关性验证是为了评估或排除仿真中的网格离散误差。在散热仿真分析规范中,应该对网格无关性验证的具体步骤做出操作说明。

网格无关性验证的基本原则是逐渐加密网格,直至继续加密后计算结果不再变化。在实际操作时,需要设置合理的网格加密方案,节省无关性验证的计算成本。

8.2.2 网格质量检查

网格生成后，应对网格质量进行检查。网格质量直接影响仿真精度，甚至导致发散，直接决定计算能否取得成功。

网格的检查有以下几方面内容：

a) 网格的贴体性

热模型被划分网格后，务必保证网格能够捕捉、匹配热模型的原始几何形状，即网格具有良好的贴体性；

如果网格有失真的现象存在，务必使用区域加密功能，对失真的网格进行加密，保证其能够贴体反应热模型的几何形状。

b) 网格的质量检查

需要包括并不限于以下指标：

1) 扭曲率；

2) 偏斜度；

3) 增长率；

4) 细长比；

5) 网格的体积（如果局部网格的体积为负值，务必对其进行修复纠正）。

8.3 边界条件

8.3.1 热耗及温度边界

编制原则/参考格式：

对参与仿真分析计算的热模型进行分析，一般考虑以下要求：

a) 各个器件、芯片本身的热耗功率；

b) 机箱壳体与外界空气的换热系数；

c) 热模型内处于恒温的温度边界；

d) 热模型受外界热辐射的热流密度等。

8.3.2 约束

编制原则/参考格式：

a) 热模型内部风机的转速、P-Q 曲线；

b) 热模型内芯片的双热阻参数；

c) 热模型所处外界空气的环境条件，比如海拔高度、日照辐射日期经纬度等。

8.4 前处理模型检查

编制原则/参考格式：

散热模型在提交求解前应进行充分的质量检查，确保模型网格质量，输入参数的正确性，边界条件的合理性等，模型质量检查主要包括：

a) 单位制检查，检查模型单位制是否统一，不应存在单位冲突情况；

b) 热模型间隙检查，主要是从各个方向上查看，器件直接是否有交错、干涉等情况；

c) 属性特征检查，主要包括热模型的材料属性、热耗属性检查等等；

d) 载荷及边界条件检查，主要包括风机本身的 P-Q 曲线、开口方向及边界条件的正确性等。

9 提交求解

编制原则/参考格式：

a) 求解器

散热问题的求解，通常选择默认的密度基求解器；也可以选择耦合压力-速度基求解器。

标准中应该规定每种求解器的主要参数选取范围。在散热计算中优先建议选取密度基求解器。

b) 求解收敛参数

在进行 CFD 散热计算时，求解可能会发散。通过调节求解控制参数，比如迭代因子、线性求解器等，一定程度上会优化求解过程的收敛性。

要获得好的收敛曲线，可以对松弛因子、时间步长、线性求解器参数输入恰当的数值或选项。标准中可以根据实际情况建议或者规范这些控制参数的具体选择范围或者经验数值。

c) 初始场定义

初始场对散热问题的收敛影响较大，有些初场甚至会导致计算发散；对初场的适当定义应该在散热计算标准中进行规范。初始场接近真实的结果，那么散热软件进行 CFD 计算时会呈现较好的收敛曲线。

建议尽可能给一个接近终场的初场。

d) 求解过程监测

对于散热计算，在 CFD 求解过程中，应该监测器件或者局部点的温度、局部点的速度、某面的热流量、质量流量等关键参数。

选取的监测参数和仿真目标要有关联性。重点监测这些相关参数的变化规律，如果这些监测点的多个物理量均不再随迭代步数而变化，可以认为 CFD 计算已经收敛。

e) 收敛的判断

可以根据残差的量级和关键散热参数的波动范围来判断收敛。

一般情况下，如果关键散热参数变化小于一定范围，同时残差（流动残差小于 e^{-1} ，能量残差 e^{-7} ）达到一定等级，即可认为 CFD 散热计算完全收敛。

散热仿真中要求得到收敛的结果，需要对迭代收敛误差进行评估和量化。

10 结果后处理

编制原则/参考格式：

结果后处理一般要求查看如下内容：

- a) 切面速度云图
- b) 切面速度矢量图
- c) 不同器件体的温度云图
- d) 迹线分布图
- e) 迹线动画图
- f) PCB 板各向异性导热率分布云图
- g) 散热器热阻数值的提取
- h) 不同器件、不同变量的定量统计报表
- i) 风机工作点后处理显示
- j) 封装 Die 结温的提取
- k) 电流密度分布云图
- l) 电压分布云图
- m) 热耗密度分布云图

11 结果评估

编制原则/参考格式：

- a) 查看模型各个器件的温度分布是否低于其允许的温度；
- b) 查看风机本身的工作点是否合理；
- c) 查看风机的效率是否在合理的范围之内；
- d) 对于温度较高的器件，是否有优化的空间；
- e) 查看热模型内部的流场，寻找气流短路的区域并对其进行优化等等。

12 模型修正

编制原则：

可以通过修正算法，对计算实验与仿真值偏差最小时的仿真模型进行评估，最终给出满足精度要求的仿真模型。

仿真模型中的一些经验参数或可变参数的设置具有很大的经验性，通过模型修正，可以找到最符合工程实际的模型参数，进一步提高仿真结果与实验数据的一致性；可以将这些参数作为同类型模型 CFD 散热仿真的参考。

参考格式：

基于实验标模测试的数据，对仿真模型进行修正；对 CFD 软件中的概念模型进行反设计，对模型中的参数进行校准优化。

13 计算报告

计算报告内容应当包括：

a) 报告一般要求

根据分析仿真的对象及分析内容，制定分析报告的名称、编号、分析标准、报告编写人员信息。

b) 仿真分析模型

对仿真分析模型应对的算例信息、工况参数进行说明，记录算例数据的版本，如几何外形、来流条件、试验条件等；务必讲述不同工况之间的参数区别。

c) 仿真分析软件

记录仿真软件的官方名称、版本信息、软件类型；简要说明不同模块在 CFD 仿真过程中的作用。

d) 仿真任务概述

对分析任务进行背景介绍，并说明本报告分析的内容及拟关注的分析结果；对分析仿真的对象进行概述，详细说明其散热路径、各个器件模块本身的热流属性；对模型中气流的组织形式、风机参数等等做详细的说明。

e) 仿真分析过程

对案例数模信息、模型简化、模型参数、边界条件、求解方式逐个进行必要的说明；比如热模型所处的环境条件（海拔高度、太阳辐射、环境温度等等）、不同风机的风量-风压曲线、热模型散热方式的选择、热模型中不同器件的材料及热耗等均需要进行详细的阐述。

f) 结果分析与结论

分析结果应至少输出热模型中关注器件的温度云图、整个场内的速度矢量图、关注芯片 Die 的结温、风机的工作点等结果；根据仿真后处理结果，总结分析，提出合理有效的建议或者解决方案。对分析对象的热流特性进行客观、综合的评定。

g) 优化和建议

报告中应根据分析结果，给出优化建议和设计改良方案。

仿真报告模板可参考内容如附表 7。

第五章：天线电磁计算仿真分析规范指南

1 目标

编制原则：

对编写或制定标准/规范的目标进行描述。

参考格式：

为了规范 XXX 天线产品电磁仿真分析过程，特制订本规范。通过规范的制定，使得不同工程师在参考本文件进行 XXX 天线产品电磁仿真分析时，得出的仿真分析结果具有高度的一致性，并保证仿真分析结果具有较高的分析精度和工程实用性。

2 范围

编制原则：

对标准/规范的适用范围进行明确。

参考格式：

本规范/标准规定了 XXX 天线产品电磁仿真的分析依据、分析流程、分析要求、分析类型、建模原则、结果评估、模型修正、结果输出、数据处理、报告编写等内容。

本规范/标准适用于应用 XXX 电磁仿真/分析软件进行 XXX 天线产品电磁仿真分析。

3 规范性引用文件

编制原则：

将标准中引用的文件进行描述。

参考格式：

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注明日期的引用文件，仅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）适用于本规范。

GB3100-1993 国际单位制及应用；

GB3101-1993 有关量、单位和符号的一般原则；

GB50922-2013 天线工程技术规范；

GB/T9410-2008 移动通信天线通用技术规范；

GB/T14733.10-2008 电信术语-天线；

GB/T21195-2007 移动通信室内信号分布系统天线技术条件；

GB/T6361-1999 微波接力通信系统抛物面天线型谱系列；

GB/T12401-1990 国内卫星通信地球站天线(含馈源网络)和伺服系统设备技术要求；

GY / T5088-2013 电视和调频广播发射天线馈线系统技术指标；

SJ20884-2003 相控阵天线测试方法。

4 术语和定义

编制原则：

对仿真分析规范中使用的主要术语属性进行描述和定义。

参考格式：

规定仿真分析规范中使用的主要术语，这些术语应该符合当前主流的仿真分析要求，部分术语如下所示。

天线 (Antenna) :天线是一种变换器，它把传输线上传播的导行波，变换成在无界媒介（通常是自由空间）中传播的电磁波，或者进行相反的变换（天线在无线电设备中是用来发射或接收电磁波的部件，无线电通信、广播、电视、雷达、导航、电子对抗、遥感、射电天文等工程系统，凡是利用电磁波来传递信息的，都依靠天线来进行工作。此外，在用电磁波传送能量方面，非信号的能量辐射也需要天

线。一般天线都具有可逆性，即同一副天线既可作为发射天线，也可作为接收天线。同一天线作为发射或接收的基本特性参数是相同的，这就是天线的互易定理）；

有限元（FEM）：有限元算法 FEM，一类基础常用的电磁计算算法，是一类数值求解偏微分方程的算法，FEM 将连续体离散化为若干个有限大小的单元体的集合，是一种高效能、常用的仿真计算方法；

几何模型（Geometry）：使用几何概念描述物理或者数学物体形状，一般包括点、线、面、体等元素构成集合；

材料属性（Material property）：用于描述天线等 3D 物理模型所用的材料电磁物理特性的数据集合；

边界条件（Boundary condition）：用于描述天线产品在给定工况下，求解区域边界上几何与物理条件，如电场、磁场、电磁辐射等约束及负载信息等；

激励（Excitation）：施加于天线模型的电压、电流、功率等（幅度/相位）信息；

网格划分（Mesh）：把几何模型分成很多小的单元，作为具有几何、物理属性的最小的求解域；

天线方向图（Pattern）：方向图是表示天线方向性的特性曲线，即天线在各个方向上所具有的发射或接收电磁波能力的图形（实用天线处在三维几何空间中，方向图应该是个 3D 图形，最常用的是水平面内的方向图（即和大地平行的平面内的方向性图）和垂直面内的方向图（即垂直于大地的平面内的方向图）。当然也有根据 E 面（指与电场方向平行的方向图切面）和 H 面（指与磁场方向平行的方向图切面）切分的方向图，分别叫做 E 面方向图和 H 面方向图；

方向性系数（Directivity）：方向性系数是用来表示天线向某一个方向集中辐射电磁波程度（即方向性图的尖锐程度）的一个参数（为了确定定向天线的方向性系数，通常以理想的非定向天线作为比较的标准。任一定向天线的方向性系数是指在接收点产生相等电场强度的条件下，非定向天线的总辐射功率对该定向天线的总辐射功率之比）；

坐标系（Coordinate System）：规定仿真中使用何种坐标系。一般情况下，天线电磁仿真建议使用直角笛卡尔坐标系与极（球）坐标系。同时，根据分析需要，也可以定义局部坐标系，包括笛卡尔坐标系、柱坐标系、球坐标系等。

5 通用规则

5.1 坐标系

编制原则/参考格式：

对天线产品电磁建模与仿真分析采用的坐标系进行描述，坐标系一般由右手定则来确定，宜采用笛卡尔直角坐标系及球坐标系，必要时可选用柱坐标系等其他坐标系。

天线建模时应定义全局坐标系，根据模型建模的复杂程度和仿真设置的具体需求，可增加局部坐标系，包括笛卡尔坐标系、柱坐标系、球坐标系等。

5.2 单位制

编制原则：

规定仿真分析规范中使用的单位制，单位制应该统一且实用。一般情况下，建议参考国际单位制系统与常用单位，当然也要考虑目前行业实际的应用情况，如附表 1 和附表 2

5.3 材料要素

编制原则：

对天线电磁仿真计算中所用到的材料进行说明，包括金属导体材料，介质材料，其他材料等，需要分别说明。

5.3.1 金属材料

编制原则：

对分析中所涉及的金属材料的要素进行说明。

金属材料一般需要考虑的要素包括：

- a) 金属一般按各向同性材料考虑；
- b) 电磁仿真时，金属导体一般求解表面，不求解金属体内部，但是建模分析时要考虑金属材料对应频率的趋肤效应/趋肤深度；
- c) 常用材料性能参数，包括：电导率、磁导率、介电常数、电损耗角正切、磁损耗角正切等。

参考格式：

XXX 天线仿真分析中所应用的金属材料电磁属性如表 1。

表1. 常用金属材料电磁属性

材料	电导率 (Bulk conductivity)	相对磁导率 (Relative permeability)	电损耗角正切 (Dielectric loss tangent)
银	61000000simens/m	0.99998	0
铜	58000000simens/m	0.999991	0
铝	38000000simens/m	1.000021	0

5.3.2 介质材料

编制原则：

对分析中所涉及的介质材料的要素进行说明，常用介质材料包括聚四氟乙烯、橡胶、玻璃等。

介质材料一般需要考虑的要素包括：

- a) 介质材料特性与频率关系比较密切，仿真时需要注意考虑频率变化（特别宽频带应用）对介质材料特性参数的影响；
- b) 常用介质材料性能参数，包括：电导率、磁导率、介电常数、电损耗角正切、磁损耗角正切等；
- c) 介质材料由于类型众多，且受材料工艺，批次等影响，参数会存在一定的变化，在仿真应用时需要注意对相关参数的验证和对比。

参考格式：

XXX 天线仿真分析中所应用的介质材料属性如表 2。

表2. 常用介质材料电磁属性

材料	相对介电常数 (Relative permittivity)	相对磁导率 (Relative permeability)	电损耗角正切 (Dielectric loss tangent)
FR4-EPOXY	4.4	1	0.02
Teflon	2.1	1	0.001
RorgersR03003	3	1	0.0013

5.3.3 其他材料

编制原则：

这部分材料主要是一些比较特殊的材料，如：半导体，铁氧体，左手材料等。

这类材料一般需要考虑的要素包括：

- a) 特殊材料特性往往介于金属和介质绝缘体之间，仿真时需要注意尽可能全面的考虑材料特性参数；
- b) 常用特殊材料性能参数，包括：电导率、磁导率、磁饱和度、密度、介电常数、电损耗角正切、磁损耗角正切、材料频变特性等；
- c) 这类材料容易受材料工艺等影响，参数会存在一定的变化，在仿真应用时需要注意对相关参数的验证和对比。

参考格式：

XXX 天线仿真分析中所应用的特殊材料属性如表 3。

表3. 特殊材料电磁属性

材料	相对介电常数 (Relative permittivity)	相对磁导率 (Relative permeability)	电损耗角正切 (Dielectric loss tangent)	密度 (mass density)
----	-----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	----------------------

Ferrite	12	1000	0	4600
Silicon	11.9	0.999991	0	2330

对于一些特殊频变材料，可参考标准模型定义，如：

- a) Debye（包括多极点 Debye）模型；
- b) Djordjevic-Sarkar 模型等。

5.4 计算程序

编制原则：

对 XXX 天线电磁仿真计算使用的计算程序及版本号进行说明。

参考格式：

本规范适用以下软件工具进行 XXX 天线电磁仿真计算分析。

- a) 前处理软件：SimSoft1；
- b) 求解器软件：SimSoft2。

其它计算软件工具，可参考使用。

5.5 命名/编号规则

编制原则：

为了规范模型，并便于模型的管理、查找及模型之间的装配等，可以对模型命名和编号进行规范化处理，比如：部件(Component)、零件(Part)、材料(material)、组(group)、集合(set)、节点(node)、单元(element)、接触(Contact)、坐标(coordinate)、曲线(curve)等。

对于天线产品的电磁建模仿真，常用的模型命名和编号处理，主要包括：天线/馈线部件，材料，激励端口，天线单元，天线罩，天线安装平台等

参考格式：

以某天线系统部件、单元等编号为例，其编号规则如表 4。

表4. 某天线系统建模编号规则

子系统	组成	ID 区间		
		部件	材料	单元
天线罩	多层天线罩	1-3	1-10	1-10
天线辐射阵面	金属辐射单元	1-10	1-10	1-10000
	介质基板	1-10	1-10	1-10000
	预留	1-10	1-10	1-10000
馈电网络	功分	1-10	1-10	1-10000
	耦合	1-10	1-10	1-10000
	传输	1-10000	1-10	1-10000

5.6 仿真目标

编制原则/参考格式：

定义仿真目标，就是要列出仿真最终要达到什么结果，或者要解决哪些问题。天线（阵列）电磁计算的一般目标包括天线的辐射方向图，工作频段（带宽），天线增益，天线输入阻抗，驻波系数（驻波比），极化/轴比，波束宽度，极化隔离（双极化天线）等。

具体产品/要求不同，仿真目标可能有所侧重和差异。仿真分析规范设置定义时，根据具体产品的需求，一要细化仿真目标，二要按重要性排序。模型建立和设置中，要优先考虑重点的仿真目标。

6 交付物

编制原则/参考格式：

明确天线电磁仿真分析过程中需要提交的成果和输出。天线电磁仿真分析过程中一般需要提交的交付物如下：

- a) 基本几何模型文件;
- b) 网格模型文件;
- c) 电磁模型文件;
- d) 电磁仿真报告;
- e) 其他要求输出的数据/资料等。

7 工作流程

编制原则:

对 XXX 天线产品电磁仿真分析过程进行规范,一般可采用流程图的方式表示。对于整个分析过程在管理上,也可以用表格形式进行。

参考格式:

天线产品电磁仿真分析流程如附图 1。

同时,为对整个仿真分析过程进行管控,可采用附表 6 的方式对电磁仿真分析过程进行管控。

8 前处理建模

8.1 几何建模处理

8.1.1 建模方式

编制原则:

可根据实际需要对合适的建模方式进行描述。

参考格式:

几何模型建模一般有两种方式,一是将 CAD 设计模型导入有限元分析前处理软件进行建模,称之为“几何模型导入法”;一种是在电磁仿真分析前处理软件直接建模,称之为“直接建模法”。

8.1.2 直接建模法

原则与参考格式:

直接建模是直接在电磁仿真软件前处理模块中进行建模,现有电磁仿真软件基本都支持直接建模。这种建模方式,便于模型参数化,适合简单模型建模,但一般软件的建模效率不及专业 CAD 设计工具,对于复杂模型建模比较困难。

直接建模时,需要根据结构特征、分析目的、采用的单元类型等,对不同结构类型的建模方式进行详细说明。

XXX 天线产品进行直接建模的一般原则如下:

- a) 对于天线辐射体部分的模型,建模时尽量保持其原始几何特征,对于一些细节可以适当简化替代:比如圆形横断面的螺旋线,可以画成多边形横断面的螺旋线;CAD 工具转换时产生的细小毛刺和裂缝等(非设计缝隙),可以进行修补平滑。
- b) 对主要仿真目标影响不大的几何细节,几何建模时可以忽略或者简化。如原始的 CAD 模型中的安装底座/外围部件的非金属部分,可以清除或简化处理。

制定规范时可根据实际产品特点,进行具体的规范定义。

8.1.3 几何模型导入法

编制原则/参考格式:

通过 CAD 建模软件建立几何模型后再导入电磁仿真软件中进行分析处理,可以建立复杂 3D 仿真模型,但需要进行模型简化及特征处理,模型特征可能会有丢失,模型参数化不方便。

外部导入的几何模型需要进行适度处理。在天线仿真计算时,不需要考虑所有的几何细节特征,可以根据下述原则进行简化处理,以节省计算工作量:

- a) 对于模型导入产生的微小模型细节(毛刺/缝隙等),可参考电磁频率特性,进行简化和平滑处理;
- b) 对仿真目标影响不大的结构或特征,可以简化或者忽略处理,如天线辐射部件以外的非金属结

构部件等在建模时可忽略处理。在制定规范时可根据实际产品特点，进行具体的规范定义。

8.2 网格划分处理

8.2.1 网格尺寸

8.2.1.1 基本网格疏密分布

编制原则：

在天线电磁仿真过程中，天线模型和空间的离散化通过网格来实现，网格疏密分布对计算结果会带来很大的影响。在仿真分析规范中，应该对网格的疏密分布给出相应的规定。

参考格式：

XXX 天线产品进行电磁仿真时，根据现有的专业电磁算法与工程仿真的实际情况，对于不同的全波算法，网格的基本尺寸应有一定的考虑：

- a) 对于频域 FEM 类/MOM 类算法的网格，建议基本尺寸为 $1/10$ 波长左右；对于时域 FDTD/FIT 类算法的网格，建议基本尺寸为 $1/10$ 波长- $1/20$ 波长左右；具体应用时还应结合实际电磁仿真软件的特点，调整网格的基本尺寸。
- b) 在电磁场变化平缓的空间区域/位置，可以采用较疏的网格，在电磁场变化剧烈的位置，需要采用较密的网格（例如复杂细节模型和空间模型过渡区域。）

8.2.1.2 复杂精细模型的网格

编制原则：

为了实现特定的天线（阵列）技术性能，往往会有一些复杂的精细结构设计，如大量的曲面/开槽/开孔等，这在天线电磁仿真过程中，会大大增加网格剖分的难度和工作量。这部分也是目前天线电磁仿真的一大技术难点，复杂细节模型网格剖分的情况直接影响计算结果的准确性与可靠性。针对这部分，虽然当前很多工具有自适应网格剖分功能，但是在制定仿真分析规范和进行仿真时还是需要特别注意。

参考格式：

对于复杂精细/细节模型，在工具自适应网格剖分的基础上，应该进行必要的网格分析检查，对于网格与原始复杂几何模型差异较大的情况，应尽量加密网格甚至是手动调整网格。

在硬件资源允许的情况下，减小网格基本尺寸，提高网格对原几何模型的贴合度。

8.2.1.3 模型空间过渡区域的网格

编制原则/参考格式：

天线仿真计算中由于模型的复杂与多样性，可能存在局部模型很小很精细，但需要计算的空间范围很大的情况。这种情况下，就会存在一个比较突出的问题：大范围空间的网格尺寸大而且比较稀疏，局部小模型的网格极其小而且密集，这两者的网格之间差异很大。两者之间如何通过适当的网格进行过渡就非常关键了。对于这类情况，在制定仿真分析规范和进行仿真时需要引起重视。

在进行基本的网格剖分后，应该进行网格检查。

原则上：一般情况需要在自适应网格基础上进行模型手动网格过渡处理。

8.2.1.4 网格质量与可靠性检查

8.2.2 网格质量检查

编制原则/参考格式：

网格生成后，应对网格质量进行必要的检查，仿真分析规范应提出要求。网格质量直接影响仿真精度，甚至导致发散，直接决定计算能否取得成功。网格质量检查需要包括并不限于以下指标：

- a) 偏斜度；
- b) 增长率；
- c) 长宽比。

同时，为避免出现奇异网格，网格尽量大小均匀分布或者网格大小/疏密分布逐步平滑过渡，保证电磁模型重点关注区域的网格质量高，非关注区域的网格质量可适当降低。

8.2.3 网格可靠性检查

编制原则/参考格式:

对于天线仿真计算,为了保证计算结果的准确性与一致性,仿真过程中还必须进行网格可靠性检查验证。网格可靠性检查是为了评估或排除仿真中的各种因素带来的系统误差。在天线电磁仿真分析规范中,建议对网格可靠性检查验证的步骤做出操作说明。

编制原则:电磁网格可靠性验证的基本原则是逐渐优化/加密网格,直至经过网格加密迭代之后计算结果稳定收敛。在实际操作时,需要设置合理的网格加密方案,节省计算资源。

以FEM电磁软件SimSoft2为例,其计算仿真中自适应网格剖分迭代的过程,就是一个网格不断优化稳定的验证过程,当迭代计算结果稳定收敛时,网格的剖分和质量就稳定下来,能够保证计算结果的准确性和一致性。

8.3 连接定义

编制原则/参考格式:

天线仿真模型对应的实际产品连接形式包括:同轴/传输线连接、接插件、焊接、螺栓、法兰连接等;

在天线电磁建模时对于这些连接接入部分,需要进行一定的模型工程简化。在仿真分析规范中,应该对相关的简化提出要求(由于仿真时完全不做任何简化处理,容易引起计算量上升,计算效率和计算精度下降等不必要的问题,因此建议实际仿真中都要进行一定的处理)。简化的时候,尽量采用标准几何体模型建模,减少不必要的连接模型细节,但原则上需要确保所建模型贴近实际情况的电连接效果。

8.4 相互作用关系定义

编制原则/参考格式:

在天线电磁仿真中,在采用混合算法(尤其高频近似算法)求解时,有时需要定义模型中不同组成部分(区域)之间的耦合与作用关系。制定仿真分析规范时,具体的定义和应用情况请参考具体电磁软件的要求。

8.5 边界与激励

8.5.1 边界条件

编制原则:

辐射(吸收)边界条件是天线/电磁场仿真的关键要素,也是电磁仿真工具模拟实际电磁能量效应的一个重要途径。辐射(吸收)边界条件的正确设置,对计算结果有重要的影响,在具体应用和仿真分析规范要求中需要注意。

参考格式:

- a) 以频域FEM算法的工具为例,在天线的主辐射方向上,设置辐射边界距离天线相应的模型表面要达到 $1/4$ 波长的距离;其他方向的这个距离,可以酌情减小。计算空间的形状可以根据天线模型的形状调整,比如:天线/辐射模型为圆柱形,则计算空间边界可以做成圆柱形。
- b) 对于时域FDTD(FIT)算法的工具(如CST),FDTD计算空间的辐射边界(吸收边界)一般只能用六面体外形,边界到模型的空间距离请参考具体的仿真工具要求。

8.5.2 激励源

编制原则:

对于天线产品模型的仿真激励源而言,既要考虑幅度/相位的信息,也要考虑天线极化的因素。在具体应用和仿真分析规范中需要注意以下原则。

参考格式:

- a) 一般而言,天线激励源为激励端口时,应该注意激励信号的幅度,相位及极化特性等;对于存在多个电磁场模式的导波结构,还需要注意其中一些高次模式/凋落波的影响。也就是说,如果存在高次模式/凋落波的影响,在设置激励端口/参考面时,应该考虑预留合适的信号传输距离

以消除这些成分对计算结果的影响。

- b) 对于天线激励源为外加辐射场（如：入射电磁波，天线等其他辐射源）的情况，需要参照具体仿真工具的要求，设置相关激励及所需的数据文件等。

8.6 前处理模型检查

编制原则/参考格式：

仿真模型在提交求解前应进行充分的质量检查，确保基本模型输入参数的正确性，确保模型网格质量，边界条件、激励的正确性等，这项工作在具体应用和仿真分析规范中需要注意。

模型质量检查主要包括：

- a) 单位制检查，检查模型单位制是否统一，不应存在单位冲突情况；
- b) 模型属性检查，主要包括模型各组成部分几何属性、材料属性及模型完整性检查等；
- c) 边界条件/激励检查，主要包括激励大小、幅度、相位、方向及边界条件的正确性。

9 求解设置与提交求解

9.1 求解设置

9.1.1 频率设置定义

编制原则：

频率的设置对天线仿真意义重大，主要涉及网格剖分频点，计算频段范围/频率点等。

参考格式：

在网格剖分，频率扫描等技术实现方面存在一定的差异，在具体应用中请参考具体软件工具进行相应的频率设置。

9.1.2 求解器设置

编制原则：

天线问题的仿真求解，可以选择全波算法求解器和高频算法求解器。

参考格式：

- a) 为确保计算精度，能够用全波求解器计算的问题，尽量采用全波求解器；
- b) 全波求解器中，复杂的/电尺寸较小的天线可采用频域 FEM 求解器；相对简单/宽频带的天线计算可采用时域 FDTD (FIT) 求解器；对于（不含介质材料）金属天线/阵列模型及开放空间散射问题，可以采用频域 MOM 求解器；
- c) 对于全波求解器不能处理的问题，可以采用高频算法求解器，但为了提高计算精度，需要尽量采取全波求解器+高频求解器组合的运用方式。

9.1.3 求解迭代收敛参数

编制原则：

天线电磁场仿真中，计算迭代的收敛参数主要有 S 参数，能量等，参数的设置对计算精度，效率等都非常重要。

参考格式：

要获得精度高且效率好的收敛效果，参数设置上要参考工程实际。以有限元 FEM 软件 HFSS 为例：S 参数的收敛标准可以选择 0.02-0.01，一般低于 0.01，实际工程意义就不大了。标准中可以根据实际情况规范具体的选择范围。

9.2 提交求解

9.2.1 求解过程监测

编制原则：

对于天线仿真计算，在求解过程中，应该监测网格、收敛参数、计算频点完成情况、硬件资源消耗等参数。

参考格式：

选取的监测参数和仿真目标要有关联性。通过监测把握仿真的进行情况和计算效果。

9.2.2 收敛的判断

编制原则:

可以根据收敛参数的数值是否达到预定收敛标准值范围来判断收敛。

参考格式:

一般情况下,如果收敛参数小于收敛标准值(绝对值),同时没有反复(即连续两次小于收敛标准值),即可认为收敛。

10 结果后处理

编制原则/参考格式:

天线电磁仿真完成后,结果后处理的数据一般包括(规范可根据实际需求调整):

- a) 天线方向图(2D/3D);
- b) 驻波系数;
- c) 输入阻抗;
- d) 相位方向图;
- e) 近场分布;
- f) 轴比;
- g) 天线辐射效率;
- h) SAR 等。

11 结果评估

11.1 基本计算效果评估

编制原则/参考格式:

对于天线仿真计算的结果,首先应从电磁计算方法,建模输入条件/参数,仿真设置,计算收敛情况,计算结果数据的基本物理合理性等角度进行分析判断;以便确定计算仿真结果的有效性和基本流程的正确性。

建议具体内容列表以表格方式进行评估,表格格式可根据具体需要自行定义。

11.2 计算结果工程精度评估

编制原则/参考格式:

对于天线仿真计算的结果,在前面基本分析评估基础上,结合产品的工程技术指标,将仿真结果数据与产品指标进行对比,分析评估天线设计仿真的效果,以便考虑进行后续必要的设计改进,模型修正等工作。

主要对比指标参数,如:天线的辐射方向图,工作频段(带宽),天线增益,天线输入阻抗,驻波系数(驻波比),极化/轴比,波束宽度,极化隔离(双极化天线)

对于仿真的工程精度评估情况,建议具体内容列表以表格方式进行评估,表格格式可根据具体需要自行定义。

12 模型修正

编制原则:

基于实验和实际测量数据,对仿真模型进行修正与标定;并结合实验结果,调整优化仿真设置,提高仿真精度。

参考格式:

- a) 在模型基本几何/物理参数检查修正的基础上,根据实验条件/测量数据与仿真情况的对比,找出主要的差异,并通过测量/仿真结果的多次对比,稳定模型基本建模输入参数;
- b) 在对比中,根据不同算法的特点,结合工程经验,加入人工/统计的修正值(修正设置和计算结果),以提高计算分析的精度和效率。

13 计算报告

编制原则/参考格式:

计算报告内容应当包括:

a) 报告一般要求

根据分析仿真的对象及分析内容,制定分析报告的名称、编号、分析标准、报告编写人员信息。

b) 仿真分析模型

对仿真分析模型应对的算例信息进行说明,记录算例数据的版本,如几何外形、来流条件、试验条件等。

c) 仿真分析软件

记录仿真软件的官方名称、版本信息、软件类型。

d) 仿真任务概述

对分析任务进行背景介绍,并说明本报告分析的内容及拟关注的分析结果;对分析仿真的对象进行概述,详细说明其散热路径、各个器件模块本身的热流属性;对模型中气流的组织形式、风机参数等等做详细的说明。

e) 仿真分析过程

对案例数模信息、模型简化、模型状态、边界条件、求解方式逐个进行必要的说明。

f) 结果分析与结论

分析结果应至少输出天线仿真目标信息如辐射方向图、增益、驻波系数等。根据仿真后处理结果,总结分析结论。对分析天线的基本性能给出客观、综合评定。

g) 优化和建议

报告中应根据分析结果,给出优化建议和设计改良方案。

仿真报告模板可参考内容如附表 7。

第六章：汽车碰撞仿真分析规范样例

1 目标

为了规范汽车整车碰撞仿真分析过程,保证有限元模型的通用性,减少重复性工作,特制订本规范,所有零部件将依据本规范所规定标准进行建模。

通过规范的制定,使得不同仿真工程师在参考本文件进行汽车整车碰撞仿真分析时,得出的仿真分析结果具有高度的一致性,并保证仿真分析结果具有较高的分析精度。

2 范围

本规范/标准规定了汽车整车碰撞的分析依据、分析流程、分析要求、分析类型、建模原则、结果评估、模型修正、结果输出、数据处理、报告编写等内容。

本规范/标准适用于汽车整车碰撞仿真分析,其它结构或零件可参考使用。

3 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。凡是注明日期的引用文件,仅标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)适用于本标准。

GB/T31054-2014 机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语;

GB/T11551-2014 汽车正面碰撞的乘员保护;

ASME V&V 10-2006 Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics;

ASME V&V 10.1-2012 An Illustration of the Concepts of Verification and Validation

In Computational Solid Mechanics;

4 术语和定义

分析中常用的术语和定义如下:

有限元建模 (finite element modeling): 构建有限元模型的过程,包括几何模型构建和处理、材料属性定义、网格划分、边界(载荷)条件施加、求解参数设置等步骤;

几何模型 (geometry): 使用几何概念描述物理或者数学物体形状,一般包括点、线、面、体等元素构成集合;

材料属性 (material property): 用于描述机械结构所用材料物理特性的数据集合;

边界条件 (boundary condition): 用于描述机械结构在给定工况下,求解域边界上几何以及物理条件,如力、温度、速度、位移等约束及载荷信息;

网格划分 (mesh): 把几何模型分成很多小的单元,作为具有几何、物理属性的最小的求解域;

约束 (constraint): 减少自由度的各种限制条件;

TEL 标准单元边长 (Typical element side length): 指零件非关键区域的目标平均单元边长;

MEL 最小单元长度 (Minimum element length): 满足显式计算时间步长的最小单元长度,一般指壳单元的最小单元边长或侧面长度;

长宽比 (aspectratio): 描述二维或三维单元最长边与最短边之比的量;

细长比 (slenderness): 杆件的计算长度与杆件截面的回转半径之比;

翘曲度 (warpage): 单元偏离平面的程度,用于检查单元的翘曲;

偏斜度 (skew): 描述单元的扭曲程度的数学量;

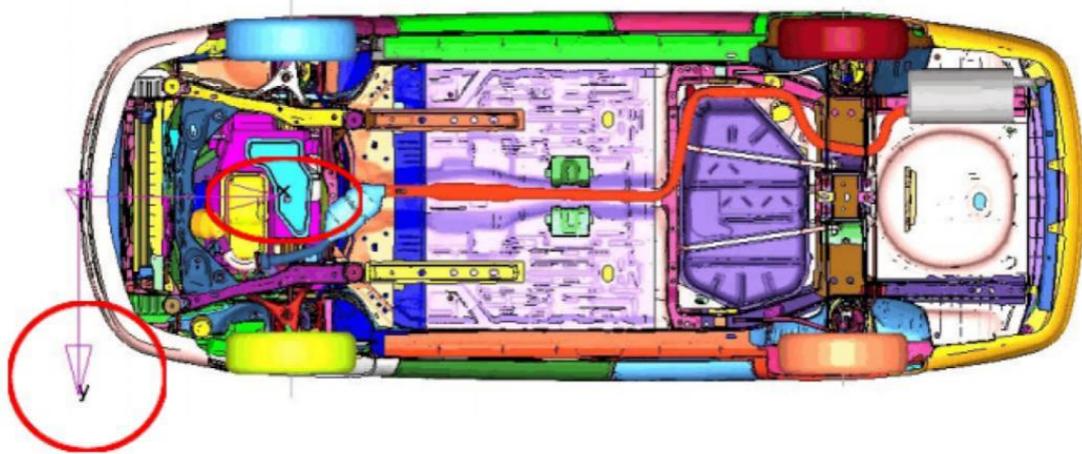
内角 (interior angle): 指三角形单元或四边形单元的夹角的值,常用于描述单元的最大内角或者最小内角的数学量;

云图 (cloud map): 利用色彩显示结构内任意一点计算结果的分布图。

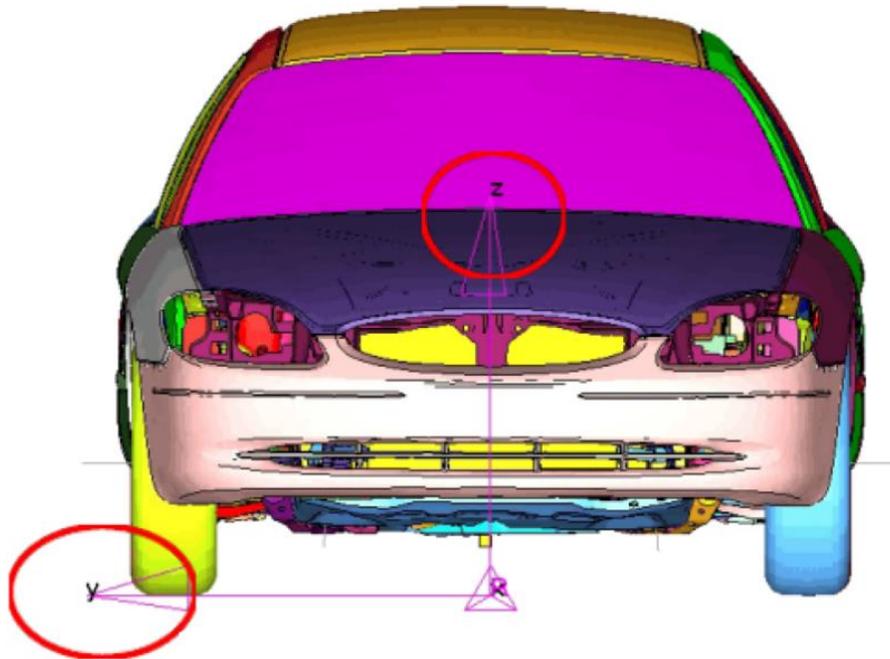
5 通用规则

5.1 坐标系

车身坐标系采用笛卡尔坐标系，X轴正向由车的前端指向尾端，Y轴的正向由车的左侧指向右侧，零点位于车的中轴线上，即Y=0.0位于车的中轴线上；Z的正向由车的底端指向车的顶端。车身坐标系如图1。



a) 车身坐标系 XY 平面



b) 车身坐标系 YZ 平面

图1. 车身坐标系

5.2 单位制

建模中单位要保持一致，单位制的对应关系如表1。

表1. 单位制

类型	国际单位制 (SI Units)	推荐单位制	常用单位制
时间(Time)	s (秒)	ms (毫秒)	s(秒)
长度(Length)	m(米)	mm(毫米)	mm(毫米)
质量(Mass)	Kg(千克)	Kg(千克)	Ton(吨)
密度(Density)	Kg/m ³	Kg/mm ³	Ton/mm ³
力(Force)	N(牛)	kN(千牛)	N(牛)

类型	国际单位制 (SI Units)	推荐单位制	常用单位制
应力(Stress)	Pa(帕, N/m ²)	GPa	MPa
重力(Gravity)	9.81m/s ²	0.00981mm/ms ²	9810mm/s ²
力矩(Torque)	N·m	kN·mm	N·mm
刚度(Stiffness)	N/m	kN/mm	N/mm
频率(Frequency)	Hz(赫)	kHz(千赫)	Hz(兆赫)
能量(Energy)	J(焦)	J(焦)	MJ(兆焦)

5.3 材料

常用的材料及基本属性如表 2。

表2. 常用材料基本属性示意

力学性能参数	SAE 1010		SAE 950		UGSS	
ρ (Kg/mm ³)	7.80E-06		7.80E-06		7.80E-06	
ν	0.3		0.3		0.3	
a (GPa)	0.192		0.345		1.14	
b (GPa)	0.111		0.095		1.287	
n	0.22		0.160		0.36	
σ_{max} (GPa)	0.303		0.440		2.10	
应力应变关系	应变	应力 (GPa)	应变	应力 (GPa)	应变	应力 (GPa)
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.94146E-03	0.19200	0.16829E-02	0.345	0.5561E-02	1.14
	0.997620E-03	0.19958	0.17315E-02	0.35481	0.70299E-02	1.2453
	0.10674E-03	0.20616	0.18309E-02	0.36462	0.13139E-01	1.3506
	0.94146E-03	0.21274	0.20133E-02	0.36952	0.27307E-01	1.4559
	0.14275E-02	0.21932	0.24852E-02	0.37443	0.52542E-01	1.5612
	0.25018E-02	0.2259	0.58515E-02	0.38423	0.91632E-01	1.6665
	0.10234E-01	0.23247	0.10202E-01	0.38914	0.14721E+00	1.7718
	0.19505E-01	0.23905	0.17964 E-01	0.39404	0.22178E+00	1.8771
	0.34847E-01	0.24563	0.31051E-01	0.39895	0.31778E+00	1.9824
	0.58705E-01	0.25221	0.52105E-01	0.40385	0.43754E+00	2.0877
	0.94044E-01	0.25879	0.13341E+00	0.41366	0.58335E+00	2.1000
	0.14439E+00	0.26537	0.20427E+00	0.41856	0.1000E+02	2.1000
	0.21384E+00	0.27195	0.30477E+00	0.42347		
	0.42963E+00	0.28511	0.44424E+00	0.42837		
	0.5874E+00	0.29169	0.63411E+00	0.43328		
	0.7872E+00	0.29827	0.88822E+00	0.43818		
0.10365E+00	0.30300	0.12231E+01	0.44000			
0.10000E+00	0.30300	0.10000E+02	0.44000			

5.4 计算程序

本规范适用以下软件工具进行白车身结构碰撞仿真计算分析。

- a) 前处理软件: SimSoft1;
- b) 求解器软件: SimSoft2;
- c) 后处理器软件: SimSoft3.

其它计算软件工具, 可参考使用。

5.5 命名/编号规则

整车模型分为白车身（BIW）、开闭件（closure，前后车门、尾门和前发动机盖板）、chassis（底盘）、trim（内饰）四个子系统，各子系统又包含相应的总成，每个总成由若干零件组成。各构成关系（整车—子系统—总成—零件）及通用编号如表 3。

表3. 整车构成及编号

子系统	总成	ID 区间			
		part	node	element	set
accelerometer	(output)	1 - 999	1 - 9999999	1 - 9999999	1 - 999
BIW	roof	1000 - 1099	10000000 - 10999999	10000000 - 10999999	1000 - 1099
	front end	1100 - 1199	11000000 - 11999999	11000000 - 11999999	1100 - 1199
	inner side body	1200 - 1299	12000000 - 12999999	12000000 - 12999999	1200 - 1299
	outer side body	1300 - 1399	13000000 - 13999999	13000000 - 13999999	1300 - 1399
	front floor	1400 - 1499	14000000 - 14999999	14000000 - 14999999	1400 - 1499
	rear floor	1500 - 1599	15000000 - 15999999	15000000 - 15999999	1500 - 1599
	预留	1600 - 1999	16000000 - 19999999	16000000 - 19999999	1600 - 1999
closure	hood	2000 - 2099	20000000 - 20999999	20000000 - 20999999	2000 - 2099
	front door	2100 - 2199	21000000 - 21999999	21000000 - 21999999	2100 - 2199
	rear side door	2200 - 2299	22000000 - 22999999	22000000 - 22999999	2200 - 2299
	tailgate	2300 - 2399	23000000 - 23999999	23000000 - 23999999	2300 - 2399
	预留	2400 - 2999	24000000 - 29999999	24000000 - 29999999	2400 - 2999
chassis	frame	3000 - 3099	30000000 - 30999999	30000000 - 30999999	3000 - 3099
	cooling system	3100 - 3199	31000000 - 31999999	31000000 - 31999999	3100 - 3199
	powertrain	3200 - 3299	32000000 - 32999999	32000000 - 32999999	3200 - 3299
	transmission system	3300 - 3399	33000000 - 33999999	33000000 - 33999999	3300 - 3399
	tyre	3400 - 3499	34000000 - 34999999	34000000 - 34999999	3400 - 3499
	suspension	3500 - 3599	35000000 - 35999999	35000000 - 35999999	3500 - 3599
	steering system	3600 - 3699	36000000 - 36999999	36000000 - 36999999	3600 - 3699
	exhaustsystem	3700 - 3799	37000000 - 37999999	37000000 - 37999999	3700 - 3799
	fuel system	3800 - 3899	38000000 - 38999999	38000000 - 38999999	3800 - 3899
	pedal	3900 - 3999	39000000 - 39999999	39000000 - 39999999	3900 - 3999
trim	windshield	4000 - 4099	40000000 - 40999999	40000000 - 40999999	4000 - 4099
	bumper	4100 - 4199	41000000 - 41999999	41000000 - 41999999	4100 - 4199
	seat	4200 - 4299	42000000 - 42999999	42000000 - 42999999	4200 - 4299
	instrument panel	4300 - 4399	43000000 - 43999999	43000000 - 43999999	4300 - 4399
	door trim	4400 - 4499	44000000 - 44999999	44000000 - 44999999	4400 - 4499
	fender	4500 - 4599	45000000 - 45999999	45000000 - 45999999	4500 - 4599
	预留	4600 - 4999	46000000 - 49999999	46000000 - 49999999	4600 - 4999
预留		5000 - 6999	50000000 - 69999999	50000000 - 69999999	5000 - 6999
dummy	dummy	7000 - 7999	70000000 - 79999999	70000000 - 79999999	7000 - 7999
restraint	restraint	8000 - 8999	80000000 - 89999999	80000000 - 89999999	8000 - 8999
barrier	barrier	9000 - 9999	90000000 - 99999999	90000000 - 99999999	9000 - 9999
其它

零件的命名使用简写后的零件名，常用词缩写规范如表 4 所示。

表4. 常用名词缩写

原型	缩写	原型	缩写	原型	缩写
assembly	assy	frame	frm	powertrain	pwt
body in white	BIW	front	frt	rail	rail
bracket	brkt	hinge	he	rear	rr
bumper	bp	inner	inr	reinforcement	reinf
chassis	chas	instrument panel	IP	right hand	rh
closure	clos	left hand	lh	seat	st
connect	cont	linking	lnkg	shock	shk
control	ctrl	lower	lwr	steering	strg
crossmember	crmb	middle	mid	subframe	subfrm
dashboard	db	mount	mt	support	supt
door	dr	outer	otr	suspension	sus
engine	eng	panel	pnl	system	sys
fender	fd	pedal	pdl	toe pan	tp
fire wall	fw	pillar	pilr	upper	upr
floor	flr	plate	pla	wheel	whe

其他命名规范如表 5 所示。

表5. 其他命名规范

项目	命名规范	示例
material	材料号_(材料牌号)_零件编号	MAT24_SPCC_1234
property	属性种类_零件编号	SectShll/SectBeam_1234
set	part	parts for 对象
	node	nodesfor 对象
syscol	Syscol_对象	Syscol_eng1
vectorcol	Vectorcol_对象	Vectorcol_exhaustsys
loadcol	InitialVel	InitialVel_对象
	LoadBody	LoadBody_对象
	Spc	Spc_对象
rigid	MPC_子系统名	MPC_susrr
joint	joint_子系统名	joint_strg sys
整车模型	车型号_标准号_版本号_日期	GL8_XXXImpact_V01_180528.hm

6 交付物

整车碰撞仿真分析过程中需要提交的文件主要包括：

- a) 有限元整车网格模型文件；
- b) 材料信息文件；
- c) 求解及载荷设置文件；
- d) 计算结果文件；
- e) 报告文档等。

7 工作流程

整车碰撞仿真分析流程如图 2。

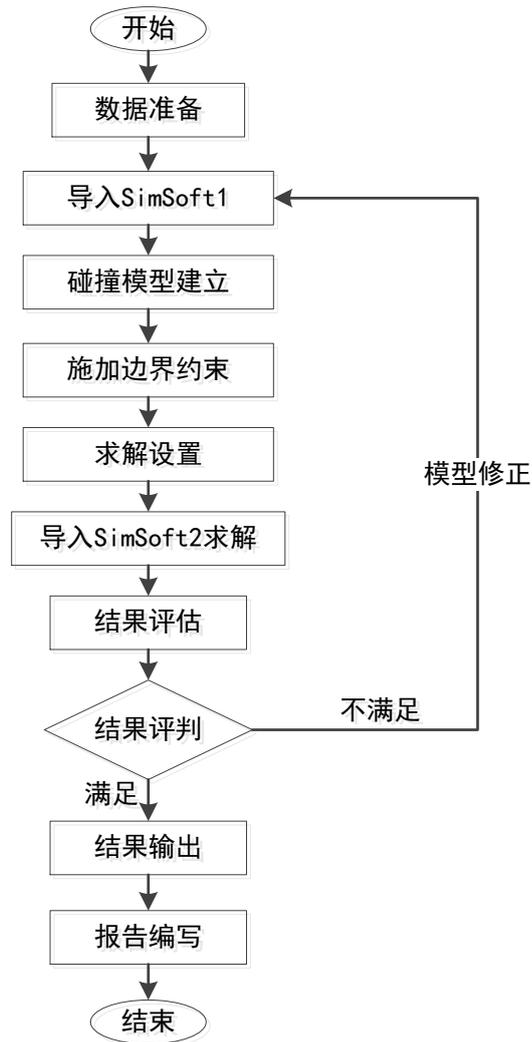


图2. 碰撞分析仿真流程

整车碰撞分析过程如表 6。

表6. 工作流程表

工作任务	工作内容	开始时间	结束时间	文件及输出	负责人
模型数据准备	需要准备的模型数据包括： <ul style="list-style-type: none"> • 三维 CAD 几何模型及板厚列表信息； • 总成/零部件之间的连接关系，提供总成/零部件的明细表； • 连接（焊点，铆接，胶接等）的空间分布参数，以及具体到每种连接的结构参数； • 整车/总成/零部件的质量、质心参数； • 每一个零部件所对应的材料牌号； • 弹簧、橡胶等连接的刚度与阻尼信息； • 分析任务目标要求等。 具体内容见表 7。			—	
整车仿真模型创建	建立整车碰撞仿真分析模型，包括： <ul style="list-style-type: none"> • 整车网格模型建立； • 各种连接关系建立，包括点焊连接、焊 			带前处理工具、版本号信息及日期等信息的整车	

工作任务	工作内容	开始时间	结束时间	文件及输出	负责人
	缝连接、粘接连接及其它连接等； • 材料属性设置，包括材料属性、板壳厚度属性、梁截面属性、质量属性、刚度属性等设置。			碰撞仿真分析模型。	
模型检查及修复	模型检查内容包括： • 网格连续性与重复检查，包括零件应全部被网格化检查、“自由边”检查、干涉或穿透检查、“壳单元法向”检查、节点和单元重新性检查等，并对模型进行修复； • 网格质量检查，检查内容及标准见表 11，对质量较差的网格进行修改或者重划，得到更好的网格质量； • 单元材料属性信息检查，检查模型中是否存在“无材料、无属性”的单元及材料、属性是否与设计数据一致，并进行修复， • 整车质心与质量调节，当整车模型质量和质心位置与设计数据不符时，可通过增加配重、增加集中质量以及改变刚体的惯性属性等方式进行质量分布的调整。			模型检查结果文件，包括单元、节点类型和数量信息、网格质量信息、模型重量和质心信息等。	
碰撞模型建立	创建内容包括： • 创建壁障和地面模型； • 将壁障和地面模型与整车模型装配，组成整车碰撞模型，可包括正面 100%碰撞仿真模型、正面 40%偏置碰撞仿真模型、及侧面移动壁障碰撞仿真模型等； • 建立接触关系，包括整车自身接触、整车与刚性壁障、汽车轮胎与地面之间接触等。			包含接触关系的整车碰撞模型，可包括包括正面 100%碰撞仿真模型、正面 40%偏置碰撞仿真模型、及侧面移动壁障碰撞仿真模型等。	
初始条件及边界条件	在碰撞模型是施加初始条件和边界约束。			包含初始条件和边界约束的碰撞模型文件。	
求解设置	求解设置内容包括： • 接触控制； • hourglass 控制； • 能量控制； • 壳单元与实体单元控制； • 计算时间控制及时间步长控制； • 结果输出控制； • K 文件输出； • 求解。			k 文件及结果 d3plot 文件。	
结果后处理	结果后处理内容包括： • 仿真结果可信性分析； • 整车质量变化分析； • 整车能量变化分析； • 整车变形阶段性分析； • 整车速度及加速度分析； • 关键部件变形分析； • 关键部件吸能分析； • 乘员舱变形分析。			各种云图、动画、曲线图、折线图、图表等。	
模型修正	仿真模型误差修正。			修正后模型。	
报告输出	计算报告编制。			碰撞仿真分析计算报告。	

8 整车模型建立

8.1 数据准备

数据准备主要是整车几何 CAD 模型准备与参数准备，其中参数包括质量、质心、材料参数、焊点信息等，这是做整车碰撞仿真最基础的输入信息：

- a) 三维 CAD 几何模型完整、合理、无干涉，数据类型可为 CATIA、UG、PRO/E 及 Stp、iges 格式等，并提供板厚列表信息；
- b) 总成/零部件之间的连接关系，提供总成/零部件的明细表；
- c) 连接（焊点，铆接，胶接等）的空间分布参数，以及具体到每种连接的结构参数；
- d) 整车/总成/零部件的质量、质心参数；
- e) 每一个零部件所对应的材料牌号；
- f) 弹簧、橡胶等连接的刚度与阻尼信息；
- g) 几何 CAD 模型与参数准备，也需提供版本信息。

整车碰撞建模中需要准备的数据内容及要求如表 7。

表7. 数据内容及要求

序号	总成名称	数据内容	要求	
1	白车身	白车身三维数模及焊点	<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 焊点信息完整、焊接层级清楚 • 零部件的材料牌号明确 • 零部件的厚度要明确 • 质量和质心统计完整、准确 • 胶粘位置完整、准确 	
		白车身零部件明细表及质量和质心统计表		
		白车身胶粘分布位置图		
2	内外饰	内外饰三维数模及焊点		
		内外饰部件明细表及质量和质心统计表		
3	开闭件	开闭件三维数模及焊点		
		开闭件部件明细表及质量和质心统计表		
4	动力总成	动力总成的三维数模及连接关系		<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 零部件的材料牌号明确 • 质量和质心统计完整、准确
		动力总成零部件明细表及质量和质心统计表		
		发动机设计参数		
5	转向系统	转向系统的三维数模及连接关系		<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 零部件的材料牌号明确 • 质量和质心统计完整、准确
		转向系统零部件明细表及质量和质心统计表		
6	前悬挂	前悬架的三维数模及连接关系	<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 零部件的材料牌号明确 • 质量和质心统计完整、准确 	
		前悬架零部件明细表及质量和质心统计表		
		弹簧刚度		
7	后悬挂	后悬架的三维数模及连接关系	<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 零部件的材料牌号明确 • 质量和质心统计完整、准确 	
		后悬架零部件明细表及质量和质心统计表		
		弹簧及橡胶软垫刚度		
8	进排气系统	进排气系统的三维数模及连接关系	<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 零部件的材料牌号明确 • 质量和质心统计完整、准确 	
		进排气系统零部件明细表及质量和质心统计表		
		橡胶软垫刚度及阻尼		
9	燃油系统	燃油系统的三维数模及连接关系	<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 零部件的材料牌号明确 • 质量和质心统计完整、准确 	
		燃油系统零部件明细表及质量和质心统计表		
		油箱满载质量和质心		
10	轮胎、备胎	轮胎、备胎的三维数模及连接关系	<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 零部件的材料牌号明确 • 质量和质心统计完整、准确 	
		轮胎、备胎零部件明细表及质量和质心统计表		
11	电器系统	电器系统的三维数模及连接关系中	<ul style="list-style-type: none"> • 三维数模完整、无误、无干涉穿透 • 零部件的材料牌号明确 	
		电器系统零部件明细表及质量和质心统计表		

序号	总成名称	数据内容	要求
			• 质量和质心统计完整、准确
12	其它	材料参数及应力应变曲线	—
		整车质量和质心参数用系统等	—
		车辆为新能源汽车时，根据车辆类型增加动力电池系统、氢能储存和使	—

8.2 建模原则

为节省计算资源及保证仿真精度，在综合分析各零部件在碰撞仿真分析中的作用及变形特征的基础上对相应构件进行合理简化及建模处理，具体措施包括以下几个方面：

- a) 需保证模型要能够正确反映各柔性构件的变形吸能特性，如车身钣金件和底架纵梁等，采用计及大变形的单元类型详细建模。
- b) 体积和刚度均较大的构件如发动机、变速箱等由于在碰撞过程中自身几乎不变形但可能与其它变形体接触，可采用刚性体单元模拟。
- c) 对变形可忽略的小构件还可进一步用点质量单元建模以保持整车模型的总质量和重心位置与实车一致。
- d) 一般情况下，钣金件建模时一个零件对应一个 component，component 的名称在零件名称基础上进行命名，从左至右，依次是项目代号或者车型代号、子组代号（建议用名称缩写）、零件号（建议用名称缩写或编号）、厚度（用字母“T”+厚度参数表示）、材料及版本号（用字母“V”+模型版本号参数表示）等，中间间隔符号用下划线“_”标识，如：

GL8_BIW_123_T2.0_SPCC_V1.0。

上述名称含义：项目代号或者车型代号：GL8，子组代号：白车身，零件号：车上的零件，零件编号为 123；厚度：厚度为 2mm；材料：材料为 SPCC，零件模型版本号：V1.0。

- e) 对于拼接件，或由不同的厚度和材料形成的挤压件，应按不同的板厚和材料特性分成不同的 component，component 的命名同（3）中方式。
- f) 对于浇铸/压铸件，在采用板壳单元建模时，有限元模型需要能够表现出不同位置的厚度信息，

可以通过在对应位置直接给单元节点赋厚度（也叫节点厚度），也可以根据厚度的不同将浇铸/压铸件分成不同的 component，component 的命名同（3）中方式。

- g) 在白车身总成和开闭机构总成中都有焊点和粘胶，焊点有两层、三层以及四层焊，可按以下方式创建 component：

SPOTX _ XXXXX，表示焊点层数和总成以及位置。

如前车门上的两层焊，命名为 SPOT2_closure_front_door。

8.2.1 单元类型

整车碰撞仿真分析中用到的单元类型包括 1D 单元、2D 单元及 3D 单元，具体单元类型及应用对象如表 8。

表8. 单元类型及应用对象

单元维度	单元类型	单元编号	应用对象
1D 单元	梁单元	Beam161	螺栓
	弹簧阻尼单元	COMBI165	弹簧、减震器等构件
	质量单元	Mass166	变形可忽略的小构件
	刚性单元	-	焊点
2D 单元	板壳单元	Shell163	白车身、开闭机构、底盘等钣金件。

3D 单元	实体单元	Solid164	发动机、变速箱、引擎冷却箱和刹车片等刚度较大构件。
-------	------	----------	---------------------------

8.2.2 单元尺寸

整车碰撞仿真分析中各部位单元尺寸如表 9。

表9. 不同部位单元尺寸

组件	零件/component	标准单元长度 TEL (mm)	最小单元边长 MEL (mm)
Front & Rear ends	Bumper Beam	6	2
	Crush Cans	6	2
	Initiators (Cans & Longits)	6	2
	Side members / Longitudinals	6	2
	Structural members (panels)	6	2
	Dash / Dash Cross Member	6	2
	Bonnet	6	2
	Outer skins	6	2
Main Floor	Floor panels	6	2
	Structural members (longitudinals and cross-members)	6	2
	Heel board	6	2
Body Upper Structure	Body side	6	2
	A, B, C, and D posts	6	2
	siil	6	2
	Cantrails	6	2
	Roof bows	6	2
Roof	Panels	6	2
	Cross Members	6	2

8.2.3 1D 单元建模

8.2.3.1 Beam 单元

车体模型中的车桥、推力杆、连接轴销及焊点等采用 Beam 单元建模，Beam 建模的一般原则如下：

- 在建立梁单元之前，首先确定梁单元坐标与全局坐标的关系，所有单元坐标系满足右手定则；
- 明确梁轴方向关键点和梁轴的方向；
- 为保持力的作用点，梁线尽可能取在截面的形心处，当截面形式为变截面时，为保持梁线的线性关系，可通过梁截面偏置功能来实现；
- 梁单元必须定义截面形状尺寸（或直接定义截面面积、转动惯性矩）、偏置信息等；
- 使用梁单元连接壳单元时，梁单元与刚性单元至少相隔一排单元以避免过约束，如图 3 示意。

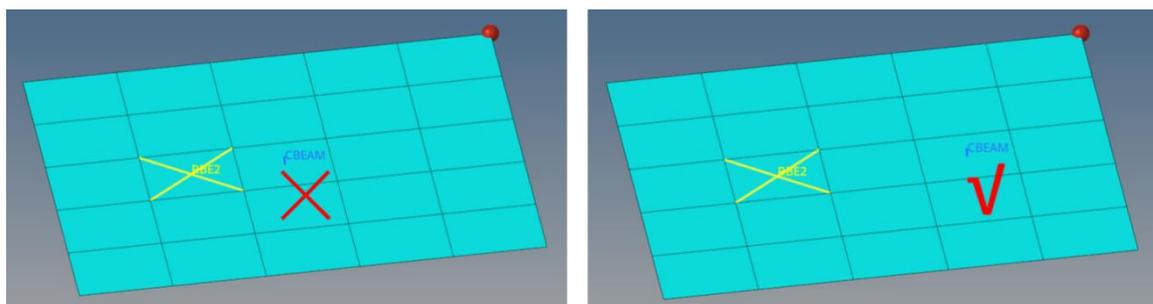


图3. 梁单元与刚性单元连接位置分布

8.2.3.2 Rigid 单元

模型中采用刚性单元进行连接时，需遵守以下编制原则：

- a) 不能存在自由端；
- b) 不能存在刚性环，即其中的节点不能既是主(master)点又是从点(slave)；
- c) 两个刚性单元之间不能出现公共节点；
- d) 不能用刚性单元连接刚性单元或者刚体，不能将刚性单元连接到已经定义约束的节点上；
- e) 刚性焊点单元要与所连接的表面正交。

8.2.3.3 Mass 单元

采用质量单元建模时遵守的原则如下：

- a) 内饰的质量要用尽量多的质量点附加在所依附的部件上；
- b) 座椅的质量，用集中质量代替，集中质量要位于重心上，并用刚性单元连接到座椅所在位置的4个锚点上(anchor point)。

8.2.4 2D 单元建模

车身钣金件采用抽取中面的方式进行2D板壳单元建模，钣金件建模方式和需要遵守的原则如下：

- a) 在零件中面处进行建模，如果提供的几何数据不在中面位置，则应将其调整至中面位置；
- b) 使用线性壳单元(3节点或4节点)对零件进行网格划分；
- c) 壳单元的法线方向应统一；
- d) 三角形单元的比例要小于5%；
- a) 单元的网格线要与几何的边界正交，即网格线与截面平行或垂直，如图4示意；

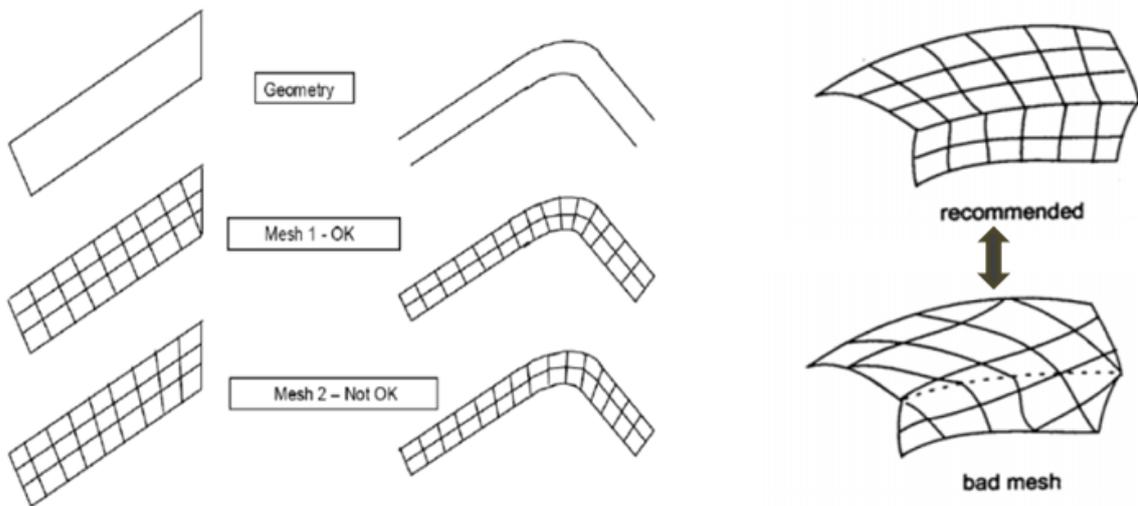


图4. 正交化网格和非正交化网格

- b) 尽量避免多个三角形单元连在相同的节点上，如图5示意；

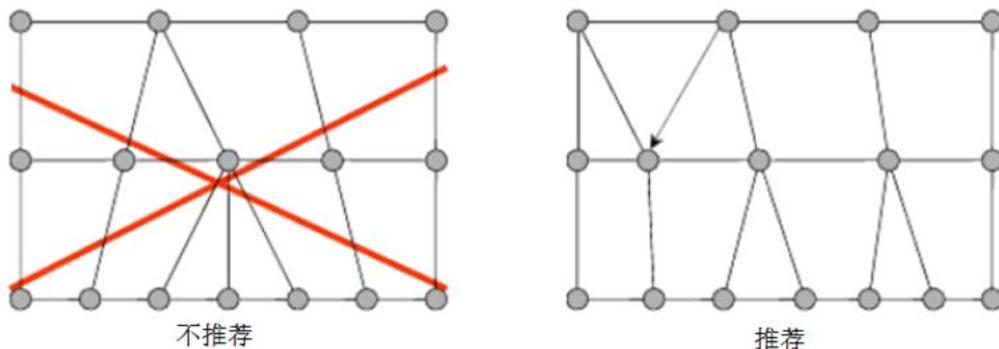


图5. 三角形单元分布

- c) 避免单排单元独立出现，至少划分两排单元，若需要焊接，则必须划分三排，而且焊点要布在中间的单元上，如图 6 示意。

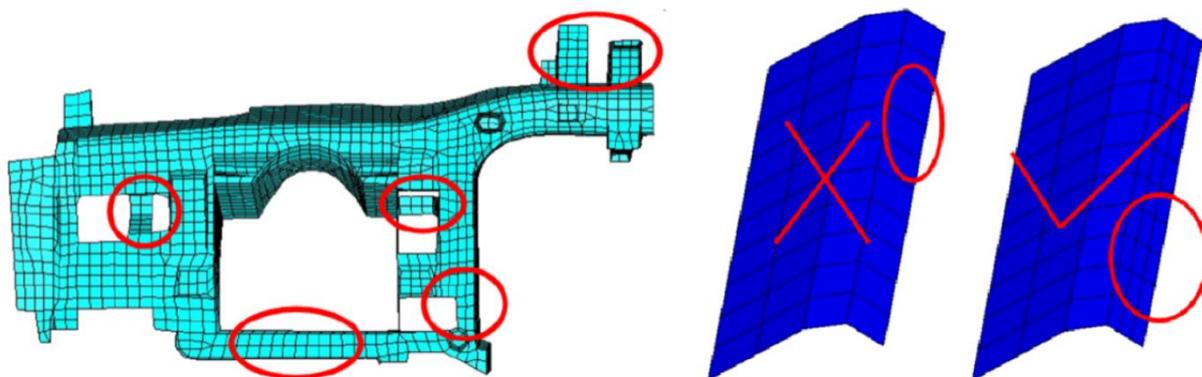


图6. 避免单排单元

8.2.5 3D 单元建模

车体模型中实体单元的建模方式和需要遵守的原则如下：

- 单元采用一阶线性体单元（4 节点四面体，6 节点五面体和 8 节点六面体）；
- 推荐使用 8 节点六面体单元，尽量避免使用四面体，五面体单元，在关键区域只能使用六面体单元；
- 若在非重要部分使用非六面体单元，要对称使用；
- 避免单排单元，相对应的截面至少划分 2 排单元，如图 7 示意；

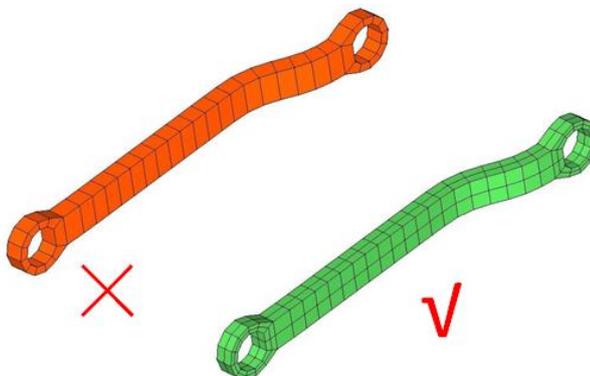


图7. 体单元划分示意

- e) 用体单元模拟截面时，至少要划分三层单元以避免弯曲载荷下影响计算结果精度，如图 8 示意。

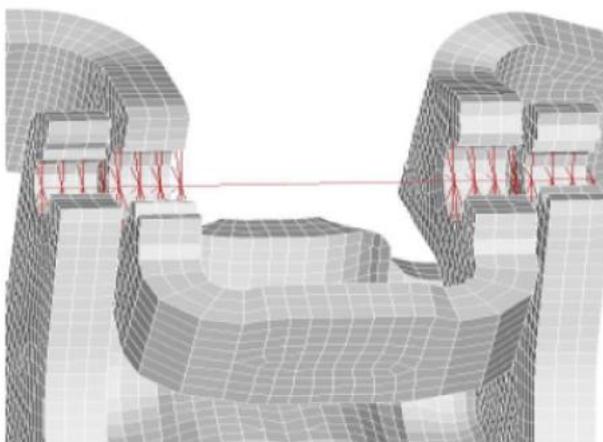


图8. 三排实体单元划分示意

8.3 关键部位/部件建模

8.3.1 孔建模

在对孔进行建模之前，首先要弄清楚孔的用途，比如定位孔，螺栓孔等。对于用于连接的孔，还要弄清楚螺栓，垫片，螺帽等的尺寸以便于划分网格和定义连接，孔的参数定义如图9。

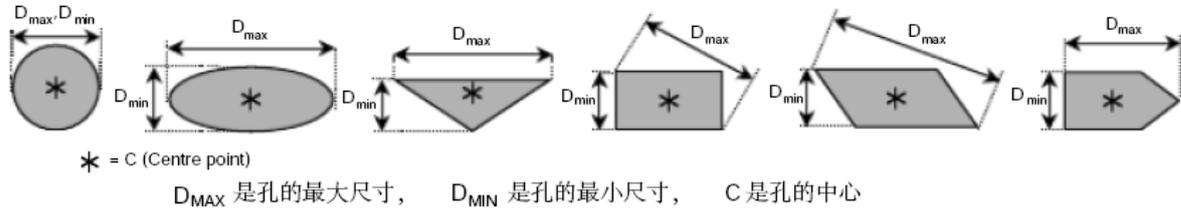


图9. 孔的参数定义

对于直径小于 5mm 的孔可以不予保留，填满即可；大于 5mm 的孔则必须保留，并根据用途划分网格；直径大于 30mm 的孔一般不进行特殊处理，周围采用标准尺寸划分，孔的处理方法如表 10。

表10. 孔的处理方法

孔直径范围 (mm)	建模处理方法	孔周围节点数	Washer 层数	半径方向 Washer 层尺寸 (mm)
0 - 5.0	填孔，在中心加几何点	-	-	-
5 - 7.5	不采用 Washer	4	-	-
7.5 - 9.5	孔周围采用 Washer 划分	6	1	~ 3.75
9.5 - 13.0	孔周围采用 Washer 划分	8	2	~ 3.75 - 4.0
13 - 17.0	孔周围采用 Washer 划分	10	1	~ 3.75
17 - 21.0	孔周围采用 Washer 划分	12	1	~ 3.75
21 - 30.0	孔周围采用 Washer 划分	>= 14	1	~ 5.0
> 30	不进行特殊处	-	-	-

不同孔尺寸的建模示例如图 10。

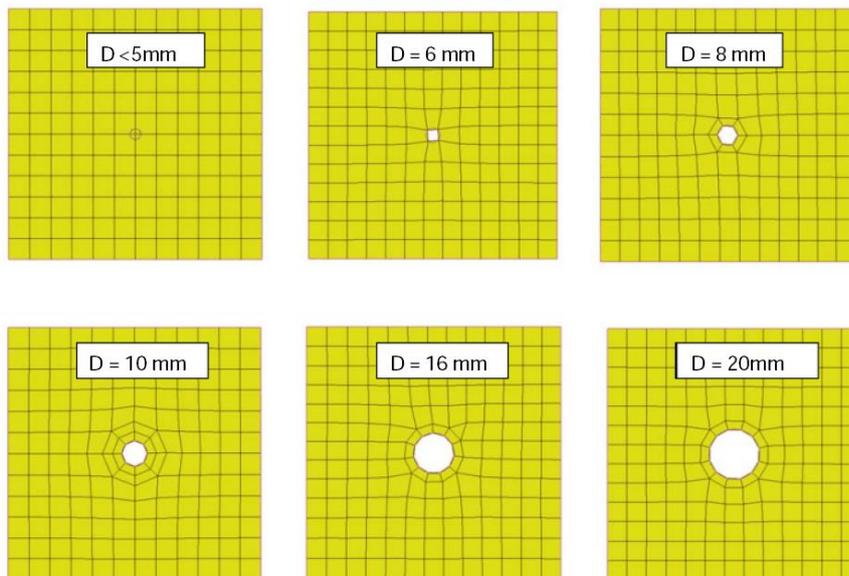


图10. 不同孔尺寸的建模示意

8.3.1.1 螺栓孔

对于采用螺栓连接的孔，比如动力总成悬置安装孔，座椅安装孔等，螺栓孔孔周上需要有6个或以上的节点，并需要在孔周围划分一排单元作为孔的外圈来模拟垫片或者螺栓头的尺寸，具体尺寸与垫片的尺寸一致，如图11示意。

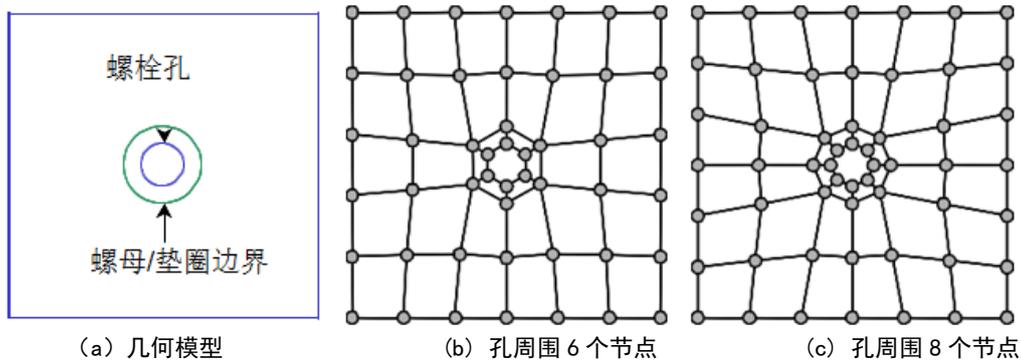


图11. 螺栓孔网格划分示意

如果垫圈尺寸大于 $1.8 \times D_{min}$ ，可以在垫圈的内外边界之间使用一层以上的单元。如果螺栓连接的垫圈外周尺寸、距离以及螺母等都未知，可使用一个圆进行投影，圆的中心位于C点，直径为 $1.8 \times D_{min}$ 。

为了在装配时能够快速找到螺栓孔，建模时使用刚性单元将螺栓孔的中心点C与螺栓和螺母/垫圈的外周节点进行连接，如图12。

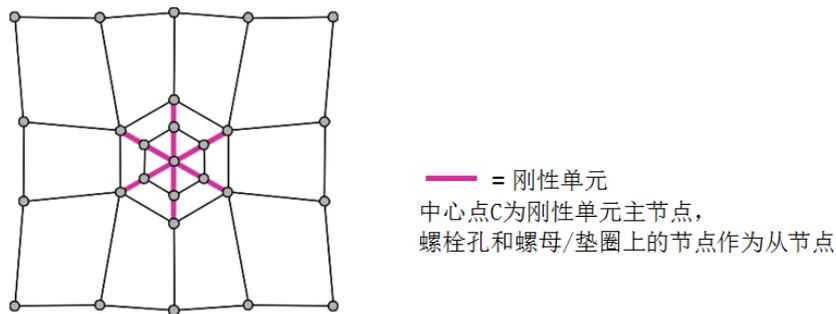


图12. 螺栓孔刚性连接

8.3.1.2 铆接孔

模型中的铆接孔，不进行建模处理，在网格划分时将孔填充并进行网格划分，如图13。

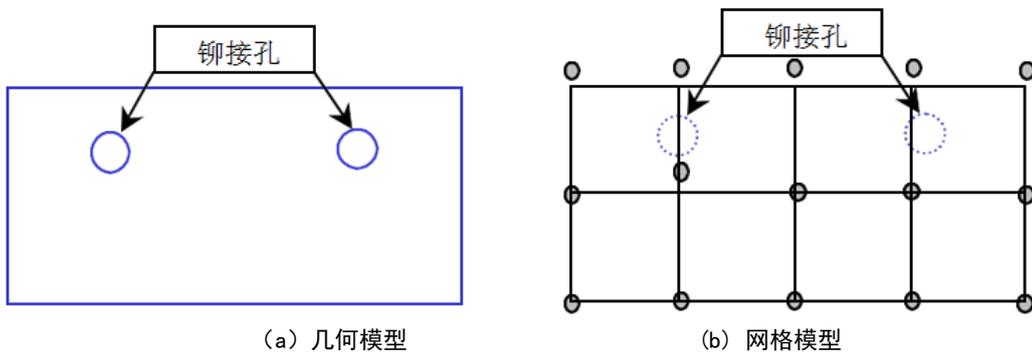


图13. 铆接孔网格划分示意

8.3.1.3 椭圆孔

对于椭圆孔结构，椭圆孔的圆弧过渡区域的直径在6-20mm之间，圆弧区域要布置两个单元，小于6毫米，则布置一个单元，见图14。

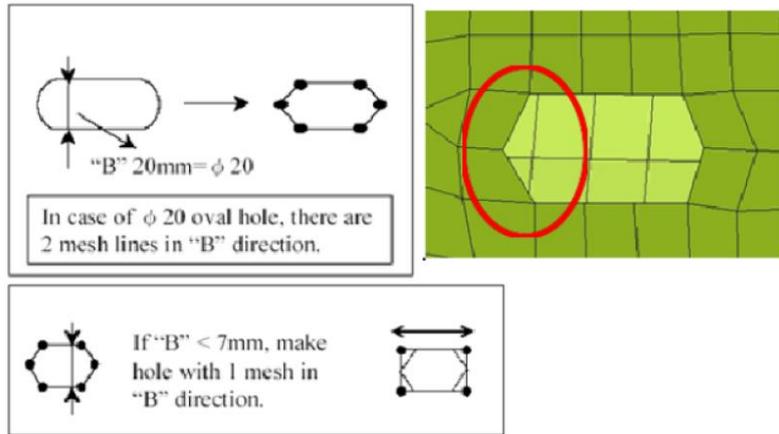


图14. 椭圆孔的划分

8.3.1.4 其它孔

除了螺栓孔和铆接孔，其它孔如果其最大直径 $D_{max} > 0.8 \times TEL$ （标准单元边长），则应对孔进行建模处理。建模时应在孔周上至少分布 6 个节点，如果孔周单元尺寸小于 MEL（最小单元边长），也允许在孔周使用 4 个节点。

典型零件中对螺栓孔和一般孔的处理方式如图 15 示意。

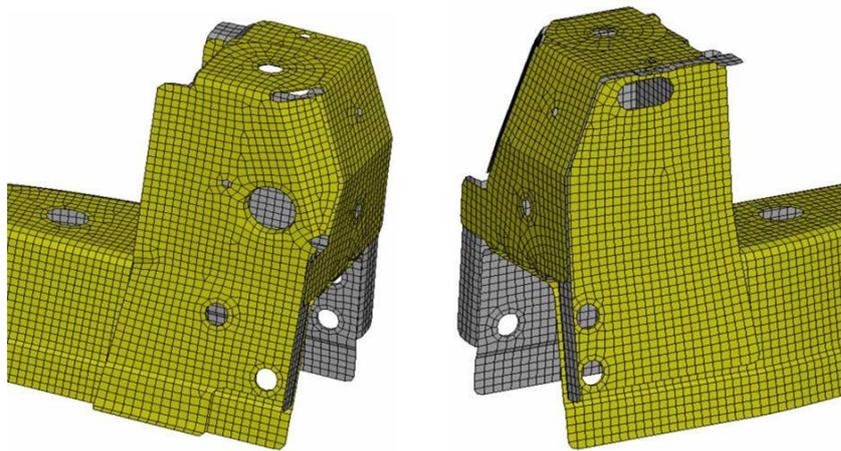
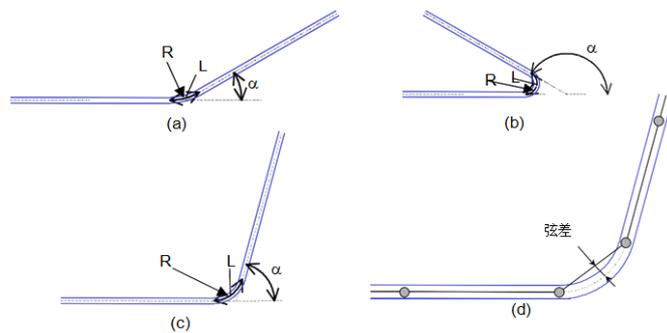


图15. 典型螺栓孔和一般孔的建模方式

8.3.2 倒角和曲率圆弧建模

倒角能够起到加强筋和降低应力集中的作用，为了更好反映局部的刚度和应力状况，需要在倒角处有足够多的单元数量。倒角的圆弧半径 R 、弧长 L 、弧角 α 及弦差定义如图 16 示意。



(a)、(b)和(c)：倒角半径 R ，弧长 L 和弧角定义 (d)：弦差定义

图16. 倒角和曲率圆弧相关定义

- a) 对于弦长 $>$ MEL（最小单元边长），并且角度 $<20^\circ$ 的倒角，不作任何简化处理。
- b) 对于弦长 $<$ MEL，并且角度 $>20^\circ$ 的倒角，应将倒角从几何中去掉，这将创建一个“尖角”，如图 17a

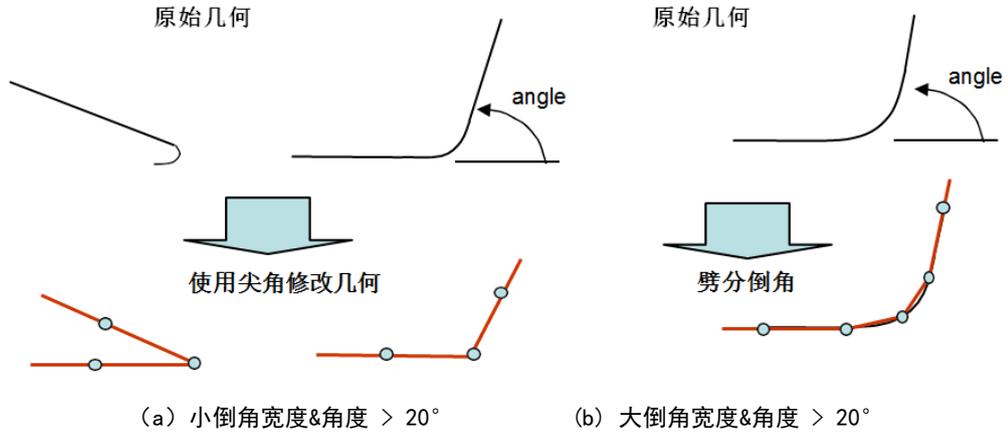


图17. 小倒角宽度和大倒角宽度的模拟

- c) 如果倒角的弦长 $>$ MEL，并且角度 $>20^\circ$ ，应对倒角进行劈分，使单元长度 $>$ MEL，如图 17b；如果劈分后单元尺寸不满足 MEL，则允许沿着法兰面或者墙体对端部节点进行移动，最大允许移动 1mm，如图 18 所示。

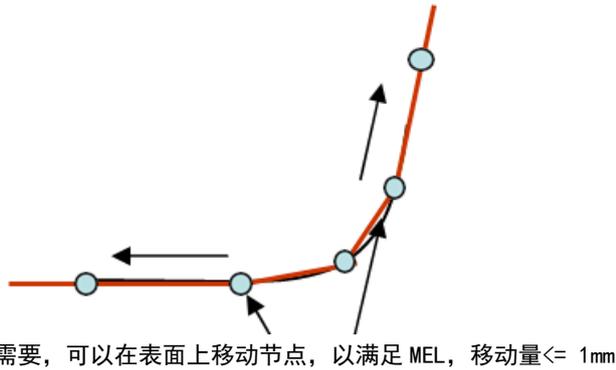


图18. 允许移动节点来满足 MEL

- d) 沿倒角的长度方向，单元长度应趋于 TEL（标准单元边长）。典型零件倒角处理方式如图 19 示意。

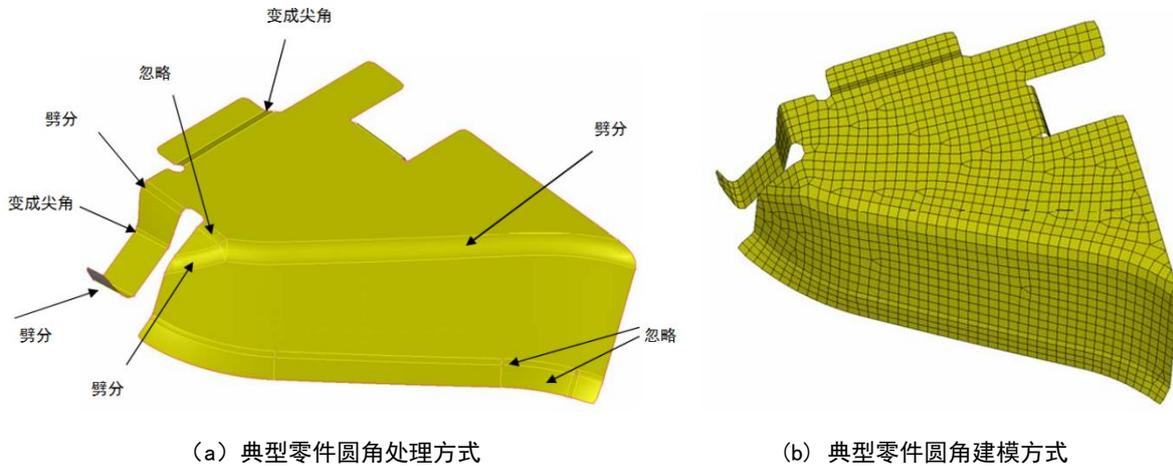


图19. 典型零件的倒角处理

8.3.3 法兰建模

法兰是加强筋或者用于不同连接操作的搭接面，通常用于焊点连接。

- a) 焊点法兰进行建模，不管 TEL 多大，在法兰的宽度方向上应至少有 3 层单元，但单元的边长应尽量不小于 5mm，且法兰的平面部分应与 CAD 几何贴合，如图 20 示意。

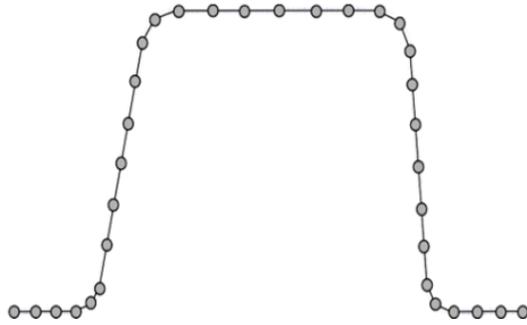


图20. 法兰网格划分

- b) 对于宽度 $< MEL$ 的非焊接法兰，建模方式如图 21 所示。

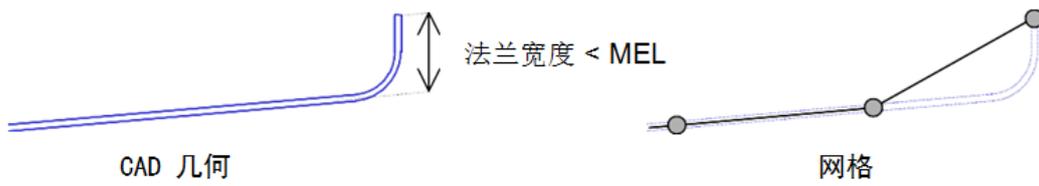


图21. 宽度小于最小单元长度 (MEL) 的法兰建模

- c) 如果法兰的宽度有适度的变化，则希望沿法兰长度保持相同的单元行数，但单元长度仍应大于 MEL。

8.3.4 轮胎建模

轮胎采用板壳单元建模，并将其与轮毂边上的对应节点逐一耦合在一起，为了能够模拟轮胎内部充气的情况，需要在轮胎内部建立一个气囊模型，气囊模型需要单独定义一个封闭的单元组合，具体建模细节本样例不做详细说明，建模效果如图 22 示意。

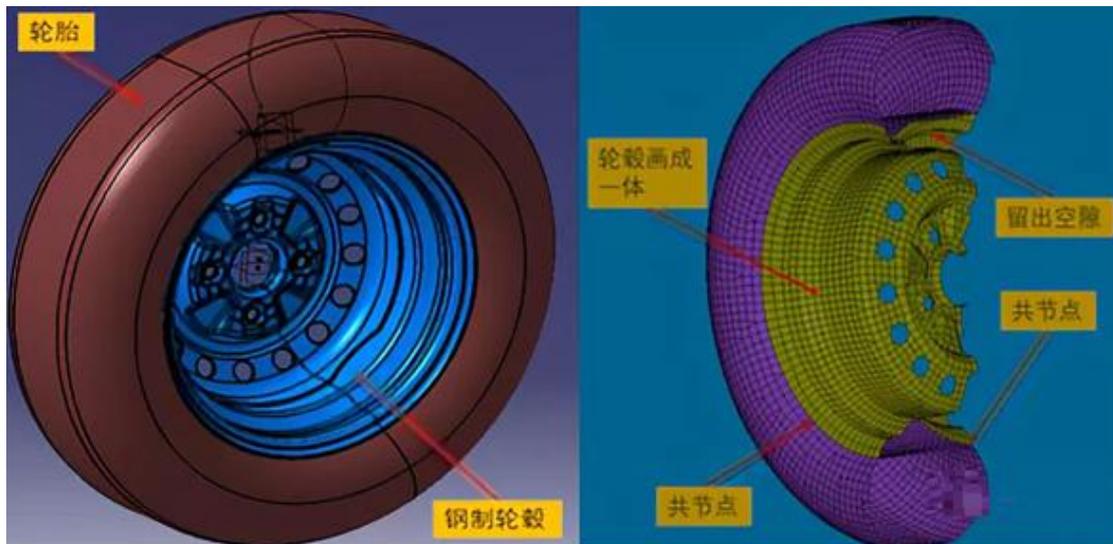


图22. 轮胎网格模型示意

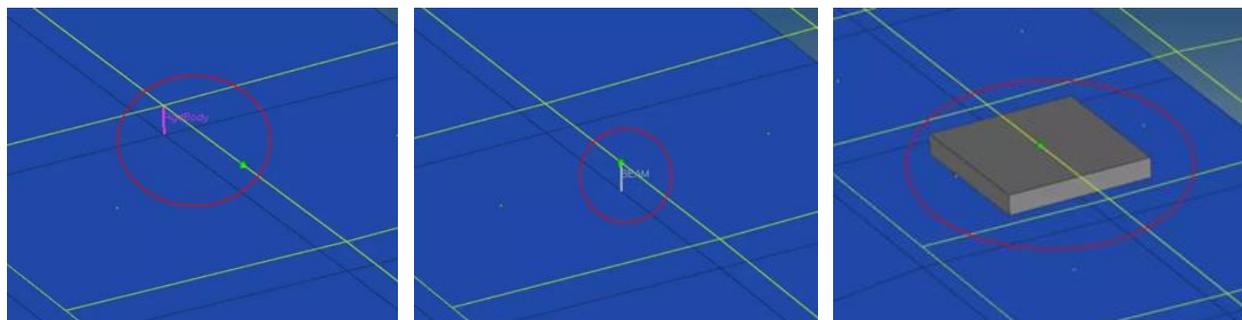
8.3.5 其它关键部件/部件建模

在整车碰撞建模中还包括许多其它特征形式，如包边、肋板、拼接件、浇铸件或压铸件、挤制件、动力总成系统、转向系统、悬挂系统、制动系统等建模方式，本规范样例不做细致说明。

8.4 连接关系建立

8.4.1 点焊连接

整车模型中的点焊一般采用刚性模型、梁模型和实体模型方式建模，如图 23 示意。



(a) 刚性梁点焊

(b) 变形梁点焊

(c) 实体模型点焊

图23. 点焊模型示意

在焊点建模之前，需设置焊点建模标准，如：

- a) 最大厚度=10.0 mm;
- b) 边缘距离=3.0 mm;
- c) 角度公差=30° 等。

点焊建模原则如下：

- a) 焊点单元用 HyperMesh 中的 Connctors 命令建立，便于更新和修改；
- b) 焊点单元要正交于所要连接的表面；
- c) 焊点单元的长度为所要连接的两个部件厚度之和的一半；

8.4.2 焊缝连接

焊缝连接建模方式，本规范样例不做细致说明。

8.4.3 粘接连接

粘接连接建模方式，本规范样例不做细致说明。

8.4.4 其它连接

铆钉、螺栓、铰接及其它连接建模方式，本规范样例不做细致说明。

8.5 材料属性设置

8.5.1 材料设置

依据表 7 中的零件材料牌号信息，给整车模型添加合适的材料属性。其中，构成车身的各钣金构件的材料主要为的、低碳钢板，高速碰撞时将产生较大的弹塑性变形，材料属性设置时需要输入相应的材料参数及应力应变曲线。

对于发动机、变速箱、引擎冷却箱和刹车片等零件，为加快求解效率，可用刚性材料替代；轮胎模型可采用弹性材料代替。

8.5.2 属性设置

依据表 8 给整车网格模型指定合适的单元类型，并依据表 6 中的零件的结构属性信息、厚度信息、质量和质心信息、弹簧等，给整车网格模型设置合理的属性信息，包括壳单元的厚度属性信息、梁单元的截面信息、弹簧-阻尼单元的刚度和阻尼信息、质量单元的质量和惯性矩信息、刚性单元的刚度信息等。

8.6 模型检查

8.6.1 网格连续性与重复检查

网格连续性和重复性检查内容包括：

- 零件应全部被网格化，即模型中不存在未划网格的区域；
- 进行“自由边”检查，以确定单元网格中没有“裂缝”或“孔洞”存在；
- 干涉检查或穿透检查，即模型中不存在干涉或穿透；
- 进行“壳单元法向”检查，以确定每个 Component 内的壳单元法向一致；
- 节点和单元重复性检查，模型中不应存在重复的节点和单元；
- 存在上述问题时，对网格模型进行修复。

8.6.2 网格质量检查

整车进行网格质量检查内容及要求如表 11。通过网格质量检查，对质量较差的网格进行修改或者重划，从而得到更好的网格质量。

表11. 单元质量要求

单元类型	质量检查	目标范围	要求	最低要求	备注
四边形壳单元	Aspect Ratio	1-2	< 4	< 6	
	Warpage Angle (deg.)	< 5	< 15	< 30	
	Skew Angle (deg.)	< 20	< 45	< 60	
	Jacobian	> 0.8	> 0.6	> 0.4	
	Minimum Angle (deg.)	70 - 90	> 45	> 30	
	Maximum Angle (deg.)	90 - 110	< 135	< 150	
	Element side length (mm)	不小于 MEL	不小于 MEL	不小于 MEL	不允许违反
三角形壳单元	Skew Angle (deg.)	< 20	< 45	< 70	
	Shape Factor	0.5 - 1.0	> 0.3	> 0.15	
	Minimum Angle (deg.)	50 - 60	> 35	> 20	
	Maximum Angle (deg.)	60 - 80	< 110	< 140	
	Element side length (mm)	不小于 MEL	不小于 MEL	不小于 MEL	不允许违反
	整个模型中三角形单元不允许超过总单元数的 5%；每个部件中三角形单元不能超过该部件单元的 10%。				
六面体单元	Aspect Ratio	1-2	< 5	< 6	
	Warpage Angle (deg.)	< 5	< 20	< 30	
	Minimum Angle (deg.)	70 - 90	> 45	> 30	
	Maximum Angle (deg.)	90 - 110	< 120	< 140	
	Element side length (mm)	不小于 MEL	不小于 MEL	不小于 MEL	不允许违反
四面体单元	Aspect Ratio	1-2	< 5	< 6	
	Warpage Angle (deg.)	< 5	< 20	< 30	
	Minimum Angle (deg.)	50 - 60	> 35	> 20	
	Maximum Angle (deg.)	60 - 80	< 100	< 120	
	Element side length (mm)	不小于 MEL	不小于 MEL	不小于 MEL	不允许违反

8.6.3 材料属性及整车质心与质量信息检查

材料属性及整车质心与质量信息检查内容包括：

- 检查模型中是否存在“无材料、无属性”的单元；
- 检查单元材料信息是否与设计数据一致；
- 检查模型单元属性信息是否与设计数据一致，包括壳单元的厚度属性信息、梁单元的截面信息、弹簧-阻尼单元的刚度和阻尼信息、质量单元的质量和惯性矩信息、刚性单元的刚度信息等；

- d) 当上述内容与设计数据不一致时，对模型的单元属性进行修改，使其与设计数据一致。其中，整车模型质量和质心位置与设计数据不一致时，可通过增加配重、增加集中质量以及改变刚体的惯性属性等方式进行质量分布的调整。如发动机的质量可通过改变其惯性属性来实现，水箱中的冷却液、油箱中的汽油等则可作为分布质量施加等。

9 碰撞模型建立

9.1 壁障和地面建立

正面碰撞壁障采用刚性墙模拟，试验地面才采用性地面模拟。其中，刚性墙宽度不小于 3m，高度不小于 1.5m，刚性墙表面应铅垂，其法线应与车辆直线行驶方向成 0° 夹角，刚性墙与汽车前端的距离为 5cm。

刚性墙和刚性地面采用壳单元 SHELL163 壳单元建模，材料类型为刚性体模型，单元实常数设置为 1mm。

正面 40%偏置碰撞和侧碰壁障建模方式，本规范样例未做细致说明。

9.2 整车碰撞模型建立

9.2.1 正面 100%碰撞仿真模型建立

将整车模型与故障刚性壁和刚性地面装配在一起，建立整车正面 100%碰撞仿真模型，具体过程本样例不做详细描述。

9.2.2 正面 40%偏置碰撞仿真模型建立

整车正面 40%偏置碰撞仿真模型（可采用蜂窝铝壁障仿真模型），多为仿真供应商提供，请参考相关手册，本规范样例将不做细致说明。

9.2.3 侧面移动壁障碰撞仿真模型建立

侧面移动壁障碰撞仿真模型，多为仿真供应商提供，请参考相关手册，本规范样例将不做细致说明。

9.3 接触定义

整车自身接触包括自身部件相互接触和焊点与板件之间接触，采用软件的自动接触方式自动创建；整车与刚性壁障、汽车轮胎与地面之间设置了刚性墙接触，其接触关系与摩擦系数设置如表 12。

表12. 接触设置

相互接触部件	接触方式	摩擦系数
整车自身接触	Automatic Single Surface	静摩擦：0.15/动摩擦：0.1
整车与刚性墙	Rigid Wall	0.2
轮胎与地面	Rigid Wall	0.2

10 初始条件及边界条件

10.1 初始条件

根据整车碰撞工况，汽车整车碰撞的初始条件包括：

- 正面 100%碰撞仿真车速为 50km/h，碰撞角为 0°，方向沿 X 轴负方向指向刚性墙；
- 正面 40%偏置碰撞仿真车速为 50km/h，其碰撞角度为 0°，方向沿 X 轴负方向指向偏置墙；
- 侧面移动壁障碰撞仿真车速为 50km/h，其碰撞角为 90°。

同时，需要分析中需要考虑重力加速度对计算结果的影响，对整车模型施加铅垂向下值为 9810mm/s² 的重力加速度。

10.2 边界约束

- 正面 100%碰撞仿真分析中，在刚性墙和地面实行全约束；
- 正面 40%偏置碰撞仿真分析中，在刚性墙和地面实行全约束；
- 在偏置碰撞仿真分析中，在相应位置施加相应的约束。

11 求解设置

11.1 接触控制

主要控制接触界面穿透量、接触算法、接触刚度系数，基于前处理 HyperMesh 软件和 LS-DYNA 求解器，接触方式如表 12，接触刚度 SLSFAC 设置为 0.1，刚性墙惩罚函数因子系数设置为 1.0，如图 24。

* CONTROL_CONTACT							
[SLSFAC]	[RWPNAL]	[ISLCHK]	[SHLTHK]	[PENOPT]	[THKCHG]	[ORIEN]	[ENMASS]
0.100	1.000	1	0	1	0	1	0
[USRSTR]	[USRFRC]	[NSBCS]	[INTERM]	[XPENE]	[SSTHK]	[ECDT]	[TIEDPR]
0	0	10	0	4.000	0	0	0

图24. 接触控制设置

11.2 hourglass 控制

基于前处理 HyperMesh 软件和 LS-DYNA 求解器，选用弹性刚度的 Flanagan-Belytschko 积分 hourglass 控制类型 (IHQ=4)，全局刚度 QH 设置为 0.05，如图 25。

* CONTROL_HOURLGLASS	
[IHQ]	[QH]
4	0.050

图25. hourglass 控制设置

11.3 能量控制

基于前处理 HyperMesh 软件和 LS-DYNA 求解器，在能量控制菜单中将 hourglass 能量 HGEN、阻碍能量耗散 RWEN、滑动接触界面能量 SLNTEN、Rayleigh 能量 RYLEN 全部设置为 2，确保程序对这些能量进行计算，如图 26。

* CONTROL_ENERGY			
[HGEN]	[RWEN]	[SLNTEN]	[RYLEN]
2	2	2	2

图26. 能量控制设置

11.4 壳单元与实体单元控制

为保证碰撞中壳单元正常发生应变响应，基于前处理 HyperMesh 软件和 LS-DYNA 求解器，在 CONTROL_SHELL 中对壳单元翘曲角度 WRPANG、自动挑选退化四边形单元 ESORT、缺省壳单元理论 THEORY、Belytschko_Tsay 单元公式翘曲刚度选项 BWC、平面应力塑性选项 MITER 进行设置，如图 27。

* CONTROL_SHELL							
[WRPANG]	[ESORT]	[IRNXX]	[ISTUPD]	[THEORY]	[BWC]	[MITER]	[PROJ]
20.000	0	-1	0	2	2	1	0

图27. 壳单元控制设置

对于整车模型中的实体单元，控制参数设置，如图 28。

* CONTROL_SOLID			
[ESORT]	[FMATRX]	[NIPTETS]	[SWLOCL]
0	1	4	2

图28. 实体单元控制设置

11.5 计算时间控制及时间步长控制

整车碰撞定义求解终止时间为 100-300ms，时间步长设为 $1e^{-6}$ s。基于前处理 HyperMesh 软件和 LS-DYNA 求解器，其设置如图 29、图 30。

* CONTROL_TERMINATION			
[ENDTIM]	[ENDCYC]	[DTMIN]	[ENDENG]
0.150	0	0.000	0.000

图29. 计算时间控制

* CONTROL _ T I M E S T E P				
[DTINIT]	[TSSFAC]	[ISDO]	[TSLIMIT]	[DT2MS]
0.000	0.900	0	0.000	1.000e-06

图30. 时间步长控制

11.6 结果输出控制

整车碰撞仿真输出结果类型包括动画输出、部件材料、总体模型能量及统计、接触反力、输出节点变形、速度、加速度等计算结果信息等。基于前处理 HyperMesh 软件和 LS-DYNA 求解器，输出控制关键字如图 31。

* CONTROL _ O U T P U T							
[NPOPT]	[NEECHO]	[NREFUP]	[IACCOP]	[OPIFS]	[IPNINT]	[IKEDIT]	[IFLUSH]
0	0	0	0	0.000	0	100	5000

图31. 输出控制关键字

其中得到的输出关键字以及对应的含义如表 13。

表13. 输出控制关键字及含义

关键字	含义
DATABASE_GLSTAT	总体统计和能量
DATABASE_NODOUT	节点信息
DATABASE_ELOUT	单元信息
DATABASE_MATSUM	Part 能量信息
DATABASE_RWFORC	刚性墙受力
DATABASE_SECFORC	截面力文件
DATABASE_RCFORC	接触面受力信息
DATABASE_BINARY_D3PLOT	图形输出文件
DATABASE_BINARY_D3DUMP	重启动文件

11.7 K 文件输出及求解

K 文件中要包含整车模型所有信息，具体可以分为 6 部分：整车模型全部网格及节点信息、整车模型全部部件属性信息、全部部件材料信息、整车模型全部连接及接触信息、整车模型全部约束和载荷信息、全部模型控制参数及计算设置信息。

将 K 文件导入到 LS-DYNA 软件中完成求解计算，生成所需的结果文件用以仿真结果分析。

12 结果后处理分析

12.1 正面 100%碰撞仿真分析

正面 100%刚性壁碰撞仿真目的在于检测车辆结构的变形情况及吸能效果，后处理分析时主要从以下几方面考虑。

12.1.1 仿真结果可信性分析

一般通过整车质量增加分析和整车能量变化分析来对计算结果的可信性进行分析。本样例不做详细介绍。

12.1.2 整车质量变化分析

具体分析内容和指标，本样例不做详细介绍。

12.1.3 整车能量变化分析

具体分析内容和指标，本样例不做详细介绍。

12.1.4 整车变形阶段性分析

具体分析内容和指标，本样例不做详细介绍。

12.1.5 整车速度及加速度分析

具体分析内容和指标，本样例不做详细介绍。

12.1.6 关键部件变形分析

关键部件变形分析包括保险杠变形分析、前纵梁变形分析、A柱折弯分析、门框变形分析、前围板侵入分析等，具体分析内容和分析指标，本样例不做详细介绍。

12.1.7 关键部件吸能分析

关键吸能部件主要有前纵梁、保险杠、前横梁、副车架、轮胎等，具体分析内容和指标，本样例不做详细介绍。

12.1.8 乘员舱变形分析

本样例对此部分内容不做详细介绍。

12.2 正面40%偏置碰撞仿真分析

本样例对此部分内容不做详细介绍。

12.3 侧面移动壁障碰撞仿真分析

本样例对此部分内容不做详细介绍。

13 计算报告

仿真报告模板可参考内容如附表7。

13.1 报告内容

针对具体分析对象、分析目的、分析问题编写有限元分析报告，报告编写内容至少应包括以下方面：

- a) 任务概述；
- b) 分析过程；
- c) 分析结论。

13.2 任务概述

对整车碰撞分析问题背景进行介绍，并说明报告所采取的分析类型和拟关注的分析结果。

13.3 引用文件

将整车碰撞分析过程中参考的标准、规范及其它引用文件进行描述，并给出引用文件的作者、名称和时间。

13.4 分析参数

对整车碰撞分析中的参数进行介绍，包括三维几何模型参数、总成/零部件之间的连接参数、整车/总成/零部件的质量/质心参数等。

13.5 分析过程

对整车碰撞分析的整个过程进行描述，包括模型简化、网格划分、连接创建、模型统计情况、材料属性、初始条件和边界条件、求解设置等，应对上述逐个进行必要的说明。

13.6 后处理分析

对整车碰撞后处理结果进行分析，并给出典型的图表结果，如变形云图、速度加速度曲线、能量变化曲线等，图表应简明、易懂，图表中不应有无关的信息。

13.7 结论

根据给出的图表结果，总结分析结论，并给出客观、综合评定。

13.8 优化建议

报告中应根据分析结果，给出优化建议和设计改良方案。

第三部分：后序

仿真分析技术是国外先进制造工业中不可或缺的手段，它不仅服务于产品设计和性能优化过程，还在制造工艺设计、自动化工厂设计中起到重要作用；在产品型谱规划、产品更新换代和升级过程中也是强有力的辅助工具，对产品竞争力的创建和保持起到关键作用。

中国已经成为制造业大国，在我国制造业由大变强、转型升级的过程中，仿真分析技术也为制造业升级提供了强大的创新利器。但是，由于种种原因，仿真技术在中国的应用仍不够广泛和深入。

“质量提升，标准先行”，仿真分析规范是企业仿真技术水平的重要体现，要推进中国仿真技术的协调、健康发展，首当其冲要加强技术标准基础研究和制定工作，并加强其在仿真领域或其他相关领域的认可和推广，而仿真联盟有义务和责任引领并推广数字仿真领域行业规范标准的制定工作。

为此，在联盟第一届第二次会议上进行了仿真规范的工作部署，成立了“中国数字仿真联盟仿真规范编制小组”，而仿真规范编制小组不负众望，如期完成了《仿真分析规范编制指南》（V1.0 版）的编制工作。本指南目标并不是为企业制定仿真分析规范，而是建立在对国内外行业标杆企业的仿真分析规范研究的基础上，通过制定“仿真分析规范编制指南”的方式，为企业提供制定仿真分析规范的方法论，让企业能够知道如何才能建立一个完整的、有效的、先进的仿真分析规范。

同时，由于仿真学科之下专业众多，不可能做出一套放之四海皆准的仿真标准建设指南，而是需要针对不同学科、不同的专业，制定出不同的指南；也不可能依据几家单位力量即可完成，而是需要集联盟单位的力量，共同推进；更不可能是一蹴而就，而是长期发展、循环迭代的过程。为此，仿真分析规范指南的编制和制定工作，将是一件长期工程，需要多单位参与、分阶段、分步骤、分专业进行，而在后续仿真规范指南编制过程中，将会在《仿真分析规范编制指南》（V1.0 版）基础上进行扩充和完善，并会从以下四个方面逐步开展工作：

- 1) 仿真软件应用规范（V1.0 版指南属于此部分内容）；
- 2) 仿真软件开发规范；
- 3) 仿真软件应用实施服务标准；
- 4) 规范理论手册。

同时，由于仿真规范具有强烈的行业和企业特点，为此，后续在仿真规范编制指南制定过程中，除需要充分考虑和吸收国外的先进经验和规范之外，也需要充分考虑和吸收国内及联盟内企业自身的标准和规范。为此，诚邀有志于 CAE 自主产业的单位或个人，积极参与并不断完善《仿真分析规范编制指南》的编制及推广工作，共同推进中国数字仿真各领域的协调、健康发展，增强中国在该领域的创新能力和核心竞争力。

中国数字仿真联盟标准规范部

2020 年 4 月 25 日

附录 A 参考性附表

附表1. SI国际单位制米制

物理量名称	基础单位	
	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
温度	开(尔文)	K
导出单位		
力	牛顿	N
应力	帕	Pa
力矩	牛顿·米	N·m
位移	米	m
速度	米每秒	m/s
密度	千克每立方米	kg/m ³
加速度	米每二次方秒	m/s ²
频率	赫兹	Hz

附表2. 常用单位制毫米制

物理量名称	基础单位	
	单位名称	单位符号
长度	毫米	mm
质量	吨	T
时间	秒	S
温度	开(尔文)、摄氏度	K、 °C
导出单位		
力	牛顿	N
应力	兆帕	MPa (N/mm ²)
力矩	牛顿·米	N·mm
位移	米	Mm
速度	米每秒	m/s
密度	千克每立方米	t/mm ³
加速度	米每二次方秒	mm/s ²
频率	赫兹	Hz

附表3. 某结构曲面特征网格划分推荐表

单元类型	整体网格尺寸 (mm)	曲面弦长 (mm)	推荐单元尺寸 (mm)	过渡单元
二阶四面体	8	0~4	2	1~2
二阶四面体		4~8	2	2~4
二阶四面体			4	2
二阶四面体		>8	8	

附表4. 单元质量检查控制参数

类别	四边形单元	三角形单元	六面体单元	楔形单元	四面体单元
长宽比	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0
翘曲度	≤16 °	-	≤18 °	≤18 °	-
偏斜度	≤60 °	≤60 °	≤60 °	≤60 °	≤60 °
内角	40 °~135 °	20 °~120 °	40 °~135 °	40 °~135 °	20 °~120 °

附表5. XXX结构建模编号规则

系统	总成	ID 区间		
		零件	节点	单元
连接系统	螺栓	1-99	1-999	1-999
	焊点	100-199	1000-9999	1000-9999
底架系统	前端	200-299	10000-99999	10000-99999
	后端	300-399	100000-199999	100000-199999
	筋板	400-499	200000-299999	200000-299999
	底板	500-599	300000-399999	300000-399999
框架系统	侧框	600-699	400000-499999	400000-499999
	端框	700-799	500000-599999	500000-599999
	顶框	800-899	600000-699999	600000-699999
	内筋	900-999	700000-999999	700000-999999
其它系统	其它系统	1000-1999	1000000-1999999	1000000-1999999

附表6. 工作流程表

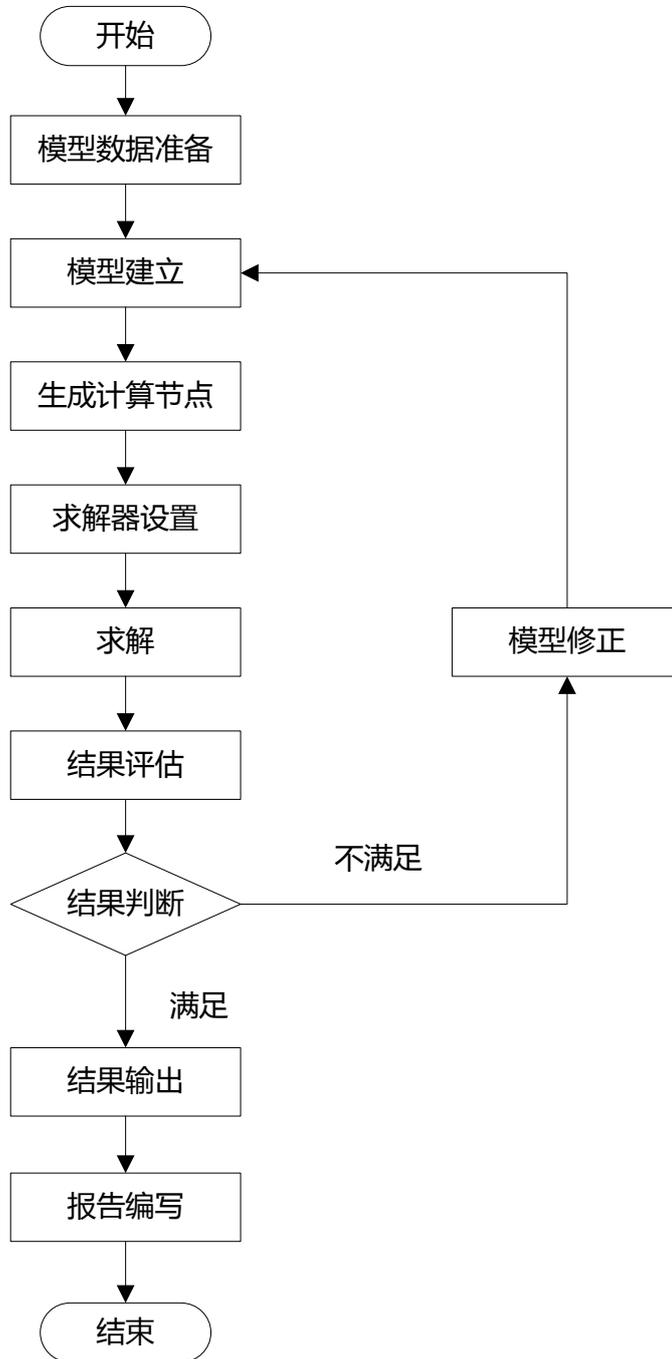
工作任务	工作内容	开始时间	结束时间	文件及输出	负责人
模型数据准备	三维模型文件； 材料数据； 载荷工况数据等。				
仿真模型创建	创建仿真模型				

工作任务	工作内容	开始时间	结束时间	文件及输出	负责人
网格划分	网格划分及质量检查				
载荷及边界条件	载荷及约束施加				
模型检查	仿真分析模型质量检查				
求解及结果后处理	提交求解及结果查看				
仿真试验一致性对比	仿真-试验结果一致性对比				
模型修正	仿真模型误差修正				
报告输出	仿真报告输出				

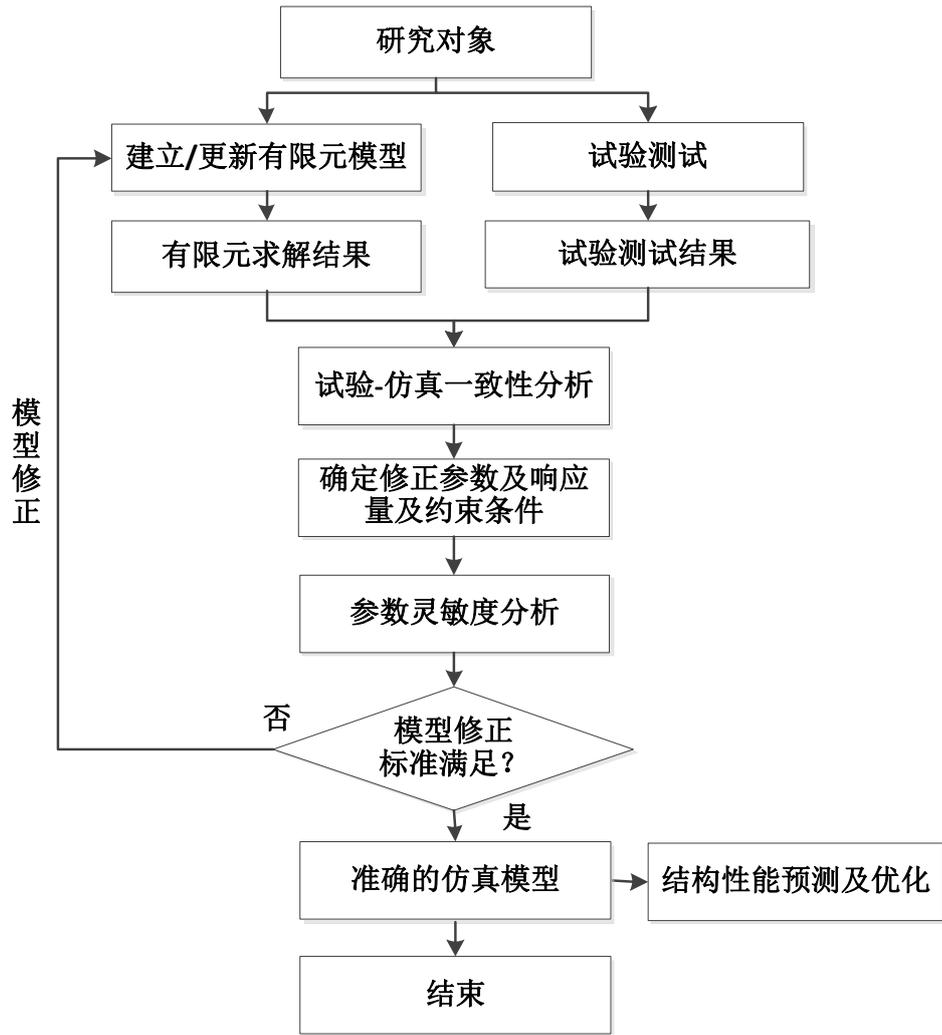
附表7. 仿真报告模板

报告名称	
报告编号	
仿真分析对象	
仿真分析时间	
报告编制人员	
报告校对人员	
报告审核人员	
报告批准人员	
仿真分析软件	软件名称： 软件类型： 版本日期：
仿真模型文件	
仿真分析标准	
仿真分析内容	
仿真模型： a) 边界及约束条件： b) 仿真分析结果： c) 仿真分析结论： d) 优化和建议：	

附录 B 参考性附图



附图1. 仿真分析计算流程图



附图2. 通用有限元模型修正流程图