



当代
杰出青年
科学文库

高端数字样机技术及应用

High End Digital Prototyping Technology and Its Applications

郑 耀 解利军 著



科学出版社

当代杰出青年科学文库

高端数字样机技术及应用

High End Digital Prototyping Technology
and Its Applications

郑 耀 解利军 著

国家杰出青年科学基金项目 (No. 60225009)

国家自然科学基金重点项目 (No. 11432013)

资助

国家自然科学基金重大研究计划 (No. 90405003)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

数字样机技术是使用计算机模型来代替真实物理样机的技术。当前数字样机技术已经从早期侧重于产品的几何建模和性能估算,向复杂精准的数值性能分析和自动优化设计技术转变。基于运用超级计算机进行大规模数值模拟的数字样机技术称为高端数字样机技术。

本书介绍作者的科研团队在高端数字样机系统研发和应用方面的科研实践,涉及其主要支撑技术与具体系统实现;从流体力学、结构力学与多场耦合、燃烧学等三个方面,介绍高端数字样机技术在航空航天等领域的典型应用实践。

本书主要面向航空航天、高速铁路、能源动力、机械制造等行业的数字化设计与分析,以及计算力学等领域,可供高等院校和科研单位相关专业的高年级本科生与研究生科研人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高端数字样机技术及应用 / 郑耀, 解利军著. —北京: 科学出版社, 2015.11

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 978-7-03-045895-7

I. ①高… II. ①郑… ②解… III. ①机械工程—计算机仿真
IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234079 号

责任编辑: 余 丁 陈 静 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张: 19 1/4 插页: 12

字数: 372 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

随着计算机的发展,计算机技术、计算数学和力学交叉而产生的计算力学,致力于研究采用计算机技术求解工程与科学中的力学及相关耦合问题的理论、算法和软件。在国民经济领域,数字化设计和数字化制造等手段的广泛使用使得计算力学已以更大的深度与广度介入到各个工程领域。

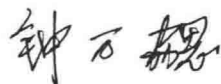
作为将先进的计算力学方法应用到工程设计和科学研究实践中的有效工具,计算力学软件需以面向不同物理问题的求解程序为核心,辅以问题求解所必需的前后处理以及并行计算等支撑模块,利用现代先进的软件工程技术完成各程序模块间的有效集成。与国际计算力学软件相比,我国计算力学软件的发展规模及水平仍然有差距,在整体功能与性能上还无法与国外同类产品竞争。因此,不但重大工程项目中的力学计算几乎全靠进口软件,甚至一般中小设计院所也被进口软件所控制。长期受制于进口软件而没有国家层面上的对策,将使我国在国际经济和科技竞争中,在航空航天、机械制造等行业的实力对比上长期处于落后被动的地位。

作为我国计算力学界的知名学者,郑耀教授长期从事计算力学理论、方法和软件技术的研究。他曾在英国威尔士大学斯旺西分校工程数值方法研究所学习工作了8年时间(该研究所由有限元数值方法研究的先驱者之一辛克维奇教授领导),后在美国国家航空与航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)格伦研究中心任高级研究科学家。2002年回到浙江大学工作后,他敏锐地捕捉到高性能计算技术对计算力学方法与软件的巨大影响,带领一支由力学、计算机、航空航天、机械、土木等具体应用领域研究人员组成的团队,历时13年,面向航空航天领域和高速列车自主设计等重大应用需求,开展高性能自主知识产权计算力学软件——高端数字样机(High End Digital Prototyping, HEDP)系统的研发工作。在大规模数值模拟前后处理及系统集成、大规模复杂空气动力学模拟、结构力学与多物理场耦合计算、空天发动机复杂湍流燃烧模拟等方面取得了一系列原创性成果,其中全过程并行数值模拟平台集成及应用等成果属国内首创、国际领先,软件性能整体上处于国际先进水平。HEDP软件目前已成功推广应用于航空航天等工业部门,减少了相关工业部门对国外软件的依赖,对型号及重点产品研制做出了重要贡献。

该书全面系统地展示了HEDP系统研制及应用成果,深入介绍了HEDP系统所涉及的计算方法与理论、前后处理与并行计算等关键支撑技术,同时还介绍了基于HEDP系统开展的部分典型数值模拟工作。该书包含了作者及其研究团队在计算力

学相关理论与方法研究上的创造性成果，系统性强，内容新颖，且大多数成果已在多领域的数值模拟应用实践中得到验证和完善，对类似软件系统的实现具有很好的参考价值。希望这本书的出版能进一步推动我国计算力学软件的研究和教学，并鼓舞更多的学者树立信心，参与到自主知识产权计算力学软件的研发工作中去，以改变我国计算力学软件行业长期受制于人的不利局面，推动我国工业产品数字化设计水平的提高，为国民经济“转型升级”这一战略目标的实现做出更大的贡献。

中国科学院院士



2015年8月12日于大连

前 言

数字样机技术是使用计算机模型来代替真实物理样机的技术，它能缩短产品开发周期、降低研制成本、提高产品质量，因此装备制造业已开始广泛使用数字样机技术。在常规制造业领域，对数字样机的要求主要强调产品全生命周期的信息数字化，侧重于 CAX 技术和 PLM 技术。而在高端制造领域，如大型复杂装备、航空航天、汽车船舶等，是最早、最深入研究和应用数字样机的领域。当前数字样机技术的应用瓶颈已经不是信息化，我们已经从早期侧重于产品的几何建模和性能估算，向复杂精准的数值性能分析和自动优化设计技术转变。这些领域对产品性能分析所要求的精度很高，其物理结构与运行条件往往非常复杂，通常必须通过大量的物理实验来完成。而这些物理实验往往是高成本、高风险，甚至是在当前技术下还无法实现的，例如航空航天领域的一些飞行条件，它很难在地面用实验来模拟。因此，使用基于力学的数值仿真方法来替代这些物理实验，是数字样机的主要需求之一。

随着精准复杂物理场模拟要求的提出，需要凭借高性能计算机进行大规模数值计算。我们把基于运用超级计算机进行大规模数值模拟的数字样机技术称为高端数字样机(High End Digital Prototyping, HEDP)技术。围绕这类高端数字样机的力学性能仿真需求，本书介绍了高端数字样机技术所涉及的主要支撑技术，并以一个高端数字样机系统为例，介绍了数字样机技术在航空航天等领域的典型应用实践。高端数字样机系统是面向飞行器设计和分析的高端数字样机系统软件，由浙江大学牵头自主研发，已在多个单位多款产品中得到了成功应用。

全书分两大部分，第一部分为第 1~第 4 章，主要介绍高端数字样机的支撑技术，具体包括网格生成技术、可视化技术、虚拟现实技术、系统集成技术，以及 HEDP 系统的具体实现。第二部分为第 5~第 7 章，分别从流体力学、结构力学与多场耦合、燃烧学等三个方面，介绍高端数字样机系统的应用实践，具体实例包括飞行器设计与气动力热估算、高超声速飞行器的概念设计与估算、飞机翼型的流动控制与减阻的数值分析、高速列车气动计算、飞行器多体分离模拟，典型结构的动力学计算、飞行器气动弹性耦合分析、飞行器结构气动力热耦合分析，航空发动机驻涡燃烧室设计分析、航空发动机低排放燃烧室的设计分析、支板型超燃冲压发动机计算分析等。

本书的主要内容涉及作者在浙江大学的科研团队十三年来的科研成果。这些研究工作最初由国家杰出青年科学基金项目的资助而起步，之后陆续得到了国家自然科学基金重大研究计划、国家自然科学基金重点项目、国家安全重大基础研究项目、

国家国防基础科研项目、国家科技支撑计划、国家科技重大专项、中欧航空科技合作项目，以及多项国家自然科学基金面上项目和浙江省自然科学基金项目的资助，在此谨向这些资助单位表示衷心的感谢！

书中涉及的应用实例是与国内航空航天、高速列车、能源动力、工程物理等行业科研院所和高等院校等单位合作的成果。合作单位包括中国航天科工集团第三研究院、中国航天科技集团第十一研究院、中国航天科技集团第一研究院、中国航天科技集团第六研究院、中国航空研究院、中国航空工业集团空气动力研究院、中国航空工业集团沈阳飞机设计研究所、中国航空工业集团燃气涡轮研究院、中国航空工业集团商用航空发动机公司、中国商飞上海飞机设计研究院、北京应用物理与计算数学研究所、西北工业大学、西安交通大学、西南交通大学、南车四方车辆有限公司、中国广东核电集团有限公司等单位。

本书的撰写得到了作者多位同事和学生的帮助与支持。直接参与编写的有陈建军、邹建锋、张继发、石兴、张帅、徐彦和郑建靖，参与相关研究工作的有黄争舸、季廷炜、杨波威、邓见、宋广华和肖周芳。赵大伟、曹秉万、曹建、曾丽娟、马飞剑、孙力胜和段丽参与了第2章所涉及的研究工作；朱博、周迪斌、杨廷俊、谢天、王康健和王彦妮参与了第3章所涉及的研究工作；谢芳芳、谢斓、刘峰、刘星、付磊和辜天来对第5章做出了贡献；李新康、张伟峰和袁鹏程对第6章做出了贡献；第7章也包含了鲁阳、盛东、张阳和王安科等的研究成果。高端数字样机技术领域是一个多学科交叉的领域，没有大家的齐心协力，我们是不可能完成这些研究工作的。作者对他们的积极贡献表示衷心的感谢。

数字制造业领域发展日新月异。虽然作者尽力将书写得全面准确，但囿于水平，难免有许多不足与不妥之处，有许多挂一漏万的地方。作者热切希望读者和同行专家提出宝贵的批评意见与建议，以便帮助我们改进与提高。

郑 耀

2015年6月22日

于浙江大学

目 录

序

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	数字样机技术的概念	1
1.1.1	数字样机技术的定义	1
1.1.2	数字样机技术的相关概念	3
1.2	数字样机技术的流程与应用	3
1.2.1	数字样机技术的工作流程	3
1.2.2	数字样机技术的应用实例	4
1.3	高端数字样机的主要支撑技术	5
1.3.1	CAD 数据转换	6
1.3.2	几何网格生成	6
1.3.3	大规模数据可视化	8
1.3.4	沉浸式设计平台	8
1.3.5	系统集成	9
	参考文献	12
第 2 章	几何建模与网格生成	14
2.1	前处理技术和软件发展现状	16
2.2	高端数字样机的前处理模块	18
2.2.1	程序特点	18
2.2.2	程序架构	18
2.2.3	可视操纵	20
2.2.4	接口设计	21
2.2.5	程序实现	22
2.3	几何建模与处理	22
2.3.1	基于分层软件结构的几何引擎	22
2.3.2	连续曲面和离散曲面	24
2.3.3	虚拓扑	26
2.3.4	几何算法	26

2.4	网格单元尺寸定义	30
2.4.1	背景知识	30
2.4.2	手工尺寸定义	31
2.4.3	自动尺寸定义	33
2.5	网格生成基础算法	36
2.5.1	算法流程	36
2.5.2	数据结构	38
2.5.3	网格生成基础算法	38
2.6	高级网格生成算法	51
2.6.1	DRAGON 混合网格生成	51
2.6.2	粘性混合网格生成	51
2.6.3	动网格生成	53
2.6.4	并行网格生成	55
2.7	网格生成算法的综合应用	61
2.8	结束语	64
	参考文献	65
第3章	科学可视化与虚拟现实技术	72
3.1	概述	72
3.1.1	科学可视化	72
3.1.2	虚拟现实技术	74
3.2	基于纹理的矢量可视化	76
3.2.1	纹理法的研究进展	77
3.2.2	高通滤波改进纹理矢量可视化	78
3.3	基于特征的可视化和智能分析	85
3.3.1	基于特征的可视化	85
3.3.2	流场数据挖掘	87
3.3.3	基于特征的流场数据挖掘实例	92
3.4	可伸缩拼接显示墙技术	99
3.4.1	系统框架	101
3.4.2	基于集群的 Sort-first 并行绘制	104
3.4.3	基于计算机视觉的投影仪拼接方法	109
3.5	小型球幕显示技术	116
3.5.1	球幕投影系统架构	116
3.5.2	球幕几何校正方法	118

3.5.3 球幕校正投影渲染	122
3.6 人机交互技术	124
3.6.1 显示墙交互技术	124
3.6.2 力反馈交互	126
参考文献	128
第 4 章 高端数字样机的系统集成	135
4.1 概述	135
4.1.1 设计目标	135
4.1.2 设计原则	137
4.1.3 系统实现	138
4.2 体系结构	138
4.2.1 控制台	140
4.2.2 模块添加	141
4.2.3 模块协同	143
4.2.4 数据接口	143
4.3 主要功能模块	145
4.3.1 任务管理模块	147
4.3.2 辅助模块	149
4.4 讨论	150
参考文献	152
第 5 章 流体力学应用	154
5.1 基本控制方程与数值方法	155
5.1.1 控制方程	155
5.1.2 空间离散	156
5.1.3 时间离散	156
5.1.4 物理量重构	157
5.1.5 通量计算	158
5.2 动网格计算方法	159
5.2.1 移动网格的 ALE 算法	159
5.2.2 六自由度刚体运动方程与流场计算耦合求解	160
5.2.3 多体分离软件框架	163
5.3 飞行器设计与气动力热估算方法	163
5.3.1 设计方法	164
5.3.2 参数化成型	168

5.3.3	气动力/热估算	168
5.3.4	程序框架/流程图	174
5.4	高超声速飞行器的概念设计与估算	175
5.4.1	概念设计结果	175
5.4.2	估算算例	176
5.5	标准模型的数值验证	178
5.5.1	DLR-F6 翼身组合体	178
5.5.2	双椭球模型	180
5.6	飞机翼型的流动控制与减阻的数值分析	184
5.6.1	后台阶模型流动控制数值模拟	184
5.6.2	NACA0015 翼型模型流动控制数值模拟	185
5.7	高速列车气动计算分析	188
5.7.1	强风条件下高速列车气动性能评估	189
5.7.2	高速列车过隧道、会车等典型非定常空气动力学效应研究	193
5.7.3	高速列车中的流致振动机理问题研究	198
5.8	飞行器多体分离计算分析	200
5.8.1	翼/架/挂载组合体分离计算	200
5.8.2	F16 战斗机外挂物分离计算	204
5.8.3	类 X43-A 外形级间分离	206
	参考文献	207
第 6 章	结构力学与多场耦合应用	211
6.1	结构动力学计算方法	212
6.1.1	结构运动方程	212
6.1.2	结构受迫振动数值分析方法	212
6.2	并行计算的效率和精度	215
6.2.1	并行计算效率测试	216
6.2.2	并行计算精度测试	219
6.3	典型结构的动力学计算分析	221
6.3.1	双曲线型冷却塔分析	221
6.3.2	汽车碰撞算例	222
6.4	飞行器气动弹性耦合分析	224
6.5	飞行器结构气动力热耦合分析	227
6.5.1	热结构动力学	227
6.5.2	蜂窝夹芯结构的热应力与热模态	230

6.5.3 飞行器多场耦合及防热分析	234
6.6 几何精确的 NURBS 有限元分析	238
参考文献	239
第 7 章 燃烧学应用	241
7.1 气态燃料燃烧过程的建模方法	243
7.1.1 多组分可压缩守恒方程	243
7.1.2 热力学/热化学属性	243
7.1.3 分子输运属性	245
7.1.4 燃烧代码中的制表处理	248
7.2 反应流的大涡模拟技术	249
7.2.1 滤波方程及亚格子模型封闭	250
7.2.2 动态增厚火焰模型	254
7.3 燃烧数值模拟的计算方法	257
7.3.1 非结构网格高阶计算格式简介	257
7.3.2 单元顶点型存储技术及控制方程离散	258
7.3.3 对流项处理方法之 1: Lax-Wendroff 离散格式	260
7.3.4 对流项处理方法之 2: TTGC 离散格式	261
7.3.5 粘性项处理方法	261
7.3.6 人工粘性和激波捕捉	262
7.3.7 并行燃烧模拟程序包	263
7.3.8 小结	264
7.4 经典燃烧实验的数值验证	264
7.4.1 一维预混火焰	264
7.4.2 二维对冲火焰	264
7.4.3 三维预混 Bunsen 火焰	266
7.4.4 三维非预混抬举火焰	268
7.5 航空发动机驻涡燃烧室的设计分析	269
7.5.1 带联焰稳流器驻涡燃烧室的设计	270
7.5.2 分析方法和参数设置	271
7.5.3 结果分析	272
7.5.4 小结	277
7.6 航空发动机低排放燃烧室的设计分析	277
7.6.1 RQL 燃烧室几何结构	277
7.6.2 数值结果与分析	279

7.6.3 小结	281
7.7 支板型超燃冲压发动机的计算分析	281
7.7.1 几何模型和网格设计	281
7.7.2 化学反应机理	282
7.7.3 边界条件设置	282
7.7.4 冷态流场的数值模拟	282
7.7.5 燃烧流场的数值模拟	285
7.7.6 各向异性非结构网格自适应求解技术的应用	287
7.7.7 小结	289
7.8 激波诱导点火超燃冲压发动机的计算分析	289
7.8.1 HyShot 发动机模型和几何尺寸	290
7.8.2 边界条件设置	290
7.8.3 模拟结果	290
7.8.4 小结	293
参考文献	293

彩图

第 1 章 绪 论

1.1 数字样机技术的概念

1.1.1 数字样机技术的定义

数字样机(Digital Prototyping)技术是使用计算机模型来代替真实物理样机的技术,是 20 世纪 80 年代随着计算机技术的发展而迅速发展起来的一项计算机辅助工程技术,是计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)、计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)、产品数据管理(Product Data Management, PDM)、产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)等技术的有机集成。其研究目的是使用数字化方法来验证设计思想、辅助产品选择、测试产品的可制造性,以及提前展示产品,替代或部分替代物理样机。

数字样机技术赋予了概念设计、工程设计、生产制造、销售与市场各部门,在产品生产制造之前虚拟地体验完整产品的能力^[1]。工程造型师、制造工程师和设计工程师在整个产品开发过程中,使用数字样机技术对产品进行设计、优化、验证和可视分析。创新的数字样机可以借助计算机自动设计(Computer-Automated Design, CAutoD)来实现,通过智能与近优迭代,满足多样的设计目标(比如最大化输出、能源效益、最高速度和成本效益),达到多种性能指标,降低开发成本,缩短上市时间。市场人员可在产品生产制造前使用数字样机技术来绘制逼真的产品图片和动画。研发单位也往往以此来增强产品利益相关者间的沟通,将产品更快推向市场,并推动产品创新与发展。

数字样机技术改变了传统的产品开发周期^[1],将传统的“设计→制造→测试→修正”过程变成了“设计→分析→测试→制造”过程。研发单位不再需要制造多个物理样机来测试其是否正常工作,取而代之的是,可以在整个生产过程中使用数字样机来进行数字化测试,以减少物理样机的数量。研究表明,通过在上游使用数字样机技术来捕捉设计问题,厂商可减少对下游订单的更改。

我国国家标准 GB/T 26100—2010《机械产品数字样机通用要求》对数字样机的定义、分类、建构要求、管理要求等进行了规定^[2]。数字样机被定义为是对机械产品整机或具有独立功能的子系统的数字化描述,这种描述不仅反映了产品对象的几

何属性,还至少在某一领域反映了产品对象的功能和性能。产品的数字样机形成于产品设计阶段,可应用于产品的全生命周期,这包括:工程设计、制造、装配、检验、销售、使用、售后、回收等环节。数字样机在功能上可实现产品干涉检查、运动分析、性能模拟、加工制造模拟、培训宣传和维修规划等。

数字样机的基本构成包含几何信息、约束信息和工程属性^[2]。几何信息包含点、线、面、体等几何相关信息。约束信息包含零部件间的约束及数字样机内部和外部的参照信息。工程属性包含装备结构、装配明细、材料性能、运动副特性、整机的工作特性、输入输出特性、总体技术要求等信息。

按照反映产品的完整程度,可以将数字样机分为全机样机和子系统样机。全机样机包含整机或系统全部信息的数字化描述,它是对系统所有结构零部件、系统设备、功能组成、附件等进行完整描述的数字样机。子系统样机是按照产品不同功能划分的子系统所包含的全部信息的数字化描述,如动力系统样机、传动系统样机和控制系统样机等。

按研制阶段的进程或生命流程阶段分类,可以将数字样机分为方案样机、详细样机和生产样机。如果将数字样机构建的进展情况按模型成熟度划分等级,则这三类样机的成熟度分别对应 0~0.25, 0.25~0.85 和 0.85~1。三种样机的具体定义如下。

(1) 方案样机。在产品方案设计阶段,包含产品方案设计全部信息的数字化描述。

(2) 详细样机。在产品详细设计阶段,包含产品详细设计全部信息的数字化描述。

(3) 生产样机。在产品生产阶段,包含产品制造与装配全部信息的数字化描述。

按照使用目的侧重点的不同,数字样机也可以分为几何样机、功能样机、性能样机和专用样机。它们分别指:①几何样机,侧重于产品几何描述的数字化信息描述;②功能样机,侧重于产品功能描述的数字化信息描述;③性能样机,侧重于产品性能描述的数字化信息描述;④专用样机,支持仿真、培训、市场等特殊目的的数字化信息描述。图 1.1 则给出了各种数字样机的关系和定位。

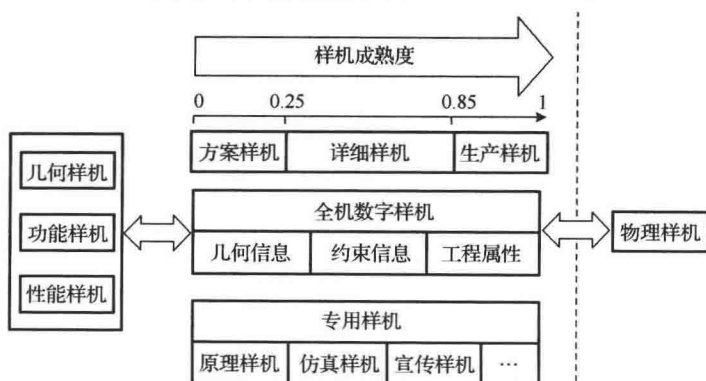


图 1.1 各种数字样机的关系和定位

1.1.2 数字样机技术的相关概念

数字样机技术是一门多学科交叉的新技术，其主要技术来源是计算机图形学领域和制造领域。传统上，这两个领域对数字样机有两种不同的认识^[3]：从计算机图形学的角度出发，数字样机和虚拟样机(Virtual Prototyping, VP)的概念一致，强调在计算机创建的虚拟环境中显示和分析产品；从制造角度出发，数字样机是一种基于计算机的产品描述，是产品全生命周期的计算机仿真和数据管理。在制造业领域，数字样机常被称为 DMU(Digital Mockup)。当前这两个领域的研究已日趋融合，在多数场合数字样机都采用了广义的定义，包含了 VP 和 DMU 的所有概念，而 Digital Prototyping、Virtual Prototyping 和 Digital Mockup 之间的区别也逐渐淡化消失了。

1.2 数字样机技术的流程与应用

1.2.1 数字样机技术的工作流程

数字样机技术的工作流程在整个设计过程中使用单一数字模型，以消除传统流程中概念设计、工程设计、生产制造、销售与市场间的隔阂^[1]。产品开发过程在大多数制造企业里可以分为以下几个通用阶段：概念设计、工程设计、生产制造、客户参与、市场营销。

1) 概念设计

在概念设计阶段使用用户输入或市场需求与数据来构建产品设计。在数字样机工作流程中，设计师从最初的草图开始，直到贯穿整个概念设计阶段，都以数字化的方式工作。设计师数字化地实现他们的设计，然后和工程师队伍使用通用文件格式来分享数据。工业设计数据被集成到数字样机系统中，以确保技术可行。

在数字样机工作流程中，设计师小组通过高质量绘制的图像来评估数字设计，做出决策。设计师在方案确定前，可以改变诸如材料或着色方案，进行多次迭代，然后生成与可视化其设计方案。

2) 工程设计

在工程设计阶段，设计工程师集成概念设计阶段的设计数据，生成产品的三维模型(即数字样机)。工程师也会增加正在开发的电子系统设计数据到数字样机中，评估各个子系统如何交互。在这个阶段，所有与产品开发相关的数据都被集成到数字样机中。在机械、电子和工业设计数据的支持下，研发单位对产品的每一个细节都进行设计处理。在这个阶段，数字样机是整个产品完整真实的数字模型。

设计工程师在整个设计过程中测试和校验数字样机,以确保最佳的设计决策,避免高代价的错误。使用数字样机技术,设计工程师可以测试运动部件工作与互动情况;建立仿真模型模拟各种真实的物理场;测试设计在真实环境中的工作性能。通过在数字样机工作流程中的集成计算与仿真,企业可以减少物理样机阶段的工作,加快开发周期。

3) 生产制造

在数字样机工作流程中,制造团队早在设计阶段就参与了工作。设计工程师和生产制造专家一起在数字样机上工作,能确保产品被经济地制造出来。生产制造团队可以精确地看到产品设计的目标。企业可以在数字样机上针对部件与型模进行成型模拟,以测试设计模型的可制造性,在开模之前识别潜在的制造缺陷。

数字样机也能使工程设计团队与生产制造团队详细地分享组装指令。纸上的装配图可能会引起混淆,但数字样机的三维可视化图片则是非常清晰的。工程设计团队与生产制造团队之间的这种早期的和明确的协作有助于最大限度地减少车间中的生产问题。最后,生产制造团队可以使用数字样机来可视化和仿真车间布局与产品生产线。他们可以检查干涉以发现潜在的问题,如空间的限制和设备碰撞。

4) 用户参与

用户参与了整个数字样机工作流程。企业使用数字样机能够让用户在很早的阶段就参与进来,而不用等到物理样机模型完成之后。企业可以给用户展示数字样机真实感的绘制和动画,使他们及早了解产品的外观和工作情况。这种早期参与有助于企业实现早期签收,而不用浪费时间去设计与制造不能满足用户期望的产品。

5) 市场营销

使用数字样机的三维 CAD 数据,企业可以为市场宣传生成逼真的可视化图片和动画,包括印刷品、网页、产品目录或电视广告。企业可以生成几乎可以乱真的摄影效果,而无需制作昂贵的物理样机并进行拍摄。

真实感可视化不仅帮助市场宣传,也有助于营销过程。企业无需制作物理样机,就可以响应项目建议书或标书需求,通过可视化方法向潜在客户显示未来的产品。另外,可视化也可以帮助企业投标更加精确,使得每个人对最终产品的有相同的期待。企业也可以用可视化方法来帮助过程审查。审查工作可以运用数字样机在逼真的环境中交互进行,这样可以在早期的产品开发过程中对设计决策进行具体校验。

1.2.2 数字样机技术的应用实例

数字样机能显著缩短产品设计和制造周期,降低开发成本,提高产品质量,因