



普通高等教育创新型人才培养规划教材



飞机制造技术基础

——热加工、塑性加工及数字化制造

FEIJI ZHIZAO JISHU JICHU

韩志仁 贺 平 郑 晖 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育创新型人才培养规划教材

飞机制造技术基础

——热加工、塑性加工及数字化制造

韩志仁 贺平 郑晖 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是为航空院校飞行器制造专业学生学习和了解航空制造技术而编写的。主要介绍航空数字化制造技术、航空钣金成形技术、铸造技术、锻造技术和焊接技术等内容,并从相关的基础理论、分类方法、制造手段、制造设备、制造工艺设计和零件的工艺性等方面进行了阐述。

本书可作为飞机设计专业的教学参考书,也可供从事飞机设计和制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞机制造技术基础. 热加工、塑性加工及数字化制造 /
韩志仁, 贺平, 郑晖编著. -- 北京: 北京航空航天大学
出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-5124-1638-3

I. ①飞… II. ①韩… ②贺… ③郑… III. ①飞机—
制造—生产工艺 IV. ①V262

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 265543 号

版权所有, 侵权必究。

飞机制造技术基础 ——热加工、塑性加工及数字化制造 韩志仁 贺平 郑晖 编著 责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话: (010)82317024 传真: (010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话: (010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本: 710×1 000 1/16 印张: 11.75 字数: 250 千字

2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷 印数: 2 500 册

ISBN 978-7-5124-1638-3 定价: 25.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话: (010)82317024

前 言

飞机制造过程包括毛坯制造、零件加工、装配安装和试验四个阶段。

随着航空制造技术的发展,在飞机制造过程的四个阶段中不仅具体的制造技术得到了飞速发展,新技术不断出现和应用,而且飞机设计制造的传统模式也发生了改变,以MBD规范为基础的三维综合信息模型作为飞机制造的依据,改变了传统的二维工程图模式,在整个制造过程中依据的载体、表达方式和制造手段等均发生了变化,最终实现了全三维数字化、无纸化制造。

在航空军民机科研生产中,钣金零件的成形技术一直是一个重点,虽然飞机设计中使用的钣金件逐渐减少,但总数量仍然占50%。成形方法主要包括橡皮囊成形、旋压成形、蒙皮拉形、壁板增量压弯成形、壁板喷丸成形、蠕变时效成形、热成形、超塑成形、数控滚弯成形和数控弯管成形等。

铸造是飞机制造的重要手段,不仅是零件毛坯的主要制造方法,而且也是一些重要的复杂零件的制造方法之一,一些发动机叶片主要靠铸造方法生产。熔模铸造、壳型铸造、陶瓷铸造都是航空零件制造的不可替代的方法,铸造仿真技术、定向凝固技术等也得到长足发展和应用。

锻造技术不仅可以提供性能良好的机械加工制造的毛坯,也是飞机重要承力部件的主要制造方法,比如飞机的梁、接头和框等重要部件均采用锻压方法制造。

焊接技术在航空制造中主要解决拼接问题,需要的大尺寸毛坯可以通过小尺寸毛坯的焊接得到。当大型零件无法直接得到时,可以通过焊接将制造的零件局部进行拼接得到;当一些钣金零件无法直接成形时,也可以将零件分成几部分成形,然后焊接拼接。飞机制造中的主要焊接方法包括氩弧焊、激光焊接、高能束电子焊接和压力焊接等。

本书主要针对上述的飞机制造方法进行编写,可作为航空、宇航制造工程专业综合基础课程的教材。由于目前有关飞机制造工程技术基础的专用教材很少,因此组织人员编著了本书。其中航空数字化制造技术引入了本书作者韩志仁老师在数字化制造方面的部分成果,同时还参考了

大量数字化制造的最新文献。这些文献主要来自国内期刊的最新数字化制造方面的文章。在此对文献的原作者深表谢意。本书可以弥补在数字化制造方面没有合适的专业书籍的不足,不仅适合于航空院校教学,也适合于工程技术人员参考。

全书共分5章。第1章总结和整理作者及已公开发表的航空数字化制造技术方面的成果,相对全面地概述了航空数字化制造技术;第2章简述塑性成型的基本原理及现有航空钣金成形方法;第3章介绍铸造的概念、类型和工艺;第4章介绍模锻和自由锻及其工艺;第5章介绍焊接原理及工艺性分析。

本书编写分工为:第1、2章由韩志仁编写,第3、4、5章由贺平编写,郑晖负责校稿和整理。

由于本书编写人员的时间、知识和经验有限,在内容编排和题材取舍方面难免有处理不妥和疏漏之处,请广大读者批评指正,以便今后本书的修订。

作 者

2014年9月

目 录

第 1 章 航空数字化制造技术	1
1.1 基本概念和内涵	1
1.1.1 数字化制造的定义	1
1.1.2 数字化制造中的数据协调关系	14
1.1.3 数字化制造的特点	14
1.2 数字化制造工艺	15
1.2.1 钣金件橡皮囊液压成形	16
1.2.2 数控加工	24
1.2.3 飞机部件的装配	29
1.3 数字化工装	30
1.3.1 数字化成形工装	31
1.3.2 数字化装配工装	32
1.3.3 柔性工装	38
1.3.4 数字化检验	41
1.4 数字化设备	43
第 2 章 航空钣金成形技术	44
2.1 航空钣金件分类	44
2.2 成形原理	45
2.2.1 钣金件变形的基本特点	45
2.2.2 钣金成形原理	45
2.3 航空钣金件主要成形方法	47
2.3.1 平板类零件	47
2.3.2 落压类零件	47
2.3.3 拉深类零件	48
2.3.4 板弯型材零件	49
2.3.5 橡皮囊液压成形零件	49
2.3.6 旋压零件	50
2.3.7 蒙皮成形零件	51
2.3.8 整体壁板零件	52

2.3.9	热成形零件	58
2.3.10	超塑成形和扩散连接零件	58
2.3.11	局部成形零件	60
2.3.12	爆炸成形零件	60
2.3.13	挤压型材零件	62
第3章 铸造技术		63
3.1	金属液态成型工艺基础	63
3.1.1	熔融合金的流动性及充型	63
3.1.2	液态合金的收缩	65
3.1.3	铸件的常见缺陷	70
3.2	铸造成型概念及铸造特点	71
3.3	铸造技术的发展	73
3.4	常见的铸造方法及比较	74
3.5	铸件结构工艺性	84
3.5.1	铸件结构设计基本原则	84
3.5.2	铸造工艺方法的选择	86
3.5.3	铸造工艺性	89
3.6	铸造工艺参数的选择	96
3.6.1	铸件机械加工余量	96
3.6.2	铸件工艺余量	97
3.6.3	铸造斜度(起模斜度)	98
3.6.4	最小铸出孔及槽	99
3.6.5	铸件线收缩率	99
3.6.6	铸件工艺补正量	100
3.6.7	分型负数	101
3.6.8	芯头	101
3.6.9	铸件尺寸公差	101
3.7	铸件机械加工初基准的选择	101
3.8	铸件结构要求	104
3.8.1	铸件壁厚	104
3.8.2	壁的连接	107
3.8.3	铸造圆角	109
3.8.4	铸造筋	110
3.8.5	铸孔和槽	113
3.8.6	铸件结构应避免冷却收缩受阻和有利于减小变形	116

3.8.7 避免外部侧凹	116
3.8.8 改进妨碍起模的凸台、凸缘和肋条的结构	116
3.8.9 铸件内腔的设计	117
3.8.10 铸造方法对铸件结构的特殊要求	118
第4章 锻造技术	120
4.1 概 述	120
4.1.1 锻造生产的特点	121
4.1.2 锻造生产的分类及其工艺流程	122
4.1.3 锻造工艺的发展简史及其发展趋势	123
4.2 自由锻	126
4.2.1 自由锻工序	126
4.2.2 自由锻工艺规程的制定	129
4.3 模 锻	134
4.3.1 锤上模锻的工艺特点	135
4.3.2 锤上模锻的锻模结构	135
4.3.3 锤上模锻工艺规程的制定	138
4.3.4 其他模锻方法	144
4.4 锻件的结构工艺性	146
4.4.1 自由锻件的结构工艺性	146
4.4.2 锤上模锻件的结构工艺性	148
第5章 焊接技术	156
5.1 焊接基础	156
5.1.1 定义、原理及特点	156
5.1.2 焊接基本知识	157
5.2 焊接方法	158
5.2.1 电弧焊	159
5.2.2 埋弧焊	160
5.2.3 气体保护焊	162
5.3 焊接应力与变形	165
5.3.1 焊接应力与变形的产生原因	165
5.3.2 焊接应力与变形的危害	167
5.3.3 防止焊接应力与变形的措施	168
5.4 焊接缺陷	170
5.4.1 焊接缺陷分类	170

5.4.2	焊接裂纹分类	171
5.4.3	焊接裂纹防止	171
5.5	焊接结构工艺设计	172
5.5.1	焊接结构生产工艺过程	172
5.5.2	焊接结构工艺设计	172
参考文献		177

第 1 章 航空数字化制造技术

随着数字化技术的飞速发展,航空企业须快速、经济地将新产品投放市场,并且在降低燃油消耗、降低噪声及环境等方面做出努力,与合作伙伴和供应商共同承担风险。面对市场竞争中的各种挑战,需要引入新的工作方式,加强创新,在国内不同领域及国际间开展合作。一种成功的方法就是数字化设计制造方法,采用 CAD(Computer Aided Design)软件设计产品,采用 CAE(Computer Aided Engineering)软件模拟产品、在虚拟环境下验证产品,采用 CAM(Computer Aided Manufacturing)软件和设备制造产品。而且三维工具也用于制造计划、模拟验证等。采用产品数据管理 PDM(Product Data Management)管理产品、过程和资源对象以及它们之间的关系。在信息化的基础上开展产品全生命周期管理 PLM(Product Lifecycle Management),使产品数据管理得到延续,与企业资源管理 ERP(Enterprise Resource Planning)系统对接,支持现代制造供应链物理层面。

设计师和工程师需要虚拟原型与模型来理解和验证复杂的设计,二维图纸工作模式不能满足这一要求,而三维数模却可以在这方面发挥优势。数字样机允许审查设计问题、制造工艺性问题,评估产品视觉和操作性等。此外,数字化制造允许制造工程师在制造产品前对生产环境、验证计划和生产工艺提出一个明确的看法。

随着计算机技术的发展,航空产品从数字化设计到数字化制造得到了飞速发展。数字化已经渗透到产品研制的设计、制造、试验和管理的全过程中,以产品数字化定义、并行工程、知识工程、试验仿真和虚拟制造等技术为主要标志,从根本上改变了传统的工作模式、方法和手段。而且,随着产品制造模式的变化,产品的管理模式也随之发生了变革。

波音和空客公司分别在 B777、B787 和 A380 等多个机型上应用了数字化设计制造技术,并产生明显的效果。如著名的联合攻击战斗机 JSF 项目通过建立基于协同平台的全球化虚拟企业,覆盖飞机全生命周期,全面采用数字化技术,使飞机设计时间减少 50%,工装减少 90%,总装工装减少 95%,零部件数量减少 50%,制造周期缩短 67%,制造成本降低 50%,使用维护成本降低 50%^[1]。

1.1 基本概念和内涵

1.1.1 数字化制造的定义

在数字化技术和制造技术融合的背景下,在虚拟现实、计算机网络、快速原型、数据库和多媒体等技术的支持下,根据用户的需求,迅速收集资源信息,对产品信息、工

艺信息和资源信息进行分析、规划和重组,实现对产品设计、功能仿真以及原型制造,进而快速生产出达到用户所要求性能的产品。这个制造全过程称为数字化制造。其内涵包括三个层面:以设计为中心的数字化制造技术、以控制为中心的数字化制造技术和以管理为中心的数字化制造技术。

下面介绍数字化制造技术涉及的主要概念。

1. 基于模型的工程定义

MBD(Model Based Definition),即基于模型的工程定义,是一个用集成的三维实体模型来完整表达产品定义信息的方法体,它详细规定了三维实体模型中产品尺寸、公差标注规则和工艺信息的表达方法。MBD 模型如图 1-1 所示。

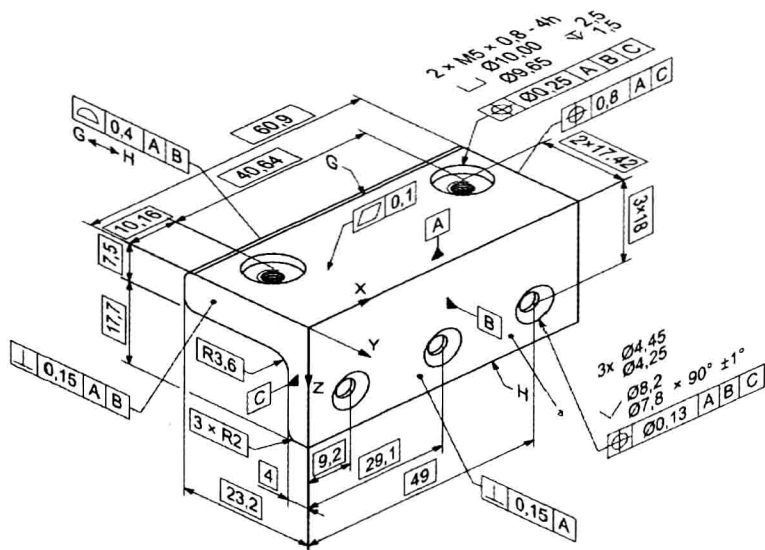


图 1-1 MBD 模型

MBD 是产品全生命周期管理(PLM)的一种新对策,是基于计算机辅助设计(CAD)模型,将简单的几何数据集合转化成综合性的数据源,为全生命周期服务。采用 MBD 技术,产品相关的大部分数据包含在 CAD 模型内,以不同的形式存储在 PLM 数据库中。MBD 的目的是抑制过多的文档和图纸,数据具有较好的协调性,产品和工艺被较好地虚拟化,在工程和制造实践中对所有计算机辅助技术任务都有较好的支撑。现在发展 MBD 主要是处理基础数据结构,以便在三维 CAD 模型内部可重复使用格式统一的结构数据。

美国机械工程师协会于 1997 年在波音公司的协助下开始了有关 MBD 标准的研究和制定工作,于 2003 年使之成为美国国家标准,并被 ASME 批准为机械产品工程模型的定义标准。MBD 的主导思想不只是简单地将二维图纸的信息反映到三维数据中,而是充分利用三维模型所具备的表现力,去探索便于用户理解且更具效率的

设计信息表达方式。它用集成的三维数模完整地表达了产品定义信息,详细规定了三维数模中产品尺寸、公差标注规则和工艺信息的表达方法。MBD 改变了传统用三维数模描述几何形状信息、用二维工程图纸来定义尺寸、公差和工艺信息的分步产品数字化定义方法。同时,MBD 使三维数模作为生产制造过程中的唯一依据,改变了传统的以工程图纸为主、三维实体模型为辅的制造方法,建立了集三维数字化设计制造于一体的集成应用体系,真正达到无图纸、无纸质工作指令的三维数字化集成制造^[2]。

(1) MBD 内涵

MBD 数据模型通过图形和文字表达的方式,直接地或通过引用间接地揭示了一个物料项 BOM(Bill of Material)的物理和功能需求。MBD 模型分为装配模型与零件模型,其组织定义如图 1-2 所示。

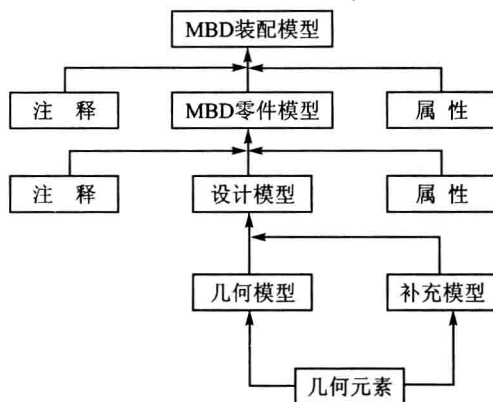


图 1-2 MBD 模型组织定义

MBD 零件模型由以简单几何元素构成的、用图形方式表达的几何信息和以文字表达的注释、属性数据组成。MBD 装配模型由一系列 MBD 零件模型组成的装配零件列表加上以文字表达的注释和属性数据组成。零件设计模型以三维方式描述了产品几何形状信息,属性数据表达了产品的原材料规范、分析数据和测试需求等产品内置信息;而注释数据包含了产品尺寸范围、公差范围、制造工艺和精度要求等生产必需的工艺约束信息。

(2) 基于 MBD 的数字化制造流程

飞机的研制必须经历产品设计、工艺设计、工装设计、产品制造和检验检测 5 个主要环节,并在产品制造和检验检测环节中,由三维设计数模分别派生出三维工艺数模和检验数模^[3]。基于 MBD 的飞机数字化制造技术应用体系包括 MBD 技术应用、技术开发和技术规范三大部分,如图 1-3 所示。基于 MBD 的数字化制造流程如图 1-4 所示。

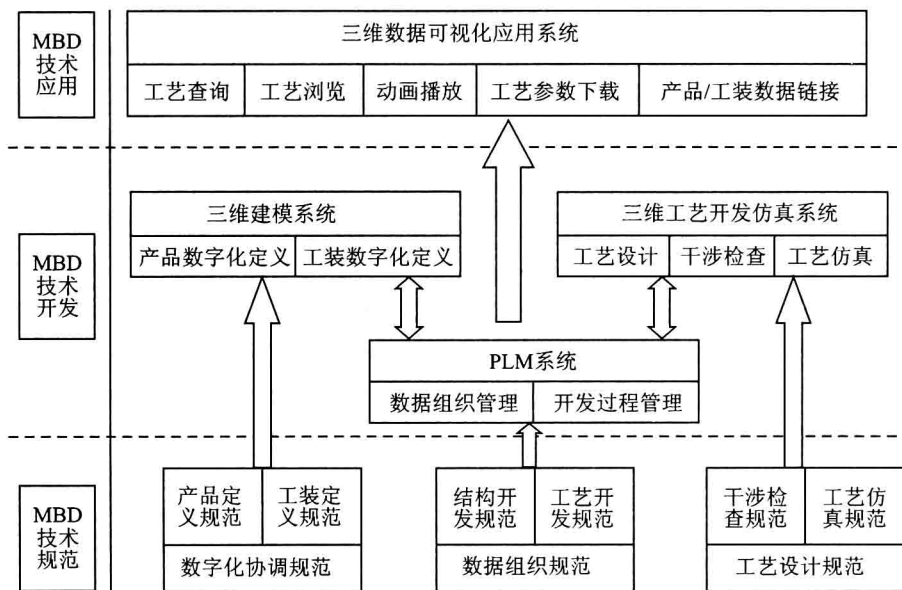


图 1-3 基于 MBD 的飞机数字化制造技术应用体系

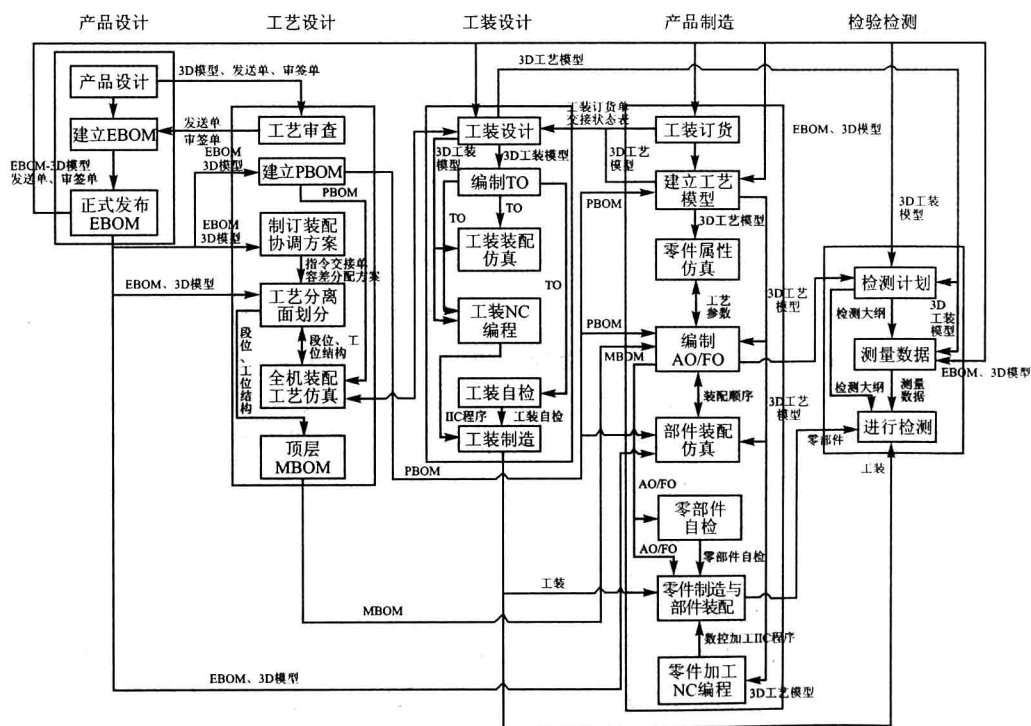


图 1-4 基于 MBD 的数字化制造流程

在产品设计过程中,设计部门依据产品性能、属性要求,经过产品构思设计(概念设计)、总体设计、详细设计(打样设计)等过程,完成产品设计。在详细设计阶段将构思设计和总体设计的思想融入具体的产品结构中,形成最终产品。对于数字化设计,最终产品的设计结果为综合信息模型,该模型符合MBD规范。

在工艺设计过程中,工艺部门依据设计部门预发放的三维设计数模进行工艺分析,并向设计部门反馈工艺审查意见;依据设计部门正式发放的产品设计结构EBOM(Engineering Bill of Material)和三维设计数模,建立产品工艺结构PBOM(Process planning Bill of Material),制订装配工艺协调方案,划分工艺分离面,进行全机装配工艺仿真,最终形成经过装配仿真验证的产品制造结构MBOM(Manufacturing Bill of Material)顶层结构,发放到下游的工装设计、专业制造和检验检测等部门。

在工装设计过程中,工装设计制造部门依据产品制造部门提出的工装订货单、三维工艺数模、产品制造工艺方案和设计部门的三维产品设计数模进行工装设计;依据三维工装设计数模进行TO(Technology Outline)的编制及装配工装的装配仿真和工装NC程序的编制,最终完成工装的制造和自检。

在产品制造过程中,产品制造部门依据设计部门正式发放的EBOM和三维设计数模、工艺部门的PBOM建立三维工艺数模,进行零件和部件几何仿真,编制装配大纲AO(Assembly Outline)和制造大纲FO(Fabrication Outline),编制NC(Numerical Control)程序,最终完成零件的加工、部件的装配以及自检。

在产品检验检测过程中,检验检测部门依据设计部门正式发放的EBOM、三维设计数模,三维工装设计数模编制检测计划,设计测量数据,完成零部件和工装的检测。

2. BOM

BOM(Bill of Material)也就是“物料清单”(有些系统中称为材料表或配料表),是生产一个产品所需零件或部件的清单。它详细记录了一个项目所用到的所有下级材料及相关属性,即母件与所有子件的从属关系、单位用量及其他属性。不同部门的BOM及其相互关系如图1-5所示^[4]。

它包括的信息有:物料的结构层次、编号、名称、规格、计量单位、数量成品率、来源类型(自制/外购/外加工)和提前期(累计提前期),此外还标注有效期(生效期/失效期)。物料清单文件列表结构有层次性,显示每完成一单位产(成)品所需下一层次的各项数量(各组件和构件数量)。

EBOM(Engineering BOM)是产品工程设计管理中使用的数据结构,通常精确地描述了产品的设计指标和零件与零件之间的设计关系。它对应的文件形式主要有产品明细表、图样目录、材料定额明细表及产品各种分类明细表等。通常以图1-6所示的产品结构树作为其表现形式,树上每个节点关联各类属性或图形信息。

PBOM(Process planning BOM)^[5]是企业的工艺设计部门用来组织和管理生产某种产品及其相关零部件的工艺文件。工艺设计部门以EBOM中的数据为依据,根据其工艺路线分工计划、实际制造中的加工与装配过程及装配部门对装配件和加工件的交

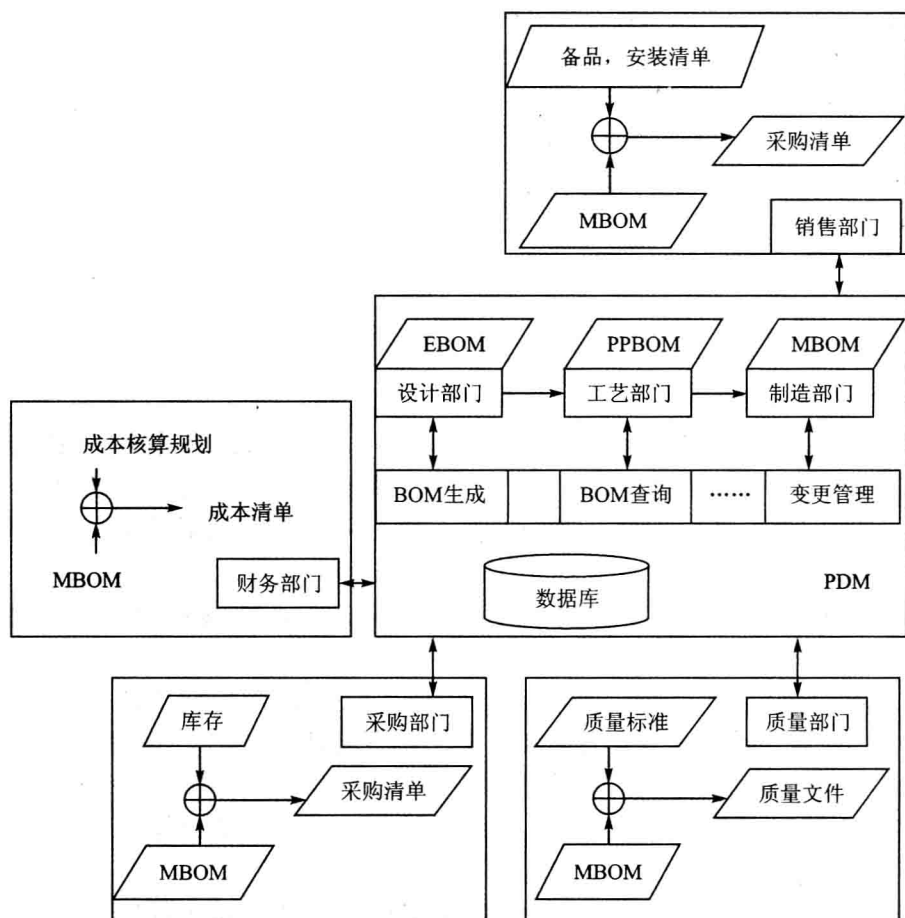


图 1-5 不同部门中的 BOM 及其相互关系

付状态的要求,通过调整 EBOM 中的零部件的装配关系,设置零部件的不同状态,形成工艺设计过程中的虚拟件,对 EBOM 再设计出用于指导工艺工作的产品数据清单。它用于工艺设计和生产制造管理、使用它可以明确地了解零件与零件之间的制造与装配关系,跟踪零件制造方法、地点、人员、物料和过程信息。具体实例如图 1-7 所示。

MBOM (Manufacturing BOM) 是企业生产制造部门用来组织和管理在实际制造和生产管理过程中生产某种产品所需的零部件 BOM。MBOM 是根据产品的 EBOM 和 PBOM 制定的,在 PBOM 的基础上,增加详细的工艺、材料、制造资源(工装、刀具、量具和设备等)、工时定额及材料定额信息,同时生产制造管理部门可以根据工艺部门制定的 PBOM,参考工艺设计中的零件的加工步骤与装配件的装配步骤,更改零部件的装配顺序,详细描述产品制造过程和制造数据的基础性数据。同时,MBOM 作为制造部门的主要数据,可用于工艺设计、工艺分工、工艺管理及工艺文件的跟踪。MBOM 的完整性和准确性对于缩短生产准备周期,协调各部门的工作具有举足轻重的作用。具体实例如图 1-8 所示。

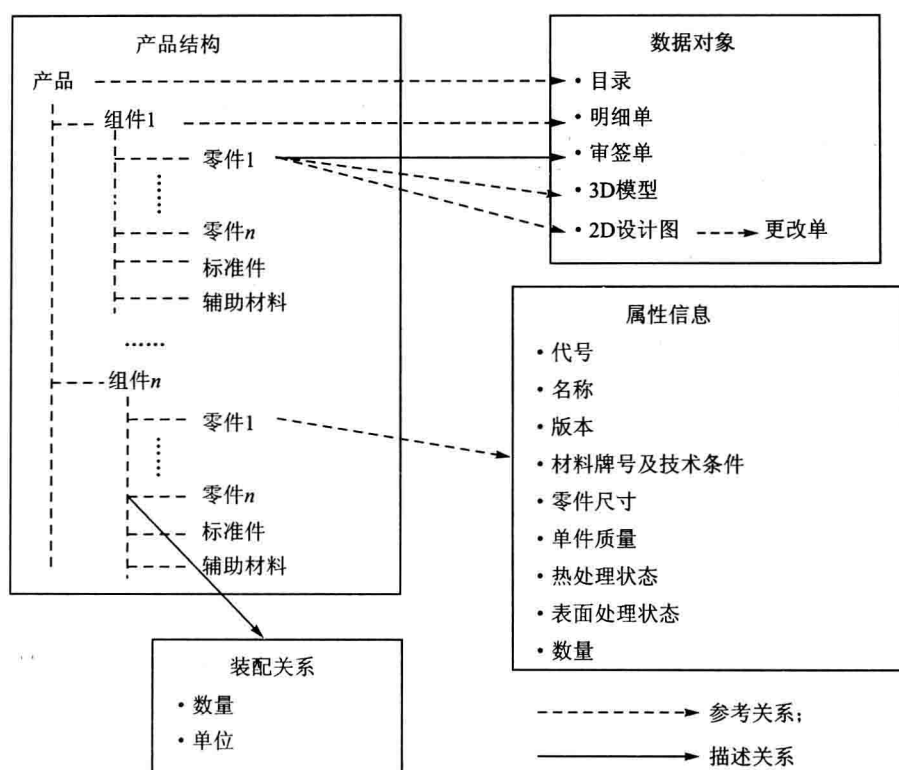


图 1-6 产品结构树

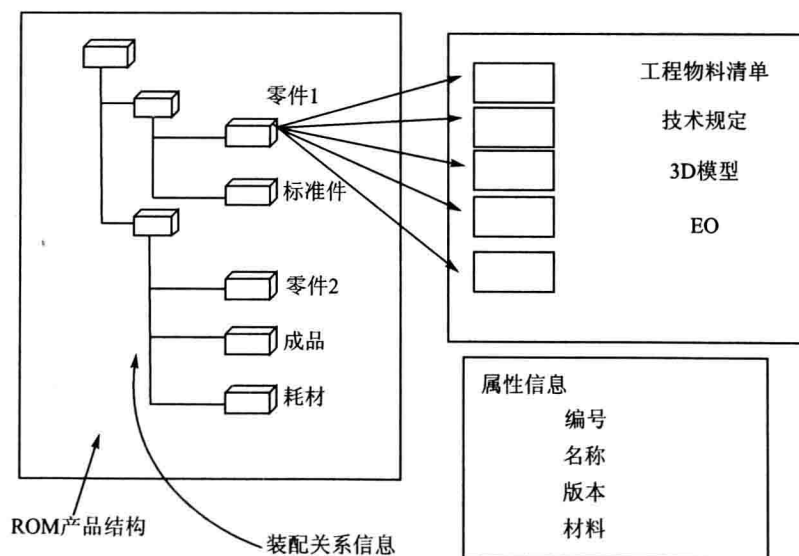


图 1-7 从 EBOM 构建 PBOM 的过程

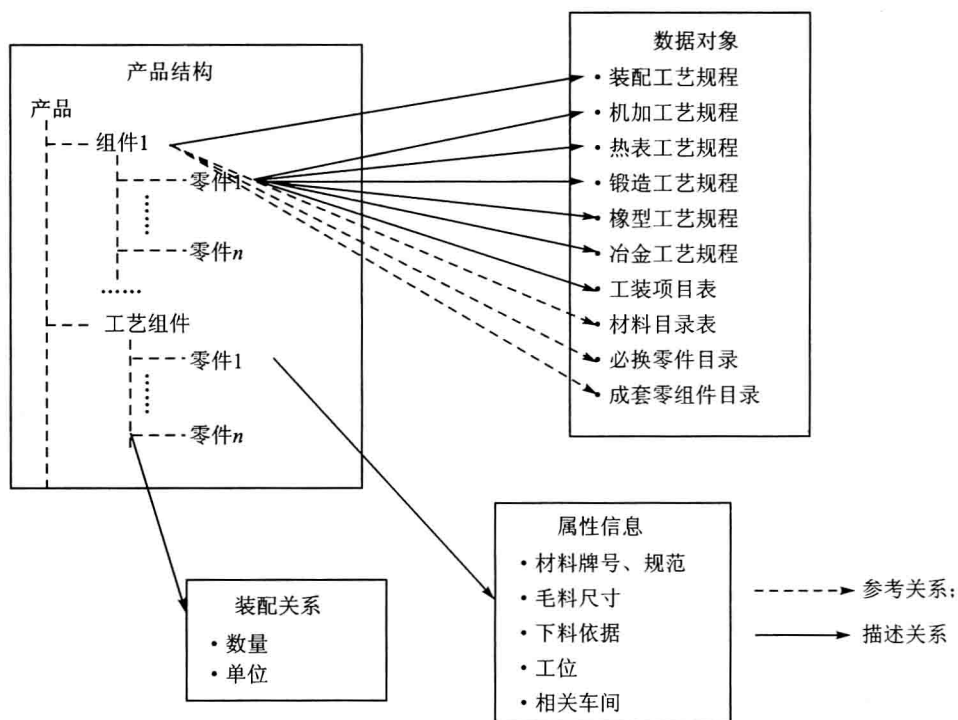


图 1-8 MBOM

目前,在企业信息化环境中往往具有多个信息系统并存的状态。在多系统的企业生产环境中,实现产品信息共享,解决 BOM 在多系统中的集成问题,一致性和时效性问题就显得尤为迫切。如图 1-9 所示,基于贯穿企业信息过程的 BOM 信息流,实现企业的多信息系统集成,可以达到提高数据共享度、数据传递时效性和准确性的目的。

通过 CAD 工具与 PDM 系统的集成,依据 CRM(Customer Relationship Management)系统传递的产品和设计需求,在 PDM 系统中可产生面向工程设计的 EBOM 视图、产品属性和材料信息、三维设计模型及其他技术文件。通过集成接口获取 EBOM 后,CAPP 系统依据工艺需求,参考车间加工能力,添加工艺分工、加工和装配约束、零组件交付要求信息,将 EBOM 转换为 PBOM。在工艺设计过程中,同时要查找工艺资源,如工装、设备和辅助材料等。具有重要纽带作用的 CAPP 系统将输出工艺文件、工艺报表和完成工艺资源管理工作。在 MES/ERP 环境中,生产制造管理部门根据工艺部门生成的 PBOM,参考工艺设计中零件的加工步骤与装配件的装配步骤,更改零部件的装配顺序,增加工艺资源、工时、材料和物料等信息,以工艺过程中的工序为单位扩充 PBOM,最后形成 MBOM。它可作为调配工艺资源、编制生产计划等管理工作的参考依据。