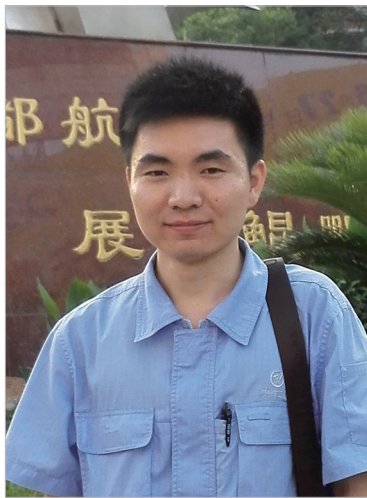


# 面向飞机虚拟装配的装配特征建模

## Modeling of Assembly Feature Facing Aircraft Virtual Assembly Simulation

中航工业江西洪都商用飞机股份有限公司 黎明 王晓宇 罗震 汪静 郑和兴  
南京航空航天大学机电学院 张臣 李迎光 史桂林



黎明

助理工程师, 现任江西洪都商用飞机股份有限公司工艺员, 主要从事飞机装配工艺、构型管理和新技术研发等方面工作。

飞机产品结构复杂, 装配精度要求高。近十余年来, 国外飞机装配技术发展迅速, 无论是波音还是空客都已经实现了数字化装配仿真技术, 以 B787、A380、F-35 等为代表的新机集中反映了国外飞机数字化装配仿真技术的发展趋势<sup>[1]</sup>。目前比较流行的飞机装配仿真应用软件有: CATIA 中的 DMU、DELMIA、UG

本文根据某型飞机的主要结构特点与装配技术要求, 充分应用数字化制造、装配、协调、仿真等先进技术, 进行相应的装配仿真的技术研究, 解决飞机装配仿真中的一些关键工艺技术。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.13.098

以及 Pro/E 软件<sup>[2]</sup>。其中, DELMIA 仿真软件中的 DPM (Digital Process Manufacture, 数字化制造工艺) 能实现对装配件装配过程的动态仿真, 并可进行实时的干涉检验, 因此广泛应用于飞机数字化装配仿真中。

目前, 以装配仿真为主要验证手段的数字化装配技术的发展及应用非常迅速, 已成为飞机装配技术发展的主要趋势。我国飞机研制的工艺水平、生产组织模式、管理理念还未能达到国外先进飞机制造企业的标准, 对飞机装配工艺的研究还开展较少, 也不能将装配过程所需的产品、工装、制造资源相互结合起来进行虚拟装配仿真验证装配工艺。与国外主要民机制造企业比较, 国内飞机装配仿真技术的应用才刚刚起步, 系统的装配仿真工艺技术规范还未建立, 在装配规划中还没有应用装配仿真

进行验证, 在飞机装配详细工艺设计过程中还未能全面应用装配仿真技术。

### 飞机的虚拟装配仿真过程

虚拟装配以产品及其零部件的三维实体模型为基础, 借助虚拟现实技术在计算机上仿真装配操作的全过程, 进行装配操作及其相关特性的分析, 实现产品的装配规划和评价, 制定合理的装配方案。本文根据某型飞机的主要结构特点与装配技术要求, 充分应用数字化制造、装配、协调、仿真等先进技术, 进行相应的装配仿真的技术研究, 解决飞机装配仿真中的一些关键工艺技术, 通过定义装配特征描述装配过程中的工艺规划和详细的工艺设计过程, 仿真验证飞机装配工艺方案的合理性和可靠性, 迭代装配工艺方案的设计与仿真

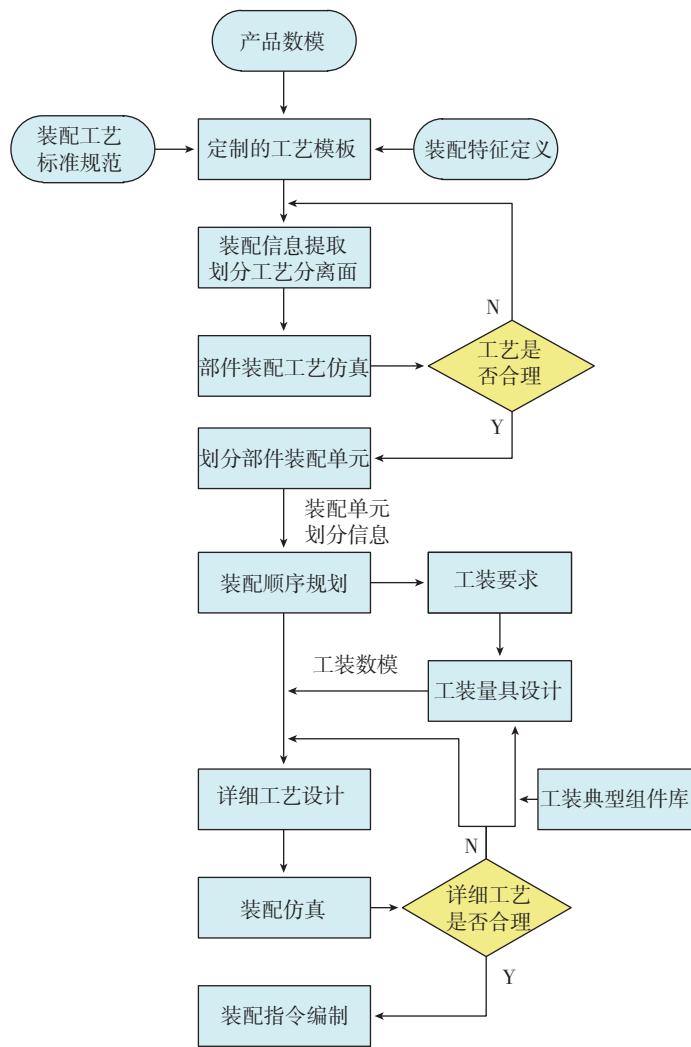


图1 飞机虚拟装配仿真过程

件的制造加工特征、装配特征、检测特征、功能特征等。目前,特征建模技术已成为新一代建模技术。

## 2 装配特征的定义

装配特征是指零件面上参与装配活动的区域,是通过装配约束定义的具有一定装配工程语义的几何元素及其属性的集合,只要装配特征相同,不管零件的功能、形状、大小都属于同一装配特征件。装配特征件是表达零件间装配关系的载体,从装配的角度来看,零件是若干装配特征件的组合体,而装配体则可以是零件中各装配特征件按一定装配规则的联接。

在实际的装配环境中零件的装配和很多因素有关,主要包括3个方面:(1)零件自身的属性,如零件结构形状、零件的尺寸、零件的重量、刚性、黏性、脆性、稳定性等;(2)装配零件之间的装配关联属性,主要描述零件间的联接约束关系,如轴孔配合;(3)装配零件时所需实施的工艺操作和操作规程信息,如装配操作,由产品的装配技术要求所采取的辅助装配操作。因此,装配特征是反映几何元素、配合类型、装配工艺以及

表1 装配特征的分类(部分)

种类	几何约束关系	装配方向	装配顺序及操作
螺钉—螺孔类  零件2位置固定	零件1的螺孔、螺钉,零件2的中心线对齐; 螺钉上端面与零件1上端面对齐; 零件1下端面和零件2上端面对齐。	零件2的螺孔轴线方向	1. 零件1的孔与零件2的孔中心线对齐; 2. 零件1下端面和零件2上端面对齐; 3. 螺钉轴线与零件1轴线对齐; 4. 螺钉上端面和零件1上端面对齐。
螺栓—螺母类  零件1 零件2 螺母	螺栓,被联接螺孔,螺母的中心线对齐; 螺栓下面和被联接螺孔上端面对齐; 被联接螺孔下面和螺母上端面对齐。	零件的孔轴线方向	1. 两被联接的螺孔轴线对中; 2. 两螺孔端面对齐; 3. 螺栓轴线与螺孔轴线对齐; 4. 螺栓面与螺孔端面对齐; 5. 螺母轴线与孔轴对齐; 6. 螺母面与螺孔端面对齐。
螺栓—轴—螺栓类  轴 螺栓1 螺栓2 零件1 螺栓3 螺栓4 零件1位置固定	轴、四个螺栓与零件1的通孔轴线对齐; 轴沿零件1通孔轴线移至合适位置; 螺栓2轴线与零件1通孔轴线对齐; 其余螺栓约束类似。	轴线方向	1. 轴与零件1通孔轴线对齐; 2. 轴移至合适位置; 3. 螺栓2与零件1通孔轴线对齐; 4. 螺栓2下端面和零件1上端面对齐; 5. 螺栓3装配(与2类似); 6. 螺栓1装配; 7. 螺栓3装配。

过程,形成优化的基于装配特征描述的装配工艺方案,面向虚拟装配仿真进行装配特征的建模技术研究,针对该型飞机建立的装配仿真的过程如图1所示。

## 装配特征的定义与表示

### 1 特征的概念

特征(feature)这一概念最早出现在1978年美国MIT的一篇学士论文《CAD中基于特征的零件表示》中。目前,特征应用最成熟的领域是产品参数化造型。由于特征不仅可以表达一定的形状、结构,还可以附带相关属性信息。因此,特征的概念就由简单的参数化形状特征发展到零

反映装配关系的所有装配辅助信息的集合。根据某型飞机零部件的结构特点,本文定义了几种装配特征类型(表1)。在装配时,每种装配特征所对应的特征形状结构、形状尺寸变量、定位尺寸变量以及该装配特征与对应的配合的装配特征等配合信息一起存储到装配特征库中。

### 3 装配特征表示

装配特征是反映几何元素、配合类型、装配操作方式以及反映装配关系的所有装配辅助信息的信息集合。用数学形式描述如下:

$AF = \{GM \ MA \ AO \ AI \ AS \ AD\}$ , 其中,AF 为装配特征;GM 为几何元素;MA 为配合类型;AO 为装配操作方式;AI 为与装配有关的所有的装配辅助信息,如装配公差、装配速度、装配工艺操作或规程信息等;AS 为装配顺序;AD 为装配方向。

### 装配特征建模与装配模型

互相装配的零件都是用装配特征几何相互约束,如两个零件相互贴合,而涉及到具体贴合的是两装配零件的两个面。由装配特征定义得知,这两个面是两个装配零件发生约束的装配特征几何。图2所示为装配特征信息。装配特征几何约束关系包含两部分,第一部分是装配零件间的装配特征几何约束关系,即所属不

同装配零件的两个装配特征发生约束关系。第二部分是装配零件内的装配特征几何约束关系,即所属同一个装配零件的两个装配特征发生的约束关系,如装配特征几何的几何约束(尺寸约束、位置约束、形状约束)。

由图3可知,装配特征几何约束关系被添加到装配零件层和装配特征层上,形成了装配特征几何约束关系层。装配特征几何约束层的上半层表示装配零件间的装配特征约束关系,下半层表示装配零件内的装配

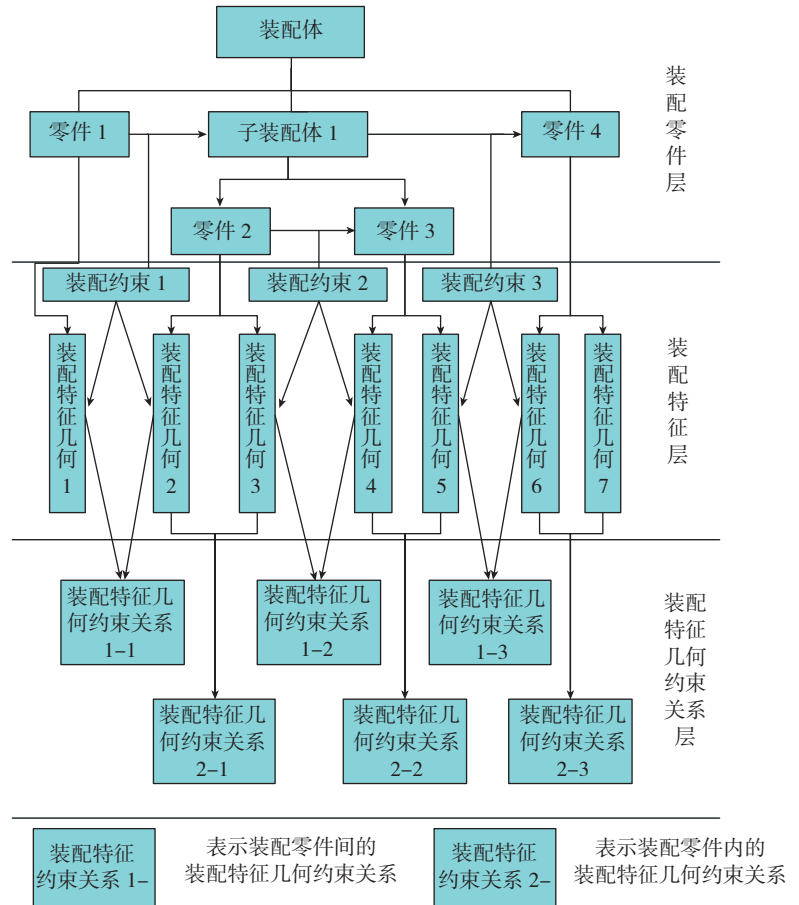


图3 装配特征几何约束层次图

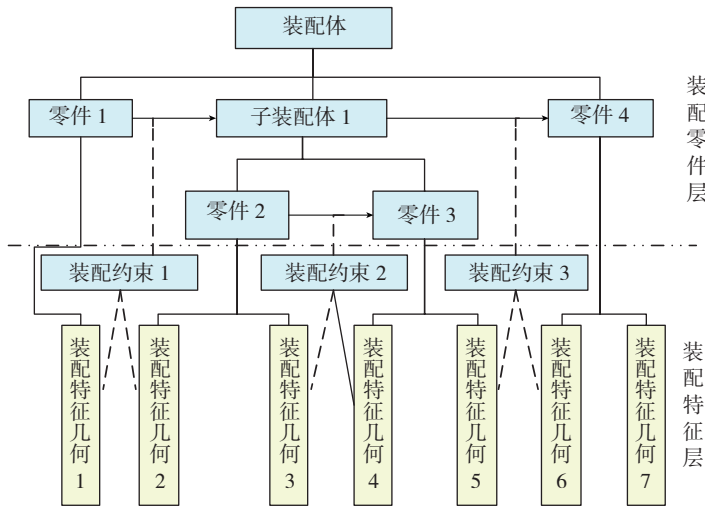
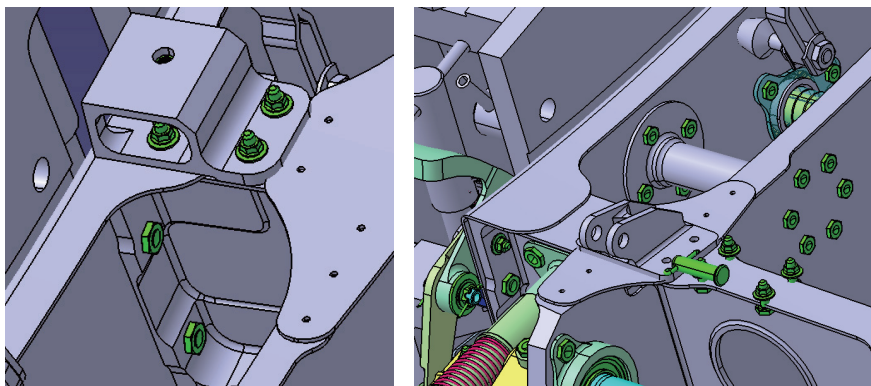


图2 装配特征信息图

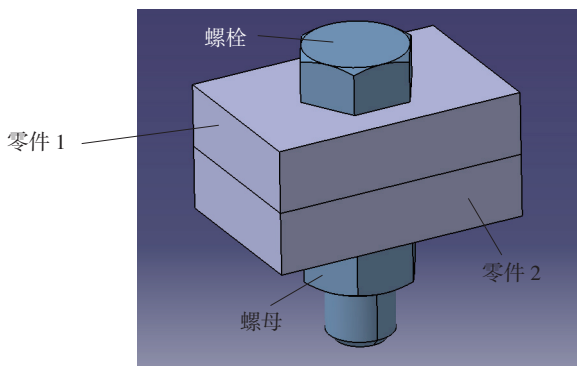
特征约束关系。通过图2和图3就可定义飞机装配的特征层次关系模型,在定义的装配特征层次关系模型的基础上,进行基于装配特征的装配仿真。

### 应用实例

下面结合具体的飞机结构件进一步说明装配特征建模过程。舱门是飞机中比较典型的部件,螺栓—螺母联接是舱门中广泛使用的装配关系,包含多个几何体素约束关系,非常具有代表性,如图4(a)所示,故



(a) 舱门螺栓—螺母装配实例



(b) 舱门螺栓—螺母简化图

图4 螺栓—螺母类装配特征示意图

选此说明装配特征建模。为说明问题,简化图4(a)所示螺栓—螺母联接关系为图4(b),其中选取的螺栓规格为M16×60,螺母规格为M16,零件1和零件2为普通三维实体,规格为60mm×40mm×15mm,通孔草图圆心在实体中心,直径为16mm。

### 1 装配特征约束语义的提取

装配完成的螺栓—螺母配合简图如图5所示。该产品的特征约束信息应包含装配零件间的所有特征约束语义关系。根据上文装配特征

的定义,并考虑实际装配中装配工艺、工艺设计等环节,对具体的装配过程加以合理的抽象表达,提炼特征约束语义。为方便表示,在下文描述中图5零件1用 $P_1$ 表示、图5零件2用 $P_2$ 表示。图5中的螺栓联接,蕴涵的装配定位约束为零件1和零件2的螺栓孔轴线共线,螺栓和螺母轴线共线,螺栓与零件1的螺栓孔轴线共线,两零件的端面贴合等。

经分析综合,整理后的特征约束如图6所示,分别为:

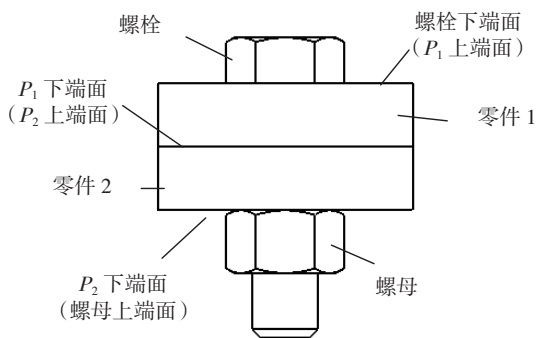


图5 螺栓—螺母装配示意图

(1) 螺栓与螺母属于轴—孔连接,满足的几何约束条件为:螺栓的轴线与螺母的轴线重合;

(2) 螺栓与零件 $P_1$ 属于轴—孔连接,满足的几何约束条件为:螺栓的轴线与零件 $P_1$ 通孔的轴重合,螺栓的下端面与零件 $P_2$ 的上端面重合;

(3) 零件 $P_1$ 与零件 $P_2$ 属于平面连接,满足的几何约束条件为:零件 $P_1$ 的下端面与零件 $P_2$ 的上端面重合,零件 $P_1$ 的孔轴线与零件 $P_2$ 的孔轴线重合;

(4) 螺母与零件 $P_2$ 属于平面连接,满足的几何约束条件为:螺母的轴线与零件 $P_2$ 的孔轴线重合,螺母的上端面与零件 $P_2$ 的下端面重合。

### 2 装配特征语义的描述

特征约束语义的约束集描述是表达特征约束语义内涵的关键,约束集的描述越完备,特征约束语义的内涵越丰富。根据上文建立的模型 $AF = \{GM\ MA\ AO\ AI\ AS\ AD\}$ ,特征约束语义描述如下:

$AF = \{GM : \text{bolt—nut} (\text{bolt}, \text{part1}, \text{part2}, \text{nut})\}$

MA:

M1 : coaxis ( axis ( part1.hole ) axis ( part2.hole ) )

// 两零件的螺栓孔同轴

M2 : coaxis ( axis ( bolt ), axis ( nut ) )

// 螺栓与螺母同轴

M3 : coaxis ( axis ( part1.hole ), axis ( bolt ) )

// 螺栓与零件1的螺栓孔同轴

M4 : mate ( part1.bottomFace, part2.topFace )

// 两零件的面贴合

M5 : mate ( bolt.bottomFace, part1.topFace )

// 螺栓与零件1的端面贴合

M6 : mate ( nut.topFace, part2.bottomFace )

// 螺母与零件2的端面贴合

AO:

O1 :  $P_1$  与  $P_2$  移至孔同轴

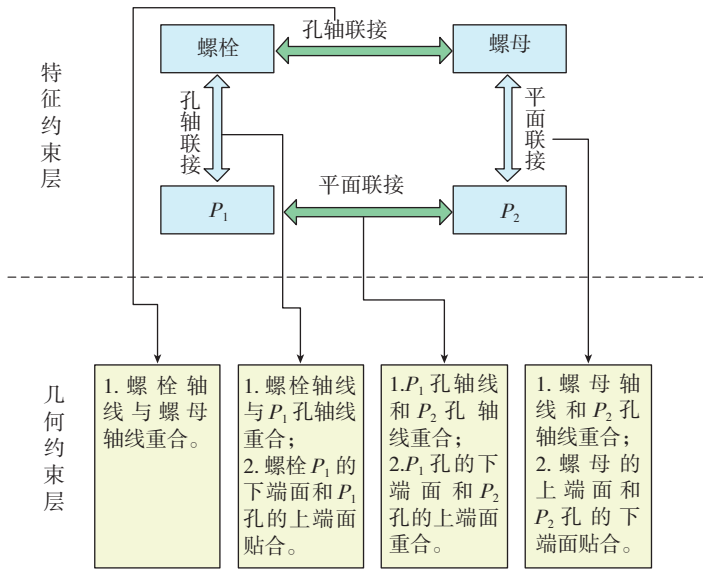


图6 螺栓—螺母特征约束图

- O2:  $P_1$  与  $P_2$  端面移至贴合
- O3: 螺栓移至与  $P_1$  孔同轴
- O4: 螺栓插入至与  $P_1$  端面贴合
- O5: 螺母移至与  $P_2$  孔同轴
- O6: 螺母旋入, 与  $P_2$  端面贴合
- AS: M1, M4, M3, M5, M2, M6,
- AD: 零件孔轴线方向
- AI: 孔径 16
- }

### 3 特征语义的约束转换

图 6 所示零部件装配模型分为两个层次: 一是特征约束层, 二是几何约束层。传统 CAD 系统用后者表达装配模型。由于特征约束是一种高层次的约束信息, 因此可以快速地完成装配操作。当需要显示装配模型时, 由程序将特征约束模型转化为几何约束模型, 然后由 CAD 系统完成零件装配。

螺栓与零件  $P_1$  特征约束转化为几何约束的过程如图 7 所示, 具体的过程如下:

(1) 搜索转换规则。

根据当前特征约束, 在 CATIA 装配规则中查找相应的转换规则。根据特征提取得到的信息, “螺栓—螺母联接” 装配中有两种几何约束, 轴线共线 “coaxis” 和平面贴合 “mate”, 整个联接装配过程就是重复

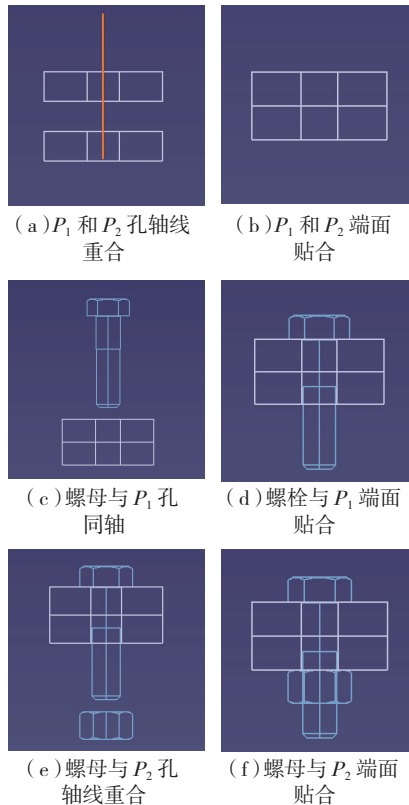


图7 特征约束转换

使用这两种约束。

(2) 规则实例化。

结合特征实例生成几何约束。“螺栓—螺母联接” 实例化为:

- (a) 两零件孔轴线共线, 如图 7 (a) 所示;
- (b) 两零件的端面贴合, 如图 7

(b) 所示;

(c) 螺栓与  $P_1$  孔的同轴, 如图 7

(c) 所示;

(d) 螺栓与  $P_1$  端面贴合, 如图 7

(d) 所示;

(e) 螺母与  $P_2$  孔的同轴, 如图 7

(e) 所示;

(f) 螺母与  $P_2$  端面贴合, 如图 7

(f) 所示;

(3) 装配特征调整。

如图 7 所示, 零件  $P_1$ 、零件  $P_2$  先后与螺栓和螺母进行装配。零件  $P_1$  和零件  $P_2$  装配后, 两者的装配体继续与螺栓进行装配, 因此需要更新描述装配体特征, 零件  $P_1$  和  $P_2$  装配完成后的装配体应呈现为孔特征。零件  $P_1$  未装配前的下端面和零件  $P_2$  未装配前的上端面这两个几何特征不再以装配特征出现,  $P_1$  的上端面为  $P_1$  和  $P_2$  装配体的上端面,  $P_2$  的下端面为  $P_1$  和  $P_2$  装配体的下端面。  $P_1$  和  $P_2$  装配体的轴线特征更新为  $P_1$  的轴线, 如图 7 (b)。

## 结论

本文对典型飞机产品的装配建模进行了研究及归纳, 提出一种基于装配特征的零件装配建模方法和实现思路。该方法主要包括基于装配特征的建模和装配关系的特征语义表达两个方面, 由用户根据装配特征定义产品装配模型, 然后由程序自动将基于特征约束的装配模型转换为常规的基于几何约束的装配模型, 从而实现快速装配。研究了装配特征表示, 基于特征约束的装配模型和约束转换等关键技术, 并以 “螺栓—螺母” 结构快速装配为案例, 验证了所提出方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 卜炎. 螺纹联接设计与计算. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [2] 邱宣怀. 机械设计. 北京: 高等教育出版社, 1989.

(责编 春早)