

# 航空复杂产品协同设计的几个基本问题\*

Several Basic Problems About Collaborative Design  
for Aviation Complicated Products

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 莫 蓉



莫 蓉

西北工业大学教授, 博士生导师。  
主要研究方向为协同设计、航空发动机数字化设计、基于知识的产品设计。航空学会工艺专业分会会员, 发表论文 100 余篇, 获省部级以上奖 2 项。

航空复杂产品具有几何结构复杂、性能要求高、信息量大、涉及学科多、制造工艺复杂、试验环节多、研制周期长等特点, 使得航空产品

异地、异构、异步的特点对航空产品研制过程的协同和信息共享都提出了更高的要求, 迫切需要从方法、环境、协同模式等方面研究航空产品协同设计中的关键问题, 以缩短航空产品的研制周期。

的研制难度大大增加。在航空产品的全生命周期中, 历经设计、分析、制造、装配、试验、维护各阶段, 涉及了气动、结构、强度、传热、试验分析、工艺规划、加工、装配协调、后勤保障等多个学科专业和领域, 需要上述领域的部门和单位密切配合, 才能实现航空产品研制的高效率、高质量、低成本。航空产品的多厂所和多学科研制特点反映了产品开发的协同性; 不同企业具有的不同开发环境, 面向不同应用配置的各种应用系统, 形成了开发环境的异构性; 分布合作的多单位构成了协同工作的异地特点; 航空产品开发各部分工作具有的关联性和各自工作局部开展具有时序上的异步性, 这些异地、异构、异步的特点对航空产品研制过程的协同和信息共享都提出了更高的要求, 迫切需要从方

法、环境、协同模式等方面研究航空产品协同设计中的关键问题, 以缩短航空产品的研制周期。

航空产品是复杂产品的典型代表, 波音飞机和空客的协同研制数字化技术, 一直是数字化领域的典范和标杆, 堪称数字化先进制造技术的里程碑。随着产品越来越复杂, 多企业甚至多国共同参与合作的产品研发模式成为一种发展趋势, 这就需要有功能强大的协作平台的支持。从协同设计的应用基础和应用研究的角度看, 在应用基础方面, 包括协同设计系统框架、分布式 CAD 系统<sup>[4]</sup>、协同环境及工具开发<sup>[5-9]</sup>、协同工作方法等从不同角度研究了协同平台支撑技术, 从应用研究方面, 阐述了在 PLM 环境下多企业协同工作的方法和途径, 我国航空企业在协同设计方面也已经开展工作积累了经验<sup>[10-12]</sup>,

\* 国家自然科学基金(50805122)、863 高技术(2007AA04Z184)项目资助。

如 ARJ21 支线飞机的研制就是多企业异地合作成功的范例。

本文针对航空产品研制的协同设计需求,论述了协同设计的关键技术,提出协同设计的整体解决思路。

### 协同工作平台

计算机支持的协同设计文献中有不同的定义,本文所指的协同设计是指在计算机网络环境下,分布在不同单位和部门的设计人员,围绕同一个航空产品的型号设计任务,并行交互协作地进行设计,共同完成航空产品设计的一种协同方法。这里的设计是一种广义的设计概念,包含了产品设计、工艺设计、工装设计等。

协同设计理想的工作过程是:协同团队成员通过协同平台对设计方案讨论修改;共享产品数据和设计资源;通过协同流程发布产品数据并可反馈信息,异地用户可通过网络动态获取阶段性设计结果,有效地实现团队成员的协同交流。

#### 1 基于能力集成的协同平台

协同工作平台是支持协同工作的基础支撑,它除了必需的软硬件环境外,还需满足协同设计和协同流程

的特殊要求,配套与协同相关的规范、资源库、知识库以及协同工作模式,并将上述内容以数字化形式变成平台支撑的一部分,例如协同流程的规范可以通过流程模板固化下来,协同流程不同节点的异地执行可以通过多企业 PDM 系统之间的功能集成系统保证。目前的协同平台的体系架构一般是在 PLM 基础上扩充的,因此需明确协同工作平台应具备的功能,使协同平台发挥最大能力。

(1)集成能力。能够进行数据集成,集成各种数字化系统的数据信息;过程集成,通过 workflow 集成多学科多专业的协同设计过程;企业集成,通过网络节点把异地多企业的相关业务集成在一起形成一个动态联盟;工具集成,为各种数字化应用系统提供互操作能力;知识集成,为协同设计提供知识、规范标准、方案等知识。

(2)基础资源库。航空产品的协同设计是一个庞大的系统工程,离不开各种数据库的支持。数据库不仅包括以结构化为基础的关系数据库,而且包含非结构化数据库(如 XML 库和图形数据库等)。知识库

则是具备了推理、挖掘、决策功能的数据库。

(3)协同工具。协同工具是支持协同工作的使能系统,包括消息处理系统,协同会议支持系统,同步异步协同工具等。如基于 WEB 的同步协同工具,为异地用户提供网络环境下的方案讨论和互操作能力。同步协同工具是一种新型的基于网络的 CAD 系统,它将 CAD 和网络融为一体,其架构完全不同于传统的 CAD 系统,用户在客户端可以交互操作 CAD 模型,网络会议的其他客户端用户可以看到发言用户的 CAD 操作,“所见即所得”,是一种超越时空的方案讨论协同环境。这种环境形成了分布式网络 CAD 系统,如 Alibre 等。协同平台框架如图 1 所示。

#### 2 协同工作方式

协同工作是一种跨越时空的工作方式,在时间上可分为异步协同和同步协同,在地域上可分为同地协同和异地协同,在系统结构上可分为同构协同和异构协同,这些对协同平台的功能也提出了要求。

##### 2.1 同步协同与异步协同

产品研制过程的协同设计在时间上以同时在线和错时在线表示了 2 种不同的协同需求,一般应以异步协同为主,同步协同为辅。

(1)异步协同设计。异步协同设计是一种高效率的设计方式,协同工作的用户大部分时间并行独立工作,只在需要协同的时候才去和其他用户交流。异步协同的工具通过消息机制互相沟通,包括数据、文件、消息等,例如产品设计和工艺设计之间,装配体的各部件之间的设计均以异步协同设计为主。目前的 PDM、PLM 系统都是一种支持异步协同工作方式的系统。

(2)同步协同设计。同步协同设计是一种协同用户同时在线的协同工作方式,其主要功能是通过网络环

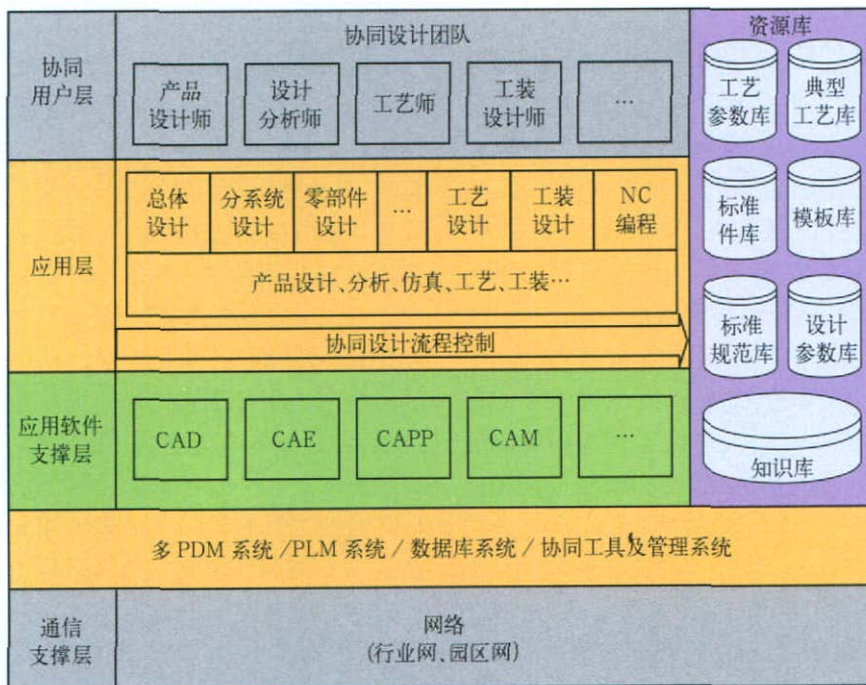


图1 协同平台框架

境下的交互式 CAD 工具对产品设计进行讨论和操作,例如 CAD 模型的同步编辑、同步标注,所有与会人员均可申请发言,示范自己对 CAD 模型的操作和理解,网络上其他用户均可实时浏览,同步协同主要适用于方案讨论或者会议讨论的工作形式。在系统结构上同步协同比异步协同技术复杂得多,主要难点是 CAD 系统在网络环境下的互操作,目前传统的 CAD 和 PLM 系统主要支持异步协同,在同步协同方面存在不足。而完全支持同步协同的系统与异步 PLM 系统在架构上的集成有待进一步研究。

## 2.2 同地协同和异地协同

网络缩小了同地和异地的差距,形成了多企业的异构环境和异地分布的网络格局。同地可以理解为地理上的同一个位置,也可以理解为企业的局域网或者园区网内的环境,形成相对独立自治的具有单一 PLM 系统的协同环境。异地协同是处于不同地域的航空企业通过园区网-行业网-园区网进行协同工作,不同的园区网具有自己的 PLM 系统,多企业在信息共享、数据有效性、单一数据源、安全性、多企业 PLM 之间集成等方面对协同平台提出了更高的要求。

## 2.3 同构协同与异构协同

由于航空产品研制涉及企业多,异地分布广,行业和企业的环境配置构成了同构和异构系统。即使是同构系统,还存在异地多企业 PLM 系统集成以及不同版本的信息共享问题,异构环境的协同则更加复杂,包括 CAX 和 PLM 系统的异构,在协同流程、单一数据源和数据有效性方面都需要协同平台提供支持,大大增加了开发成本和维护成本,因此行业整体规划应尽可能考虑同构系统。系统配置有如下几种:

(1) 单一企业同地同构环境。产品(作为航空产品成品件或部件)

的设计制造基本上可由单一企业完成,设计制造协同环境属同地同构,设计-设计、设计-工艺协同均在企业内的协同平台上完成,企业间协同通过行业网和协同规范确定。

(2) 多企业异地同构环境。行业内各企业统一构建 CAD/CAM 和 PLM 协同环境,企业间的业务协同,如设计-设计、设计-工艺是跨企业协同,在协同流程、数据共享、单一数据源上需要协同规范约束和功能强大的系统支持,例如航空发动机行业的同构 PDM 系统需 Global-TC 支持多站点异地协同。行业的同构系统升级应同步进行,以避免协同发生困难。

(3) 多企业异地异构环境。行业内多企业合作,异地异构协同一般支持松散的协同方式,主要在模型共享、分系统接口之间的协同提供支持,通过异构系统的专用接口或中性接口实现模型共享,但是难以实现互操作,也无法实现同步协同。

## 协同工作基本要素

航空产品协同设计是多方共同协作为实现一个共同的目标和完成产品项目而进行的一种多企业联合开发的一种形式。协同工作就是协同团队成员在协同工作流的管理下,按照协同工作规范工作,保证在正确的时间把正确的数据以正确的格式通过正确的地址传输给需要的人。包括协同团队构建、跨企业协同工作流和协同规范标准制定等。

### 1 协同团队

由于国内的单位分工和建制因素,协同团队以集成产品开发的并行设计团队的形式存在,团队的主要工作形式有:

(1) 跟设队和跟产队形式:在条件允许的情况下,应尽可能互派成员到对方工作区域内进行同地工作,以提高工作效率。

在产品的设计阶段,工艺人员应融

入到设计所,进行初步工艺方案评审和产品的 DFX,这种形式称之为“跟设队”。在实际工作空间开辟同地办公区域,便于协同讨论,或者通过服务器开辟专用协同数据区,或者通过网络双方互为对方建立协同工作区进行异地协同工作。

在详细工艺设计和制造阶段,协同团队的产品设计人员要跟产,对工艺设计中出现的问题进行协同化处理,这种形式称之为“跟产队”,如工程更改和信息反馈,在协同流程和协同规范的约束下,实现产品数据的有效性和可追溯性。

(2) 完全通过网络形式:团队成员之间所有的协同通过网络,包括支持方案讨论的同步协同和支持并行工作的异步协同,需要各种协同工具的支持。

## 2 协同工作流

复杂产品协同工作流有多种形式:

(1) 支持技术协调的协同流程。技术协调双方或多方通过协调的问题描述、原因分析、最终协调结果等步骤,实现设计-设计间的协同流程,需在规范化约束下进行,协同流程结束后需提交相关的模型信息。

(2) 以审批流程形式表现的协同流程。在逻辑上以审批流程控制设计向制造的信息发布,以完成流程控制产品的更改和数据的更新。在设计的并行度上以产品设计的成熟度控制信息发布的时机,例如定义适当的成熟度等级,达到等级即可向下游发布产品信息,便于下游的生产准备和关键技术攻关。在支持环境上,涉及异地异构的流程需要流转不同的节点,并且伴随流转提供附带的模型等各种信息。在流程管理上,流程的分支、汇聚需分解为不同的子流程,并在异地异构的约束下与审批流程和更改流程对应起来,使得审批流程和更改流程能够满足航空产品工作流的控制。

(3)子流程形式。一个节点的审核由另外一个流程完成,这个流程即为子流程。如图2所示为一个航空产品典型零件的满足指定成熟度的异地审批流程的逻辑表示,其中工艺评审的协同单位是一个异地制造企业,流程和子流程事先已按流程规范分别定制为模板,并存储在各自的协同平台上。在工艺评审节点,通过异步协同和消息机制,将零件的三维模型、二维图样、BOM等信息通过网络发送到企业协同平台中指定的数据审核区域,企业启动工艺评审子流程,获取数据信息,进行相应的工艺评审,并将评审结果按照规范的格式反馈给设计部门。(注:子流程可以异地审核,也可在一个同地协同平台上开辟一个特别的区域进行评审,根据协同团队之间的系统布局确定)。

### 3 协同工作规范

功能强大的平台是基础,高素质的协同团队是协同的执行者,还需要协同工作规范的约束,才能使协同工作协调有效地进行。如与产品研制过程相配合的协同流程规范,与并行工程配套的协同产品数字化定义规范和协同工作团队规范、基于模型共

享的产品建模规范、各种资源库规范等。协同工作规范的内容很多,重点是应规范协同设计的各种模型和信息的产生方法、传输、共享、流程、更改、工作模式、信息内容等。

## 协同设计工作模式

协同设计是多方合作共同完成确定的目标。但是在整个设计过程,根据研制阶段所处的生命周期的位置,可以以某个阶段为重点,分为:设计-设计协同、设计-工艺协同,企业根据承担的任务,与不同的单位进行协同,协同可发生在企业内和企业间,如图3所示。

### 1 设计-设计协同

在设计-设计协同阶段,企业间、部门间、学科与专业间的协同贯穿于整个设计过程,其协同主要涉及总体与分系统之间、部件与部件之间、学科与专业之间、设计与工艺之间在结构、性能、可制造性方面的配合协调,使得最终产品整体性能最优。

(1) 总体与分系统和部件之间的协同设计。总体设计确定了产品的总体架构和各分系统,如总体与各

分系统之间、总体与各部件之间的设计分离面,在总体和分系统之间、总体和部件之间、部件和部件之间、部件和零组件之间都存在多次协调反复修改优化的过程,多个设计所之间存在异地协同的工作方式。

(2) 学科专业之间的协同。航空产品在气动-结构-强度-热传导等多学科的协同,设计-分析-修改的多次循环是一个典型的协同过程,为达到模型共享和总体性能最优,需要研究面向多学科协同建模问题和学科之间的数据管理问题,包括仿真数据管理与产品数据管理之间的数据共享和混合式管理。

(3) 多学科建模的相关性。相关性包括几何相关性、性能相关性和信息相关性。几何相关性在结构设计中关系到整体、部件、组件和零件之间在空间上的协同以及结构和形状上的几何参数之间的关系,关键参数的修改会影响到其他部分的改变;性能相关性关系到产品各部分的性能优化和相互之间的影响,并最终影响到结构;信息相关性为非几何信息的相关性,如材料工艺之间的相关性等。

### 2 设计-工艺协同

在大设计的概念下,设计-工艺协同是伴随着产品设计过程进行的。广义的工艺设计从型号研制初期就开始介入,早期开展的有工艺总方案可行性分析、关键技术提炼和新技术跟踪等。在详细设计-工艺协同中,主要的协同是:

(1) 设计-工艺-工装-加工的协同建模。包括面向不同应用所需的三维模型、二维图样、NC模型和其他信息模型,这些模型之间的关联、继承、共享、派生、约束等关系均应在协同建模规范中予以确定。

(2) DFX及可制造性分析。包括零件的可加工性,产品的可装配性、制造工艺的成本评价和控制等。例如航空发动机整体叶盘的弯扭程

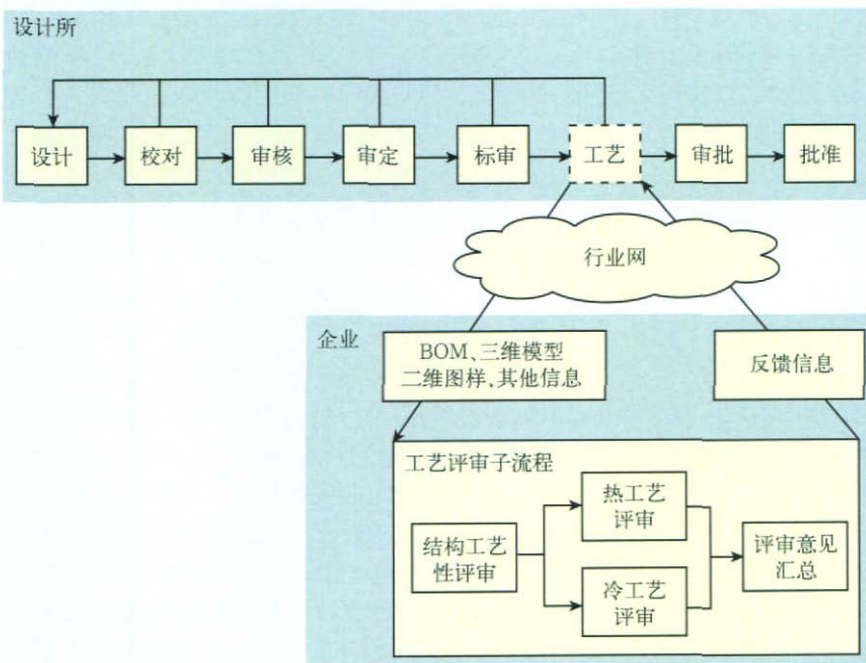


图2 跨企业协同工作流

度与叶片间距的约束可能导致不可加工,涡轮叶片的最小厚度可能导致铸造质量不能保证,这些均可造成产品结构的修改;设计给出的过于严格的公差等工艺要求可能导致成本急剧上升,造成生产准备周期延长,质量难以保证,需要协同团队成员多次协调完善设计。

(3) 协同流程的执行(工艺会签、设计数据发放管理、工程更改管理、制造现场问题反馈与交流)等,如图2所示。

(4) 产品-典型工装设计协同。工装设计相对于产品设计既有相对独立性,又和产品结构形状紧密相关,例如飞机的型架设计、钣金设计,

要利用工装与产品的相关性,包括协同建模模型共享和信息集成等都是协同的主要内容。

## 结束语

在数字化环境下,多厂所异地协同设计导致不同企业具有不同数字系统和PLM系统,异构的设计环境、异地的分布厂所都为协同设计提出了现实的问题。本文较为全面地描述了以能力为核心的协同工作平台架构,阐述了异地、异构、异步的工作方式,以及协同工作流程的异地审批和大设计环境下的协同工作模式。在协同流程方面,针对跨企业的多PLM系统以及以审批流程形式表达

workflow管理的特点,以协同流程的工艺评审节点为例说明了跨企业的流程审批过程,实现在不同PLM之间通过接口和消息机制将工艺评审的各种信息发布给工艺评审部门,通过制造企业内部的审签流程,并最终反馈审批结果,实现工艺节点的评审。在大设计的概念下,将产品设计-工艺设计-工装设计-NC编程纳入设计的范畴,其中后面3个阶段的设计介入前期的产品设计,为DFX提供了参考依据。

本文有参考文献12篇,因版面有限示能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 金卯)

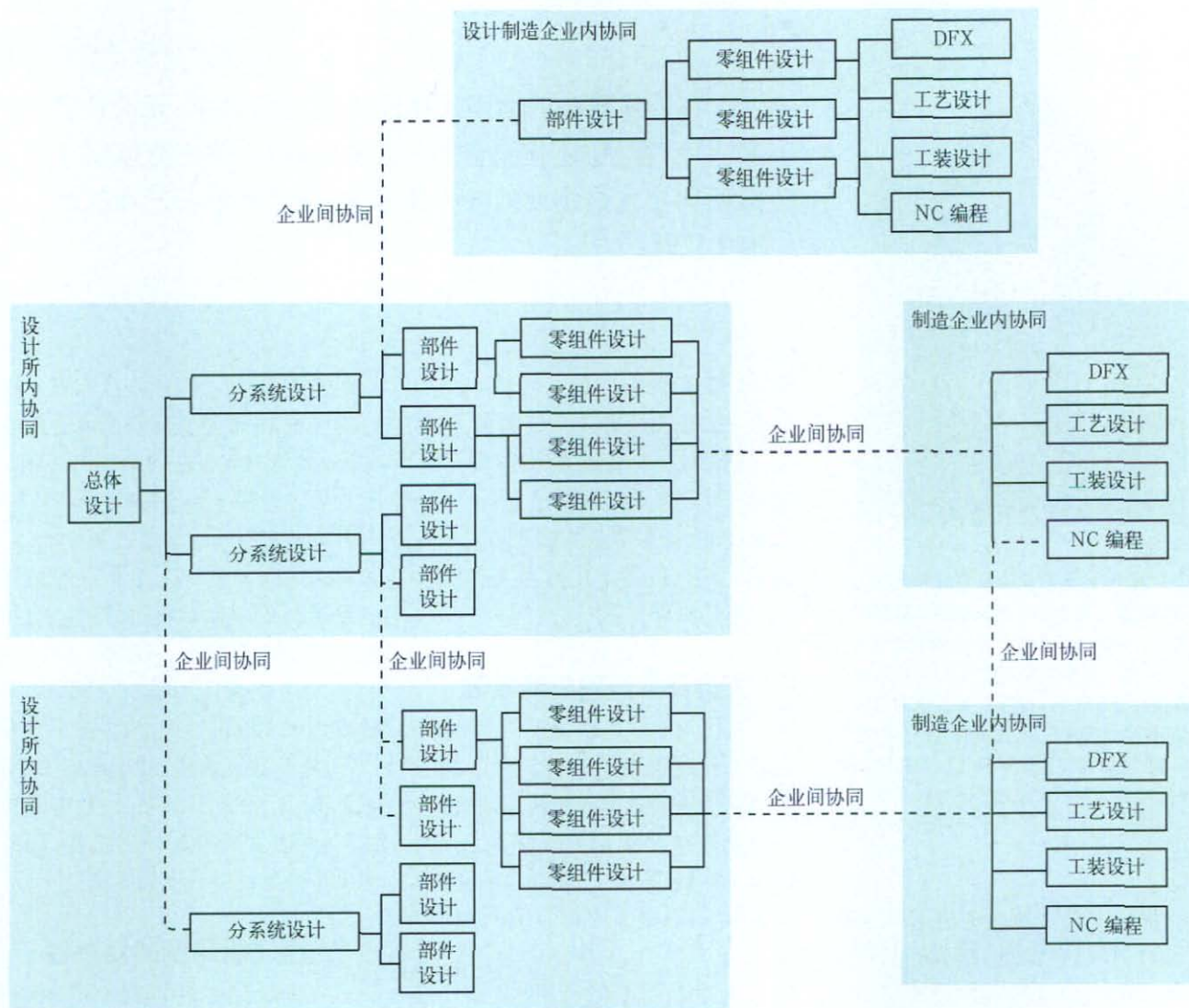


图3 企业内协同和企业间协同