

协同环境中基于轻量化的 3D 异构 CAD 模型干涉检查

刘清华 李 帅 刘云华 万 立

华中科技大学国家 CAD 支撑软件工程技术研究中心, 武汉, 430074

摘要:为了解决异构 CAD 产品模型干涉检查比较困难等问题,提出了一种基于轻量化模型的对异构 CAD 产品模型进行干涉检查的实现方法,利用轻量化模型的精细度模型,采用分层过滤的方法,实现了快速干涉检查,并对干涉结果从可视化显示和分析报告两方面进行处理,然后将协同设计插件作为设计端与协同设计管理平台(PLM)的中间层,及时把干涉检查结果发布给设计者以便作出修改。该方法已经在商品化的产品设计可视化平台 InteVue 中得到应用,应用结果表明,其干涉检查结果可以作为模型设计的有效参考。

关键词:异构 CAD;干涉检查;轻量化模型;协同设计

中图分类号:TP391

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.012

Collaborative Supported 3D Heterogeneous CAD Model Interference Checking Based on Lightweight Model

Liu Qinghua Li Shuai Liu Yunhua Wan Li

National CAD Support Software Engineering Research Center,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: To solve 3D Heterogeneous CAD interference checking problems, a new method based on lightweight model was proposed. Using lightweight model and subdividing the set of the possible interference components step by step, this method can finish interference checking quickly and the results can be handled well by both visualization and analysis reports. Then, the results were sent to designers through a collaborative tool based on PLM managing the model designing and interference checking, which enable designers obtain the accurate feedback as quickly as possible to modify the original 3D models and make collaborative work among designers much easier. The proposed method has been implemented in a commercial 3D browser named InteVue and the application result shows that it can be used as a strong reference during 3D heterogeneous CAD model designing.

Key words: heterogeneous CAD; interference check; lightweight model; collaborative design

0 引言

随着现代企业产品复杂度和技术含量的提高,单一企业常常受到技术和资源等方面的限制,不能胜任产品开发的全过程,必须进行跨专业、企业、地域的合作以获得整体优化。当前三维模型已成为表达产品信息的核心媒介,在产品模型设计的过程中,各企业根据自身发展需要会选择合适的三维 CAD 系统,甚至同一企业内部也同时存在多种三维 CAD 系统,造成了产品模型往往由异构的 CAD 模型组成,异构 CAD 模型装配和干涉检查困难。此外,目前由于协同设计管理平台(PLM)在企业中的广泛使用,使得在协同的环境中快速准确地实现异构 CAD 模型的干涉检查

需要解决的问题更多。本文在分析目前解决异构 CAD 模型干涉检查过程中存在问题的基础上,结合协同设计管理平台,提出一种基于 3D 轻量化技术异构 CAD 模型快速干涉检查方法,对该方法的体系结构和干涉检查原理算法等关键技术进行讨论并给出了软件实现和应用实例。

1 异构 CAD 模型干涉检查问题分析

目前异构 CAD 模型干涉检查方法主要有两种,第一种方法是将异构 CAD 模型转换为中间几何文件格式(STEP、IGES、SAT 等)^[1],然后在单一的三维系统中完成装配和干涉检查。这种做法存在如下问题:①各三维系统对中间格式的支持标准不尽相同,不同系统生成的中性文件并不一定能在其他系统中正确打开;②中间文件为了保证其通用性,牺牲了模型显示速度,导致中间文件在显示速度上效率很低,尤其是大装配体模型,打开时间长;

收稿日期:2011-11-05

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目
(2007AA040603)

③各三维系统转换的中间文件的数据可能不一致,在三维系统中装配困难,在此基础上所做的干涉检查的精确性得不到保证。总的来说,这种方式难以适应异构 CAD 模型快速干涉检查。第二种方法是将异构的 CAD 模型导入单一的三维系统中,完成装配过程,然后利用三维系统中的干涉检查功能对其进行干涉检查。这种做法存在如下问题:①在单一的三维系统对异构 CAD 模型进行干涉检查时,导入异构 CAD 模型时装配树会丢失,无法准确定位干涉部位;②单一的三维系统对其他三维系统的支持程度有限,不能支持所有的主流三维系统,而且对所支持的三维系统的版本也有限制要求。另外,协同设计管理平台的应用,使设计工作在网络协同的环境下进行,设计完成的模型文件通过协同设计管理系统实现资源共享,在这种情形下,上述两种方法又都会存在以下问题:①对于较大的 CAD 模型,尤其是中间文件可能比模型的原始文件更大的 CAD 模型,网络传输效率低;②原始 CAD 模型对于设计者是透明的,这使产品数据的安全性得不到保证。

针对异构 CAD 模型干涉检查存在的问题,本文采用一种基于 3D 轻量化技术的异构 CAD 模型干涉检查方法进行干涉检查。该方法利用三维模型轻量化技术,首先将异构 CAD 模型转换为统一的轻量化模型,将异构 CAD 模型的轻量化模型进行预装配,利用轻量化模型的多层次精细度 LOD 模型,设计一种新的逐层过滤干涉检查算法,最后根据轻量化模型的干涉情况来确定原始异构 CAD 模型干涉情况。该方法使设计者能够对干涉检查的结果作出很快的响应。设计了一种基于协同设计管理平台 PLM 的协同插件,从而能充分利用企业的协同环境实时快速地进行干涉检查。

2 异构 CAD 模型干涉检查

2.1 异构 CAD 模型轻量化和装配

要对异构 CAD 模型进行干涉检查,首先需要对其进行同构处理,即将异构 CAD 模型转换成统一格式的轻量化模型。本文所采用的轻量化实现方法是笔者前期对产品模型轻量化进行研究的成果^[2-4]。该方法中多层次三维几何模型轻量化表示的文件结构关系如图 1 所示,借鉴当前三维平台中将装配文件与零件分开的做法,用不同的文件记录装配信息、零件显示和几何信息。将显示信息和几何信息关联起来,既可快速显示,还保留了零件的几何和拓扑信息。

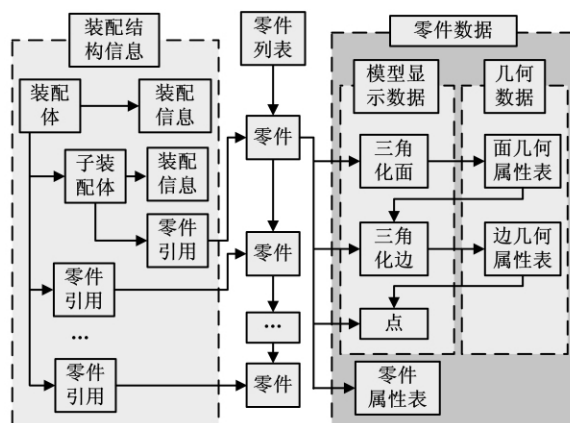


图 1 轻量化文件数据结构

装配结构信息包括子零部件的数量、名称、相对位置、配合关系,以及零件几何显示属性等。零件列表记录零件信息,零件列表中的零件不直接显示,根据其在不同装配下的引用生成一个显示实例,然后利用该零件在装配体下的变换矩阵实现在整个装配模型的正确显示。零件数据包括显示数据和几何数据。显示数据利用三角面片来实现,模型显示数据包括三角化面、三角化边和点信息。三角化面和三角化边实际上是对几何模型中的面和边进行三角化之后的结果。三角化面和三角化边以几何模型中的面和边为单位进行组织,实现显示数据与零件几何数据的一一对应,有利于在图形区进行交互选择和显示。利用另外一个链表来记录与三角化面和三角化线对应的几何信息。面几何信息包含了对构成面边界的三角化边的引用,在边的几何信息中记录了边端点的引用。这样就将零件的显示信息和几何信息关联起来,形成零件完整的几何拓扑结构,既可快速显示零件的几何模型,还保留了零件的几何和拓扑信息。

采用该轻量化模型作为异构 CAD 模型干涉检查的实际处理对象,有以下优点:①该轻量化模型支持多精细度 LOD 模型,是本文干涉检查算法原理的基础;②轻量化文件大小一般为原模型的 1/50 到 1/10 之间,网络传输方便;③文件数据结构也可以使原始模型的装配树保留,既有利于干涉检查的计算,又可在结果处理中准确定位干涉项;④文件数据中的显示信息和几何信息,保证了干涉检查计算过程中精确的几何数据,显示信息使干涉检查结果能进行可视化处理。

本文对异构 CAD 模型装配的解决方法,采用了三维模型常用的自顶向下的建模方法。以汽车模型设计为例,首先构建整车骨架模型,其中包括定义整车各零部件的基准坐标系、约束关系等,然后把相关骨架模型和设计文档提交到协同设计

管理平台 PLM 中。各汽车零部件设计者根据实际需要选择合适的三维平台,并在骨架模型和相关设计文档的整体框架下初始化零件的基准坐标系等,完成零件设计,然后将各异构三维模型生成轻量化模型,提交到 PLM 管理系统中。要对异构 CAD 模型进行干涉检查,首先从 PLM 中获得相关异构 CAD 模型的轻量化模型,因为各模型的装配约束关系在骨架模型中已定义,所以将轻量化模型按其自身的绝对坐标放置,即完成了模型装配。

2.2 异构 CAD 产品模型干涉检查原理

模型干涉通常分为静态干涉和动态干涉两种。静态干涉是指模型在空间中的位置是可变化的,但不随时间变化;动态干涉与时间相关,即物体在空间中的位置是随时间变化的。干涉检查也分为静态干涉检查和动态干涉检查两种。本文研究异构 CAD 模型的干涉检查,要求轻量化模型在空间中的位置是可变化的,即装配零部件的结构尺寸可更改,但模型在装配空间中的位置并不随时间而变化,所以本文讨论的重点是静态干涉检查。目前常见的干涉检查算法及存在的问题如表 1 所示。

表 1 常见的干涉检查算法及存在的问题

常见算法	存在的问题
空间分割法	互为包含关系的两物体会误判
分离平面法	对异常情形无法处理
对象分解法	会陷入死循环
包围盒算法	运算量大或实现难度较高
距离法	局限于特定模型,距离值难确定
图像空间法	对计算机硬件要求高

本文在包围盒干涉检查算法^[5-6]的基础上结合轻量化模型的 LOD 模型数据结构,提出一种逐层过滤可变精度快速干涉检查的方法,并利用可视化技术对干涉检查结果进行处理,其干涉检查基本流程图如图 2 所示。

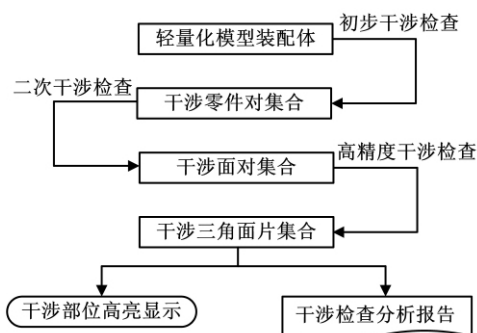


图 2 干涉检查流程图

采用的轻量化模型所支持 LOD 模型的三级显示分别为零件的包围盒、面包围盒以及实际的面片三角面片模型。两部件发生干涉的必要条件

是它们的包围盒相交,本文干涉检查方法的基本思想是通过 LOD 模型的三级显示模型来逐层过滤发生干涉的对象,最大限度地用定性干涉检查的方法剔除包围盒不相交的部件,尽可能地减少精确干涉检查的次数和缩短干涉检查的时间。

2.3 异构 CAD 产品模型干涉检查

2.3.1 初步干涉检查

干涉检查的过程是干涉集逐渐缩小的过程。初步干涉检查时,在装配体的各级子零部件集中利用零部件包围盒来定性剔除不相交的零部件,逐步缩小干涉集。初步干涉检查得到的结果为干涉零件对。以对装配中的零部件 P 进行初步干涉检查为例说明本文方法。记总装配体为 A_{00} ,其子装配层为 n 。

算法 1:

(1) 初始化干涉集 $C_0 = \{A_{10}, A_{11}, \dots, A_{1n}\}, k=1$ 。 k 为装配树的层级序数,装配体的根层序数 $k=0$ 。

(2) 遍历 C_k ,对 $\forall A_{ki} \in C_k$,判断 A_{ki} 与 P 的包围盒是否相交,如果不相交,则将 A_{ki} 从干涉集 C_k 中剔除。

(3) 遍历 C_k ,对 $\forall A_{ki} \in C_k$,判断 A_{ki} 是否为子装配体。如果是,则将 A_{ki} 分解为零部件集 $\{A_{(k+1)0}, A_{(k+1)1}, \dots, A_{(k+1)l}\}$,并把该零部件集加到本层干涉集 C_{k+1} 中,然后遍历 C_{k+1} ,重复步骤(2);如果 A_{ki} 不是子装配体,则把 A_{ki} 加入到待处理的零件干涉集 C 中。

(4) 判断 C 是否为空,如果为空,则干涉检查结束, P 与 A_{00} 没有发生任何干涉;否则执行下一步,零件干涉集 $C = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, a_i$ 为 C 中的零件。

(5) 判断 P 是否为零件或装配体,如果 P 为零件,则记初步干涉检查结果为干涉零件对集 D ;如果 P 为装配体,将 P 分解为零部件集 $\{P_{10}, P_{11}, \dots, P_{1e}\}$ 。遍历 C ,对 $\forall a_i \in C$,将 a_i 和 $\{P_{10}, P_{11}, \dots, P_{1e}\}$ 作为输入参数重复步骤(1),记与 a_i 发生干涉的零件集为 $\{p_1, p_2, \dots, p_f\}$,然后将干涉零件对 (p_j, a_i) 加入到 D 中。

(6) 判断 D 是否为空,如果是,则 P 在总装本体 A_{00} 中没有发生干涉;否则记干涉零件对集 $D = \{(p_i, a_j) \mid i=1, 2, \dots, n-1; j=1, 2, \dots, m-1\}$ (这里的 m, n 分别为 A_{00} 和 P 的零件总数)。

2.3.2 二次干涉检查

二次干涉检查是对初步干涉检查的结果作进一步干涉检查,以缩小干涉集。在该过程中,利用组成零件的面片包围盒是否相交来定性剔除不相

交的零件。本次干涉检查的结果为成对的干涉面组成的集合。在 D 中取干涉零件对 (p, a) 进行分析判断。

算法 2:

(1) 将 a 分解成各组成面 $\{f_{a0}, f_{a1}, \dots, f_{an}\}$, 对 $\forall f_{ai} \in a$, 求面 f_{ai} 与零件 p 的包围盒, 判断包围盒是否相交, 如果相交, 则将 f_{ai} 加入到待处理的干涉集 C_a 中, $C_a = \{f_{a0}, f_{a1}, \dots, f_{ak}\} (k=0, 1, \dots, n)$ 。

(2) 判断 C_a 是否为空, 如果为空, 则零件 p 与 a 没有发生干涉, 否则执行下一步。

(3) 将 p 分解成各组成面 $\{f_{p0}, f_{p1}, \dots, f_{pm}\}$, 对 $\forall f_{pi} \in p$, 求面 f_{pi} 与零件 a 的包围盒, 判断包围盒是否相交, 如果相交, 则将 f_{pi} 加入到待处理的干涉集 C_p 中, $C_p = \{f_{p0}, f_{p1}, \dots, f_{pl}\} (l=0, 1, \dots, m)$ 。

(4) 判断 C_p 是否为空, 如果为空, 则零件 p 与 a 没有发生干涉, 否则执行下一步。

(5) 对 $\forall f_{ai} \in C_p, \forall f_{pj} \in C_p$, 从 C_a 中取 f_{ai} , 从 C_p 中取 f_{pj} , 判断 f_{ai} 与 f_{pj} 的包围盒是否相交, 如果相交, 则将干涉面对 (f_{pj}, f_{ai}) 加入到本次干涉检查的结果集 E 中。

(6) 判断 E 是否为空, 如果为空, 则零件对 (p, a) 没有发生干涉, 不为空则干涉面集 $E = \{(f_{pj}, f_{ai}) \mid i=0, 1, \dots, n-1; j=0, 1, \dots, m-1\}$ (这里的 n, m 分别为零件 a 和 p 的总数量)。

2.3.3 可变精度干涉检查

组成轻量化模型的最小粒度为三角面片, 在三角面片的显示粒度上进行高精度的干涉检查, 确定最终发生干涉的位置、性质等参数。在本过程中, 可以附加干涉检查的临界值, 用定义中描述的发生干涉的条件, 判断干涉类别(软干涉和硬干涉)。在 E 中取一对干涉面 (f_1, f_2) , 干涉面 f_1 和 f_2 由若干三角面片组成, 对其进行精确干涉检查。

算法 3:

给出临界值 $tolerance$, 在该临界值下对干涉面 f_1 和 f_2 进行精确求交运算, 如果相交, 返回发生干涉的三角面片对 (s_{1i}, s_{2j}) , 并将其加入到发生干涉的三角面片集合 T 中, $T = \{(s_{1i}, s_{2j}) \mid i=1, 2, \dots, n-1; j=1, 2, \dots, m-1\}$ (这里的 n, m 分别为面 f_1 和 f_2 所含三角面片的总个数)。

由于 s_{1i} 记录了模型上的位置、颜色等参数, 从而能得到发生干涉的三角面片在模型上的具体位置, 也能确定在该位置时的相交程度以及干涉类型等。另外, 可以根据初始化的临界值的不同,

得到不同干涉程度情况下的检查结果, 实现干涉检查结果的定制化。

2.4 干涉结果的处理

在干涉检查完成后, 需要对结果进行处理, 以便直观地反馈给产品模型设计者。本文干涉结果处理的过程也就是对干涉面片集 T 处理的过程。对干涉结果的处理包括三个方面: ①选择性地显示干涉部位; ②生成干涉分析报告; ③干涉分析报告的发布。结合这三方面的处理, 形成完整的干涉结果处理方案, 再提交到产品模型设计端以作为模型修改的参考。

选择性地显示干涉部位的处理方式有: ①修改干涉部位面片的颜色属性来突出高亮显示; ②利用调整各零件的透明度来突出显示干涉部位。通过这种选择性可视化处理, 用户可以对干涉有很直观的认识。生成干涉分析报告后, 就对装配体干涉的计算结果进行整理, 按照产品装配设计中零件及其参数、装配关系等具体要求, 形成完整的干涉结果分析报告。干涉报告主要包括干涉精度、干涉项列表、零部件的设计者、修改时间、干涉项快照等。利用协同插件对设计端进行方便有效的管理, 通过建立各零部件与设计端的关联关系, 准确向各设计端发送相关的干涉报告, 作为返工修改的重要参考依据。

3 干涉检查实现和应用实例

3.1 异构 CAD 模型干涉检查实现

协同设计环境中基于轻量化模型的异构 CAD 模型干涉检查方法在华中科技大学 CAD 支撑软件工程技术研究中心开发的产品设计可视化平台 InteVue 中得到应用, 同时在笔者开发的基于 PLM 的协同插件工具 TeamCAD 也得到了使用。具体实现的体系结构如图 3 所示。

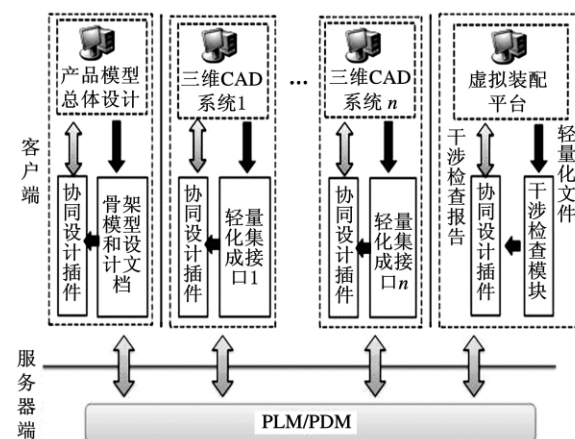


图3 异构 CAD 干涉检查体系结构

为了支持目前主流的三维 CAD 模型轻量化,在轻量化技术的基础上开发了对主流三维平台的轻量化文件的生成接口,将异构 CAD 模型生成符合该轻量化格式的轻量化装配体(.iva)和轻量化零件(.ivp)。协同设计插件是基于协同平台 PLM 管理系统的协同设计插件,与三维 CAD 系统和虚拟装配平台集成作为 CAD 端或装配平台与 PLM 交互的中间层。从图 3 可以看出,设计端不直接与 PLM 交互,这样能使设计者可以更专注于模型设计、装配或干涉检查等工作。另外,通过协同插件能够有效地管理干涉检查结果,使之合理使用,提高产品模型的设计质量和效率。

对异构 CAD 模型干涉检查的过程如下:

(1)产品总体设计者将产品总体骨架模型的布局模型及相关设计文档通过协同插件提交到 PLM;

(2)零部件设计者通过协同插件获得骨架模型和设计文档来定义零件设计的基准坐标系等,完成设计后通过轻量化接口生成轻量化文件,随原模型文件一同提交到 PLM;

(3)通过协同插件获得需要进行干涉检查异构 CAD 的轻量化模型,在产品可视化平台 InteVue 中按零部件的绝对坐标显示,即完成轻量化模型的装配;

(4)干涉检查工具对装配空间中的轻量化模型进行干涉检查,并处理干涉结果;

(5)通过与可视化平台集成的协同插件向发生干涉 CAD 模型的设计端发送干涉报告,设计者参考该报告修正三维模型,然后提交到 PLM;

(6)不断重复步骤(3)~(5),直到异构 CAD 模型符合设计要求。

3.2 应用实例

下面以某汽车车架的三维模型为对象进行实例分析。各设计部门在协同的环境中采用不同三维系统完成各零部件的设计,现对该车架的异构 CAD 模型进行干涉检查。该汽车车架模型由某汽车公司提供,轻量化零件已生成,以下主要是验证干涉检查过程:

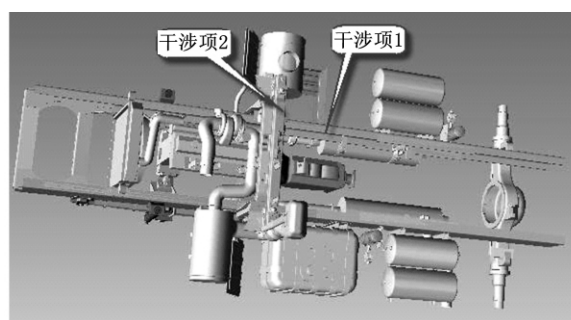
(1)通过与可视化平台集成的协同插件从 PLM 获取车架所有零部件的轻量化模型。

(2)将需要干涉检查的模型加载到可视化平台中,加载显示了组车架的所有零部件的轻量化模型。

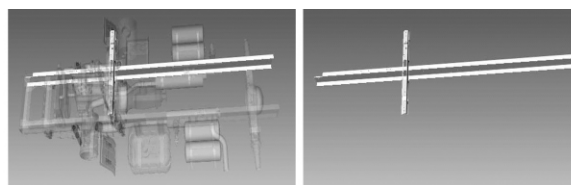
(3)在干涉精度为 0.5cm 下,对整个车架装

配体进行干涉检查时,共产生 692 处干涉。操作中也可以选中某个零部件,然后对其进行干涉检查,找出在当前的装配环境中,与其发生干涉的零部件。

对干涉结果的处理在显示属性方面有以下几种形式:①加亮显示干涉项 1 和干涉项 2,如图 4a 所示;②非干涉项透明,如图 4b 所示;③非干涉项隐藏,如图 4c 所示。上述形式可以与“放大干涉零件”叠加使用。另外还能生成干涉检查分析报告,对发生干涉模型的修改提供有效可靠的参考。干涉报告可根据具体的要求进行定制,如干涉检查精度只对某一项或几项进行特定的干涉检查,过滤可以接受的干涉项或不关注的干涉项,使干涉检查报告更具有针对性,效率也更高。



(a) 干涉项高亮显示



(b) 非干涉项透明

(c) 非干涉项隐藏

图 4 对干涉结果显示属性的处理方法

将所有干涉项的基本信息以相应的格式生成文本文件和干涉快照文件夹。通过协同插件记载每一个零部件相关信息,并将该装配体的干涉检查报告发送给相关设计端,因此设计者可以及时地根据干涉检查报告来修正各自的三维模型。

4 结束语

本文提出的干涉检查方法较好地解决了异构 CAD 模型干涉检查时存在的问题。将该方法应用到可视化设计平台 InteVue 中,成功地实现了干涉检查的功能。在国内某汽车制造企业的实际应用表明,该干涉检查方法可以帮助设计人员及时发现产品设计上的缺陷,降低了设计成本,提高了设计效率。

(下转第 77 页)

- 盘模态局部化的作用[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1):82-85.
- Wang Hongjian, Zhao Zhibin, He Erming. Effects of Frequency Veering Features on Mode Localization of Mistuned Bladed Disks[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(1):82-85.
- [7] 赵志彬, 贺尔铭, 王红建. 叶盘振动失谐敏感性与频率转向特性内在关系研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(12):1606-1611.
- Zhao Zhibin, He Erming, Wang Hongjian. Correlation between Frequency Veering and Vibration Mistuning Sensitivity of Bladed Disk[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(12):1606-1611.
- [8] 王建军, 于长波, 姚建尧, 等. 失谐叶盘振动模态局部化定量描述方法[J]. 推进技术, 2009, 30(4):457-461.
- Wang Jianjun, Yu Changbo, Yao Jianyao. Vibratory Mode Localization Factors of Mistuned Bladed Disk Assemblies[J]. Journal of Propulsion Technology, 2009, 30(4):457-461.
- [9] Kruse M J, Pierre C. An Experimental Investigation of Vibration Localization in Bladed Disks, Part I: Free Response[C]//42nd ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress. Orlando, Florida: ASME, 1997-492.
- [10] Judge J A, Ceccio S L, Pierre C. Traveling-wave Excitation and Optical Measurement Techniques for Non-contacting Investigation of Bladed Disk Dynamics[J]. The Shock and Vibration Digest, 2003, 35(3):183-190.
- [11] Jones K W. Mistuning for Minimum Maximum Bladed Disk Forced Response[C]//40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida: AIAA, 2004-3755.
- [12] 陈熠, 贺尔铭, 赵志彬. 失谐叶盘振动实验虚拟行波信号发生器的设计[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(5):736-740.
- Chen Yi, He Erming, Zhao Zhibin. Design of the Virtual Traveling Wave Signal Generator Used for Mistuning Bladed Disk Vibration Experiment[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(5):736-740. (编辑 郭伟)
- (上接第 60 页)
- 参考文献:
- [1] 邵晓东, 陈锋, 刘焕玲. 基于特征的异构 CAD 模型转换技术研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(1):60-64.
- Shao Xiaodong, Chen Feng, Liu Huanling. Study on Isomeric CAD Model Exchange Based on Feature[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(1):60-64.
- [2] 刘云华, 刘俊, 陈立平. 产品三维数据模型轻量化表示实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4):602-607.
- Liu Yunhua, Liu Jun, Chen Liping. Lightweight Representation for 3D Product Model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(4):602-607.
- [3] 刘云华, 陈立平, 钟毅芳. 利用设计历史实现异构 CAD 系统特征信息交换[J]. 中国机械工程, 2003, 14(21):1845-1847.
- Liu Yunhua, Chen Liping, Zhong Yifang. Exchange Feature Information of Heterogeneous CAD Systems by Design History[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(21):1845-1847.
- [4] 任延珍, 高峰, 张新访. 一种基于包容盒的逐层过滤的动态干涉检查方法[J]. 计算机应用与软件, 1999, 16(3):30-35.
- Ren Yanzhen, Gao Feng, Zhang Xinfang. A Dynamic Interference-examination Method with Gradual Filterings Based on Envelope Boxes[J]. Computer Applications and Software, 1999, 16(3):30-35.
- [5] 行开新, 田凌. 支持异地协同设计的异构 CAD 虚拟装配系统[J]. 清华大学学报, 2009, 49(2):226-231.
- Xing Kaixin, Tian Ling. Heterogeneous CAD Supported Virtual Assembly System for Distributed Collaborative Design[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(2):226-231.
- [6] 周之平. 面向虚拟装配的干涉检测关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2006.

(编辑 郭伟)

作者简介:赵志彬,男,1980年生。西北工业大学航空学院讲师、博士研究生。主要研究方向为复杂结构动力学建模与仿真。发表论文近10篇。贺尔铭,男,1964年生。西北工业大学航空学院教授、博士研究生导师。王红建,男,1968年生。西北工业大学航空学院副教授。陈熠,男,1988年生。西北工业大学航空学院硕士研究生。

作者简介:刘清华,男,1970年生。华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心副教授、博士。主要研究方向为产品数据管理、产品生命周期管理、CAD/CAM集成、协同设计。李帅,男,1987年生。华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心硕士研究生。刘云华,男,1974年生。华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心讲师、博士。万立,男,1963年生。华中科技大学国家CAD支撑软件工程技术研究中心教授、博士研究生导师。