

文章编号:1000-6893(2008)06-1722-09

飞机外形和结构件反求建模技术研究

谭昌柏, 周来水, 张丽艳, 卫炜, 王志国, 汪俊

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

Reverse Engineering of Aircraft Contours and Structural Parts

Tan Changbai, Zhou Laishui, Zhang Liyan, Wei Wei, Wang Zhiguo, Wang Jun
(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 探讨了基于特征的飞机外形和结构件反求建模策略,并给出曲面特征和实体特征的定义,该方法支持具有完整特征表达的模型快速重建。提出了大规模散乱数据 k -近邻的空间球搜索算法,其逐步增大搜索范围的策略可有效提高搜索效率。研究了结构件与外形相关曲面特征的重建方法,当贴合面较窄、外形线接近于直线时,采用直纹面逼近,否则由蒙皮曲面等距间接求取。研究了基于工程约束的曲面形状修改算法,以 B 样条曲面需满足的点、线、面几何约束为目标约束,通过最小化形状修改前后差曲面的弯曲能得到精确满足目标约束的光滑曲面,推导了曲面弯曲能和曲线约束的表达式。最后,以飞机翼肋模型反求为例验证了所提方法的可行性。

关键词: 模型重建; 飞机外形; 飞机结构件; 特征分解; k -近邻; 直纹面; 曲面形状修改

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A

Abstract: A feature-based model reconstruction strategy of aircraft contours and structural parts is discussed systematically in this article, and the definition of infrastructural surfaces and solid features is given. The proposed method enables rapid CAD model reconstruction with comprehensive feature representation, which is beneficial to design improvement or modification. A spatial sphere algorithm by gradually widening the search range is developed for searching the k -nearest neighbors of a measured point in a massive scattered point set, which improves the search efficiency greatly. Then, an approach to rebuild the surface feature of a structural part conjoint with the aircraft contour is proposed. That is, if the surface feature conjoins a skin with a narrow area, it is approximated by a ruled surface; otherwise it is deduced by offsetting the aircraft contour. Surface shape modification based on engineering constraints is also investigated, and a smooth surface satisfying a given point, curve, and surface constraints can be derived by minimizing the bending energy of the different surfaces between pre- and post-shape modification. Also the expressions of the bending energy and curve constraint for a B-spline surface are given. Finally, model reconstruction of a certain wing rib is provided to illustrate the validity of the proposed method.

Key words: model reconstruction; aircraft contour; aircraft structural part; feature decomposition; k -nearest neighbor; ruled surface; surface shape modification

逆向工程在飞机的改进改型中可发挥重要作用。如中国的歼 7、歼 8、运 8 等在役飞机,以前不是采用数字化的设计制造方法,没有建立全机数模或只有部分产品数模,仍采用传统的模拟量协调与数字量协调相结合的方法进行制造。通过逆向工程建立飞机外形、结构件等零部件及工艺装备的数字化模型,可充分发挥数字化的优势,实现智能化、集成化的产品数据交换,利用数字化设

计、数控加工、虚拟装配、有限元分析等数字化手段,缩短飞机的改进改型周期。近年来,中国的航空企业积极探索对外技术交流的途径,通过技术引进和产品外包制造服务的方式与国外先进的飞机制造企业开展合作,逐步提高自身的制造水平。在技术引进和对外合作中,由于种种原因,有时外方只提供了设计图纸、产品样件(样机)、工装实物,产品数模资料不全的情况也时有发生,通常需要根据实物样件(样机)反求产品的数字化模型以满足生产制造的需求。

逆向工程通常包括数据采集、数据处理和

收稿日期:2008-05-05; 修订日期:2008-09-19
基金项目:国家自然科学基金(50475041)
通讯作者:谭昌柏 E-mail: tcbnuaa@nuaa.edu.cn

CAD 模型重建 3 个主要环节。早期,数据采集多采用以三坐标测量机为代表的接触式测量设备,通过手动方式逐点测量或按预先编制的路径自动连续扫描测量。近年来,以光学测量法为代表的非接触式测量技术发展非常迅速,在 3D 激光扫描、相机自由拍摄、双目立体测量等技术的研究和测量装置的研制方面取得了重要成果^[1-2]。光学测量设备能快速采集大量数据,尤其适合于具有复杂型面零件的测量,同时带来了如何高效处理大规模测量数据的难题。测量数据通常需要进行进一步处理,消除数据瑕疵以便于 CAD 模型重建。针对不同的数据组织形式和具体需求,研究人员对散乱点的 k -近邻关系建立、简化、去噪、修复、分块等数据处理技术进行了研究^[3-5],其有效性在一般工业产品反求中得到了验证,但是对于飞机产品上千万乃至数亿量级的大规模测量数据,缺乏针对性的措施,难以保证算法的高效性。CAD 模型重建是实施逆向工程的主要任务,以曲面反求的研究和应用为主,可分为分片连续的曲面片模型重建和基于特征分解的曲面模型重建。分片连续的曲面模型重建将表面数据划分为具有 n 边结构的区域(通常为四边或三边域),然后用参数曲面拟合每个区域,通过在公共边施加约束保证曲面片之间的连续性。其主要不足是未考虑设计特征,从而导致产品形状割裂,整体拟合精度稍逊。基于特征分解的曲面模型重建需对测量数据进行特征区域划分,对各特征区域,可根据数据点构造曲面造型所需的线架,然后结合扫掠、放样、蒙皮、填充等曲面造型手段进行重建,或者直接用某种曲面拟合各分块数据集,最后通过延伸、求交、裁剪、过渡等曲面高级操作得到最终曲面模型。该方法在很大程度上恢复了产品的设计意图,有利于模型的精确拟合。特征是模型设计意图的重要载体,近年来,学术界开始关注基于特征的反求建模技术,其目的是通过探求蕴含在离散几何信息(点云等)中的设计理念、工程约束、功能需求,实现特征层次上的模型重建。文献[6-9]对特征模型重建进行了探索,在特定应用中得到了初步验证,但与参数化模型的最终目标还有较大距离,仍需在模型特征表示、约束优化等方面进一步研究。

飞机外形和结构件反求具有不同于一般工业产品反求的显著特点,目前国内外类似的研究非常少见。首先,飞机外形巨大、结构复杂,为了获得其准确的形状表达,需采集大量的数据,如何针

对大规模测量数据进行优化,以保证数据处理和模型重建算法的高效是一项重要课题。此外,飞机蒙皮、结构件及工装之间存在大量的互换协调关系,重建模型首先要保证装配的协调性和工装的可用性。特别是种类繁多的飞机结构件,为了减重和等强度设计,往往形成各种复杂型腔,具有结构形状复杂、空穴多、壁板薄等特点。例如壁板、梁、框、座舱盖骨架等结构件具有由构成飞机气动外形的流线型曲面、各种异形切面、结合槽口、交点孔组成的复杂结构,其模型反求的难度非常大。如何快速准确地反求飞机外形和结构件 CAD 模型并保证装配协调性和工装可用性,成为亟待解决的主要技术问题。

基于先进的特征反求思想,本文研究了基于曲面特征和实体特征分解重建的飞机外形曲面模型和结构件实体模型反求建模技术。详细讨论了大规模散乱点的 k -近邻关系的空间球搜索算法、结构件与外形相关曲面特征的直纹面逼近、基于最小弯曲能的 B 样条曲面形状修改等关键技术。实现了具有完整特征表达的飞机外形和结构件 CAD 模型重建,可更好地支持产品的创新设计。

1 飞机外形和结构件的特征反求理论

基于不同的求解策略,目前的逆向工程系统为产品反求建模提供了灵活的解决方案,但仍普遍存在缺乏完整特征表达、未有效捕捉设计意图和模型无法参数化修改等问题。对于飞机外形和结构件等功能性产品的反求,甚至可能导致重建模型的气动属性等功能特性的失效。本文提出的基于曲面特征的飞机外形反求和基于曲面、实体特征的飞机结构件混合反求策略,力图通过捕获飞机外形和结构件模型中各种特征和约束并将其贯穿于模型重建的全过程,以最大限度恢复产品设计意图,快速重建理想的 CAD 模型。

1.1 特征定义与分类

Varady 等^[10]将构成模型的曲面定义为特征,并按造型方法的不同分为简单曲面、规则扫掠曲面、自由曲面、过渡曲面等。Thompson 等^[8]将凸台、型腔、孔等实体特征直接作为逆向工程特征。柯映林等^[7]则将反求特征分为由数据提取的曲线(曲面)底层特征、组合曲线(曲面)以及 B-rep 体素特征 3 个层次。可见,关于特征的定义并不统一,通常是针对某类产品反求或为解决模型重建中特定问题而设定。本文则根据飞机外

形和结构件的形状和反求特点,将曲面特征和实体特征统一纳入了反求的特征范畴,以实现产品的完整特征表达,如图 1 所示。

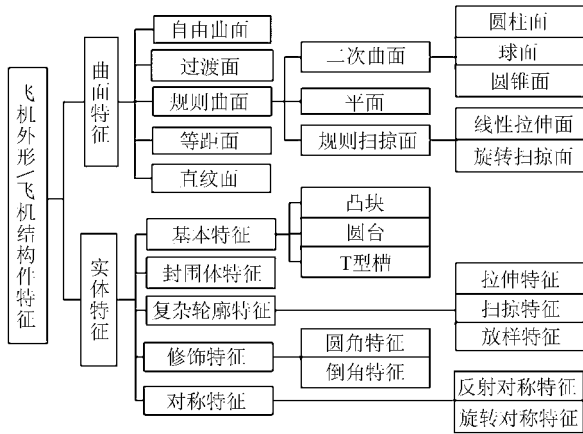


图 1 飞机外形、结构件组成特征的定义与分类

Fig. 1 Feature definition and classification

构成飞机外形的主要部件包括机身、机翼、尾翼、驾驶舱等,为了支持特征反求,需按构形规律进一步细分(如将机身分为前、中、后机身,尾翼分为垂直安定面、水平安定面、方向舵),再用符合设计规律的曲面特征来重建。如雷达罩可采用旋转面或圆锥面近似,中机身局部可用圆柱面表达,机翼蒙皮用直纹面逼近,座舱盖和整流罩由自由曲面拟合。针对典型飞机结构件构形特点,从特征造型角度将其组成特征分解为曲面和实体特征。

实体特征包括 4 类:①基本特征:包括凸块、圆台、圆孔、T 型槽等可由少量几何参数表示的特征;②复杂轮廓特征:可由若干二维轮廓曲线和辅助参数表示的特征,包括拉伸特征、旋转特征、扫掠特征、放样特征等;③修饰特征:包括圆角特征、倒角特征等;④对称特征(或关联特征):指对已有特征的操作(如复制、移动、旋转等)得到的特征,包括平面对称特征、旋转对称特征等。考虑到飞机结构件通常采用特征造型的方法进行设计,而实体特征对于发掘产品更高层的工程语义具有重要意义。因此在实体特征定义上尽量涵盖结构件规律性强、易于参数化表示的局部结构,而对于结构件上难以按实体特征反求的复杂结构,则将其分解为曲面特征重建,包括规则曲面特征和自由曲面特征。其中规则曲面特征主要指平面、二次曲面、规则扫掠面;自由曲面特征则主要指 B 样条表示的自由曲面。特殊地,对于飞机结构件中与气动外形有协调关系的曲面,本文采用关联外形曲面等距或直纹面逼近的方法来构造。

1.2 基于特征的反求建模路线

基于特征的参数化反求思想,在上述特征分类定义的基础上,提出了基于曲面特征的飞机外形反求建模以及基于曲面、实体特征的飞机结构件反求建模的策略,其技术路线如图 2 所示。

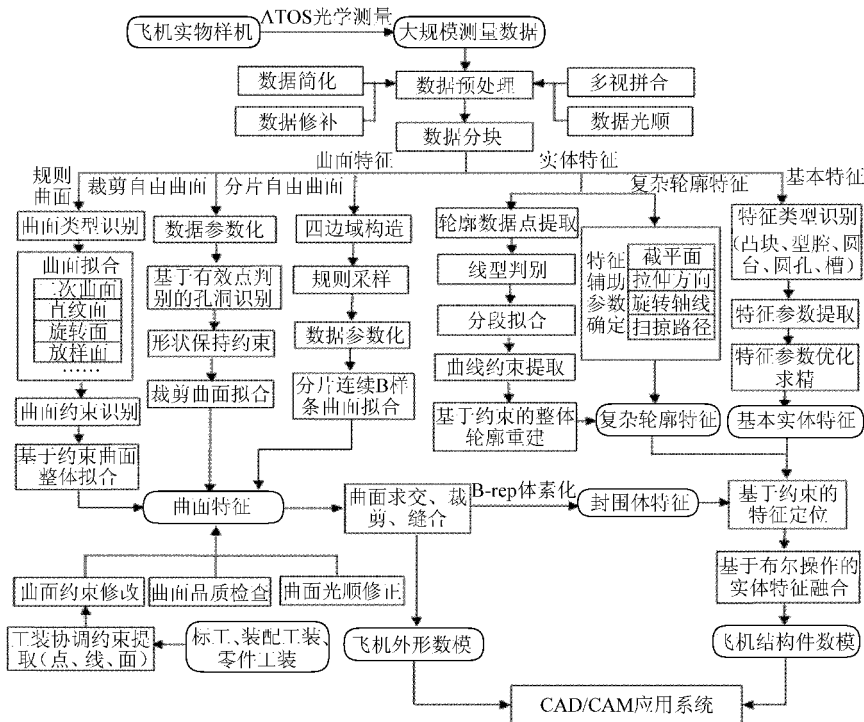


图 2 飞机外形和结构件反求技术路线

Fig. 2 Technical route of aircraft contour and structural part model reconstruction

实物样机的外形和结构件数据采用 ATOS[®] 流动式结构光测量设备获取。ATOS[®] 流动式的测量方式可不受样件大小进行多位置、多视角的测量,非常适合飞机外形测量,非接触式的测量方式避免了飞机钣金件测量受力变形,可实现高效率、高精度的数据采集。外形测量时,为减小多次测量的累积拼合误差,首先用近景摄影测量定位系统 TRITOP[®] 建立部件级(如左、右机翼,前、中、后机身等)测量工程和各自的坐标系,再用 ATOS[®] 进行外形细节数据采集,每次测量数据自动并入其所在测量工程的坐标系下。通常,全机外形测量需建立多个测量工程,然后再对各测量工程数据进行拼合,因此需特别注意公共特征数据的采集,以利于后续的数据拼合。结构件测量时,先对部件、段件、组合件进行整体测量得到其结合部位数据,再拆开零件单独测量,这样可利用结合部位数据抽取几何约束指导后续模型重建,保证重建模型的装配协调性。测量数据通常需进行多视数据拼合、数据简化、孔洞修补、数据光顺等预处理,将其转化为利于模型重建的“造型数据”。并运用基于特征的数据分块技术,根据数据点的法矢、曲率等离散几何特性的一致性准则,将外形和结构特征进行分解,再针对其具体结构特点采用不同策略进行重建。

飞机外形反求综合采用分片连续 B 样条曲面、裁剪自由曲面和规则曲面拟合来实现。分片连续 B 样条曲面重建是将无气动力学要求的外形局部划分为四边界区域,为每个四边界区域拟合 B 样条曲面片,曲面片边界处施加适当的连续性约束。针对由于遮挡而无法测得完整数据的外形部分,采用裁剪 B 样条曲面进行重建,首先去除无效数据,对缺失数据区域施加形状保持约束后进行 B 样条曲面拟合,最后通过裁剪获取实际边界^[9]。对于飞机外形上具有明确设计要求的二次曲面、直纹面、放样面等规则曲面特征,则在各曲面单独拟合基础上,通过判别曲面类型、提取特征参数和约束关系,再基于约束进行曲面整体拟合。该方法体现了飞机外形设计内涵,提高了曲面重建质量。为了保证重构外形、结构件及工装间的协调,从工装上抽象出必要的点、线、面约束,应用曲面变形技术,修改外形曲面以满足上述约束关系,保证产品、工装数模的协调。此外,曲面还需进行误差、连续性和光顺性分析,以构造满足工程要求的高品质曲面。

对于飞机结构件,采用了曲面特征和实体特

征混合实体模型重建的方法。实体特征比曲面特征包含更丰富的工程语义,对于模型重建、模型修改、加工编程乃至工艺优化至关重要。对于结构件中可参数化的实体特征,基于测量数据提取其特征参数,实体特征被定义为基本特征、复杂轮廓特征、修饰特征和对称特征 4 类。如对凸块、圆孔等基本特征,采用 BP 网络进行特征识别,再通过极大似然估计和仿射变换提取特征参数。而对由二维轮廓线及辅助参数定义的复杂轮廓特征,探讨了基于分段线型识别的轮廓线约束拟合,以及从测量数据中提取截平面、拉伸方向、旋转轴线等辅助参数的重建方法。另外,考虑到飞机结构件的结构复杂性和形式多样性,完全的实体特征表达难以实现。本文从工程实际出发,将难以实体参数化的复杂结构分解为曲面特征重建,曲面特征定义方法与飞机外形曲面特征是通用的。特殊地,对于与外形相关的飞机结构件(与蒙皮连接),若结构件与蒙皮贴合表面较宽、面积较大,通过求取外形曲面的等距面来重建,该方法遵循了结构件的设计规则;对于框、梁等与蒙皮贴合面较窄、外形线接近于直线的平面变斜角类结构件(通常采用四、五坐标机床的刀具摆角功能以线接触方式加工),近似为可展直纹面进行逼近反映了加工制造的实际情况。结构件实体模型的混合建模采用两种途径,其一是 B-rep 体素化操作将曲面特征转化为封闭实体特征,然后与其他实体特征进行布尔运算,实现特征融合基础上的实体模型重建;二是用曲面特征来裁剪特征融合后的实体,最终重建实体模型。由于特征分解重建割裂了特征间的固有约束关系,为了获取高品质的 CAD 模型,还需对实体特征进行约束推理及重定位。最后,飞机外形和结构件 CAD 模型可由通用数据交换接口导入 CAD/CAM 系统,以满足进一步应用的需求。

2 关键技术研究

针对飞机外形和结构件反求的特点,作者所在项目组进行了多年研究,突破了诸多关键技术。本文从大规模测量数据的 k -近邻搜索、结构件与外形相关的曲面特征重建、基于约束的曲面形状修改等方面予以阐明。

2.1 数据点集 k -近邻的空间球搜索算法

k -近邻搜索是基于散乱数据的反求建模的关键步骤, k -近邻结构可反映待求曲面的形状信息,

作为曲面法矢或曲率近似计算的依据,为数据简化、光滑处理及特征参数提取提供依据。设点集 $P = \{p_i, i=1, 2, \dots, N\}$, k -近邻搜索是指在 P 中的某一点 p_i , 顺序找出所有距 p_i 距离最近的 k 个邻近点。即对于点 $p_i, p_i \in P$, 若其 k -近邻点集为 $Q \subset P$, 则对于 Q 中任意一点 q 和 P 中任意一点 s , 必然满足 $\|p_i - q\| \leq \|p_i - s\|$ 。ATOS[®] 单帧测量点数高达 40 万, 一架飞机外形的完整测量点数可高达千万乃至数亿量级, 给数据处理带来巨大挑战, 数据处理效率低下成了突出的瓶颈问题, 因此 k -近邻搜索效率是首要考虑的指标。基于数据集空间栅格划分策略, 本文提出了快速 k -近邻空间球搜索算法, 该算法每次搜索立方体栅格的个数与假想空间球的半径有关, 建立对应的搜索终止原则, 可有效减少搜索立方体栅格的个数, 提高算法效率。

空间球搜索算法采用逐步递加搜索立方体栅格的策略。首先对数据集进行空间栅格划分, 计算测点到所在立方体栅格 6 个面的距离, 并按距离进行排序。根据距离值确定空间球的半径, 考虑不同半径的空间球与哪些立方体栅格发生干涉, 在干涉栅格中进行搜索。算法如下:

① 将数据集划分为 $m \times n \times t$ 个立方体栅格, 并记录每个点所在的栅格和栅格包含的点索引值。设数据点数为 N , 最小矩形包围盒顶点坐标的最小、最大值分别为 $(X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min})$ 和 $(X_{\max}, Y_{\max}, Z_{\max})$, 则栅格边长为^[11]

$$l_c = \sqrt{\frac{3\alpha k}{N} |X_{\max} - X_{\min}| |Y_{\max} - Y_{\min}| |Z_{\max} - Z_{\min}|} \quad (1)$$

式中: α 为栅格中平均数据点数与近邻数 k 之间的系数, 可调节栅格的边长大小。本文通过实验确定 $\alpha = 1.31$ 可取得较高搜索效率。确定栅格边长 l_c 后即可计算 m, n, t 值。

② 计算 p_i 到其所在立方体栅格 6 个面的距离, 建立数据对象 $S\{d, \text{tag}\}$, 其中: d 为点到栅格面的距离; tag 为栅格面标志, 用于搜索方向的判定。将点 p_i 与 6 个栅格面距离按升序排列, 可得有序数组 $S[i], i=0, 1, \dots, 5$ 。

③ 令搜索球半径 $r = S[0] \cdot d$, 该搜索球必然包含于点 p_i 所在栅格, 计算该栅格内数据点与 p_i 的距离, 按距离升序顺次 p_i 的近邻链表。若链表中至少包含 k 个点且第 k 个点距离小于 r , 则表示已经找到符合条件的 k -近邻, 结束搜索; 否则修改搜索球半径 $r = S[1] \cdot d$, 判定与空间球发生

干涉的栅格, 计算干涉栅格中数据点与 p_i 的距离并排序。依此类推, 直到满足搜索终止条件。

图 3 示例了上述搜索过程, 首先搜索 p_i 所在的栅格 I, 此时的空间球半径 $r = S[0] \cdot d$, 若不满足搜索终止条件, 增大半径 $r = S[1] \cdot d$, 沿 $S[0]$. tag 值确定的搜索方向寻找与空间球干涉的栅格 II。搜索完栅格 I 和栅格 II 后, 若仍需继续搜索, 增大半径 $r = S[2] \cdot d$, 沿 $S[1]$. tag 值确定的搜索方向找到与空间球发生干涉的栅格 III 和栅格 IV。按此方法完成 k -近邻搜索。

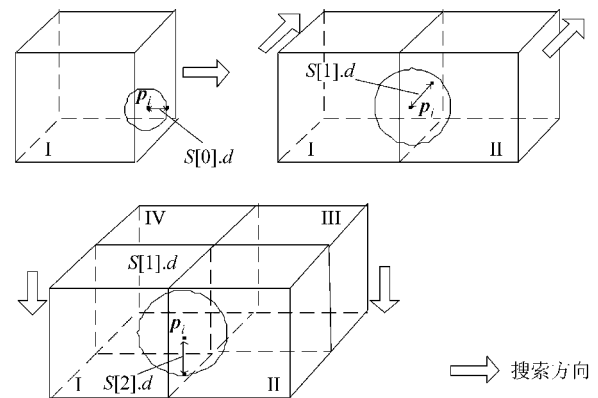


图 3 空间球搜索算法示意图

Fig. 3 Illustration of spatial sphere algorithm

上述算法用若干飞机实测数据测试表明, 当 $k < 30$ 时, 90% 以上的点在 4 个栅格范围内可完成 k -近邻搜索, 与类似方法相比^[3, 11], 该算法能有效压缩搜索时间, 搜索效率提高一倍以上, 在普通配置的 P4 2.0 GHz 微机上处理 10 万数量级的数据, 建立 k -近邻的时间不超过 1 min, 完全满足飞机大规模测量数据处理的要求。

2.2 结构件与外形相关的曲面特征重建

飞机结构件设计阶段, 与蒙皮内表面有连接关系的结构件表面通常不单独设计, 而是由相关外形数据决定, 以保证装配协调。该类曲面特征在制造时, 也是根据飞机外形及其结构模线的数据进行加工和检验的, 可达到较高的加工精度。当结构件与外形贴合部分较宽、面积较大时, 相应的外形线是弯曲的, 不能近似为直线, 这时, 结构件表面特征需以已重构的相应外形为基础进行重建。本文采用如下重建方法: 首先依据装配协调关系, 获取与之连接的已重构的飞机外形曲面; 然后根据结构件的位置, 通过曲面等距操作创建等距面; 最后将等距面按结构件表面轮廓裁剪即为所求曲面。而对于飞机整体梁、框、缘条、肋等结

构件,当其与外形贴合部分较窄、外形线较平坦接近于直线时,通常采用四、五坐标机床的铣刀摆角功能以线接触方式进行加工,其加工面与水平面夹角呈小角度的连续变化,称为变斜角类零件。该类零件其外形轮廓表面可采用可展直纹面进行逼近。

若 $p(u)$ 为准线, $\tau(u)$ 为沿准线上每一点的母线方向给定的非零矢量,则直纹面可表示为

$$p(u, v) = p(u) + v\tau(u) \quad (2)$$

曲面上任意一点的法矢 $n(u, v)$ 可表示为该点处 u, v 偏导矢的向量积,

$$n(u, v) = \frac{\partial p(u, v)}{\partial u} \times \frac{\partial p(u, v)}{\partial v} = \dot{p}(u) \times \tau(u) + v\dot{\tau}(u) \times \tau(u) \quad (3)$$

设 u 向参数值 u_0 对应母线为直线 $L(u_0)$, 则 $L(u_0)$ 上各点法矢为

$$n(u_0, v) = \dot{p}(u_0) \times \tau(u_0) + v\dot{\tau}(u_0) \times \tau(u_0) \quad (4)$$

根据可展曲面每条母线上具有唯一切平面的性质,得出 $\dot{p} \times \tau$ 与 $\dot{\tau} \times \tau$ 必线性相关,即

$$\det(\dot{p}, \tau, \dot{\tau}) = 0 \quad (5)$$

式(6)表明可展曲面中同一母线上各点(除奇异点外)单位法矢相等,其中奇异点的 v 向参数值为

$$v_s = -(\dot{p} \times \tau) \cdot (\dot{\tau} \times \tau) / \|\dot{\tau} \times \tau\|^2 \quad (6)$$

设数据点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 各数据点的高斯曲率 $\kappa = \{\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m\}$, 法矢 $n = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$ 。本文采用如下方法重建可展直纹面:根据直纹面上数据点的高斯曲率为零的特性识别直纹面特征;然后在数据点集 P 中任意选择一点作为种子点,按照法矢方向一致性的准则进行区域生长,得到直纹面母线点集,用直线拟合得到当前母线;选择距离当前母线为定值的数据点,以该点作为种子点,重复上述过程,则可得到直纹面上一组母线集合;最后根据母线提取直纹面边界特征线,进而重建直纹面特征。

如图 4 所示,设 P 为直纹曲面 S 上的数据点集,提取的母线集合为 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_r\}$, 其中母线 L_i 的首末端点分别为 (s_i, e_i) , 母线的单位方向矢量为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_r\}$ 。则边界特征线提取算法描述如下:

① 引入参考直线 $c(u) = c_0 + un_0$, 其中 $n_0 =$

$$\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r v_i, c_0 = \frac{1}{2r} \sum_{i=1}^r (s_i + e_i);$$

② 计算每条母线段 L_i 的首末端点 (s_i, e_i) 在参考直线 $c(u)$ 上的投影点,记具有最小、最大参数值的投影点分别为 $c_{u_{\min}}$ 和 $c_{u_{\max}}$;

③ 构造边界平面 $P_1 = \{p | (p - c_{u_{\max}}) \cdot n_0 = 0\}$, $P_2 = \{p | (p - c_{u_{\min}}) \cdot n_0 = 0\}$, 则曲面上的数据点位于两边界平面之间;

④ 将母线段集合 L 延伸后与边界平面 P_1, P_2 求交,得到边界点集 E_1, E_2 ;

⑤ 采用 3 次 B 样条线拟合边界点集 E_1, E_2 , 即可求出边界特征线 b_1, b_2 。

提取一组母线和两边界特征线后,即可由曲面造型方法重建该直纹曲面特征。

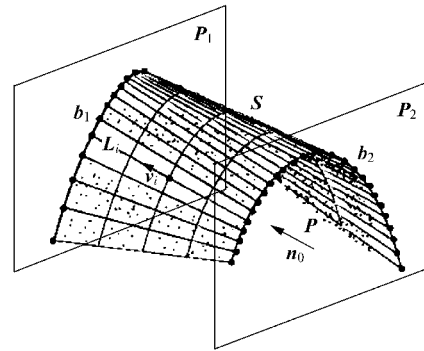


图 4 直纹面母线及边界提取示意图

Fig. 4 Generatrix and directrix extraction of ruled surface

图 5 为采用直纹面逼近算法重建某型飞机翼肋与外形相关曲面的实例。误差分析表明其重建标准误差值为 0.002 mm, 满足了设计要求。

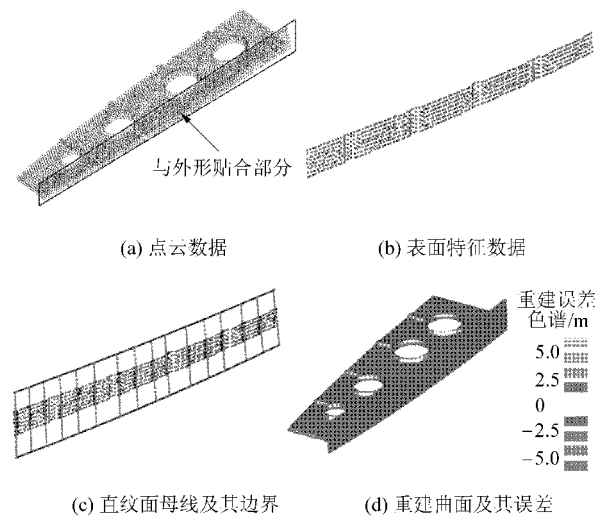


图 5 基于直纹面逼近的曲面特征重建

Fig. 5 Surface reconstruction by ruled surface

2.3 基于约束的曲面形状修改

飞机外形曲面重建除了在精度、连续性、光顺性方面具有较高要求外,更重要的是重建曲面需符合设计规律,以达到飞机的功能性需求。考虑如下两种情况对外形曲面的影响:一是由于制造误差、使用变形等因素,导致实物样机与原始设计模型的差异,此外测量误差、拟合误差又会导致重建模型与实物样机的差异,从而使重建模型与设计模型不符,需要修改模型以满足设计约束;二是各产品部件之间、产品与工艺装备之间需满足装配协调关系,通常这种协调关系可转化为特定几何约束下的模型修正问题。对此,将工装等工程约束抽象为点、线、面约束,研究了基于最小弯曲能泛函描述的 B 样条曲面修改问题。对重建曲面施加由工程要求抽象出的单点约束、多点约束、点与法矢约束、曲线约束和曲面约束条件,运用变分方法求解弯曲能最小的曲面模型,修改后曲面可精确满足指定约束且具有良好光滑性。本文以曲线约束的 B 样条曲面形状修改为例进行阐述。

参数曲面的弯曲能可定义为

$$E(\mathbf{P}) = \iint (\alpha \cdot \mathbf{P}_{uu}^2 + \beta \cdot 2\mathbf{P}_{uv}^2 + \lambda \cdot \mathbf{P}_{vv}^2) dudv \quad (7)$$

通常令弯曲系数 $\alpha = \beta = \lambda = 1$ 。则由 B 样条曲面的定义 $\mathbf{P}(u, v) = \mathbf{N}(u, v)\mathbf{S}$, 可得

$$\mathbf{P}_{uu}^2 = \mathbf{S}^T \left(\frac{\partial^2 \mathbf{N}}{\partial u^2} \right)^T \left(\frac{\partial^2 \mathbf{N}}{\partial u^2} \right) \mathbf{S} \quad (8)$$

式(7)中关于参数 u 二次偏导数的积分可写为

$$\iint \alpha \cdot \mathbf{P}_{uu}^2 dudv = \mathbf{S}^T \left(\iint \alpha \left(\frac{\partial^2 \mathbf{N}}{\partial u^2} \right)^T \left(\frac{\partial^2 \mathbf{N}}{\partial u^2} \right) dudv \right) \mathbf{S} = \mathbf{S}^T \mathbf{K}_{uu} \mathbf{S} \quad (9)$$

式中: \mathbf{K}_{uu} 表示 u 向的刚度矩阵。类似地,可求取 \mathbf{K}_{uv} 和 \mathbf{K}_{vv} 的表达。令 $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{uu} + \mathbf{K}_{uv} + \mathbf{K}_{vv}$, 则 B 样条曲面的弯曲能可表示为

$$E(\mathbf{P}) = \mathbf{S}^T \mathbf{K} \mathbf{S} \quad (10)$$

式中: \mathbf{K} 表示总刚度矩阵,为一正定矩阵。各刚度矩阵采用 Gaussian 积分法进行计算^[12]。

以差曲面 $\Delta \mathbf{P}(u, v) = \bar{\mathbf{P}}(u, v) - \mathbf{P}(u, v)$ 的弯曲能最小为优化目标,调整曲面控制顶点,同时满足给定的曲线约束条件。引入差曲面而不是目标曲面的弯曲能作为优化目标,可避免目标曲面过度平坦。该优化问题的数学描述为

$$\left. \begin{aligned} E(\Delta \mathbf{P}) &\rightarrow \min \\ \mathbf{C} &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{C} = \mathbf{0}$ 为曲面需满足的几何约束,采用罚函数法将该问题转化为无约束的优化问题求解,构造罚函数方程为

$$\bar{E}(\Delta \mathbf{P}) = \Delta \mathbf{S}^T \mathbf{K} \Delta \mathbf{S} + \theta \mathbf{C}^2 \quad (12)$$

式中: θ 为惩罚因子矩阵,通常为一对角矩阵且对角元素取值相同。

本文采用一种可保证 B 样条曲面精确过目标曲线的约束方法。设曲面上目标曲线为 $\mathbf{S}_c(t)$, 首先计算对应于 $\mathbf{S}_c(t)$ 的曲面 $\mathbf{P}(u, v)$ 参数域上的 B 样条曲线 $\mathbf{D}(t) = [D_x(t) \quad D_y(t)]^T$ (次数为 k_d , 节点矢量为 \mathbf{T}_d), 然后计算对应于参数域曲线 $\mathbf{D}(t)$ 的曲面上曲线 $\mathbf{S}_c(t) = \mathbf{P}(D_x(t), D_y(t))$ 。令 $T_{ij}(t)$ 为对应下标 (i, j) 的两个 B 样条基函数的乘积。

$$T_{ij}(t) = N_{i, k_u}(D_x(t)) N_{j, k_v}(D_y(t)) \quad (13)$$

式中: k_u, k_v 分别为 B 样条曲面 $\mathbf{P}(u, v)$ 参数 u 向、 v 向的次数。

由于 B 样条基函数是分段表示的多项式,因此 $T_{ij}(t)$ 可写成

$$T_{ij}(t) = \sum_{l=0}^{n_c} t_{ij, l} N_{l, n_c}(t) \quad (14)$$

式中: $t_{ij, l}$ 为数值标量。因此, $\mathbf{S}_c(t)$ 又可写为

$$\mathbf{S}_c(t) = \sum_{l=0}^{n_c} \left(\sum_{i=0}^{n_u} \sum_{j=0}^{n_v} t_{ij, l} \mathbf{S}_{ij} \right) N_{l, k_c}(t) = \sum_{l=0}^{n_c} N_{l, k_c}(t) \mathbf{s}_{cl} \quad (15)$$

式中: \mathbf{s}_{cl} ($l = 0, 1, \dots, n_c$) 为曲线 $\mathbf{S}_c(t)$ 的控制顶点; $N_{l, k_c}(t)$ 为定义在节点矢量 \mathbf{T}_c 上的 B 样条基函数; k_c 为曲线 $\mathbf{S}_c(t)$ 的次数; $n_c + 1$ 为控制顶点数目。考虑到 B 样条基函数的复合和乘积,令 $k_c = (k_u + k_v)k_d$, \mathbf{T}_c 中的节点值 t_i 由 $\mathbf{D}(t)$ 的节点矢量 \mathbf{T}_d 以及 $\mathbf{D}(t)$ 与曲面 $\mathbf{P}(u, v)$ 参数平面的网格交点组成,而 $t_{ij, l}$ 的求解则采用文献[13]的方法以避免繁琐的 Blossom 运算。在得到 $t_{ij, l}$ 后,曲线 $\mathbf{S}_c(t)$ 的控制顶点可表示为

$$\mathbf{s}_{cl} = \sum_{i=0}^{n_u} \sum_{j=0}^{n_v} t_{ij, l} \mathbf{S}_{ij} \quad (16)$$

或表示为矩阵形式

$$\mathbf{S}_c = \mathbf{T} \mathbf{S} \quad (17)$$

式中: \mathbf{S}_c 为曲线 $\mathbf{S}_c(t)$ 的控制顶点向量; \mathbf{T} 为以 $t_{ij, l}$ 为元素的系数矩阵。

修改初始曲面之前,先要运用节点插入、升阶等方法初始化原始曲面 $P(u, v)$ 和曲面上目标曲线 $S_c(t)$,直到满足条件: $T_t = T_c, k_t = k_c$ 。约束条件为曲面上曲线 $S_c(t)$ 的控制顶点与曲面外目标曲线 $S_t(t)$ 的控制顶点向量 S_t 保持一致,

$$T(S + \Delta S) = S_t \quad (18)$$

故曲线约束的线性约束方程为

$$T\Delta S = S_t - S_c = \Delta S_0 \quad (19)$$

因此,曲线约束下的罚函数方程表示为

$$\bar{E}(\Delta P) = \Delta S^T K \Delta S + \theta(T\Delta S - \Delta S_0)^T (T\Delta S - \Delta S_0) \quad (20)$$

令 $\partial \bar{E}(\Delta P) / \partial \Delta S = 0$, 可得 $\bar{K}\Delta S = \theta T^T \Delta S_0$, 其中, $\bar{K} = K + \theta T^T T$ 。则曲线约束时基于最小弯曲能的 B 样条曲面形状修改的解为

$$\Delta S = \theta \bar{K}^+ T^T \Delta S_0 \quad (21)$$

图 6 为上述方法在某型飞机座舱盖重建中的应用实例。座舱盖设计时需整体建模,但制造时需将风挡玻璃分片制造后用框连接安装。由于制造误差的存在,导致连接处不光滑,因此连接处的数据在曲面重建时需要去除。分片制造的风挡玻璃用单张曲面拟合的效果不好,用 3 张 B 样条曲面分别拟合,在连接处施加两约束曲线,使形状修正后的 B 样条曲面精确过约束曲线,并且在连接处达到 C^1 光滑拼接,满足了设计要求。

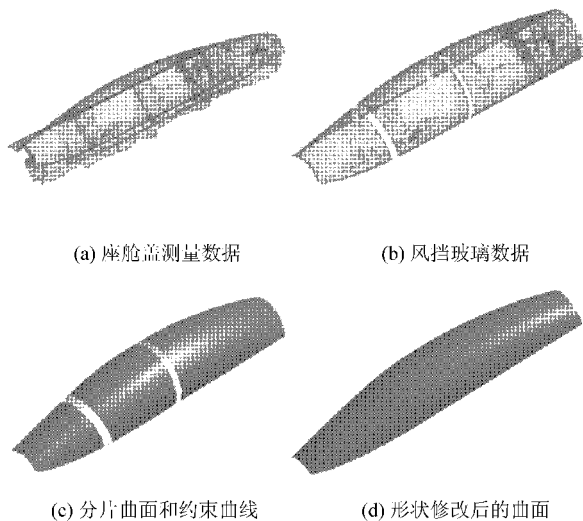


图 6 风挡玻璃曲面模型的形状修正

Fig. 6 Shape modification of canopy windshield surfaces

3 实例分析

下面以某型飞机翼肋实体模型反求为例验证本文的特征反求建模方法。如图 7,基于数据分解的结果将模型分为 16 个特征区域分别重建,各

分解特征的说明见表 1。

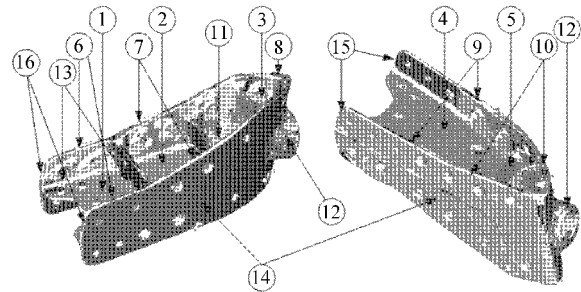


图 7 翼肋模型的特征分解示意图

Fig. 7 Illustration of feature decomposition of wing rib

表 1 分解特征一览表

Table 1 Description of decomposed features

特征编号	特征类型	特征重建说明
①,②,③,④,⑤	拉伸特征	提取截面轮廓线和拉伸方向
⑥,⑦,⑧,⑨,⑩,⑮,⑯	平面特征	提取过平面一点和平面法矢
⑪	组合面特征	由各平面、圆柱面约束拟合
⑫	旋转特征	提取旋转轴线和母线
⑬	圆角特征	提取圆弧半径值
⑭	等距面特征	由蒙皮外形等距取

如图 8 所示,首先根据结构件外轮廓重建毛坯模型。将外轮廓数据投影至计算得到的投影平面,获得投影点集,再根据投影点集添加合适的辅助线形成毛坯的二维轮廓,通过拉伸得到毛坯模型。平面特征⑥,⑦,⑧,⑨,⑩,⑮,⑯由数据点拟合,与蒙皮贴合的曲面特征⑭由机翼外形向内等距一个蒙皮厚度得到。用上述曲面特征裁剪毛坯体,可得中间特征 A。中间特征 A 与由轮廓拉伸得到的拉伸特征①,②,③,④,⑤做布尔差运算,得到中间特征 B。中间特征 B 与旋转特征⑫进行布尔并运算,再由组合面特征⑪对其进行剪裁,最后由计算的圆角特征半径值进行边混合操作,最终重建翼肋实体模型。

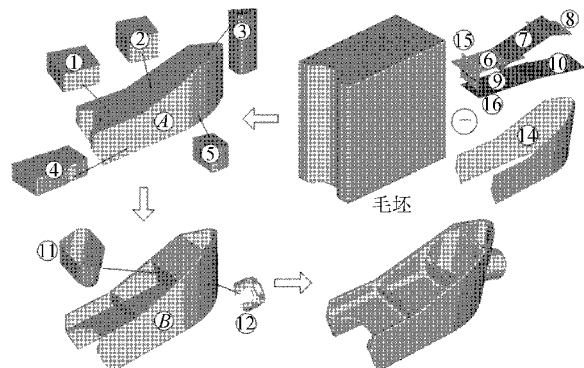


图 8 基于特征的翼肋模型重建

Fig. 8 Feature-based wing rib model reconstruction

4 结 论

基于先进的特征反求思想,探讨了基于实物样件(样机)的飞机外形和飞机结构件反求建模技术,给出了符合飞机外形和结构件特点的特征定义方法,提出了基于曲面特征、实体特征分解重建的飞机外形和结构件反求建模策略,可快速实现具有完整特征表达的 CAD 模型反求。详细阐述了大规模数据的快速 k -近邻空间球搜索、结构件与外形相关的曲面特征重建以及满足装配约束的 B 样条曲面模型修正技术。本文的研究成果已成功应用于某型飞机的全机外形与结构件反求建模,提高了建模质量和效率,大大缩短了该机的研制周期。

参 考 文 献

- [1] Xu Z Q, Ye S H, Fan G Z. Color 3D reverse engineering [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1): 495-499.
- [2] 张辉, 张丽艳, 陈江, 等. 基于平面模板自由拍摄的双目立体测量系统的现场标定 [J]. 航空学报, 2007, 28(3): 695-701.
Zhang Hui, Zhang Liyan, Chen Jiang, et al. Field calibration of binocular stereo system base on planar template and free snapping [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3): 695-701. (in Chinese)
- [3] Piegls L A, Tiller W. Algorithm for finding all k -nearest neighbors [J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(2): 167-172.
- [4] Desbrun M, Meyer M, Schroder P, et al. Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow [C]//Proceeding of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics. New York: ACM, 1999: 317-324.
- [5] Park S, Jun Y. Automated segmentation of point data in a feature-based reverse engineering system [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacturing, 2002, 216(3): 445-451.
- [6] Benko P, Martin R R, Varady T. Algorithms for reverse engineering boundary representation models [J]. Computer-Aided Design, 2001, 33(11): 839-851.
- [7] 柯映林, 王青, 范树迁, 等. RE-SOFT 系统架构及关键技术 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(8): 1327-1332.
Ke Yinglin, Wang Qing, Fan Shuqian, et al. Architecture and key techniques of feature-based reverse modeler—RE-SOFT [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(8): 1327-1332. (in Chinese)
- [8] Thompson W B, Owen J C, Germain H J, et al. Feature-based reverse engineering of mechanical parts [J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1999, 15(1): 57-66.
- [9] 谭昌柏. 逆向工程中基于特征的实体重建关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2006.
Tan Changbai. Research on key technology in feature-based reconstruction of solid model in reverse engineering [D]. Nanjing: College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [10] Varady T, Martin R R, Cox J. Reverse engineering of geometric models—an introduction [J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(4): 255-268.
- [11] 熊邦书, 何明一, 俞华璟. 三维散乱数据的 k 个最近邻域快速搜索算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 909-911.
Xiong Bangshu, He Mingyi, Yu Huajing. Algorithm for finding k -nearest neighbors of scattered points [J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2004, 16(7): 909-911. (in Chinese)
- [12] Pourazady M, Xu X. Direct manipulations of B-spline and NURBS curves [J]. Advances in Engineering Software, 2000, 31(2): 107-118.
- [13] Wang Z G, Zhou L S, Wang X P. Direct manipulation of B-spline surfaces [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(1): 103-108.

作者简介:

谭昌柏(1978—) 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 逆向工程, 飞机数字化装配, 飞机工装数字化设计。

Tel: 025-84891678

E-mail: tcbnuaa@nuaa.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐, 杨冬)