

飞机框肋类零件外形样板三维快速设计原理及算法

汤志鸿, 郑国磊

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

[摘要] 作为近年来飞机型号研制中常用的内外形控制与协调方式, 飞机样板因其使用便捷、成本低廉、技术成熟等优势, 在当前飞机研制中仍具有不可替代性。在当前智能化技术快速发展的数字化环境下, 依赖二维图纸的样板设计技术已明显成为制约飞机研制效率和周期的重要因素, 研究和开发以框肋类零件三维几何模型为基础的样板三维设计技术已成为当前航空产业的迫切需要。针对上述问题, 对框肋类零件样板的一大分支——外形样板的三维快速设计原理及算法展开研究, 提出钣金零件几何属性提取及外形样板三维快速设计算法, 主要内容为: 提出框肋类零件基础结构特征定义及提取方法, 基于提取结果构建零件弯边特征并计算样板设计所需几何属性, 提出外形样板轮廓计算及补加添加算法, 最终实现零件外形样板三维模型生成。经由实例测试, 验证此算法的可行性与有效性。

关键词: 飞机样板设计; 框肋类零件; 几何信息提取; 特征识别; 几何计算

Principle and Algorithm of 3D Rapid Design for Aircraft Outline Template of Sheet Metal Parts

TANG Zhihong, ZHENG Guolei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] As an outline control and coordination method commonly used in the development of aircraft in recent years, aircraft template is still not replaceable in current aircraft development for its convenience, low-cost and technological maturity. However, in current digital environment with rapid development of intelligent technology, the design technology relying on 2D drawings has become an important factor that restricts the efficiency and cycle of aircraft development, for which research and development of 3D design technology based on 3D geometric models of parts has become an urgent need for the aviation industry at present. In view of the problem, the 3D design of outline template is studied, which is a large branch of template in sheet metal parts manufacturing. An algorithm of parts' geometric information extraction and template rapid design is proposed, of which the main parts are as follows: infrastructure feature of sheet metal is defined and its extraction method is proposed. Flange feature are constructed and the geometric attributes required for the template design are calculated. The profile of the outline template are calculated according to the information and data extracted, and the adding are appended. The 3D model of outline template is finally generated. The feasibility and effectiveness of the algorithm are verified by case tests.

Keywords: Aircraft template design; Sheet metal part; Geometric information extraction; Feature recognition; Geometric calculation

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.091

当前,随着数字化技术的发展和先进测量手段的应用,飞机制造中以模线样板为代表的模拟量协调方法正逐渐被工艺数模等数字量协调方法代替。但由于样板使用直观便捷、成本低廉、技术积累深厚等优点^[1],结合相关数字化检验技术发展相对缓慢等原因,研制一架飞机仍需设计数以千计的样板,样板技术在一定时期内仍将在飞机研制中发挥重要作用。

然而,在当前快速发展的数字化环境下,样板的设

计制造体系已明显成为制约飞机研制效率和研制周期的重要因素,其主要原因在于其落后的设计方式、检验方式和缺乏专业化、智能化的研制工具,设计流程仍大量依赖人工进行,任何一个步骤的疏忽和失误都可能导致模线样板的设计错误,由此给后续工装设计制造以及零件生产检验埋下质量风险。因此,研究样板三维设计的快速化与自动化,以形成飞机样板三维快速设计CAD系统是当前航空产业的迫切需求。

对于样板的自动化设计制造问题,国内研究人员已进行过部分探索。石晶^[2]对数字化技术在模线样板设计中的应用展开探讨,对应用过程中存在的问题和改进思路做了阐述。陈树林等^[3]提出了一种样板快速设计工具,显著提升了设计过程中部分步骤的设计效率,但自动化程度不高。目前,样板设计领域中仍未形成一套行之有效的快速化或自动化设计系统。此外,零件特征识别作为样板智能化设计的关键问题,已在国内外取得较多成果^[4-11],如 Shunmugam^[5]从制造角度出发,将钣金特征分为裁剪、拉伸、拉深、弯曲共4类; Gutpa 等^[6]将钣金零件特征分为切削特征与变形特征两大类。其中,切削特征可视为对毛坯进行去料操作的结果,特征的定义与识别主要依赖边的几何信息与连接属性,典型特征为孔、槽、圆角、倒角等;变形特征可视为对板料进行折弯、拉深等操作的结果,特征的定义与识别依赖面的几何信息与拓扑关系,典型特征为折弯、下陷、翻边等。此类特征识别问题已取得一些成果,但尚未在样板设计领域展开应用。

本文针对框肋类零件样板设计的一大分支——外形样板的三维快速设计问题展开研究。为解决当前航空制造产业的实际需求,本文的研究对象主要为平面腹板且带弯边的框肋类零件。基于传统设计思路,提出框肋类零件外形样板快速设计算法,结合零件基础结构特征识别、弯边特征构建、样板轮廓计算等关键技术,实现框肋类零件外形样板的快速设计。结合实例测试,验证算法的有效性与可行性。

1 外形样板快速设计原理

1.1 基础结构特征介绍

形状特征在 CAD、CAPP、CAM 等领域具有重要作用。根据所面向的产品生命周期过程,可将形状特征分为设计特征、加工特征、检测特征等多种类型。由于特征的多样性和自定义性,特征间难以建立相应的映射关系,因此需由 CAPP 系统识别并构造产品 CAD 模型上适用于工装设计、产品制造的形状特征,以便于开展后续的自动化样板设计和工艺规划。为提升特征应用柔性,使特征识别结果不仅能应用于样板设计,同时能够满足其他框肋类零件制造领域的应用需求,在先前研究中给出了框肋类零件基础结构特征的定义与识别方法,基于零件几何拓扑结构特点对构成零件的基础结构特征进行归纳,分为腹板、弯曲、墙体3类,如图1所示,其中,腹板特征是零件的中心部分,各弯边以腹板为中心分布于四周;弯曲特征为零件成形过程中的受弯结构,连接两段非弯曲部分;墙体特征为零件弯曲后的弯侧部分。各类基础结构所具备的特点为:(1)两侧对应;(2)

相互独立;(3)相互邻接。

以 BNF 范式给出基础结构特征通用表示模型如下:

$$\begin{aligned} \langle Fea \rangle &::= (\langle type \rangle, \langle F^+ \rangle, \langle F^- \rangle) \\ \langle type \rangle &::= (\langle Web \rangle | \langle Bend \rangle | \langle Wall \rangle) \end{aligned}$$

其中, Fea 表示基础结构特征; $type$ 为特征类型,分为 Web (腹板)、Bend (弯曲)、Wall (墙体)。 F^+ 和 F^- 分别为构成特征的正、反两侧特征面。特征面的本质为由一个或多个拓扑面构成的组合面,用以拓扑面作为顶点,面邻接关系作为边的图结构表示。

为描述结构间的拓扑关系,对基础结构特征的邻接关系做如下定义:

定义1: 设 Fea_1 和 Fea_2 分别为零件 S 的两个基础结构特征,若 Fea_1 和 Fea_2 之间满足:

- (1) 特征类型不同;
- (2) 正、反两侧特征面分别存在公共边。

则称 Fea_1 和 Fea_2 邻接。

根据公共边和特征面之间的关系,可将邻接关系分为内邻接和外邻接。其中,将公共边属于特征面内环边的邻接关系成为内邻接,公共边属于外环边的邻接关系称为外邻接。

根据以上定义,可将整个零件数模分割为一系列基础结构特征的组合。为描述特征间满足的邻接关系,构建以基础结构特征为顶点,以特征邻接关系为边的特征图。

1.2 弯边特征描述与定义

弯边是框肋类零件上的变形结构,是框肋类零件的标志性特征之一,也是外形样板设计的重要依据。在基础结构特征认知基础上,将弯边特征作为组合特征进行定义与构建。

1.2.1 弯边特征定义

弯边结构的本质可视为单项单次弯曲或多项单次弯曲的组合。每项单次弯曲大体呈现“平—弯—平”的形状,由起始、过渡、弯侧3部分构成。为实现零件弯边的通用化表示,首先对零件弯边中的单次弯曲特征进行定义。

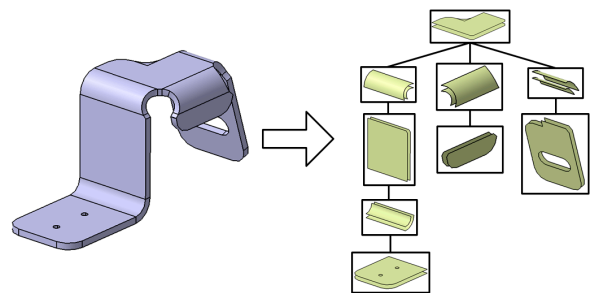


图1 零件基础结构特征图

Fig.1 Graph of basic structural features

定义 2：在飞机钣金弯边零件三维模型中,将样板设计所需的、描述零件几何弯曲形状的特征单元称为样板设计弯曲单元,简称弯曲元。

给出弯边和弯曲元的形式化定义如下：

$$\langle Flange \rangle ::= (\{Unit\})$$

$$\langle Unit \rangle ::= (\langle P_1 \rangle, \langle P_2 \rangle, \langle P_3 \rangle, \langle G \rangle)$$

其中, *Flange* 为弯边特征; *Unit* 表示构成弯边特征的弯曲元; P_1 对应弯曲元起始部分,一般为腹板或墙体特征; P_2 对应弯曲元过渡部分,一般为弯曲特征; P_3 对应弯曲元弯侧部分,一般为墙体特征,各特征间存在邻接关系; *G* 为外形样板设计所需的弯曲元几何属性,如图 2 所示。

1.2.2 弯曲元几何属性计算

在弯边特征构建基础上,以弯边元为单位计算外形样板设计所需几何属性,作为后续外形样板轮廓的计算依据。本文以外形样板设计为目标,归纳总结了外形样板设计所需的几何属性,如图 3 所示。

(1) 外形交叉线,起始、弯侧部分中外形面延伸部分的交线。

(2) 内形交叉线,起始、弯侧部分中内形面延伸部分的交线。

(3) 弯曲始线,起始、过渡部分中外形面的公共边。

(4) 弯曲终线,过渡、弯侧部分中外形面的公共边。

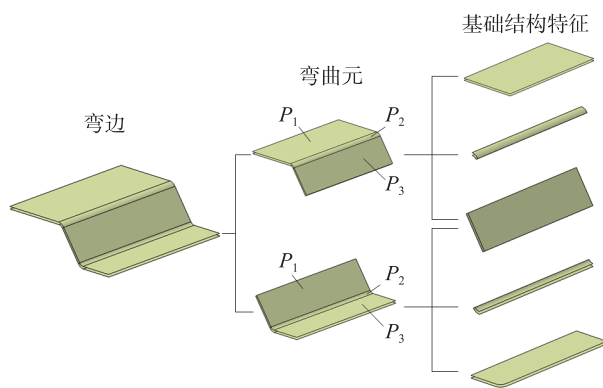


图2 弯边、弯曲元和基础结构特征间关系

Fig.2 Relations among flange, flange unit and basic structural features

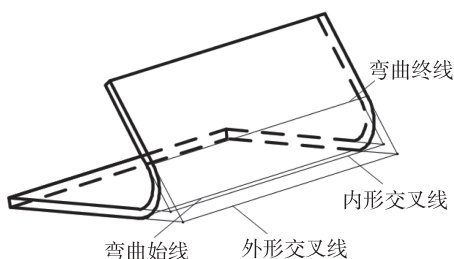


图3 弯曲元几何属性

Fig.3 Geometric attributes of bend unit

技术人员将样板贴合检验的零件一侧称为零件正侧,为方便描述弯曲朝向,将弯曲元起始部分的正侧特征面水平朝上放置作为基准,并将弯曲部分在空间上的呈现状态分为向上弯曲和向下弯曲两类,如图 4 所示。

零件内、外形面判断规则为：

(1) 若弯曲元向下弯曲,则正侧为外形面,反侧为内形面。

(2) 若弯曲元向上弯曲,则反侧为外形面,正侧为内形面。

将几何属性集 *G* 表示为以上 4 类线的组合,即：

$$\langle G \rangle ::= (\langle l_{oi} \rangle, \langle l_{ii} \rangle, \langle l_{bs} \rangle, \langle l_{be} \rangle)$$

其中, l_{oi} 、 l_{ii} 、 l_{bs} 、 l_{be} 分别为外形交叉线、内形交叉线、弯曲始线和弯曲终线。

为实现几何属性计算,以弯边元为单位给出其自动计算方法,其关键点为弯曲元内、外形面的判断。根据内、外形面判断规则,其本质为弯曲元弯曲方向计算。通过计算面外法矢夹角以判断弯曲方向,进而确定零件内、外形面。

1.3 外形样板设计

1.3.1 轮廓设计

外形样板用于表达弯边零件本身结构平面(腹板面)的形状^[12],如图 5 所示,其轮廓设计规则如下：

(1) 对于零件的无弯边区域,样板在该处的轮廓为零件的外廓形状。

(2) 对于零件的单弯边区域,样板在该处的轮廓为零件的外形交叉线。

(3) 对于零件的多次弯边区域,样板在该处的轮廓为首个弯边元的外形交叉线。

由此,给出外形样板轮廓的形式化表示方法如下：

$$\langle P \rangle ::= (\{p_{co}\}, [p_{ci}], \{p_f\})$$

$$\langle P_f \rangle ::= (\langle l_i \rangle, [l_{ci1}, l_{ci2}])$$

其中, *P* 为样板轮廓; p_{co} 为基础外轮廓; p_{ci} 为基础内轮廓,即腹板上不与其他特征邻接的内、外边集合; p_f 为弯边轮廓; l_i 为弯边的外形交叉线; l_{ci1} 、 l_{ci2} 分别弯边的封

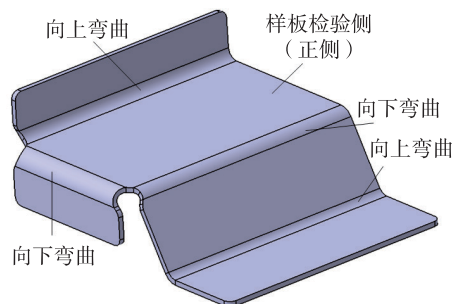


图4 弯曲朝向

Fig.4 Bending orientation

闭线,其作用为连接外形交叉线与相邻基础轮廓,以生成封闭的样板轮廓。

封闭线计算方法为:获取各弯边上首个弯曲元弯曲特征的外形面转角边(即不与其他特征邻接的边),沿对应的外形交叉线端点方向投影至腹板面。值得注意的是,与腹板呈内邻接关系的弯曲特征不存在转角边,其外形交叉线本身已满足闭合,因此无需计算封闭线。由此,由腹板非弯边区域轮廓、外形交叉线和封闭线3部分共同组成样板封闭轮廓,如图6所示。

1.3.2 补加设计

由于零件形状的多变性,所制造样板的基础形状可能过小、过长,因而导致样板具有打不下标注、易丢失、易破裂等缺点。由此,基于为较小样板增加标记区域、为狭长样板提升刚性、提供钻销钉孔区域等工艺要求,设计人员在样板设计中一般会额外留出补加材料,并于样板上添加补加标记^[1]。对此,提出样板补加的参数化快速设计方法。

总结样板设计中较为常用的补加形式和构造方法如表1所示。其中, A_r 、 A_c 、 A_f 、 A_a 分别对应4类常见补加, P_1 、 P_2 表示补加生长点, H 为补加高度, h 为倒角补加中倒角高度, r 为圆角补加中圆角半径, R 为圆弧补加中

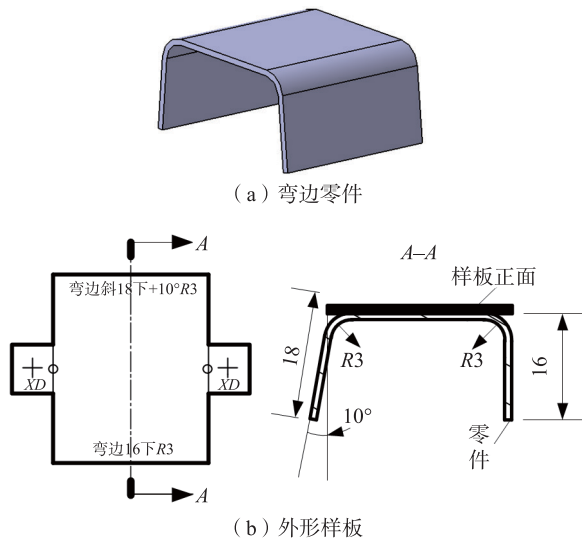


图5 外形样板设计

Fig.5 Design of outline template

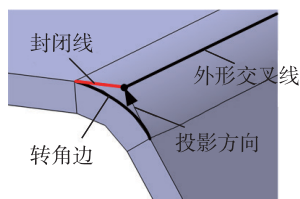


图6 样板轮廓封闭线计算

Fig.6 Calculation of template closing profile

圆弧半径。以补加生长点为分界修剪基础轮廓,沿两点中垂线方向快速生成补加轮廓。

2 外形样板快速设计算法

外形样板快速设计算法如图7所示,对其中部分关键技术进行详细描述。

2.1 基础结构特征识别

根据基础结构特征的定义与表示方法,各类特征仅由零件正、反两侧几何信息表示。因此,为避免在特征识别过程中不相关几何信息的计算,减少零件数模中面的搜索范围以提升特征识别效率,在识别过程中将零件模型分割为正、反两侧,对两侧几何

表1 常用补加类型及其构造方法

Table 1 Commonly used adding types and their construction methods

类型	图例	构造方法
矩形补加		$A_r = (P_1, P_2, H)$
倒角补加		$A_c = (P_1, P_2, H, h)$
圆角补加		$A_f = (P_1, P_2, H, h)$
圆弧补加		$A_a = (P_1, P_2, H, R)$

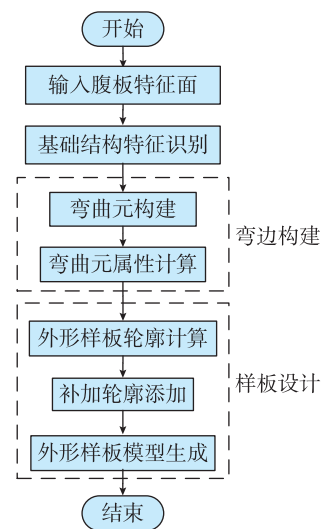


图7 外形样板快速设计算法流程图

Fig.7 Flowchart of outline template rapid design

信息分别识别后再进行特征构造。

2.1.1 两侧几何信息识别

两侧几何信息识别的基本思路为：以正、反关键面为输入，通过扩展识别方法逐级识别同侧邻接特征面。具体步骤如下：

(1) 输入正、反两侧腹板特征面后。

(2) 以公共边凹凸性为依据计算其有效邻接面，邻接关系需满足 G_1 连续但非 G_2 连续。

(3) 将得到的有效邻接面集进行分组，使得相邻的有效邻接面置为一组，每组有效邻接面间不相邻，均作为新的特征面。

(4) 以各组新特征面为种子面继续扩展识别，直至无法得到新的有效邻接面。

2.1.2 特征面匹配

在两侧几何信息识别基础上，将两侧相关特征面分别进行关联匹配以构造基础结构特征。

遍历零件正侧所有特征面，取特征面内一点沿其面内法矢方向作射线与反侧某特征面相交。若存在多个相交结果，则保留距该点最近的特征面，以该正、反特征面构造基础结构特征；若无相交结果，则退出。在特征构造基础上，根据特征间邻接关系构建基础结构特征邻接图。

2.2 弯边构建

弯边构建的关键点为弯曲元属性计算，在弯曲元构建结果基础上，其计算步骤如下：

(1) 在起始部分的正侧特征面内取一点 p_1 ，计算 p_1 处体外法矢 v_{n1} 。

(2) 在弯侧部分和弯曲部分正侧特征面的公共边上取一点 p_2 ，在 p_2 创建边的法平面与特征面产生交线 l ，计算 l 在 p_2 处指向线外的切矢 v_{l2} 。

(3) 计算 v_{n1} 和 v_{l2} 所呈角度 α ，若 $\alpha > 90^\circ$ ，则判定弯曲元向上弯曲，弯曲元正侧为内形面，弯曲元反侧为外形面；若 $\alpha < 90^\circ$ ，则判定弯曲元向下弯曲，弯曲元正侧为外形面，弯曲元反侧为内形面；否则，判定弯曲元无弯曲，如图 8 所示。

(4) 在外形面上提取相关特征公共边作为弯曲始线和弯曲终线。

(5) 将起始和弯侧部分在内、外形面上的相关特征面在转角处作曲面延伸并求交，相交结果作为内、外形交叉线。

2.3 样板设计

样板设计的关键点为外形样板轮廓计算，在弯边构建基础上，样板轮廓计算步骤如下：

(1) 遍历腹板正特征面的内、外边，提取不与其他特征邻接的内、外边分别组成基础内、外轮廓集合。

(2) 遍历所有弯边的首个弯曲元，对外形交叉线非闭合的弯曲元进行封闭线计算。

(3) 遍历所有弯边的首个弯曲元，获取弯曲方向。若为向上弯曲，则将弯边区域轮廓（外形交叉线和封闭线）向腹板正侧平面投影；否则，直接提取弯边区域轮廓。

(4) 合并基础内、外轮廓，外形交叉线和封闭线组成样板轮廓，判断轮廓是否封闭。若是，进行后续样板模型生成操作；否则，退出。

3 算法实现及测试

利用专业开发工具对本文研究内容及相关理论进行实现，开发了“外形样板三维快速设计程序”，结合实际，验证本文提出算法的正确性和有效性。

以带弯边的框肋类零件作为测试对象对本文提出的有关算法及理论展开验证。如图 9 所示，零件包含两个单弯边，分别为直弯边和带直下陷的变斜角弯边，两弯边弯曲方向不同，各均在两侧开出圆角切边。运行程序对该零件进行外形样板快速设计，程序流程包含同侧面识别构建、样板基础轮廓计算、补加快速设计、样板模型生成等。

针对某框肋类零件如图 10(a) 所示，进行效率测试，使用程序的设计结果如图 10(b) 所示。其中，计算出的内环轮廓数据可根据设计者需要，选择作为实体内轮廓或样板标记显示，此处选择前者。将其交互数据与传统交互式设计方法的交互数据进行比较，结果如表 2 所示，设计效率显著提升。

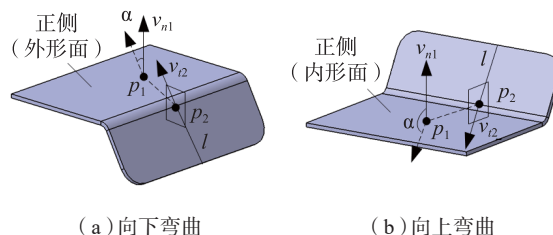


图8 内、外形面计算

Fig.8 Calculation of inner and outer sides

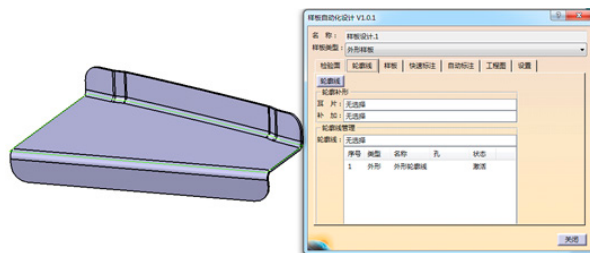


图9 实例测试

Fig.9 Functions of program

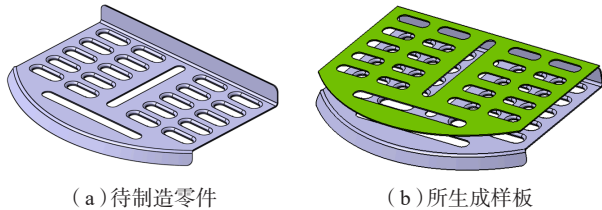


图10 某大型框肋类零件应用实例

Fig.10 Application example of a large rib sheet metal part

表2 某框肋类零件样板快速设计与交互设计对比

Table 2 Comparison between rapid design and interactive design of a sheet metal part template

交互设计			快速设计		
设计时间 /s	操作次数	节省率 /%	设计时间 /s	操作次数	节省率 /%
900	692	98.3	15	10	98.5

将本文所提方法与陈树林等^[3]所提出的外形样板快速设计方法进行对比,陈树林等所设计系统仅提升了单项弯边上相关轮廓计算的效率,需设计人员对零件上所有弯边进行逐项操作,且后续仍需设计人员对样板轮廓进行逐项拾取并整合。此外,如轮廓封闭线等数据的快速计算在其样板设计方法中未被提及。本文所提方法对可实现整块样板二维封闭轮廓快速计算,对样板设计人员的专业能力要求较小,无论从交互时间和设计时间都具备优势。

4 结论

作为框肋类零件制造及检验的常用工具,外形样板的设计效率对飞机研制与生产具有重要意义。本文研究了飞机外形样板三维快速设计的原理与算法,将长期积累的样板专家设计知识与数字化设计系统进行融合,在提高设计效率的同时降低了设计人员的劳动强度与专业知识要求。研究所取得的主要成果如下:

(1) 归纳弯边结构,提出了弯边特征的描述与定义,给出了弯曲元作为描述零件弯边构成的最小单元,并基于零件基础结构特征实现其构建及相关几何属性计算。

(2) 基于外形样板传统设计方法,提出了零件外形样板轮廓设计与补加设计算法,避免了样板设计过程中设计人员大量的交互与输入操作,大大减轻设计人员的工作量,降低错误率。

(3) 经实例测试表明,该算法能较好地实现外形样板快速设计,结果完整、合理。在零件几何信息有效提取及样板模型设计的基础上,可进一步实现样板的快速标注,这也是下一步的研究目标。

参考文献

- [1] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册(飞机模线样板)[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
Editorial Board of Manual of Aeronautical Manufacturing Engineering. Manual of Aeronautical Manufacturing Engineering (Aircraft Lofting and Template)[M]. Beijing: Aviation Industrial Press, 1993.
- [2] 石晶. 数字化条件下三维数模在模线样板设计中的应用[J]. 科技创新与应用, 2016(11): 17-18.
- [3] SHI Jing. Application of 3D digital model in the design of loft and template under digital condition[J]. Technology Innovation and Application, 2016(11): 17-18.
- [4] 陈树林, 杜宝瑞, 田世明, 等. 飞机样板快速设计系统及关键技术[J]. 制造业自动化, 2015, 37(17): 134-138.
CHEN Shulin, DU Baorui, TIAN Shiming, et al. Rapid designing system and key technologies of aircraft template[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(17): 134-138.
- [5] LIU Z J, LI J J, WANG Y L, et al. Automatically extracting sheet-metal features from solid model[J]. Journal of Zhejiang University Science B (Biomedicine & Biotechnology), 2004, 5(11): 1456-1465.
- [6] SHUNMUGAM M S. Processing of 3D sheet metal components in STEP AP-203 format, Part I: feature recognition system[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(4): 941-964.
- [7] GUPTA R K, GURUMOORTHY B. Classification, representation, and automatic extraction of deformation features in sheet metal parts[J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(11): 1469-1484.
- [8] SHUNMUGAM M S. Processing of 3D sheet metal components in STEP AP-203 format. Part II: feature reasoning system[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(5): 1287-1308.
- [9] SUNIL V B, PANDE S S. Automatic recognition of features from freeform surface CAD models[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(4): 502-517.
- [10] GUPTA R K, GURUMOORTHY B. Automatic extraction of free-form surface features (FFSFs)[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(2): 99-112.
- [11] CHUN J, ZHANG X H. Automatic recognition of intersecting features of freeform sheet metal parts[J]. Journal of Zhejiang University Science A (Applied Physics & Engineering), 2009, 10(10): 1439-1449.
- [12] BASSI R, REDDY N V, BEDI S. Automatic recognition of intersecting features for side core design in two-piece permanent molds[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(5-8): 421-439.
- [13] HB240-89-3102-1989. 模线样板[S]. 北京: 中华人民共和国航空航天工业部, 1989.
HB240-89-3102-1989. Lofting and template[S]. Beijing: Ministry of Aerospace Industry of the People's Republic of China, 1989.

通讯作者: 郑国磊, 教授, 研究方向为智能 CAD、工装智能化设计, E-mail: zhengguolei@buaa.edu.cn.

(责编 古京)