

文章编号: 1000-6893 (2005) 02-0229-05

飞机装配型架中骨架的数字化设计原理及实现

郑国磊¹, 朱心雄¹, 许德², 万世明²

(1. 北京航空航天大学 机械学院, 北京 100083)

(2. 成都飞机工业公司 总师办, 四川 成都 610092)

Principle and Implementation of Digital Frame Design for Aircraft Assembly Fixtures

ZHENG Guo-lei¹, ZHU Xin-xiong¹, XU De², WAN Shi-ming²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Office of Chief Engineers, Chengdu Aircraft Corporation, Chengdu 610092, China)

摘要: 骨架设计对型架的总体性能和研制进度具有重要的影响。因此, 在 FixCAD 系统的研制中, 将骨架的数字化设计方法作为一个主要的问题, 开展了专门的研究。但是, 由于这些研究未考虑到现在的骨架结构中含有曲轴线和新型材元件的情况, 其研究成果已不再适应于这些骨架结构的设计。为此, 从对骨架轴线的抽象定义、表示和计算入手, 探索和提出全新的骨架数字化设计技术, 从根本上解决现有方法存在的局限性。具体包括: (1) 根据骨架结构轴线及其设计方法的特点, 提出线元、线列和线链等新概念, 建立线元逻辑端矢的计算算子; (2) 应用所提出的概念和算子, 构建骨架的轴线模型、元件端面法矢计算方法、设计过程模型以及元件造型算法等; (3) 介绍利用所建立的数据模型和算法技术实现的“骨架数字化设计子系统”及其应用。最后, 总结了所介绍的技术特点和意义以及后续研究重点。

关键词: 飞机装配型架; 数据模型; 数字化设计

中图分类号: V263.2 **文献标识码:** A

Abstract: The frame design significantly affects the whole performance and development time of an aircraft assembly fixture. So the digital modeling of a frame was studied as a special topic during the research and implementation of the FixCAD system. But the proposed techniques are confined to the design of a frame which only contains all the elements with straight axes and standard sections, and unable to create the modern frame structures in which there are elements with curved axes and new sections. In order to solve the problem, the definition, representation and computation of a frame sketch are studied, and a new technique of digital frame design is proposed. This paper presents the technique and includes: firstly, based on the characteristics of the frame sketch and its design, some new concepts, such as line-segment, line-series and line-chain, are abstracted and defined, and the calculi of logic end vectors of a line-segment is created; secondly, according to these concepts and calculi, the sketch model, the end vector computation of an element, the process model of frame design and modeling of an element are constructed; thirdly, with the application of the proposed models and algorithms, the new system for digital frame design is developed and some of its applications are introduced.; finally, the characteristics of the new technique are concluded and the focal points in the future researches are proposed.

Key words: aircraft assembly fixture; data model; digital design

在飞机制造过程中, 采用了许多适合飞机结构及其生产特点的工艺装备——型架^[1]。为了适应现代飞机研制中对型架的设计周期和质量提出的高标准要求, 自“七五”开始并结合当时的某重点航空型号工程的研制, 作者在国内率先提出并开展了具有自主知识产权的“飞机装配型架智能化

设计 (FixCAD) 系统^[2]的研究和开发。

在型架结构中, 骨架除了用于固定和支撑定位件、夹紧件等各种工作元件外, 还起着确保这些元件空间位置的准确度和稳定性的作用, 因此, 骨架的设计质量和效率对型架的性能和研制进度具有全局性的影响。为此, 作为 FixCAD 系统研制中的重要子课题, 孟学军等^[3]曾对骨架的数字化设计方法和技术开展过专门的研究。但

收稿日期: 2004-02-23; 修订日期: 2004-06-11
基金项目: “十五”总装预研资助项目

是，由于在当时的研究中未考虑到现在的骨架结构中可能含有曲轴线和新型材（如方管）的元件，因而其研究成果已不再适用于这些骨架结构的设计。另外，现有的技术方法都是非常具体和富有针对性的，缺乏必要的理论支持，因此不具备灵活性和可扩张性，难以在现有的基础上提升这些技术的适应性和设计能力。

为了解决这些局限性，作者从分析骨架的结构轴线及其元件形状的共性特点入手，引入新概念和相关算子，抽象轴线的定义、表示和计算方法，建立骨架设计的过程模型，以及构造元件造型的算法等。

1 定义与算子

骨架轴线是骨架结构设计及其元件实体造型的最重要基础。为了建立严格的骨架轴线模型以及造型参数的计算方法，这里先提出如下几个概念及相关算子：

(1) 线元、线列和线链 构成骨架轴线的常见几何单元有直线段、圆、圆弧和曲线段，如图1所示，称这些单元为线元 s_u 。

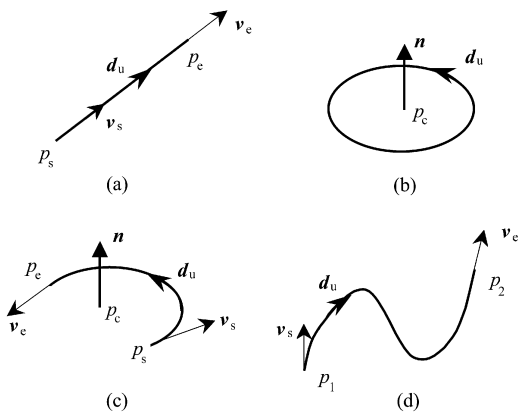


图1 线元及其方向

Fig. 1 Line units and their directions

s_u 的参数化定义形式为

$$s_u = \begin{cases} (p_s, p_e) & s_u \quad L_n \\ (p_c, r, n) & s_u \quad C_r \\ (p_c, r, n, p_s, p_e) & s_u \quad A_r \\ (p_1, p_2, \dots, p_m) & s_u \quad C_v \end{cases} \quad (1)$$

式中： L_n 、 C_r 、 A_r 和 C_v 分别为直线段、圆、圆弧和曲线段组成的集合， p_i ($i=1, 2, \dots, m$)， p_c 、 p_s 和 p_e 均为点，且 p_s 与 p_e 和 p_1 与 p_m 分别为直线段和圆弧及曲线段的始点和终点； n 为圆和圆弧平面的单位法矢； r 为圆和圆弧半径。图1中的 d_u 代表线元的正向， $-d_u$ 代表负向。

一组线元 $s_{u,i}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 构成的序

偶称为一个线列 s_t ，即 $s_t = (s_{u,1}, s_{u,2}, \dots, s_{u,n})$ 。若 s_t 中线元依次相接，则称 s_t 为线链。

(2) 线元逻辑端矢 对于线列 s_t 和线元 s_u ，分别定义算子 $V_{u,s}(s_t, s_u)$ 为

$$V_{u,s}(s_t, s_u) = \begin{cases} v_s, I(s_t, s_u) & 0 \\ & D(s_t, s_u) = 1 \\ -v_e, I(s_t, s_u) & 0 \\ & D(s_t, s_u) = -1 \\ \phi, I(s_t, s_u) & 0 \end{cases} \quad (2)$$

和 $V_{u,e}(s_t, s_u)$ 为

$$V_{u,e}(s_t, s_u) = \begin{cases} v_e, I(s_t, s_u) & 0 \\ & D(s_t, s_u) = 1 \\ -v_s, I(s_t, s_u) & 0 \\ & D(s_t, s_u) = -1 \\ \phi, I(s_t, s_u) & 0 \end{cases} \quad (3)$$

用于提取 s_u 在 s_t 中的逻辑始端矢 $v_{u,s}$ 和逻辑终端矢 $v_{u,e}$ (如图2所示)。图中： v_s 和 v_e 为 s_u 的始端矢和终端矢(见图1所示)。 $I(s_t, s_u) = 0$ ，表示 s_u 是 s_t 的成员；否则，亦即 $I(s_t, s_u) = 0$ ，意为 s_u 不是 s_t 的成员。 $D(s_t, s_u) = 1$ ，代表 s_u 与 s_t 方向相同；反之，亦即 $D(s_t, s_u) = -1$ ，表示方向相反。

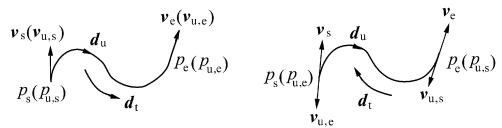


图2 线元逻辑端矢

Fig. 2 Logical end normal vectors of a line unit

2 轴线模型与骨架建模

2.1 轴线模型

骨架轴线 S 是一组线链 $s_{t,i}$ ($i=1, 2, \dots, m$) 的集合，即

$$S = \{s_{t,i} / i = 1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

其直观表示如图3所示。在 s_u 结点中，除了其定义参数(见式(1))外，还包含了其对应元件造型所需的端面法矢、长度、方位角和局部(元件)坐标系等参数，这些参数在定义和建立 s_u 及其所在 s_t 的同时即已生成。其中，端面法矢的计算方法如下：

设 s_t 为线元 s_u 所在的线链，则其对应元件的端面法矢 $v_{n,s}$ (始端矢)和 $v_{n,e}$ (末端矢)依次用下列两式计算

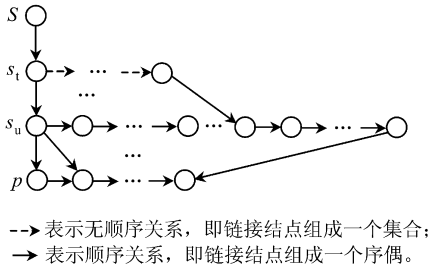


图 3 轴线模型

Fig. 3 Sketch model of a frame

$$V_{n,s}(S_t, S_u) = \begin{cases} -V_{u,s}(S_t, S_u), L(S_t, S_u) = \phi \\ -V_{n,e}(S_t, S_{u,l}), S_{u,l} = L(S_t, S_u) \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{n,e}(S_t, S_u) = \begin{cases} V_{u,e}(S_t, S_u), R(S_t, S_u) = \phi \\ V_n(v_1, v_2), v_1 = V_{u,e}(S_t, S_u), \\ v_2 = V_{u,s}(S_t, S_{u,r}), \\ S_{u,r} = R(S_t, S_u) \end{cases} \quad (6)$$

式中：等式“ $L(S_t, S_u) = \phi$ ”和“ $S_{u,l} = L(S_t, S_u)$ ”分别代表“ S_u 为 S_t 的第 1 个成员”和“ $S_{u,l}$ 为紧邻 S_u 的前 1 个成员”，“ $R(S_t, S_u) = \phi$ ”和“ $S_{u,r} = R(S_t, S_u)$ ”分别表示“ S_u 为 S_t 的最后一个成员”和“ $S_{u,r}$ 为紧邻 S_u 的后 1 个成员”； $V_{u,s}$ 和 $V_{u,e}$ 见式 (2) 和式 (3)； $V_n(v_1, v_2)$ 为 v_1 与 v_2 间角平分矢的算式。

同样，可以建立其它造型参数的计算方法。这里，不再赘述。

2.2 骨架建模

基于轴线模型的骨架三维结构的设计过程如图 4 所示，其中 S_t 、 S_u 、 E_u 和 E_t 分别代表线链、线元、元件和元件链的集合。所谓元件链 $e_{t,i}$ ，是指对应于线链 $S_{t,i}$ 的端面相接的一个元件序列。由图中可见，骨架的建模过程包含 3 个阶段：

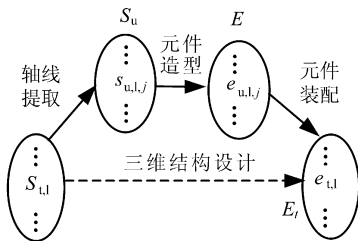


图 4 骨架三维建模过程

Fig. 4 Process of modeling a frame

(1) 轴线提取 通过遍历轴线模型，依次获取各个线元及相关的元件造型参数。

(2) 元件造型 根据指定的型材类型和规

格，查询型材库，并获取型材截面的定义参数。根据型材截面和元件造型参数，调用专门的算法（见 2.3 节），建立元件的实体模型。

(3) 元件装配 根据元件坐标系，进行元件在骨架结构空间中的自动定位和装配。元件在元件坐标系中的位置和方向为系统预先设定的，通过引入方位角来定义和调整其在元件坐标系中的朝向。

2.3 元件造型

从图 4 可见，除了轴线模型的构造外，“元件造型”是骨架三维结构建模的关键。其算法流程如图 5 所示。

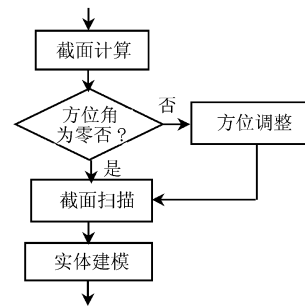
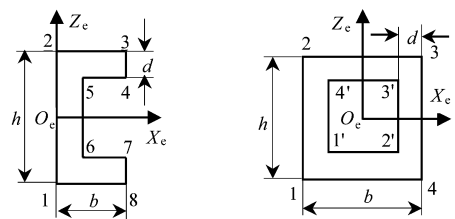


图 5 元件造型流程

Fig. 5 The flowchart of modeling an element

(1) 截面计算 即按照预先的设定和型材类型及其定义参数，计算位于元件坐标系中 xz 坐标面内的一组特征点，并用这组特征点表示元件基准截面的内外边界。如槽钢和方钢型材的基准截面及其特征点定义如图 6 (a) 和 (b) 所示。



(a) 槽钢

(b) 方钢

图 6 基准截面的定义及计算

Fig. 6 Definition and calculation of a section

(2) 方位调整 根据输入的方位角，在元件坐标系的坐标面内，绕原点旋转元件的基准截面，以调整元件在其坐标系中的朝向。

(3) 截面扫描 沿元件轴线（线元）及其所在线链的正向，先后扫描基准截面的外环和内环，计算元件的基体和中间穿孔边界上的各个顶点。根据后续“实体建模”的需要，这些顶点按照统一的规则严格排序和编号。

(4) 实体建模 根据元件边界上的顶点序列

和各要素间的关系,运用通用的算法,依次建立元件实体表示结构中的顶点表、边表、环表、面表和体结点等。

在 FixCAD 系统中,实体均采用边界模型表示,因此实体建模也就是建立骨架元件的边界表示结构。过去,常用的方法是为每一类型材开发其专门的造型程序。对于采用有限的型材类型和具有直轴线的元件,这种方法是可行和实用的。但是,随着现代飞机结构的变化和先进制造方法的应用,型架中的骨架结构也发生了改变,如通过直接采用由直线和圆弧等构成的复杂曲轴线的元件,来简化骨架的结构及其设计。过去的元件造型方法已不能适应这样的变化,需要提出新的思路和方法。为此,作者在深入分析骨架的直轴线和曲轴线的元件的形状特点的基础上,建立了统一的元件边界的数学结构,利用这一结构设计了通用的元件“实体建模”算法。这项技术很好地解决了原有方法的局限性,也为研究和开发实体造型方法提供了一种新思路。

3 系统开发及应用

应用上面提出的技术方法,成功地开发了 FixCAD 系统中“骨架数字化设计子系统”,如图 7 所示。作为 FixCAD 系统的核心组成之一,该系统已应用于多个航空型号、数十套关键部件装配型架的骨架设计。图 8 即为所设计的某飞机

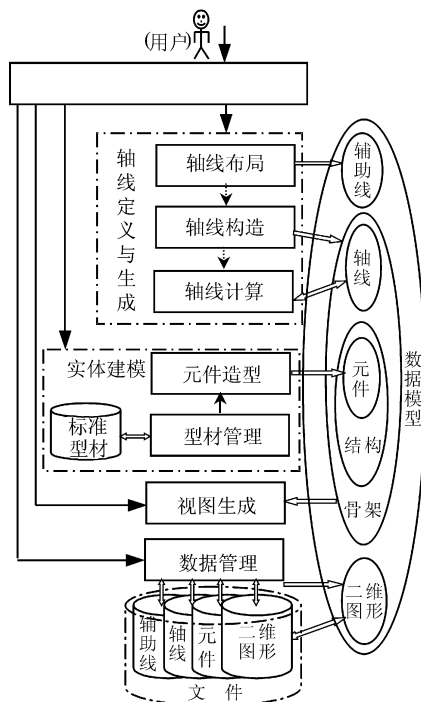


图 7 骨架数字化设计子系统

Fig. 7 The subsystem of digital frame design

座舱段装配型架的结构轴线,其对应的骨架如图 9 (a) 所示。首先,根据产品理论外形和专业知识,依次调用“轴线布局”、“轴线构造”和“轴线计算”等各项功能建立图 8 所示的轴线模型;然后,交互指定各轴线(线链)及选择型材类型和规格,调用“元件造型”功能,自动生成图 9 (a) 所示的各元件实体。按照同样的方法,可设计图 9 (b) 所示的含有曲轴线元件的骨架。

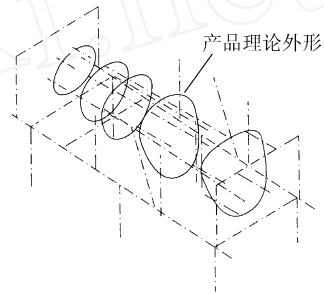


图 8 骨架轴线

Fig. 8 The sketch model of a frame

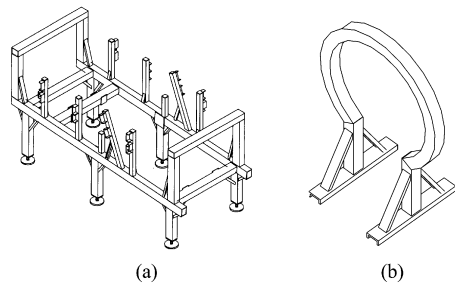


图 9 典型骨架结构

Fig. 9 Two typical frames designed with FixCAD

4 结束语

在深入分析骨架结构及其设计特点的基础上,提出了线元和线链等新概念,构造了线元逻辑端矢的计算算子。应用这些概念和算子,构建了严格的骨架轴线模型和结构设计过程模型,建立了元件造型所需参数的计算方法和相关算法。由于这些模型和技术方法均建立在抽象和具有普遍意义的概念和算子基础上,因而具有较强及通用的表达和设计能力,亦即应用统一的算法,可设计具有直轴线或曲轴线以及不同型材类型的元件。应用实例证实,所研究和开发成果对提升 FixCAD 系统的骨架设计能力以及适应现代飞机制造工艺装备的结构变化具有重要的意义。后续的研究重点是自动识别飞机装配件外形和结构特征,并在此基础上运用型架结构布局设计的知识和经验,自动建立骨架的轴线模型,以进一步提高骨架设计的智能化和自动化程度。

参 考 文 献

- [1] 王云渤, 张关康, 冯宗律, 等. 飞机装配工艺学 (修订本) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
Wang Y B, Zhang G K, Feng Z L, *et al.* Aircraft assembly technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [2] 郑国磊, 冯宗律, 王云渤, 等. 飞机装配型架 CAD 系统 [J]. 航空制造工程, 1996 (9): 14 - 15.
Zheng G L, Feng Z L, Wang Y B, *et al.* Aircraft assembly fixture CAD system [J]. Aviation Production Engineering, 1996 (9): 14 - 15. (in Chinese)
- [3] 孟学军, 王云渤. 框架结构 CAD 系统 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11 (2): 154 - 158.

Meng X J, Wang Y B. Frame CAD system [J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 1999, 11 (2): 154 - 158. (in Chinese)

作者简介:



郑国磊 (1964 -) 男, 福建莆田人, 北京航空航天大学机械学院教授, 分别于 1988 和 2003 年获北京航空航天大学航空宇航制造工程专业硕士、博士学位, 主要从事智能 CAD、工装智能设计和计算机辅助工艺人机学等方面的教学、研究和开发工作。联系电话: 010-82901716 (H), 13910303992, 010-82317704 (O); E-mail: zhengguolei@buaa.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐)

第 25 届国际航空科学大会 (ICAS2006) 征文通知

国际航空科学理事会 (ICAS) 主办的第 25 届国际航空科学大会将于 2006 年 9 月 3 - 8 日在德国汉堡举行。本届大会由德国航空航天学会 (DGLR) 承办。会议涵盖航空科学技术的各个领域, 并设学生论文和墙报论文。会后组织参观德国有关航空单位。会议注册费约 550 欧元 (预注册者有优惠)。

中国航空学会作为代表中国参加 ICAS 的会员, 受 ICAS 秘书处委托在国内征文: 一、征文通知全文可在 ICAS 网站 (地址: www.icas.org) 上查阅。2005 年 7 月 31 日前通过 ICAS 网站提交英文详细摘要 (提交程序于 2005 年 5 月开通)。摘要包括文字与少量必要的图表, 不超过 2 页。

二、投送摘要必须标明主题范围 (按征文通知 TOPIC AREAS 所列) 和类别 (Oral, Poster, Student), 并注明作者姓名 (拼音全名)、单位对外英文名称、英文详细通讯地址、电话、传真、电子信箱。合作论文署名不得超过 3 人。

三、论文摘要由 ICAS 程序委员会于 2005 年 11 月评审后, 通知作者是否录用。被录用的论文应于 2006 年 6 月 15 日前提提交全文, 过期则不能收入会议论文集 (光盘)。

四、学生论文必须由学生本人撰写和到会宣读, 并在 2005 年 11 月评审之前向 ICAS 声明能够承担出席会议的费用。

五、ICAS 要求作者所在国学会 (我国为中国航空学会) 对投递的摘要提出推荐意见。为方便我会工作, 请投稿者在提交摘要时同时送交我会 1 份, 并注明提交成功时 ICAS 给予的编号和作者中文姓名、单位, 在信封或电子邮件标题栏注明“ICAS 征文”。鉴于以往我国有些作者投稿被录用后却不出席会议, 给会议组织者带来麻烦, 也影响我国科技工作者的声誉, 我会要求所有投稿者同时向我会提交所在单位保密审查证明和经费保证的书面材料。凡未能提供以上材料者, 我会将把推荐意见定为“不推荐”。

六、中国航空学会联系人: 王晓舟, 赵霜红

电话: 010 - 64021416, 64021415, 传真: 010 - 64021413

电子邮箱: lunwen@csaa.org.cn

通讯地址: 北京东城区亮果厂五号中国航空学会 (100010)