

# 飞机结构强度试验载荷演算方法

李 葭

(成都飞机工业(集团)公司技术中心, 四川 成都 610092)

**摘要:** 针对飞机结构试验设计计算问题, 将计算机辅助设计技术引入这一领域, 结合飞机的曲面外形, 探讨了飞机结构试验设计中的分布式载荷和集中式载荷的演算问题, 在 UNIX 工作站上 Motif 图形用户界面环境下完成了交互式的载荷演算软件, 使载荷演算能够以较高的精度和自动化程度进行, 并且可以使载荷演算的结果直观地以图形方式进行显示。结果表明, 利用计算机辅助设计的载荷演算方法更精确、快速。

**关键词:** 结构试验; 计算机辅助设计; 载荷演算

用传统手工设计方法进行结构试验设计时, 复杂的飞机外形及庞杂的试验载荷, 使得设计计算工作量很大, 试验设计修改不易, 试验周期长, 无法适应现代飞机设计的要求。因此为了有效解决加载点的协调与载荷演算问题, 必须充分利用交互计算机图形技术和计算机软件开发技术, 开发适合现代飞机制造技术的试验设计应用软件, 有效地解决全尺寸飞机静力、疲劳试验及结构部件静力、疲劳试验在试验设计时的大量计算和复杂加载载荷的协调问题<sup>[1]</sup>。

本文采用了将 CAD 技术引入结构试验设计工作的方法, 开发了相应的计算机软件, 实现结构试验 CAD 工作中飞机外形在计算机中的描述与处理, 并以此为基础解决了结构试验设计过程中载荷演算的自动化进行的问题, 为后续试验设计工作铺平了道路。

为完成上述工作, 共编制了 C 语言程序 10000 余条, 实现了两部分软件: 一部分是由大型设计软件 IESP 输出的外形数据拟合生成飞机的外形, 另一部分是采用人机交互、图形显示等技术完成结构试验设计中的载荷演算。软件在工作站硬件平台和 UNIX 操作系统下开发, 采用了标准 Motif 图形用户界面, 具有良好的可移植性<sup>[2][3]</sup>。

## 1 结构的外形拟合

在载荷演算软件中, 主要是由曲线和曲面表示飞机外形, 描述飞机外形时, 采用了部件、曲面、曲线、控制点等的分级数据结构。部件由曲面组成, 曲面由不同站位的截面曲线决定, 显示和处理中用到曲面数据时, 按照用户给定的精度将其离散成小平面对格, 然后通过对小平面对格进行处理实现对曲面的处理。

在飞机外形的描述中 Bezier 曲线和 B 样条曲线是两种常用方法<sup>[4][5]</sup>, 两者描述方法相比, B 样条方法具有可以进行局部修改、描述能力强等良好特性, 非常适合于在设计中使用, 但在拟合大量的数据点时, 描述相同的外形, B 样条方法的数据量远大于 Bezier 方法, 如采用其描述整架飞机的外形, 数据量太大; 在载荷演算软件中, 所使用的飞机外形是别的软件已经设计好的, 只需要对已有的外形

数据进行处理, 并不要求有外形设计的能力, 而且对结构试验设计来说, 要求的主要是位置精度, 采用较高阶次的 Bezier 曲线在精度方面完全可以满足要求, 而描述所用的数据量大大少于 B 样条方法。所以, 在软件中最终采用的是 Bezier 方法。经过实际使用, 完全可以满足要求。

## 2 载荷演算的分类与处理

在进行结构试验设计时, 已有的载荷分三类, 一类是已经计算好的小集中载荷, 可直接进行加载设计, 如机翼上演算后的载荷; 另一类是分布式载荷, 这类载荷只给出了单位面积上载荷的大小及变化规律, 作用在已知形状的部件上, 如座舱上的载荷; 第三类是集中式载荷, 这类载荷给出了大小和方向, 但载荷值往往很大, 不能直接按给出的载荷进行加载, 如机身上的载荷。

因为结构试验时对结构加载只能是集中载荷, 而且必须通过粘贴胶布带和打孔等方法进行, 单个载荷不能太大, 所以对后两类载荷在结构试验设计时必须进行演算, 将其转变成等效且可以进行实际加载的载荷, 又因为结构试验的目的是要模拟真实结构在外载作用下的真实工作情况, 所以在进行载荷演算时也要以能够更好地模拟真实载荷为目的。一般情况下, 分布式载荷分块演化为集中载荷, 大集中载荷分解为一定数量的比较小的集中载荷。

### 2.1 分布式载荷演算方法

对飞机结构试验来说, 在进行试验设计时, 机翼上的载荷使用的是强度计算时确定的载荷, 只需进行少量调整, 不需要再进行重新演算。由于座舱外形曲度很大, 不可能再向机翼那样, 将载荷演化为互相平行的, 对这种情况只能演化为平面非平行力系。以下结合座舱载荷演算的软件实现介绍这类分布式载荷的演算方法。

处理座舱上的载荷时, 由于要求演化后的各组载荷分别在同一平面内, 一般先将座舱外形沿纵向分为几块, 每块演化出一组载荷, 各组载荷分别在同一平面内。分块完成后, 需要对各块分别进行处理, 将各分块作为一个单独的曲面, 对其上的分布载荷进行演算, 得出一组在同一平面内的集中载荷。

求曲面上分布载荷的合力作用点时,对曲面用离散后的三角形逼近,将每个小三角形上作用的分布载荷集中到它的形心上,得到整个曲面上分布载荷的合力。

各小三角形的处理方法如下,设三角形三个顶点为  $\bar{A}(x_1, y_1, z_1)$ 、 $\bar{B}(x_2, y_2, z_2)$ 、 $\bar{C}(x_3, y_3, z_3)$ ,三边长分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,面积  $S$ ,分布载荷大小为  $q$ ,合力大小为  $F$ ,方向为  $\bar{V}(u, v, w)$ , 计算方法是:

$$s = \frac{1}{2}(a+b+c)$$

$$S = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$$

$$F = q \cdot S$$

$$\bar{V} = \bar{A}\bar{B} \times \bar{B}\bar{C} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ (x_2-x_1) & (y_2-y_1) & (z_2-z_1) \\ (x_3-x_1) & (y_3-y_1) & (z_3-z_1) \end{vmatrix} = u\bar{i} + v\bar{j} + w\bar{k}$$

$$u = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (y_3 - y_1)(z_2 - z_1)$$

$$v = (x_3 - x_1)(z_2 - z_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1)$$

$$w = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)$$

## 2.2 集中载荷演算方法

飞机上所受的载荷除分布式载荷外,有时机身等部件上还受有很大的集中载荷,必须经过载荷演算,对这种载荷进行分解,使其等效成一定数量的比较小的集中载荷,然后才能进行设计加载。

由于演算后的集中载荷要在机身的曲面上进行布置,为了确定载荷的位置,必须首先求出各站位处的截面线,使下一步沿站位的截面线布置载荷成为可能。

表 1 座舱上分布载荷分块后计算结果 单位: mm

站 位	2200.	2350.	2575.	2715.	2845.	3000.	3200.	3406.	3580.	3700.	3820.
角 度	80°	80°	85°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	110°	120°
加载点数	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	5



图 1 座舱上各分块载荷演算后图形结果显示

## 3.2 集中载荷

集中载荷演算采用的是机身上作用的 19 个集中载荷,演算结果如图 2 所示。

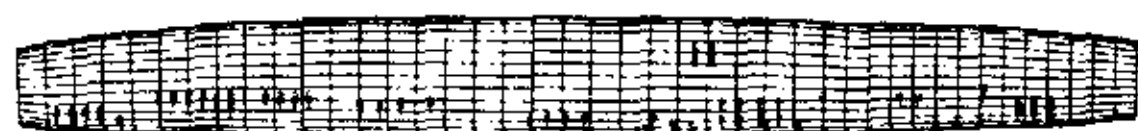


图 2 集中载荷演算后图形结果显示

## 4 结论与展望

随着计算机软硬件技术和其它相关技术的不断向前发展,先进国家的飞机设计技术由过去的各方面相互独立向设计、分析、试验计算机一体化方向发展。针对这种趋势,本文完成了飞机结构试验设计软件的基础性工作,再加入

在机身上布置加载点时,对机身对称面内的载荷,一般规定布置时的起始  $y$  坐标。进行截面内演算时,首先根据给定的起始  $y$  坐标确定第一个加载点的位置,然后根据胶布带的尺寸,确定其余加载点的位置,各加载点的载荷大小按总载荷进行等分,对机身对称面内的  $y$  向载荷,由于在机身两侧分别进行布置,没有附加力矩产生,不需要进行平衡,而对其它载荷,由于沿截面的弧长进行布置时,各加载点对原始的载荷作用点不具有对称关系,等分所得的载荷不能保证与原载荷力矩等效,这时,为了平衡附加的力矩,需要在各截面内对载荷进行调整,使演算后的载荷与原始载荷完全等效。

对载荷演算的结果,软件中按一定的数据结构进行保存,在显示几何外形的同时,还可对载荷的位置和方向进行显示,便于用户直观地检查载荷演算的结果。

## 3 算例

此处采用的算例是某型飞机进行结构静力试验时所采用的数据,分布载荷演算采用的是座舱上的分布载荷,集中载荷是机身上的集中载荷。经过两种形式的演算,结果都和人工设计的结果基本一致。

### 3.1 分布载荷

取分布载荷大小为  $0.008287\text{N/mm}^2$ ,演算结果如表 1、图 1 所示。

杠杆系统设计、扣重、配重计算、平衡计算等功能即可实现完整的计算机辅助飞机结构试验设计软件,从而提高飞机设计工作的效率和准确性,缩短新机研制的周期,为计算机模拟试验技术奠定了基础,同时还适用于汽车、船舶制造等领域。

## 参考文献:

- [1] 顾松年,等. 结构试验基础. 西安:西北工业大学出版社,1990.
- [2] Open Software Foundation. OSF/Motif Programmer's Guide. PTR Prentice-Hall,1993.
- [3] 多窗口图形系统的设计与实现. 西安:西北工业大学学报,1997, 15(4): 613-618.
- [4] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条. 北京:北京航空航天大学出版社,1994.
- [5] Milroy M J, Bradley C, Vickers G W, Weir D J. G Continuity of B-spline Surface Patches in Reverse Engineering. Computer Aided Design, 1995, 27(6): 471-478.