

工装托架线性静力分析及变形计算

Deformation Calculation and Linear Static Analysis of Tooling Bracket

北京航空制造工程研究所

甘露

[摘要] 基于 ANSYS 的有限元技术对工装托架横梁进行线性静力分析,得到不同姿态情况下横梁的变形;根据分析结果,用拉格朗日插值法构造横梁的变形方程,对横梁的形状函数进行校正。

关键词: 托架 静力分析 插值 有限元

[ABSTRACT] In order to obtain the deformation of a bracket beam along with different rotational angle, the finite element technology based on ANSYS is applied to the linear static analysis. The deformation formulas of beam is constructed by using Lagrange Interpolation Polynomials according to the analysis result. The shape function of the timer is adjusted.

Keywords: Bracket Static analysis Interpolation Finite element

工装托架在飞机大型机翼装配制造的关键自动钻铆工序中有着广泛的应用。机翼钻铆精度很大程度上取决于钻铆过程中钻铆机动力头加工轴线相对联接区域的垂直精度。由于受到钻铆冲击,托架在自身重力作用下会产生较大的变形,机翼姿态在空间动态变化,从而导致实际钻铆位置和理论位置存在较大的偏差,使钻铆出来的产品质量达不到要求,因此必须解决工装托架变形补偿的问题。

本课题按以下步骤进行分析计算^[1]:

(1) 用 ANSYS Workbench 分析围框在不同运动姿态下(如图 1、2 所示绕 YC 轴转动为 A 角,绕 XC 轴转动为 B 角;先转动 B 角后转动 A 角。 $A \in [0^\circ, 15^\circ]$, $B \in [0^\circ, 9^\circ]$) 由自重产生的变形;

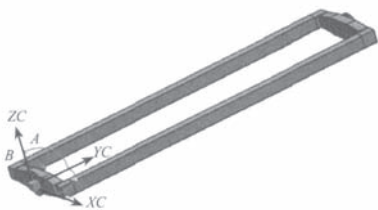


图 1 围框实际模型局部

Fig.1 Part of real model for frame

② 根据 ANSYS Workbench 的分析结果,用拉格朗日插值函数构造围框变形量的计算公式;

③ 对围框的形状函数进行校正。

1 有限元模型的建立

1.1 三维几何模型的建立

围框分为 2 个部分:端梁和横梁。由于端梁部分的变形量很小,在有限元分析时将其忽略。由于围框的结构对称,本课题只选取其中的一根横梁进行分析。

在划分网格时,横梁上一些微小特征会导致单元数量的增加,并会产生不理想的单元形状,使分析结果存在较大误差。实际上,这些微小特征对横梁变形影响极小,有必要对横梁进行简化。以简化后的横梁为研究对象,在 UG 中建立横梁的几何模型(见图 2)。

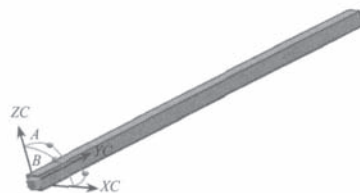


图 2 简化后的横梁 CAD

Fig.2 CAD model beam after simplification

1.2 有限元模型的建立

ANSYS Workbench 中的重力加速度只有 6 个方向(分别为 $+X$ 、 $-X$ 、 $+Y$ 、 $-Y$ 、 $+Z$ 、 $-Z$) 可供选择。考虑到横梁的转动,先根据转角 A 、 B 建立新的工作平面,然后将 CAD 模型导入。横梁材料选用结构钢,弹性模量 $E=200\ 000\text{MPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho=7.85 \times 10^{-6}\text{kg}/\text{mm}^3$ 。

横梁简化以后,沿长度方向具有相同的截面,而且横梁结构形状对称,为了消除网格不对称引起的误差,用六面体单元建立三维扫掠网格。网格划分后的有限元模型如图 3 所示,共有 26 289 个节点,4 500 个单元。

1.3 边界条件和载荷的施加

如上文所述,端梁的变形量很小,横梁两端面相对

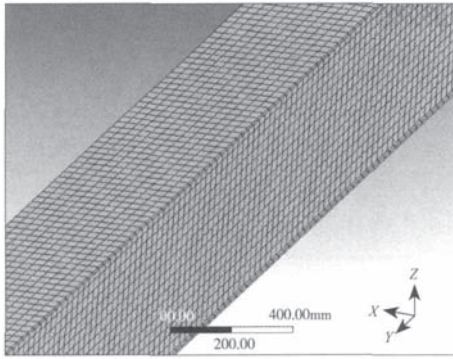


图3 有限元模型网格(局部)

Fig.3 Finite element model grid (Part)

距离看成不变。在模型导入时已经考虑到围框的转角 A, B , 因此将横梁两端面的边界条件设置为 Fixed Support。本课题只考虑横梁自重产生的变形, 故只需施加重力载荷。重力加速度大小选择系统默认值, 方向为 +Z (此时重力方向指向 -Z)。

1.4 分析环境设置

本课题研究横梁在不同转角状态下, 由自重产生的变形, 从中总结出横梁变形量随转动角度变化的规律, 忽略横梁转动过程中惯性的影响, 这里采用结构线性静力分析。

Ansys Workbench 的求解方法有 2 种: 直接法和迭代法。直接法适合于薄壁类零件的求解, 迭代法则适合于大体积零件的求解^[2]。由于横梁的厚度相对于宽度和长度而言比较小, 可以看成是薄壁类零件, 所以这里选择直接法求解^[3]。

1.5 求解及结果

横梁处于水平状态(即 $A=B=0^\circ$) 时, 分析结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 横梁的最大变形发生在横梁

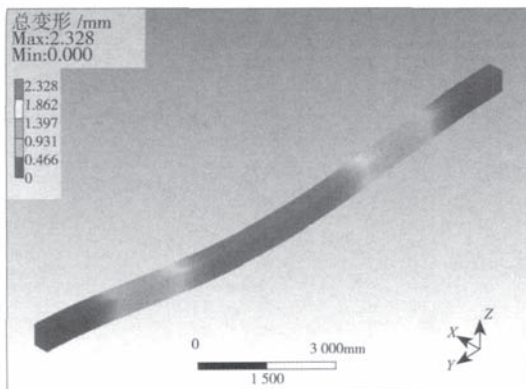


图4 横梁的变形云图

Fig.4 Deformation nephogram of beam

中部附近, 最大变形量为 2.328mm。这 and 实际测量的结果是相吻合的。

2 变形计算

在自重状态下, 横梁主要发生弯曲变形, 变形前后横梁沿长度方向 (Y 方向) 的任一横截面形状基本保持不变, 即同一截面上的各个点沿宽度方向 (X 方向) 和高度方向 (Z 方向) 变形量基本相同。为了总结横梁的变形规律, 在横梁上表面中线 l (沿长度方向, 横梁长度为 L) 上取 5 个点 (见图 5):

$$a_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (i=1, 2, \dots, 5)$$

其中, $x_i=0$; $z_i = \frac{H}{2}$ (H 是横梁高度); a_3 是中线 l

的中点, $y_3 = \frac{y_1 + y_5}{2} = \frac{y_2 + y_4}{2} = 0.5L$ 。

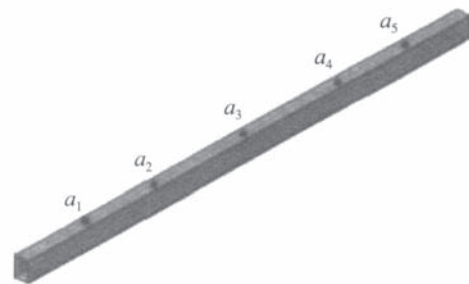


图5 中线 l 上取 5 个点

Fig.5 Selecting 5 points on center line l

利用力学方法得到横梁变形量和转角 A, B 的关系; 根据 Workbench 分析结果, 用拉格朗日插值法构造横梁的变形公式。

下文中, $F_n(A, B, y)$ 表示横梁处于转角 A, B 状态下, 中线 l 上一点的变形, 其中 $n=1$ 表示 X 方向的变形, $n=2$ 表示 Z 方向的变形。 $f_n(A, B, y)$ 表示横梁处于转角 A, B 状态下, 通过 ANSYS Workbench 分析得到的中线 l 上点 a_i 的变形, 其中 $n=1$ 表示 X 方向的变形, $n=2$ 表示 Z 方向的变形。

2.1 沿宽度方向 (X 方向) 的变形^[4]

重力 G 沿 X 方向的分量 $G_1 = G \cdot \sin A \cdot \cos B$ 。在弹性形变范围内, $F_1(A, B, y) \in G_1$, 应该有表示

$$F_1(A, B, y) = K_1(y) \sin A \cos B, \quad (1)$$

其中, $K_1(y)$ 仅与 y 有关, 而与 A, B 无关,

$$K_1(y) = \frac{F_1(A, 0, y)}{\sin A} = \frac{F_1(3^\circ, 0, y)}{\sin 3^\circ}。$$

表1 $f_1(A, B, y)$ 和相对误差 Q_1

$A, B / (^\circ)$	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	3,3	6,6	9,9
$f_1(A, B, y_1)$	0.07	0.14	0.20	0.27	0.34	0.07	0.14	0.20
$f_1(A, B, y_2)$	0.18	0.36	0.55	0.73	0.91	0.18	0.37	0.54
$f_1(A, B, y_3)$	0.26	0.51	0.77	1.02	1.28	0.26	0.51	0.76
$f_1(A, B, y_4)$	0.18	0.36	0.55	0.73	0.91	0.18	0.37	0.54
$f_1(A, B, y_5)$	0.07	0.14	0.20	0.27	0.34	0.07	0.14	0.20
Q_1	0.632%							

令

$$F_1(3^\circ, 0, y_i) = f_1(3^\circ, 0, y_i),$$

相对误差限

$$e_r(f_1(A, B, y_i)) = \frac{F_1(A, B, y_i) - f_1(A, B, y_i)}{F_1(A, B, y_i)},$$

$$Q_1 = \text{Max}\{|e_r[f_1(A, B, y_i)]|\} \quad (i=1, 2, \dots, 5).$$

从表1可以看出,式(1)计算得到的 $F_1(A, B, y_i)$ 和 WorkBench 分析得到的 $f_1(A, B, y_i)$ 基本吻合,相对误差限为 0.632%;由于横梁结构对称,重力载荷为均布载荷,应该有 $F_1(A, B, y) = F_1(A, B, L-y)$,通过表1也可以发现 $f_1(A, B, y_i) = f_1(A, B, L-y_i)$,这说明用 WorkBench 分析得到的结果和实际情况是吻合的。

把 $F_1(3^\circ, 0, 0)$ 记为 $f_1(3^\circ, 0, y_0)$,结合 $f_1(3^\circ, 0, y_i) (i=1, 2, 3)$,用拉格朗日插值法分段构造的计算公式为

$$F_1(3^\circ, 0, y) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 f_1(3^\circ, 0, y_i) l_i(y), & 0 \leq y \leq \frac{L}{2} \\ \sum_{i=0}^3 f_1(3^\circ, 0, y_i) l_i(L-y), & \frac{L}{2} \leq y \leq L \end{cases}, \quad (2)$$

其中

$$\text{变形量} \quad l_k(y) = \frac{\omega_4(y)}{(y - y_k)\omega'_4(y_k)},$$

$$\omega_{n+1}(t) = \prod_{i=0}^n (t - t_i),$$

联立(1)、(2)式,得

$$F_1(A, B, y) = \begin{cases} \frac{\sin A \cdot \cos B}{\sin 3^\circ} \sum_{i=0}^3 f_1(3^\circ, 0, y_i) l_i(y), & 0 \leq y \leq \frac{L}{2} \\ \frac{\sin A \cdot \cos B}{\sin 3^\circ} \sum_{i=0}^3 f_1(3^\circ, 0, y_i) l_i(L-y), & \frac{L}{2} \leq y \leq L \end{cases} \quad (3)$$

2.2 沿高度方向(Z方向)的变形

重力 G 沿 Z 方向的分量 $G_2 = G \cdot \cos A \cdot \cos B$ 。在弹性形变范围内, $F_2(A, B, y) \in G_2$, 应该有

$$F_2(A, B, y) = K_2(y) \cdot \cos A \cdot \cos B, \quad (4)$$

其中 $K_2(y)$ 仅与 y 有关,而与 A, B 无关, $K_2(y) = F_2(0, 0, y)$ 。

$$\text{令 } F_2(0, 0, y_i) = f_2(0, 0, y_i),$$

$$e_r[f_2(A, B, y_i)] = \frac{F_2(A, B, y_i) - f_2(A, B, y_i)}{F_2(A, B, y_i)},$$

$$Q_2 = \text{Max}\{|e_r[f_2(A, B, y_i)]|\} \quad (i=1, 2, \dots, 5).$$

从表1可以看出,式(4)计算得到的 $F_2(A, B, y_i)$ 和 Workbench 分析得到的 $f_2(A, B, y_i)$ 基本吻合,相对误差限为 0.27%;由于横梁结构对称,重力载荷为均布载荷,因此在水平状态下应该有 $F_2(0, 0, y) = F_2(0, 0, L-y)$;再根据

$$F_2(A, B, y) = F_2(0, 0, y) \cdot \cos A \cdot \cos B, \quad (5)$$

则 $F_2(A, B, y) = F_2(A, B, L-y)$ 。观察表2可知, $f_2(A, B, y_i) = f_2(A, B, L-y_i)$,说明用 Workbench 分析得到的结果符合实际情况。

把 $F_2(0, 0, 0)$ 记为 $f_2(0, 0, y_0)$,结合 $f_2(0, 0, y_i) (i=1, 2, 3)$,用拉格朗日插值法分段构造 $F_2(0, 0, y)$ 记为 $F_2(0, 0, y)$ 的计算公式:

$$F_2(0, 0, y) = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 f_2(0, 0, y_i) l_i(y), & 0 \leq y \leq \frac{L}{2} \\ \sum_{i=0}^3 f_2(0, 0, y_i) l_i(L-y), & \frac{L}{2} \leq y \leq L \end{cases}, \quad (6)$$

表2 $f_2(A, B, y)$ 和相对误差限 Q_2

$A, B / (^\circ)$	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0	0,3	0,6	0,9	3,3	6,6	9,9
$f_2(A, B, y_1)$	-0.66	-0.66	-0.65	-0.65	-0.64	-0.64	-0.66	-0.65	-0.65	-0.66	-0.65	-0.64
$f_2(A, B, y_2)$	-1.67	-1.67	-1.66	-1.65	-1.63	-1.61	-1.67	-1.65	-1.65	-1.66	-1.65	-1.63
$f_2(A, B, y_3)$	-2.33	-2.32	-2.31	-2.30	-2.28	-2.25	-2.32	-2.31	-2.30	-2.32	-2.30	-2.27
$f_2(A, B, y_4)$	-1.67	-1.67	-1.66	-1.65	-1.63	-1.61	-1.66	-1.66	-1.65	-1.66	-1.65	-1.63
$f_2(A, B, y_5)$	-0.66	-0.66	-0.65	-0.65	-0.64	-0.64	-0.66	-0.65	-0.65	-0.66	-0.65	-0.64
Q_2	0.27%											

(下转第79页)

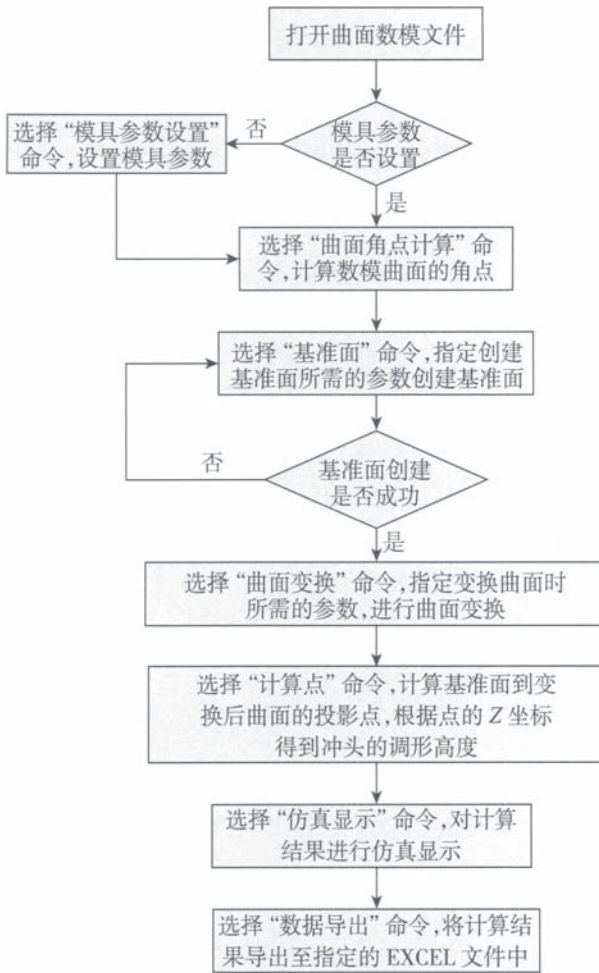


图 12 多点模具型面生成系统工作流程图

Fig.12 Work flow sketch of multi-point die profile generation system

出所有的冲头调形数据,并能进行数据分析校验和三维虚拟显示,极大地提高了生产效率。

蒙皮拉形柔性多点模具型面生成系统针对目前航空企业 CATIA 的普遍使用情况,采用 CAA 对 CATIA 进行二次开发。利用 CAA 二次开发工具所开发的程序与 CATIA 有一致的界面风格和操作习惯,用户只要具备 CATIA 的操作技能便可使用该系统。蒙皮拉形柔性多点模具型面生成系统经过详细的测试,测试结果表明,系统产品质量稳定、可靠,完全适合科研生产的需要。

蒙皮拉形柔性多点模具型面生成系统的开发和应用也为今后进一步研制大型模具奠定了坚实可靠的技术基础。

参 考 文 献

[1] 罗红宇,李东升,曾元松,等. 蒙皮拉形可重构柔性模具

模面生成系统开发及应用研究. 塑性工程学报,2006(12):61-64.
 [2] 白雪飘,曾元松,吴为,等. 典型双曲率零件柔性多点模具蒙皮拉形技术研究. 塑性工程学报,2007(12):105.

[3] 董伊鑫. CATIA 二次开发研究及基于 CATIA 的五坐标数控机床运动仿真的研究与实现 [D]. 北京:北京航空航天大学,2005.

[4] 蒋长锦. 科学计算与C程序集. 合肥:中国科技大学出版社,1998. (责编 阳光)

(上接第74页)

联立(5)、(6)式,得到

$$F_2(A, B, y) = \begin{cases} \cos A \cdot \cos B \sum_{i=0}^3 f_i(0, 0, y) l_i(y), & 0 \leq y \leq \frac{1}{2} \\ \cos A \cdot \cos B \sum_{i=0}^3 f_i(0, 0, y) l_i(L - y), & \frac{1}{2} \leq y \leq L \end{cases} \quad (7)$$

3 变形校正

假设横梁上一点 M 的理论坐标为 (x, y, z) , 由于横梁在自身重力作用下发生变形, 变形后该点的坐标为 (x', y', z') , 位移为 $\Delta M(x, y, z) = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。由于围框或者横梁变形主要是沿 X 方向和 Z 方向, Y 方向的变形不予考虑, 可以认为 $\Delta y=0$ 。则变形后 M 点的坐标为 $(x', y', z') = (x + \Delta x, y, z)$ 。

根据点 M 的坐标 (x, y, z) , 可以用式(3)和式(7)分别求出 Δx 和 Δz :

$$\begin{cases} \Delta x = F_1(A, B, y) \\ \Delta z = F_2(A, B, y) \end{cases} \quad (8)$$

4 结束语

本课题用 Ansys Workbench 对不同转角状态下的横梁进行了线性静力分析; 根据 Ansys Workbench 分析得到的数据, 结合力学分析的方法, 用拉格朗日插值函数构造横梁变形计算公式; 比较横梁变形计算公式计算得到的结果和 Ansys Workbench 的分析结果, 证明了横梁变形公式的有效性; 利用变形公式, 计算出横梁上的点在变形以后的位置, 解决了工装托架变形补偿问题。

参 考 文 献

[1] 余功炎. 型架快速设计与变形分析 [D]. 西安:西北工业大学,2004.

[2] 小枫工作室. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程. 北京:电子工业出版社,2004.

[3] 封建湖,车刚明,聂玉峰. 数值分析原理. 北京:科学出版社,2001.

[4] 苟文选,金保森,卫丰. 材料力学. 西安:西北工业大学出版社,2000. (责编 岩石)