

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2020.04.006

大规模应变监测值获取技术研究

葛路遥* 田忠良

(上海飞机设计研究院 上海 201210)

摘 要: 针对全机静强度试验过程中获取应变监测值的问题,提出一种适用解决该方法。全机静强度试验过程中,需要对一万个左右的应变片进行监控。在试验之前,需要提供试验工况下每个应变片的理论计算值作为监测值,筛选出重点关注部位,方便与试验值进行对比。由于应变片数量大,根据有限元结果,手工获取应变监测值效率低且易出错。从应变变换和应变插值的基本理论出发,详细介绍了快速获取应变监测值的方法,并基于 HyperWorks 有限元前后处理软件开发出一套应变监测值获取工具,实现了在单元面内和面外对应变进行插值,提高了应变监测值计算精度,克服了传统基于自然网格有限元模型方法带来的计算繁琐、效率低、局部计算精度不足的缺点,大大降低了应变监测值数据的准备难度。

关键词: 静强度试验;应变片;监测值;有限元

中图分类号: V215.6

文献标识码: A

OSID:



0 引言

应变片是全机静力试验中一种重要的测量元件,是对全机承载能力最直接的观察手段。在全机静力试验过程中,需要对 10 000 个左右的应变片进行监控,全机应变片分布如图 1 所示。在试验前,需要计算每个应变片监测点的理论应变值,该值就是应变监测值。试验时,通过应变片测量结果与监测值的对比,确保试验的顺利进行,验证结构强度分析方法和全机有限元模型的正确性。

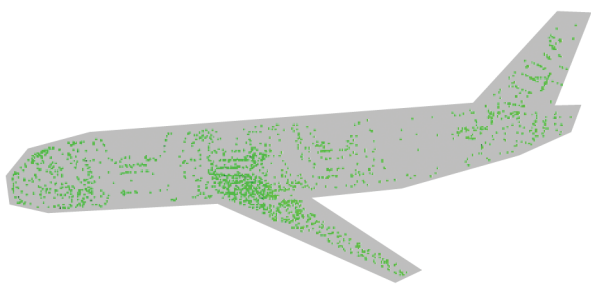


图 1 图 1 全机静强度试验应变片分布

应变监测值可以由自然网格分析结果结合工程算法计算得到,或者由精细有限元模型分析结果直

接对应变片所在单元做结果变换得到。自然网格模型的网格尺寸由典型结构件站位决定,网格尺寸大,结构细节特征在模型简化过程中丢失,宏观上能够准确表达全机刚度,应变监测值需要经过工程算法进行推算,但局部细节处应变计算精度不足。相比自然网格模型,全机精细有限元模型^[1-2]正逐渐被广泛使用,其单元尺寸可达厘米级别,网格数量达到千万级别,结构细节特征更加丰富,应变监测值无需复杂计算便可以得到,且计算精度更高。

然而,全机精细有限元模型规模和计算结果数据量都十分庞大,手工获取应变监测值繁琐且耗时。本文基于全机精细有限元模型,提出了一种获取应变监测值的解决方案,降低了应变监测值数据的准备难度,大大提高了工作效率。

1 基本原理

1.1 应变坐标变换

在全机精细有限元模型求解分析时,采用 MSC NASTRAN 求解器,该求解器对应变符号作如下规定:正应变以伸长为正,剪应变以使直角变小为正,

* 通信作者。E-mail: geluyao@comac.cc

引用格式: 葛路遥,田忠良. 大规模应变监测值获取技术研究[J]. 民用飞机设计与研究,2020(4):30-35. GE L Y, TIAN Z L. Research on monitoring data acquisition of massive strain gauges[J]. Civil Aircraft Design and Research,2020(4):30-35 (in Chinese).

且剪应变为工程剪应变,如图 2 所示的 ε_y 和 γ_{yz} 均为正值。

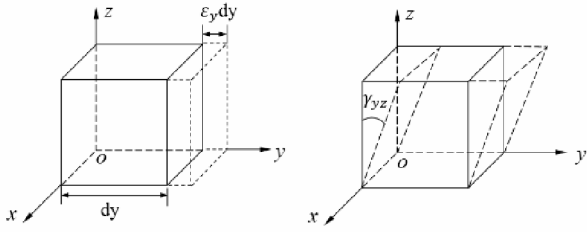


图 2 应变符号说明

对于二维应变状态,坐标系 oxy 下应变分量变换至坐标系 $ox'y'$ 下,变换公式^[3]如下:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{x'y'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2 \sin \theta \cos^2 \theta & 2 \sin^2 \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, θ 表示从 x 轴转向 x' 轴的角度,以逆时针为正,如图 3 所示。

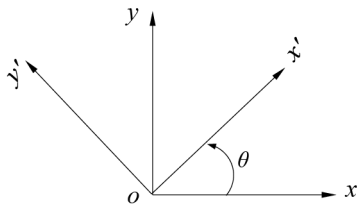


图 3 应变坐标变换

全机精细有限元模型主要采用壳单元建模,单元尺寸为 10 mm 左右,应变片尺寸为 4 mm × 8 mm,网格尺寸略大于应变片尺寸。假设应变片对应单元的中心点处的应变为应变片的应变。若已知应变片对应单元以及该单元中心点在单元坐标系下的应变状态,单元坐标系为 oxy ,应变片测量方向沿着坐标系 $ox'y'$ 的 x' 轴,由公式(1)可以计算出应变片测量的应变,即

$$\varepsilon_{\text{strain gauge}} = \varepsilon_{x'} = \varepsilon_x \cos^2 \theta + \varepsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

更为精确的方法是根据单元节点应变状态插值得到应变片中心点位置的应变状态,再根据公式(2)计算应变片方向的应变,应变插值方法参见 1.2 节。

1.2 等参单元应变插值

在二维平面 oxy 内,对于一阶等参四边形单元,如图 4 所示,其几何形状的插值公式^[4]为:

$$x = \sum_{i=1}^4 x_i N_i, y = \sum_{i=1}^4 y_i N_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

$$\text{式中, } N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta), N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)$$

$$(1 - \eta), N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta), N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)。$$

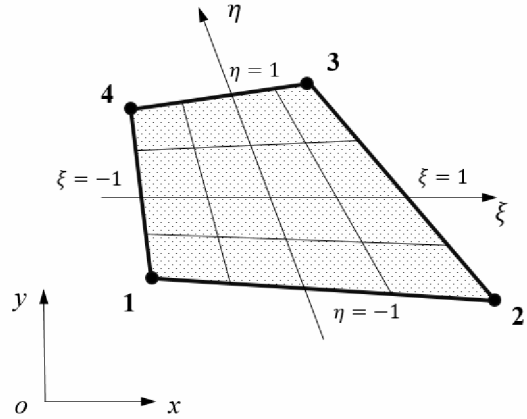


图 4 一阶等参四边形单元

对于单元所在平面内任意一点 $P(x_0, y_0)$,该点的应变状态可以由单元节点应变状态通过形函数 $N_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 插值得到,即

$$\varepsilon_i = \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i^i N_i(\xi_0, \eta_0) \quad (4)$$

式中, ε_i 为某个应变状态分量, ε_i^i 为单元节点 i 对应的某个应变状态分量, $N_i(\xi_0, \eta_0)$ 为第 i 个形函数在 P 点对应的自然坐标值 (ξ_0, η_0) 下的值,该值代表 ε_i^i 的插值权重。对于单元中心点,自然坐标值为 $(0.0, 0.0)$,节点插值权重系数均为 0.25,所以中心点的应变状态为四个节点应变状态的平均。

根据公式(3),利用牛顿法^[5]求解非线性方程组可以得到 P 点的自然坐标值 (ξ_0, η_0) 。将 P 点坐标代入公式(3)后,并改写为

$$\begin{cases} a_0 + a_1 \xi + a_2 \eta + a_3 \xi \eta - x_0 = 0 \\ b_0 + b_1 \xi + b_2 \eta + b_3 \xi \eta - y_0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix},$$

$$\begin{Bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{Bmatrix}。$$

则牛顿迭代公式为

$$\begin{cases} \xi_{k+1} \\ \eta_{k+1} \end{cases} = \begin{cases} \xi_k \\ \eta_k \end{cases} - \begin{bmatrix} a_1 + a_3 \eta_k & a_2 + a_3 \xi_k \\ b_1 + b_3 \eta_k & b_2 + b_3 \xi_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_0 + a_1 \xi_k + a_2 \eta_k + a_3 \xi_k \eta_k - x_0 \\ b_0 + b_1 \xi_k + b_2 \eta_k + b_3 \xi_k \eta_k - x_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在迭代的过程中,当公式(6)计算的残差在容差范围内时,便可得到 P 点的自然坐标值 (ξ_0, η_0) ,即 $\|X_{k+1} - X_k\| < \delta$,其中 $\|\cdot\|$ 为 $L2$ 范数, δ 为容差。

2 应变监测值获取方法

2.1 获取流程

根据应变坐标变换和应变插值,本文提出了一套基于 S 模型的应变监测值获取流程,如图 5 所示。该流程分前处理和后处理两个部分,前处理主要完成:(1) 建立应变片几何模型,称该模型为 S 模型;(2) 确定 S 模型对应的最近单元;(3) 计算所需的数据,相关数据形成 S 模型配置文件作为前处理的最终结果。后处理主要完成:(1) 获取最近单元的应变状态;(2) 利用 S 模型配置文件中相关数据进行应变坐标变换和应变插值。

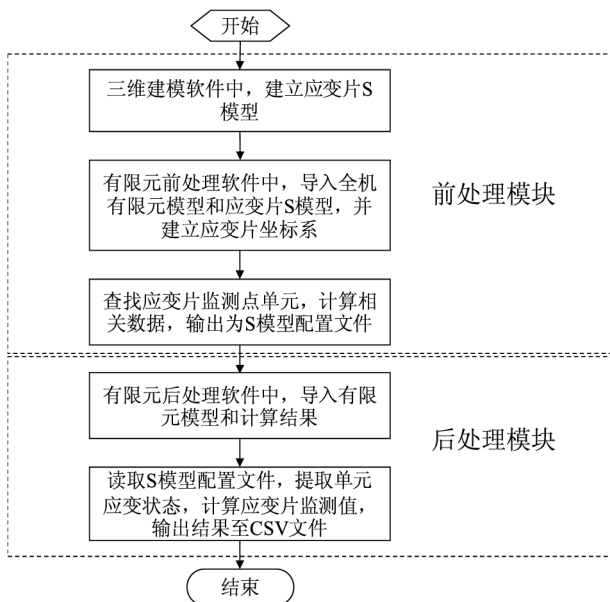


图 5 应变监测值获取流程

相比后处理,前处理的工作量更大,但一旦生成一个工况下的 S 模型配置文件,便可以冻结该文件,在后续多个工况计算结果的后处理中重复使用该配置文件。

2.2 应变片 S 模型

在模型试验贴片工作之前,需要在三维建模软件中完成应变片几何模型的创建,该数模文件一般称之为 S 模型,如图 6 所示。

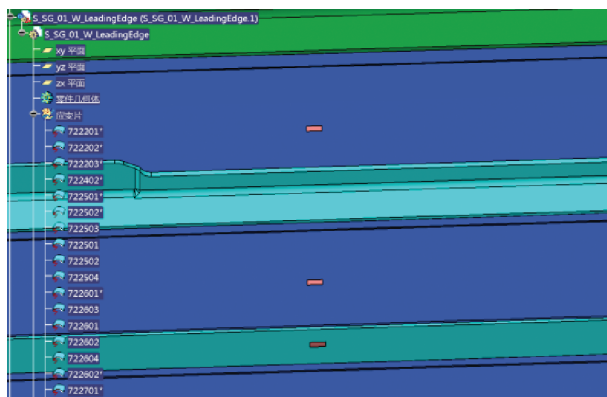


图 6 应变片 S 模型

单片是由 4 个几何点组成的矩形,花片是由 10 个几何点组成的二维封闭多边形,如图 7 所示。对每个应变片定义应变片坐标系,且均为右手笛卡尔正交坐标系,确保应变片坐标系正 z 轴指向贴片者,应变片坐标系定义规则如下:

(1) 对于单片,应变片坐标系原点为应变片的中心点,正 x 轴为应变片长边方向,正 y 轴为应变片短边方向,正 z 轴为应变片法向;

(2) 对于花片,应变片坐标系原点为应变片的角点,正 x 轴为 0° 片测量方向,正 y 轴为 90° 片测量方向,坐标系第一象限与正 x 轴夹角为 45° 的为 45° 片测量方向。

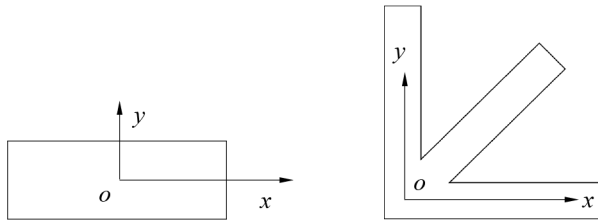


图 7 应变片坐标系

2.3 最近单元搜索方法及相关物理量的计算

在应变监测值获取过程中,S 模型配置文件中必须包含应变片最近单元编号、应变片在最近单元的单元坐标系下的夹角、应变插值权重系数、应变片距离最近单元参考平面的距离。

在前处理过程中,在应变片坐标系原点沿着 $\pm z$ 轴方向寻找距离应变片最近的单元,将此单元作为

应变片配置文件生成之后,使用后处理工具计算应变片测量方向的应变。若应变输出设置为 ,则程序直接根据单元坐标系下 Z1 面或 Z2 面应变,并按照公式(2)计算应变片测量方向应变。若应变输出设置为 ,则程序首先根据单元坐标系下参考面的应变和曲率,结合公式(7)计算 Z1 面或 Z2 面的应变,最后按照公式(2)计算应变片测量方向的应变。当勾选“interpolate with corner data”时,程序使用单元节点应变进行单元面内应变插值。

输出的应变结果如图 12 所示,图 13 给出了机翼下壁板某处剖面应变对比结果,试验值和计算值吻合度较高。

	A	B	C	D
1	subcase = 251448			
2	StrainGaugeID	Closest Element	Z12	Strain
3	153501	11129641	1	-47.20466768
4	153502	11129578	1	11.31100148
5	153503	11128338	1	7.76864886
6	153504	11128402	1	-80.10846842
7	133501	11093069	2	1477.832554
8	143501	11094089	2	1508.831747
9	133502	11093078	2	1725.267874
10	133503	11093512	1	218.499998
11	133504	11093703	1	-169.9999948
12	133505	11094533	1	129.354778
13	133506	11093513	1	130.7631097
14	133507	11093514	1	-79.46744406
15	133508	11093514	1	-79.46740583
16	133509	11096586	1	-110.1895574
17	133510	11096587	2	-263.4438795
18	133511	11096587	2	-263.4435329
19	133512	11093513	2	136.5840761

图 12 应变结果

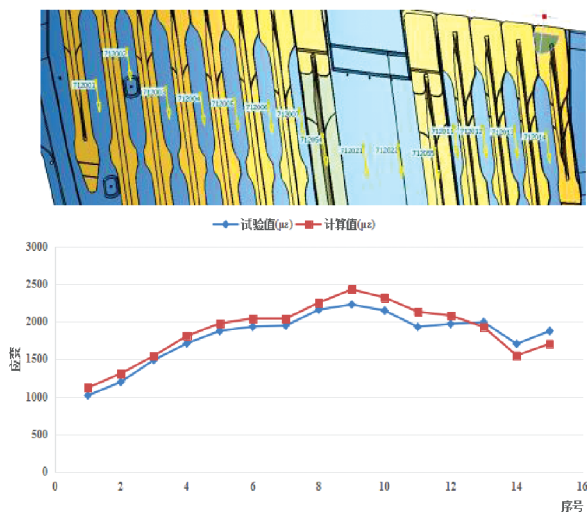


图 13 应变对比

此外,采用插值算法提高应变片计算精度是本文的一个重要研究内容。图 14 给出了机翼下壁板油箱检查口孔壁上一些应变片结果对比,油箱检查口附近有较大的应变梯度,可以看出采用插值方法后应变片的计算精度有明显提高。

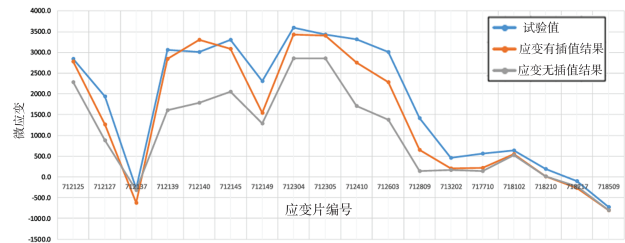


图 14 应变插值结果对比

4 结论

本文详细介绍了基于精细有限元模型的全机静强度试验应变监测值获取方法和流程,开发了相应的应变监测值获取工具。该方法和工具具有一般通用性,适用于所有结构强度试验。本文所述方法克服了传统方法使用工程方法带来的计算繁琐、效率低、局部计算精度不足的缺点,通过面内和面外插值提高了应变片监测值的计算精度,大大降低了应变片监测值数据的准备难度,有效地辅助了试验顺利进行。

参考文献:

- [1] 黄勇,李三平. 民用飞机结构强度设计中的全机精细有限元分析技术及其应用[J]. 计算机辅助工程, 2018,6(3):35-38;53.
- [2] 赵峻峰,李三平,李强. 民用飞机机体结构静强度验证[J]. 民用飞机设计与研究,2020(2):1-5.
- [3] 刘鸿文. 材料力学:第5版[M]. 北京:高等教育出版社,2011:210-225.
- [4] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:130-161.
- [5] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社,2001:261-283.
- [6] 孙家广,胡事民. 计算机图形学基础教程[M]. 北京:清华大学出版社,2009:48-49.
- [7] FEITO F, TORRES JC, URENAA. Orientation, simplicity, and inclusion test for planar polygons[J]. Computers & Graphics, 1995, 19(4):595-600.
- [8] HORMANN K, AGATHOS A. The point in polygon problem for arbitray polygons[J]. Computational Geom-

etry, 2001, 20(3):131-144.

- [9] 周培德. 判定点是否在多边形内部的算法[J]. 北京理工大学学报, 1995, 15(4): 437-440.
- [10] OUSTERHOUT J K, JONES K. Tel/Tk 入门经典:第2版[M]. 张元章,译. 北京:清华大学出版社,2010.

作者简介

葛路遥 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度。

E-mail: geluyao@comac.cc

田忠良 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构强度。

E-mail: tianzhongliang@comac.cc

Research on monitoring data acquisition of massive strain gauges

GE Luyao * TIAN Zhongliang

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: In the article, an innovate method is presented in order to solve the problem of monitoring data acquisition of massive strain gauges during the aircraft static strength test. There are over 10 thousands of strain gauges mounted on the aircraft, which need to be monitored. Before the test, according to the finite element model analysis, the monitoring data from the strain gauges must be supplied, and the focus areas are screened out for comparison with experimental results. Due to the large amount of strain gauges, manually calculating the monitoring data can be a tough and error prone task. In this article, based on strain transformation and interpolation, more details of monitoring data acquisition are introduced step by step. Besides, a tool is developed on HyperWorks with the feature of improving the accuracy of monitoring data by using the in-plane and outer-plane interpolations. The method overcomes the shortcomings of cumbersome calculation, low efficiency, and insufficient local calculation accuracy brought by the global finite element model (GFEM), and greatly reduces the difficulty of preparing monitoring data.

Keywords: static strength test; strain gauges; monitoring data; finite element

* Corresponding author. E-mail: geluyao@comac.cc