

# 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问题的方法。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。

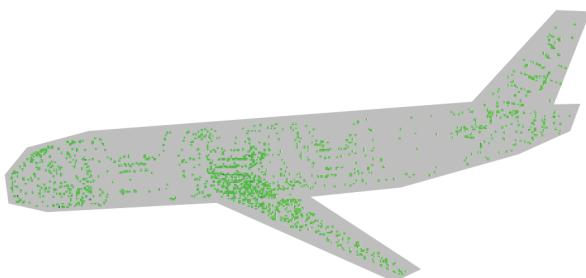


图 1 全机静强度试验应变片分布

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<sup>[1-2]</sup>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 $\varepsilon_y$ 和 $\gamma_{yz}$ 均为正值。

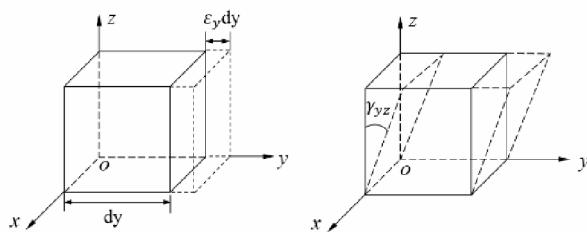


图2 应变符号说明

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<sup>[3]</sup>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, $\theta$ 表示从 $x$ 轴转向 $x'$ 轴的角度,以逆时针为正,如图3所示。

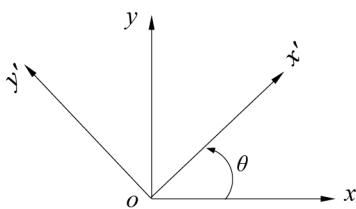


图3 应变坐标变换

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

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

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<sup>[4]</sup>为:

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

式中, $N_1 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)$ , $N_2 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)$ , $N_3 = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)$ , $N_4 = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)$ 。

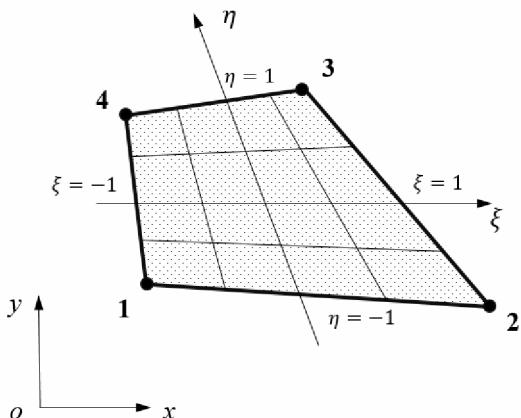


图4 一阶等参四边形单元

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, $\varepsilon_I$ 为某个应变状态分量, $\varepsilon_I^i$ 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( $\xi_0, \eta_0$ )下的值,该值代表 $\varepsilon_I^i$ 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<sup>[5]</sup>求解非线性方程组可以得到P点的自然坐标值( $\xi_0, \eta_0$ )。将P点坐标带入公式(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,

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

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

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( $\xi_0, \eta_0$ ),即  $\|X_{k+1} - X_k\| < \delta$ ,其中  $\|\cdot\|$  为 L2 范数,  $\delta$  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。

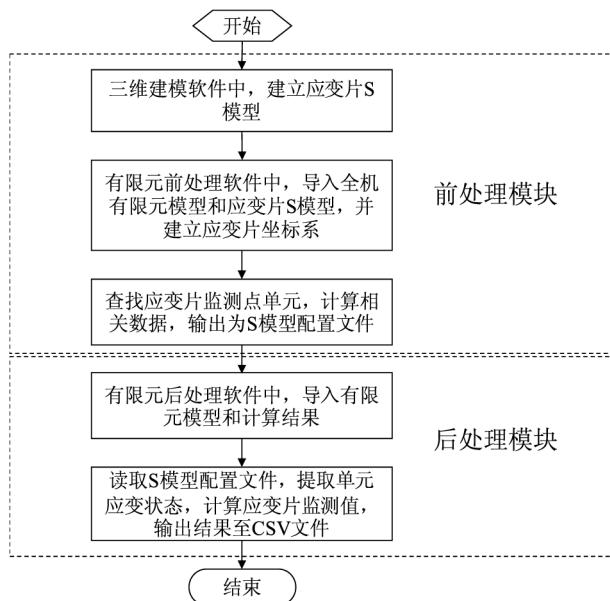
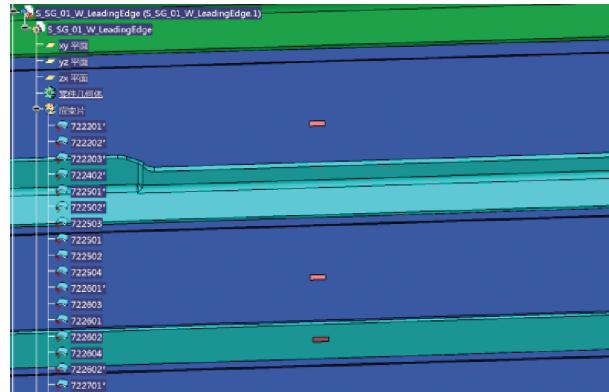


图 5 应变监测值获取流程

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。



应变片所粘贴的单元, 应变片的测量结果由此单元的应变状态经坐标变换计算得到。

搜索距离应变片最近的单元时, 需要将与应变片不平行的单元从搜索集中去除。对单元搜索集内的每个单元, 计算应变片  $z$  轴与单元所在平面的交点, 找到交点在单元内的单元。有限元模型中使用的二维单元包括三角形单元和四边形单元, 几何上均为凸多边形。判断点是否在凸多边形内的方法有弧长法<sup>[6]</sup>、面积法<sup>[7]</sup>、角度法<sup>[8]</sup>、射线法<sup>[9]</sup>等, 其中面积法适用范围广且算法简单, 如图 8 所示。若交点与单元节点依次构成的三角形面积之和等于单元面积, 则交点在单元内。

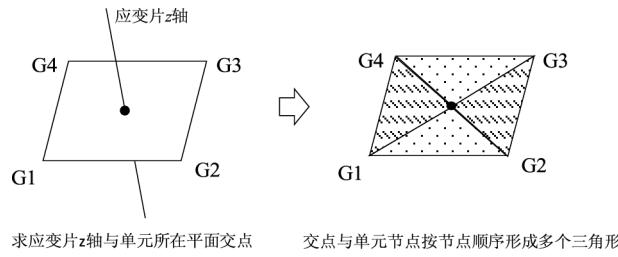


图 8 面积法判断点与单元关系示意图

若应变片  $z$  轴和单元交点在单元内则计算交点至应变片坐标系原点的距离, 按此规则找到单元搜索集中所有距离应变片原点最近的单元, 该单元就是应变片所粘贴的单元。整个搜索过程中, 考虑单元的偏置, 从而真实地反映单元所在的空间位置。

成功找到应变片所粘贴的单元后, 将应变片的测量方向投影到该单元坐标系下计算测量方向与单元坐标系  $x$  轴的夹角, 如图 9 所示。

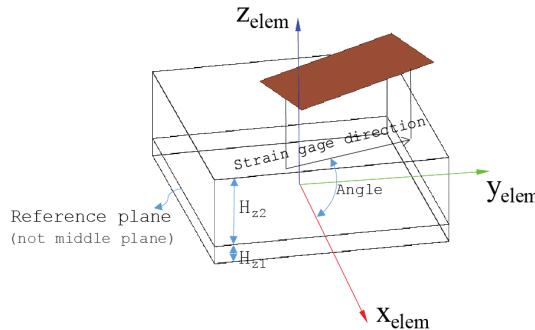


图 9 应变片在单元坐标系下的投影

若需要通过插值计算应变片测量方向的应变, 还应该计算插值点在应变片最近单元内的权重系数。插值点定义为应变片原点沿应变片  $z$  轴与最近单元的交点, 并按照 1.2 节计算单元节点插值权重

系数  $N_i(\xi_0, \eta_0)$ 。若应变片最近单元是三角形单元, 则单元节点插值权重系数直接取(1/3, 1/3, 1/3)。

此外, 若单元应变输出结果为单元参考面应变和参考面曲率, 还需要根据公式(7)进一步计算单元表面的应变:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} - z \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

这里,  $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0$  和  $\gamma_{xy}^0$  为单元参考面应变,  $\chi_x, \chi_y$  和  $\chi_{xy}$  为单元参考面曲率,  $z$  为计算点至参考面的距离。所以, 还应该计算应变片所在的单元粘贴面距离单元参考平面的距离, 并根据公式(7)计算应变片位置的应变。

### 3 应变监测值获取工具

根据本文所述方法和流程, 在 HyperWroks 前后处理软件中使用 tcl/tk 语言<sup>[10]</sup>开发出一套应变监测值获取工具, 共包含前处理和后处理两个工具, 如图 10 所示。



图 10 应变监测值获取工具

前处理工具根据应变片 S 模型生成应变片配置文件。应变片配置文件是在应变片几何搜索和插值计算的基础上, 将后处理工具所需相关信息汇总得到的一个列表。为了在后处理工具中计算应变片的测量值, 一个完整的应变片配置文件包括应变片号、应变片粘贴的单元、单元具体粘贴面、应变片测量方向与粘贴单元坐标系  $x$  轴的夹角、单元节点插值权重系数、单元表面至单元参考面的距离, 如图 11 所示。

应变片号	应变片单 元编号	监控点单 元Z12	监控点单 元Z11	监控点单 元Z10	监控点单 元Z9	监控点单 元Z8	监控点单 元Z7	监控点单 元Z6	监控点单 元Z5	监控点单 元Z4	监控点单 元Z3	监控点单 元Z2	监控点单 元Z1	监控点单 元Z0	监控点单 元Z-1	监控点单 元Z-2	监控点单 元Z-3	监控点单 元Z-4	监控点单 元Z-5	监控点单 元Z-6	监控点单 元Z-7	监控点单 元Z-8	监控点单 元Z-9	监控点单 元Z-10	监控点单 元Z-11	监控点单 元Z-12	监控点单 元Z-13	监控点单 元Z-14	监控点单 元Z-15	监控点单 元Z-16	监控点单 元Z-17	监控点单 元Z-18	监控点单 元Z-19	监控点单 元Z-20	监控点单 元Z-21	监控点单 元Z-22	监控点单 元Z-23	监控点单 元Z-24	监控点单 元Z-25	监控点单 元Z-26	监控点单 元Z-27	监控点单 元Z-28	监控点单 元Z-29	监控点单 元Z-30	监控点单 元Z-31	监控点单 元Z-32	监控点单 元Z-33	监控点单 元Z-34	监控点单 元Z-35	监控点单 元Z-36	监控点单 元Z-37	监控点单 元Z-38	监控点单 元Z-39	监控点单 元Z-40	监控点单 元Z-41	监控点单 元Z-42	监控点单 元Z-43	监控点单 元Z-44	监控点单 元Z-45	监控点单 元Z-46	监控点单 元Z-47	监控点单 元Z-48	监控点单 元Z-49	监控点单 元Z-50	监控点单 元Z-51	监控点单 元Z-52	监控点单 元Z-53	监控点单 元Z-54	监控点单 元Z-55	监控点单 元Z-56	监控点单 元Z-57	监控点单 元Z-58	监控点单 元Z-59	监控点单 元Z-60	监控点单 元Z-61	监控点单 元Z-62	监控点单 元Z-63	监控点单 元Z-64	监控点单 元Z-65	监控点单 元Z-66	监控点单 元Z-67	监控点单 元Z-68	监控点单 元Z-69	监控点单 元Z-70	监控点单 元Z-71	监控点单 元Z-72	监控点单 元Z-73	监控点单 元Z-74	监控点单 元Z-75	监控点单 元Z-76	监控点单 元Z-77	监控点单 元Z-78	监控点单 元Z-79	监控点单 元Z-80	监控点单 元Z-81	监控点单 元Z-82	监控点单 元Z-83	监控点单 元Z-84	监控点单 元Z-85	监控点单 元Z-86	监控点单 元Z-87	监控点单 元Z-88	监控点单 元Z-89	监控点单 元Z-90	监控点单 元Z-91	监控点单 元Z-92	监控点单 元Z-93	监控点单 元Z-94	监控点单 元Z-95	监控点单 元Z-96	监控点单 元Z-97	监控点单 元Z-98	监控点单 元Z-99	监控点单 元Z-100	监控点单 元Z-101	监控点单 元Z-102	监控点单 元Z-103	监控点单 元Z-104	监控点单 元Z-105	监控点单 元Z-106	监控点单 元Z-107	监控点单 元Z-108	监控点单 元Z-109	监控点单 元Z-110	监控点单 元Z-111	监控点单 元Z-112	监控点单 元Z-113	监控点单 元Z-114	监控点单 元Z-115	监控点单 元Z-116	监控点单 元Z-117	监控点单 元Z-118	监控点单 元Z-119	监控点单 元Z-120	监控点单 元Z-121	监控点单 元Z-122	监控点单 元Z-123	监控点单 元Z-124	监控点单 元Z-125	监控点单 元Z-126	监控点单 元Z-127	监控点单 元Z-128	监控点单 元Z-129	监控点单 元Z-130	监控点单 元Z-131	监控点单 元Z-132	监控点单 元Z-133	监控点单 元Z-134	监控点单 元Z-135	监控点单 元Z-136	监控点单 元Z-137	监控点单 元Z-138	监控点单 元Z-139	监控点单 元Z-140	监控点单 元Z-141	监控点单 元Z-142	监控点单 元Z-143	监控点单 元Z-144	监控点单 元Z-145	监控点单 元Z-146	监控点单 元Z-147	监控点单 元Z-148	监控点单 元Z-149	监控点单 元Z-150	监控点单 元Z-151	监控点单 元Z-152	监控点单 元Z-153	监控点单 元Z-154	监控点单 元Z-155	监控点单 元Z-156	监控点单 元Z-157	监控点单 元Z-158	监控点单 元Z-159	监控点单 元Z-160	监控点单 元Z-161	监控点单 元Z-162	监控点单 元Z-163	监控点单 元Z-164	监控点单 元Z-165	监控点单 元Z-166	监控点单 元Z-167	监控点单 元Z-168	监控点单 元Z-169	监控点单 元Z-170	监控点单 元Z-171	监控点单 元Z-172	监控点单 元Z-173	监控点单 元Z-174	监控点单 元Z-175	监控点单 元Z-176	监控点单 元Z-177	监控点单 元Z-178	监控点单 元Z-179	监控点单 元Z-180	监控点单 元Z-181	监控点单 元Z-182	监控点单 元Z-183	监控点单 元Z-184	监控点单 元Z-185	监控点单 元Z-186	监控点单 元Z-187	监控点单 元Z-188	监控点单 元Z-189	监控点单 元Z-190	监控点单 元Z-191	监控点单 元Z-192	监控点单 元Z-193	监控点单 元Z-194	监控点单 元Z-195	监控点单 元Z-196	监控点单 元Z-197	监控点单 元Z-198	监控点单 元Z-199	监控点单 元Z-200	监控点单 元Z-201	监控点单 元Z-202	监控点单 元Z-203	监控点单 元Z-204	监控点单 元Z-205	监控点单 元Z-206	监控点单 元Z-207	监控点单 元Z-208	监控点单 元Z-209	监控点单 元Z-210	监控点单 元Z-211	监控点单 元Z-212	监控点单 元Z-213	监控点单 元Z-214	监控点单 元Z-215	监控点单 元Z-216	监控点单 元Z-217	监控点单 元Z-218	监控点单 元Z-219	监控点单 元Z-220	监控点单 元Z-221	监控点单 元Z-222	监控点单 元Z-223	监控点单 元Z-224	监控点单 元Z-225	监控点单 元Z-226	监控点单 元Z-227	监控点单 元Z-228	监控点单 元Z-229	监控点单 元Z-230	监控点单 元Z-231	监控点单 元Z-232	监控点单 元Z-233	监控点单 元Z-234	监控点单 元Z-235	监控点单 元Z-236	监控点单 元Z-237	监控点单 元Z-238	监控点单 元Z-239	监控点单 元Z-240	监控点单 元Z-241	监控点单 元Z-242	监控点单 元Z-243	监控点单 元Z-244	监控点单 元Z-245	监控点单 元Z-246	监控点单 元Z-247	监控点单 元Z-248	监控点单 元Z-249	监控点单 元Z-250	监控点单 元Z-251	监控点单 元Z-252	监控点单 元Z-253	监控点单 元Z-254	监控点单 元Z-255	监控点单 元Z-256	监控点单 元Z-257	监控点单 元Z-258	监控点单 元Z-259	监控点单 元Z-260	监控点单 元Z-261	监控点单 元Z-262	监控点单 元Z-263	监控点单 元Z-264	监控点单 元Z-265	监控点单 元Z-266	监控点单 元Z-267	监控点单 元Z-268	监控点单 元Z-269	监控点单 元Z-270	监控点单 元Z-271	监控点单 元Z-272	监控点单 元Z-273	监控点单 元Z-274	监控点单 元Z-275	监控点单 元Z-276	监控点单 元Z-277	监控点单 元Z-278	监控点单 元Z-279	监控点单 元Z-280	监控点单 元Z-281	监控点单 元Z-282	监控点单 元Z-283	监控点单 元Z-284	监控点单 元Z-285	监控点单 元Z-286	监控点单 元Z-287	监控点单 元Z-288	监控点单 元Z-289	监控点单 元Z-290	监控点单 元Z-291	监控点单 元Z-292	监控点单 元Z-293	监控点单 元Z-294	监控点单 元Z-295	监控点单 元Z-296	监控点单 元Z-297	监控点单 元Z-298	监控点单 元Z-299	监控点单 元Z-300	监控点单 元Z-301	监控点单 元Z-302	监控点单 元Z-303	监控点单 元Z-304	监控点单 元Z-305	监控点单 元Z-306	监控点单 元Z-307	监控点单 元Z-308	监控点单 元Z-309	监控点单 元Z-310	监控点单 元Z-311	监控点单 元Z-312	监控点单 元Z-313	监控点单 元Z-314	监控点单 元Z-315	监控点单 元Z-316	监控点单 元Z-317	监控点单 元Z-318	监控点单 元Z-319	监控点单 元Z-320	监控点单 元Z-321	监控点单 元Z-322	监控点单 元Z-323	监控点单 元Z-324	监控点单 元Z-325	监控点单 元Z-326	监控点单 元Z-327	监控点单 元Z-328	监控点单 元Z-329	监控点单 元Z-330	监控点单 元Z-331	监控点单 元Z-332	监控点单 元Z-333	监控点单 元Z-334	监控点单 元Z-335	监控点单 元Z-336	监控点单 元Z-337	监控点单 元Z-338	监控点单 元Z-339	监控点单 元Z-340	监控点单 元Z-341	监控点单 元Z-342	监控点单 元Z-343	监控点单 元Z-344	监控点单 元Z-345	监控点单 元Z-346	监控点单 元Z-347	监控点单 元Z-348	监控点单 元Z-349	监控点单 元Z-350	监控点单 元Z-351	监控点单 元Z-352	监控点单 元Z-353	监控点单 元Z-354	监控点单 元Z-355	监控点单 元Z-356	监控点单 元Z-357	监控点单 元Z-358	监控点单 元Z-359	监控点单 元Z-360	监控点单 元Z-361	监控点单 元Z-362	监控点单 元Z-363	监控点单 元Z-364	监控点单 元Z-365	监控点单 元Z-366	监控点单 元Z-367	监控点单 元Z-368	监控点单 元Z-369	监控点单 元Z-370	监控点单 元Z-371	监控点单 元Z-372	监控点单 元Z-373	监控点单 元Z-374	监控点单 元Z-375	监控点单 元Z-376	监控点单 元Z-377	监控点单 元Z-378	监控点单 元Z-379	监控点单 元Z-380	监控点单 元Z-381	监控点单 元Z-382	监控点单 元Z-383	监控点单 元Z-384	监控点单 元Z-385	监控点单 元Z-386	监控点单 元Z-387	监控点单 元Z-388	监控点单 元Z-389	监控点单 元Z-390	监控点单 元Z-391	监控点单 元Z-392	监控点单 元Z-393	监控点单 元Z-394	监控点单 元Z-395	监控点单 元Z-396	监控点单 元Z-397	监控点单 元Z-398	监控点单 元Z-399	监控点单 元Z-400	监控点单 元Z-401	监控点单 元Z-402	监控点单 元Z-403	监控点单 元Z-404	监控点单 元Z-405	监控点单 元Z-406	监控点单 元Z-407	监控点单 元Z-408	监控点单 元Z-409	监控点单 元Z-410	监控点单 元Z-411	监控点单 元Z-412	监控点单 元Z-413	监控点单 元Z-414	监控点单 元Z-415	监控点单 元Z-416	监控点单 元Z-417	监控点单 元Z-418	监控点单 元Z-419	监控点单 元Z-420	监控点单 元Z-421	监控点单 元Z-422	监控点单 元Z-423	监控点单 元Z-424	监控点单 元Z-425	监控点单 元Z-426	监控点单 元Z-427	监控点单 元Z-428	监控点单 元Z-429	监控点单 元Z-430	监控点单 元Z-431	监控点单 元Z-432	监控点单 元Z-433	监控点单 元Z-434	监控点单 元Z-435	监控点单 元Z-436	监控点单 元Z-437	监控点单 元Z-438	监控点单 元Z-439	监控点单 元Z-440	监控点单 元Z-441	监控点单 元Z-442	监控点单 元Z-443	监控点单 元Z-444	监控点单 元Z-445	监控点单 元Z-446	监控点单 元Z-447	监控点单 元Z-448	监控点单 元Z-449	监控点单 元Z-450	监控点单 元Z-451	监控点单 元Z-452	监控点单 元Z-453	监控点单 元Z-454	监控点单 元Z-455	监控点单 元Z-456	监控点单 元Z-457	监控点单 元Z-458	监控点单 元Z-459	监控点单 元Z-460	监控点单 元Z-461	监控点单 元Z-462	监控点单 元Z-463	监控点单 元Z-464	监控点单 元Z-465	监控点单 元Z-466	监控点单 元Z-467	监控点单 元Z-468	监控点单 元Z-469	监控点单 元Z-470	监控点单 元Z-471	监控点单 元Z-472	监控点单 元Z-473	监控点单 元Z-474	监控点单 元Z-475	监控点单 元Z-476	监控点单 元Z-477	监控点单 元Z-478	监控点单 元Z-479	监控点单 元Z-480	监控点单 元Z-481	监控点单 元Z-482	监控点单 元Z-483	监控点单 元Z-484	监控点单 元Z-485	监控点单 元Z-486	监控点单 元Z-487	监控点单 元Z-488	监控点单 元Z-489	监控点单 元Z-490	监控点单 元Z-491	监控点单 元Z-492	监控点单 元Z-493	监控点单 元Z-494	监控点单 元Z-495	监控点单 元Z-496	监控点单 元Z-497	监控点单 元Z-498	监控点单 元Z-499	监控点单 元Z-500	监控点单 元Z-501	监控点单 元Z-502	监控点单 元Z-503	监控点单 元Z-504	监控点单 元Z-505	监控点单 元Z-506	监控点单 元Z-507	监控点单 元Z-508	监控点单 元Z-509	监控点单 元Z-510	监控点单 元Z-511	监控点单 元Z-512	监控点单 元Z-513	监控点单 元Z-514	监控点单 元Z-515	监控点单 元Z-516	监控点单 元Z-517	监控点单 元Z-518	监控点单 元Z-519	监控点单 元Z-520	监控点单 元Z-521	监控点单 元Z-522	监控点单 元Z-523	监控点单 元Z-524	监控点单 元Z-525	监控点单 元Z-526	监控点单 元Z-527	监控点单 元Z-528	监控点单 元Z-529	监控点单 元Z-530	监控点单 元Z-531	监控点单 元Z-532	监控点单 元Z-533	监控点单 元Z-534	监控点单 元Z-535	监控点单 元Z-536	监控点单 元Z-537	监控点单 元Z-538	监控点单 元Z-539	监控点单 元Z-540	监控点单 元Z-541	监控点单 元Z-542	监控点单 元Z-543	监控点单 元Z-544	监控点单 元Z-545	监控点单 元Z-546	监控点单 元Z-547	监控点单 元Z-548	监控点单 元Z-549	监控点单 元Z-550	监控点单 元Z-551	监控点单 元Z-552	监控点单 元Z-553	监控点单 元Z-554	监控点单 元Z-555	监控点单 元Z-556	监控点单 元Z-557	监控点单 元Z-558	监控点单 元Z-559	监控点单 元Z-560	监控点单 元Z-561	监控点单 元Z-562	监控点单 元Z-563	监控点单 元Z-564	监控点单 元Z-565	监控点单 元Z-566	监控点单 元Z-567	监控点单 元Z-568	监控点单 元Z-569	监控点单 元Z-570	监控点单 元Z-571	监控点单 元Z-572	监控点单 元Z-573	监控点单 元Z-5

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 **Strain** ▾ **FIBER** ▾, 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 **Strain** ▾ **STRCUR** ▾, 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

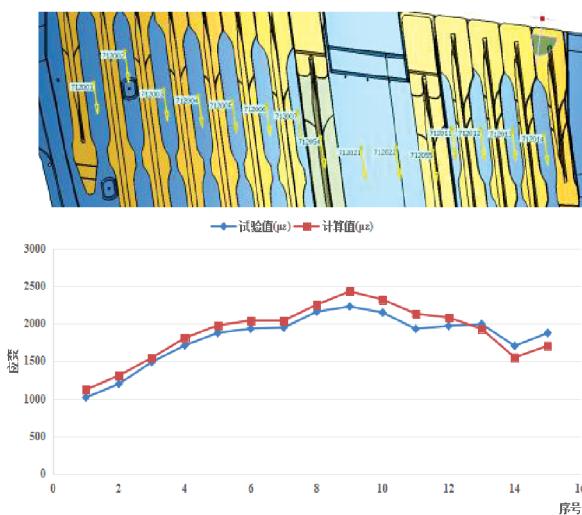


图 13 应变对比

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。

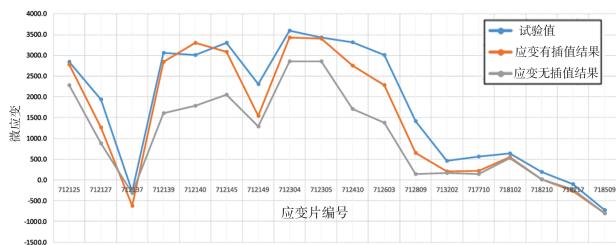


图 14 应变插值结果对比

## 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] 王勛成. 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, URENA A. 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 arbitrary 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. Tcl/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 innovative 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