

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2017090097



# 一种针对蜂窝芯外形曲面特征的测量方法

刘 蕾<sup>1</sup>, 陈雪梅<sup>1</sup>, 易 元<sup>1</sup>, 宋忠超<sup>2</sup>, 黄庆奕<sup>1</sup>, 江 磊<sup>2</sup>

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092; 2. 西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 针对蜂窝芯外形曲面特征测量过程中出现的数据不完整、精度低等问题, 提出一种基于三维光学扫描的测量方法。首先在蜂窝芯外形曲面紧密贴合覆盖层, 以覆盖层外形特征代替蜂窝芯外形曲面特征, 然后采用三维光学扫描技术采集覆盖层外形的点云数据。通过计算点云数据的法向矢量, 并在矢量方向偏置覆盖层厚度, 从而获得蜂窝芯曲面特征的轮廓数据, 完成蜂窝芯外形曲面特征测量。通过对某型号蜂窝芯材料的测量, 证明该方法的可行性和精确性, 具有实际工程应用价值。

**关键词:** 机械公差配合与技术测量; 曲面特征测量; 光学扫描; 蜂窝芯

中图分类号: TH124

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)07-0056-05

## A method for measuring the shape and surface characteristics of honeycomb core

LIU Lei<sup>1</sup>, CHEN Xuemei<sup>1</sup>, YI Yuan<sup>1</sup>, SONG Zhongchao<sup>2</sup>, HUANG Qingyi<sup>1</sup>, JIANG Lei<sup>2</sup>

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To solve the problems of incomplete data and low precision in the process of feature measurement of honeycomb core surface, a method based on 3D optical scanning was proposed. First, the covering layer was laminated on the surface of the honeycomb core, then cloud data of the cover layer was collected by optical scanning as a substitute for contour data of honeycomb core surface feature. By calculating the normal vector of the cloud data and making an offset whose size was the thickness of the covering layer in the vector direction, contour data of honeycomb core surface feature was obtained. The feasibility and accuracy of the method are proved by the measurement of a honeycomb core material in practice. The results show that the method can be applied to the measurement of the surface characteristics of honeycomb core materials and has the realism value in engineering applications.

**Keywords:** mechanical tolerance and technical measurement; surface feature measurement; optical scanning; honeycomb core

收稿日期: 2017-09-28; 收到修改稿日期: 2017-11-15

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2014GZ0123)

作者简介: 刘 蕾(1985-), 女, 河北石家庄市人, 工程师, 主要从事机械加工及加工质量检测工作。

## 0 引言

蜂窝芯材料, 指类似蜜蜂巢穴在结构上呈空心六方体, 有规则排列的填充材料。此种材料具有质量轻、稳定性好、强度高<sup>[1-2]</sup>等特点, 作为填充材料广泛应用于航空航天、现代造船等工业领域。

由于蜂窝芯外形轮廓为蜂窝孔状, 并非完整表面特征, 所以其外形测量有较大难度, 曲面特征尤甚(蜂窝芯曲面特征指曲率较小的曲面外形轮廓)。诸如三坐标测量机等常规测量手段会出现测头落入蜂窝孔内进而产生偏差等问题。对此, 李慧娟等<sup>[3-4]</sup>采用三种光学测量方法对蜂窝结构中模拟脱粘缺陷进行检测, 但其并未涉及到外形轮廓测量; 万谷<sup>[5]</sup>针对航空发动机机匣中蜂窝芯材料, 提出了采用基于伸缩式圆柱形测针的接触式电感传感器作为表面几何公差的测量手段, 但此方法仅针对环形蜂窝芯有较好效果; 李智<sup>[6]</sup>针对蜂窝陶瓷提出一种线阵 CCD 摄像机对蜂窝陶瓷扫描以获取图像的方式分析测量, 但只考虑了边缘检测。当前在航空制造企业中, 还有采用圆柱形测头的三坐标测量机测量方法, 以避免测头在采集数据过程中落入蜂窝孔内, 但此种方法不适用蜂窝芯曲面矢量未知的情况。

在上述研究的基础上, 针对蜂窝芯零件曲面特征的测量难点, 本文研究了一种基于光学扫描的蜂窝芯曲面特征测量方法。

### 1 基于光学扫描的蜂窝芯曲面特征测量

为了获得完整的蜂窝芯曲面特征轮廓数据, 首先在蜂窝芯表面紧密贴合一层覆盖层, 以覆盖层外形特征代替蜂窝芯曲面特征; 然后采用三维光学测量仪器扫描蜂窝芯零件外部覆盖层获取测量点数据, 通过测量点在轮廓矢量方向的偏置, 消除覆盖层厚度误差, 间接得到蜂窝芯轮廓坐标。蜂窝芯轮廓与覆盖层的几何关系如图 1 所示。

覆盖层可选用热收缩聚乙烯膜或不干胶软纸等材料。聚乙烯膜一侧涂布胶层, 能紧密贴附在蜂窝芯表面, 且不易产生褶皱, 但膜厚度会随着曲面曲率变化而变化, 影响后续精度判断; 不干胶纸不会发生厚度变化, 但在曲率较大情况下会产生褶皱。综上, 在曲面曲率较小情况下采用不干胶纸作为覆盖层, 曲率较大情况下采用聚乙烯膜作为覆盖层。

本文方法与其他蜂窝芯外形测量方法对比如表 1 所示, 可以看出此种针对蜂窝芯外形曲面特征

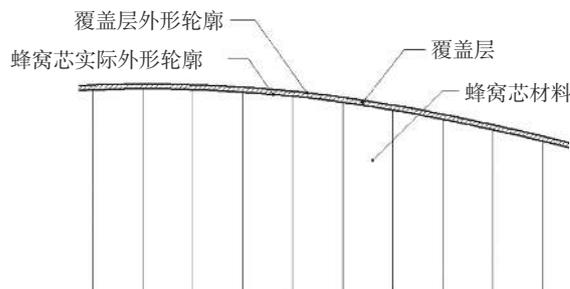


图 1 蜂窝芯轮廓及覆盖层示意图

表 1 蜂窝芯外形测量方法对比

测量方法	效率	特点
伸缩式圆柱测针	低	适应性差, 只适用于环形蜂窝芯测量
CCD 摄像机	高	边缘检测效果佳, 不适用于任何公差测量
圆柱形测头三坐标测量机	低	精度高, 但仅适用于曲面矢量已知情况
覆盖层光学扫描	高	适应性强, 结果可分析更多几何精度

测量方法与其他方法相比具有效率高、适应好的特点, 且测量高密度点云可用于多种几何公差分析。

#### 1.1 覆盖层光学测量

随着光电技术的迅猛发展, 光学测量技术日益提高, 在测量领域得到了广泛应用。目前, 代表性光学测量有激光测量、结构光测量、照相测量等方式<sup>[7]</sup>, 不同光学测量方式测量精度、测量工件需求也不同。针对带覆盖层蜂窝芯零件, 结构光测量方式较为适应。

由于结构光测量对覆盖层外形颜色要求较高<sup>[8]</sup>, 覆盖层应选择白色或相近颜色, 且需一定密度无编码标记点集成在覆盖层表面。然后校准结构光测量仪器, 对贴合覆盖层的蜂窝芯进行扫描测量。利用标记点拼合单幅扫描点云, 获取整体测量数据。

光学测量数据即测量点的集合, 设测量点  $P_i$  坐标为  $(x_i, y_i, z_i)^T (i = 1, 2, \dots, n, \text{其中 } n \text{ 为点云的测量点数量})$ , 点云  $P$  为测量点的集合, 则

$$P = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

每个测量点都对应一个法向矢量, 即外形轮廓在该点的法向矢量, 设点  $P_i$  对应的法向矢量为  $T_i(I_i, J_i, K_i)^T$ ,  $T$  为点云法向矢量集合, 则

$$T = \begin{pmatrix} I_1 & I_2 & \cdots & I_n \\ J_1 & J_2 & \cdots & J_n \\ K_1 & K_2 & \cdots & K_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

## 1.2 覆盖层轮廓法向矢量的计算

覆盖层轮廓法向矢量的求解计算,可先通过计算每个测量点  $P_i$  在全部测量数据点云中与该点欧氏距离最近的  $k$  个点,即点  $P_i$  在点云中  $k$  邻域<sup>[9]</sup>;再以  $k$  邻域点集建立一个微切平面,微切平面的矢量即可作为覆盖层轮廓法向矢量。

### 1.2.1 测量点的 $k$ 邻域搜索

测量点  $P_i$  的  $k$  邻域搜索可通过逐个计算点  $P_i$  到其他点距离并比较获得,但由于测量点云数量过大,所以此种方法效率较低。目前较为便捷的方法是通过点云空间分块<sup>[10-11]</sup>的方式进行  $k$  邻域搜索。

$k$  邻域空间分块法搜索的流程如下:

1) 设测量点云各方向坐标的极值为  $(x_{\min}, x_{\max})$ 、 $(y_{\min}, y_{\max})$ 、 $(z_{\min}, z_{\max})$ , 则所能包裹点云的最小长方体空间为:

$$\begin{cases} X = x_{\max} - x_{\min} \\ Y = y_{\max} - y_{\min} \\ Z = z_{\max} - z_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $X$ ——最小长方体空间  $x$  轴长度;

$Y$ ——最小长方体空间  $y$  轴长度;

$Z$ ——最小长方体空间  $z$  轴长度。

2) 将长方体进行分块, 设子块的长度为  $L$ , 子块的数量为  $n_{\text{cube}}$ , 则:

$$n_{\text{cube}} = \lceil X/L \rceil \lceil Y/L \rceil \lceil Z/L \rceil \quad (4)$$

其中,  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上方向取整, 子块的长度  $L$  由点云密度与  $k$  邻域中  $k$  值大小设定。分块完成后得到块空间结构  $\text{cube}[a][b][c]$ ,  $a = \lceil X/L \rceil$ ,  $b = \lceil Y/L \rceil$ ,  $c = \lceil Z/L \rceil$ 。根据测量点  $P_i$  的坐标, 可定位所属空间块的位置。

3) 搜索子块空间内每一测量点  $P_i$  的  $k$  邻域, 并计算该点到所属子块壁的最近距离  $d_{\text{short}}$ 。

4) 判断点  $P_i$  的  $k$  邻域中最远一点欧氏距离是否小于  $d_{\text{short}}$ , 是则完成该点搜索, 否则将子块向该方向扩大一个子块空间后跳回上一步继续搜索, 直至满足条件为止。

按上述过程即可求得测量点集中每一点  $P_i$  的  $k$  邻域。

### 1.2.2 微切平面建立及法向矢量求解

设点  $P_i$  在覆盖层轮廓处对应微切平面为  $S(P_i)$ , 而微切平面一般由中心点  $O_i$  与法向矢量  $N_i$  确定, 即  $S(P_i) = (O_i, N_i)$ 。

微切平面可通过点  $P_i$  及其  $k$  邻域点集进行最小二乘法拟合的方法建立, 以点  $P_i$  及  $k$  邻域点

$p_j (j = 1, 2, \dots, k+1)$  与微切平面距离的平方和为目标求极值, 即

$$\sum_{j=1}^{k+1} \left\| (p_j - O_i) \cdot N_i \right\|^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

其中,  $O_i$  表示微切平面的中心点,  $O_i = \left( \sum_{j=1}^{k+1} p_j \right) / (k+1)$ 。

经式(5)求得法向矢量  $N_i$ ,  $N_i$  即可看作点  $P_i$  在覆盖层轮廓法向矢量。

### 1.3 覆盖层测量坐标偏置

由于微切平面的法向矢量有两个方向, 所以矢量  $N_i$  会出现图2中矢量方向不统一的情况, 需先进行矢量方向调整<sup>[12]</sup>。



图2 法向矢量方向示意图

由于外形轮廓曲率较小, 无曲率突变情况, 因此使用点积相乘的几何意义即可完成矢量方向调整。相邻矢量  $N_i$  和  $N_{i+1}$  的点积结果为矢量长度及夹角  $\theta$  余弦值的乘积。若两方向矢量的夹角  $\theta$  小于  $90^\circ$ , 点积大于零, 若大于  $90^\circ$  则小于零, 即

$$N_i \cdot N_{i+1} = |N_i| |N_{i+1}| \cos \theta \quad (6)$$

预先选取某一指向蜂窝芯外侧矢量方向为基准, 如图3所示。在相邻点中, 如果点积相乘小于零, 则相邻矢量乘以  $-1$ , 进行方向调整; 反之不进行调整。调整路线采用基准矢量点  $k$  邻域搜索调整, 并标记后扩展搜索的方式, 实现全部矢量的方向调整。



图3 基准矢量示意图

设调整后的矢量为  $T_i$ , 点云法向矢量集  $T$ , 覆盖层的厚度为  $h$ 。于是, 点  $P_i$  即可在其矢量  $T_i$  方向偏置厚度  $h$ , 得到去除覆盖层后的蜂窝芯外形面轮廓点  $P'_i$ ; 测量点云  $P$  在对应法向矢量集  $T$  偏置厚度  $h$  得到蜂窝芯外形近似轮廓点云  $P'$ , 即

$$P' = P - hT \quad (7)$$

$P'$  即蜂窝芯外形曲面特征的轮廓坐标数据。

## 2 实 例

本文以某型号航空机翼填充材料纸蜂窝为例, 对零件外形贴合覆盖层, 并采用三维光学扫描仪获取覆盖层的测量数据, 截取部分数据点  $P_0$ , 其坐标参数如表 2 所示。

表 2 实测覆盖层轮廓坐标参数

测点	$x$	$y$	$z$
点1	-24.066	24.810	-4.240
点2	-23.479	25.756	-4.420
点3	-23.491	26.109	-4.340
点4	-23.261	26.463	-4.406
点5	-23.046	27.337	-4.331
点6	-22.713	27.752	-4.445
点7	-22.767	28.229	-4.274
点8	-22.406	28.094	-4.564
点9	-22.415	28.568	-4.422
点10	-22.311	29.073	-4.336
点11	-22.124	28.873	-4.539
点12	-21.835	29.267	-4.621
点13	-21.847	29.685	-4.456
点14	-21.892	30.036	-4.285
点15	-21.525	29.738	-4.682
点16	-21.464	30.465	-4.442
点17	-21.347	31.133	-4.253
点18	-21.160	31.462	-4.260
点19	-24.066	24.810	-4.240
点20	-23.479	25.756	-4.420
⋮	⋮	⋮	⋮

按本文所提出的点云矢量计算方法, 先对数据分块求  $k$  邻域, 根据  $k$  邻域求解得到微切平面, 进而调整平面矢量方向求得  $P_0$  对应的矢量点集  $T_0$ , 如表 3 所示。

覆盖层厚度为 0.2 mm, 经式(7)对测量点厚度坐标偏置, 得到目标点集  $P_0'$  坐标参数如表 4 所示。

在点云处理软件 *geomagic studio* 中将点集  $P_0$  封装为三角面片, 并导入目标点集  $P_0'$ , 计算目标点集到三角面片的法向间距, 结果如图 4 所示, 间

表 3 实测数据对应矢量点集

测点	$i$	$j$	$k$
点1	0.514	-0.154	0.844
点2	0.523	-0.178	0.834
点3	0.528	-0.189	0.828
点4	0.529	-0.201	0.825
点5	0.543	-0.216	0.811
点6	0.553	-0.229	0.801
点7	0.558	-0.232	0.797
点8	0.555	-0.231	0.799
点9	0.568	-0.246	0.785
点10	0.568	-0.272	0.777
点11	0.564	-0.250	0.787
点12	0.579	-0.277	0.767
点13	0.573	-0.286	0.768
点14	0.573	-0.302	0.762
点15	0.582	-0.294	0.758
点16	0.585	-0.305	0.752
点17	0.587	-0.316	0.746
点18	0.587	-0.316	0.746
点19	0.514	-0.154	0.844
点20	0.523	-0.178	0.834
⋮	⋮	⋮	⋮

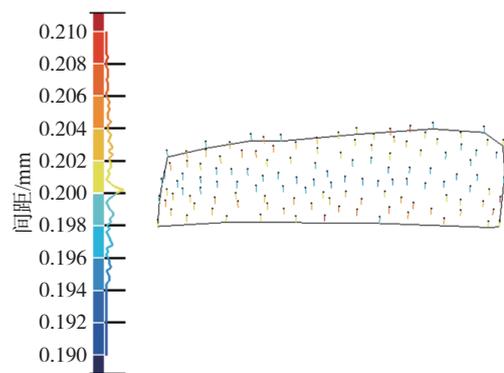


图 4 法向间距分布图

距都在 0.19~0.21 mm 范围内。间距与实际覆盖层厚度 0.2 mm 相比存在一定误差, 其主要来源为微切平面的拟合偏差。但由于误差范围在  $\pm 0.01$  mm 内, 满足该零件的测量需求, 这表明该测量方法是有效的。

## 3 结束语

本文针对蜂窝芯曲面特征的测量难点, 提出了

表4 零件轮廓坐标参数

测点	$x'$	$y'$	$z'$
点1	-23.963	24.779	-4.071
点2	-23.375	25.720	-4.253
点3	-23.385	26.071	-4.174
点4	-23.156	26.422	-4.241
点5	-22.938	27.294	-4.169
点6	-22.602	27.706	-4.285
点7	-22.655	28.182	-4.115
点8	-22.295	28.048	-4.404
点9	-22.302	28.519	-4.264
点10	-22.198	29.018	-4.181
点11	-22.011	28.823	-4.382
点12	-21.720	29.212	-4.467
点13	-21.733	29.628	-4.302
点14	-21.778	29.976	-4.132
点15	-21.409	29.679	-4.531
点16	-21.347	30.403	-4.291
点17	-21.229	31.070	-4.104
点18	-21.042	31.398	-4.111
点19	-23.963	24.779	-4.071
点20	-23.375	25.720	-4.253
⋮	⋮	⋮	⋮

一种新的测量方法。通过在蜂窝芯表面贴合覆盖层,以覆盖层外形特征代替蜂窝芯外形曲面特征,基于三维光学的扫描技术获得覆盖层轮廓数据,然

后消除覆盖层厚度误差,间接实现对蜂窝芯曲面特征的测量。最后通过某蜂窝芯零件测量实例表明了测量方法的可行性和精确性,具有实际工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 周履, 范赋群. 复合材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1991: 35-60.
- [2] CHEONG T W, ZHENG L W. Vibroacoustic performance of composite honeycomb structures[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2006, 54(4): 251-262.
- [3] 李慧娟, 霍雁, 蔡良续, 等. 不同光学方法对蜂窝结构中脱粘缺陷检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 89-94.
- [4] 李慧娟, 吴东流, 王俊涛, 等. 铝蒙皮蜂窝夹层结构的无损检测方法 [J]. *无损探伤*, 2009, 33(2): 9-12.
- [5] 万谷. 航空发动机蜂窝表面跳动和同轴度测量技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [6] 李智. 三元催化器蜂窝陶瓷载体质量的视觉检测系统研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2015.
- [7] 周良明. 铸件毛还机加余量的数字化测量分析与工艺补偿 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [8] SCHWIDER J, BUROW R, ELSSNER K E, et al. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(21): 3421-3432.
- [9] KOBELT L P, BOTSCH M, SCHWANECKE U, et al. Feature sensitive surface extraction from volume data [C]//ACM. *Computer Graphics Proceedings*, 2001: 57-66.
- [10] 熊邦书, 何明一, 俞华, 等. 三维散乱数据的 k 个最近邻域快速搜索算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 16(7): 909-912.
- [11] 杨军, 林岩龙, 张瑞峰, 等. 一种大规模点云 k 邻域快速搜索算法 [J]. *武汉大学学报*, 2016, 41(5): 656-663.
- [12] 黄雪梅, 陈吉红, 王平江, 等. 微切平面逼近三维散乱数据的研究 [J]. *华中理工大学学报*, 1997, 25(9): 16-17.

(编辑:李刚)