

基于轮廓特征的点阵尺寸可溯源测量

苏仕祥, 戴宁*, 程筱胜, 喻长江, 雷鹏福

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 工业计算机断层扫描(CT)是对点阵结构增材制件进行尺寸特征检测的有效选择,但目前缺少统一的工业 CT 尺寸测量误差评价方法,因此首先通过三坐标测量机和孔板标准器实现工业 CT 尺寸测量误差的评定,然后提出基于轮廓特征的点阵结构周期性尺寸测量方法,最后通过实例验证该方法的有效性。结果表明,该工业 CT 的最大允许误差(MPE)能够达到 $\pm(50+L/400)\mu\text{m}$,满足当前检测要求。轮廓特征提取法能够实现点阵结构周期性尺寸特征的测量。

关键词 测量; 工业 CT; 尺寸测量; 孔板标准器; 点阵结构; 增材制造

中图分类号 TP921

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1212006

Traceable Dimensional Measurement for Lattices Based on Contour Features

Su Shixiang, Dai Ning*, Cheng Xiaosheng, Yu Changjiang, Lei Pengfu

College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Industrial computed tomography (CT) is an effective tool for measuring the dimensional characteristics of lattice structures in additive manufacturing parts. However, currently there is no uniform method to evaluate the dimensional measurement errors of industrial CT. Therefore, in this paper, we first evaluate the dimensional measurement errors of industrial CT using a coordinate measuring machine and a hole plate standard; then, we propose a method for conducting the periodic dimensional measurements of the lattice structure based on contour features. Finally, the effectiveness of the method is verified via an example. The result shows that the maximum permissible error of the industrial CT can reach $\pm(50+L/400)\mu\text{m}$, which meets the current testing requirements. The contour feature extraction method can be applied to measuring the periodic dimensional features of lattice structures.

Key words measurement; industrial computed tomography; dimensional measurement; hole plate standard; lattice structure; additive manufacturing

OCIS codes 120.3930; 340.7440; 100.2960

1 引 言

点阵结构在满足一定力学性能的基础上具备多种功能特性,在航空航天领域拥有巨大的应用潜力^[1]。因为航空结构件对安全性和可靠性要求极高,加之这种点阵结构的服役条件极其复杂,所以对空间复杂点阵结构进行质量检测 and 评估,对于保证航空装备的质量和寿命都具有十分重要的意义。点

阵结构由于具有轻质高效的结构形式及开放的内部空间,在满足承载和多功能要求的同时,对其制造与检测的要求也越来越高。传统基于铸造和冲压等制造方式已经不能满足越来越复杂的点阵构型以及多密度排列点阵结构的制备要求,而增材制造工艺在复杂点阵结构等周期性多孔结构的制备上具有很多优势。它对零件的复杂程度不敏感,设计和制造的自由度较大,但是,由于增材制造是一种基于分层累

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-06-19; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51775273)、十三五国防装备预研项目(61409230305)、装备预研航天科工联合基金(6141B07090119)、国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目(COMAC-SFGS-2018-37)、国防基础科研计划(JCKY2018605C010)

* E-mail: dai_ning@nuaa.edu.cn

积制造的加工技术,最终产品在微观尺度上的内部质量和表面质量都不容易控制。在增材制造过程中制造工艺参数以及阶梯效应容易对制件的尺寸精度产生影响,而点阵结构的功能特性与其相关尺寸精度和表面完整性密切相关^[2]。目前,国内外学者对于点阵结构质量检测的研究侧重于表面粗糙度的评价^[3-4],仅有部分文献研究其尺寸制造精度的评价方法。例如,Azmi等^[5]采用轮廓投影仪评价体心立方(BCC)点阵结构增材制件的尺寸制造精度,但该方法不能测量点阵结构的内部特征。Abele等^[6]基于Micro-CT图像分析不同工艺参数对体心立方点阵结构增材制件尺寸精度的影响,但该方法稳定性较差。因此,对点阵结构进行尺寸精度研究具有重要意义。

在零件设计过程中,必须为每个特征定义公差,以确保零件符合制造规范。为了验证制造部件的尺寸特征是否在定义的公差范围内,需要借助测量工具。虽然传统的接触式测量方式能够提供测量误差值,但是点阵结构制件内部结构复杂、单元尺寸小。现有的测量设备无法对这类零件进行高精度测量^[7]。工业计算机断层扫描(CT)作为一种极具前景的无损检测技术,是应用于点阵结构质量检测的可选方法之一^[8]。近年来,随着相关技术的不断发展,工业CT正从传统的无损检测领域拓展到了几何坐标测量领域,它可以在不破坏工件结构的情况下对内外尺寸进行测量^[9]。然而,与其他测量技术相比,工业CT还没有建立统一的精度评价规范与技术要求,为了克服这一问题,一些研究机构提出了自己的精度评价方法,并设计相应的CT标准器来评定CT系统的测量误差,以便能够为CT系统所获得的尺寸测量值提供最大允许误差(MPE, E_{MPE})估计值^[10]。Welkenhuyzen等^[11]设计了一种多球标

准器,以研究几何误差对工业CT尺寸测量的影响。Villarraga-Gómez^[10]基于“球盘”标准器来评定225KV工业CT系统尺寸测量的 E_{MPE} 。唐天旭等^[12]基于散射校正板研究了锥束微纳CT系统的散射校正。尽管国内外学者都使用各自设计的标准器对工业CT系统的测量误差进行研究,但还是存在多种影响其最终测量结果的因素。其中,实际被测件材料与标准器材料的不同是主要影响因素之一^[13]。另外,不同工业CT系统之间在硬件设备和软件算法方面存在诸多差异,即使CT设备本身有测量精度参考值,但由于缺少统一标准,各个CT制造商之间的精度评价方法仍然有一定的不同,这将导致同一零件在不同CT系统上的测量值出现偏差。因此,本文首先研制孔板标准器,并对工业CT系统尺寸测量误差进行评定;然后在相同扫描条件下获取点阵结构增材制件的CT断层图像,并基于轮廓特征提取技术计算其周期性间距;最后结合工业CT尺寸测量误差实现点阵结构周期性间距的可溯源评定。

2 基本方案

为保持不同工业CT系统之间测量值的一致性,其尺寸测量误差的评定需建立在合适的溯源体系上。虽然国际上尚未建立统一的工业CT测量性能评价规范,但“三坐标测量机(CMM)-标准器-工业CT”溯源体系是目前广泛采用的评价方法^[14]。如图1所示,一方面,采用如图2(c)所示的CMM测量孔板标准器,获取孔距参考值 L_r ,然后使用工业CT对孔板标准器进行扫描,获取孔距被测值 L_a ,最终可根据测量误差 E 计算出当前扫描环境下该CT设备的 E_{MPE} ;另一方面,使用增材制造工艺打印点阵结构,随后在相同工业CT设备、相同扫描参数下

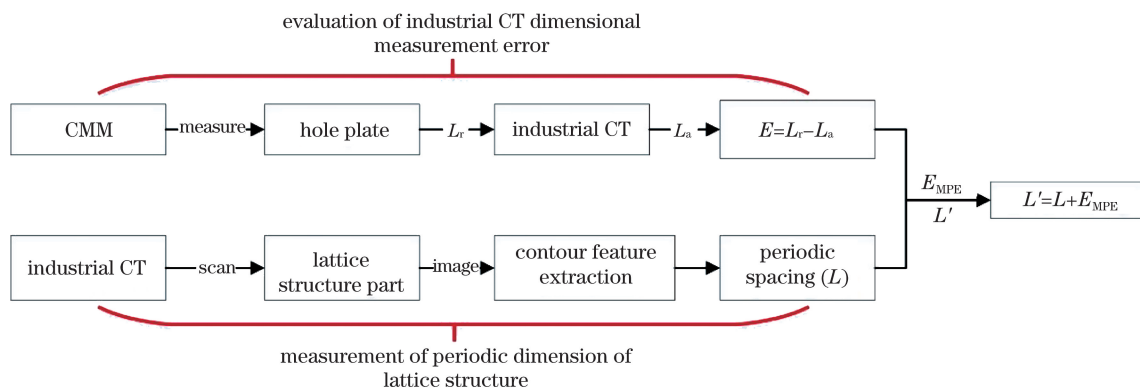


图1 溯源体系的基本流程

Fig. 1 Basic flow of traceability system

对点阵增材制件进行 CT 无损检测,采用本文基于轮廓特征提取的方法实现点阵结构周期性间距 L 的计算,最后将 CT 设备的 E_{MPE} 与周期性间距检测值 L 进行结合,以实现点阵结构周期性间距的可靠评价。

3 工业 CT 尺寸测量误差评定

德国电气工程师协会和德国工程师协会共同起草的针对工业 CT 尺寸测量的行业标准 VDI/VDE 2630 是目前广泛采用的国家级工业 CT 指导规范^[15]。许多先进的工业 CT 制造商根据该指南设计标准器来评定工业 CT 系统的测量精度。本文根据该指南研制孔板标准器以实现工业 CT 尺寸测量误差的评定。

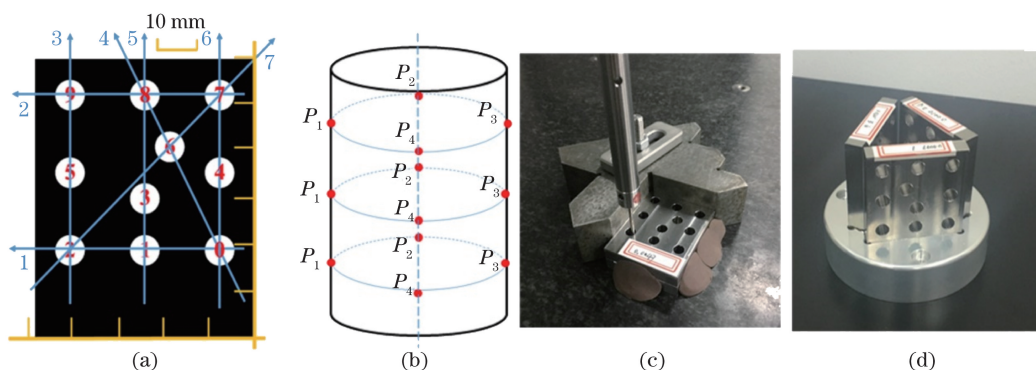


图 2 孔板标准器的设计与 CMM 测量。(a) 孔板示意图;(b) 圆柱孔点分布;(c) CMM 测量;(d) 孔板校准器
Fig. 2 Hole plate standard design and CMM measurement. (a) Hole plate diagram; (b) hole point distribution; (c) CMM measurement; (d) hole plate standard

3.2 孔板标准器的测量

1) CMM 测量

如图 2(c)所示,首先使用 PMM-C(德国 Leitz) CMM 对三个孔板单独测量,其测量不确定度可达 $(0.6 + L/850) \mu\text{m}$,这完全满足工业 CT 的测量误差评定要求。为了获取相对准确的测量结果,按照图 2(b)所示的 QUINDOS 软件操作方式在每个圆柱孔中采集三圈点,每圈上采集 4 个点,最后拟合中轴线并提取交点。

2) CT 扫描与数据处理

CMM 测量完毕后,将三个孔板装配为图 2(d)所示的孔板校准器。使用 IPT04103D 工业 CT 系统对孔板标准器进行扫描,该型号工业 CT 中小焦点直径为 0.4 mm,射线源电压为 450 kV,平板探测器尺寸为 2048 pixel \times 2048 pixel,射线源到平板探测器距离为 1419 mm。具体扫描参数设置见表 1。

使用德国 VGStudio Max 3.0 软件对 CT 数据进行处理,主要包括图像重建、阈值分割以及几何参

3.1 孔板标准器的设计

Villarraga-Gómez^[16]使用德国联邦物理技术研究院和日本国家计量院共同研制的孔板标准器,并对工业 CT 的尺寸测量精度进行了深入分析,但该孔板加工难度大,测量过程繁琐。依据德国 VDI/VDE2630-1.3^[17]相关指导意见,对孔板进行简化,如图 2(a)所示。本文设计的孔板包含 10 个圆柱孔,可划分为 7 个不同空间方向,满足测量需求,材料为 TC4 钛合金。工业 CT 扫描过程中,工件作 360°旋转式运动且工业 CT 系统采用硬 γ 射线的衰减来检测,因此单个孔板无法体现整个空间的测量精度。与 Villarraga-Gómez 使用的孔板标准器相比,将三个相同的简化孔板以等边三角形的排列方式放置更为合理,如图 2(d)所示。

表 1 CT 扫描参数

Table 1 CT scanning parameters

Parameter	Value
Scan voltage /kV	420
Scan current /mA	1.6
Integration time /ms	250
Magnification	2.1
Voxel size / μm	200
Focal spot size /mm	0.4
Number of projections	1800
Gain	0.25

数提取。如图 3(a)所示,在“几何参数提取”过程中,需要计算圆柱孔的中轴线。因此,需对每个圆柱孔进行点采样,然后采用高斯法拟合中轴线,进而提取孔中心的空间坐标。

3.3 尺寸测量误差评定

近几年,研究人员试图确定工业 CT 系统的测量性能^[18-19]。目前,一些工业 CT 制造商已经对尺寸

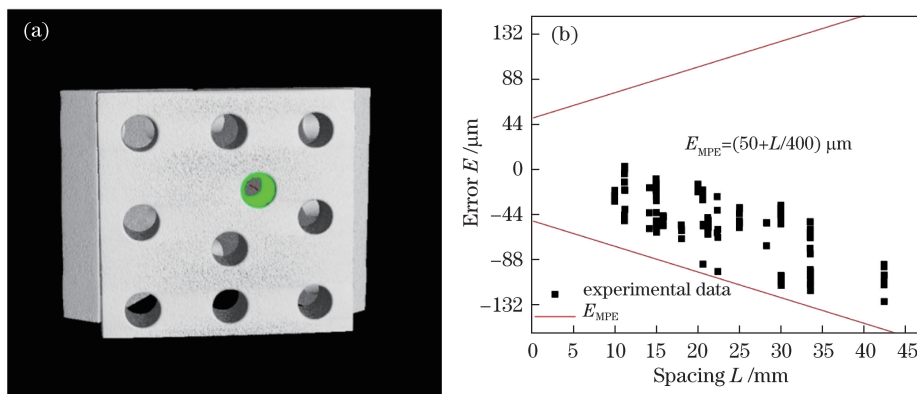


图 3 CT 扫描与误差评定。(a) 几何参数提取;(b) CT 误差评定结果

Fig. 3 CT scanning and error evaluation. (a) Geometric parameter extraction; (b) results of CT error evaluation

测量精度进行了研究并采用 E_{MPE} 作为尺寸精度参考值,其表达式为

$$E_{MPE} = \pm(A + L/K), \quad (1)$$

式中: A 、 K 为常量; L 需转换为微米单位。Villarraga-Gómez 等^[20] 提出在进行双向测量时需要在(1)式中引入放大因子,但是在测量误差评定过程中仅使用单向测量(中心到中心)时,(1)式仍成立。因此,本文采用(1)式,以圆孔中心到圆孔中心的距离作为误差评定的参数,计算方法为

$$E = L_a - L_r, \quad (2)$$

式中: E 指孔距测试值 L_a (CT 测量值) 和孔距参考值 L_r (CMM 测量值) 之差。首先,采用最小二乘法对所有“实验数据”进行线性拟合, K 即拟合后直线斜率的倒数; 然后通过最大误差点作平行于拟合直线的平行线,再以 $y = 0$ 为对称轴作该平行线的对称线,即可获得两条 E_{MPE} 曲线; 最后在 $x = 0$ 处作垂直于水平轴线的直线,通过求解该直线与 E_{MPE} 曲线的交点即可得到 A 。为确保所有被测点的误差值均在 E_{MPE} 曲线内,本文将 A 的值适当增大,把 E_{MPE} 曲线向两侧偏移。最终得到的 E_{MPE} 误差曲线如图 3(b) 所示,其结果可表示为 $\pm(50 + L/400) \mu\text{m}$ 。从该图可以看出被测孔距 L 越大,测量误差 E 越大,与(1)式所体现的规律相符。虽然该 E_{MPE} 误差曲线是在一种放大比(如表 1 所示)下得出的,但这与第 5 章节中点阵结构制件的 CT 扫描参数完全一致,从而保证最终评价结果的可靠性。

4 点阵结构尺寸特征检测

骨架线是描述对象拓扑结构的一种有效形式,它为模型的表示和几何特征的识别提供了更为直观的定义。针对增材制造点阵结构的尺寸特征提取困

难和稳定性不足等问题,本文提出一种基于轮廓特征识别的点阵骨架快速提取方法,该方法能够很好地利用骨架线提取过程的稳定性和连通性,实现复杂点阵结构的周期性尺寸特征检测。

4.1 点阵单元

点阵结构种类多,且功能特性各不相同。本文方法旨在解决一类点阵结构的周期性尺寸特征检测问题。

$$M = f(L_i, D_i, \theta), i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

假设点阵单元 M 包含 n 个长度为 L_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 直径为 D_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的杆,各杆件在拓扑规则 $f(\cdot)$ 下以角度 θ 呈空间规则分布。该类点阵结构需要满足以下几个条件:

- 1) $L_1 = L_2 = \dots = L_n, D_1 = D_2 = \dots = D_n$, 即点阵单元 M 各边长相等,杆径一致且为圆柱形;
- 2) $\theta \geq 20^\circ$, 以点阵单元 M 中心为原点,构建笛卡尔直角坐标系,杆件轴向与切片方向夹角大于 20° ;
- 3) 点阵单元 M 外部结构为正立方体,且内部呈中心对称结构。

图 4 为适用于本文处理对象的几种典型点阵结构单元。图中的数字和字母分别代表点阵单元的特征线与特征点。

4.2 点阵结构 CT 数据预处理

选择性激光熔化工艺容易存在未熔融粉末颗粒,并导致灰度图像上出现大量噪声,从而影响测量的结果。这需要对图像进行预处理,具体步骤如下。

- 1) 中值滤波在数据处理过程中对发生阶跃的轮廓边缘和斜坡边缘有较好的效果,可以有效地保留边缘,而不会使其发生模糊^[21]。本文选择中值滤波处理 CT 切片数据,以更好地保留轮廓细节,为后面数据分析做准备。随后对图像进行二值化以提取

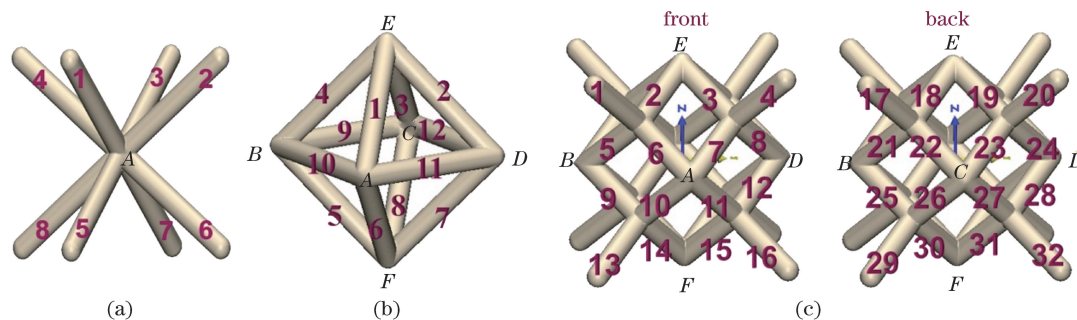


图 4 典型点阵结构单元。(a)体心立方;(b)正八面体单元;(c)正十二面体单元

Fig. 4 Typical lattice structure cell. (a) Body-centered cubic; (b) regular octahedron unit; (c) dodecahedron unit

轮廓边界。

2) 为提升检测方法的效率及稳健性,通过裁剪获得部分图像数据,并进行分析。裁剪的过程中,通常选取 $n \times n$ 个点阵单元进行分析(例 3×3 、 4×4),将相同位置的图像顺次裁剪并进行保存。

4.3 点阵结构周期性间距计算

周期性点阵结构增材制件受制造工艺的影响,其单元尺寸误差的不断累积将直接导致点阵单元的周期性间距出现偏差,从而破坏结构的整体性能。为定量分析周期性间距的偏差值,需要对点阵单元周期性间距进行检测。

a) 轮廓特征提取

以 BCC 点阵单元为例,采用 Snake 算法^[22]寻找各轮廓的边缘点。Snake 模型提取目标轮廓线的整个过程等价于将能量泛函式极小化,能够保证能量函数达到一个理想的全局极小值。该能量泛函式表示为

$$E[I(S)] = \frac{1}{2} \int_0^1 (\alpha |I'(S)|^2 + \beta |I''(S)|^2) ds + \int_0^1 E_{\text{ext}}[I(s)] ds, \quad (4)$$

式中: $I(S)$ 为初始曲线; $I'(S)$ 和 $I''(S)$ 分别为曲线的弹性能量和刚性能量;系数 α 和 β 分别对曲线轮廓的连续性和光滑性进行调控,轮廓线收敛性能跟参数密切相关,系数 α 值越大,轮廓线提取的速度越快,系数 β 越大,轮廓就越平滑; E_{ext} 为在整个能量空间中曲线的外部能量,以此保证期望的边缘特征有一个较低的值。如图 5(a)所示,最终提取的轮廓特征近似于椭圆,如图 5(b)所示,采用重心法计算该轮廓的中心点坐标 $P(x, y, z)$ 。

b) 特征几何骨架生成

如图 6(a)所示,将各点阵单元按照从属关系构建“点-骨架-单元”式数据结构。设被测点阵结构件包含 n 个点阵单元,每个点阵单元 $C_i (i=1, 2, \dots, n)$

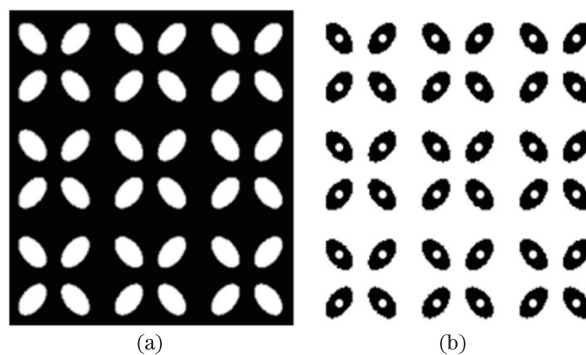


图 5 轮廓特征提取。(a) CT 图像;(b) 轮廓中心点提取

Fig. 5 Contour feature extraction. (a) CT image; (b) extraction of center point of contour

由多根杆构成,而每根杆 Q 由步骤 a)中得到的中心点坐标 $P(x, y, z)$ 组成。其中,对于每种点阵结构单元,骨架 Q 需要按照既定的顺序依次存储,以便于下一阶段的特征点识别。图 6 中的数字即为本文骨架线存储的编号。最后利用最小二乘法拟合出空间骨架线,如图 6(c)所示。

c) 周期性尺寸计算

图 4 中几种典型的点阵结构单元,其主要特征可分为两大类:特征线(数字表示)与特征点(字母表示)。点阵结构周期性间距的测量需要特征点的相关信息,如图 7(b)中实心圆点所示。在步骤 b)中,已经利用轮廓中心点拟合出骨架线。因此,在骨架线提取完成的基础上,如图 7(b)中虚线所示,通过算法 1 进行点阵单元的特征点取值,如图 7(a)所示。算法 1 的功能是依据步骤 b)中的骨架线集合 S_Q ,计算出点阵单元的所有特征点空间坐标 S_{ver} ,其主要步骤如下:

- 1) 在骨架线集合 S_Q 中查找与当前待求特征点相关联的骨架线 S'_Q ;
- 2) 在 S'_Q 中分别计算第一条骨架线与该集合中其余骨架线之间的最近点 $P'_{(i,j)}$;
- 3) 将所有最近点 $P'_{(i,j)}$ 的重心作为当前待求特

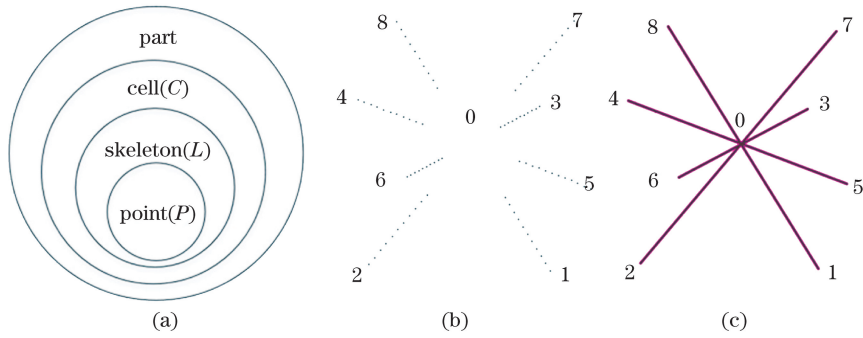


图 6 BCC 特征几何骨架生成。(a)数据结构;(b)中心点获取;(c)中心点直线拟合

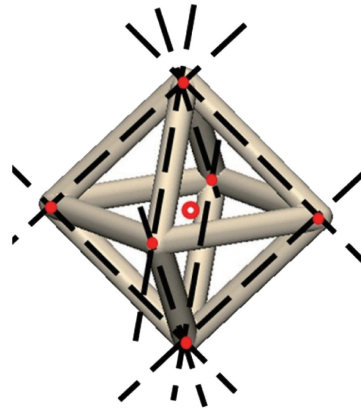
Fig. 6 Characteristic geometric skeleton generation of BCC. (a) Data structure; (b) central point acquisition; (c) center point linear fitting

Algorithm1: lattice cell feature point extraction algorithm

```

input: skeleton  $S_Q$ ;
output: feature point coordinate  $S_{ver}$ ;
1. for  $i=1$  to  $n$  do //  $n$  is the number of feature points
2.  $S'_Q \leftarrow S_Q$ ; // the skeleton associated with the current
   feature point
3.  $L_1 \leftarrow S'_Q(i)$ ;
4. for  $j=2$  to  $m$  do //  $m$  is the number of associated skeletons
5.  $L_2 \leftarrow S'_Q(j)$ ;
6.  $P'_{(i,j)} \leftarrow \min|L_1-L_2|$ ; //  $P'_{(i,j)}$  is the closest point between two
   skeletons
7. end for
8.  $S_{ver}(i) \leftarrow \sum_{j=2}^m P'_{(i,j)} / (m-1)$ ;
9. end for
10. return  $S_{ver}$ 
    
```

(a)



(b)

图 7 点阵结构特征点与中心点。(a)特征点提取伪代码;(b)点阵结构特征点与中心点示意图

Fig. 7 Feature points and center point of lattice structure. (a) Pseudo-code for feature point extraction; (b) schematic of lattice structure feature points and center point

征点的空间坐标 $S_{ver}(i)$;

4) 迭代求取所有特征点的空间坐标 S_{ver} 并返回。

在获取该点阵单元所有特征点相关信息之后,点阵单元的中心点即为这些特征点的重心。点阵结构周期性间距最终是通过计算两点阵单元中心点之间的距离完成的。

由此,空间点阵结构 X、Y 方向的周期性间距为

$$\begin{cases} L_{xy} = P_y^x - P_y^{x-1} \\ L_{xy} = P_x^y - P_x^{y-1} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: x 、 y 分别为周期性排列点阵单元对应方向的序号; L_{xy} 为间距测量值,即两相邻点阵单元中心点之差。结合工业 CT 设备尺寸测量的最大允许误差 E_{MPE} ,点阵结构周期性间距测量值 L' 计算方程为

$$L' = L_{xy} \pm (A + L_{xy}/K)。 \quad (6)$$

5 结果与讨论

5.1 点阵结构的制备

本文选用 BCC 点阵单元作为实验对象,如

图 8(a)所示。点阵样件的制备参数如表 2 所示。采用 Renishaw AM400 金属 3D 打印机打印样件,该打印机的成型精度与部件结构有关。由于点阵结构内部单元尺寸小且呈周期性密集排列,根据使用经验,该设备实际打印精度在 $\pm(0.2 \sim 0.6)$ mm 范围内。图 8(b)为打印完的样件。随后使用 3.2 节所述工业 CT 设备对样件进行扫描,由于该样件与孔板标准器材料相同且尺寸基本一致,因此扫描参数能够完全保持一致。

表 2 点阵样件制备参数

Table 2 Lattice sample preparation parameters

Property	Parameter
Length and angle	$n=12, L=10$ mm, $D=2$ mm, $\theta=70^\circ$
Material	TC4
Size	40mm×40 mm×40 mm
Number of cells	8×8×8
3D printer	Renishaw AM400

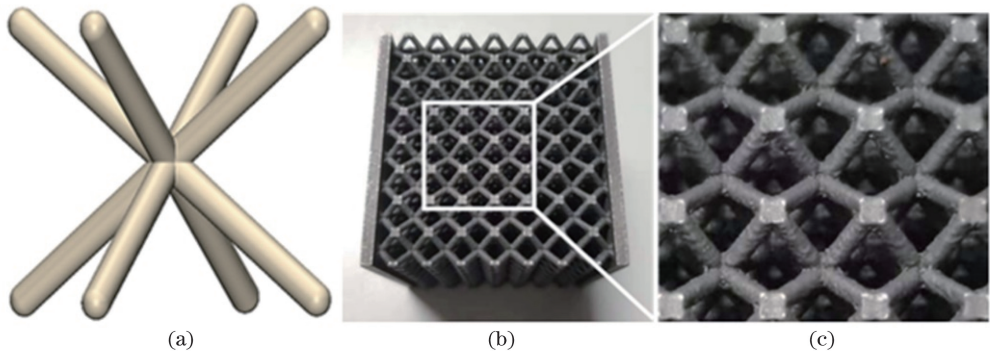


图 8 BCC 点阵结构。(a) BCC 点阵单元；(b) BCC 点阵增材制品；(c) 区域局部放大
Fig. 8 BCC lattice structure. (a) BCC lattice unit ; (b) additive manufacturing part with BCC lattice ;
(c) local area amplification

5.2 周期性间距检测

对于点阵增材制品,本文在 CT 图像的 4 个角点依次选取 3×3 点阵单元进行分析,4 个角点如图 9(a)中的 a、b、c 和 d 区域所示。如图 9(b)所示,每个 3×3 单元在 x 和 y 方向共包含 12 个周期性间距,在进行骨架线提取前,使用中值滤波处理图像

数据。图 9(c)为最终提取的骨架线,其周期性间距检测结果如图 10 所示。该图横坐标表示周期性间距测量顺序,即图 9(b)中的排序方式。纵坐标为间距检测值 L ,每个 L 值的误差范围由 3.2 节 $E_{MPE} = \pm(50 + L/400) \mu\text{m}$ 得出。周期性间距设计参考值为 5.0 mm。

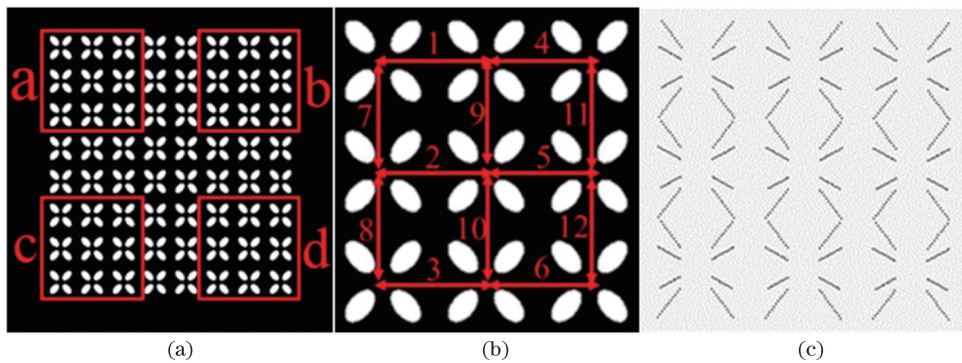


图 9 BCC 骨架线提取。(a) CT 图片；(b) 3×3 点阵间距排序；(c) 空间骨架线提取
Fig. 9 BCC skeleton line extraction. (a) CT photo; (b) spacing ordering of 3×3 lattice elements ;
(c) extracted spatial skeleton line

5.3 讨论

文献[5]采用轮廓投影仪测量 BCC 点阵结构的杆径。轮廓投影仪是一种利用光学投射原理,将被测工件的轮廓投影至屏幕中的测量仪器。该测量方法简单直接,但轮廓投影仪适用于二维测量,对于三维点阵结构仅能测量表面层的点阵单元,而且底层点阵单元的制造误差会影响光线的投射,造成上层点阵单元测量结果不可靠,更重要的是凭操作人员的手动操作无法界定杆件的中心位置,难以实现点阵周期性间距的准确测量。如图 11(a)所示,使用新光光电 JT12A-B 型轮廓投影仪对点阵结构的周期性间距进行测量,由于轮廓投影仪无法实现三维点阵结构内部点阵单元的测量,本文选取其表面 3×3 点阵单元进行测量,放大倍率为 20,重复测量

3 次,其平均标准偏差约为 $8.5 \mu\text{m}$;而采用本文算法对同一区域进行 3 次测量后的平均标准偏差约为 $0.3 \mu\text{m}$,表明本文算法稳定性较好,空间骨架线算法对计算 BCC 点阵结构周期性间距具有可靠性。文献[6]基于 Micro-CT 图像分析不同工艺参数对 BCC 点阵结构尺寸精度的影响。在特定的切片图像位置,通过轮廓拟合提取圆柱曲线以测量点阵结构杆径。虽然该方法能够测量点阵结构内部特征,但仍然存在一些问题。首先,切片图像是手动截取的,而手动选取的方式无法保证切片图像位置的准确性,会不可避免地存在误差;其次,只用点阵单元中一个切片图像的测量数据不足以评价整个点阵单元的尺寸制造精度。图 12 为采用本文算法研究切片图像数量对测量结果影响的实验。在该实验中,

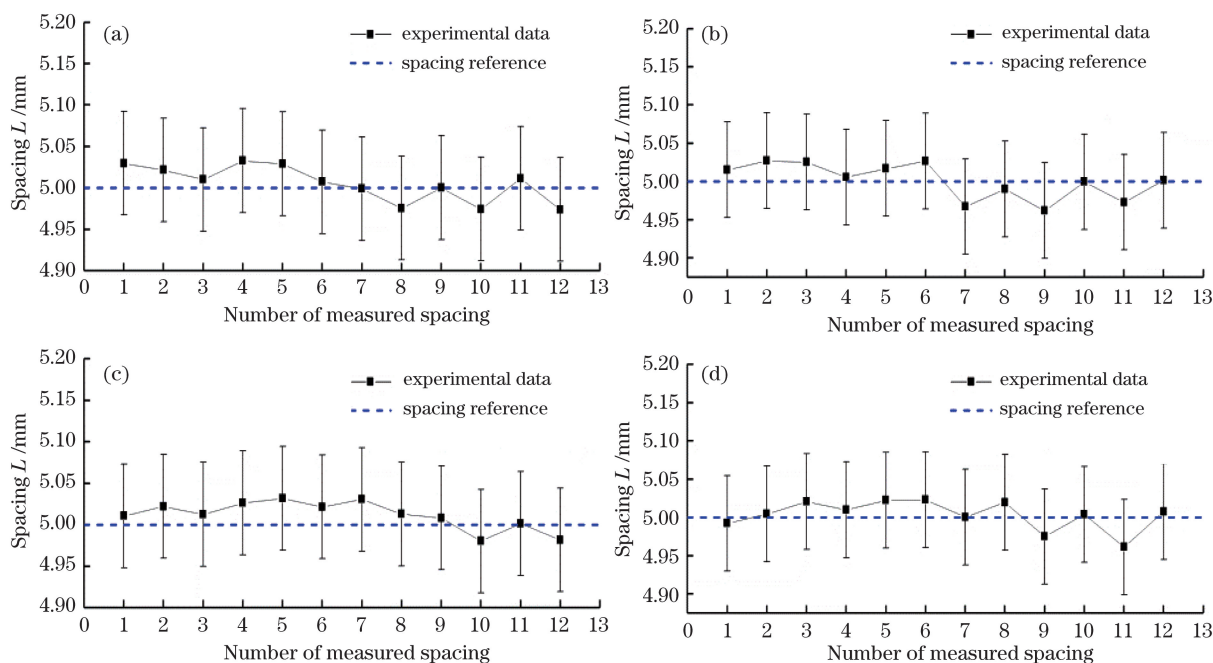


图 10 BCC 周期性间距检测结果。(a)左上角测量结果;(b)右上角测量结果;(c)左下角测量结果;(d)右下角测量结果
Fig. 10 Results of BCC periodic interval detection. (a) Measurement results at upper left; (b) measurement results at upper right; (c) measurement results at lower left; (d) measurement results at lower right

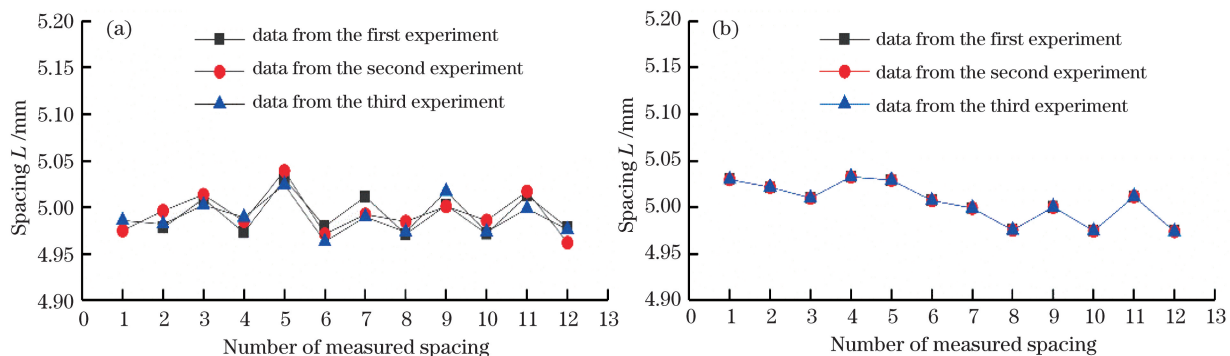


图 11 实验对比分析。(a)轮廓投影法测量结果;(b)所提算法测量结果
Fig. 11 Comparison of experimental analysis. (a) Measurement results of profile projection; (b) measurement results of the proposed algorithm

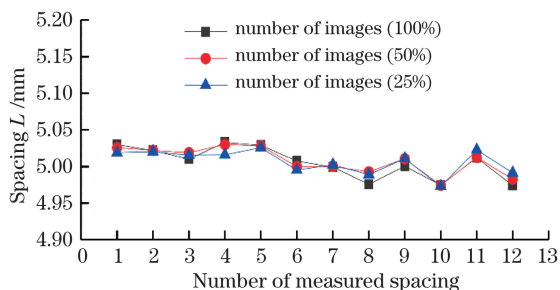


图 12 图像数量对测量结果的影响
Fig. 12 Influence of image quantity on measurement results
分别选取原始切片图像数量的 25%, 50% 和 100% 进行测试,结果表明,3 次测量的平均标准偏差约为 5 μm ,切片图像的数量对测量结果有较大影响。另

外,这两篇文献中仅研究了点阵结构杆径的测量,并未涉及更复杂的点阵周期性间距的测量;而本文方法是基于 CT 图像,通过对轮廓特征的提取构建数据结构,最终实现点阵结构周期性间距的测量。如图 10 所示,在 4 个角点区域的共 48 组周期性间距测量结果中,最小值为 4.96 mm,最大值为 5.03 mm。最小最大值对应的测量误差分别为 50.012 μm 和 50.013 μm 。

目前,许多研究机构已经设计出各自的 CT 标准器。但是这些校准器的材料往往和 CT 最终检测的工件有很大差别,例如:有些先进的工业 CT 制造商采用多球标准器来评价设备的测量性能,其主要

由红宝石球组成,材料为 Al_2O_3 ,但工业应用中的实际检测件很少采用这种材料。而工业 CT 的尺寸测量误差和工件的材料有密切关系,且目前没有统一的解决方法。钛合金是航空航天轻量化领域的常用材料,因此本文所用孔板校准器和点阵增材制件的材料都为 TC4 钛合金。在溯源过程中,工业 CT 测量误差的来源较多,除了被测件的材料外,还包括 CT 系统的硬件配置、环境温度和扫描参数等。本文基于同一工业 CT 系统实现孔板标准器和点阵结构的检测并在检测过程中保持环境的稳定。另外,由于孔板标准器与点阵结构件的材料相同且尺寸基本一致,两工件的扫描参数完全相同。因此,CT 系统的硬件配置、环境温度和扫描参数带来的误差可视为相同,从而保证了尺寸测量结果的准确性。

6 结 论

使用孔板标准器和 CMM 能够实现对工业 CT 系统尺寸测量精度的可溯源评定。实验结果表明在当前实验条件下,该工业 CT 系统尺寸测量的最大允许误差可表示为 $E_{\text{MPE}} = \pm(50 + L/400) \mu\text{m}$,满足本文点阵增材制件尺寸精度的检测要求。结合该精度评价结果,在 CT 图像上采用轮廓特征提取法能够有效地完成点阵结构周期性间距的可溯源测量。

参 考 文 献

- [1] Chen L M, Dai Z, Fan H L, *et al.* Design and analysis of light-weight lattice sandwich cylinders[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(4): 489-493.
陈立明, 戴政, 范华林, 等. 轻质点阵夹层圆柱壳的设计与分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(4): 489-493.
- [2] Zhang X Z, Tang H P, Leary M, *et al.* Toward manufacturing quality Ti-6Al-4V lattice struts by selective electron beam melting (SEBM) for lattice design[J]. JOM, 2018, 70(9): 1870-1876.
- [3] Xiao Z F, Yang Y Q, Xiao R, *et al.* Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting [J]. Materials & Design, 2018, 143: 27-37.
- [4] Zanini F, Sbettega E, Sorgato M, *et al.* New approach for verifying the accuracy of X-ray computed tomography measurements of surface topographies in additively manufactured metal parts [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(1): 12.
- [5] Azmi M S, Ismail R, Hasan R, *et al.* Study on dimensional accuracy of lattice structure bar using FDM additive manufacturing[C]//Proceedings of Mechanical Engineering Research Day 2017, March 30, 2017, UTeM, Melaka, Malaysia. Malaysia: CARE, 2017: 397-398.
- [6] Abele E, Stoffregen H A, Klimkeit K, *et al.* Optimisation of process parameters for lattice structures [J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(1): 117-127.
- [7] Thompson A, Maskery I, Leach R K. X-ray computed tomography for additive manufacturing: a review[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(7): 072001.
- [8] du Plessis A, Yadroitsev I, Yadroitsava I, *et al.* X-ray microcomputed tomography in additive manufacturing: a review of the current technology and applications[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2018, 5(3): 227-247.
- [9] Kruth J P, Bartscher M, Carmignato S, *et al.* Computed tomography for dimensional metrology [J]. CIRP Annals, 2011, 60(2): 821-842.
- [10] Villarraga-Gómez H. X-ray computed tomography for dimensional measurements [C]//Digital Imaging 2016, July 2016, Mashantucket, CT, USA. USA: The American Society for Nondestructive Testing, Inc., 2016: 44-57.
- [11] Welkenhuyzen F, Boeckmans B, Tan Y, *et al.* Investigation of the kinematic system of a 450 kV CT scanner and its influence on dimensional CT metrology applications[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Computed Tomography, January 24-25, 2014, Paris, France. [S.l.: s.n.], 2014: 217-225.
- [12] Tang T X, Duan X J, Zhou Z Z, *et al.* Scatter correction based on beam stop array for cone-beam micro-computed tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0834001.
唐天旭, 段晓礁, 周志政, 等. 基于散射校正板的锥束微纳 CT 系统的散射校正 [J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0834001.
- [13] Carmignato S, Dewulf W, Leach R. Industrial X-ray computed tomography[M]. Cham: Springer, 2018.
- [14] Song X, Shi Y S, Song X P, *et al.* Exploratory research on the length measuring error calibration of industrial CT[J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(3): 225-228.
宋旭, 施玉书, 宋小平, 等. 工业 CT 长度测量误差校准的探索研究 [J]. 计量学报, 2015, 36(3): 225-228.
- [15] Wang Y X. The probing error and error of indication for size measurement of industrial CT [D]. Hangzhou:

- China University of Metrology, 2014.
王义旭. 工业 CT 探测误差与尺寸测量示值误差的研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
- [16] Villarraga-Gómez H. Studies of dimensional metrology with X-ray CAT scan[D]. Charlotte: UNC Charlotte, 2018.
- [17] VDI/VDE 2630-1.3. Computed tomography in dimensional measurement-guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT sensors[Z]. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [18] Hiller J, Hornberger P. Measurement accuracy in X-ray computed tomography metrology: toward a systematic analysis of interference effects in tomographic imaging[J]. Precision Engineering, 2016, 45: 18-32.
- [19] Aloisi V, Carmignato S. Influence of surface roughness on X-ray computed tomography dimensional measurements of additive manufactured parts[J]. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 2016, 6: 104-110.
- [20] Villarraga-Gómez H, Smith S T. Magnification dependent *MPE*-equation for dimensional X-ray CT metrology[C]//Proceedings of euspen's 17th International Conference & Exhibition, May 2017, Hannover, Germany. UK: Euspen, 2017: 1-2.
- [21] Li Q, Wang Y Z, Wang Q, *et al*. Noise suppression algorithm of coherent lidar range image[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(5): 581-584.
李琦, 王永珍, 王骐, 等. 相干激光雷达距离像的噪声抑制算法研究[J]. 光学学报, 2005, 25(5): 581-584.
- [22] Liu S M, Huang Y P, Zhang R J. Pedestrian contour extraction and its recognition using stereovision and snake models[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0533001.
刘述民, 黄影平, 张仁杰. 基于立体视觉及蛇模型的行人轮廓提取及其识别[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0533001.