

# 工业 CT 材料密度测量方法研究

王 珏<sup>1,2</sup>, 黄苏红<sup>2</sup>, 蔡玉芳<sup>1</sup>

WANG Jue<sup>1,2</sup>, HUANG Su-hong<sup>2</sup>, CAI Yu-fang<sup>1</sup>

1.重庆大学 ICT 研究中心, 重庆 400030

2.重庆大学 自动化学院, 重庆 400030

1.ICT Research Center, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2.College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China

E-mail: huangsuHong1986@163.com

WANG Jue, HUANG Su-hong, CAI Yu-fang. Research on measuring ICT material density. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(2): 203-205.

**Abstract:** In order to realize density quantitative measurement for high-density and great varying range materials, an automatic density measurement system is established and the relationship between the density and CT number of industrial materials is investigated. According to the common density of detected work-piece in ICT, a few representative kinds of uniform material are chosen as the standard work-pieces and aluminum material is as a standard reference. It is based on CT scanning to gain the CT number with different density standard work-pieces. The CT number of air in the standard image, chosen from all, is as the reference standards for correcting the CT number of detected material. Using the least square method fits the formula between the material density and the CT number. An experiment to detect the density of plastics, rubber, glass, titanium alloy, steel and copper, the measuring accuracy can be reached 1%. It can satisfy the industry requirements of precision.

**Key words:** CT image; material density; CT number

**摘 要:** 为了实现对密度高且变化范围大的材料进行密度定量测量, 建立自动密度测量系统, 对工业材料的密度与 CT 数的关系进行研究。根据工业 CT 检测工件常见密度, 选取有代表性的几种均匀材料作为标件, 并以铝材料作为参考标准件。通过 CT 扫描获取不同密度标件对应的 CT 数。选用一幅 CT 图像为标定图像, 以该图像中空气的 CT 数为标准, 对被测材料的 CT 数进行修正。采用最小二乘法拟合材料密度与 CT 数的关系式。实验对塑料、橡胶、玻璃、钛合金、钢、铜等材料的密度进行测试, 测量精度小于 1%。测量结果基本满足工业材料密度的精度要求。

**关键词:** CT 图像; 材料密度; CT 数

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.02.060 文章编号: 1002-8331(2010)02-0203-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391

## 1 引言

工业 CT 具有不受被检测物体的材料种类、形状结构等因素影响的优点, 能以图像的形式, 清晰、直观、准确地展示被检测物体的内部结构、物质组成以及缺陷状况, 因而 CT 技术被广泛地用于定性地测量和分析材料密度。然而实际工程应用中, 传统的定性测量已不能达到要求, 如军事上的弹药, 它的装药密度指标就要求误差控制在 1%, 所以对材料密度的定量测量进行研究就显得尤为重要<sup>[1]</sup>。

基于 CT 图像的密度测量技术在医学上的研究与应用相对比较成熟, 因为医学检测的组织相对比较稳定<sup>[2-3]</sup>。而工业检测对象材料密度高且变化范围大、结构复杂, 很难准确定量测量被检工件的密度。目前已有部分研究实现了对低密度、密度变化范围小的材料密度的定量测量, 然而对于工业实际应用材

料的要求, 仍不能满足需求<sup>[4-7]</sup>。研究出了基于最小二乘法的特定标定技术, 建立特定条件下材料密度与 CT 值之间的关系, 并提出采用空气修正被测材料 CT 值, 减小密度测量误差。实验证明该方法应用于工业领域, 实现工业材料密度的定性测量, 且达到较高的精度, 满足工业需求。

## 2 材料密度的测量原理

在物理学原理上, 单色射线穿过物体遵循指数衰减规律, 即比尔定律:

$$I=I_0e^{-\mu d} \quad (1)$$

式中,  $I$ : 表示通过物质衰减后的射线强度;  $I_0$ : 表示入射射线强度;  $\mu$ : 表示物质的线性衰减系数;  $d$ : 表示物质厚度。由 CT 原理

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60672098)。

作者简介: 王珏(1961-), 男, 教授, 主要研究方向: 检测技术与自动化装置、模式识别与智能系统、工业测控系统等; 黄苏红(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 工业用计算机断层扫描成像技术; 蔡玉芳(1978-), 女, 助理研究员, 研究方向: 工业用计算机断层扫描成像技术。

收稿日期: 2009-03-27

修回日期: 2009-05-25

表1 各标件的密度及 CT 数

名称	铜	钢	钛合金	花岗石	铝	玻璃	橡胶	塑料	有机玻璃	木材	空气
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	8.73	7.85	4.43	3.09	2.80	2.51	1.66	1.59	1.19	1.95	0
CT/Hu	9 254	8 319	2 603	675	0	-385	-1 800	-1 957	-2 658	-3 178	-4 995

可知,CT 图像反映的是断面各点物质对射线吸收系数的定量数据,即物体断面各点的线性衰减系数。

工业上基于 CT 图像的材料密度测量原理,主要是根据 CT 数与衰减系数成正比的关系<sup>[6]</sup>:

$$CT \text{ 数} = \frac{\mu_{\text{物质}} - \mu_{\text{标}}}{\mu_{\text{标}}} \times K \quad (2)$$

医用 CT 系统中用水作为参考物质,并以空气和致密骨的吸收系数分别作为上下限,K 设定为 1 000,每个 CT 单位表示 0.1%的密度变化。而工业上,由于涉及到各种各样的材料以及射线源的能量不同,K 和  $\mu_{\text{标}}$  的值需依据实际需要来设定。根据式(2),选定合适的分度因子 K 和  $\mu_{\text{标}}$  的值,将各 CT 图像中空气的 CT 数进行归一化,就可以求出被测物质的 CT 数。那么,密度定量测量的关键就在于如何寻找物质 CT 数与密度的关系,即:

$$f = \rho(CT \text{ 数}) \quad (3)$$

### 3 CT 图像的密度标定

由于工业 CT 扫描使用能量不同,扫描物体的密度、形状和尺寸差别较大,经重建后图像的 CT 数的浮动范围大。因此,在扫描的开始和结束必须用特定密度的材料来规范图像 CT 数,以便将不同时间、不同能量的同一密度的 CT 数归一化。选用一幅效果较好的密度标件 CT 图像作为标定图像,如图 2(c)所示,图中由白到黑的圆区域分别代表密度由大到小的材料。该图像中含有如表 1 所示的 10 种标件,根据公式(2),以铝(密度为 2.8 g/cm<sup>3</sup>)作为标准件,K 取 5 000,所以铝的 CT 数为 0,密度大于铝的材料 CT 数大于 0,小于铝的 CT 数小于 0。计算出各标件的 CT 数如表 1 所示。

采用最小二乘法原理对表 1 中各标件的密度与 CT 数进行多项式拟合,得到密度计算公式为:

$$\rho = p_n * CT^n + \dots + p_1 * CT + p_0 \quad (4)$$

其中  $p_n, \dots, p_1, p_0$  的为多项式系数,n 为多项式阶数。根据物质的 CT 数与密度值之间存在着近似线性关系,当  $n \geq 7$  时,如图 1 中所示,曲线严重变形。考虑计算方便及精度要求,只考虑的多项式拟合,从表 2 中可以看出采用  $n=4$  的多项式拟合时,标准差最小,精度最高,它的拟合曲线如图 1 所示。

表2  $n \leq 4$  时,各次数拟合的标准差

拟合次数	$P_4$	$P_3$	$P_2$	$P_1$	$P_0$	标准差
1	0	0	0	5.988 8×10 <sup>-4</sup>	2.8109	6.438 1×10 <sup>-3</sup>
2	0	0	3.087 1×10 <sup>-9</sup>	5.828 1×10 <sup>-4</sup>	2.760 1	3.613 1×10 <sup>-3</sup>
3	0	-9.906 6×10 <sup>-13</sup>	8.255 9×10 <sup>-9</sup>	6.145 4×10 <sup>-4</sup>	2.751 7	1.130 3×10 <sup>-3</sup>
4	-9.449 5×10 <sup>-18</sup>	-9.350 9×10 <sup>-13</sup>	8.606 5×10 <sup>-9</sup>	6.138 4×10 <sup>-4</sup>	2.750 4	1.126 8×10 <sup>-3</sup>

实验对塑料、橡胶、玻璃、钛合金、钢、铜等物质进行测量,测量不同时间、不同成像矩阵扫描的 4 幅 CT 图像,如图 2 所示。从表 3 和图 3(c)中可以看出,由于 CT 扫描时投影数据存在漂移性,各 CT 图像中相同材料的 CT 数仍存在较大的差值。所以测量时先选定一幅效果较好的 CT 图像作为标定图像。比

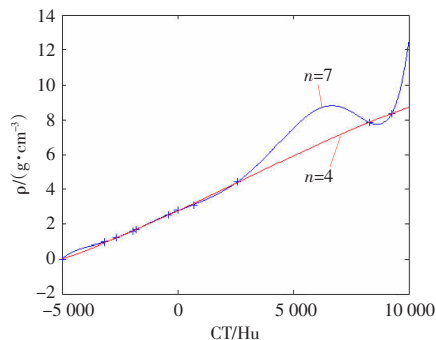
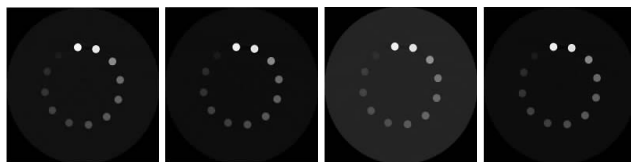


图1 标件的 CT 数与密度拟合曲线

较图 2 的 4 幅 CT 图像,(c)图的成像矩阵最大,受噪声影响最小,所以以(c)图中空气的 CT 值(-4 995 Hu)为标准,对各被测材料的 CT 值进行修正。从图 3 和表 3 中可以看出,修正后各被测材料的 CT 数与它们各自标定的 CT 数更接近。



(a)572×572 (b)1 144×1 144 (c)2 288×2 288 (d)1 144×1 144

图2 不同时间不同成像矩阵扫描的 4 幅 CT 图像

表3 修正前后各被测材料与空气的 CT 数

	被测材料	塑料	橡胶	玻璃	钛合金	钢	铜	Hu
								标准密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
图 3(a)	修正前 CT 数	-2 036	-1 868	-399	2 704	8 614	9 553	-5 014
	修正后 CT 数	-2 029	-1 861	-397	2 695	8 583	9 519	-4 995
图 3(b)	修正前 CT 数	-1 966	-1 806	-400	2 597	8 312	9 224	-4 991
	修正后 CT 数	-1 968	-1 807	-400	2 599	8 319	9 231	-4 995
图 3(c)	修正前 CT 数	-1 957	-1 800	-385	2 603	8 319	9 254	-4 995
	修正后 CT 数	-1 957	-1 800	-385	2 603	8 319	9 254	-4 995
图 3(d)	修正前 CT 数	-1 932	-1 787	-376	2 601	8 287	9 205	-5 000
	修正后 CT 数	-1 930	-1 785	-376	2 599	8 280	9 197	-4 995

### 4 实验结果及分析

实验对塑料、橡胶、玻璃、钛合金、钢、铜等材料密度进行测试,结果见表 4。实验结果证明,采用该标定技术实现了工业材料密度的定量测量,且其测量精度小于 1%。且除图像 3(a)因

表4 实验结果

	被测材料	塑料	橡胶	玻璃	钛合金	钢	铜
图 3(a)	测量密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.552	1.646	2.506	4.42	7.931	8.442
	相对误差	-0.45%	-0.17%	-0.05%	-0.12%	0.97%	0.86%
图 3(b)	测量密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.584	1.677	2.510	4.39	7.879	8.36
	相对误差	-0.07%	0.20%	0%	-0.47%	0.35%	-0.12%
图 3(c)	测量密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.582	1.677	2.507	4.38	7.856	8.343
	相对误差	-0.10%	0.20%	-0.04%	-0.6%	0.07%	-0.32%
图 3(d)	测量密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.598	1.687	2.514	4.383	7.841	8.326
	相对误差	0.10%	0.32%	0.05%	-0.56%	-0.11%	-0.53%

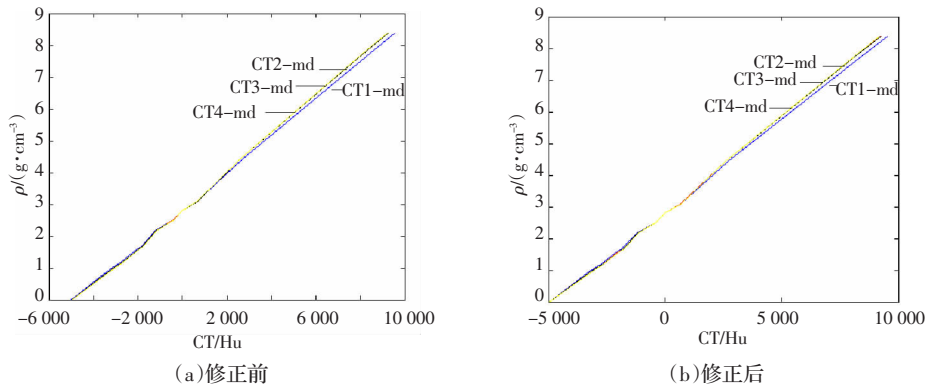


图3 各图像 CT 数与密度曲线

为像素小,受噪声影响大,其他图像中被测材料密度的测量精度小于 0.57%。

根据分析,影响该方法测量精度的主要有以下几个方面的原因:

(1)以上计算公式的前提是假设 X 射线是单能的,而实际实验中 X 射线是多色的,即 CT 图像存在射线硬化现象,采取一定硬化校正技术后仍然存在 CT 线性衰减系数测量误差。

(2)CT 数据漂移性,射线剂量波动性、射线散射、图像重建算法等因素也影响 CT 值测量,而影响密度的测量。

(3)测量所用标件的密度本身存在误差,也影响被测材料的密度测量精度。如果增加相应的高密度标件,加大密度标件的量程范围,可以实现更高密度材料的测量,并达到更好的测量效果。

## 5 结论

根据工业应用材料的密度要求,采用工业 CT 技术对高密度、密度变化范围大的材料密度进行检测,通过特定的标定技术,建立特定条件下材料密度与 CT 值之间的关系。标定后,对材料密度进行定量测量,实验结果证明:被测材料的测量精度

小于 1%,基本满足工业材料的密度精度要求。

## 参考文献:

- [1] 张方宇.我国弹药生产技术和装备发展状况及发展对策初探[J].兵工自动化,2008,27(4):1-4.
- [2] 刘景鑫,张光,孙晶,等.定量 CT 骨矿密度测量系统的研制[J].中国医疗器械杂志,2001,25(3):130-131.
- [3] 郭佑民,王建国,吴晓明,等.周围性肺栓塞螺旋 CT 强化扫描肺密度测量的研究[J].西安交通大学学报:医学版,2003,24(2):140-143.
- [4] Macedo A,Vaz C M P,Pereira J C D,et al.Wood density determination by X-and gamma-ray tomography[J].Walter de Gruyter and Co,2002,56(5):535-540.
- [5] 韩书霞,于雷,孔超,等.基于计算机断层扫描技术的木材密度检测研究[J].森林工程,2007,23(1):19-23.
- [6] 杨文海,何得昌,徐军培,等.γ 射线工业 CT 技术在高能炸药密度检测中的应用[J].火炸药学报,2001(3):33-35.
- [7] Mull R T.Mass estimates by computed tomography:Physical density from CT numbers[J].American Journal of Roentgenology,1984,143(5):1101-1104.http://dlib.edu.cnki.net
- [8] pany,2002.
- [9] Tsoumakos D.Acomparison of Peer-to-Peer search methods[C]//Proceedings of the WebDB, San Diego, CA, USA, 2002.
- [10] Castro M,Druschel P,Hu Y,et al.Exploiting network proximity in distributed hash tables[C]//Proceedings of the FuDiCo 2002, Bertinoro, Italy, 2002.
- [11] Mizrak A T,Cheng Y C.Structured superpeers:Leveraging heterogeneity to provide constant-time lookups[C]//Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Internet Applications, San Jose, California, 2003.
- [12] Yang Yong-jian, Li Shu-qiu, Han Hong-ying. Grid resource discovery model based on layered topology[J]. Computer Engineering, 2007.
- [13] Foster I, Kesselman C, Tuecke S. The anatomy of the grid: Enabling scalable virtual organizations[J]. International J Supercomputer Applications, 2001, 15(3): 200-222.
- [14] Feng Guo-Fu, Mao Ying-Chi, Lu Sang-LU, et al. PeerRank: A strategy for resource discovery in unstructured P2P systems[J]. Journal of Software, 2006.
- [15] Rudiger S. Why P2P does scale: Analysis of P2P traffic patterns[C]// Proceeding of the IEEE P2P Computing Conference, Linkoping, Sweden, 2002.

(上接 98 页)

的高度动态性和查询的高效性。提出的基于索引 P2P 分层的网格资源发现模型将索引 P2P 分层网格技术应用到网格资源发现中,较好地克服了现有 P2P 网格资源发现模型的一些确定。通过分析可以得出此模型无论在理论上还是在实际上都是可取的,并且其查询延迟时间和维护代价都相对较少。接下来,将重点研究资源查询的优化,索引存储空间优化等方面的工作。

## 参考文献:

- [1] Foster I, Kesselman C. The grid: Blueprint for a new computing infrastructure[M]. San Francisco: Morgan Kaufman, 2004.
- [2] Solomon M, Raman R, Linvy M. Resource management through multilateral matchmaking[C]// Proceedings of the 9th IEEE Symposium on High Performance Distributed Computing. Pittsburgh, Pennsylvania: [s.n.], 2000.
- [3] Czajkowski K, Fitzgerald S, Foster I, et al. Grid information services for distributed resource sharing[C]// Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on High-performance Distributed Computing. [S.l.]: IEEE Press, 2002.
- [4] Milojicic D S. Peer-to-Peer computing[M]. [S.l.]: Hewlettpackard Com-