

潘光勇, 张敏霞, 鲍熠朗, 等. 工业 CT 在电磁线圈缺陷检测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2019, 28(2): 205-212. doi:10.15953/j.1004-4140.2019.28.02.06.
PAN G Y, ZHANG M X, BAO Y L, et al. Application of industrial computerized tomography in testing of fault magnetic coil[J]. CT Theory and Applications, 2019, 28(2): 205-212. doi:10.15953/j.1004-4140.2019.28.02.06. (in Chinese).

工业 CT 在电磁线圈缺陷检测中的应用

潘光勇[✉], 张敏霞, 鲍熠朗, 张杭滨

(浙江三花智能控制股份有限公司计量测试中心, 浙江 新昌 312500)

摘要: 通过工业 CT (ICT) 对电磁线圈进行内部结构分析, 可以避免电磁线圈解剖的困难。ICT 能有效地检测出电磁线圈中的漆包线断开、零部件安装不到位、漆包线熔断、绕组变形、包封层中气孔、多余杂线以及金属杂质等缺陷, 并且能够精确地确定出缺陷的位置和几何形状。工业 CT 分析对提高电磁线圈产品的质量, 改进生产工艺有指导意义。

关键词: 工业 CT; 电磁线圈; 检测

doi:10.15953/j.1004-4140.2019.28.02.06 中图分类号: TP 391 文献标志码: A

电磁线圈作为电磁阀、电子膨胀阀、四通阀等产品的核心驱动部件, 其作用在我们日常生活和工作中随处可见, 其质量优劣对产品的性能和寿命均具有很大影响。电磁线圈缺陷分析在保证产品质量和工艺改进中起着至关重要的作用。电磁线圈表面往往都有绝缘层保护, 在对电磁线圈进行缺陷原因分析时存在的困难是: ① 缺陷部位难于检测, ② 缺陷原因难于确定。目前最常用的就是传统的物理“开帽”技术以及随后利用光学显微镜进行剖面检查^[1]。该方法非常耗时且容易出现解剖失败。因此, 无损检测手段是电磁线圈缺陷分析的重要研究方向。

工业 CT (industrial CT, ICT) 是工业用计算机断层成像技术的简称, 它能在对检测物体无损伤条件下, 以二维断层图像或三维立体图像的形式, 清晰、准确和直观地展示被检测物体的内部结构、组成、材质及缺损状况。被誉为当今最佳无损检测和无损评估技术。ICT 的上述特点, 使其成为电磁线圈缺陷无损、准确、高效和全方位检测行之有效的手段之一, 对电磁线圈可靠性的提升具有重要作用。ICT 检测技术已广泛应用于航空、航天、汽车、材料、国防军工等领域, 应用范围涵盖缺陷检测、材料密度表征、尺寸测量、装配结构分析等^[2-15]。目前有关采用 ICT 分析线圈缺陷的研究还很少报道^[16-17]。

本文采用 ICT 技术对部分电磁线圈进行检测实验, 通过分析 CT 检测的效果, 评估电磁线圈进行 CT 检测的可行性; 并讨论 CT 技术在电磁线圈缺陷分析的注意事项。如果将 ICT 技术和制造工艺相结合, 能够及时发现缺陷, 有利于及时改进生产工艺, 提高产品质量。

1 实验部分

1.1 实验样品

本次研究中, 主要选取由绝缘材料包封的电磁线圈进行检测。选取的电磁线圈包含电

磁阀线圈、电子膨胀阀线圈和四通阀线圈，共计 12 件样品。

1.2 实验设备

采用的设备为德国生产的 225 kV 工业 CT 系统。实验时采用三维锥束扫描 (CT) 模式。

1.3 工艺参数选择

1.3.1 管电压

管电压必须保证能穿透所观察区域最厚的部位。若管电压过低，射线能量不够，没有完全穿透工件。这种情况虽然也可以得到 CT 图像，但图像质量很差，边界模糊，不利于后续图像观察和处理，严重时甚至会出现严重穿不透伪像。另外，射线能量选取过高，不利于低密度小细节特征的检测，容易造成漏检。对于单一材料或密度差异较大的材料组成的被测物，在保证穿透被测物的前提下宜选用偏高的射线能量，以提高信噪比；对于密度差异小的材料组成的被测物，在保证穿透被测物的前提下宜选择偏低的射线能量，以提高对比度。本文样件检测时采用的管电压是 220 kV。

1.3.2 管电流

管电流的增加可以提高射线的强度，也就是增加了射线到达探测器的光子数量，提高检测图像对比度。缺陷尺寸测量精度越高，检测图像质量越好^[18]。但通常探测器有接受功率限制，即管电流的增加范围是有限制的。为了提高图像质量，可以适当增加管电流，但必须保证探测器使用的安全性。

1.3.3 扫描视场直径

为了提高图像视觉效果，被测物的图像在扫描视场的面积越大越好，同时也意味着被测物与射线管越近，被测物位置摆放的难度也越大，花费时间也越多。在扫描过程中，既要保证被测物的图像始终在扫描视场，又要确保被测物和夹具不会碰到设备。选择扫描视场直径时，被测物在图像中约占视场的 2/3。

1.3.4 图像矩阵

图像矩阵越大，CT 图像对细节的表现越好，但相应的重建时间变长，图像数据量增大。在兼顾精度和效率的情况下，本文样件检测时图像矩阵使用 1024×1024 。

1.3.5 积分时间

增加积分时间可以增加射线到达探测器的光子数量，提高信噪比，从而提高图像质量，但扫描时间也会相应延长。另外在射线强度严重不足时，仅增加积分时间会导致噪声的增加。因此积分时间的确定要综合考虑探测器响应参数、射线强度等因素^[19]。探测器受接受功率限制，故限制积分时间的增加范围。所以为了提高图像质量，可以适当增加积分时间，但必须保证探测器使用的安全性。

1.3.6 滤波片

加滤波片可以将射线束中的低能射线先过滤掉一部分使射线有效能量提高（射线预硬化）以减弱射束硬化现象。然而加滤波片也会使射线强度减弱。需要增加积分时间，扫描时间也会相应增加。本文样件检测时选用 1.0 mm 铜滤波片和 0.5 mm 铝滤波片各一张。

1.3.7 扫描投影张数

扫描投影张数越多，CT 图像对细节的表现越好，但相应的扫描时间变长，图像数据量增大，后续处理困难。本文样件检测时扫描投影张数为 1 440 张。

综上所述，本文中电磁线圈样件的 ICT 扫描参数设置如表 1 所示。另外，扫描视场直径根据被测物的形状大小进行调整，使被测物在图像中约占视场的 2/3。

表 1 工业 CT 扫描参数设置
Table 1 Scanning parameters setting of ICT

管电压/kV	管电流/mA	图像矩阵	积分时间/ms	投影数目/张	滤波片
220	0.20	1 024 × 1 024	800	1 440	1.0 mm Cu 0.5 mm Al

2 实验结果与分析

2.1 漆包线断开

漆包线断开是电磁线圈的主要缺陷。结合电磁线圈的生产工艺，漆包线断开是由漆包线线头没有正确放入骨架线槽内或注塑压力过大等原因造成的。该缺陷会导致电磁线圈断路。漆包线断开缺陷的检测结果如图 1 所示。

从图 1 (a) 和图 1 (b) 可看出，在 CT 的三维视图中可以清楚观察到漆包线已经断开。

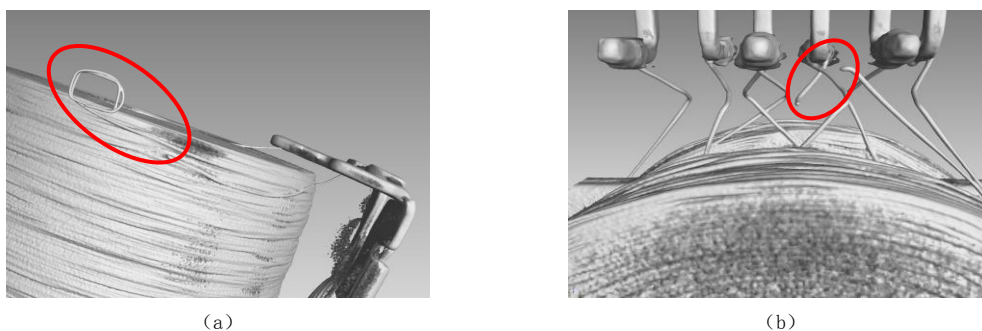


图 1 漆包线断开
Fig.1 Breakage of enamelled wire

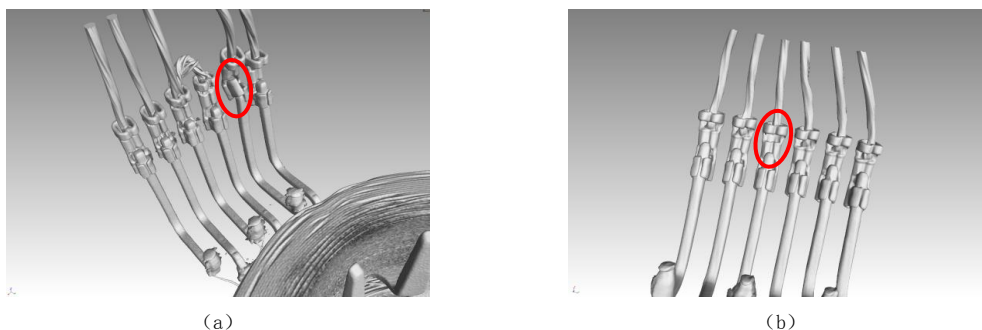


图 2 零部件安装不到位
Fig.2 Inadequate installation of components

2.2 零部件安装不到位

零部件安装不到位是电磁线圈的又一主要缺陷。结合电磁线圈的生产工艺，零部件安装不到位是受工人培训没到位，工人没有严格按照工序要求操作，工作夹具磨损或不适合等原因造成的。该缺陷可能会导致接触不良，造成电磁线圈断路。零部件安装不到位的 CT 检测结果如图 2 所示。

从图 2(a) 可以看出，在 CT 的三维视图中清楚地观察到注塑件端子与插针安装不到位。从图 2(b) 可以看出，引线与端子安装不到位。

2.3 漆包线熔断

电磁线圈中的漆包线熔断产生的原因主要有漆包线本身存在漆膜损伤导致短路、使用电压超过额定电压范围等。漆包线熔断的 CT 检测结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出，电磁线圈绕组上有漆包线熔化产生的熔珠。

2.4 绕组变形

绕组变形又是电磁线圈的主要缺陷。结合电磁线圈的生产工艺，绕组变形是由注塑包封层前绕组受外力变形，注塑压力过大，注塑模具结构设计不合理等原因造成的。该缺陷可能会出现漆包线绝缘层损伤或漆包线机械强度降低甚至漆包线断开，导致电磁线圈断路或短路。绕组变形缺陷的 CT 检测结果如图 4 所示。

从图 4(a) 和图 4(b) 可看出，在 CT 的三维视图中清楚地观察到电磁线圈绕组发生了明显的变形。

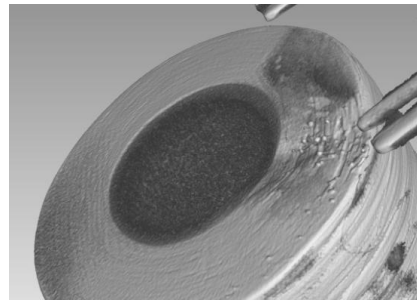
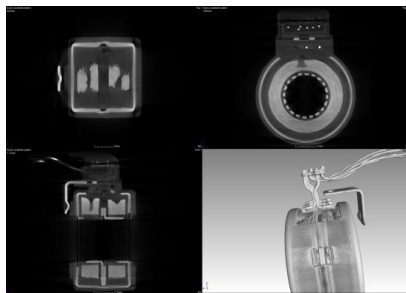
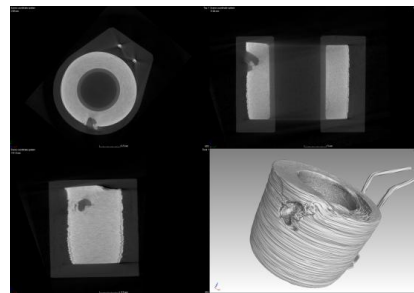


图 3 漆包线熔断

Fig.3 Fusing of enamelled wire



(a)



(b)

图 4 漆包线变形

Fig.4 Winding deformation

2.5 包封层气孔

包封层气孔是电磁线圈的主要缺陷。结合电磁线圈的生产工艺，气孔是由原材料没有预热而导致的原材料中水分、挥发物含量大以及固化过程中夹杂的空气和未排出的挥发组

分等原因造成的。该缺陷可能会导致电磁线圈绝缘性能下降，出现电气绝缘不良。电磁线圈的包封层气孔缺陷的 CT 检测结果如图 5 所示。

从图 5 (a) 和图 5 (b) 可以看出，包封层存在气孔缺陷，其轮廓光滑有明显的边界，影像灰度较大且无明显变化。

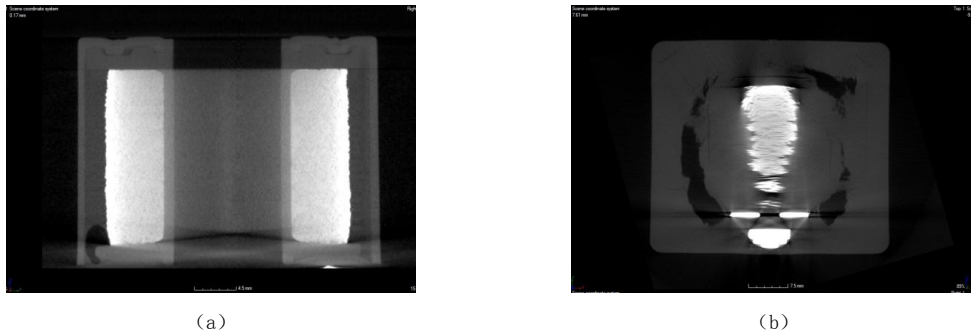


图 5 包封层气孔

Fig.5 porosity in the envelope

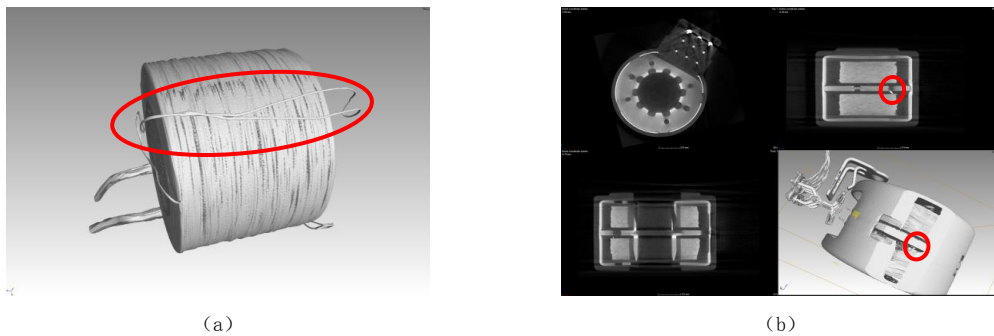


图 6 多余杂线或金属杂质

Fig.6 Excess wire or metal impurities

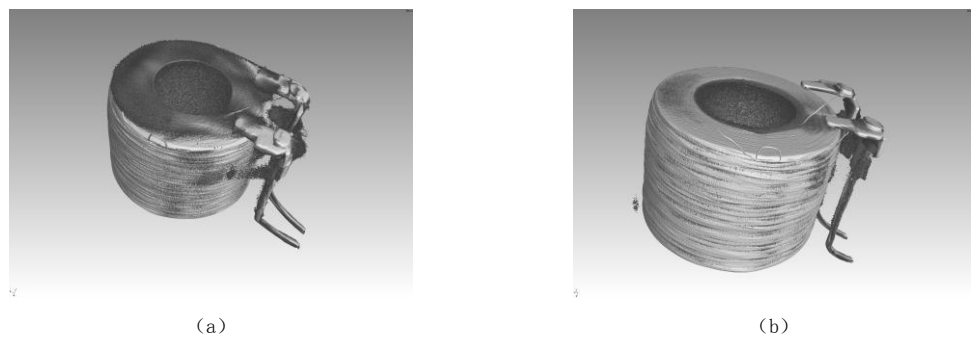


图 7 同一线圈两种不同的装夹位置

Fig.7 Two different clamping positions for the same coil

2.6 多余杂线或金属杂质

电磁线圈中的多余杂线或金属杂质缺陷产生的原因主要是原材料漆包线或导磁体自带

的杂质, 操作现场不干净以及周转箱不干净等。该缺陷可能会导致电磁线圈绝缘性能下降, 出现电气绝缘不良。电磁线圈的多余杂线或金属杂质缺陷的 CT 检测结果如图 6 所示。

图 6 (a) 中电磁线圈的绕组旁边明显多了一条不该有的漆包线。图 6 (b) 中电磁线圈内有金属杂质。

3 电磁线圈检测的注意事项

(1) 电磁线圈 CT 扫描时装夹位置至关重要, 合适的装夹位置有助于减少伪像, 如图 7 所示。电磁线圈装夹时通过调整样件的摆放方向和倾斜角度来减少甚至避开绕组和插针等部件在扫描过程对需重点观察部位(如漆包线)的影响。

(2) ICT 扫描较适合检测体积型缺陷, 对于线状缺陷不敏感, 可能会漏检(如漆包线有细裂纹, 一般分辨不出)。

(3) 受到现有 X 射线源能量限制, 目前 ICT 的穿透能力受限制。故在电磁线圈扫描前, 需评估 ICT 的射线能否穿透需扫描样品。

(4) ICT 扫描前最好是将样品上可能影响扫描的其他部件去除。

4 结论

利用 ICT 对电磁线圈缺陷进行了检测分析。ICT 对线圈中的漆包线断开、零部件安装不到位、漆包线熔断、绕组变形、包封层中气孔、多余杂线或金属杂质等有较高的检测灵敏度, 并能够准确地确定出缺陷的位置和几何形状。将 ICT 技术与线圈的制作工艺相结合, 能够及时发现电磁线圈制品中的缺陷, 从而改进线圈的生产工艺, 提高产品质量。

参考文献

- [1] 孙博, 郭伟, 陈颖, 等. 自整角机灌封线圈的失效定位和分析[J]. 微电机, 2007(9): 93-97.
SUN B, GUO W, CHEN Y, et al. Failure isolation and analysis technique for polymer-filled device[J]. Micromotors, 2007(9): 93-97. (in Chinese).
- [2] 徐留根, 彭春增, 全建龙, 等. 工业 CT 在航空机载传感器可靠性提升中的应用[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(10): 158-160.
XU L G, PENG C Z, QUAN J L, et al. Applications of industrial CT in reliability improvement of airborne sensors[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(10): 158-160. (in Chinese).
- [3] 张祥春, 周言贤, 刘安, 等. 航空发动机涡轮叶片的三维 CT 检测[J]. 无损检测, 2017, 39(8): 34-36, 40.
ZHANG X C, ZHOU Y X, LIU A, et al. The three-dimensional CT detection of aero-engine turbine blade[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(8): 34-36, 40. (in Chinese).
- [4] 倪培君, 李旭东, 梁晓明, 等. 工业 CT 技术在卫星产品检测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2000, 9(S1): 119-123.
NI P J, LI S D, LIANG X M, et al. Industrial computed tomography for inspection of satellite products[J]. CT Theory and Applications, 2000, 9(s1): 119-123. (in Chinese).
- [5] 路浩天, 卢晓青, 张祥春, 等. X 射线三维 CT 技术在元器件失效分析中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2012, 21(3): 433-441.
LU H T, LU X Q, ZHANG X C, et al. Application of X-ray 3D CT technology on electrocomponent failure analysis[J]. CT Theory and Applications, 2012, 21(3): 433-441. (in Chinese).
- [6] 朱延霆, 梁丽红, 张亚军, 等. 碳纤维复合材料气瓶的 CT 检测实验研究[J]. CT 理论与应用研究,

- 2013, 22(4): 651-658.
- ZHU Y T, LIANG L H, ZHANG Y J, et al. Study on CT testing for carbon fiber composite cylinders[J]. *CT Theory and Applications*, 2013, 22(4): 651-658. (in Chinese).
- [7] 刘金汇. 箱包 CT 检测系统弱信号情况下的 CT 成像实验研究[J]. *CT 理论与应用研究*, 2014, 23(6): 931-938.
- LIU J H. Experimental study of CT imaging under weak signal for luggage CT inspection system[J]. *CT Theory and Applications*, 2014, 23(6): 931-938. (in Chinese).
- [8] 杨少丹, 张彦敏, 宋宇, 等. 工业 CT 在材料失效分析中的应用与展望[J]. *材料研究与应用*, 2016, 10(3): 155-158.
- YANG S D, ZHANG Y M, SONG Y, et al. Application and prospect of industrial computerized tomography (ICT) in material failure analysis[J]. *Materials Research and Application*, 2016, 10(3): 155-158. (in Chinese).
- [9] 赵付宝, 王从科, 张霞, 等. 工业 CT 在树脂基复合材料缺陷检测中的应用[J]. *工程塑料应用*, 2013, 41(11): 96-98.
- ZHAO F B, WANG C K, ZHANG X, et al. Application of industrial computed tomography on testing defects in resin matrix composites[J]. *Engineering Plastics Applications*, 2013, 41(11): 96-98. (in Chinese).
- [10] 曹玉玲, 孙玲霞. 工业 CT 在复合材料孔隙率分析中的应用[J]. *CT 理论与应用研究*, 2001(4): 14-17.
- CAO Y L, SUN L X. Applications of industry CT in porosity analysis of composite materials[J]. *CT Theory and Applications*, 2001(4): 14-17. (in Chinese).
- [11] 曹玉玲, 熊艳才. 工业 CT 在复杂铝合金精铸件检测中的应用[J]. *无损检测*, 2002, 24(8): 357-359.
- CAO Y L, XIONG Y C. Application of industrial computed tomography to testing complicated castings[J]. *Nondestructive Testing*, 2002, 24(8): 357-359. (in Chinese).
- [12] 田少军. 工业 CT 在铸件无损检测中的应用[J]. *现代工业经济和信息化*, 2017, 7(22): 27-28.
- TIAN S J. Application of industrial CT in non-destructive testing of castings[J]. *Modern Industrial Economy and Informationization*, 2017, 7(22): 27-28. (in Chinese).
- [13] 周京, 徐滨士, 王海斗, 等. 工业 CT 技术应用介绍及其在再制造中的展望[J]. *材料导报*, 2013, 27(S1): 101-103.
- ZHOU J, XU B S, WANG H D, et al. Introduction of industrial computed tomography technology and its application in remanufacturing[J]. *Materials Review*, 2013, 27(S1): 101-103. (in Chinese).
- [14] 李正利, 冯云国, 刘文, 等. 电力设备材料工业 CT 无损检测系统研究[J]. *山东电力技术*, 2017, 44(7): 39-42.
- LI Z L, FENG Y G, LIU W, et al. Research on nondestructive testing system of industrial CT in power equipment material[J]. *Shandong Electric Power*, 2017, 44(7): 39-42. (in Chinese).
- [15] 蒋绍青, 栾传彬, 满月娥, 等. 工业 CT 在大型复杂机匣检测中的应用[J]. *无损检测*, 2017, 39(2): 18-21.
- JIANG S Q, LUAN C B, MAN Y E, et al. Application of industry CT in large complicated casing inspection[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(2): 18-21. (in Chinese).
- [16] 杨宝刚, 李建伟, 任华友, 等. 导线线圈的射线层析检测[J]. *CT 理论与应用研究*, 2005, 14(1): 33-36.
- YANG B G, LI J W, REN H Y, et al. X-ray computed tomography on conducting windings[J]. *CT Theory and Applications*, 2005, 14(1): 33-36. (in Chinese).
- [17] 郑欣, 吴章勤, 刘荣海. 工业 CT 在电气设备检测中的应用[J]. *云南电力技术*, 2016, 44(3): 65-66, 71. doi:10.3969/j.issn.1006-7345.2016.03.017.
- ZHENG X, WU Z Q, LIU R H. Research and application of Industry CT in inspection of electric device[J]. *Yunnan Electric Power*, 2016, 44(3): 65-66, 71. doi:10.3969/j.issn.1006-7345.2016.03.017. (in Chinese).
- [18] 董方旭, 王从科, 赵付宝, 等. 工业 CT 检测工艺参数对复合材料检测图像质量的影响[J]. *无损检测*, 2017, 39(12): 15-19.
- DONG F X, WANG C K, ZHAO F B, et al. Effect of detection process parameters of ICT to the detection image quality of composite material[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(12): 15-19. (in Chinese).
- [19] 张维国, 倪培君, 王晓艳, 等. 工业 CT 检测中主要工艺参数定量取值方法[J]. *无损检测*, 2017,

39(12): 7-9, 14.

ZHANG W G, NI P J, WANG X Y, et al. Quantitative method of main process parameters in industrial CT detection[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(12): 7-9, 14. (in Chinese).

Application of Industrial Computerized Tomography in Testing of Fault Magnetic Coil

PAN Guangyong[✉], ZHANG Minxia, BAO Yilang, ZHANG Hangbin
(Zhejiang Sanhua Intelligent Controls Co.,Ltd., Xinchang 312500, China)

Abstract: The internal structure analysis of the magnetic coil was using industrial CT to avoid the difficulty of disassemble magnetic coil during failure analysis. The computed tomography (CT) imaging characteristics for internal defects of resin matrix composite products were studied and analyzed. The results show that industrial CT is able to effectively detect various defects of the fault magnetic coil such defects as breakage of enameled wire, inadequate installation of components, fusing of enameled wire, winding deformation, porosity in the envelope, excess wire or metal impurities, et al. industrial CT can accurately determine the location and geometry of the defects. The analysis of Industrial CT application has guidance significance for improving the quality of magnetic coil and production technology.

Keywords: industrial CT; magnetic coil; testing



作者简介: 潘光勇[✉] (1985—), 男, 2008 年获得中南大学学士学位, 现任职于浙江三花智能控制股份有限公司助理工程师, 主要从事理化检测和无损检测方面的研究工作, E-mail: pangy@zjshc.com。