

(12) 67-70
一类 γ 射线工业 CT 系统设计的研究

Research one kind of γ -Ray ICT System Design

杨学恒
Yang xueheng

(重庆大学粒子物理研究所, 重庆, 630044)

苏显素
Su Xiansu

(无线电系)

赵炬
Zhao Ju

(粒子物理研究所)

摘 要 研究了由透射成象的 γ 射线工业 CT 的设计原理以及数据采集传输、计算机、自动控制、机械扫视和图象重建等子系统的协调、参数分配和数据校正。

关键词 γ 射线工业 CT; 系统设计; 参数分配; 数据校正

中国图书资料分类法分类号 TL99

ABSTRACT The principles of transmission imaging γ -ray industrial computer tomography (ICT) design have in this paper been discussed. The discussion also includes the issues of data acquisition system, automation control, mechanical scanning, image reconstruction, parametric distribution and data correction.

KEYWORDS γ -ray ICT; system design; parametric distribution; data correction

0 引 言

工业 CT (Industrial Computer Tomography) 是集核技术、光、机、电为一体的高新技术, 主要用于无损检测^[1~5], 80年代后期在美国、俄罗斯和德国逐渐形成产业。自1988年起我国开始研制 γ 射线工业 CT, 1993年5月18日, 我国首台 γ 射线工业 CT-XN1300商业机在重庆大学研制成功。在1980~1993年间, 有关 ICT 的论文国内外已经发表了300多篇, 但是涉及 γ 射线工业 CT 的设计依据和主参数的研究等方面的论文甚少, 而且比较简略。因此, 本文研究了由透射成象的 γ 射线工业 CT 的设计原理, 各子系统的规范, 参数分配, 系统间的协调, 数据校正和结果分析。

1 γ 射线工业 CT 主参数设计依据

工业 CT 常用 X 射线、 γ 射线、正电子、中子、同步辐射以及来自加速器的电子束作源。本文着重研究用 γ 射线作源的工业 CT。

γ 射线与物质的相互作用总截面 $\delta = \delta_{\mu} + \delta_e + \delta_n$

* 收文日期 1994-01-25
国家八五火炬计划项目

其中 δ_{μ} 为光电效应截面, δ_e 是电子对产生截面, 而 δ_c 系电子光子 Compton 散射截面, 它们分别为

$$\delta_{\mu} = AZ^5 F(E_r), A = \text{const}$$

$$\delta_e = Z^2 \Phi(E_r),$$

$$d\delta_c/dE_r = \frac{\pi r_0^2 E_{\infty}}{(E_r - E_s)^2} \left[\frac{(E_{\infty} E_s)^2}{E_r^4} + \frac{2(E_r - E_s)^2}{E_r^2} + \frac{(E_r - E_s)(E_r^2 - 2E_s E_{\infty})}{E_r^3} \right]$$

这里, Z 为原子序数; E_r 系入射光子的能量; 而 r_0 、 E_s 、 E_{∞} 分别为电子的经典半径、动能和静能量。射线穿过物质的透射强度 $I = I_0 e^{-\int \mu dx}$

此地 I_0 为光子的入射强度, x 为透射距离, 减弱系数 $\mu = \delta \cdot n_0 = \mu(E_r, \rho(x))$ 。

式中 n_0 、 $\rho(x)$ 即为电子密度与物质密度。利用透射强度与减弱系数的关联可对物体进行无损检测。

将物体的某个断面记为 S_k , 并将每个断面划分为间隔相等的 m 行、 n 列, 记位于第 i 行 j 列的减弱系数为 μ_{ij} , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$, $k = 1, 2, \dots, K$,

$$\text{于是 } I_k = I_0 \exp\left(-\sum_{j=1}^n \mu_{ij} a_j\right), \quad a_j = \text{const} \quad P = L/a_j$$

式中 a_j 为格距, L 系样条长度, k 是断面序号, 而 K 为断层数。在 CT 中 I_k 称为“投影”, 应有 $m \times n$ 个。CT 原理: ① 测出 $m \times n$ 个“投影” I_k , ② 由“投影”计算出减弱系数 μ_{ij} , ③ 将 $m \times n$ 个 μ 值用灰阶标绘, ④ 令 μ_{ij} 与象素一一对应, ⑤ 用几何卡与密度卡进行定标。

令 Δx 与 $\Delta \mu$ 为某 CT 的最小可分辨量, 则

$$\eta_r = \Delta x/D, \quad \eta_0 = \Delta \mu/\mu$$

分别为其空间分辨率与密度分辨率, 这里 D 为工件的直径。

γ 射线工业 CT 的前准直孔一般为扇形孔, 其高度决定断层厚度。被测工件的最大尺寸与可容纳的探测器数取决于扇形孔的张角和源至探测器阵列架的间距。后准直孔或晶体(在无后准直孔时)的宽度 b_0 与其空间极限分辨本领密切相关, 按照母指规则其极限分辨量为 $b_0/4$ 。

在 γ 射线工业 CT 中为了获得足够的“投影”, 通常令工件自转, 并用圆光栅予以分度。如果探测器不多, 则其阵列架须作插值运动。

由于累积计数—“投影”的涨落为 $\sqrt{I_k}$, 因此其测量精度为 $1/\sqrt{I_k}$, 如要达到极限精度, 则应满足:

$$f_1(b_0) \geq f_2(m, n) \geq f_3(I_k)$$

足够深的前、后准直孔能够压低散射和背影。令其强度为 I_{sb} , 压低因子为 2^{-r} , r 是待定参数, 它应满足如下条件:

$$I_{sb} \cdot 2^{-r} < f_1(I_k)$$

根据卫生与防护条例, 源塔的厚度应达到二级包装水平。

2 γ 射线工业 CT 的主参数设计举例

美国 I. L. Morgan 曾报导了他的第 4、5 代 ICT, 其中用了 3 个放射源, 257 个探测器, 可在 10 ms 内测完一个断面, 但是至今未能投入应用。在 I. L. Morgan 的第 3 代 ICT 中用了一个 1.85

TBq 的放射源, 64个探测器, 测量一个 512×512 阵列的断面, 历时15 min, 较为实用。下面作者给出一个用于离线测量的 γ 射线 ICT 商业机的主参数设计。

2.1 用户要求(离线精密测量)

2.1.1 测量对象: 工件直径: $\varphi \leq 200 \text{ mm}$; 长度: $L \leq 16 \text{ m}$; 重量: $W \leq 500 \text{ kg}$; 密度范围: $\rho = 1 \sim 12 \text{ g/cm}^3$ 。

2.1.2 技术指标 动态范围: $1 \sim 8$; 密度分辨率: $1/128$; 空间分辨率: 2% ; 空间最小可分辨量: 0.5 mm ; 空间最小可显示量: 低密度材料中的金属针 $\varphi = 0.1 \text{ mm}$; 高密度材料中的裂纹: $0.02 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 测量一个断面的时间 $T \sim 20 \text{ min}$ 。

2.2 实施措施

2.2.1 图象规模 像素: $256 \times 256, 512 \times 512$; 插值数: 2, 4; 分度数: 256, 512; 探测器数: 64×2 。

2.2.2 精度 相对精度: 2% ; 密度分辨率: $1/128$ 。

2.2.3 源强 $1.85 \text{ TBq}^{137}\text{Cs} \times 2$, 活性区: $\varnothing 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

2.2.4 计数率 准直孔或闪烁体的截面积: $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$; 源至闪烁体的间距 $R = 300 \text{ mm}$; 效率: 70% ; 源利用系数: $\xi = 1$; 计数率: $n = 4.58 \times 10^6/\text{s}$ 。

2.2.5 准直孔 前孔(高 2 mm , 深 30 mm , 扇形角 $\alpha = 10^\circ + 45^\circ + 45^\circ + 10^\circ = 110^\circ \times 2$; 材料: 铜钨合金; 后孔(高 2 mm , 宽 2 mm , 深 50 mm) $\times 2$, 材料: 铜钨合金。

2.2.6 测量一个断面的时间 $2 \sim 16 \text{ min}$ 。

2.2.7 控制精度 定时精度: 10^{-8} ; 定位精度: $1/32$, (用时 $9/10$)。

2.2.8 准直孔加工线精度 不低于 $10 \mu\text{m}$, 截面积精度 $\leq 1\%$ 。

2.2.9 探测器阵列架的圆心位置在源的圆与 $\varphi = 200 \text{ mm}$ 的圆的公切线的交点上。

2.2.10 采传系统的参数 探测器: 闪烁体 — 塑料闪烁体, 光电倍增管: 即 R647 或 GDB15; 误码率为 10^{-6} ; 死时间 $\leq 8 \text{ ns}$; 反射 $\leq 26 \text{ dB}$; 信噪比优于 40 dB ; 脉冲工作频率: 100 MHz ; 放大倍率的稳定性: 8 小时内不超过 1% ; 放大倍率随频率的变化为 $0 \sim 100 \text{ MHz}$, $\Delta\beta/\beta \leq 2\%$; 放大倍率的温度系数为 $0.5\%/^\circ\text{C}$; 探测器的温控指标为 $\pm 0.3^\circ\text{C}/24 \text{ h}$; 电网: 隔离、滤波、净化; 采传系统的一致性: $\Delta\eta/\bar{\eta} \leq 5\%$ 。

3 误差分配与各子系统间的协调

累积计数 $I_M = \eta j_i S_w \Delta t$

式中 $j_i, S_w, \Delta t, \eta$ 分别为进入闪烁体中的入射光子流强、准直孔或闪烁体的截面积、测量时间和探测效率, 其误差

$$dI_M = \eta S_w \Delta t dj_i + \eta j_i S_w d\Delta t + \eta j_i \Delta t dS_w + j_i S_w \Delta t d\eta$$

由于

$$dj_i/j_i = f_s(dg/n, dR/R)$$

这里 dg 为源强的统计涨落, dR 来自机械扫视系统共面与同心度的公差, $d\Delta t$ 系定时误差。准直孔截面积的加工精度: $2db_0/b_0$, $d\eta$ 是探测效率的偏差, 它包括采传系统的堆积与不一致, 放大器放大倍率的漂移和温度效应等等。其中 $2db_0/b_0$ 与采传系统的堆积和不一致属固定因素可用软件予以校正, 但是为了提高测量精度, 仍应对此规定指标: $2db_0/b_0 \leq 1\%$; 采传系统的不一致性 $\Delta\eta/\bar{\eta} \leq 5\%$ 。“堆积”由死时间校正克服。如要求

$$1/\sqrt{I_M} \leq 2\%$$

则应做到

$$2dR/R \leq 0.1\%, d\Delta t/\Delta t \leq 0.1\%$$

在工业 CT 中,因为工件自转,因此对定时与定位精度都作要求,通常用闭环控制定位,其精度不低于 1/32,开环给出测量时间,为分清楚样条和减少定时误差,定时精度: 10^{-8} , 采样时间一般取为 ξT , $\xi < 1$, T 为运行一个分度的时间。

4 结 语

从工件穿透出来的 Compton 散射光子也能被探测器接收,并且造成伪影,在文献*中论述了散射修正。

如用多色源,则 $E_i: \{E_n\}, i = 1, 2, \dots$

由于此时 $I_{\mu} = \sum_i I_{\mu i} e^{-\int_0^{\tau} \mu(E_i, x) dx}$

也即在同一地点有几个 μ , 而 CT 原理限定像素与 μ 值必须一一对应,因此在图象重建之前应作能谱硬化修正,在文献**中给出了修正模式。

此外有关死时间校正,采传系统的一致性校正和减少扫视中的镜像对称点的论述一起包含在文献**中。

γ 射线工业 CT 的采传系统另文专论。

如用 γ 射线工业 CT 作定量检测,应对所测数据作详尽分析,同时应与核数据库中有关 μ 值作仔细对照。

工业 CT 主参数设计,误差分析,数据校正,各子系统间的协调以及指标的分配难度极大,在上述方面我们作了一些研究,希望这一系列论文的发表,能对工业 CT 的发展起到一定作用。

在完成本工作时作者与重庆大学 ICT 研究所的有关同志作了讨论,罗美依女士为我们作了详尽的文献检索,在此谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 Kanamori T, Kotani K and Ojaki N. Application of Gamma Ray Computed Tomography to Non-Destructive Testing. Nuclear Engineering and Design 1986, 94: 421~426
- 2 Gilboy W B. x-and γ -Ray Tomography in NDE Applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 1984, 221: 193~220
- 3 Reimers P, Goebbels J, Weise H-P and Wilding K. Some Aspects of Industrial Non-Destructive Evaluation by x- and γ -Ray Computed Tomography. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1984, 221: 201~206
- 4 Gentle D J, Spyrou N M, Dhani A, Hutchinson I G and Huddleston J. Scattering and Attenuation Correction in Emission Tomography in the Nuclear Industry. Appl. Radiat. Isot. 1990, 41(10, 11): 975~979
- 5 Duvachelle P, Girier P and Peix G. Development of High Resolution Focusing Collimators Intended for Nondestructive Testing by the Compton Scattering Tomography Technique. Appl. Radiat. Isot. 1990, 41(2): 199~205

* 杨学恒, 苏显豪, 赵炬. 在 γ 射线工业 CT 中的散射修正. 核技术, 待发表.

** 杨学恒, 苏显豪, 赵炬. 在 γ 射线工业 CT 中的若干校正. 无损检测. 待发表.