基于 CDD 函数的 ICT 系统设计技术

魏东波 傅 健 李 冰 张 磊

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083)

摘 要：工业计算机层析成像(ICT，Industrial Computed Tomography)是一种先进的非接触式无损检测技术，具有复杂精密、非通用和高成本的特点，需要根据用户的具体检测需求进行定制开发，以降低系统研发风险和成本. 为此，提出并研究了一种基于对比度-细节-剂量(CDD，Contrast-Detail-Dose)函数的 ICT 系统设计技术框架. 据此，推导了扇束三代二维 ICT 系统基于 CDD 函数的设计平台，并完成了软件开发. 该项技术包括基于 CDD 函数的计算机辅助设计(CAD，Computer Aided Design)模块、扇束三代二维 ICT 成像数字仿真模块和 CT 图像性能评定模块 3 部分. 其输入参数是表征用户检测需求的初始设计参数，输出参数是满足用户检测需求的最优解. 初始设计参数首先进入 CAD 模块完成性能考核；如果满足要求，再进入仿真模块完成仿真考核；最后，对仿真结果进行量化评定，得到设计参数对应的系统性能指标. 计算机仿真和工程系统开发结果验证了该设计技术的有效性.

关 键 词：工业 CT；系统设计；对比度-细节-剂量函数；仿真；性能评定

中图分类号：TP 391

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)02-0214-05

Design technique based on CDD function for industrial CT system

Wei Dongbo Fu Jian Li Bing Zhang Lei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Industrial computed tomography(ICT) is an advanced, non-contact and non-destructive testing method. It is complicated, non-universal and expensive. It is necessary to make the custom development to reduce the risk and the cost. A kind of design technique frame based on the contrast-detail-dose(CDD) function was proposed for the development of ICT system. According to this frame, the design method for fan-beam 3rd generation two dimensional ICT(2D-ICT) was deduced and the corresponding software platform was implemented which is consisted of three parts. They are the computer aided design(CAD) part based on the CDD function, the simulation part and the performance evaluation part. The initial design parameters firstly entered the CAD part. They secondly entered the simulation part if they passed the CAD check. The simulation results were finally evaluated by the evaluation part. The validity of the proposed method was proved by the computer simulation and the example of the engineering development.

Key words: industrial computed tomography; system design; contrast-detail-dose function; simulation; performance evaluation

工业 CT(ICT，Industrial Computed Tomography)是一种能无损再现被检对象内外部结构及其介质三维形态的技术，已在航空、航天、微电子等领域得到重要应用. 由于 ICT 技术具有复杂精密、非通用和高成本的特点，需要面向用户的具体检测需求进行定制开发，保证一次设计成功率，

收稿日期：2006-09-30

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50575015)

作者简介：魏东波(1952—)，男，湖北赤壁人，副教授，weidongbo1019@buaa.edu.cn.

以降低系统研发风险和成本.关于工程设计技术的研究直接关系到各国 ICT 技术产权,所以其研究成果和研究方法很少公开,本文的参考文献[1—3]也仅是这方面情况的一般介绍.为满足 ICT 系统工程开发的需求,本文提出并研究了一种基于对比度-细节-剂量(CDD, Contrast-Detail-Dose)函数的 ICT 系统虚拟设计技术,并完成了针对扇束三代二维 ICT 的软件设计平台开发.计算机仿真和工程系统开发验证了该设计技术的有效性.

1　ICT 系统设计任务

ICT 系统由一个物理系统和一个数字系统组成,实现 Radon 变换对.物理系统进行投影扫描及采集,完成 Radon 正变换;数字系统进行图像重建,完成 Radon 逆变换.ICT 系统设计技术的任务就是,确定物理、数字系统参数,以最低硬件成本满足用户要求.

表 1 列出了用户要求与 ICT 系统各物理、数字子系统间的对应关系[4].

表 1　ICT 系统设计参数分类

用户要求	对应子系统
物体重量和尺寸	机械扫描装置
物体密度和最大透照厚度	探测器动态范围和 X 射线源
空间分辨率	探测器/准直器/X 射线源焦点/机械扫描系统
对比度分辨率	X 射线源、探测器
伪迹	机械系统/探测器/X 射线源/准直器
扫描速度	机械扫描装置
图像尺寸	探测器和扫描几何结构
切片厚度	准直器/探测器

2　基于 CDD 函数的设计技术

2.1　基本思路

将表 1 所列系统参数分为关键参数和辅助参数进行设计.空间分辨率和对比度是 ICT 系统关键性能指标,决定了整个系统的成像特性,与这 2 个指标相关的参数是系统设计的关键参数,需要进行详细设计.用户的其它要求可以看作是系统的辅助性指标,它们与系统的成像特性不发生直接联系,与它们相关的参数可以看作是系统设计的辅助参数.辅助参数的设计准则[4]比较简洁,可直接进行仿真设计.关键参数的设计准则比较复杂,是整个 ICT 系统设计技术的核心.

关键参数的一种设计思路是,建立一个数学模型,将反映系统空间分辨率和对比度指标的关键参数都纳入其中,然后根据这个模型进行设计.该模型输入参数是表征用户检测需求的初始设计参数,输出参数是基于这些参数的系统的性能指标.CDD 函数[5-7]是系统 MTF 和噪声的函数,国际上用它来评定实际 CT 系统综合性能.受其启发,本文逆向运用这个函数,作为关键参数设计的目标函数.

2.2　设计框架

基于上述分析,本文提出并研究了基于 CDD 函数的 ICT 系统虚拟设计技术,其技术框架如图 1 所示.

它由基于 CDD 函数的计算机辅助设计模块(CAD)、计算机仿真模块和仿真结果性能评定模块 3 部分构成.其工作原理如下:

1) 根据用户要求提取系统初始设计参数;

2) 将设计参数分为关键参数和辅助参数 2 类;

3) 将关键参数输入 CAD 模块,得到表征待设计系统临界性能的 CDD 曲线,完成考核;

4) 通过 CAD 模块考核的关键参数连同辅助

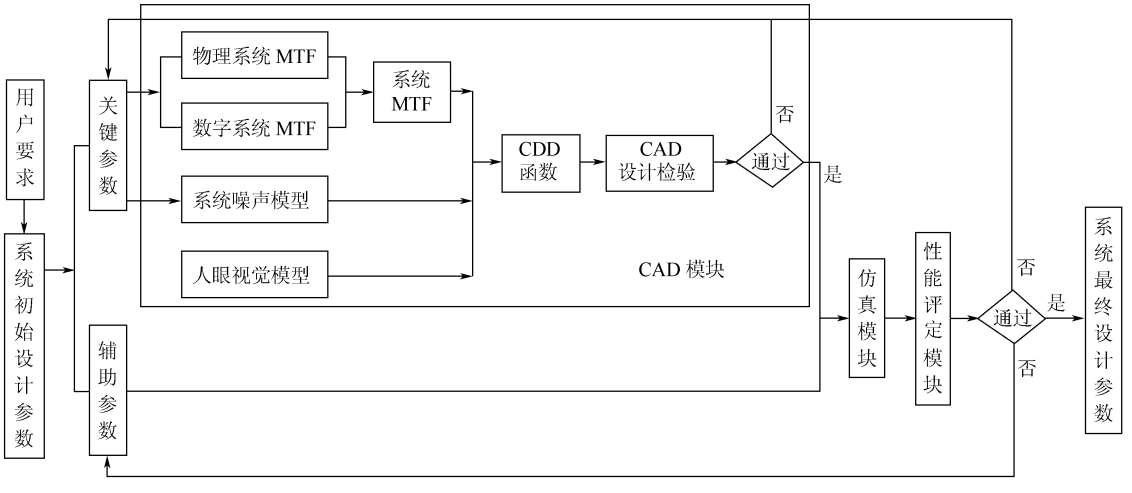

图 1　基于 CDD 函数的 ICT 系统虚拟设计技术框架

参数一起进入仿真模块进行仿真考核；

5) 利用性能评定模块对仿真结果进行量化校核，得到所需的设计结果.

显然，根据该设计平台，设计人员可根据设计结果调整设计参数，得到不同 CDD 曲线，实现系统最优设计，即在满足用户需求的情况下使系统硬件开发成本最低.

3 扇束三代 ICT 设计技术

扇束三代 ICT 是目前广为应用的技术，本节研究其基于 CDD 函数的工程设计方法. 首先，推导 ICT 系统的 CDD 函数；然后，给出扇束三代 ICT 系统的 MTF 模型和噪声模型；最后，得到扇束 ICT 系统的 CDD 函数. 限于篇幅，本文只给出其 CDD 函数的推导. 关于仿真和性能评定模块，可参见参考文献[8].

3.1 系统 CDD 函数的推导

由于人眼的视觉积分效应和系统噪声，一个特征能被人以 50% 的可能性观察到而需要的临界对比度为[9]

$$(\Delta\mu)_e \approx \frac{C\sigma\Delta p}{D} \tag{1}$$

式中，Δp 为像元间距；$C=2\sim5$，为常数；σ 为图像噪声；D 为物体直径.

特征对比度 $\Delta\mu_{CDD}$ 通过 ICT 系统的 MTF 调制之后得到的对比度为

$$(\Delta\mu_{CDD})_e = \Delta\mu_{CDD} \cdot MTF \tag{2}$$

如果经过系统调制后的特征可以被人识别出，则调制后的实际对比度 $(\Delta\mu_{CDD})_e$ 应大于等于人可以观察到而需要的对比度 $(\Delta\mu)_e$. 据此，可将上述 2 个参数联立，解出临界可检出的特征具有的对比度 $\Delta\mu_{CDD}$ 如下：

$$(\Delta\mu_{CDD})_e = (\Delta\mu)_e$$

所以

$$\Delta\mu_{CDD} = \frac{C\sigma\Delta p}{D \cdot MTF}$$

$$|\mu_f - \mu_b| = \frac{C\sigma\Delta p}{D \cdot MTF(f)} \tag{3}$$

式中，$f=1/(2D)$，f 为频率分量；μ_f 为特征线衰减系数；μ_b 为背景线衰减系数.

式(3)就是 CDD 函数. 它给出了在待设计的 CT 系统中，某一检测剂量下，直径为 D、相距 $2D$ 的 2 个特征(对应频率为 $1/(2D)$)能被人在该系统产生的 CT 图像上观察出来需要的最小对比度. 显然，这个函数汇集了表 1 中与系统空间分辨率和对比度指标相关的参数，可以将 CDD 函数作为 ICT 系统设计的 CAD 模型. 对式(3)输入不同的 D 值，可以得到不同的临界对比度输出值，形成 CDD 曲线. 它表明了被设计的系统在某一检测剂量下的性能，是判断设计参数是否满足用户要求的依据.

3.2 系统 MTF 模型

本文的扇束三代 ICT 指等距探测器的情况，其 MTF 模型由物理子系统 MTF 和数字子系统 MTF 通过卷积级联而成. 其物理子系统 MTF 推导基于如下假设：

1) 探测器对来自射线源、且通过某成像质点的每一条射线的冲击响应函数是高斯函数 $D'(r)$，其半波宽度为 d；

2) 射线源在成像方向的场强分布符合高斯函数 $S'(r)$，半波宽度为 α.

上述 2 个高斯函数的卷积形成了成像系统的点扩展函数. 该点扩展函数也是一个高斯函数，其半波宽计算公式如下(推导过程见文献[8])：

$$BW' = 2r = \sqrt{a^2(M-1)^2 + d^2}$$

式中 M 为放大比.

映射到成像质点所在平行于探测器平面：

$$BW = \frac{2r}{M} = \frac{\sqrt{a^2(M-1)^2 + d^2}}{M}$$

对上述结果做频域变换，得系统 MTF 模型：

$$F_{BW}(f) = E e^{-\left(\pi f \cdot \sqrt{(a^2(M-1)^2+d^2)/(4\ln 2)}\right)^2}$$

式中 E 为常数.

数字子系统 MTF 可由文献[9]直接得到：

$$MTF(f) = (F_{CON}(f)/f) \cdot F_{MOV}(f) \cdot F_{INT}(f) \cdot F_{PIX}(f)$$

式中，$F_{CON}(f)$ 是重建滤波函数的傅里叶变换；$F_{MOV}(f)$ 是运动积分采样因子的傅里叶变换；$F_{INT}(f)$ 是重建算法中的插值函数的傅里叶变换；$F_{PIX}(f)$ 是图像显示函数的傅里叶变换；f 是空间频率分量.

这样，将物理与数字系统的 MTF 通过卷积级联起来，可得到整个 ICT 系统 MTF 模型如下：

$$MTF(f) = F_{BW}(f) \cdot (F_{CON}(f)/f) \cdot F_{MOV}(f) \cdot F_{INT}(f) \cdot F_{PIX}(f)$$

3.3 系统噪声模型

被检特征经过上述 MTF 调制之后，特征频率成分按高斯函数衰减，它决定了系统可分辨特征细节的能力，但这些细节能否可视化，则取决于系统成像噪声.

CT 投影中的噪声 σ 主要由 X 射线源光子噪声 σ_p 和探测器噪声 σ_d 构成.

$$\sigma = f(\sigma_p, \sigma_d)$$

根据文献[6]和文献[10],σ_p 经滤波反投影重建算法后在 CT 图像中的值可用如下公式表征:

$$\sigma_{S-L}=1/(\sqrt{2}\,s\sqrt{V})\sigma_p$$

式中,σ_{s-L} 为采用 S－L 滤波函数对应的噪声;V 为投影视图数;s 为采样间距.

文献[10]给出了扇束三代 CT 下 σ_p 的一个参考计算公式如下:

$$\sigma_p=1/\sqrt{N}=N_0 TdwMD$$

式中,N_0 为无物时探元单位时间接受的光子数;T 为一幅投影的曝光时间;d 为探元感光面积;w 为切片高度;D 为 X 射线穿过物体中心的平均衰减值;M 为系统扫描结构几何放大比.

由于目前未能验证上述公式的正确性,故以实际 CT 图像的噪声作为参考噪声.

3.4　系统 CDD 模型及其工作原理

利用公式(3)将 3.2 节和 3.3 节所述系统 MTF 和噪声模型纳入临界对比度公式中,可得到等距扇束三代工业 CT 设计的 CDD 模型:

$$|\mu_f-\mu_b|=(C\sigma\Delta p)/[D\cdot F_{BW}(f)\cdot (F_{CON}(f)/f)\cdot F_{MOV}(f)\cdot F_{INT}(f)\cdot F_{PIX}(f)] \quad (4)$$

下面简要说明 CDD 函数作为 ICT 系统设计的 CAD 模型的工作原理:

1) 根据输入的设计参数计算 MTF 和噪声 σ;

2) 根据试件材料和透照光子能量,查等效线衰减系数,作为背景 μ_b;

3) 根据特征的材料和透照光子能量,查等效线衰减系数,作为特征 μ_f;

4) 根据一系列的特征直径 D,按式(4)计算对应的临界对比度;

5) 根据第 4)步结果,建立以临界对比度为纵坐标、以特征直径 D 为横坐标的虚拟 CT 系统 CDD 曲线;

6) 根据被检工件、特征的材料和尺寸,计算特征与背景的对比度;

7) 在第 5)步坐标系中,标出第 6)步计算结果.如果该对比度值在 CDD 曲线上方,则设计成功,否则修改设计参数.

4　计算机仿真

图 2 中实线是根据文献[11]的实验方法获得的实际 CT 系统 BHCT-320 的 CDD 性能曲线;图 2 中点划线是根据本节理论模型计算得到的 CDD 曲线.显见,2 条曲线基本一致.这说明该 CDD 模型准确反映了系统的性能,可以作为设计的依据.

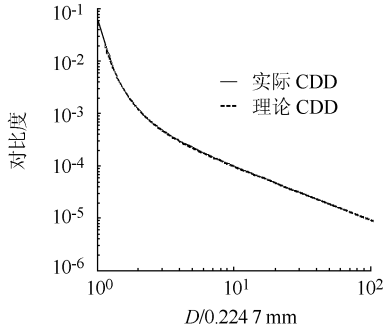

图 2　理论与实际 CDD 函数比较

5　应用实例

表 2 是用户检测需求;表 3 是根据前述方法设计得到的系统参数.应用 CDD 公式(4),可计算出该设计系统的 CDD 性能曲线如图 3 所示.

表 2　用户检测需求

指标	用户要求
工件尺寸	直径<500 mm,高度<300 mm
重量	<10 kg
工件材料	铁
空间分辨率	2 lp/mm
对比度	0.5%～1%(空间分辨率小于 1 lp/mm 时)
伪迹	不明显
检测效率	>3 min/层

表 3　设计参数

设计对象	设计参数
探测器	采样间距 0.127 mm,动态范围 12 bit,半波宽 0.15 mm(两像素合并)
X 射线源	450 kV 射线源,半波宽 2.3 mm
扫描方式	标准三代扫描
扫描几何	射线源到探测器距离 972 mm,射线源到旋转中心距离 860 mm
滤波函数	S-L 滤波器
插值函数	线性插值
与噪声相关参数	由于目前未能建立有效的系统噪声模型,这里采用同类系统 BHCT-320 的 CT 图像噪声作为系统设计时的参考噪声,其值为 3.64×10^{-4}

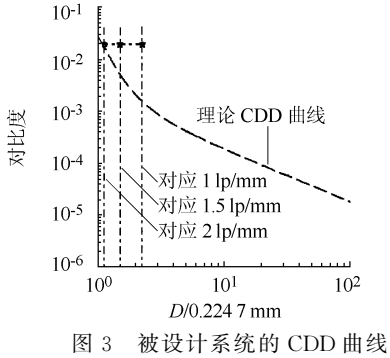

图 3　被设计系统的 CDD 曲线

备注	忽略其它因素

根据物质射线衰减系数表，铁在300 kV能量下的线衰减系数为0.866 cm^{-1}，可得到CT重建图像中1个像素代表的线衰减值为0.0195 mm^{-1}（1个像素等于0.2247 mm）. 所以，根据图3可见，这个系统的空间分辨率为2 lp/mm左右；在空间分辨率小于1 lp/mm时，这个系统对比度分辨率可达0.5%以上. 因此，被设计系统能满足用户的检测要求.

图4是根据上述设计结果开发的系统. 以铝制测试卡测试时，其空间分辨率达到3.3 lp/mm；以铁制测试卡测试时，其空间分辨率达到2 lp/mm. 以铝制圆环测试时，其对比度分辨率达到0.3%；以铁制圆环测试时，其对比度分辨率达到0.5%. 满足了用户使用要求.



图4 开发的ICT系统

6 结束语

基于CDD函数的ICT系统设计技术为面向用户要求进行ICT系统的定制开发提供了有效的工程设计技术支持. 目前，受制于系统噪声模型的不完善，该方法只能设计出系统总体噪声指标，而不能进一步设计出射线源和探测器对应的噪声指标. 后续研究应在系统噪声模型这方面取得进展.

参考文献（References）

[1] Hammersberg P. A theoretical model for determination of the optimal irradiation conditions for computerized tomography[J]. Insight, 1995, 37(12):978－985

[2] Hammersberg P, Mangard M. Optimal computerized tomography performance[C/CD]//Proceedings BB 67CD. Berlin:DGZfp, 1999:31－43

[3] Mangard M, Hammersberg P. Optimized detail detectability in computerized tomography[J]. Journal of X-ray Science and Technology, 1998, 8(1):51－73

[4] E1672-95, Standard guide for computed tomography system selection[S]

[5] Cohen G, Dibicanca F A. The use of contrast-detail-dose evaluation of image quality in a computed tomographic scanner[J]. J Comput Assist Tomogr, 1979, 3:189－195

[6] Kensuke S, Rideki K, Shinji Y. Theoretical prediction of X-ray CT image quality using contrast-detail diagrams[J]. IEEE Trans on Nucl Sci, 1982, NS-29:2115－2121

[7] Cohen G, Wagner L K, Amtey S R. Contrast-detail-dose and dose efficiency analysis of a scanning digital and a screen-film-grid radiographic system[J]. Med Phy, 1981, 8(3):358－367

[8] 傅健. X射线三代工业CT工程关键技术研究[D]. 北京：北京航空航天大学机械工程及自动化学院，2004
Fu Jian. Research on engineering techniques for X-ray generation III industrial CT and its application[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2004(in Chinese)

[9] E1441-00, Standard guide for computed tomography(CT) imaging[S].

[10] Gore J C, Tofts P S. Statistical limitations in computed tomography[J]. Phys Med Biol, 1978, 23:1176－1182

[11] E1570-93, Standard practice for computed tomography(CT) examination[S]

（责任编辑：文丽芳）