

## • 新技术与新方法 •

# 电子计算机断层扫描系统球管焦斑与扫描中心平面校准的设计及验证

余小敏<sup>1</sup>, 尹蔚<sup>2</sup>, 兰宇<sup>1</sup>, 刘志宏<sup>1</sup>

1. 成都信息工程大学 电子工程学院 物理场生物效应及仪器四川省高校重点实验室(成都 610225)

2. 成都师范学院(成都 611130)

**【摘要】** 本文开发设计了一种电子计算机断层扫描(CT)系统球管焦斑与扫描中心平面校准的方法。该方法是把球管分别旋转到 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 位置,首先让CT系统在冷态下分别静态扫描一次自制的具有对称窗口A、B的金属校准工具;然后对扫描的原始数据进行去噪、均值、归一化处理后,利用球管焦斑、准直器中心和校准工具的几何关系,计算球管焦斑到扫描中心平面的校准距离。为验证该方法的实用性和有效性,本文采用该方法对16排CT系统(Brivo CT385, GE, 中国)的球管焦斑进行校准,校准结果用即显胶片扫描方式进行验证,结果显示球管焦斑与扫描中心平面距离误差为0.02 mm,处于焦斑校准误差范围 $\pm 0.1$  mm之内。通过本文研究结果表明,作为一种简单、低成本的设计,该方法可以实现球管焦斑与扫描中心平面的快速校准。

**【关键词】** 校准; 焦斑; 准直器; 扫描中心平面

## Design and validation of calibration between tube focus spot and center plane of rotation in computed tomography system

YU Xiaomin<sup>1</sup>, YIN Wei<sup>2</sup>, LAN Yu<sup>1</sup>, LIU Zhihong<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Biomedical Effect of Physical Field and Instrument, School of Electrical and Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, P.R.China

2. Chengdu Normal University, Chengdu 611130, P.R.China

Corresponding author: YU Xiaomin, Email: jonahyxm@126.com

**【Abstract】** This study proposed a method to calibrate tube focus spot and the center plane of rotation in computed tomography system. In the method, the tube was rotated to  $0^\circ$  and  $180^\circ$  respectively, and then one metal jig with symmetric windows A and B was scanned at each position under the tube cool and static condition. According to the geometry of tube focus spot, aperture center of the collimator and jig, the distance between tube focus spot and the center plane of rotation were calculated with the X ray transmittance data after denoising, mean value and normalization. To verify the practicability and validity of the method, the tube focus spot in a 16 slices CT system (Brivo CT385, GE, China) was calibrated, and the result after calibration was validated by scanning a polaroid film. The validation result showed that the deviation between tube focal spot and center plane of rotation was 0.02 mm and was in the error range within  $\pm 0.1$  mm. The results of this study showed that, as a simple and low-cost design, the method could be used for fast calibration between tube focus spot and the center plane of rotation.

**【Key words】** calibration; tube focus spot; collimator; center plane of rotation

## 引言

电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)是指利用X射线对人体特定部位进行扫描,根据人体不同组织对X射线的吸收和透过率不同,将

穿透组织的投影数据进行重建以获得人体内组织的断层图像。由于其具有扫描精度高、分辨率高、成像清晰、扫描时间短等优点,现已作为临床诊断分析的常用设备<sup>[1-2]</sup>。

为了得到清晰图像,并减少对人体不利的多余

DOI: 10.7507/1001-5515.201812016

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2019YJ0317); 四川省教育厅重点资助项目(18ZA0105)

通信作者: 余小敏, Email: jonahyxm@126.com

<http://www.biomedeng.cn>

射线剂量<sup>[3-5]</sup>, 扫描过程中系统必须保证扫描的球管焦斑、准直器中心和探测器中心近似地处于同一扫描平面, 即扫描中心平面, 因此系统在设计和使用前需要首先对这三个关键成像部件进行准直<sup>[6]</sup>。准直过程一般以准直器中心为参考点, 通过不断调整球管和探测器的位置, 使三个部件中心处于扫描中心平面内, 如图 1 所示。其中, 探测器中心准直相对简单, 在完成球管焦斑准直后, 可以通过扫描图像进行调整。但是球管焦斑准直比较繁琐, 因为扫描过程中球管焦斑位置不是固定不变的, 精确地校准球管焦斑, 对 CT 扫描成像质量非常关键<sup>[7-10]</sup>。

球管焦斑位置易受球管温度影响, 当球管长时间没有进行扫描时, 即使用时间间隔超过 2 h 以上, 球管处于常温状态, 称为冷态。开始扫描后, 球管内部温度迅速升高, 焦斑位置会发生微小偏移, 且随着球管温度持续升高焦斑偏移量逐渐增加。当达到临床扫描需求后, 球管温度趋于稳定, 这种状态称为热态。除温度外, 扫描过程中扫描架高速旋转产生的离心力也会使球管焦斑和探测器中心发生偏移。因此基于以上原因, 在使用 CT 系统进行扫描成像前需要对球管焦斑、准直器和探测器进行校准, 其中关键的一步是球管焦斑校准。

## 1 球管焦斑校准方法

### 1.1 传统胶片校准法

球管焦斑常用的校准方法是采用扫描胶片法。具体操作如下: 校准前, 先使球管温度预热到热态, 然后在扫描架孔径中的指定位置放置即显胶片; 把球管旋转到扫描架顶端即 0° 的位置, 在扫描架静止状态进行一次扫描, 再把球管旋转到扫描架底部即 180° 位置再次进行一次静态扫描。每次扫描后, 胶片相应曝光区域颜色变黑。经过两次曝光, 胶片中间重叠曝光区域颜色会加深, 如图 2 所示。测量胶片重叠区两侧曝光区域的长度  $L$ 、 $R$ , 计算得到球管焦斑与扫描中心平面之间的距离 (以符号  $TS$  表示), 如式 (1) 所示:

$$TS = \frac{(L - R) \times SA}{2(G_0 - G_{180})} \quad (1)$$

其中, 球管在 0° 扫描时, 球管焦斑距胶片的距离, 以符号  $G_0$  表示; 球管在 180° 扫描时, 焦斑距胶片的距离, 以符号  $G_{180}$  表示; 焦斑与准直器中心距离, 以符号  $SA$  表示。

根据  $TS$  值调整球管位置, 再重新换上新胶片重复上述校准过程, 直至  $TS$  值满足校准的误差范围, 完成球管焦斑校准。这种胶片校准方法的缺点

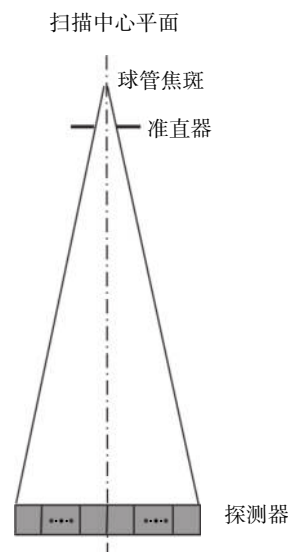


图 1 球管焦斑、准直器中心和探测器中心组成的扫描中心平面的示意图

Fig.1 Diagram of plane of rotation composed by tube focal spot, collimator center and detector center

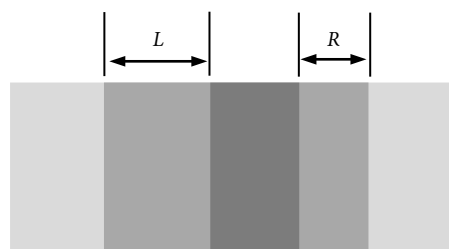


图 2 球管在 0° 和 180° 对即显胶片的扫描曝光

Fig.2 Polaroid film exposure when tube is at 0° and 180° position

是操作繁琐, 整个过程中球管需长时间持续保持在热态, 校准过程时间长、成本高。

### 1.2 金属工具校准法

本文提出一种新的校准方法, 使用特制的金属工具校准。金属工具结构如图 3 所示, 校准工具材料使用铝, 中间有两个对称窗口 A 和 B。在校准过程中, 先把校准工具放置在扫描架孔径中指定位置, 然后把球管旋转到 0°、180° 位置, 冷态、静止条件下, 分别进行一次扫描。每次扫描后 X 射线穿过校准工具被 CT 各排探测器接收, 取出探测器中的原始数据并进行处理。为了减小测试误差, 原始数据先进行去噪、均值和归一化处理, 然后选取经过窗口 A 和 B 中间部分 (如图 3 所示的阴影部分) 被探测器接收的数据, 先对每排数据取均值, 再对各排数据取均值, 最后分别得到经过两个窗口后的 X 射线相对剂量, 代入校准公式, 计算球管焦斑与扫描中心平面的距离。重复上述校准过程, 直至该距离满足球管焦斑的校准误差, 校准过程完成。与传

统胶片校准方法相比,本方法避免了胶片的浪费,耗时短,整个校准过程都在系统常温下完成。

利用金属工具校准,首先需要测得冷态、静止时球管焦斑位置与热态、扫描系统高速旋转时球管焦斑位置的偏移量,以符号  $TO$  表示。而冷态与热态的焦斑位置偏移量,以及球管静止与高速旋转时的焦斑位置偏移量,可以分别通过胶片扫描法和CT系统内部软件测试工具测得,综合两个偏移量,得到  $TO$ 。本校准方法的目的是让球管在静止、冷态时  $TS$  等于  $TO$ ,即可保证在热态、高速旋转扫描时,球管焦斑正好处于扫描中心平面内。

采用金属工具校准过程时,球管先后旋转到扫描架顶部  $0^\circ$  和底部  $180^\circ$  位置,在冷态、静止时,分别进行一次扫描。球管焦斑、准直器中心和校准工具的几何关系右视图如图4所示。图中  $0^\circ$  扫描时,校准工具位置表示当球管位于扫描架顶部位置时,

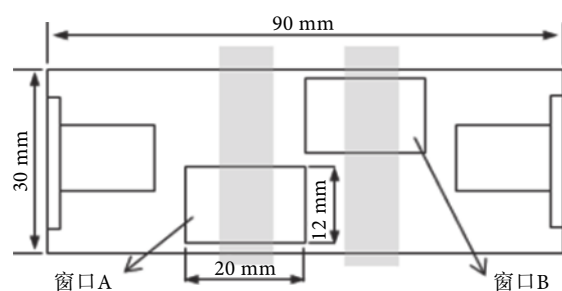
球管焦斑与校准工具之间的位置;  $180^\circ$  扫描时,校准工具位置表示当球管旋转到扫描架底部时,球管焦斑与校准工具之间的位置关系。为了方便表示,把  $180^\circ$  扫描时球管与校准工具位置旋转  $180^\circ$ ,球管位置与  $0^\circ$  扫描时球管位置重合,几何关系变成如图4所示。

根据图中几何关系,可以得到如式(2)、式(3)所示:

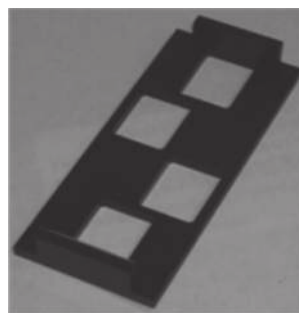
$$\frac{l_{A180} + OS}{G_{180}} = \frac{l_{A0} + OS}{G_0} = \frac{C_A}{SA} \quad (2)$$

$$\frac{l_{B180} - OS}{G_{180}} = \frac{l_{B0} - OS}{G_0} = \frac{C_B}{SA} \quad (3)$$

其中,在  $0^\circ$  扫描时,X射线分别穿过校准工具窗口A、B的长度,分别以符号  $l_{A0}$ 、 $l_{B0}$  表示;在  $180^\circ$  扫描时,X射线分别穿过校准工具窗口A、B的长度,分别以符号  $l_{A180}$ 、 $l_{B180}$  表示;校准工具中



示意图



实物照

图3 校准工具结构示意图和实物图

Fig.3 Structure diagram and photograph of the calibration tool

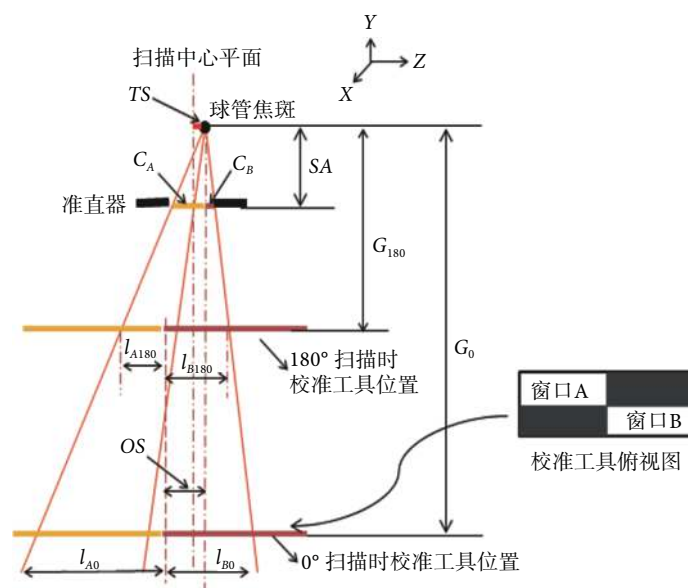


图4 球管焦斑与扫描中心平面几何关系右视图

Fig.4 Geometry of the tube focus spot and center plane of rotation from right view

心与球管焦斑的距离,以符号  $OS$  表示;准直器开口被球管焦斑轴线分开的距离,以符号  $C_A$ 、 $C_B$  表示;焦斑到准直器的距离,以符号  $SA$  表示。通过式(3),可得到公式如式(4)所示:

$$OS = \frac{l_{B180} - l_{B0} \times \frac{G_{180}}{G_0}}{1 - \frac{G_{180}}{G_0}} \quad (4)$$

其中,  $l_{B0}$ 、 $l_{B180}$  未知。

扫描时 X 射线穿过校准工具窗口 A 后,被探测器接收到的相对射线量,以符号  $PA_i$  表示,如式(5)所示:

$$PA_i = l_{Ai}P + r l_{Bi}P \quad (5)$$

同理, X 射线穿过校准工具窗口 B 后,被探测器接收到的相对射线量,以符号  $PB_i$  表示,如式(6)所示:

$$PB_i = l_{Bi}P + r l_{Ai}P \quad (6)$$

其中,单位射线量,以符号  $P$  表示; X 射线分别经过金属、空气后的能量衰减比,以符号  $r$  表示;  $i = 0$  或  $180$ , 分别代表球管在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  位置。公式(5)、(6)相除得到如公式(7)所示:

$$\frac{PA_i}{PB_i} = \frac{l_{Ai} + r l_{Bi}}{l_{Bi} + r l_{Ai}} \quad (7)$$

从图4的几何关系,可以得到公式(8)和公式(9):

$$l_{A0} + l_{B0} = (C_A + C_B) \frac{G_0}{SA} \quad (8)$$

$$l_{A180} + l_{B180} = (C_A + C_B) \frac{G_{180}}{SA} \quad (9)$$

上面公式中,  $C_A + C_B$ 、 $G_0$ 、 $G_{180}$ 、 $SA$  和  $r$  已知,  $PA_0$ 、 $PA_{180}$ 、 $PB_0$ 、 $PB_{180}$  可以从系统扫描后的原始数值计算得到。联立公式(7)、(8)、(9),求得  $l_{B180}$ 、 $l_{B0}$ ,再代入公式(4),算出  $OS$ 。根据公式(2)、(3),求得  $C_A$ 、 $C_B$ 。

$TS$  的计算如式(10)所示:

$$TS = C_A - \frac{C_A + C_B}{2} = \frac{C_A - C_B}{2} \quad (10)$$

根据  $TS$  调整球管位置,再重复上述校准过程,直至  $TS$  与  $TO$  之差满足误差要求,完成球管焦斑校准。

## 2 测量实验与结果

### 2.1 离线测试

以 16 排 CT (Brivo CT385, GE, 中国) 为例,先计算  $TO$ 。将即显胶片放置在扫描架内指定位置,把球管分别旋转到  $0^\circ$  和  $180^\circ$  位置,各进行一次冷

态、静态扫描。然后预热球管至热态,换一张新胶片,重复上述扫描。测试两张胶片中心曝光区域两侧的曝光区域长度,计算出冷态和热态下,焦斑在  $Z$  轴的偏移量为  $0.20$  mm。扫描架高速旋转引起球管焦斑偏移量,通过系统内部工具测得。取不同旋转速度下偏移的均值,得到高速旋转与静止时,球管焦斑  $Z$  轴偏移量为  $-0.04$  mm。根据以上结果,综合得到  $TO = 0.16$  mm。

正式校准前,把金属校准工具放入扫描架内指定位置,旋转球管至  $0^\circ$ ,曝光参数设置为  $120$  kV、 $20$  mA、 $1$  s,做一次静态扫描,再读出 16 排探测器原始数据,对原始数据离线做去噪、均值和归一化处理。然后只选取其中 X 射线穿过金属后被探测器接收的通道的数据,取均值,得到射线经过金属后的 X 相对剂量。然后取出校准工具,在同样条件下进行一次空气扫描,对相同探测器通道的数据做同样处理,得到 X 射线经过空气后的相对剂量。通过比较两次扫描的相对剂量,得到  $r = 0.154$ 。

本次测试的 16 排 CT 系统,  $SA$  为  $162$  mm, 准直器开口尺  $C_A + C_B = 1.49$  mm,  $G_0 = 751$  mm,  $G_{180} = 331$  mm。曝光参数为  $120$  kV、 $20$  mA、 $1$  s。在冷态时,把球管旋转到  $0^\circ$  和  $180^\circ$ ,各做一次静态扫描。每次扫描后取出 16 排探测器原始数据。为了减小测试误差,16 排数据取均值和归一化处理。对处理后的数据选取其中 X 射线经过窗口 A、B 后对应的数据,如图5所示。

如图5所示,  $0^\circ$  扫描曲线中,取与窗口 A 对应的探测器通道 387 ~ 397,对这些通道的射线通过率值取平均作为 X 射线穿过窗口 A 的相对射线量  $PA_0$ ;取与窗口 B 对应的探测器通道 405 ~ 413,对这些通道的射线通过率值取平均作为 X 射线穿过窗口 B 的射线量  $PB_0$ <sup>[11]</sup>,计算得到  $PA_0/PB_0 = 1.391$ ;同理,在  $180^\circ$  扫描时,与窗口 A 对应探测器通道 340 ~ 358,与窗口 B 对应探测器通道为 378 ~ 396,进行处理计算后得到  $PA_{180}/PB_{180} = 0.739$ 。由式(2) ~ (9),求出  $TS = 0.413$  mm。与  $TO = 0.16$  mm 比较,理论上球管应沿着  $Z$  轴反向调整  $0.253$  mm。

### 2.2 实际球管焦斑校准

根据前面介绍的球管准直方法,按照图6的操作流程编写校准软件并在该 16 排 CT 系统进行校准调试。根据程序提示,把球管分别旋转到  $0^\circ$  和  $180^\circ$  位置,冷态下各进行一次扫描,扫描结束后根据系统提示进行球管位置调整,调整后再重复上述过程。本次校准过程经过两次调整球管位置后,球



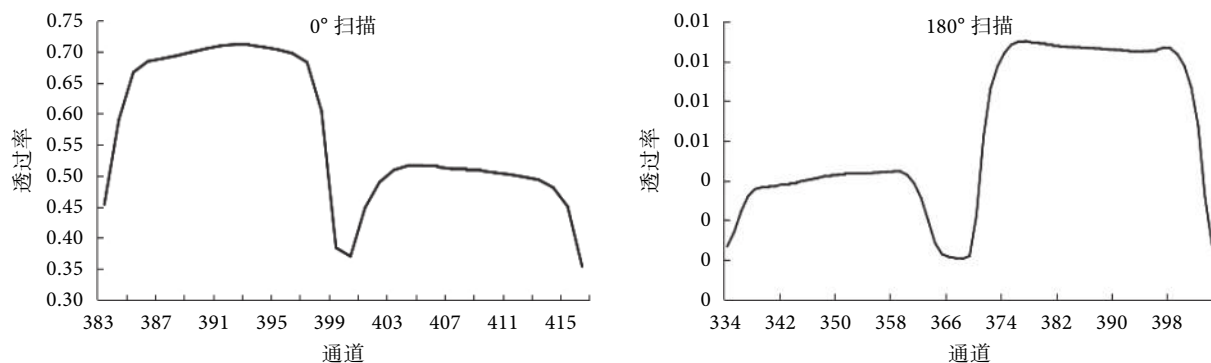


图5 在0°和180°系统扫描金属工具后X射线透过率曲线

Fig.5 X-ray transmittance curve through metal jig after 0°and 180°exposures

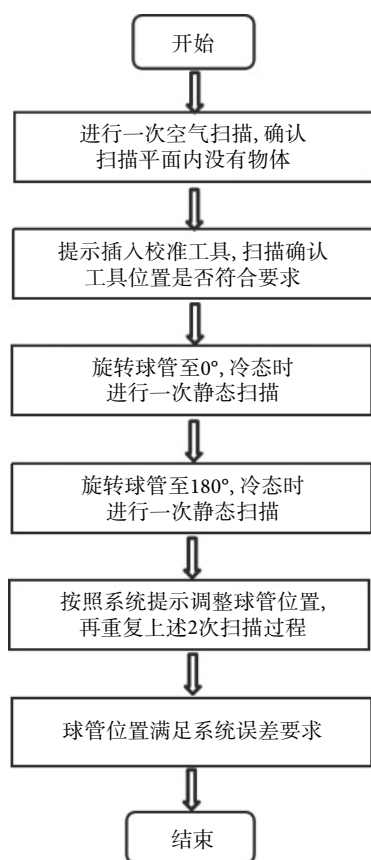


图6 软件设计流程图

Fig.6 Flow chart of software algorithm

管焦斑与扫描中心平面距离小于球管焦斑校准误差范围, 完成校准。

### 2.3 结果验证

为了验证校准的结果, 利用传统胶片校准方法测试上述球管焦斑校准后的位置。把金属校准工具取出, 放置即显胶片至测试位置, 等系统恢复到冷态下, 把球管分别旋转到扫描架的0°和180°位置各进行一次静态扫描, 系统扫描参数设置与金属工具校准时一致。胶片扫描曝光后的影像如图2所示。测得  $L = 2.44 \text{ mm}$ ,  $R = 1.52 \text{ mm}$ , 代入公式

(2) 得到  $TS$  为  $0.18 \text{ mm}$ , 与冷态下  $TO = 0.16 \text{ mm}$  相比, 误差仅为  $0.02 \text{ mm}$ , 满足误差范围  $\pm 0.1 \text{ mm}$  的要求<sup>[12]</sup>, 证明该校准方法能完成对球管焦斑的校准。

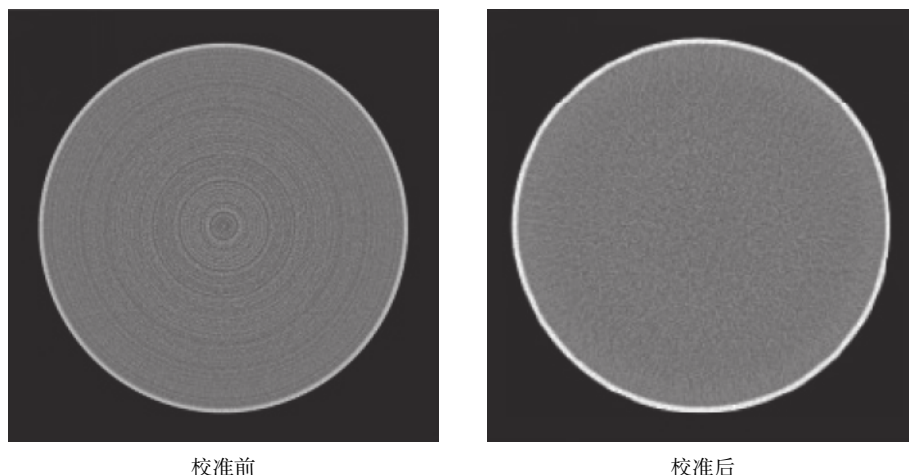
### 2.4 图像重建

球管焦斑经过校准后, 再把探测器中心调整到扫描中心平面内。对  $20 \text{ cm}$  水膜 ( $20 \text{ CT}$  水当量膜, 北京双玉科技, 中国) 扫描, 取得扫描后原始数据, 离线进行预处理和图像重建。如图7所示为球管焦斑校准前后的重建图像。球管焦斑校准前, 重建图像有明显的伪影; 而球管焦斑校准后, 重建图像均匀, 没有出现明显伪影。实验结果表明, 本文采用的校准方法可以有效地实现球管焦斑与扫描中心平面准直。

## 3 讨论和结论

本文提出的校准方法中所有的操作步骤都在球管冷态下进行, 但是  $\text{CT}$  系统经过一次扫描后, 球管温度会迅速上升, 等到温度再降到室温, 所需时间长, 影响整个校准时间。所以校准软件里把冷态温度统一为  $35.6^\circ\text{C}$ , 大大减少两次扫描之间等待时间。比如, 球管在  $0^\circ$  位置进行一次  $120 \text{ kV}$ 、 $20 \text{ mA}$ 、 $1 \text{ s}$  的扫描后, 只需要等待  $3 \text{ min}$  即可进行下一步扫描, 相比传统的胶片校准方法, 节省大量时间。

另外在初始校准过程中发现, 如果校准金属工具初始位置过多偏离  $Z$  轴中心, 会导致窗口 A 或 B 的中间位置远远偏离扫描中心平面。在球管  $0^\circ$  扫描时, X 射线能照射到窗口 A 或 B, 但在球管  $180^\circ$  扫描时, 可能只有一个窗口能接收到 X 射线, 影响校准计算结果。简单的处理方法是在设计软件流程时, 先进行  $180^\circ$  扫描, 然后再进行  $0^\circ$  的扫描。从图4的几何关系可以看出, 如果在  $180^\circ$  扫



校准前

校准后

图7 20 cm 水膜的重建图形

Fig.7 Reconstruction image of 20 cm water phantom.

描时 X 射线能覆盖窗口 A、B, 则  $0^\circ$  扫描时必定也能覆盖。

本文球管焦斑校准的基础是对穿过校准工具 A、B 窗口后的探测器接收到的 X 射线量数据进行处理计算, 要求探测器的排数应足够宽才能覆盖一定宽度的 X 射线。对于 16 排以下的 CT 系统, 特别是单双排 CT, 由于探测器排数少、宽度窄, 很难同时覆盖经过窗口 A、B 的 X 射线, 所以不适宜使用本方法进行球管焦斑的校准。而对于 16 排以上的中高端 CT 系统, 探测器的排数和宽度足够大, 足以覆盖曝光后穿过窗口 A、B 的所有射线, 则可以采用该方法。球管在  $0^\circ$  或  $180^\circ$  扫描时, 由于准直器开口大小限制, 探测器中间排能接收到 X 射线, 而两边的探测器可能接收不到 X 射线, 因此在校准计算时, 需要把没有接收到 X 射线的两边探测器数据去除, 保证球管焦斑校准的准确性。

综上所述, 本文设计了一种用于 CT 球管焦斑校准的方法。该方法实现了在系统冷态、静止时, 球管焦斑与扫描中心平面的校准。并在 16 排 CT 系统上, 测试并验证了该方法的有效性和实用性。与传统的校准方法相比, 该方法在常温下操作, 省去了系统扫描加热的过程, 而且不需要反复使用胶片进行校准, 降低成本, 操作简单, 大大减少了 CT 系统在设计、使用过程中的维护时间。

**利益冲突声明:** 本文全体作者均声明不存在利益冲突。

#### 参考文献

- 1 包尚联. 现代医学影像物理学. 北京: 北京大学医学出版社, 2003: 54-62.
- 2 马继明, 张建奇, 宋顾周, 等. 全变分约束迭代滤波反投影CT重建. 光学学报, 2015, 35(2): 392-398.
- 3 Hounsfield G N. Computerized transverse axial scanning (tomography): part 1. description of system. British Journal of Radiology, 1973, 46(552): 1006-1022.
- 4 Zhang Hongyu, Li Yingxin, *et al.* The analysis of effective radiation dose during PET/CT examination. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2016, 25(3): 134-138.
- 5 Sodickson A, Baeyens P F, Andriole K P, *et al.* Recurrent CT, cumulative radiation exposure, and associated radiation-induced cancer risks from CT of adults. *Radiology*, 2009, 251(1): 175-184.
- 6 余小敏, 姜添浩, 刘志宏, 等. 数字X射线摄影系统中探测器纵向自动追踪射线设计. 生物医学工程学杂志, 2018, 35(2): 297-300.
- 7 Mansoor A, Bagci U, Foster B, *et al.* Segmentation and image analysis of abnormal lungs at CT: current approaches, challenges, and future trends. *Radiographics*, 2015, 35(4): 1056-1076.
- 8 Shen Shiwen, Bui A A T, Cong J, *et al.* An automated lung segmentation approach using bidirectional chain codes to improve nodule detection accuracy. *Comput Biol Med*, 2015, 57: 139-149.
- 9 Jiang H. 计算机断层成像技术原理, 设计, 伪像和进展. 北京: 科学出版社, 2006: 106-116.
- 10 Sensakovic W, Starkey A, Armato S. A general method for the identification and repair of concavities in segmental medical images//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record Nuclear Science Symposium. Dresden: IEEE, 2008, 20(7): 5320-5326.
- 11 Sanchez-Fernandez M, de-Prado-Cumplido M, Arenas-Garcia J A. SVM multiregression for nonlinear channel estimation in multiple-input multiple-output systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(8): 2298-2307.
- 12 Kitamura Y. Medical electrical equipment-part 2-44. Particular requirement for the basic safety and essential performance of X-ray equipment for computed tomography, IEC 60601-2-44: Ed 3, 2009: 30-35.

收稿日期: 2018-12-10 修回日期: 2019-03-28

本文编辑: 陈咏竹