



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200510086904.1

[43] 公开日 2007年5月23日

[11] 公开号 CN 1965760A

[22] 申请日 2005.11.17
 [21] 申请号 200510086904.1
 [71] 申请人 中国科学院高能物理研究所
 地址 100049 北京市石景山区玉泉路19号乙
 [72] 发明人 吴自玉 袁清习 王寓越 朱佩平
 黄万霞 舒 航

[74] 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司
 代理人 段成云

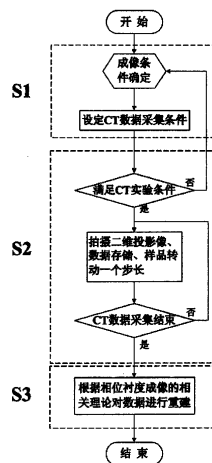
权利要求书 3 页 说明书 7 页 附图 3 页

[54] 发明名称

同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置及实验方法

[57] 摘要

本发明涉及计算机断层成像技术领域，特别是一种同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置及实验方法。装置由单色器晶体、样品转台、分析晶体、电离室和成像探测器组成，样品转台由三个转动和两个平动来组成。同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像方法流程，其具体步骤如下：步骤 S1，不同成像模式下相位衬度成像条件的确定；步骤 S2，相位衬度 CT 成像实验数据的获取；步骤 S3，相位衬度成像实验数据的重建。



1. 一种同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置, 所述的装置由单色器晶体、样品转台、分析晶体、电离室和成像探测器组成, 在衍射增强相位衬度 CT 成像实验中, 单色器晶体、样品转台、分析晶体、电离室和成像探测器顺序排列在光路上; 在同轴相位衬度 CT 成像实验中, 单色器晶体、分析晶体、样品转台、电离室和成像探测器依次排列在光路上; 电离室的作用是作为 X 射线强度的监测设备, 电离室测得的 X 射线光强以光电流的形式通过微静电计实时显示。

2. 根据权利要求 1 所述的同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置, 其特征在于, 样品转台由三个转台和两个平动组成, 三个转台中, 转台 (1) 的作用是实现固定在转台 (1) 上样品的转动, 是 CT 成像实验过程中的主要转台; 转台 (2) 用来调整样品相对于从单色器晶体出射的 X 射线的方位以满足不同成像条件的需要, 因为转台 (1) 固定在转台 (2) 上, 所以转台 (2) 转动时, 固定于转台 (1) 上的样品相对于入射 X 射线的方位将随转台 (2) 变动; 转台 (3) 用来调整样品台相对入射 X 射线的方位以保证 X 射线对样品的正入射, 转台 (3) 转动时, 固定于转台 (3) 上的转台 (2) 随转, 固定在转台 (2) 上的转台 (1) 同时随转以实现 X 射线对样品的正入射, 两个平动中, 平动 P1 用以实现样品台相对于 X 射线高度位置的调节, 平动 P2 用以实现样品台相对于 X 射线水平位置的调节。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置, 其特征在于, 通过自动控制, 可满足衍射增强相位衬度 CT 成像和同轴相位衬度 CT 成像在不同条件下的实验需要; 同时, 本装置结合计算机可以实现整个数据采集过程的全部自动化。

4. 一种同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像的方法, 其具体步骤如下:

步骤 S1, 不同成像模式下相位衬度成像条件的确定:

(1) 在衍射增强相位衬度 CT 成像实验中, 根据样品所需的成像条件和双晶摇摆曲线上的相应位置的关系, 确定在单色器晶体和分析晶体之间的夹角,

(2) 在同轴相位衬度 CT 成像实验中, 根据不同样品确定合适的样品和探测器的距离以获得最佳的成像效果或得到所需的信息,

(3) 根据 X 射线光强、探测器等的不同参数确定不同条件下相应的成像曝光时间;

步骤 S2, 相位衬度 CT 成像实验数据的获取, 在步骤 S1 所确定的成像条件下, 样品转台 (1) 每转动一个特定的角度后, 利用成像探测器获得一张样品的相位衬度投影像, 样品转台的范围可为 180° 、 360° 或其它任意角度, 最终获得相应张数的相位衬度二维投影像, 在所述的装置中, 确定好不同成像条件下的曝光时间后, 在程序中输入样品需转动的总角度和转动步长, 确定好数据在计算机上存放的路径后, 整个数据采集过程即可自动运行直至数据采集过程结束;

步骤 S3, 相位衬度成像实验数据的重建, 以衍射增强相位衬度成像或同轴相位衬度成像的相关理论作为算法基础, 对所获得的二维投影像进行处理即可重建样品的相位衬度 CT 断层像。

5. 根据权利要求 4 所述的同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像方法, 其特征在于, 可以实现多种相位衬度 CT 成像模式实验

衍射增强相位衬度 CT 成像实验的主要模式有如下四种:

1) 样品转轴平行于单色器晶体转轴和分析晶体转轴, 此种模式通过调整转台 2 实现,

2) 样品转轴垂直于单色器晶体和分析晶体转轴, 此种模式可通过在上一模式基础上使转台 2 旋转 90° 得以实现,

3) 单色器晶体和分析晶体调谐模式, 单色器晶体和分析晶体衍射面完全平行,

4) 单色器晶体和分析晶体失谐模式, 单色器晶体和分析晶体的衍射面存在一非常小的夹角;

同轴相位衬度 CT 成像实验的主要工作模式有如下两种:

1) 在最优样品-探测器距离处进行同轴相位衬度成像 CT 实验, 此种模式需要预先确定好样品和探测器之间的最佳距离, 然后在样品-探测器距离不变的条件下进行 CT 成像实验,

2) 选取几个不同的样品-探测器距离, 在不同距离处分别进行 CT

成像实验数据采集，然后利用所获的几套数据在数据处理中获得最优相位衬度。

同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置及实验方法

技术领域

本发明涉及计算机断层成像技术领域，特别是一种同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置及实验方法。

背景技术

自 1895 年伦琴发现 X 射线至今的一百多年里，基于吸收衬度的 X 射线透视成像，因为能无损地得到样品的内部结构信息，在医学诊断和材料研究等领域已经成为重要的检测手段。特别是 20 世纪中、后期 A. M. Cormack 和 G. N. Hounsfield 等人发明 X 射线 CT（计算机断层成像术）后，CT 目前已成为医学诊断的必备手段。但无论是 X 射线透视成像还是传统 CT，成像衬度都是基于样品对 X 射线的吸收差异。对于以轻元素为主要成分的生物软组织而言，由于轻元素材料对硬 X 射线的吸收非常小，而不同轻元素材料之间的吸收差别就更小，所以只能得到衬度较低的吸收像。因此，基于吸收差异的常规 CT，即使提高了空间分辨率，仍然不能对生物软组织的内部细微结构产生衬度，还无法看到生物软组织内部的结构细节（如早期肿瘤、微血管等）。这极大限制了 X 射线吸收成像方法在生物软组织研究方面的应用。

近年来，随着 X 射线相位衬度成像技术的出现，人们对 X 射线的成像机制有了进一步的认识。相位衬度成像是通过记录 X 射线穿过物体后相位的变化而成像的技术，在硬 X 射线波段($\lambda \leq 0.2 \text{ nm}$)，轻元素的相位项 δ 比吸收项 β 大 3~4 个数量级。因此，相位衬度成像比传统 X 射线吸收成像具有更高的灵敏度和分辨率，更有利于在轻元素范围内对物质内部结构信息的研究，并有可能在生物样品的内部结构细节以及某些疾病的早期诊断方面发挥一定的作用，这对生物、医学方面的相关研究具有重要的意义。

虽然理论和实验都表明，X 射线相位衬度成像能达到较高的衬度和

分辨率，但是它仍然是二维成像，是样品在垂直于光束方向各个层面投影的重叠，还不能获得样品的三维结构。因此，将具有高衬度和分辨率的相位衬度成像技术应用于三维成像、开展同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像方法及应用研究是一个迫切需要解决的问题。

图 1 是相位衬度成像中广泛应用的两种成像模式光路示意图。

同步辐射 X 射线相位衬度成像装置一般由单色器晶体、样品台、分析晶体、电离室和探测器组成。

单色器晶体是将入射的“白光”X 射线进行单色化、获得带宽很窄的单色 X 射线装置，单色器晶体一般选用硅或锗单晶体，通过调整单色器晶体衍射面与入射“白光”X 射线的角度（布喇格角），可以选择出射 X 射线的波长（能量）。分析晶体一般是与单色器晶体相同类型的晶体。在衍射增强相位衬度成像模式中，分析晶体是精度很高的角度滤波器；而在同轴相衬成像模式中，分析晶体是单色 X 射线的偏转器。在本发明的装置中，单色器晶体和分析晶体都固定在相应的转轴上，转轴的转台由步进电机通过相应的减速传动装置实现。转轴的转角分辨远远小于双晶摇摆曲线的半高宽（FWHM），以满足在摇摆曲线的不同部位进行成像的要求。以能量为 10KeV 的 X 射线为例，Si(111)晶体的双晶摇摆曲线的半高宽约为 8 角秒，在本发明的装置中，单色器晶体和分析晶体转轴的转动精度可以达到 0.05 角秒，足以满足在摇摆曲线不同部位成像的需要。

电离室的主要作用是实时监测分析晶体出射的 X 射线的强度。通过微静电计可将电离室测得的 X 射线产生的光电流显示出来。电离室的具体作用体现在两个方面：1) 不放置样品，当旋转分析晶体时，通过电离室记录的从分析晶体出射 X 射线的强度可以测定双晶摇摆曲线，并确定分析晶体衍射面相对于单色器晶体衍射面的相对角度位置，以满足不同相位衬度成像模式的要求。2) 放置样品进行实验时，通过电离室记录的从分析晶体出射 X 射线的强度变化，可以确定曝光时间和实验过程中 X 射线强度下降带来的影响，为后续图像数据处理和归一化提供依据。

成像探测器的一般为二维面探测器，要求是便于图像的数字化的以及

具有一定的空间分辨率。成像探测器便于图像数字化可以方便地对图像进行同步或后续处理。同时，为了满足成像分辨率的要求，探测器必须有足够的空间分辨率。

发明内容

本发明的目的在于提供一种同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置及实验方法。

在同步辐射相位衬度 CT 成像实验中，由于光源是固定的，后续的实验装置必须根据光源位置及方向调整，所以在开展相位衬度 CT 实验时，只有通过实验样品的旋转来完成。

单色器晶体、样品转台、分析晶体、电离室和成像探测器组成组成了本发明的 X 射线相位衬度 CT 实验装置。

在上述的 X 射线相位衬度成像 CT 实验装置中，结合计算机可以实现单色器晶体、分析晶体和样品台的转台、电离室数据读出和记录、成像的拍摄及记录等过程的完全自动化进行。

在衍射增强相位衬度 CT 成像实验中，样品转台放置在单色器晶体和分析晶体之间，根据电离室测得的双晶摇摆曲线确定分析晶体和单色器晶体之间的夹角。固定调好的分析晶体和单色器晶体，样品转台（转台 1）每转台一个特定的角度后，利用成像探测器获得一张样品的衍射增强投影像，样品转台的范围可为 180° 、 360° 或其它任意角度，最终获得相应张数的衍射增强二维投影像（二维投影像张数=样品转台度数/转台步长）。根据衍射增强成像的相关理论和相应 CT 算法，对所获得的二维投影像进行处理，即可得到样品的衍射增强相位衬度 CT 断层像。

在同轴相位衬度 CT 成像实验中，样品台放置在两块晶体的后面，两块晶体组成双晶单色器，探测器放置在可沿 X 射线光路方向自动滑动的直线滑台上。根据晶体衍射的布喇格角，可以选择照射到样品上的 X 射线波长；根据电离室测得的双晶摇摆曲线，可将两块晶体的衍射面调节平行。根据同轴相位衬度成像理论，选择合适的样品-探测器距离，可在成像探测器上获得同轴相位衬度二维投影像。按照特定步长旋转样品同时在每一个角度位置采集二维投影像，样品旋转整个预定转台范围

后，可采集到完整的投影像数据。根据同轴相位衬度成像的相关理论和相应 CT 算法，对所获得的二维投影像进行处理，即可得到样品的同轴相位衬度 CT 断层像。

在本发明所述的装置中，确定好不同成像条件下的曝光时间后，在程序中输入样品需转台的总角度（样品扫描范围）和转台步长，确定好数据在计算机上存放的路径后，整个数据采集过程即可自动运行直至数据采集过程结束。程序的运动过程是：采集二维投影像并存盘→样品旋转一个步长→再次采集二维投影像并存盘→样品继续旋转一个步长，如此反复，直到样品旋转完成整个扫描范围。图 3 是本发明的相位衬度 CT 成像实验工作过程示意图。

以本发明所述装置为基础，同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像实验工作模式主要有：

衍射增强相位衬度 CT 成像实验的主要工作模式有如下四种：

- 1) 样品转轴平行于单色器晶体转轴和分析晶体转轴，此种模式通过调整转台 2 得以实现，
- 2) 样品转轴垂直于单色器晶体和分析晶体转轴，此种模式通过在上一模式基础上使转台 2 旋转 90° 得以实现，
- 3) 单色器晶体和分析晶体调谐模式，单色器晶体和分析晶体衍射面完全平行，
- 4) 单色器晶体和分析晶体失谐模式，单色器晶体和分析晶体的衍射面存在一非常小的夹角；

同轴相位衬度 CT 成像实验的主要工作模式有如下两种：

- 1) 此种模式需要预先确定好样品和探测器之间的最佳距离，然后在样品-探测器距离不变的条件下进行 CT 成像实验，
- 2) 选取几个不同的样品-探测器距离，在不同距离处分别进行 CT 成像实验数据采集，然后利用所获的几套数据在数据处理中获得最优相位衬度。

在不同相位衬度 CT 成像实验工作模式下，本发明所述的相位衬度 CT 成像实验流程。其具体步骤为：

步骤 S1，不同成像模式下相位衬度成像条件的确定：

(1) 在衍射增强相位衬度 CT 成像实验中, 根据样品所需的成像条件和双晶摇摆曲线上的相应位置的关系, 确定在单色器晶体和分析晶体之间的夹角,

(2) 在同轴相位衬度 CT 成像实验中, 根据不同样品确定合适的样品和探测器的距离以获得最佳的成像效果或得到所需的信息,

(3) 根据 X 射线光强、探测器等的不同参数确定不同条件下相应的成像曝光时间;

步骤 S2, 相位衬度 CT 成像实验数据的获取, 在步骤 S1 所确定的成像条件下, 样品转台 (1) 每转动一个特定的角度后, 利用成像探测器获得一张样品的相位衬度投影像, 样品转台的范围可为 180° 、 360° 或其它任意角度, 最终获得相应张数的相位衬度二维投影像, 在所述的装置中, 确定好不同成像条件下的曝光时间后, 在程序中输入样品需转动的总角度和转动步长, 确定好数据在计算机上存放的路径后, 整个数据采集过程即可自动运行直至数据采集过程结束;

步骤 S3, 相位衬度成像实验数据的重建, 以衍射增强相位衬度成像或同轴相位衬度成像的相关理论作为算法基础, 对所获得的二维投影像进行处理即可重建样品的相位衬度 CT 断层像。

附图说明

图 1 是相位衬度成像中广泛应用的两种成像模式光路示意图。

图 2 是本发明中的样品转台示意图。

图 3 是本发明的同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像方法流程图。

具体实施方式

图 1 是相位衬度成像中广泛应用的两种成像模式光路示意图。其中, 图 1 (a) 是同轴相位衬度 CT 成像实验光路图, 图 1 (b) 是衍射增强相位衬度 CT 成像实验光路图。

在同步辐射相位衬度成像实验中, 由于光源是固定的, 后续的实验装置必须根据光源位置及方向调整, 所以在相位衬度 CT 成像 CT 实验中, 投影数据的采集只有通过实验样品的旋转而不是光源的旋转来完成。

本发明的同步辐射 X 射线相位衬度 CT 成像装置，所述的装置包括由单色器晶体、样品转台、分析晶体、电离室和成像探测器组成，在衍射增强相位衬度 CT 成像中，单色器晶体、样品转台、分析晶体、电离室和成像探测器顺序排列在光路上；在同轴相位衬度 CT 成像中，单色器晶体、分析晶体、样品转台、电离室和成像探测器依次排列在光路上；电离室的作用是作为 X 射线强度的监测设备，电离室测得的 X 射线光强以光电流的形式通过微静电计实时显示。

图 2 是本发明中的样品转台示意图。转台 1、转台 2、转台 3 分别对应于 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 ，平动 1、平动 2 分别对应图中 P1 和 P2。

本发明的样品转台由三个转台和两个平动组成，三个转台中，转台 1 (ω_1) 的作用是转动固定在转台 1 上样品，是 CT 实验过程中的主要转台；转台 2 (ω_2) 用来调整样品相对于从单色器晶体出射的 X 射线的方位以满足不同成像条件的需要，因为转台 1 固定在转台 2 上，所以转台 2 转台时，固定于转台 1 上的样品相对于入射 X 射线的方位将随转台 2 变动（例如，通过转台 2 可实现样品转轴由水平转台变为竖直转台）；转台 3 (ω_3) 用来调整样品台相对入射 X 射线的方位以保证 X 射线对样品的正入射，转台 3 转台时，固定于转台 3 上的转台 2 随转，固定在转台 2 上的转台 1 同时随转以实现 X 射线对样品的正入射，两个平动中，平动 P1 用以实现样品台相对于 X 射线高度位置的调节，平动 P2 用以实现样品台相对于 X 射线水平位置的调节。

此外，为避免同步辐射 X 射线入射到金属部件上带来的强散射的影响，转台 2 的中央通过 X 射线的部位设计为一个足够大的 X 射线通道；样品转台（转台 1）的转动轴要有足够高的同心稳定性以满足 CT 成像分辨率的要求。

图 3 是同步辐射 X 射线相位衬度成像 CT 方法流程，其具体步骤如下：

步骤 S1，不同成像模式下相位衬度成像条件的确定：

(1) 在衍射增强相位衬度 CT 成像实验中，根据样品所需的成像条件和双晶摇摆曲线上的相应位置的关系，确定在单色器晶体和分析晶

体之间的夹角，

(2) 在同轴相位衬度 CT 成像实验中，根据不同样品确定合适的样品和探测器的距离以获得最佳的成像效果或得到所需的信息，

(3) 根据 X 射线光强、探测器等的不同参数确定不同条件下相应的成像曝光时间；

步骤 S2，相位衬度 CT 成像实验数据的获取，在步骤 S1 所确定的成像条件下，样品转台 (1) 每转动一个特定的角度后，利用成像探测器获得一张样品的相位衬度投影像，样品转台的范围可为 180° 、 360° 或其它任意角度，最终获得相应张数的相位衬度二维投影像，在所述的装置中，确定好不同成像条件下的曝光时间后，在程序中输入样品需转动的总角度和转动步长，确定好数据在计算机上存放的路径后，整个数据采集过程即可自动运行直至数据采集过程结束；

步骤 S3，相位衬度成像实验数据的重建，以衍射增强相位衬度成像或同轴相位衬度成像的相关理论作为算法基础，对所获得的二维投影像进行处理即可重建样品的相位衬度 CT 断层像。

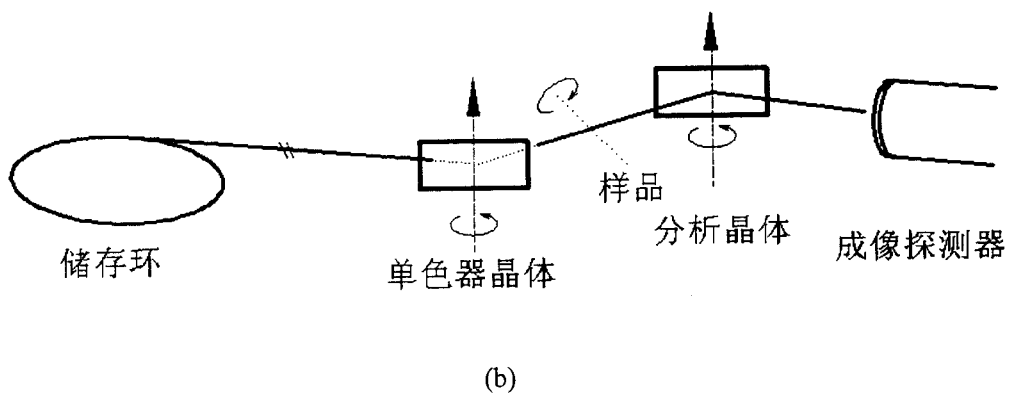
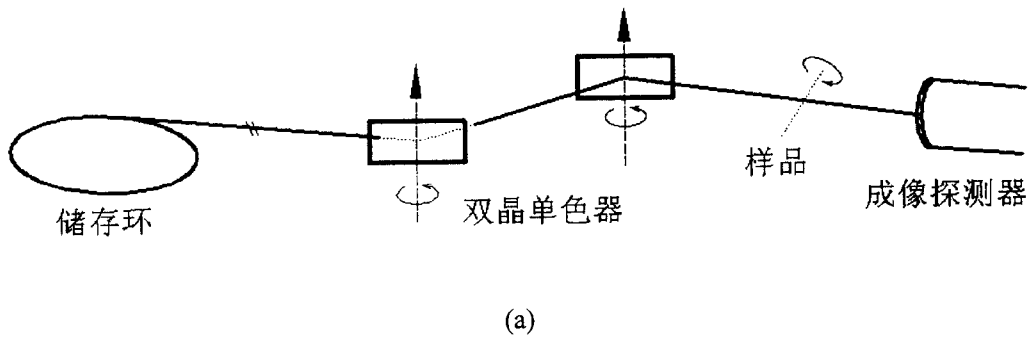


图 1

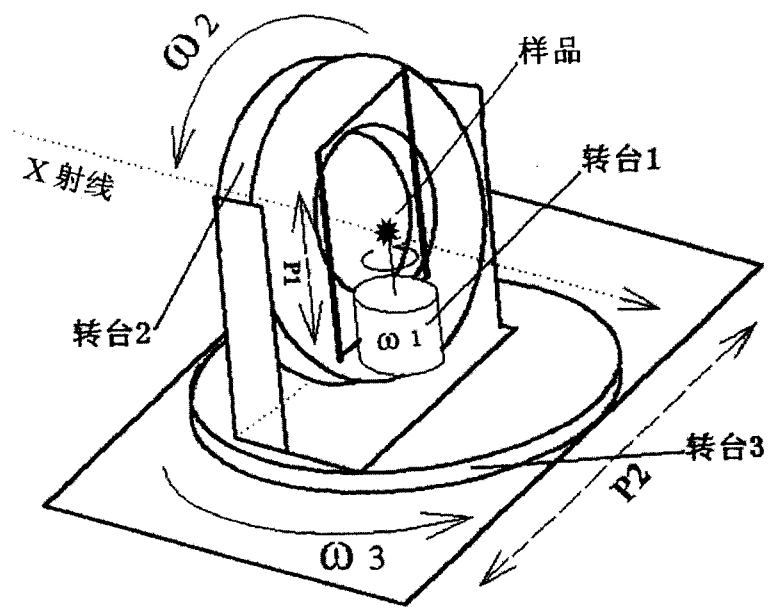


图 2

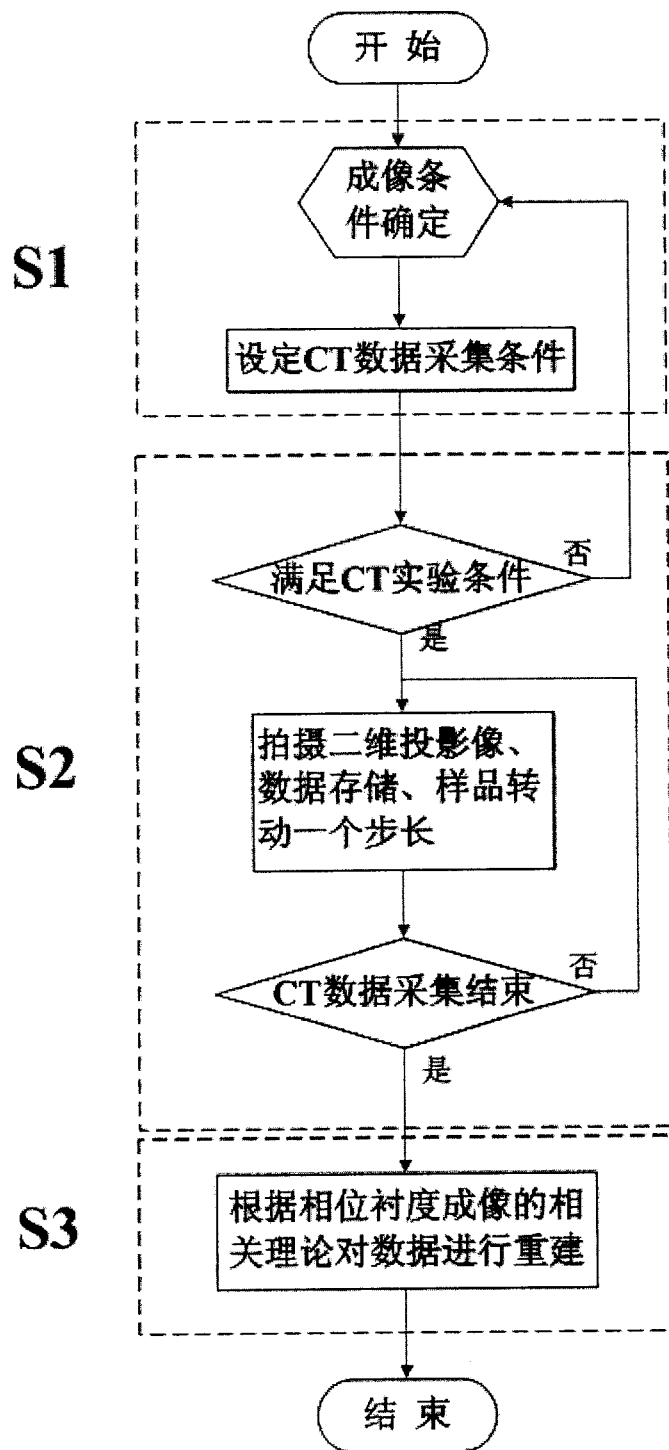


图 3