



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103842800 B

(45) 授权公告日 2016. 04. 20

(21) 申请号 201280048265. 8

G01N 21/93(2006. 01)

(22) 申请日 2012. 09. 26

(56) 对比文件

(30) 优先权数据

13/249, 468 2011. 09. 30 US

JP 2004003925 A, 2004. 01. 08,

US 6850857 B2, 2005. 02. 01,

CN 102105781 A, 2011. 06. 22,

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2014. 03. 31

US 2011141269 A1, 2011. 06. 16,

US 2011170762 A1, 2011. 07. 14,

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2012/057167 2012. 09. 26

CN 102171549 A, 2011. 08. 31,

CN 101194199 A, 2008. 06. 04,

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/049090 EN 2013. 04. 04

审查员 陈时靖

(73) 专利权人 3M 创新有限公司

地址 美国明尼苏达州

(72) 发明人 贾斯汀·W·威廉

(74) 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限

责任公司 11219

代理人 梁晓广 关兆辉

(51) Int. Cl.

G01N 21/27(2006. 01)

G01N 21/89(2006. 01)

B65H 20/00(2006. 01)

B65H 43/00(2006. 01)

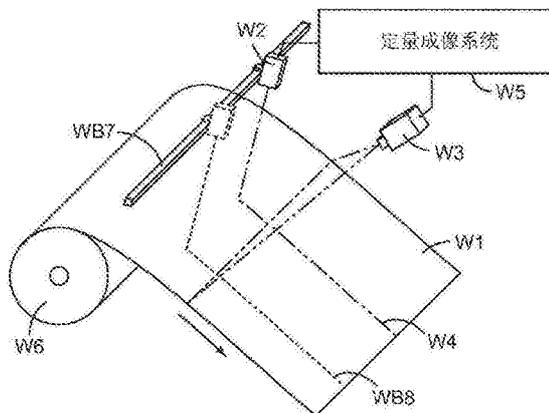
权利要求书1页 说明书20页 附图7页

(54) 发明名称

幅材检测校准系统及相关方法

(57) 摘要

本发明公开了使用来自校准的点传感器的数据、使用基于频谱的分析来校准幅材检测系统的系统和方法。



1. 一种针对用于监测幅材材料的幅材检测系统的校准系统,所述校准系统包括:

至少一个幅材传感器,被构造成接收指示所述幅材材料的第一横向幅材部分的第一特性的信号,并且提供以校准的测量单位来表示所述第一特性的第一响应信号,所述第一横向幅材部分小于所述幅材材料的宽度;

所述幅材检测系统,被构造成接收指示所述幅材材料的第二横向幅材部分的所述第一特性的信号,并且提供表示所述第二横向幅材部分的第二响应信号;以及

传感器至检测系统校准模块,所述校准模块将所述第一响应信号和第二响应信号转换成频域,并对于所关注的第一频率范围,分析所述第一响应信号和第二响应信号的频谱以提供第一频率范围校准模型,然后将所述第一频率范围校准模型应用到所述第一频率范围中的所述第二响应信号,以将所述第一频率范围中的所述第二响应信号转换成所述第一响应信号的测量单位。

2. 根据权利要求 1 所述的校准系统,其中所述幅材检测系统为行扫描摄像机,并且所述幅材传感器为点传感器。

3. 根据权利要求 1 所述的校准系统,其中所述第二横向幅材部分包括所述第一横向幅材部分。

4. 根据权利要求 1 所述的校准系统,其中所述第二横向幅材部分为所述幅材材料的整个宽度。

5. 根据权利要求 1 所述的系统,其中向所述频域的转换使用傅里叶变换或小波变换。

6. 根据权利要求 1 所述的校准系统,其中所述分析包括对指示所关注的所述第一频率范围内的所述第一响应信号和所述第二响应信号的频谱的数据应用递归加权最小二乘算法。

7. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述幅材检测系统位于所述幅材传感器的幅材下游或幅材上游。

## 幅材检测校准系统及相关方法

### [0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本专利申请涉及美国专利申请 No. 12/133, 487 (现为美国专利 No. 7, 773, 226) 和美国专利申请 No. 12/786, 975 (现为美国专利 No. 7, 957, 000), 两者的名称均为“Web Inspection Calibration System and Related Methods”(幅材检测校准系统及相关方法)。

### 背景技术

[0003] 某些幅材属性适合于光学检测。这些属性或者是可直接观察的(如透射率或者如刮痕或其他外观缺陷之类的偏差),或者是与某个可光学观察的属性充分相关以致可测量的。例如,对于非织造幅材,与可光学观察属性相关但不可直接观察的属性为其隔热能力,所述隔热能力通常是利用导热率来测定的。可通过监测从已知温度梯度的一端到另一端的热流率来测定幅材的导热率,但这种测定难以用于在线生产型环境中。然而,如果幅材的构造为透光提供条件,则其导热率可能与透过它并且进入一系列光学传感器的光的亮度相关。因此,可利用透过幅材的光的光学信号,并通过已知的光学感测技术来指示幅材的导热率,前提条件是所述光学信号可被校准到导热率单位。导热率仅为可通过光学检测技术来测定的属性之一例。举例来说,其他属性例如包括表面粗糙度、热扩散率、孔隙度、结晶度和厚度,举例来说,以及如光密度、透射率、反射率和双折射率的光学属性。

[0004] 定量检测方法(以及等级较低的定性检测方法)的问题在于构成幅材检测系统的一个或多个传感器的校准,以能够产生以被校准到某个已知标准的误差范围之内的测量单位给出的关于所关注幅材属性的数据。

### 发明内容

[0005] 本文公开了用于校准幅材检测系统的系统和方法。更具体地说,公开了用于实时、在线校准幅材检测系统的系统和方法。通常,这些系统和方法涉及来自幅材检测系统的幅材上游(或幅材下游)的传感器的使用,所述传感器被构造成以校准单位来精确地测定所关注的幅材属性。由该传感器提供的信息被转变为频域(使用傅里叶变换或类似方式),所述频域对于由幅材检测系统(例如摄像机)提供的信息未加改变。提供了所关注的频率范围,并且为该频率范围创建了相关模型。该校准模型然后被用来使幅材检测系统的(在频率范围内的)校准常数能够被实时或接近实时地算出,最常出现的情况是无需中断幅材的正常制造过程。在各个实施例中,此校准系统可以不需要与幅材检测系统校准的传统方法相关联的停机时间或资源密集测试。而且,通过使用本文所公开的系统和方法,幅材检测系统可被构造为以工程单位提供有关幅材属性的定量信息。在一些实施例中,定量信息可用来比较不同生产线上的幅材加工的属性、或比较多个幅材检测系统上的数据、或分析同一幅材检测系统在单次或多次运行上的性能。

### 附图说明

- [0006] 图 1 为校准系统的示意图。
- [0007] 图 2 为构成定量成像系统的功能模块的示意图。
- [0008] 图 3a 为示出可用于在时间域内校准幅材检测系统的高级过程的流程图。
- [0009] 图 3b 为示出可用于在频域内校准幅材检测系统的高级过程的流程图。
- [0010] 图 4 为具有装于横向幅材转移装置上的传感器的校准系统的示意图。
- [0011] 图 5 为校准系统的示意图,其中幅材检测系统包括两个行扫描摄像机。
- [0012] 图 6a 和 6b 为示出频谱分析中涉及的各种参数的图线。
- [0013] 图 7 为示出频谱分析的三种图线和高级过程视图的图形。

### 具体实施方式

[0014] 幅材检测系统包括一些定量和定性实施例。定量检测系统可产生关于被校准到已知标准的单位内(例如工程单位内)的幅材属性的检测信息。这是与定性检测系统相对比,所述定性检测系统注重于幅材属性随时间推移的相对变化。定性检测系统或许足以识别表示特定加工缺陷(诸如颤痕、模痕、斑点和其他典型的非均匀性)的信号模式。然而,由于定性检测系统不依赖于绝对目标值或校准过程,因此它们不能产生可再现度量标准(或一套度量标准),其可用来让操作员对幅材加工是否处于控制下或者对于加工的改变是否已经从一道加工到下一道加工减少了幅材的非均匀程度的情况进行跟踪。

[0015] 必须定期地校准用于检测基于幅材的产品的传感器和成像系统。具体的校准计划表取决于诸如被检测的幅材类型以及受检测的所关注幅材属性这样的项目。另外,作业环境中的环境条件(温度、湿度和粉尘量等)以及生产和维护安排会使检测系统偏离校准值,因此需要每隔几天、几小时或可能更频繁地进行校准。对用于幅材检测的光学感测设备进行校准的方法一般归属于若干类别中的一种或多种。

[0016] 首先,用于校准幅材检测系统的“离线”方法需要在幅材检测系统暴露于已知样品或已知样品集时记录由该系统产生的信号(光学或其他信号)。就光学检测系统而言,该方法经常通过将一系列样品布置在检测系统的光路内(有可能在多个位置上)来完成。这种离线方法要求将正常的幅材加工或生产中断,同时样品被置于通常由幅材占据的位置内。这种离线方法的一种改型是将幅材检测系统(包括照明装置)移至离开幅材的位置,通常为邻近生产线且在幅材路径之外,其中可记录与标准样品相关联的感测响应,并因此可校准幅材检测系统。校准后,将幅材检测系统恢复到其幅材检测位置。虽然检测系统在离线校准时可进行幅材加工,但如果没有第二检测系统(该系统价格昂贵)存在,则这种处理可能不受控制。

[0017] 第二方法试图在正常幅材生产进行的同时获取校准数据,即用所生产的幅材来获得校准数据,尽管有仍然未知的属性。为了如此进行,检测系统记录得自幅材的第一部分的数据,所述幅材的位置或者被标出或者以其他方式为幅材搬运系统所知。当幅材的第一部分到达卷绕机时,其通常作为“卷端”样品从幅材的剩余部分切下,并送往质量管理实验室。如果可获得精确的位置信息以允许当样品通过检测站时使样品上的位置与检测系统所存储的数据对准,则可使用离线质量管理仪器来为检测系统提供校准数据。这种方法是资源密集的,要求谨慎注意样品对准以获得良好的数据,并且在样品开始通过检测站的时点和校准成为可用的时点之间有相当大的延迟。

[0018] 第三种方法涉及上述两种方法的某种组合。例如,可以将已知样品布置在正常的幅材路径的边缘之外,但位于检测系统观察到的区域之内。这在产品仍然运行的同时为最外侧的传感器元件提供持续进行的校准数据。然而,将校准值传送到正常幅材(其属性未知)上的幅材检测系统传感器需要知道内部传感器元件的响应和外部传感器元件的响应之间的关系,并且这些响应必须在所有时间彼此保持固定。在另一个实例中,一些校准样品被暴露于检测系统观察区域的各个部分,从而给幅材的未知属性上附加已知的偏置。这对于在校准期间幅材的统计变化施加了一些限制,并且也改变了检测系统可能必须工作的范围。

[0019] 上述方法所需的检测系统的多点校准是耗时的,并且可能需要相对大量的操作人员、对自动校准系统的大笔投资或者这两者都需要。而且,对于构成检测系统(例如,用于向摄像机提供照明的光源的强度分布或激光扫描器中的光源和接收光学部件之间的对齐)的组成部分作出的改变,使得(一些)进一步的校准成为必要。

[0020] 图 1 示出了幅材处理系统 W6 中的校准系统的一个实施例的示意图。幅材处理系统 W6 可以为任何用于制造、转换、加工或检测幅材 W1 的幅材处理系统。幅材 W1 可以为任何显著宽于其能够经受自动检测的厚度的材料。例如,幅材 W1 可为光学薄膜、电池薄膜材料、纸张、一种织造材料、一种非织造材料、研磨材料、微结构化薄膜、多层薄膜、复合膜、印刷和图案化的幅材、箔或板材产品(如轧制钢材)。幅材 W1 可具有一个或多个涂层,比如湿涂层。另外,幅材 W1 可以是为由多个片模制形成的或模制到幅材上而形成的幅材。

[0021] 将幅材 W1 从左向右移动,这可能作为制造或转换过程的一部分。传感器 W2 显示为设置在幅材检测系统 W3 的幅材上游,但其也可以设置在幅材检测系统 W3 的幅材下游。在一个实施例中,传感器 W2 甚至可以被设置成使得能够接收来自与幅材检测系统 W3 相同的幅材区域的信号。在这种实施例中,可针对从幅材区域发出的信号使用一个或多个分束器(前提条件是传感器 W2 和幅材检测系统 W3 两者均基于光学信号)。

[0022] 在一个实施例中,传感器 W2 是单读出传感器,其被构造成接收从幅材 W1 的单通道 W4 发射的检测信号,然后产生表示此响应的信号。传感器 W2 可为任何类型的传感器,例如,其可为光学传感器(对(例如)可见光、紫外线、红外线或近红外线敏感,或使用太赫兹成像技术)、或被构造成接收某种类型的电磁辐射的传感器、或被构造成接收声波的传感器。传感器 W2 被校准为可按校准单位精确地测定幅材 W1 的属性。传感器 W2 不必为单点传感器,但向下述幅材检测系统的校准传送使用单数据流。在传感器 W2 不是单点传感器时,可以通过将来自构成传感器 W2 的若干相邻感测元件(摄像机的像素、电容式传感元件等等)的信号平均来获得单数据流。然而,对于构成传感器 W2 的传感元件的数量没有严格的限制,传感器 W2 中的元件越多,则确保它们都被校准到相对于彼此相同的响应就变得越困难。

[0023] 在一个实施例中,幅材检测系统 W3 为行扫描摄像机,其至少接收关联于与单输出传感器 W2 相同的单通道 W4 以及除通道 W4 之外的通道的检测信号。行扫描摄像机相对便宜和普遍,但如本文所述的相同或类似的校准技术和系统能够适应其他类型的检测系统。例如,除了行扫描摄像机,幅材检测系统 W3 也可包括激光扫描器、时延积分摄像机、区域扫描摄像机、其他阵列传感器或这些系统的某种组合。幅材检测系统 W3 可从小于全宽的幅材 W1 的宽度中接收信号。

[0024] 传感器 W2 定期地相对于已知标准进行校准。传感器 W2 校准的时间安排取决于传

感器漂离校准的倾向性和特定的幅材加工环境所要求的公差。例如,用作传感器 W2 的光密度计可被构造为可测定幅材在特定波长带内的透光率,但是当光源老化时,其光谱输出和 / 或功率电平可能会改变以至于影响来自传感器的数据的精度。可使用已知的标准或标准集来定期地检测这种传感器的响应来修正这种漂移。

[0025] 与诸如行扫描摄像机之类的幅材检测系统的校准相比,传感器 W2 的校准相当琐碎,在一个实施例中这种校准通过将单输出传感器摆离生产线来接收已知标准或标准集的信号而实现。也可以选择,在接近生产线的质量管理实验室用已知技术来校准传感器 W2。作为另一种选择,可将传感器 W2 送至制造商或供应商的实验室或者送至甚至诸如国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology) 之类的实验室来校准。在传感器 W2 的校准期间,幅材检测系统 W3 可继续以先前校准的状态来检测幅材。在一些情况下,最好给幅材输送系统 W6 配置多个(2 个、3 个或甚至更多个)单输出传感器,使得在任何给定时间至少有一个在线并从在通道 W4 中通过的幅材接收信号,并使得在任何其他单输出传感器被离线校准的同时至少有一个单输出传感器接收校准信号(反之亦然)。

[0026] 在一个实施例中,传感器 W2 被构造为用于测定与幅材检测系统 W3 相同的属性。例如,在一个实施例中,传感器 W2 和幅材检测系统 W3 这二者均可被构造为响应人眼可见范围内的检测信号(在这种情况下为光)。然而,作为另外一种选择,幅材检测 W3 可被构造为用于测定与由传感器 W2 测定的属性不同但是与其强相关的属性。强相关属性的一个例子是,其中传感器 W2 通过超声换能器来测定幅材的厚度,而幅材检测系统 W3 为对于可见光谱中的光敏感的行扫描摄像机。与可见光谱中的光强相关的幅材属性的另一个例子为上文所述的导热率(至少在一些情况下)。

[0027] 定量成像系统 W5 可以是具有存储器和中央处理单元(其接收来自传感器 W2 和幅材检测系统 W3 的输入并分析该输入以应用,或在一些实施例中确定,幅材检测系统 W3 的校准模型)的专用或通用计算机。校准模型是一个或多个限定数学关系的数值或算法,所述数学关系用于将来自幅材检测系统 W3 的输出信号从原始数据转变为校准单位。本文将描述两个一般的校准模型。第一个校准模型为“传感器 - 检测系统校准模型”,其限定了传感器 W2 和与传感器 W2 相同的通道 W4 相关的检测系统 W3 的一部分之间的数学关系。第二个校准模型为“横向幅材校准模型”,其限定了构成检测系统 W3 的横向幅材观察区域的通道之间的数学关系。

[0028] 定量成像系统 5 通过下述方式来确定横向幅材校准模型:处理与通道 W4 (该通道被校准到点传感器 W2 并经由该传感器校准到检测系统校准模型)相关的数据集和与除通道 W4 之外的一个或多个通道相关的数据集以及用于描述检测系统的横向幅材信号分布的数据。

[0029] 定量成像系统 W5 在图 1 中示为单个系统,但在一些替代实施例中,它可以由多个共同联网的或单独立立的计算机构成,所述计算机执行支持本文所述的校准技术的各种软件算法。

[0030] 图 2 为示出一个示例性实施例中的构成定量成像系统 W5 的功能模块的示意图。图 2 是相对于一组分立的功能模块来描述的,但本领域内的技术人员将会理解本描述仅用于说明性目的,具有相同或类似功能的系统可通过多种方式来构建。图 2 中示出的功能模

块各自可与任一其他模块通信;这些模块中的任何一个可用硬件或软件或者它们的某种组合实现。用户 P1 为幅材检测系统 W5 的任何用户。用户 P1 可为负责对幅材 W1 进行质量控制的人工操作员。用户 P1 主要通过键盘、鼠标以及某种显示器(图 2 中均未示出)与定量成像系统 W5 交互。用户接口模块 P5 可在显示器上生成图形用户界面或命令行型界面,这使得用户 P1 既可向定量成像系统 W5 提供信息,也可接收来自定量成像系统 W5 的信息。在一个实施例中,用户接口模块 P5 通过访问由操作系统(例如通过美国华盛顿州雷德蒙德市的微软公司(Microsoft Corporation, Redmond, Washington)以商品名“Windows”上市的一种操作系统)提供的功能而在显示器上生成窗口。可同样地使用其他操作系统。用户接口模块 P5 依次提供并接收来自其他功能模块的数据和命令。对于自动化幅材加工控制或幅材监测系统,可存在其他接口(图 2 中未示出)。

[0031] 输入/输出模块 P9 与传感器 W2 和幅材检测系统 W3 连接。输入/输出模块 P9 接收来自传感器 W2 和幅材检测系统 W3 的数据流。在一个示例性实施例中,根据定量成像系统 W5 的特定实施方式,输入/输出模块 P9 还向传感器 W2 和/或幅材检测系统 W3 提供命令和控制信息。例如,在本公开的其他位置描述了在其上附连传感器 W2,使得传感器 W2 可横向幅材移动的横向幅材传送装置的实施例。在这样的实施例中,输入/输出模块 P9 可提供指示这种横向幅材移动的控制信号。另外,输入/输出模块 P9 可提供其他信息以总体上控制传感器 W2 或幅材检测系统 W3。由输入/输出模块 P9 接收的输入可直接提供给其他模块或保存在数据库 P8 中以用于后续分析。

[0032] 数据库 P8 为在计算机存储器(例如随机存取存储器或硬盘驱动器或它们的某种组合)中实现的数据存储区。其可仅为计算机存储器、平面文件或(例如)由美国华盛顿州雷德蒙德市的微软公司(Microsoft Corporation, Redmond, Washington)以商品名“SQL Server”上市的数据 库。数据库 P8 管理构成定量成像系统 W5 的任何功能模块的数据存储需求。从传感器 W2 和幅材检测系统 W3 发出的数据流以及构成校准模型的数据可存储在数据库 P8 中。

[0033] 幅材检测系统控制模块 P7 经由输入/输出模块 P9 向幅材检测系统 W3 提供命令和控制信号。由幅材检测系统控制模块 P7 支持的具体功能主要取决于由选用于实施的具体幅材检测系统 W3 提供的命令和控制接口。例如,可构成幅材检测系统 W3 的一些行扫描摄像机具有应用程序编程接口,以支持特定的一组功能;这种功能将存在于图 2 中的幅材检测系统控制模块 P7 内。如果幅材检测系统 W3 有需要转换的输出(例如,需要转换为单位的原始电压),则在幅材检测系统控制模块 P7 中实现转换手段。

[0034] 经必要的变更后,传感器控制模块 P6 之于传感器控制模块 P6 的关系正如幅材检测系统控制模块 P7 之于幅材检测系统 W3 的关系。

[0035] 传感器至检测系统校准模块 P4 分析来自传感器 W2(经由输入/输出模块 P9 提供并且可能存储在数据库 P8 中)和幅材检测系统 W3 的数据,并且建立传感器至检测系统校准模型,使得关联于与传感器 W2 相同的横向幅材通道的、来自幅材检测系统 W3 的输出被转换为传感器 W2 的输出的校准单位。下面提供此转换的实例。

[0036] 横向幅材校准模块 P3 确定(如果需要)并应用由传感器至检测系统校准模块 P4 向由幅材检测系统 W3 检测的幅材 W1 的其他通道提供的校准模型,使得来自构成检测系统 W3 的观察区域的所有通道的数据相对于通道 W3 进行校准。下面提供这种校准的一些实例。

[0037] 参照图 2 描述的功能模块可具有与其一般属性一致但在本公开中未提及的其他功能。通常,定量成像系统 W5 中存在不与图 2 中列出的功能模块明确地相关的、在其他部分描述的功能。例如,定量成像系统 W5 中通常有将从传感器 W2 和幅材检测系统 W3 发出的信号对准的功能。

[0038] 现在将对图 3a 和图 3b 进行描述。它们总共描述了两种校准幅材检测系统的方法,前者基于在时间域或幅材下游空间域内将通道同步,而后者基于在频域内开发校准模型。

[0039] 图 3a 是示出可用于校准在图 1 中所示的幅材检测系统 W3 的高级过程的流程图。从传感器 W2 接收第一信号响应,在此实例中所述传感器位于幅材检测系统 W3 的幅材上游侧,并且与幅材线 W4 的特定“通道”相关 (F1)。在图 3 (a 和 b) 的上下文中,该通道应当被称为通道 X。幅材检测系统 W3 可检测幅材的整个宽度(或其某些部分)(即,接收来自幅材的整个宽度或其某些部分的信号),但至少检测通道 X (F2)。来自幅材检测系统 W3 的、与通道 X 相关的信号在图 3 中称为第二信号响应。将第一信号响应与第二信号响应同步 (F3),使得来自单输出传感器 W2 和幅材检测系统 W3 的通道 X 部分的信号代表幅材 W1 的相同区域。如果单输出传感器 W2 和幅材检测系统 W3 之间的距离以及幅材的速度是已知的,则同步可通过确定某点沿着幅材 W1 从单输出传感器 W2 到达幅材检测系统 W3 所消耗的时间而实现。可使用该时间延迟来定义偏移,然后可将该偏移应用到从传感器 W2 或幅材检测系统 W3 发出的各自的数据流,从而对所述数据流进行时间同步。作为另外一种选择,可使用一个或多个编码器触发对来自传感器 W2 和检测阵列 W3 的点进行采样。所述一个或多个编码器在幅材的固定空间间隔处而不是固定时间间隔处触发数据采集,使得所述两个数据集在空间上同步。

[0040] 当偏移值不能通过测量(或计算)传感器和幅材检测系统之间的时间延迟来确定时,可使用数据分析技术(例如互相关)确定将从传感器 W2 和幅材检测系统 W3 发出的数据流时间同步所必需的偏移值。如果来自传感器 W2 和幅材检测系统 W3 通道 X 部分的数据流是相似的,使得线性互相关方法足以确定数据集之间的不一致,则这些技术是可行的。在一些情况下,将来自邻近幅材检测系统 W3 通道 X 的传感元件的数据流与来自传感器 W2 的数据流进行比较,从而为通道 X 寻找最佳的横向幅材对齐。幅材检测系统 W3 上具有最佳相关性的横向幅材空间位置可能与传感器 W2 的实际横向幅材位置稍有不同,原因在于幅材转向,或甚至可能是幅材拉伸或收缩。在其他情况下,当幅材检测系统 W3 的横向幅材空间分辨率具有比由传感器 W2 感测的通道 X 更细的尺度时,从幅材检测系统 W3 的若干相邻元件输出的信号可进行组合,以在执行互相关之前更好地反映通道 X 中的材料。

[0041] 在某些实施例中,或许有利的是在互相关前作变量变换,以在数据集之间获得线性关系,特别是在存在传感器的响应函数的数学模型的情况下。在其中在数据集之间存在未知的、可能非线性的关系的其他实施例中,可使用在本领域中公知的更一般的相似性度量,例如互信息。该过程与下述内容的类似之处在于对若干时移值计算相似性度量,并且通过选择使相似性度量成为最大的时移来对齐数据集。

[0042] 下面的公式示出了一种用数学手段确定时移值以使数据流同步的方法。下面的公式用于在线性回归之前的非归一化互相关。

$$[0043] \quad r(x_i, n) \equiv \sum_m f(x_i, y_m) g(x_i, y_{m+n})$$

[0044]  $f$  为在特定的横向幅材位置上具有工程单位的经校准的单输出传感器数据的矢量,  $x_i$  和  $g$  为由该位置处的适当加权的阵列传感器数据算出的对应矢量。可使用在固定采样距离的编码器触发采集, 在时间或在空间上离散地采样来自传感器 W2 和与通道 W4 相关联的幅材检测系统 W3 的数据集。将采样结果存入用于幅材的有限的幅材下游部分的计算机存储器(例如定量成像系统 W5 的计算机存储器)中, 以计算总和。可在执行互相关前将数据平均中心化, 并且也可使用多种公知的归一化方法的任何一种。两个数据集在这种方法中具有相同数量的样本(其可表示以相同的速率采样的传感器和幅材检测系统, 或者它可以表示使用统计外推法来缩小或扩展所述数据集之一)。在一个实施例中, 用于传感器 W2 和幅材检测系统 W3 的采样率是相同的, 并且传感器和幅材检测系统均解析所关注属性中的相同特征。互相关输出的峰值

$$[0045] \quad n^*(x_i) = \arg \max_n \{r(x_i, n)\}$$

[0046] 识别由于幅材在单输出传感器和阵列传感器的位置之间的通过时间导致的在两个数据集之间的时移(反之亦然)。然后可将该时移施加到数据流中以实现时间同步。

[0047] 也可结合使用人工和统计方法来确定施加到数据流上以实现同步的时移值。例如, 在幅材上的点从传感器 W2 向幅材检测系统 W3 移动所需的时间估计值可用于建立窗口, 在该窗口中使用互相关来从互相关结果的峰值获得更精确的数据对齐。相关系数强度也可用来表示传感器误差, 因为在传感器和幅材检测系统之间的幅材下游侧距离越远, 幅材转向对相关减少的影响就越大。

[0048] 继续参考图 3a, 在数据流对齐的情况下, 接下来由定量成像系统 W5 来分析第一和第二信号响应以产生校准模型, 该校准模型定义了传感器 W2 的相应信号响应(此附图中称为第一数据流)和与作为传感器 W2 的同一通道 W4 相关联的幅材检测系统 W3 的区域(此附图中称为第二数据流)之间的关系(步骤 F5)。

[0049] 本文描述的第一个示例性技术使用线性回归来确定第一和第二数据流之间的关系, 并且因此确定相关因子。已发现线性回归非常适于在测定属性的有限范围上具有类似响应函数的传感器。其他技术可能更好地适用于传感器和幅材检测系统响应的其他组合。例如, 当处理较宽范围的测定属性时, 可以在数据集之间的固定间隔(例如, 在通过某个时间量或某个幅材距离后)上进行局部线性回归或由测定属性的幅值所确定的那样自动地进行局部线性回归。如果已知非线性参数模型与数据集相关, 则可使用非线性最小二乘法来拟合该模型的参数。就未知模型而言, 更一般的非参数方法是本领域中所熟知的。例如, 可以将核平滑器应用于与对齐的数据集相关的观察曲线, 以获得真实关系的非参数估计而不求助于任何先前的模型。

[0050] 用于在相邻的元件之间没有串扰的阵列传感器中的第  $i$  个元件的线性响应模型可写为:

$$[0051] \quad \hat{f}(x_i, y_j) = \alpha_1(x_i) \tilde{g}(x_i, y_j) + \alpha_2(x_i)$$

[0052] 其中  $\tilde{g}(x_i, y_j) = g(x_i, y_{j+n^*})$  是对齐的数据矢量, 并且  $\hat{f}$  是校准输出的估计矢量。目的是找到拟合系数  $\alpha$ , 这些拟合系数将来自校准传感器的测定值  $f$  和源自阵列传感器的第  $i$  个元件的数据的、由该模型预测的值  $\hat{f}$  之间的最小二乘误差最小化。

[0053] 因此, 设  $G$  为其第一列是在位置  $x_i$  上的对齐和加权的阵列传感器数据的矩阵, 并且  $f$  是由也在位置  $x_i$  上的经校准单输出传感器数据形成的单列矢量, 随后计算标量矢量  $\alpha$  以获得在最小二乘意义上的最佳拟合的线性比例和偏移值:

$$G_{j1}(x_i) = \tilde{g}(x_i, y_{j1})$$

$$[0054] \quad G_{j2} = 1 \quad (3a, b, c)$$

$$\alpha(x_i) = (G^T G)^{-1} G^T f$$

[0055] 这个标量矢量  $\alpha$  构成校准因子(在此实例中)。

[0056] 现在参见图 3b, 示出了第二个示例性技术的流程图, 该技术可用于建立第一和第二数据流之间的关系, 并因此建立一个或多个校准因子或校准模型。该第二个示例性技术涉及在频域中而不是在时间域或空间域中的计算。与时间/空间系列实施相关的一个缺陷(与频率分析相比) 归因于这样一个事实: 并非所有在传感器和摄像机数据集方面的改变均以完全一样的方式相关。例如, 在通常受制于材料性质和/或背景环境中的渐变的低频域中, 源自基于时间分析的相关模型可能不是那么精确。在频域中分析还摆脱了对强度与在时间域中进行相关分析所必需的基准信号之间的严格时间对齐的需求。在频域中, 数据流没有必要对齐, 而对于传感器和检测系统数据集两者而言, 与幅材的相同幅材下游长度相关的数据“窗口”必须被处理。

[0057] 这一概念可用假想的例子来说明。假设所关注的过程变化在变化范围内具有至少一些周期性重复的频率组成。过程操作员通常知道与特定过程变化相关的频率范围可能是多少, 这能够有助于该过程, 但是这种知识不是必需的。收集来自传感器 W2 和幅材检测系统 W3 两者的数据的相应幅材下游窗口(图 3b, 步骤 F10 和 F11)。将傅里叶变换操作应用于信号数据(来自传感器 W2) 和图像数据(来自检测系统 W3) 两者(步骤 F12)。可使用其他变换操作来代替傅里叶变换, 例如本领域公知的小波变换或滤波器组方法(全部调节到不同频率的滤波器阵列), 或拉普拉斯变换或 Z 变换方法。由于来自传感器 W2 的数据与来自幅材检测系统 W3 的通道 W4 像素数据高度相关, 所以此时若干处理操作均是可行的。可以沿横向幅材方向将图像数据裁切成单像素列, 在这种情况下可将 1D 变换应用于两个数据流。或者, 可以简单地将通道中的像素列一起平均为单数据流, 接着再将 1D 变换应用于两个数据流。但是本领域内的技术人员将认识到上述列平均化操作是应用于图像数据通道的一种 2D 变换的形式。所以一般情况是将特定的 2D 卷积核应用于图像数据通道, 接着进行图像数据的转换和对幅材下游频率数据的选择。在所有这些图示中, 已转换的数据集将随频率的变化显示变幅, 通常称为频谱。傅里叶变换操作对于本领域内的技术人员来说是熟知的, 且有关如何选择数据窗口大小和进行该操作的详细信息将会为技术人员所知。描述 1D 和 2D 变换的合适参考文献为 Ronald Bracewell, *Fourier Transforms and Its Applications* (McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> edition, 1999) (Ronald Bracewell, 《傅里叶变换及其应用》, 麦格劳-希尔出版社, 第 3 版, 1999 年)。

[0058] 如果在过程中有在 W2 和 W3 信号中可观察到的周期性波动, 那么这两个光谱将会在振幅谱中的相同频率处显示尖峰。然后将所关注的频率范围挑选出来(图 3b, 步骤 F13)。这可以手动完成, 例如通过具备一些加工条件知识的操作员完成, 所述加工条件可产生某些频率的幅材下游异常现象(参见例如图 7 中所示的峰值振幅); 或自动完成, 例如通过在算

法上识别与点传感器和幅材检测系统的频谱相关的频率峰值区域。如果是在算法上完成,则采集自过程中别处的数据可提供关于许多不同的潜在原因(如,卷筒旋转频率、张力变化的频率组成,等等)的周期性循环的信息。过程控制器能够搜寻出该信息,确定适当的波段来包封周期性波动的可能原因,并将所关注的频段指定到定量成像系统。在围绕任何这些尖峰的狭窄频率范围(频段)内,期望在与相同的输出幅材属性相关的这两个数据流之间保持在时间上稳定的(即,在幅材下游空间上稳定的)相关性。在另一个实施例中,可以使用峰值检测算法,其例如使用振幅的导数识别峰并将阈值应用于峰的振幅。技术人员将容易领会到可使用其他方法来识别通用的频段。然后可使用传感器光谱和幅材检测光谱的相对振幅来建立在特定特征频率范围处的这两个数据集之间的关系,并因此建立校准模型。若干个不同的频率范围可能是相关的,并且对于不同的范围来说该相互关系可能有所不同。事实上,预期的是该现象靠近光谱的低频端,因为这些值相当于上述线性回归方法中的常数值。本质上讲,来自频谱的两个相对振幅使得两个信号集之间能够确立稳定关系,此为相关模型的基础。关注相同频率内的数据通常会改善相关模型的信噪比,因为其专注于重复变化并从而大大降低了影响两个信号流的随机噪声分量。

[0059] 随着在某些频率或频率范围处的传感器 W2 与成像系统 W3 之间的关系得以建立,下一步骤为开发相关模型(图 3b,步骤 F14)。

[0060] 下面将使用其中可见光透射通过幅材的应用示出模型的开发过程,但是本领域的技术人员将会知道,可针对图像源自通过或自幅材透射、反射、折射、散射等的其他形式的辐射的情况使用类似的方法。开发相关模型中的第一步涉及使透射通过幅材的可见光成像,在该过程中,如果需要进行时程分析,则将图像的每个线条与参考时钟同步地捕获,或者如果需要进行空间分析,则将图像的每个线条与幅材耦合的编码器同步地捕获。横向幅材宽度可被细分为许多子区域,每一个子区域都将产生离散的测量结果。在每个子区域内,将 2D 核应用于像素数据。可将核的形式选择为突出或弱化数据中的某些模式,但是在许多情况下,选择仅仅是与点传感器的空间响应相对应的加权平均数的核就足够了。这种核的最简单情况为沿着每一行将列数据进行平均以创建逐行信号(其形成来自检测系统的幅材下游数据流),但是本领域的技术人员将意识到其他加权核也是可用的,例如用于点传感器的圆形高斯核,其具有圆形的测量体积。这样的操作实际上是沿着横向幅材方向的低通滤波器,其除去了来自诸如模拟像素噪声的源头的一些随机噪声以及幅材材料中的颗粒度或孔隙度,并为每个子区域提供了相对干净的幅材下游信号。一旦这些强度信号以任意亮度单位获得,就需要应用转换以使用厚度或密度的实体单位来表达后续的分析结果。

[0061] 假定一种形式的比尔定律来模拟光透射通过所关注产品的过程。

$$[0062] \quad I = I_0 e^{-\alpha \cdot z}$$

[0063] 变量  $I_0$ 、 $\alpha$  和  $z$  分别为幅材背面上的入射强度、材料的消光系数以及材料的厚度。所有这些变量通常是所用的光的波长的函数,但是将照明波长范围内的积分并入这里所列的变量中。使用消光系数涵盖那些涉及光的散射以及光的吸收的情况,因为消光截面可以表示为散射和吸收过程的总和。描述了这些相关性的参考文献可见于 Craig F. Bohren and Donald R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (Wiley, 1<sup>st</sup> ed, 1983) (Craig F. Bohren 和 Donald R. Huffman, 《小粒子对光的吸收和散射》,威利出版社,第 1 版,1983 年)。

[0064] 对上述公式两边取自然对数,可操作如下。

$$[0065] \quad \ln(I) = \ln(I_0) - \alpha \cdot z$$

[0066] 当产品中存在周期性的厚度波动时,将会观察到正常透射的光中的相应波动。取这些高强度和低强度之间的差值得到如下表达式。

$$\ln(I_1) - \ln(I_2) = \ln(I_0) - \alpha \cdot z_1 - \ln(I_0) + \alpha \cdot z_2$$

$$\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \alpha(z_2 - z_1)$$

$$[0067] \quad \ln\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right) = \alpha(\Delta z)$$

$$\Delta z = \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right)$$

[0068] 其中  $I_1$  代表测得的强度的一个极值,  $I_2$  代表测得的光强度的互补极值。幅材厚度中的相应极值被指定为  $z_1$  和  $z_2$ 。

[0069] 最后一个公式为校准公式的一个例子。一旦消光系数  $\alpha$  是已知的,就可使用该公式由透射强度中的测得波动估计实际的厚度波动。方便地,使用强度比率的对数能够将参比强度从波动计算中排除;因此,背光源强度中的变化不会影响对波动的校准。如果对厚度中实际变化的独立测量是可用的,那么可以使用这样的信号来估计上面提到的消光系数。通常,该基准信号为点位移传感器,例如设置在与上述子区域之一相同的横向幅材位置处的激光三角测量仪。然后将来自特定子区域的强度信号与该基准信号相比较,以进行以下段落中将要讨论的校准方法。如果还期望厚度的非时变目标(即,透射强度),则对参考强度的测量有时是有用的。这可经由光谱的 DC 分量(零频率)访问。

[0070] 熟知的带有先验信息的用于递归加权最小二乘估计的算法非常适合估计消光系数的这一任务。这些算法的核心是将一些输入或进程状态连接到可测量的输出的测量模型。要进行线性估计,通过以下线性矩阵映射完成:

$$[0071] \quad y = H \cdot x$$

[0072] 对于这里提出的参数估计问题,测量模型构成如下,其中  $y$  和  $H$  矢量中的每个元素对应于匹配的一对厚度和强度测量值:

$$[0073] \quad \mathbf{y} = [\Delta z_1 \quad \Delta z_2 \quad \dots \quad \Delta z_n]^T$$

$$\mathbf{H} = \left[ \ln\left(\frac{I_{\max,1}}{I_{\min,1}}\right) \quad \ln\left(\frac{I_{\max,2}}{I_{\min,2}}\right) \quad \dots \quad \ln\left(\frac{I_{\max,n}}{I_{\min,n}}\right) \right]^T$$

$$x = \frac{1}{\alpha}$$

[0074] 根据该算法,参数估计通过以下更新公式递归地更新,其基本上计算出基于估计和实际测量的当前模型之间的误差,然后将该值乘以增益以确定应该在估计值上加上或从其减去的值。

$$[0075] \quad \hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + \mathbf{K}_k [\tilde{y}_k - \mathbf{H}_k \cdot \hat{x}_{k-1}]$$

[0076] 下面是在每一步处确定增益矩阵的表达式。P 矩阵表达了在当前估计中不确定度的多少。高不确定度产生高增益矩阵,并且估计进展积极地继续进行。R 矩阵表达了即将进

行的新测量中所期望的不确定度的多少。当新测量中的不确定度高时,增益矩阵将受到限制并且估计进展将比较保守。当在新测量中设置高置信度时,该矩阵的增益较大并且估计进展将加快。

$$[0077] \quad \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1}$$

[0078] 当前估计中不确定度的水平基于过去的判断以及估计质量的预期恶化(如通过添加恶化矩阵 Q 进行描述)更新。

$$[0079] \quad \mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_k + \mathbf{Q}_k$$

[0080] 虽然对时间序列数据的这种校准估计的简单执行看起来是易处理的,但是实践经验建议在频域中进行该操作。伴随时间序列实施的主要问题之一起因于以下事实:并非所有透射强度的改变均与厚度的改变有关联。在通常受制于材料属性和环境的渐变的低频域中尤其如此。在频域中分析还摆脱了对强度与在时间域中进行相关分析所必需的基准信号之间的严格时间对齐的需求。

[0081] 这里提出的方法利用了即将被测量的目标周期性厚度波动,而在一个实施例中,利用了关于期望的频率组成的先验知识。通常,已知的是周期性波动落入有限的频段内。如果该频段足够狭窄,则在同样的范围中测量的强度波动与厚度波动相互关联的可能性较高。所得的有利信噪比大大地提高了参数估计的性能。基于该思路,上述 y 矢量和 H 矩阵反映了包含于目标周期性信号中的自然波动,并且由分别来自基准信号和强度信号的幅值谱的期望频段中的光谱组成构成。使用结合平顶窗口的快速傅里叶变换 (FFT) 对两个信号的幅值谱进行估计。该平顶窗口有助于将 FFT 频率盒 (bin) 尺寸与位置对校准结果的影响降至最低。每个频率盒中的厚度和强度的频谱振幅被视作单独的测量对。当在有限频段中的每个频率处的幅值仅翻倍时,对  $\Delta z$  的计算简单明了。强度比率通过在强度信号的 DC 幅值中加上或从其减去频段中每个频率处的幅值以分别得到  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ ,然后取这两组数字的比值而计算得到。

[0082] 即便当非常有限的频段已被定义时,信号强度和纯度可能不总是处于优良估计性能的期望水平。所关注的周期性信号可根据当前进程条件而变化不定,或者噪声可能偶尔会进入一个传感器或另一个传感器的该频段。要解决这个问题,将来自介于强度信号和基准信号之间的互功率谱的信息掺入到 R 加权矩阵中。

$$[0083] \quad \mathbf{R} = \frac{\sigma_I \cdot \sigma_r}{k} \cdot \text{diag} \left[ \frac{1}{cp_i}, \frac{1}{cp_{i+1}}, \dots, \frac{1}{cp_{i+n}} \right]$$

[0084] 将强度信号的标准偏差  $\sigma_I$  与基准信号的标准偏差  $\sigma_r$  的乘积与每个互功率项的比值沿着加权矩阵的对角线使用。当强度信号和基准信号在频域中呈现出相对高的相关性时,特别是当它们的振幅较高且大大超过光谱本底噪声时,这实际上授予取得的测量值很高的权威性。当存在强的相干信号时估计进展的速度最为激进,而当相干信号薄弱时估计进展的速度最不激进。将总增益 k 包括在内,以使工程师能够调整校准估计的整体激进性。图 4 示出了估计问题的常规设置。

[0085] 如果没有接收到来自用户的用于识别所关注频段的输入,则系统可基于对频谱的分析选择频段。例如,可以使用简单的高通、低通或带通选择,使得将可能包含不能用的数据的光谱区域从计算中省略掉。当选择的频段位于任何超过了定义的振幅阈值的光谱峰周

围,或具有的能量或能量密度超过定义的能量阈值的区域周围时,也可以使用阈值方法。

[0086] 不管使用何种方法为通道 W4 建立来自传感器 W2 和幅材检测系统 W3 的数据之间的关系,在校准幅材检测系统中的最终步骤均任选地为将校准因子应用到幅材检测系统 W3 的剩余横向幅材部分。这如图 3a 中的步骤 F6 所示。该步骤在图 3b 中没有示出,然而可以用到同样的通用技术。这称为横向幅材校准。通常,构成幅材检测系统 W3 的传感器元件各自的响应将会改变,使得对于从被成像样品发出的相同的 光学能量(在此实例中)各传感器元件具有略微不同的输出信号。因此,需要修正在幅材检测系统中单个元件的响应上的改变,以从整个幅材检测系统中获得校准数据。换句话讲,对于构成幅材检测系统的每个传感器元件,需要找到在每个横向幅材位置  $x_i$  处的  $\alpha$  矢量。这个问题类似于“平场”改正,该“平场”改正经常被应用到基于摄像机的检测系统中。关键是在成像检测系统中可能有成千上万的横向幅材位置  $x_i$  的情况下,如何有效地进行这种改正。

[0087] 检测系统的非均匀的传感器元件或像素响应可以起因于在像素到像素的“背景电平”和与“增益”电平上的差别,该像素到像素的“背景电平”即当关断照明源时记录的信号值(虽然低,但不一定为零),“增益”电平与输出信号中的增加量相关联,而输出信号与落到像素上的入射光功率增加的给定单位相关联。假设关断照明源,就可以记录到背景信号,并且如果摄像机响应是线性的,则可以拍摄到另一个均匀亮度的“白”场图像,并且指示与像素相关联的值改变的响应。如果摄像机响应是非线性的,将需要多于仅两个点来指示响应。

[0088] 当指示横向幅材响应改变时会出现若干困难,由于背景光电平、照明源强度分布和传感器响应因子均会随时间改变。例如,假定检测系统 W3 使用行扫描摄像机沿着由光源(例如,行灯、激光扫描器或类似装置)照亮的行来成像由参考样品发射的光。将沿着由照明源建立的成像部分的强度分布定义为  $I(x)$ ,将样品的透射率定义为  $T(x)$ ,并且由检测系统从幅材区域  $A(x)$  收集光,并且将该光成像在线阵中的对应的离散传感器上,该线阵的每个光单位的响应是线性的且由  $R(x)$  给出。进一步假定可以有一组放大器,每个像素至少一个,该组放大器限定了沿线阵的增益。因此,如果  $b(x)$  是当关断照明源时来自线阵的信号,则沿着线阵输出的信号可写为:

[0089]  $S(x) = g(x) * R(x) * T(x) * I(x) * A(x) + b(x)$ ,或写为合并项

[0090]  $S(x) = a(x) * T(x) + b(x)$

[0091] 目的是找到  $a(x)$  和  $b(x)$ ,这样就可以变换测定的信号  $S(x)$ ,重新获得幅材的属性  $T(x)$ 。

[0092] 通过将  $\zeta(x)$  定义为光输出对检测系统每单位光输入和每单位幅材属性  $Z$  的分数,可将上述的透射情况一般化为任何幅材属性  $Z(x)$ 。那么,信号的一般化形式为

[0093]  $S(x) = a(x) \zeta(x, Z) Z(x) + b(x, Z)$

[0094] 在许多所关注情况下,  $\zeta(x)$  和  $b(x)$  均不是  $Z$  的函数,因此这可写为:

[0095]  $S(x) = a(x) \zeta(x) Z(x) + b(x)$

[0096] 将其改写为:

[0097]  $S(x) = k \alpha(x) Z(x) + b(x)$

[0098] 其中  $k$  是常数比例因子,使得  $\alpha(x)$  为与此前的表示相一致的相对信号响应分布。因为常数  $k$  将会在如上所述的线性回归步骤中找到,所以仅需要找到相对分布  $\alpha(x)$  以变换信号并求得  $Z(x)$ 。实际运用中这很重要,因为有时必须使用与在生产期间使用的不同

同的整体增益或曝光度来执行横向幅材分布校准,以使检测系统响应既不饱和也不曝光不足。然而,因为  $\alpha(x)$  现在包含除了光源和像素响应改变之外的附加功能,所以一般不能仅成像光源强度分布以达到期望的分布,虽然当所关注属性为透射率时这就足够。在许多所关注情况下,  $b(x)$  对于  $x$  的改变小于所有  $x$  位置上的信号电平,因此其对于  $x$  的依赖可以忽略,并且可以在线性回归步骤中找到其常数值。否则,可以通过在参考样品在(照明源关断以致任何位置上  $\alpha(x)=0$  的情况除外)正常环境生产条件下置放到位时存储信号来记录  $b(x)$ 。

[0099] 现将时间平均信号定义为

$$[0100] \quad \langle \hat{S}(x) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} S(x) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [k\alpha(x)Z(x) - b(x)] dt$$

[0101] 其中  $T$  是所选择的任意持续时间,用来对测定系统噪声中的随机波动和幅材轮廓  $Z(x)$  的空间随机波动进行平均。可能需要根据所测定的属性和特定处理来调整  $T$  的长度,但是基于统计过程测量来选择  $T$  的适当长度的方法是本领域中公知的。如果在从  $t_0$  到  $t_0+T$  的时间窗口期间相对于  $\alpha(x)$  和  $Z(x)$  的平均分布的瞬时偏差是不相关变量,则变为

$$[0102] \quad \langle \hat{S}(x) \rangle = k \langle \alpha(x) \rangle \langle Z(x) \rangle - \langle b(x) \rangle$$

[0103] 其中在  $\langle$  括号  $\rangle$  中的数量表示时间平均值。

[0104]  $\langle \alpha(x) \rangle$  和  $\langle b(x) \rangle$  的分布趋向于在给定的运行期间随着时间(即幅材下游距离)较为稳定。因为能够使用如上所述的校准传递方法来基本上按需要经常地找到在幅材传感器的特定的  $x$  位置处的  $k$  和  $b$  的值,所以将横向幅材校准问题简化到以测定所需的精度等级来记录在某个合理的持续时间 ( $\gg T$ ) 上有效的相对横向幅材分布  $\langle \alpha(x) \rangle$ 。如果发现  $\langle \alpha(x) \rangle$  的分布在运行期间略微漂移,则可使用仅在如下所述的若干横向幅材位置校准的幅材传感器数据来完成分布修正。每当对于检测系统有实质改变时,或每当(例如)新的产品结构改变了与  $\zeta(x)$  相关的分布时,可能需要  $\langle \alpha(x) \rangle$  的新记录。

[0105] 可以用若干方式来进行相对横向幅材校准分布  $\alpha(x)$  的记录。作为第一例方法,可以在幅材生产前在检测阵列上的每个传感器的观察区域上扫描单个校准样品,以映射出相对横向幅材响应分布。只要该样品的属性值(将其称为  $Z_1$ ) 在幅材的所关注范围中并且  $\zeta$  仅是  $x$  的函数而不是  $Z$  的函数,则甚至不必知道  $Z_1$  的精确值。

[0106] 横向幅材校准的第二例方法如下。在生产幅材之前,幅材检测系统  $W3$  可以成像下述的材料带的连续部分,已经横跨某个区域测定了该材料所需属性的分布,所述区域对应于由构成幅材检测系统  $W3$  的传感器元件观察的区域,并且沿着采样带测定的位置可以与在检测阵列中的对应元件对齐。在这种情况下,沿着校准带的所需属性的范围不必完全均匀,只要已知沿着该带的值的分布,所述值位于随后的幅材运行的操作范围内,并且  $\zeta$  仅是  $x$  的函数而不是  $Z$  的函数。带上的点可与阵列元件物理地对齐,或可使用互相关分析来将沿着该带的已知分布匹配到来自阵列元件的所测定响应上。

[0107] 用于横向幅材校准的第三例方法是在生产幅材时获取图像,收集与该图像对应的幅材的横向幅材部分,然后用另一个校准传感器来测定在与由检测系统阵列元件采样的位置对应的位置上的该幅材样品上的属性。可使用横跨该样品的若干“行”或带以减少来自不同传感器的噪声的影响。再次指出,此方法简单明了,只要  $\zeta$  仅是  $x$  的函数而不是  $Z$  的

函数。

[0108] 用于在  $\zeta$  仅是  $x$  的函数而不是  $Z$  的函数的情况下执行横向幅材校准的第四种方式是迭代方法,该迭代方法在幅材的生产期间更新横向幅材校准分布。对于执行横向幅材校准的这个第四种方式,幅材检测系统  $W3$  由固定在不同的横向幅材位置上的具有类似构造的若干固定传感器  $W2$ 、或可以位于若干不同的横向幅材位置上的可移动的传感器  $W2$ 、或它们的组合以及根据检测图像的时间平均图像构成。然而,横向幅材传感器位置的数量(称其为  $M$ )比在由成像系统(诸如扫描摄像机)构成的幅材检测系统  $W3$  中的感测位置的数量  $P$  少得多。幅材传感器位置仅产生真实时间平均的横向幅材材料属性分布  $\langle Z(x) \rangle$  的粗略估计;通常这就足够,因为稳定的  $\langle Z(x) \rangle$  (经常是较为均匀的那种)是良好控制的制造过程的目标。因此,例如,来自比方说三个幅材传感器的时间平均数据可用来拟合成  $\langle Z_{est}(x) \rangle$  的二阶分布。在  $\langle a(x) \rangle$  和  $\langle b(x) \rangle$  上与发光强度分布和传感器响应以及增益因子中改变有关的精细空间细节被包含在时间平均的横向幅材信号分布  $\langle S(x) \rangle$  内。因此记录  $\langle S(x) \rangle$ , 并使用所记录的  $\langle b(x) \rangle$  分布和作为真实分布  $\langle Z(x) \rangle$  的估计的  $\langle Z_{est}(x) \rangle$  来计算  $\langle a(x) \rangle$ 。可以重复此过程,其中经常包括:将点传感器之一移动到新的横向幅材位置以更新  $\langle Z_{est}(x) \rangle$  分布的精度,并且因此更新  $\langle a(x) \rangle$  的精度。

[0109] 这个时间平均方法存在的主要问题是在下述两种情况之间作出区别:在不随时间改变的幅材属性  $\langle Z(x) \rangle$  的横向幅材改变,例如条痕;以及在也不随时间改变的  $\langle a(x) \rangle$  上的改变,这种改变可能由例如落到照明光源上的灰尘引起。这是在频域中操作可能有所助益的情况,2D 核可有助于过滤掉图像中的高频横向幅材变化。此外,如果条痕在传感器下方进进出出地漂移,则它可能不是周期性的漂移,所以其在传感器数据的频率分析中的影响会大大降低。这个问题可以通过采用可被驱动到条痕位置或沿着轮廓的若干位置的可改变位置传感器以校准在那些点上的实际幅材属性值求得解决,在此例中同样不对构成检测系统的阵列中的各传感器进行校准。作为另一种选择,可以例如通过将幅材转向或将整个检测系统相对于幅材平移某个量  $\Delta x$  来有意地传递检测系统和幅材之间的横向幅材对准上的相对改变。然后,可以如上找到与  $\langle Z(x) \rangle$  和  $\langle a(x - \Delta x) \rangle$  类似的新分布,并且这些分布上的空间改变因此可以通过与在位移之前的分布数据相比较而被适当地归因于  $\langle Z(x) \rangle$  或  $\langle a(x) \rangle$ 。所需的移动量将取决于在  $\langle Z(x) \rangle$  和  $\langle a(x) \rangle$  上的改变水平和时间平均测量的信噪比。其他方法或许对于本领域内的技术人员也是显而易见的,例如使用双检测系统,以使下述情况的出现概率小到可以忽略:与两个检测系统的响应对应的  $\langle a_1(x) \rangle$  和  $\langle a_2(x) \rangle$  在同一时刻在精确相同的横向幅材位置上具有横向幅材分布干扰。

[0110] 在一些实施例中,使用在正常的幅材生产期间获得的时间平均信号分布来校准像素到像素的响应改变,并且使用少量的横向幅材校准点来校准在横向幅材模型中的缓慢变化的改变。 $a(x_i)$  用矢量形成横向幅材响应分布,并且可用于将检测系统数据转换成在幅材属性上的横向幅材的和幅材下游改变的经校准的定量图像。这种方式具有下述优点:可以在生产线上生产薄膜的同时进行这种方式,并且可在运行期间定期地更新。

[0111] 到目前为止,已经讨论了其中对于  $Z$  的信号依赖性是非线性的和可分离的情况。也可能出现其中  $\zeta = \zeta(x, Z)$  的所关注情况,就像(例如)有孔隙率和表面粗糙度之类的属性的场合,这时光学散射有可能影响很大。但这仍然是所期望的情况,只要光信号与属性  $Z$  单调地相关,虽然以非线性的方式相关。当在  $\zeta$  中的  $x$  和  $Z$  的相关性就像在

[0112]  $\zeta(x, Z) = \xi(x) \psi(Z)$

[0113] 中那样可分离时出现最简单的情况,可以简单地定义新属性

[0114]  $Z' = \psi(Z)Z$

[0115] 并且如上文所述进行,在必要时将  $\xi(x)$  替代为在上面的  $\zeta(x)$ 。为了重新获得属性  $Z$ ,需要知道或独立地校准函数  $\psi(Z)$ ,并且该函数须在运行期间保持稳定。在示例性方法 1 的情况下,需要跨越所关注属性值的适当范围的一组校准样品,各属性值是幅材检测系统在生产期间在幅材所占的平面上的观察区域上扫描的。在示例性方法 2 中,可用一组经校准的带来跨越所需属性范围。在示例性方法 3 中,可能需要收集和测定若干横向幅材样品,以指示幅材检测系统的响应范围。在这些情况下,如果预先了解  $\xi(x)$  的函数形式,则可以使用较小数量的校准样品。在使用迭代法 4 的方式中,此前所述的非线性方法将足以满足要求。

[0116] 一种概念上类似的方法也可以处理  $\zeta = \zeta(x, Z)$  的最一般情况。假定有跨越所需校准范围的一组  $N$  个校准样品,对于每个样品已知  $\{Z_j\}_{j=1}^N$ ,并且假定在多个横向幅材位置  $x_j$  记录与这些样品对应的一组测定响应  $\{S_j\}_{j=1}^N$ 。所需的横向幅材位置  $j=1$  至  $M$  的数量取决于函数  $\zeta = \zeta(x, Z)$  的平滑度以及需要最终测量来达到的精度。经验显示,对于大多数的所关注情况,横向幅材校准点的数量  $M$  可以比在检测阵列中的感测元件的数量  $P$  少得多。因此,对于  $Z$  的  $N$  种实现方式中的每一个可通过  $M$  个测定来拟合分布曲线,以获得  $\zeta = \zeta(x, Z)$  的第一估计,如上文方法 1-3 中所述。然后,可以迭代地更新横向幅材分布,如在方法 4 中所述。用来如此进行的分析方法的例子在可获得  $\zeta = \zeta(x, Z)$  的参数模型的情况下是非线性最小平方,而在  $\zeta = \zeta(x, Z)$  的模型未知的情况下是非参数核平滑方法。

[0117] 图 4 示出了上述定量成像系统的布置方式上的改型。图 4 与图 1 相同,不同的是将传感器 W2 安装在横向幅材转移装置 WB7 上,横向幅材转移装置 WB7 将传感器 W2 移动到若干离散的横向幅材位置,从而使其面临若干幅材通道,而不是仅面临通道 W4。例如,传感器 W2 可自动地从与通道 W4 相关的横向幅材位置移动到与通道 WB8 相关的第二横向幅材位置(例如,由定量成像系统 W5 控制)。在每个位置取得沿着幅材的幅材下游部分的足够样品,使得能够在每个点使用此前所述的互相关和回归方法。并且,虽然在任何给定的横向幅材位置的校准限于采样间隔上的幅材属性所跨越的取值范围,但通过将校准传感器返回到相对于阵列传感器的同一位置来容易地重新进行校准。例如,在已过去一定量的时间或已通过一定量的幅材后,或当测定的属性已经相对于由先前的校准跨越的数据范围改变了预定量时。在一些情况下,可以向该过程有意地加上一个或一组微扰,以增大在校准期间采样的测定属性范围。

[0118] 借助于如此校准的幅材检测系统 W3 的输出,可对比以标准度量(例如以工程单位)建立的基准,使用统计处理方法、图像处理算法和模式识别来分离、分类和跟踪缺陷的严重程度。关于缺陷(现在已定量为标准化度量)的信息可用于产品质量的在线反馈,或结合其他工艺参数来确认因果关系。此外,可在多次运行上跟踪关于缺陷的信息,以评估与各种工艺改变相关联的影响和折衷。另外可结合数据库(roll-map)来提供关于缺陷的信息,以确保标准化的、可确认的产品质量水平。

[0119] 技术人员应当认识如此描述的系统的多个变型。例如,如此描述的系统和方法可

适于与由多个行扫描摄像机构成的幅材检测系统结合使用。图 5 示出了一种这样的系统，其中幅材检测系统 W3 包括两个行扫描摄像机。传感器 W2 可手动地设置在通道 WX1 和 WX2 处，上述通道分别对应于在第一和第二行扫描照相机范围内的区域，上述行扫描照相机构成幅材检测系统 W3。类似地，传感器 W2 可安装到此前所述的横向幅材转移装置上，该传感器在多个通道之间移动，该多个通道可能是对应的幅材检测系统 W3 的横向幅材范围。

[0120] 实例：光密度

[0121] 我们已证明了测定幅材上的炭黑涂层的光密度的校准水平的能力。所关注属性为  $\lambda = 10604$  纳米波长下的炭黑涂层的光密度。光密度“OD”是涂布膜的透射率 T 的对数测定值，如下：

$$[0122] \quad OD(\lambda) = -\log_{10}[T(\lambda)] \quad (1)$$

[0123] 其中

$$[0124] \quad T = \frac{I - I_{bkg}}{I_0 - I_{bkg}} \quad (2)$$

[0125] 并且

[0126] I= 透过膜的光强度

[0127]  $I_0$ = 入射到膜上的光强度

[0128]  $I_{bkg}$ = 光源关闭且有膜时的背景环境漏光

[0129] 炭黑涂层遵守比尔 (Beer) 消光定律，因此透过膜的光遵守

[0130]

$$[0130] \quad \begin{aligned} I(\lambda) &= I_0(\lambda)(1 - r_{\text{基底}}^2) \exp(-\alpha_{\text{涂层}}(\lambda)\ell_{\text{涂层}}) \exp(-\alpha_{\text{基底}}(\lambda)\ell_{\text{基底}}) \\ &= I_0 T_{\text{基底}} \exp(-\alpha_{\text{涂层}}(\lambda)\ell_{\text{涂层}}) \end{aligned} \quad (3)$$

[0131] 其中

[0132]  $\alpha_{\text{涂层}}$  和  $\alpha_{\text{基底}}$  分别为在给定波长下的涂层和基底的消光系数

[0133]  $\ell_{\text{涂层}}$  和  $\ell_{\text{基底}}$  分别为涂层和基底的物理厚度

[0134]  $r_{\text{基底}}$  和  $T_{\text{基底}}$  分别是基底的振幅反射系数和透射率

[0135] 因此，光密度是涂层厚度的非线性函数，并且其随波长而改变。我们安装并校准了定制的近红外 (NIR) 传感器以监测 1060nm 下的 OD (此传感器对应于在图 W 中的传感器 W2)。涂层的目标 NIR OD 是 0.8，并且基底具有  $T_{\text{基底}} = 0.92$ 。测定的涂布基底 OD=0.84，并且涂层厚度的独立测定给出  $\ell = 1.18 \mu\text{m}$ ，这表明  $\alpha(\lambda = 1060\text{nm}) = 1.56 \mu\text{m}^{-1}$ 。因此，在涂层厚度上  $\pm 0.02 \mu\text{m}$  ( $\pm 20\text{nm}$ ) 的改变对应于在  $\lambda = 1060\text{nm}$  下的透射率的  $\pm 3\%$  的改变。

[0136] 将行扫描摄像机和白炽行灯用作幅材检测系统(对应于图 1 中的幅材检测系统 W3)。此幅材检测系统用于监测在大约 6 英寸的横向幅材观察区域上的涂层透射的均匀度。使用通过未涂布基底获取的时间平均图像来将图像归一化(使用缩短的曝光时间来将信号引入该范围内)，以说明光源强度分布和摄像机响应随横向幅材位置的变化。设置的 NIR 传感器在幅材上游方向侧距由摄像机成像的行的距离为大约  $d = 12$  英寸的距离，所述行位于摄像机观察区域的接近中心处，并且以与摄像机的行速率相同的频率  $f$  采样数据。因为已知幅材速度  $v$ ，所以在传感器和摄像机数据流之间的时延近似为  $d/v$ ，并且 NIR 数据可以在

时间上被向前移位  $d/v$  个点,以大致对齐数据集。在许多情况下,这样的“手动”对齐是足够的,但其精度取决于获知间隔距离  $d$ 、幅材速度  $v$  和采样率  $f$  所基于的精度。通过选择与接近该近似值的互相关光谱中的峰值相关的移位,可以找到更精确的对齐。将互相关方法与从试验条件中得知的近似值相结合让我们选定了适当的移位,即使在幅材的 OD 上存在一定程度的周期性干扰。

[0137] 在行扫描照相机之前不存在滤光器,因此光谱响应是典型的硅电荷耦合器件的响应,其中峰值响应波长为约 650nm,并且最小响应波长为约 400nm 以下和约 1000nm 以上。也就是说,不曾试图使摄像机观察与 NIR 传感器相同的光谱窗。摄像机响应范围上的光谱消光分布的细节是未知的,虽然知道当在此范围上观察时比开始端之外透射率更低。在两个传感器上背景漏光均被忽略,可以说明在这种情况下基底透射的效果可忽略,并且以下的近似成立

[0138]

$$OD_{\text{涂层}}(1060) = \frac{\alpha_{\text{涂层}}(1060)}{\alpha_{\text{涂层}}(\text{vis})} OD_{\text{涂层}}(\text{vis}) \quad (4)$$

[0139] 以使对于摄像机上的任何给定像素,可按照下式从可见透射数据计算出 1060nm 处的 OD

[0140]

$$OD_{\text{涂层}}(1060, \text{像素}) = [-\log_{10}\{T(\text{vis}, \text{像素})\} - 0.036] \left[ \frac{\alpha_{\text{涂层}}(\text{vis})}{\alpha_{\text{涂层}}(1060)} \right] \quad (5)$$

[0141] 从基底透射产生 0.036 的偏移,并且在括号中的最后一项是用于将由摄像机记录的可见透射数据转换为红外 OD 单位的校准因子。使用幅材速度以及传感器和摄像机之间的距离的先验知识,允许我们借助于两个数据系列的并列曲线来手动地将数据集移成对齐。然后调整在公式 (5) 中的缩放因子  $\alpha_{\text{涂层}}(\text{vis})$ ,直至对齐的数据集之间的最小平方误差达到最小,这类似于此前所述的回归方法。

[0142] 实例:双折射薄膜快轴的延迟与定向

[0143] 点传感器和行扫描摄像机被构造成可监测双折射聚丙烯薄膜的光学属性。在这种情况下,薄膜延伸方法定向聚合物分子并且建立标称在幅材下游方向上的“快”轴,这意味着在此方向上的折射率略低于相对此轴成  $90^\circ$  (即,“慢”轴)上测定的折射率。然而,该快轴不被限制为精确对齐在幅材下游方向上(幅材下游对齐是目标),但是此过程中的差异使得定向在大约  $\pm 3^\circ$  左右的范围中内变动。因为沿着快轴和慢轴的折射率不等,所以沿这两个轴偏振的光波在通过薄膜后变得不同相。这被称为延迟,其中双折射薄膜的面内延迟  $R_0$  被定义为

$$[0144] \quad R_0 = (n_{\text{FA}} - n_{\text{SA}})d \quad (6)$$

[0145] 其中

[0146]  $n_{\text{FA}}$  是沿快轴的折射率(薄膜的主轴,接近机器方向但不必与机器方向精确对齐)

[0147]  $n_{\text{SA}}$  是沿慢轴的折射率

[0148]  $d$  是薄膜厚度

[0149] 设置点传感器(对应于图 1 中的传感器 W2),使得入射光连续地穿过偏振器、薄膜、

检偏器(与第一偏振器交叉的第二偏振器),并且到达检测器。快轴取向传感器和延迟传感器具有类似的信号响应公式:

$$[0150] \quad V_i = A_i \sin^2(2(\beta_{FA} - \beta_{o,i})) \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda_i} R_0\right) + C_i \quad (7)$$

[0151] 其中

[0152] i 代表快轴 (FA) 或延迟传感器

[0153] V 是信号电压

[0154] A 是计及光源强度、反射损耗、检测器响应和放大器增益的增益系数

[0155]  $\beta_{FA}$  是在沿幅材下游的机器方向上以顺时针方向为正测定的薄膜的快轴角度

[0156]  $\beta_o$  是在沿幅材下游的机器方向上以顺时针方向为正测定的第一偏振器通过轴的角度

[0157]  $\lambda$  是所用光的波长(由光源的波长和在检测器前的任何光谱滤波器确定) [nm]

[0158]  $R_0$  是薄膜延迟 [nm]

[0159] C 是计入了当没有薄膜时通过偏振器泄漏的背景光、薄膜的平均去偏和非零放大器失调的偏移系数(通常接近于零)。

[0160] FA 和延迟传感器响应的不同之处仅在于系数 A 和 C 以及偏振器角度,即  $\beta_{o,FA} = -10^\circ$  和  $\beta_{o,ret} = -45^\circ$  的标称角度。通过校准过程来确定用于每个传感器的 A、C 和  $\beta_o$  的值,且源波长是已知的,因此两个传感器一起测定未知量  $\beta_{FA}$  和  $R_0$ 。灵敏度分析显示,当对于具有范围为  $[-5, 5^\circ]$  的  $\beta_{FA}$  以及范围为  $[45, 85\text{nm}]$  的  $R_0$  的薄膜,调整增益系数以将信号映射进范围  $[0, 10\text{V}]$  时,在分析 FA 响应时需要考虑薄膜延迟值,而包括薄膜的真实 FA 角度(与假定 FA 角度为  $0^\circ$  相比较)仅对于根据  $R_0$  传感器计算的延迟值有很小的影响。

[0161] 在离开传感器的幅材下游侧设置行扫描摄像机(对应于图 1 中的幅材检测系统 W3),以观察通过薄膜的偏振线光,并且将检偏器安装在摄像机镜头上并且与用作照明源的相应的偏振器交叉。除了数字化的响应单位之外,观察区域中心附近的照相机像素在接近垂直入射角度处(相对于幅材的表面)接收的信号遵守与上面类似的响应公式。因此,通过对齐摄像机以使点传感器位于观察区域中心内,并且使摄像机行速率与点传感器的采样率同步,可使用此前所述的互相关和回归操作,以将  $R_0$  和 FA 点传感器的校准响应传送相对于相应  $R_0$  和 FA 摄像机的中心像素。注意,此操作仅使用来自生产薄膜的在线数据;不使用任何校准样品来指示这些像素的响应。

[0162] 如上文所述,对于  $R_0$  图像完全忽略了 FA 取向变化,因为这仅有微小的影响。对于 FA 图像,作为一级近似假定由点传感器测定的  $R_0$  值沿着由摄像机观察的整个线方向是均匀的。这在此项应用中相当奏效,因为颤动和浇注轮速度改变趋向于控制在  $R_0$  中的改变,并且这种改变显示为在幅材上或多或少地均匀延伸的时变幅材厚度这样,不必对齐两个行扫描摄像机来保证线阵精确平行,虽然可能已经作了这样的操作。

[0163] 实例:基于频谱分析的相关性

[0164] 图 6a 为示出得自测试幅材样品的参数估计结果的图线。对未知参数  $x = 1/\alpha$  的估计的初始值为 25,具有非常大的初始不确定性。由于现有样品的长度有限,所以估计没有完全收敛。尽管如此,看起来收敛可能处于值 30 附近,这与手动数据分析的结果很好地符

合。在图 6b 中可以观察到不确定性值的指数式衰减。背光源的强度似乎没有显著影响估计结果。

[0165] 图 7 示出了若干图线,其突出了此前所述的基于频谱的处理的各方面。成组的连续像素采集来自幅材的大约两英寸宽的横向区域的光。将这些组的每一组中的像素的值进行平均,得到幅材的每个区域在每种采样情况下的平均强度值。同时,将点传感器(测量经过的幅材的顶部和底部表面的一对相对的激光三角位移传感器)设置在一些选定的横向位置处。提供的幅材厚度信号的样本在摄像机行扫描速率的相同间隔处采集,所述摄像机行扫描速率如受通用编码器或参考时钟脉冲串支配。选择与由点传感器测量的幅材部分良好对齐的幅材区域,且相应的平均强度值构成将与从点传感器获得的采样信号进行比较的采样信号。将快速傅里叶变换(FFT)应用于强度信号以及基准厚度信号两者。图 710 示出了来自点传感器的频谱。图 701 示出了来自幅材成像系统(在这种情况下为摄像机)的频谱。

[0166] 频段 720 包括所关注的峰,这在图 701 和图 710 中均明显地存在。用于估计校准系数的信息提取自所关注的频段。回想上文,校准方法围绕测量模型公式建立,其中  $x$  为代表未知参数的矢量(在这种情况下为长度的矢量),  $y$  为包含所取用的基准测量值的矢量,且  $H$  为包含描述测量值对于未知参数的建模依赖的元素的矩阵。

$$[0167] \quad y = H \cdot x$$

[0168] 简言之,估计校准系数的方法由收集两组若干测量值构成,所述两组测量值为:其中一组与涉及未知参数的系统密切相关且以未校准的单位表示,另一组直接来自以校准的单位表示的对相同主体的测量值。将所关注频段中的每个光谱分量(图 7 中的 720)视作单独测量值。刚才提及的两组测量值分别来自强度信号谱 701 和基准厚度信号谱 710 的相同频段,如以下公式所示。

$$[0169] \quad y = [\Delta z_i \quad \Delta z_{i+1} \quad \dots \quad \Delta z_{i+n}]^T$$

[0170] 基准测量值的集合用  $y$  表示,其由发生在所关注频段中的  $n$  个频率的每一个处的厚度的周期性变化组成,其中  $i$  是指落在该频段内的第一频率。正如此前所解释过的,将在给定频率处厚度中的总变化简单地计算为在该频率处的频谱振幅的两倍。

$$[0171] \quad H = \left[ \ln\left(\frac{I_{\max,i}}{I_{\min,i}}\right) \quad \ln\left(\frac{I_{\max,i+1}}{I_{\min,i+1}}\right) \quad \dots \quad \ln\left(\frac{I_{\max,i+n}}{I_{\min,i+n}}\right) \right]^T$$

[0172] 根据此前的讨论,还得知对基准测量值进行建模,以便随未知参数  $1/\alpha$  线性地变化,且乘数为在频段中的每个频率处的周期性强度变化的最大值和最小值之间的比率的自然对数。通过分别在平均强度上加上或从其减去在每个频率处的频谱振幅而计算最大和最小强度。

[0173] 将这些主要分量结合下述的其他因素使用,应用熟知的递归加权最小二乘算法(分别用以下三个公式表示)。

$$[0174] \quad \begin{aligned} \hat{x}_k &= \hat{x}_{k-1} + K_k [\tilde{y}_k - H_k \cdot \hat{x}_{k-1}] \\ K_k &= P_k H_k^T [H_k P_k H_k^T + R_k]^{-1} \\ P_{k+1} &= [I - K_k H_k] P_k + Q_k \end{aligned}$$

[0175] 下一个步骤为定义加权矩阵,其将调控由每个单独的数据点引起的估计改变量。由于此前讨论的原因,加权矩阵还提取自所述两种信号的光谱组成。为了在当强度信号和

基准信号的所关注分量高度相关且在大小上相对于这两种信号中的总噪声大时,对对应于示例的测量值设置更大的权重,将以下矩阵用作加权矩阵。使用所关注频段中的每个频率处的互功率谱分量与这两种信号的总互功率之间的相对大小来确定基于每个单独的测量数据对,估计应被调整的量。如果在给定频率处的互功率分量与总互功率相比相对较小,则表明这两种信号不一致且在特定频率处存在有意义信息,基于在该频率下相应的测量数据,允许校准估计存在小的变化。调整增益  $k$ ,以调节估计算法的总响应能力。

$$[0176] \quad \mathbf{R} = \frac{\sigma_f \cdot \sigma_r}{k} \cdot \text{diag} \left[ \frac{1}{cp_i} \quad \frac{1}{cp_{i+1}} \quad \dots \quad \frac{1}{cp_{i+n}} \right]$$

[0177] 不确定度矩阵  $P$  在这种情况下为标量(因为仅存在单个未知参数),且以一定任意度被设置为较大数字,例如 5000,以使得算法能够迅速接近校准估计的合理值。在初始设置后,通过算法不断地被调整该值,以反映基于最近测量中的信息质量而针对当前估计所设置的置信度的大小。该变量的值越大,在即将进行的测量中,对于校准估计中的各种水平的质量而言,允许其存在的改变就越自由。

[0178] 该算法的最后一个分量(即恶化矩阵  $Q$ )也是标量,其用于防止算法变得过于静态。该变量实际上在不确定度矩阵上施加了向上压力,使得富含信息的测量值必须一致地出现以保持低不确定度;否则,不确定度将会向上漂移,并且算法将会根据新的测量值变得更能容忍改变。该参数由工程师基于对算法响应校准系数变化的能力的定性评价,结合包含在  $R$  矩阵中的增益  $k$  进行调整。

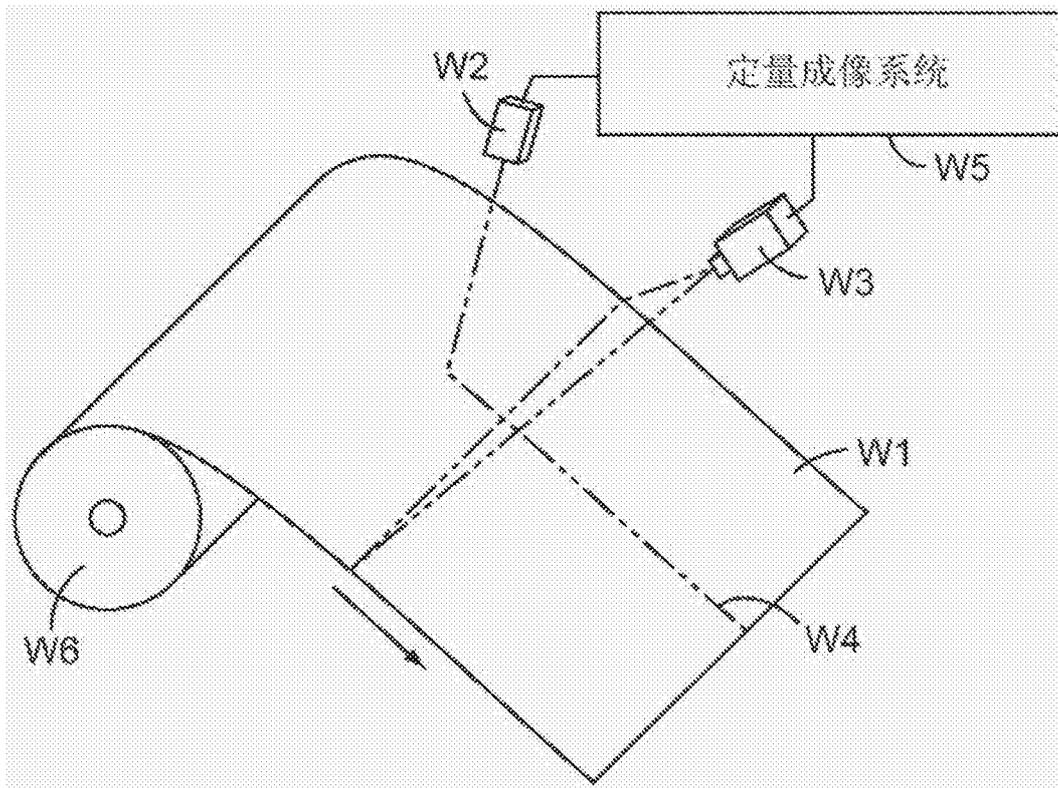


图 1

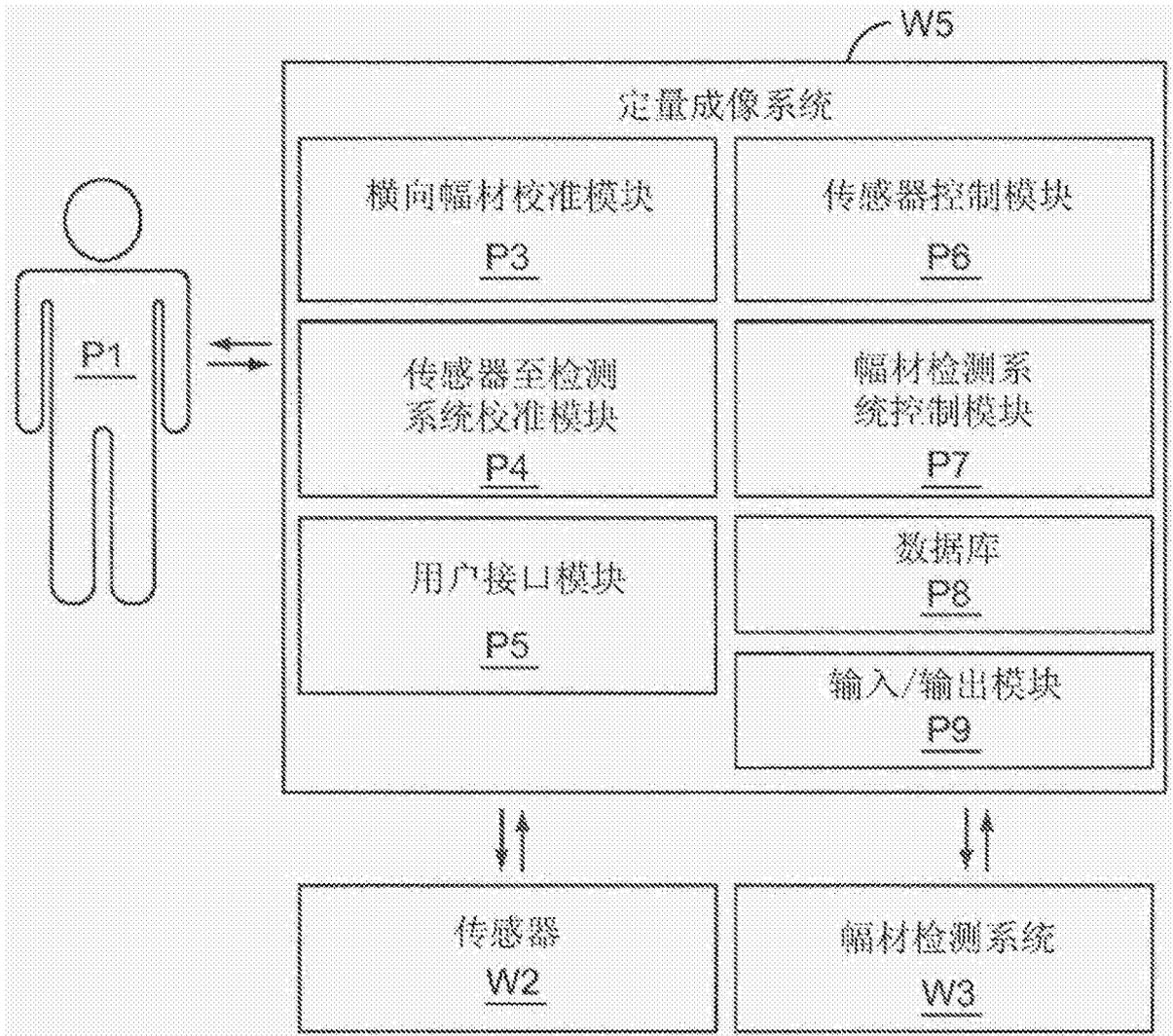


图 2

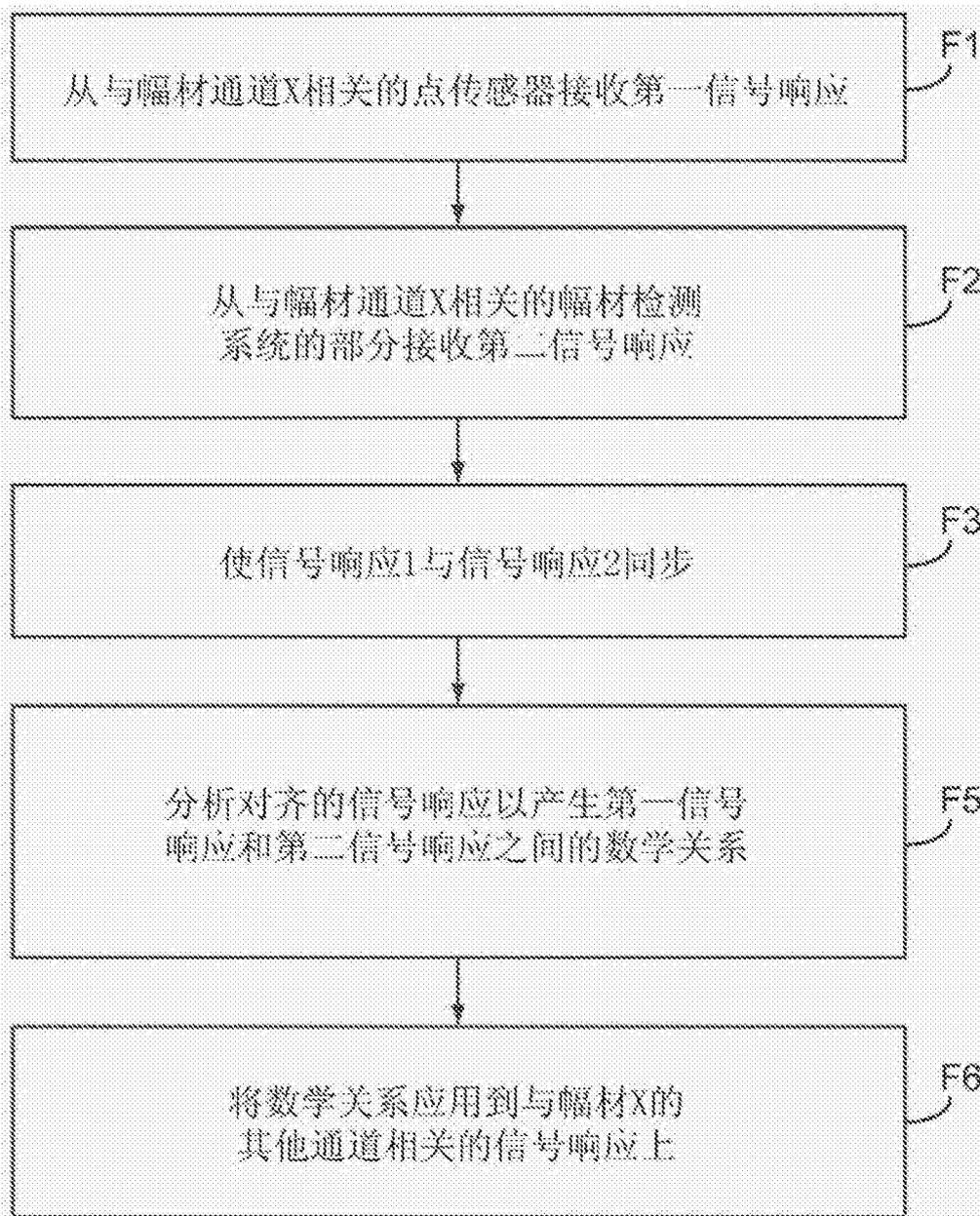


图 3a

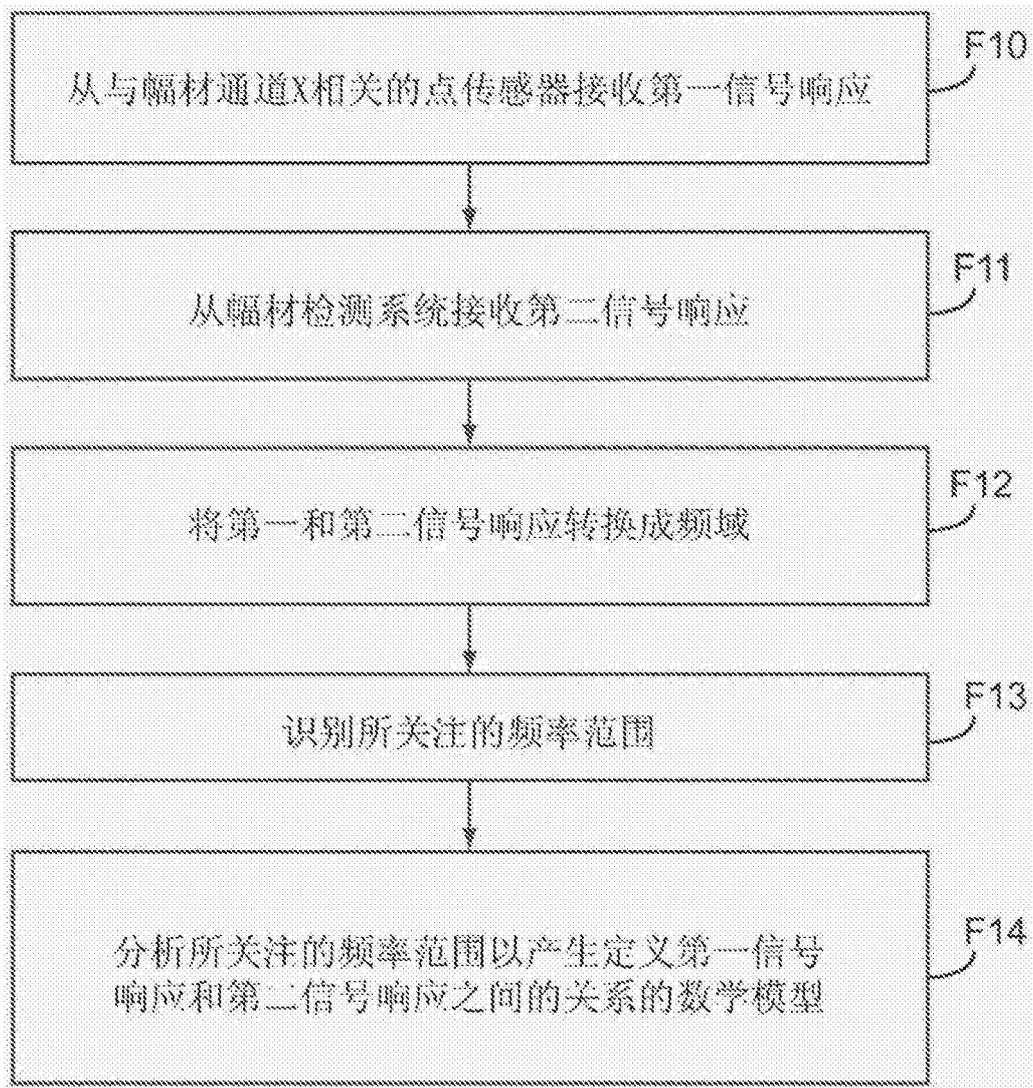


图 3b

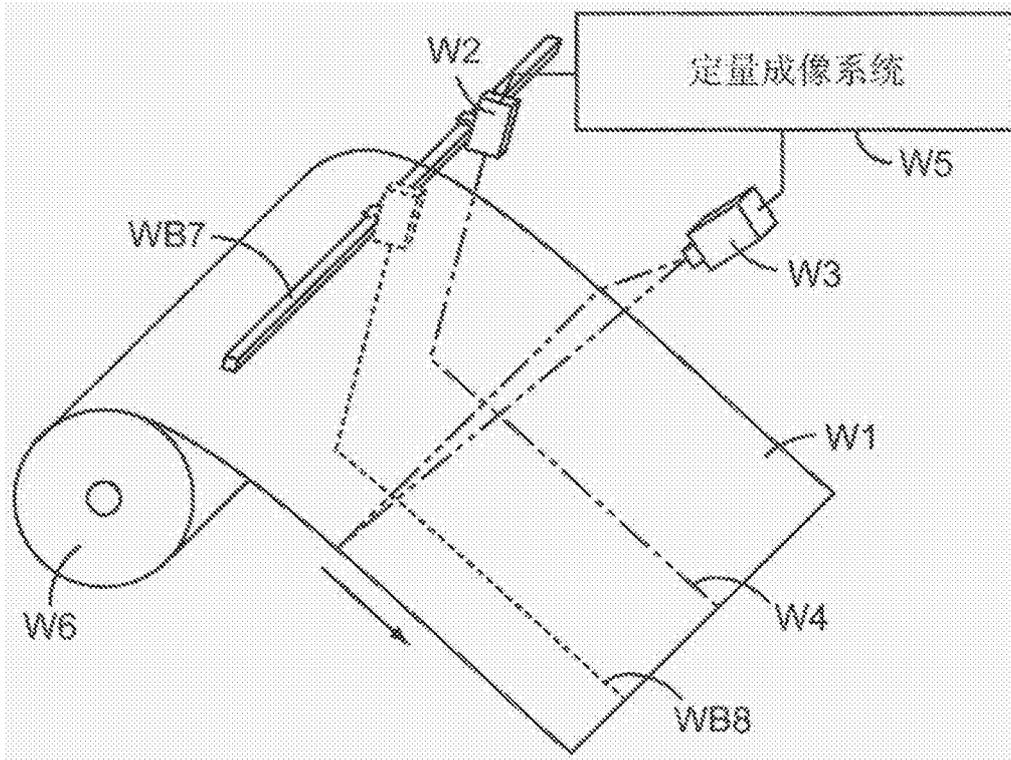


图 4

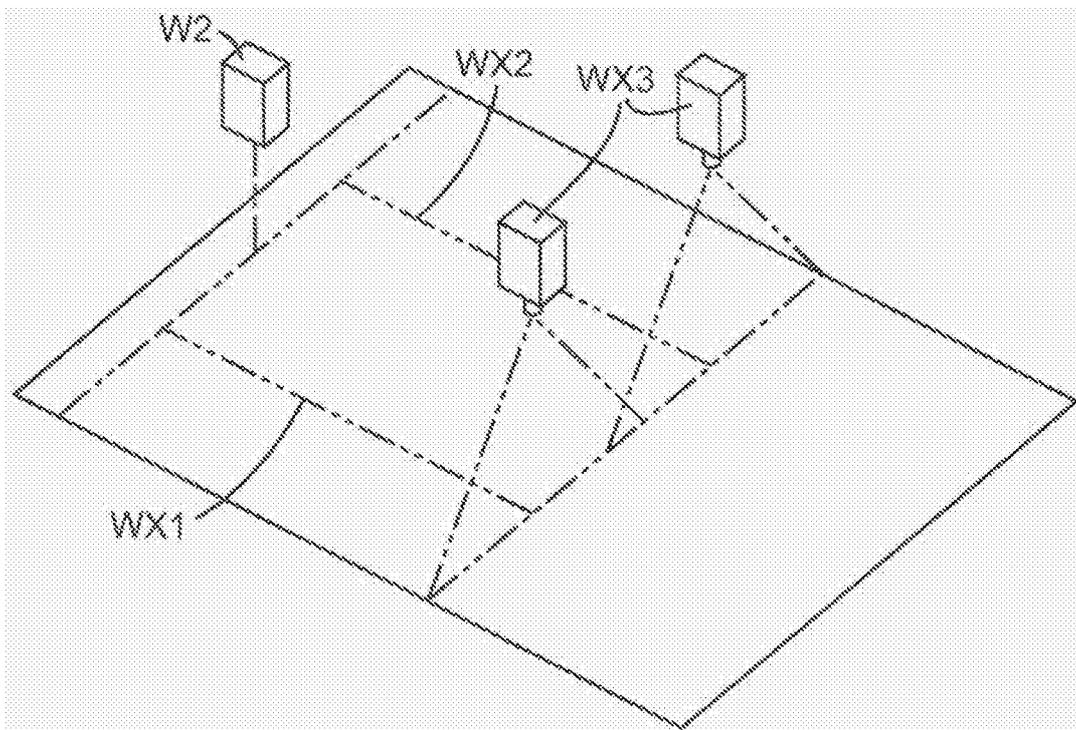


图 5

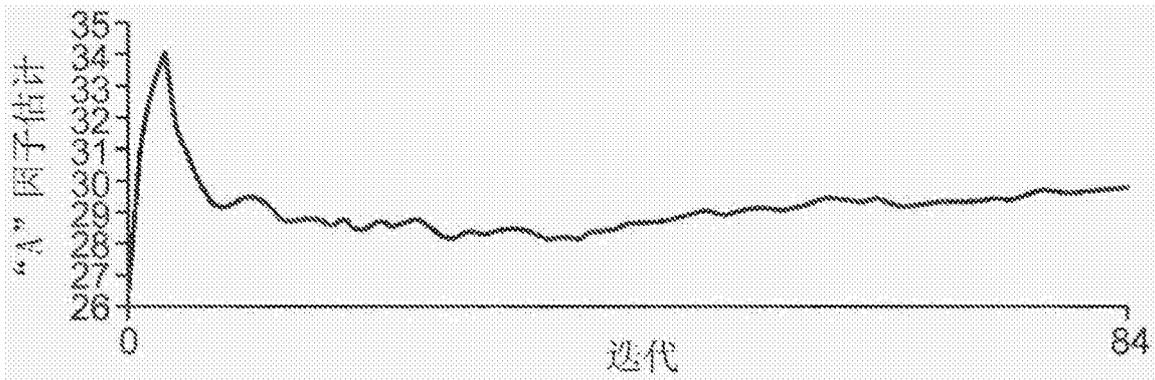


图 6A

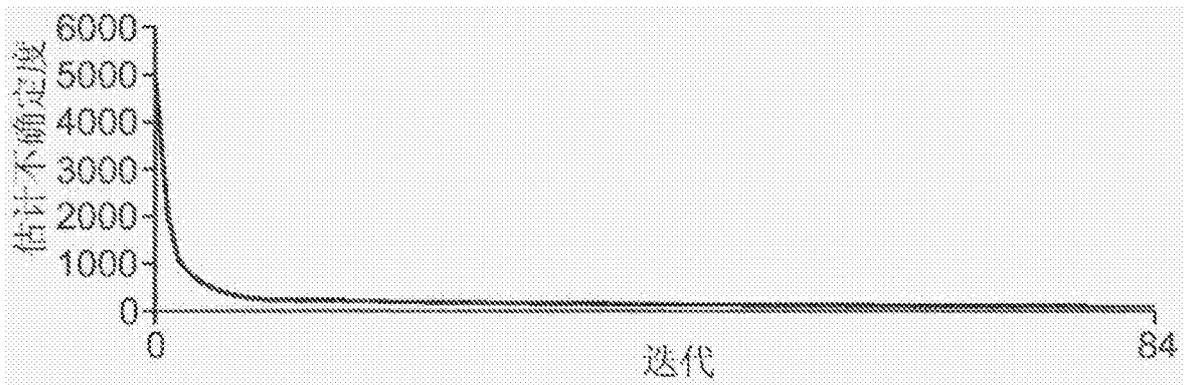


图 6B

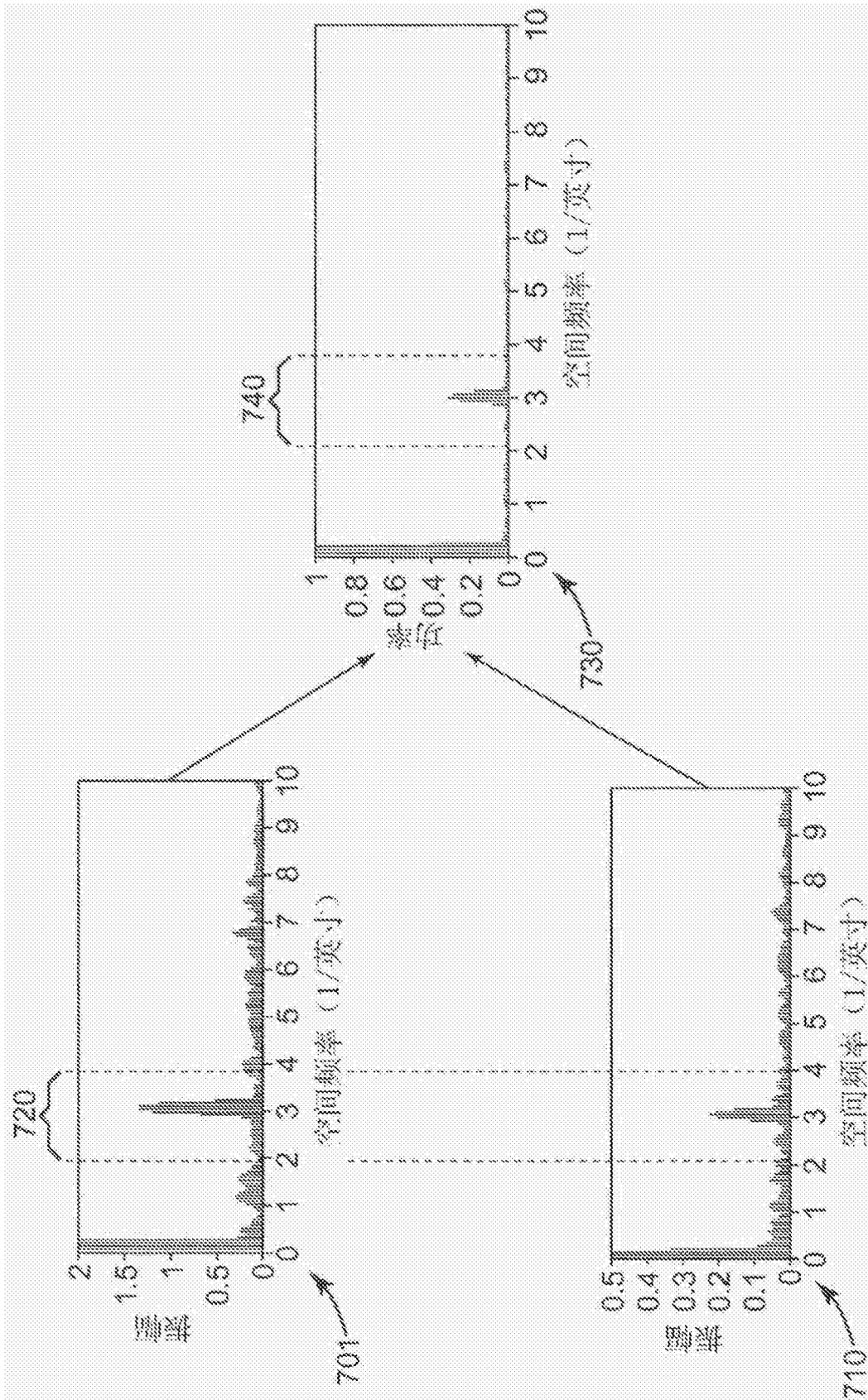


图 7