



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510006316.2

[45] 授权公告日 2007 年 12 月 5 日

[11] 授权公告号 CN 100353141C

[22] 申请日 2005.1.26

[21] 申请号 200510006316.2

[73] 专利权人 香港理工大学
地址 香港九龙红磡

[72] 发明人 殷建华 靳伟

[56] 参考文献

JP61008608A 1986.1.16

CN2570733Y 2003.9.3

GB415520A 1934.8.30

审查员 金波

[74] 专利代理机构 隆天国际知识产权代理有限公司

代理人 王玉双 张浴月

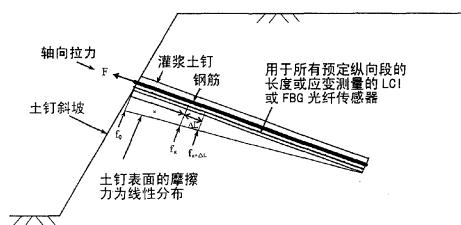
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 4 页

[54] 发明名称

测量土钉与桩的长度与质量的方法

[57] 摘要

本发明提供一种测量土钉与桩的长度与质量的方法，包括以下步骤：在感测光纤上设置多个传感器；将感测光纤沿轴向嵌置在被测桩或土钉中，其中，感测光纤的布置长度与所述桩或土钉的长度相同；将感测光纤分别与光源和反射波接收装置相连接；将反射波接收装置与数据收集记录器、数据处理电路依次连接；使用加载装置在暴露在外面的土钉或桩的头部施加轴向负荷；由反射波接收装置得到用于计算传感器在轴向负荷的作用下的应变(或局部两点长度变化)的物理量；数据处理电路利用所述物理量得到土钉或桩的应变分布、长度与质量。本发明能够广泛适用于对各种类型的土钉或桩的长度与质量的测量，并且具有可靠性高、成本低、抗电磁干扰、抗腐蚀以及便于使用的优点。



1. 一种测量土钉或桩的长度与质量的方法，包括以下步骤：

步骤 S1：在感测光纤上设置多个传感器；

步骤 S2：将具有所述多个传感器的所述感测光纤沿轴向嵌置在被测桩或土钉中，其中，所述感测光纤的长度与所述桩或土钉的长度相同；

步骤 S3：将所述感测光纤分别与光源和反射波接收装置相连接，使所述感测光纤接收来自所述光源的入射光，并将所述入射光反射到所述反射波接收装置中；

步骤 S4：将所述反射波接收装置与数据收集记录器、数据处理电路依次连接；

步骤 S5：使用加载装置在暴露在外面的所述土钉或桩的头部施加轴向力荷载；

步骤 S6：由所述反射波接收装置得到用于计算所述传感器在所述轴向力荷载的作用下的应变或长度的物理量；

步骤 S7：所述数据处理电路利用所述物理量得到所述土钉或桩的应变分布、长度与质量。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其中，

在所述步骤 S1 中，通过在所述感测光纤的预定位置设置多个反射标志器，由相邻的两个反射标志器之间的感测光纤段限定一个所述传感器，来得到所述多个传感器。

3. 如权利要求 2 所述的方法，其中，

所述步骤 S3 中的所述光源为低相干宽带光源，所述反射波接收装置为扫描式干涉仪，并且，所述低相干宽带光源的相干涉长远远小于所述多个传感器每个的长度，所述扫描式干涉仪具有可与各个所述传感器的光路长度相匹配的光程差，所述多个传感器每个的长度为使对应于不同传感器的干涉峰不会同时出现在所述扫描式干涉仪中的同一位置的不同长度。

4. 如权利要求 3 所述的方法，其中，

在所述步骤 S6 中，通过调整所述扫描式干涉仪中的扫描镜的位置，得到所述传感器的两端的反射标志器所反射的反射波的干涉峰的模拟位置光信号，用于计算所述传感器的所述应变。

5. 如权利要求 4 所述的方法，其中，

在所述步骤 S4 中，所述扫描式干涉仪经由光电探测仪与所述数据收集记录器连接；

在所述步骤 S7 中，所述光电探测仪将所述干涉峰的模拟位置光信号转换为模拟位置电信号，接着所述数据收集记录器将所述干涉峰的模拟位置电信号转换为数字位置数据输出到所述数据处理电路中，所述数据处理电路根据所述数字位置数据，计算出所述土钉或桩的应变、长度与质量。

6. 如权利要求 1 所述的方法，其中，

在所述步骤 S1 中，通过将所述感测光纤分为长度基本相等的光纤段，并在各个光纤段上设置具有互不相同的布拉格波长的光栅，来形成多个 FBG 传感器。

7. 如权利要求 6 所述的方法，其中，

所述步骤 S3 中的所述光源为宽带光源，所述反射波接收装置为 FBG 查询仪。

8. 如权利要求 7 所述的方法，其中，

在所述步骤 S6 中，使用所述 FBG 查询仪得到所述 FBG 传感器的布拉格波长。

9. 如权利要求 8 所述的方法，其中，

在所述步骤 S7 中，所述数据收集记录器将所述布拉格波长的模拟信号转换为数字数据输出到所述数据处理电路中，所述数据处理电路根据所述数字数据，计算出所述土钉或桩的应变分布、长度与质量。

10. 如权利要求 7 所述的方法，其中，

在所述步骤 S1 中，使用导入光纤将所述宽带光源的入射光导入到所述感测光纤。

11. 如权利要求 10 所述的方法，其中，

在所述步骤 S1 中，将所述感测光纤容纳在具有锚点的管中，并且将相邻的两个锚点之间的感测光纤段限定一个所述 FBG 传感器。

12. 如权利要求 2 或 6 所述的方法，其中，

在所述步骤 S2 中，将所述感测光纤与保护性涂层与缆索相结合后嵌置在所述桩或土钉中。

13. 如权利要求 2 或 6 所述的方法，其中，

在所述步骤 S2 中，将所述感测光纤置于塑料或钢制的管中后嵌置在所述桩或土钉中。

14. 如权利要求 2 或 6 所述的方法，其中，

在所述步骤 S2 中，所述感测光纤位于所述土钉或桩的一侧、内部或者表面任一位置。

测量土钉与桩的长度与质量的方法

技术领域

本发明涉及土木工程领域，尤其涉及采用光纤测量装置测量土钉与桩的长度与质量的方法。

背景技术

桩与土钉为土木工程中的重要结构。桩用于支持建筑物、桥等的上部构造，其有不同的类型：如 H 型钢桩和直径为 1 米到 3 米的钻孔灌注混凝土桩。土钉用于稳定低标准的土壤斜坡。土钉构建为，在土壤斜坡上在一具有 100 毫米直径的预钻孔的中部放置入一根钢筋或其它细长杆材料，并沿孔全长灌水泥浆。土钉就像一个直径大约为 100 毫米并且长度为 5 米到 30 米的苗条的桩。

桩与土钉一般埋在土壤或岩石中，因此难以在地下检查它们的实际长度与质量（缺陷）。在建筑产业中存在着许多或者短或者有缺陷的桩与土钉。如果这些桩与土钉不能及时发现，将会对生命与财产造成极大的损失。如果能及时发现这些缺陷，可以及时更换或加强这些桩与土钉从而避免损失。

现有的测量土钉与桩的长度与质量的技术具有很多局限，如：（1）基于应力波传播理论的无损技术，难以测量较长和/或具有连接点的桩/土钉的长度，这是因为对于较长的桩/土钉，反射波会太弱并会与来自连接点与周围土壤的反射波混合，因此这种技术的应用性与可靠性较差；（2）超声扫描法则造价太高，并且在一个桩上至少需要预装两个（一般是四个）直径为 40 毫米到 100 毫米的塑料套管或钢套管；另外，根本不可能为直径仅为 100 毫米的土钉安装两个塑料套管，因此这种技术根本不适用于土钉，而对桩而言，成本又太高；（3）混凝土钻心法（concrete coring method）对于混凝土桩较为可靠，但是价格昂贵。此外，这种钻心法不适用于直径仅为 100 毫米的土钉。因此，需要一种成本低、适用性强的可实时监控位于地下的桩与土钉的长度与质量的方法。

发明内容

为了解决现有技术中存在的弊端，本发明提供一种能够广泛适用于对各种类型的土钉或桩的长度与质量的测量的方法。本发明的目的还在于提供一种可靠性高、成本低、抗电磁干扰、抗腐蚀以及便于使用的测量土钉与桩的长度与质量的方法。

为达上述目的，本发明测量土钉与桩的长度与质量的方法包括以下步骤：

步骤 S1：在感测光纤上设置多个传感器；

步骤 S2：将具有所述多个传感器的所述感测光纤沿轴向嵌置在被测桩或土钉中，其中，所述感测光纤的布置长度与所述桩或土钉的长度相同；

步骤 S3：将所述感测光纤分别与光源和反射波接收装置相连接，使所述光纤接收来自所述光源的入射光，并将所述入射光反射到所述反射波接收装置中；

步骤 S4：将所述反射波接收装置与数据收集记录器（datalogger）、数据处理电路依次连接；

步骤 S5：使用加载装置在暴露在外面的所述土钉或桩的头部施加轴向力荷载；

步骤 S6：由所述反射波接收装置得到用于计算所述传感器在所述轴向力荷载的作用下的应变（或长度变化）的物理量；

步骤 S7：所述数据处理电路利用所述物理量得到所述土钉或桩的应变分布、长度与质量。

概括地讲，在步骤 S1~S5 中，是将光纤测量装置嵌入桩或土钉里，使用加载设备施加轴向力荷载到暴露在外面的土钉或桩的头部，利用光学与力学原理，来感测桩或土钉在轴向负荷作用下的长度变化。而在步骤 S6 中，则由反射波接收装置将光纤测量装置所感测到土钉或桩的长度变化转换为可以用来测量应变的物理量。最后在步骤 S7 中，由数据处理电路根据该物理量计算出被测土钉或桩的应变分布、长度、质量。

其中，本发明感测土钉或桩的长度变化，并将长度变化转换为可以用来测量应变的物理量的方式有两种。

第一种方式是：在所述步骤 S1 中，通过在所述感测光纤的预定位置设置多个反射标志器，由相邻的两个反射标志器之间的感测光纤段限定一个所述传感器，来得到所述多个传感器。所述步骤 S3 中的所述光源为宽带低相干光源，所述反射波接收装置为扫描式干涉仪，并且，所述宽带低相干光源的相干涉长远远小于所述多个传感器每个的长度，所述扫描式干涉仪具有可与各个所述传感器的光路长度基本相匹配的光程差，所述多个传感器每个的长度略有不同，从而使得对应于不同传感器的干涉峰不会同时出现在所述扫描式干涉仪中的同一位置。这种测量系统称为低相干干涉仪（LCI）。在所述步骤 S6 中，通过调整所述扫描式干涉仪中的扫描镜的位置，得到所述传感器的两端的反射标志器所反射的反射波的干涉峰的模拟位置光信号，接着，所述模拟位置光信号经过电转换（光电探测器 detector）后，转换为电信号，用于计算所述传感器两端反射标志器之间的长度变化（由此可计出两反射标志器之间的平均应变）。在所述步骤 S7 中，所述数据收集记录器将所述干涉峰的模拟位置电信号转换为数字位置数据输出到所述数据处理电路中，所述数据处理电路根据所述数字位置数据，计算出所述土钉或桩的应变、长度与质量。关于这种方式更详细的内容，请参见“具体实施方式”中结合图 2 的说明。

第二种方式是：在所述步骤 S1 中，通过将所述感测光纤分为长度基本相等的光纤段，并在各个光纤段上设置具有互不相同的布拉格波长的光栅，来形成多个光纤布拉格（FBG）传感器。所述步骤 S3 中的所述光源为宽带光源，所述反射波接收装置为 FBG 查询仪。在所述步骤 S6 中，使用所述 FBG 查询仪得到所述 FBG 传感器的布拉格波长。在所述步骤 S7 中，所述数据收集记录器将所述布拉格波长的模拟信号转换为数字数据输出到所述数据处理电路中，所述数据处理电路根据所述数字数据，计算出所述土钉或桩的应变分布、长度与质量。

其中，将所述感测光纤与被测土钉或桩结合的方式有多种，如：将所述感测光纤与保护性涂层与缆索相结合后嵌置在所述桩或土钉中；将所述感测光纤固定地置于塑料或钢制的管中后，沿轴向布置嵌置在所述桩或土钉中。并且，所述感测光纤位于所述土钉或桩的一侧、内部或者表面中任一位置。

本发明的方法中使用的光纤测量装置、反射波接收装置、数据收集记录

器与加载设备，均是为了本发明的目的而专门设计并生产。

本发明的测量系统的光学设置基本上为一个准分布长度测量系统，其具有从 10 米到 70 米长的全面的测量范围，以及从几厘米到几十厘米的空间分辨率。由于土钉与桩一般在 5 米到 30 米长的范围内，因此本发明的测量系统可以广泛适用于对各种类型的土钉或桩的长度与质量的测量。此外，本发明还具有可靠性高、成本低、抗电磁干扰、抗腐蚀以及便于使用的优点。

附图说明

图 1 为本发明的测量桩或土钉在轴向力荷载作用下的长度变化，从而得知应变分布，总长度和质量的方法的整体设置示意图，其以斜坡中的土钉为例，示出了 LCI 或 FBG 光纤传感器、轴向拉出力 F、线形摩擦力分布、以及典型的纵向段 ΔL ；

图 2 为本发明的感测桩或土钉在轴向力荷载作用下的长度变化，并将该长度变化转换为可以计算应变的物理量的第一种方式，即 LCI 传感器，其中图 2 (a) 为整体设置图，图 2 (b) 为光电探测器输出作为扫描镜位置的函数的示意图；

图 3 为本发明测量桩或土钉在轴向力荷载作用下的长度变化，并将该长度变化转换为可以计算应变的物理量的第二种方式，即 FBG 传感器，其中图 3 (a) 为整体设置图，图 3 (b) 为反射波的功率波谱 ($P-\lambda$) 示意图，图 3 (c) 为光源的输出光谱；

图 4 为图 3 所示的方法中使用 FBG 传感器的准分布长度测量系统的结构示意图。

具体实施方式

本发明的方法总的测量步骤是：

第一步骤，基于力学与光学原理来感测嵌置在被测土钉或桩中的光纤传感器在轴向力荷载作用下的长度的变化，并将其转换成可以计算光纤传感器的应变的物理量；

第二步骤，根据所得到的可以计算光纤传感器的应变的物理量，计算光纤传感器的应变、长度；

第三步骤，根据所测得的土钉或桩的应变，可得知沿土钉或桩的轴向应变分布，计算出被测土钉或桩的质量。

其中，第一步骤、第二步骤通过两种方式实现，其构成与使用的光学原理如下：

(a) 通过在感测光纤的预定位置处设置多个反射标志器，将相邻的两个反射标志器之间的光纤段定义为一个光纤传感器，并将该感测光纤与宽带低相干光源与扫描干涉仪连接，来形成基于低相干干涉（LCI）原理的多段离散距离测量装置（参见图 2）。

在上述方式中，桩或土钉的长度变化被转换为每个光纤传感器的长度变化，当有宽带低相干光入射时，就转换为每个光纤传感器两端的反射标志器所反射的反射波的光程的变化。该反射波被扫描式干涉仪接收后，就转换为干涉峰的位置的变化。即，在 LCI 法时，根据从 LCI 返回的相干光信号，先计算出光纤传感器的当前长度（即被测土钉或桩的当前长度），再使用当前长度计算出光纤传感器的应变（即被测土钉或桩的应变）。

(b) 通过在感测光纤上设置多个串联的光纤布拉格光栅（FBG），并将该感测光纤与宽带光源与 FBG 查询仪连接，来形成基于宽带光源的多点 FBG 传感器的距离测量装置（参见图 3）。

在上述方式中，桩或土钉的长度变化被转换为每个光纤传感器的沿轴向的应变，当有宽带光入射时，就转换为每个光纤传感器的布拉格光栅所反射的反射波的布拉格波长的变化。该反射波被 FBG 查询仪接收后，就可以得到用来计算出每个光纤传感器的应变的布拉格波长。即，在 FBG 法时，根据从 FBG 中得到的布拉格波长，先计算出光纤传感器的应变（即被测土钉或桩的应变），再使用所得到的应变计算出光纤传感器的当前长度（即被测土钉或桩的当前长度）。

下面是对本发明优选实施例的具体描述。

首先，请参见图 1，为本发明的测量桩或土钉在轴向力荷载作用下的长度变化的方法的整体设置示意图，其以斜坡中的土钉为例，示出了 LCI 或 FBG 光纤传感器、轴向拉出力 F 、线形摩擦力分布、以及典型的纵向段 ΔL 。

将光纤测量装置嵌入桩或土钉的方式可以是，将感测光纤（LCI 传感器或 FBG 传感器）与保护性涂层与缆索（cable）（套管）结合，然后将其沿

轴向嵌入到土钉或桩。该受保护的感测光纤既可以粘着在土钉或钻孔混凝土桩中钢筋的一侧，也可以固置于钢管(pipe)/I型桩的表面上。

可选择的，也可将感测光纤可以放置并固定在小的塑料/钢管(tube)中，然后，将该塑料/钢管(tube)放入钻孔中，通过混凝土(浆)浇灌而形成混凝土桩或水泥土钉。这样，有感测光纤的塑料/钢管(tube)与混凝土桩或水泥土钉形成一体。

但是，无论使用哪种将感测光纤嵌入土钉或桩的方法，均需满足所安装的感测光纤长度要与桩和土钉的长度相同的条件。

促使土钉或桩发生应变或者说长度发生变化的加载装置是专门设计的，用于在暴露在外面的土钉或桩的头部施加轴向力荷载 F 。在加载过程中，就会产生土钉或桩的轴向应变或者说长度就会发生变化。

下面请参见图2(a)与图2(b)，为本发明的感测桩或土钉在轴向力荷载作用下的长度变化，并将该长度变化转换为可以计算被测土钉或桩的长度、应变的物理量的第一种方式，其采用基于宽带光源的低相干干涉(LCI)原理的多段离散距离测量装置。

如图2(a)所示，本发明的多段离散距离测量装置具体设置为：沿感测光纤的预定位置设置 N 个反射标志器 R_1 到 R_N ，将相邻的两个反射标志器之间的感测光纤段限定为一个传感元件 S_i ($i=1, 2, \dots, N-1$)，即从 S_1 到 S_{N-1} 共 $N-1$ 个光纤传感器；然后将具有反射标志器的感测光纤安装在桩或土钉中；将该感测光纤与低相干宽带光源和扫描式干涉仪相连接，其中，该扫描式干涉仪具有基本上与各个传感元件的光程长度相匹配的光程差(Optical Path Difference)；将该扫描式干涉仪与数据收集记录器以及数据处理电路连接。

同时，该 $N-1$ 个传感元件 S_1 到 S_{N-1} 的长度需要满足以下两个条件：第一、 S_1 到 S_{N-1} 的长度均需远远大于宽带低相干光源的相干涉长，这样设置的目的是：在到达扫描干涉仪之前，从反射标志器 R_1 到 R_N 反射回来的 N 个反射波中任两个反射波的光程差就是一个或几个传感元件的长度，由于该光程差远远大于反射波即宽带低相干光源的相干涉长，而要发生宽带低相干光干涉需要满足光程差小于宽带光源的相干涉长的条件，因此，这 N 个反射波在到达扫描式干涉仪之前不会彼此发生干涉，而只能在到达扫描干涉仪之后，通过调整扫描镜的位置，使相邻的反射标志器反射回的反射波的光程差

匹配而可以发生低相干光干涉；第二、 S_I 到 S_{N-1} 的分段长度要选择得略有不同，从而使对应于不同传感元件的干涉峰不会同时出现在同一位置。这样设置的目的是为了在整个测量过程中，干涉峰的位置始终不会重合，从而可以准确测量出对应于每一个干涉峰的扫描镜的位置。

当外界拉长或压缩的应力加在土钉或桩上使其发生轴向应变时，安装在其中的感测光纤就会产生轴向应变，即长度发生变化。该 N 个反射标志器会将入射的白光反射回来，从而将每个传感元件 S_i 的长度的变化 δL_i ($i=1,2, \dots, N-1$) 转换为其两端的反射标志器所反射的反射波的光程的变化。此时，通过移动扫描式干涉仪的扫描镜的位置 x ，可以改变扫描式干涉仪的光程差，从而使每个传感元件的两个反射波的光程差相匹配而产生干涉峰，干涉光信号经过探测器 (detector) 后，转换为电信号。参见图 2 (b)，为表示 $N-1$ 个干涉峰的位置的函数的坐标图。

接下来，通过数据收集记录器记录干涉仪的扫描镜的位置，即干涉峰的位置 x_i ，并将该模拟信号转换成数字信号输出到数据处理电路。接着，该数据处理电路使用干涉峰的位置的变化 $\delta x = x'_i - x_i$ ，其中 x'_i 和 x_i 分别是轴向荷载施加前后的干涉峰的位置。通过公式 (1) 计算出任意一个传感元件 S_i 的长度变化 $\delta L_i'$ 。

$$\text{公式 (1)} : \delta L_i = k \delta x$$

其中 k 为一个常数。

接着，数据处理电路可以通过公式 $\delta L_i = \Delta L_i' - \Delta L_i$ ，其中 ΔL_i 和 $\Delta L_i'$ 分别为轴向荷载施加前后的传感元件 S_i 的长度(参见图 1 和 2)，计算出每个传感元件的当前长度 $\Delta L_i'$ ，进而计算出整个感测光纤的当前长度，由于感测光纤长度与被测土钉或桩长度相同，因此可以得到被测土钉或桩的当前长度。

同时，数据处理电路通过公式 (2) 计算出传感元件 S_i 的应变 ε_i ，

$$\text{公式 (2)} : \varepsilon_i = \frac{\delta L_i}{\Delta L_i}$$

其中， i 为分别对应于从传感元件 S_I 到传感元件 S_{N-1} 的从 1 到 $N-1$ 的整数。

最后，数据处理电路把全部 $N-1$ 个传感元件 S_i 的应变 ε_i 沿土钉 (或桩) 长方向计算出，就可以得到应变分布，进而计算出被测土钉或桩的质量，参

见公式（3）到（10）以及对公式（10）的说明。

下面请参见图 3（a）与图 3（b），为本发明的感测桩或土钉在轴向力荷载作用下的长度变化、应变的第二种方式，其采用基于宽带光源的布拉格光栅形变原理的多点 FBG 传感器应变测量装置。

如图 3（a）所示，本发明的多点 FBG 传感器距离测量装置具体设置为：在感测光纤上连续设置 N 个 FBG 传感器 S_1 到 S_N ，其中， S_i 到 S_N 要具有不同的布拉格波长 λ_{Bi} ；将该感测光纤沿轴向安装在桩或土钉中；将该感测光纤与宽带光源与 FBG 查询仪相连接；将该 FBG 查询仪与数据收集记录器以及数据处理电路连接。

该 N 个 FBG 传感器用于在宽带光源的入射光通过导入光纤进入 FBG 传感器时，通过各自的光栅将宽带光源发出的光波的某一波长即布拉格波长 λ_{Bi} 的部分反射回来，即反射对应于 N 个布拉格波长 λ_{B1} 到 λ_{BN} 的成分。

当外界拉长或压缩的应力加在土钉或桩上使其发生轴向应变时，土钉或桩就会产生轴向应变，即长度发生变化。从而，嵌入在土钉或桩中的这些 FBG 传感器的光栅也将沿轴向发生形变，即布拉格波长将会产生移位。由宽带光源通过导入光纤入射的光，将被这些发生了形变的光栅反射，即反射新布拉格波长的成分，并导入到 FBG 查询仪中，由 FBG 查询仪检测出反射波的波谱，从该波谱可以得到变化后的 N 个布拉格波长 λ_{B1} 到 λ_{BN} 。

接下来，通过数据收集记录器记录变化后的 N 个布拉格波长 λ_{B1} 到 λ_{BN} ，并将该模拟信号转换成数字信号输出到数据处理电路。接着，该数据处理电路使用该新的布拉格波长，通过公式（1）' 确定每个 FBG 传感器上的应变 ε_i ：

$$\text{公式 (1) }': \varepsilon_i = k \frac{\Delta\lambda_{Bi}}{\lambda_{Bi}}$$

其中， k 是一个常数， i 为分别对应于从 FBG 传感器 1 到 FBG 传感器 N 的从 1 到 N 的整数； $\Delta\lambda_{Bi}$ 代表所述 FBG 传感器在应力作用下布拉格波长的位移数据； λ_{Bi} 代表所述 FBG 传感器在没有应力时的布拉格波长。

接下来，为了计算出 FBG 传感器在应力下的长度，将具有 FBG 传感器的感测光纤以图 4 的方式容纳在具有锚点的管中，并且相邻的两个锚点之间的感测光纤段限定一个 FBG 传感器。假定第 i 个 FBG 传感器的长度为 ΔL_i ，

施加到每个 FBG 传感器的应变与每个 FBG 传感器的长度变化 δL_i 通过公式

(2)' 相联系:

$$\text{公式 (2)'} : \delta L_i = \varepsilon_i \Delta L_i$$

因此, 数据处理电路通过上面的公式 (2)', 就可以计算出每个 FBG 传感器的长度变化 δL_i , 从而可以通过公式 $\delta L_i = \Delta L'_i - \Delta L_i$ 而得到每个 FBG 传感器的当前长度, 进而得到整个感测光纤的当前长度, 由于感测光纤与被测土钉或桩一样, 因此可以得到被测土钉或桩的当前长度。

最后, 数据处理电路把全部 N 个传感元件 S_i 的应变 ε_i 沿土钉 (或桩) 长方向计算出, 就可以得到应变分布, 进而计算出被测土钉或桩的质量, 参见公式 (3) 到 (10) 以及对公式 (10) 的说明。

下面将结合图 1, 描述如何利用前面公式 (1) 与公式 (2) 或前面公式 (1)' 与公式 (2)', 得到的应变来计算土钉或桩的质量, 即杨氏模量。

假设土钉的总长度为 L , 在轴向拉力荷载 F 的作用下, 假设土钉灌浆表面 (nail grout surface) 的土摩擦力 f_0 为线性分布。这里, 将使用前述通过光纤传感器测得的应变与图 1 所示的摩擦力的分布, 并以从钉头开始距离为 x , 典型的纵向段 ΔL 来推导杨氏模量 E 的公式。

由于摩擦力 f_0 为线性分布, 其大小以下式计算:

$$\text{公式 (3)} : F = \frac{1}{2} f_0 L$$

$$f_0 = \frac{2F}{L}$$

在从钉头起距离为 x 处的摩擦力 f_x 与在距离 $x + \Delta L$ 处的摩擦力 $f_{x+\Delta L}$ 的大小计算如下:

$$\text{公式 (4)} : f_x = f_0 \frac{L-x}{L} = \frac{2F}{L} \frac{L-x}{L} = 2F \frac{L-x}{L^2}$$

$$\text{公式 (5)} : f_{x+\Delta L} = 2F \frac{L-x-\Delta L}{L^2}$$

在从钉头起距离为 x 处的轴向力 F_x 与在距离 $x + \Delta L$ 处的轴向力 $F_{x+\Delta L}$ 的大小计算如下:

$$\text{公式 (6)} : F_x = F - \frac{x}{2} (f_0 + f_x) = F - \frac{x}{2} \left(\frac{2F}{L} + 2F \frac{L-x}{L^2} \right) = F - xF \frac{2L-x}{L^2}$$

公式 (7) :

$$\begin{aligned} F_{x+\Delta L} &= F - \frac{x + \Delta L}{2} (f_o + f_{x+\Delta L}) = F - \frac{x + \Delta L}{2} \left(\frac{2F}{L} + 2F \frac{L - x - \Delta L}{L^2} \right) = \\ &= F - (x + \Delta L) F \frac{2L - x - \Delta L}{L^2} \end{aligned}$$

在从钉头起距离为 x 处的轴向力 F_x 与在距离 $x + \Delta L$ 处的轴向力 $F_{x+\Delta L}$ 的平均值 \bar{F}_x 为:

公式 (8) :

$$\begin{aligned} \bar{F}_x &= \frac{F_x + F_{x+\Delta L}}{2} = \frac{1}{2} \left[F - xF \frac{2L - x}{L^2} + F - (x + \Delta L) F \frac{2L - x - \Delta L}{L^2} \right] = \\ &= F - (x + \frac{\Delta L}{2}) F \frac{2L - x - \frac{\Delta L}{2}}{L^2} \end{aligned}$$

假设土钉的面积为 A , 纵向段 ΔL 的平均应变为 $\bar{\varepsilon}_x$, 弹性关系是:

公式 (9) : $\bar{\sigma}_x = E_x \bar{\varepsilon}_x$

其中, $\bar{\sigma}_x = \bar{F}_x / A$.

从而, 杨氏模量 E_x 可以计算如下:

公式 (10) :

$$E_x = \frac{\bar{\sigma}_x}{\bar{\varepsilon}_x} = \frac{\bar{F}_x}{A \bar{\varepsilon}_x} = \frac{F - (x + \frac{\Delta L}{2}) F \frac{2L - x - \frac{\Delta L}{2}}{L^2}}{A \bar{\varepsilon}_x}$$

公式 (10) 中的该平均应变 $\bar{\varepsilon}_x$ 可由前面的 LCI 法或 FBG 法得到的应变分布得到。优选的, 在 LCI 法或 FBG 方法中, 当 x 值大约为从光纤传感器 S_i 到光纤传感器 S_{i-1} 的长度之和, 并且轴向段 ΔL 的长度大约与光纤传感器 S_i 的长度相等时, 轴向段 ΔL 的平均应变为 $\bar{\varepsilon}_x$ 即大约为对应的光纤传感器 S_i 上的应变 ε_{i-1} 。

这样, 用式 (10) 就可以得到用于评估土钉或桩的质量的杨氏模量的值, 并且可以沿着土钉或桩绘制该值。例如, 如果 E_x 的值小于水泥与钢筋的结合杨氏模量, 该水泥灌浆土钉的质量有问题 (或低于标准)。同样的方法可以用于评估混合桩或钢管/H-桩的质量。

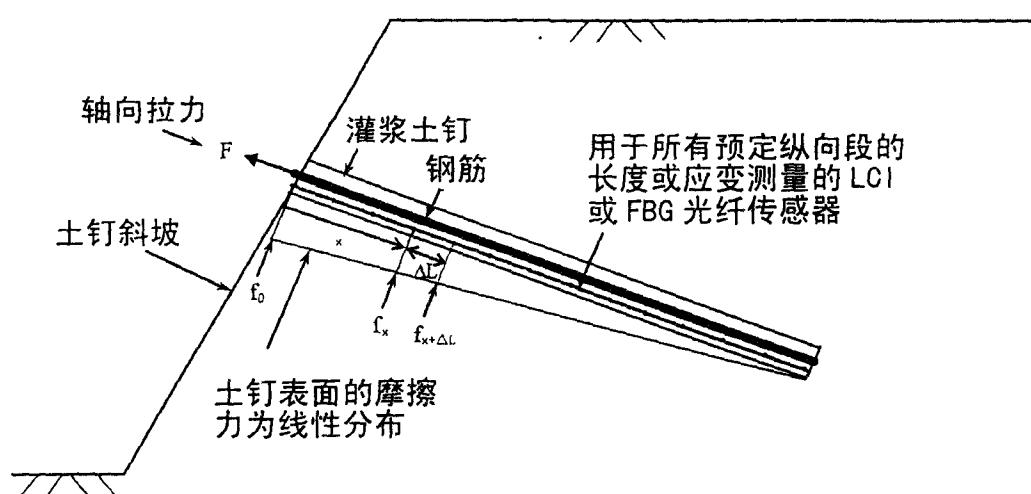


图 1

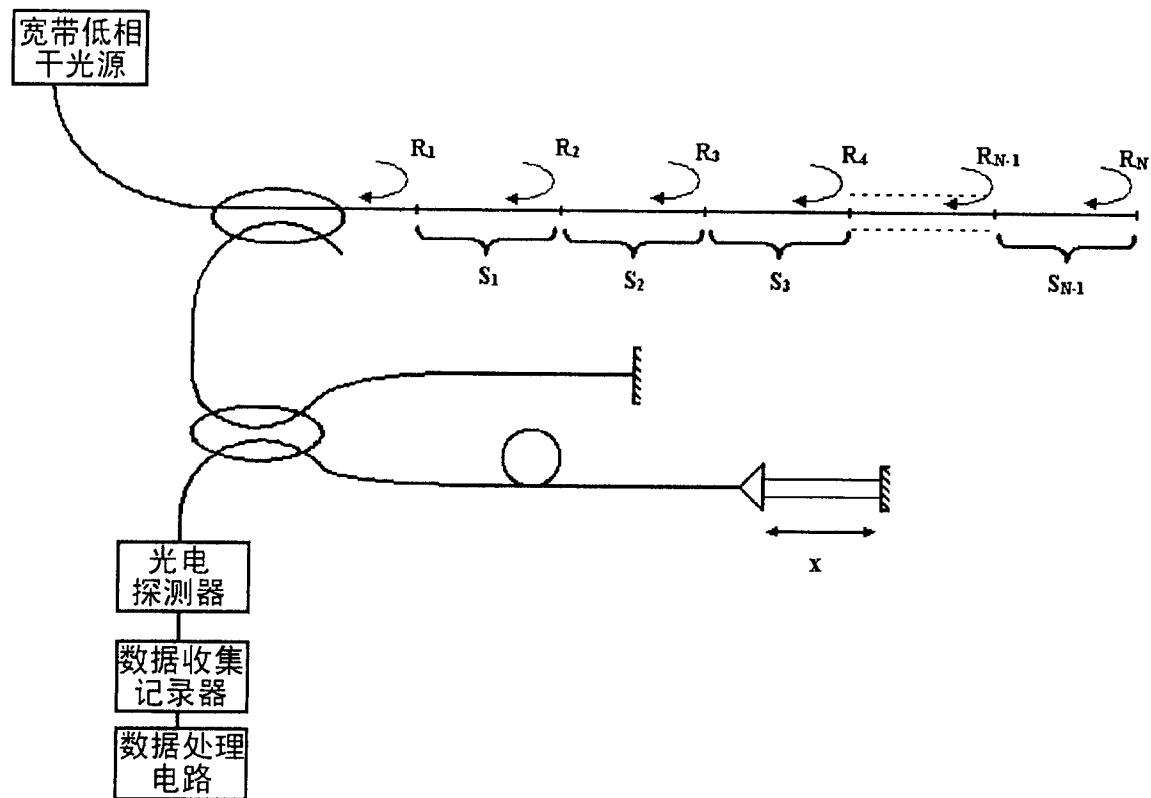


图 2(a)

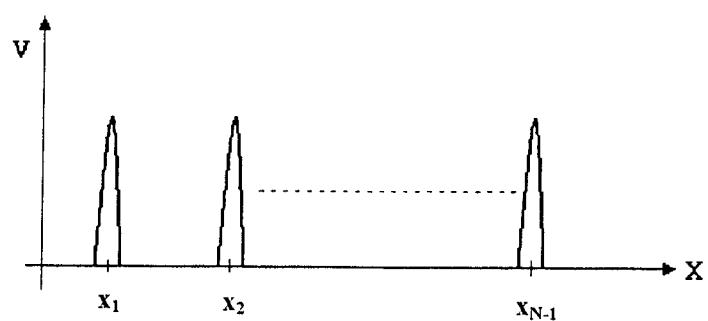


图 2(b)

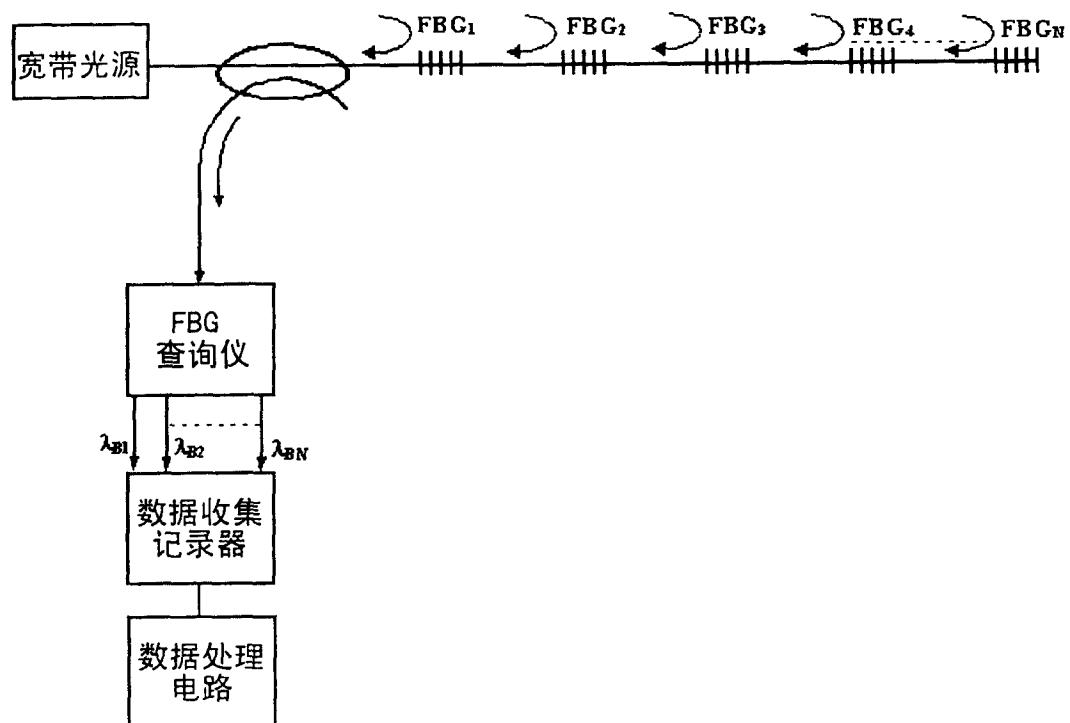


图 3(a)

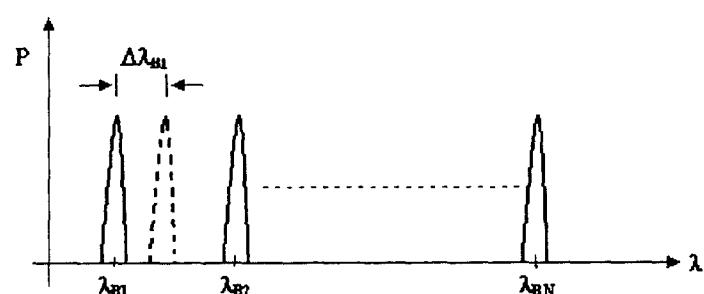


图 3(b)

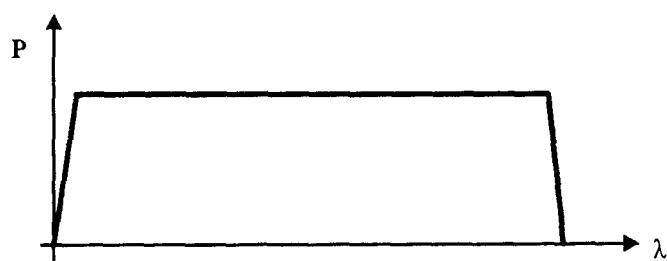


图 3(c)

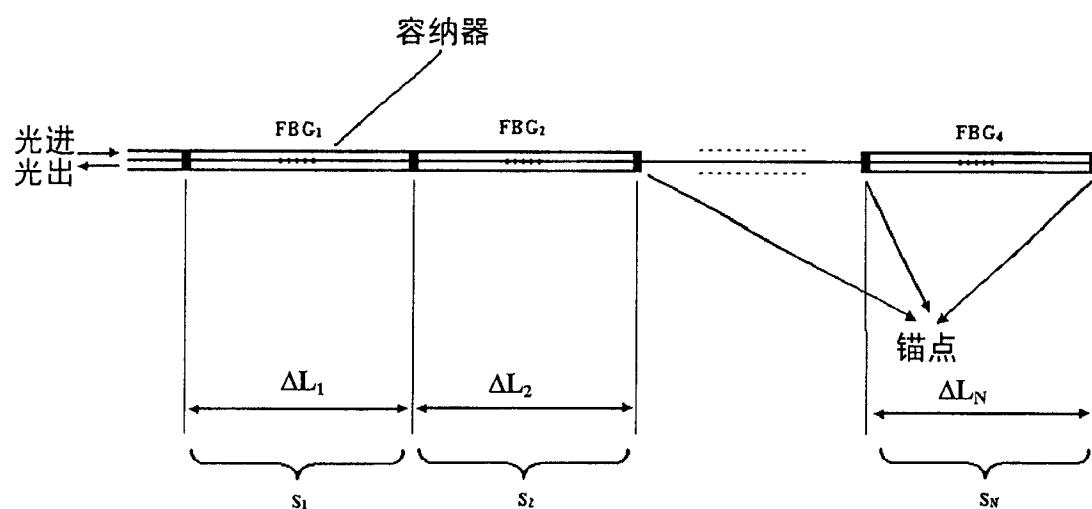


图 4