



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102620661 B

(45) 授权公告日 2014. 05. 14

(21) 申请号 201210112710. 4

CN 202547600 U, 2012. 11. 21, 权利要求

(22) 申请日 2012. 04. 18

1-2.

(73) 专利权人 中国新兴保信建设总公司

CN 2272568 Y, 1998. 01. 14, 全文.

地址 100079 北京市丰台区永外东铁营顺八条 9 号

US 5839199 A, 1998. 11. 24, 全文.

(72) 发明人 孙洪超 程琦然 戴连双 张春玲
张扬 轩兴沧 张超

JP 特开 2005-331363 A, 2005. 12. 02, 全文.

CN 101078618 A, 2007. 11. 28, 说明书第 1-2 页

“说明内容”、第 3-4 页“具体实施方式”及图 1-2.

审查员 王书伦

(74) 专利代理机构 北京国林贸知识产权代理有限公司 11001

代理人 李桂玲 杜国庆

(51) Int. Cl.

G01B 11/02 (2006. 01)

G01B 11/16 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 201181332 Y, 2009. 01. 14, 说明书第 3 页
倒数 1-2 段, 第 4 页第 1-3 段及图 1-8.

CN 201130017 Y, 2008. 10. 08, 全文.

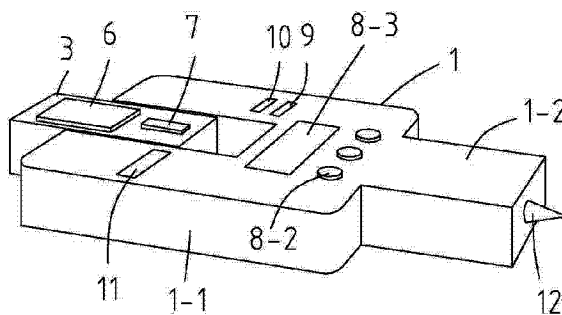
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种隧道沉降收敛检测仪及其检测方法

(57) 摘要

本发明涉及一种隧道沉降收敛检测仪及其检测方法, 所述检测仪包括检测仪主体, 在检测仪主体上设置有一个由伺服马达驱动旋转的测量装置, 所述测量装置包括一个载体, 所述载体通过旋转轴连接在检测仪主体上, 所述旋转轴连接有角度编码器, 所述载体上设置有一个激光干涉测距仪和一个带有水平零度输出信号的重力感应传感器; 所述方法包括原始数据检测步骤和沉降收敛检测步骤; 本发明结构简单、操作方便、精度高、稳定性好, 可以实现快速检测; 完成一次检测只需一个人、几分钟, 省时省力, 具有明显的技术进步; 同时检测过程中不与其他工程施工冲突, 配上应用软件可进行全天候实时监测, 对隧道有较大沉降、不稳定沉降进行预警。



1. 一种隧道沉降收敛检测方法,其特征在于,所述方法是基于一种隧道沉降收敛检测仪而实现的检测方法,所述隧道沉降收敛检测仪包括检测仪主体,在检测仪主体上设置有一个由伺服马达驱动旋转的测量装置,所述测量装置包括一个载体,所述载体通过旋转轴连接在检测仪主体上,所述旋转轴连接有角度编码器,所述载体上设置有一个激光干涉测距仪和一个带有水平零度输出信号的重力感应传感器,所述重力感应传感器的敏感轴与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴的轴向一致;在所述检测仪主体上设置有微处理器测量控制装置、温度传感器、湿度传感器和水平尺;所述水平尺轴向与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴向呈 90 度夹角设置,所述角度编码器、激光干涉测距仪、重力感应传感器、温度传感器、湿度传感器的输出信号分别连接至微处理器测量控制装置;所述隧道沉降收敛检测方法的步骤包括原始数据检测步骤和沉降收敛检测步骤:

所述原始数据检测步骤包括:

- a. 首先将所述隧道沉降收敛检测仪固定在隧道的一侧边墙处并记录固定原点;
- b. 将激光干涉测距仪朝向隧道的另一侧边墙,校准水平尺,使检测仪旋转轴处于水平状态;
- c. 启动隧道沉降收敛检测仪工作:微处理器测量控制装置发出伺服马达启动命令,伺服马达带动测量装置开始旋转,微处理器测量控制装置等待重力感应传感器发出的水平零度输出信号;

d. 当微处理器测量控制装置接收到重力感应传感器发出的水平零度输出信号后,记录此时的激光干涉测距仪测得的距离数据为隧道第一宽度距离,并定义此时角度编码器输出的角度为零度角信号;继续向上旋转测量装置读取激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离,定义顶部任意的一个点,读取激光干涉测距仪到隧道顶部所述任意的一个点的斜向距离,记录此时的角度编码器输出的角度,通过正弦定理计算出隧道顶部所述任意一个点到激光干涉测距仪水平线的垂直高度为隧道第一垂直高度,通过正弦定理计算出激光干涉测距仪到隧道宽度距离中所述隧道第一垂直高度的垂点距离;

所述沉降收敛检测步骤包括获取隧道宽度收敛结果步骤和获取隧道高度收敛结果步骤:

所述获取隧道宽度收敛结果步骤是:

- e. 将所述隧道沉降收敛检测仪固定在隧道的一侧边墙所记录的固定原点处,所述固定原点是所述原始数据检测步骤中隧道沉降收敛检测仪的固定原点;
- f. 将激光干涉测距仪朝向隧道的另一侧边墙,校准水平尺,使检测仪旋转轴处于水平状态;
- g. 启动隧道沉降收敛检测仪工作:微处理器测量控制装置发出伺服马达启动命令,伺服马达带动测量装置开始旋转,微处理器测量控制装置等待重力感应传感器发出的水平零度输出信号;当微处理器测量控制装置接收到重力感应传感器发出的水平零度输出信号后,记录此时的激光干涉测距仪测得的距离数据为隧道第二宽度距离,并定义此时角度编码器输出的角度为零度角信号,将隧道第一宽度距离和隧道第二宽度距离进行相减,得到隧道宽度收敛结果;

由于隧道宽度收敛中两侧边墙的收敛是对称的,因此原始数据检测步骤中所述激光干涉测距仪到所述隧道第一垂直高度的垂点距离是已知距离,所述隧道第一垂直高度的垂点

到当前激光干涉测距仪的距离计算过程是：原始数据检测步骤中所述激光干涉测距仪到所述隧道第一垂直高度的垂点距离减去二分之一宽度收敛距离；

所述获取隧道高度收敛结果步骤是：

h. 继续向上旋转测量装置读取激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离，根据已知的隧道第一垂直高度的垂点到当前激光干涉测距仪的距离、连续读取的角度编码器输出的角度和连续读取的激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离，由于激光干涉测距仪、所述垂点和垂点之上的所述顶部任意的一个点的三点连线为直角三角形，通过余弦定理找到在所述垂点之上的所述顶部任意的一个点，通过正弦定理或勾股定理计算出此时隧道顶部所述任意一个点到激光干涉测距仪水平线的垂直高度，并称之为隧道第二垂直高度，将隧道第一垂直高度和隧道第二垂直高度进行相减，得到隧道高度收敛结果。

一种隧道沉降收敛检测仪及其检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于测量技术领域,特别涉及一种隧道沉降收敛检测仪及其检测方法,通过激光干涉测距装置和重力感应装置的组合应用实现了隧道沉降收敛的快速检测。

背景技术

[0002] 在隧道施工中隧道净空是非常关键的控制因素,在开挖控制中,隧道净空的大小影响到超欠挖方量的多少同时也对以后的二衬厚度产生非常大的影响;在二衬中直接关系到成型后的隧道的断面净空是否侵限。因此,隧道的沉降收敛是必备的检测,它能对隧道稳定程度做出判断,预警隧道不安全的因素,防止事故的发生。目前,检测方法是“水准仪倒尺法”,其有比较高的精度,但是操作比较繁琐,需要在隧道顶部预埋件;隧道内一般比较昏暗,影响水准尺的读数精度;在隧道出渣土过程中会造成彼此的工作延误,用这种方法费时费力。

发明内容

[0003] 本发明的目的是提出一种隧道沉降收敛检测仪及其检测方法技术方案,该技术方案通过激光干涉测距装置和重力感应装置的组合应用实现了隧道沉降收敛的快速检测。

[0004] 为了实现上述目的,本发明的技术方案是:

[0005] 一种隧道沉降收敛检测仪,包括检测仪主体,在检测仪主体上设置有一个由伺服马达驱动旋转的测量装置,所述测量装置包括一个载体,所述载体通过旋转轴连接在检测仪主体上,所述旋转轴连接有角度编码器,所述载体上设置有一个激光干涉测距仪和一个带有水平零度输出信号的重力感应传感器,所述重力感应传感器的敏感轴与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴的轴向一致;在所述检测仪主体上设置有微处理器测量控制装置、温度传感器、湿度传感器和水平尺;所述水平尺轴向与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴向呈 90 度夹角设置,所述角度编码器、激光干涉测距仪、重力感应传感器、温度传感器、湿度传感器的输出信号分别连接至微处理器测量控制装置。

[0006] 所述水平尺是目测水准管。

[0007] 一种隧道沉降收敛检测方法,所述方法是基于一种隧道沉降收敛检测仪而实现的检测方法,所述隧道沉降收敛检测仪包括检测仪主体,在检测仪主体上设置有一个由伺服马达驱动旋转的测量装置,所述测量装置包括一个载体,所述载体通过旋转轴连接在检测仪主体上,所述旋转轴连接有角度编码器,所述载体上设置有一个激光干涉测距仪和一个带有水平零度输出信号的重力感应传感器,所述重力感应传感器的敏感轴与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴的轴向一致;在所述检测仪主体上设置有微处理器测量控制装置、温度传感器、湿度传感器和水平尺;所述水平尺轴向与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴向呈 90 度夹角设置,所述角度编码器、激光干涉测距仪、重力感应传感器、温度传感器、湿度传感器的输出信号分别连接至微处理器测量控制装置;所述隧道沉降收敛检测方法的步骤包括原始数据检测步骤和沉降收敛检测步骤:

[0008] 所述原始数据检测步骤包括：

[0009] a. 首先将所述隧道沉降收敛检测仪固定在隧道的一侧边墙处并记录固定原点；

[0010] b. 将激光干涉测距仪朝向隧道的另一侧边墙，校准水平尺，使检测仪旋转轴处于水平状态；

[0011] c. 启动隧道沉降收敛检测仪工作：微处理器测量控制装置发出伺服马达启动命令，伺服马达带动测量装置开始旋转，微处理器测量控制装置等待重力感应传感器发出的水平零度输出信号；

[0012] d. 当微处理器测量控制装置接收到重力感应传感器发出的水平零度输出信号后，记录此时的激光干涉测距仪测得的距离数据为隧道第一宽度距离，并定义此时角度编码器输出的角度为零度角信号；继续向上旋转测量装置读取激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离，定义顶部任意的一个点，读取激光干涉测距仪到隧道顶部所述任意的一个点的斜向距离，记录此时的角度编码器输出的角度，通过正弦定理计算出隧道顶部所述任意一个点到激光干涉测距仪水平线的垂直高度为隧道第一垂直高度，计算出激光干涉测距仪到隧道宽度距离中所述隧道第一垂直高度的垂点距离；

[0013] 所述沉降收敛检测步骤包括获取隧道宽度收敛结果步骤和获取隧道高度收敛结果步骤：

[0014] 所述获取隧道宽度收敛结果步骤是：

[0015] e. 将所述隧道沉降收敛检测仪固定在隧道的一侧边墙所记录的固定原点处，所述固定原点是所述原始数据检测步骤中隧道沉降收敛检测仪的固定原点；

[0016] f. 将激光干涉测距仪朝向隧道的另一侧边墙，校准水平尺，使检测仪旋转轴处于水平状态；

[0017] g. 启动隧道沉降收敛检测仪工作：微处理器测量控制装置发出伺服马达启动命令，伺服马达带动测量装置开始旋转，微处理器测量控制装置等待重力感应传感器发出的水平零度输出信号；当微处理器测量控制装置接收到重力感应传感器发出的水平零度输出信号后，记录此时的激光干涉测距仪测得的距离数据为隧道第二宽度距离，并定义此时角度编码器输出的角度为零度角信号，将隧道第一宽度距离和隧道第二宽度距离进行相减，得到隧道宽度收敛结果；

[0018] 隧道宽度收敛中两侧边墙的收敛是对称的，因此原始数据检测步骤中所述隧道第一垂直高度的垂点到当前激光干涉测距仪的距离是已知距离，其计算过程是：原始数据检测步骤中所述激光干涉测距仪到所述隧道第一垂直高度的垂点距离减去二分之一宽度收敛距离；

[0019] 所述获取隧道高度收敛结果步骤是：

[0020] h. 继续向上旋转测量装置读取激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离，根据已知的隧道第一垂直高度的垂点到当前激光干涉测距仪的距离、连续读取的角度编码器输出的角度和连续读取的激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离，通过余弦定理找到在所述垂点之上的所述顶部任意的一个点，通过正弦定理或勾股定理计算出此时隧道顶部所述任意一个点到激光干涉测距仪水平线的垂直高度，并称之为隧道第二垂直高度，将隧道第一垂直高度和隧道第二垂直高度进行相减，得到隧道高度收敛结果。

[0021] 本发明与现有技术相比：结构简单、操作方便、精度高、稳定性好，可以实现快速检

测；完成一次检测使用其它方法多于一个小时、至少需要两个人，而使用本方法只需一个人、仅需几分钟，省时省力，具有明显的技术进步；同时检测过程中不与其他工程施工冲突，配上应用软件可进行全天候实时监测，对隧道有较大沉降、不稳定沉降进行预警。

[0022] 下面结合附图和实施例对本发明作一详细描述。

附图说明

[0023] 图 1 是本发明隧道沉降收敛检测仪外形示意图；

[0024] 图 2 是本发明隧道沉降收敛检测仪结构示意图；

[0025] 图 3 是本发明隧道沉降收敛检测仪电路框图；

[0026] 图 4 是本发明测量过程示意图。

具体实施方式

[0027] 实施例 1：

[0028] 一种隧道沉降收敛检测仪，参见图 1、图 2 和图 3，所述隧道沉降收敛检测仪包括检测仪主体 1，在检测仪主体上设置有一个由伺服马达 2 驱动旋转的测量装置，所述测量装置包括一个载体 3，所述载体通过旋转轴 4 连接在检测仪主体上，所述旋转轴连接有角度编码器 5，所述载体上设置有一个激光干涉测距仪 6 和一个带有水平零度输出信号的重力感应传感器 7，所述重力感应传感器的敏感轴与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴的轴向一致；在所述检测仪主体上设置有微处理器测量控制装置 8、温度传感器 9、湿度传感器 10 和水平尺 11；所述水平尺轴向与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴向呈 90 度夹角设置，所述角度编码器、激光干涉测距仪、重力感应传感器，温度传感器、湿度传感器的输出信号分别连接至微处理器测量控制装置。其中所述水平尺是目测水准管，所述伺服马达由微处理器通过驱动电路 12 带动。

[0029] 实施例中的检测仪主体可以根据现场测量方便设计成多种形状，本实施例考虑到现场手持方便，所述检测仪主体包括有一个 U 形框架 1-1，在 U 形框架的封口边设置有一个方便手持的手柄 1-2，本仪器的电源电池可以安装在手柄中，在手柄的外端设置有一个用于定位原点的锥头 12。利用该锥头在测量时可以将该锥头卡入隧道一侧的墙体中，即可以定位原点，又可以起到稳定检测仪主体的作用。

[0030] 实施例中所述微处理器测量控制装置包括有一个微处理器 8-1，微处理器数据口连接数个用于进行操作的按键 8-2，微处理器数据口还连接用于显示数据的显示器 8-3；其中的温度传感器和湿度传感器是用于激光干涉测距仪的数据校正，所述的激光干涉测距仪是市场上购买的成熟产品。

[0031] 实施例 2：

[0032] 一种隧道沉降收敛检测方法，所述方法是基于实施例 1 一种隧道沉降收敛检测仪而实现的检测方法，实施例 1 所述隧道沉降收敛检测仪包括检测仪主体，在检测仪主体上设置有一个由伺服马达驱动旋转的测量装置，所述测量装置包括一个载体，所述载体通过旋转轴连接在检测仪主体上，所述旋转轴连接有角度编码器，所述载体上设置有一个激光干涉测距仪和一个带有水平零度输出信号的重力感应传感器，所述重力感应传感器的敏感轴与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴的轴向一致；在所述检测仪主体上设置有微处理

器测量控制装置、温度传感器、湿度传感器和水平尺；所述水平尺轴向与所述激光干涉测距仪发出的激光束轴向呈 90 度夹角设置，所述角度编码器、激光干涉测距仪、重力感应传感器、温度传感器、湿度传感器的输出信号分别连接至微处理器测量控制装置；所述隧道沉降收敛检测方法的步骤包括原始数据检测步骤和沉降收敛检测步骤：

[0033] 所述原始数据检测步骤包括：

[0034] a. 首先将所述隧道沉降收敛检测仪固定在隧道的一侧边墙处并记录固定原点；

[0035] b. 将激光干涉测距仪朝向隧道的另一侧边墙，校准水平尺，使检测仪旋转轴处于水平状态；

[0036] c. 启动隧道沉降收敛检测仪工作：微处理器测量控制装置发出伺服马达启动命令，伺服马达带动测量装置开始旋转，微处理器测量控制装置等待重力感应传感器发出的水平零度输出信号；

[0037] d. 当微处理器测量控制装置接收到重力感应传感器发出的水平零度输出信号后，记录此时的激光干涉测距仪测得的距离数据为隧道第一宽度距离，并定义此时角度编码器输出的角度为零度角信号；继续向上旋转测量装置读取激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离，定义顶部任意的一个点，读取激光干涉测距仪到隧道顶部所述任意的一个点的斜向距离，记录此时的角度编码器输出的角度，通过正弦定理计算出隧道顶部所述任意一个点到激光干涉测距仪水平线的垂直高度为隧道第一垂直高度，计算出激光干涉测距仪到隧道宽度距离中所述隧道第一垂直高度的垂点距离；

[0038] 所述沉降收敛检测步骤包括获取隧道宽度收敛结果步骤和获取隧道高度收敛结果步骤：

[0039] 所述获取隧道宽度收敛结果步骤是：

[0040] e. 将所述隧道沉降收敛检测仪固定在隧道的一侧边墙所记录的固定原点处，所述固定原点是所述原始数据检测步骤中隧道沉降收敛检测仪的固定原点；

[0041] f. 将激光干涉测距仪朝向隧道的另一侧边墙，校准水平尺，使检测仪旋转轴处于水平状态；

[0042] g. 启动隧道沉降收敛检测仪工作：微处理器测量控制装置发出伺服马达启动命令，伺服马达带动测量装置开始旋转，微处理器测量控制装置等待重力感应传感器发出的水平零度输出信号；当微处理器测量控制装置接收到重力感应传感器发出的水平零度输出信号后，记录此时的激光干涉测距仪测得的距离数据为隧道第二宽度距离，并定义此时角度编码器输出的角度为零度角信号，将隧道第一宽度距离和隧道第二宽度距离进行相减，得到隧道宽度收敛结果；

[0043] 隧道宽度收敛中两侧边墙的收敛是对称的，因此原始数据检测步骤中所述隧道第一垂直高度的垂点到当前激光干涉测距仪的距离是已知距离，其计算过程是：原始数据检测步骤中所述激光干涉测距仪到所述隧道第一垂直高度的垂点距离减去二分之一宽度收敛距离；

[0044] 所述获取隧道高度收敛结果步骤是：

[0045] h. 继续向上旋转测量装置读取激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离，根据已知的隧道第一垂直高度的垂点到当前激光干涉测距仪的距离、连续读取的角度编码器输出的角度和连续读取的激光干涉测距仪到隧道顶部的斜向距离，通过余弦定理找到在所述垂点

之上的所述顶部任意的一个点,通过正弦定理或勾股定理计算出此时隧道顶部所述任意一个点到激光干涉测距仪水平线的垂直高度,并称之为隧道第二垂直高度,将隧道第一垂直高度和隧道第二垂直高度进行相减,得到隧道高度收敛结果。

[0046] 实施例中激光干涉测距仪的距离数据是经过现场温度、湿度校正后的数据,其测距方法是一种已知的方法。

[0047] 图 4 是对现场隧道收敛测量的形象的示意,具体描述如下:

[0048] 第一次测量数据是:把仪器 O 安放在隧道的边墙处 A,调整仪器方向使水准管气泡居中,开机后可先设定转动角度($< CAB$)后启动测量,或不用输入角度微处理器直接发出测量指令,微处理器通过驱动电路驱动伺服马达带动测量装置转动,重力感应传感器监测测量装置水平情况,当测量装置水平时,重力感应传感器向微处理器发出测量装置已在水平信号,微处理器激活激光干涉测距装置工作,激光干涉测距装置测量 A 点到沿着水平方向 B 点距离 AB,微处理器记录数据,根据气象站(温度传感器、湿度传感器)的数据经过校正后最终得到 AB 距离值数据并存储;伺服马达继续驱动测量装置转动,当角度编码器输出的角度与开机设定转动角度($< CAB$)相同时,微处理器收到这一角度数据后令伺服马达停止转动,激光干涉测距装置测量 A 点到 C 点距离 AC,微处理器记录 AC 距离数据,根据气象站的数据经过校正后最终得到 AC 距离值数据并存储。如果不用事先输入角度直接发出测量指令方式:伺服马达驱动测量装置转动,重力感应传感器监测测量装置水平情况,当测量装置水平时,重力感应传感器向微处理器发出触发信号,微处理器收到信号后激活激光干涉测距装置,激光干涉测距装置测量 A 点到沿着水平方向 B 点距离 AB,微处理器记录数据,根据气象站的数据经过校正后最终得到 AB 距离数据值并存储;伺服马达继续驱动测量装置转动,旋转一定角度后定义顶部任意一点按动控制按钮使其停止转动,激光干涉测距装置测量 A 点 C 点距离 AC,微处理器记录数据,根据气象站的数据经过校正后最终得到 AC 距离值数据并存储,角度编码器输出测量装置所转过的角度($< CAB$),微处理器记录存储距离数据和角度数据。

[0049] 依据这些数据用以下公式:

[0050] 隧道顶部任意一点的高度 $CD=AC \times \sin CAB$;

[0051] 计算激光干涉测距装置到隧道顶部任意一点的高度的垂足点的距离 AD;

[0052] $AD=AC \times \cos CAB$;

[0053] 沉降收敛检测是:把仪器放置在第一次测量的位置点上,调整仪器方向使水准管气泡居中,微处理器发出测量指令,伺服马达驱动测量装置转动,重力感应装置监测测量装置水平情况,当测量装置水平时,重力感应传感器向微处理器发出触发信号,微处理器激活激光干涉测距装置,激光干涉测距装置测量 A' 点到沿着水平方向 B' 点距离 A' B',微处理器记录数据,根据气象站的数据经过校正后最终得到 A' B' 距离值数据并存储;算出宽度收敛数据并计算出 A' 点到 D 的距离;伺服马达继续驱动测量装置转动,当角度编码器输出角度接近上次输出角度($< CAB$)时,仪器进入微调状态,测量装置慢速转动,根据已知的 A' D 的距离不断地调整角度编码器输出角度激光测距装置连续测量 A' 点到顶部点的距离,角度编码器不间断输出角度值,微处理器记录处理这些数据直至 A' D 的距离 = $A' C' \times \cos C' A' B'$ 。

[0054] 则 C' 为 C 的沉降点,计算此时的高度 $C' D=A' C' \times \sin C' A' B'$;

- [0055] 上述结果的前提是两边墙收敛值近似相等(实际的结果也是近似相等)即：
- [0056] $AA' = BB'$
- [0057] 可得收敛值
- [0058] $AA' = (AB - A'B') / 2;$
- [0059] 又得
- [0060] $A'D = AD - AA'$
- [0061] 因此第一次与第二次量测的沉降值为：
- [0062] $CC' = CD - C'D;$
- [0063] 三次观测、四次观测等多次观测的沉降收敛值依次类推,其数学表达式为：
- [0064] $E = Ne - (N-1)e;$
- [0065] $F = Nf - (N-1)f;$
- [0066] E 代表沉降收敛值,
- [0067] Ne 代表第 n 次检测时隧道顶部到仪器的垂直距离,
- [0068] (N-1)e 第 n-1 次检测时代表隧道顶部到仪器的垂直距离,
- [0069] F 代表宽度收敛值,
- [0070] Nf 代表第 n 次检测时仪器到边墙的水平距离,
- [0071] (N-1)f 代表第 n-1 次检测时仪器到边墙的水平距离。

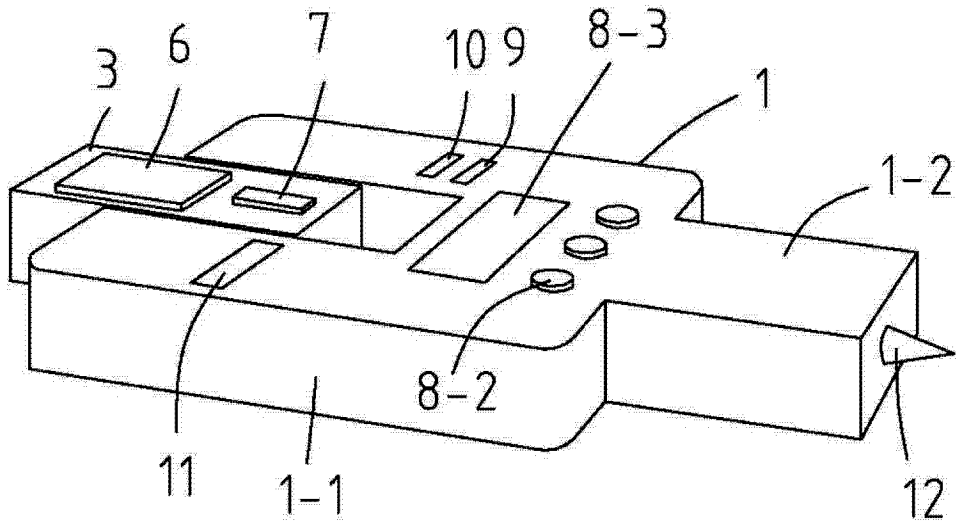


图 1

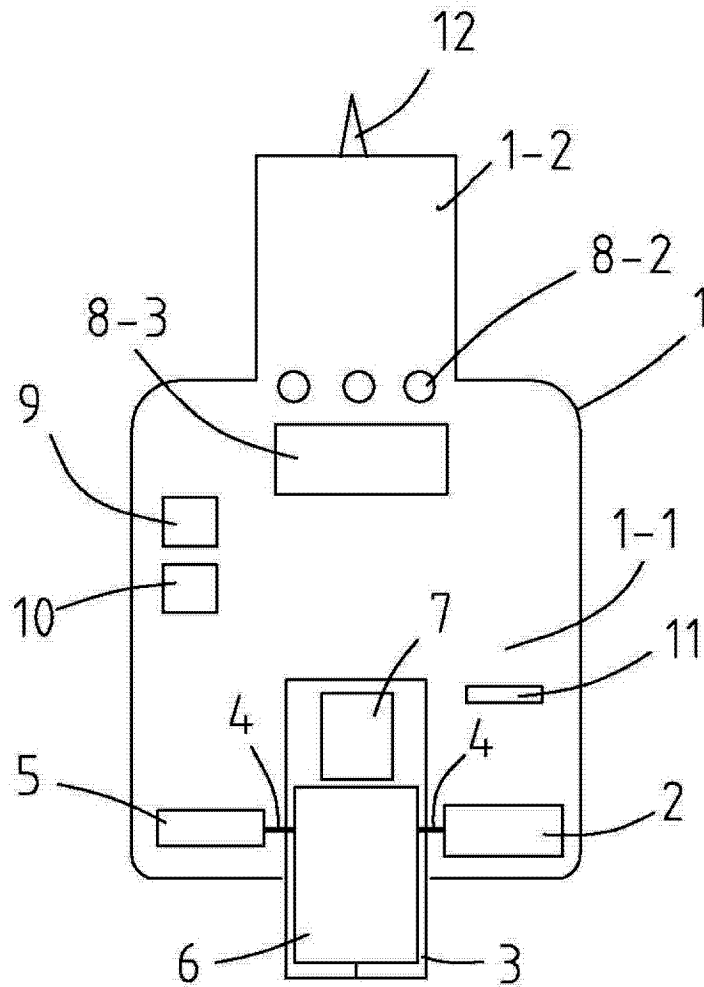


图 2

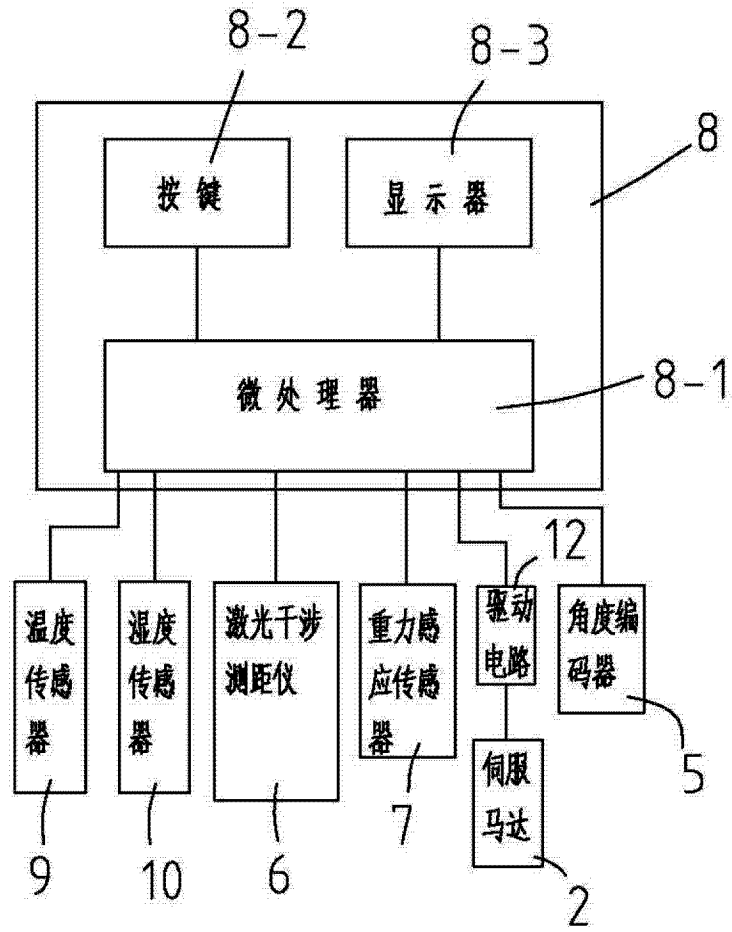


图 3

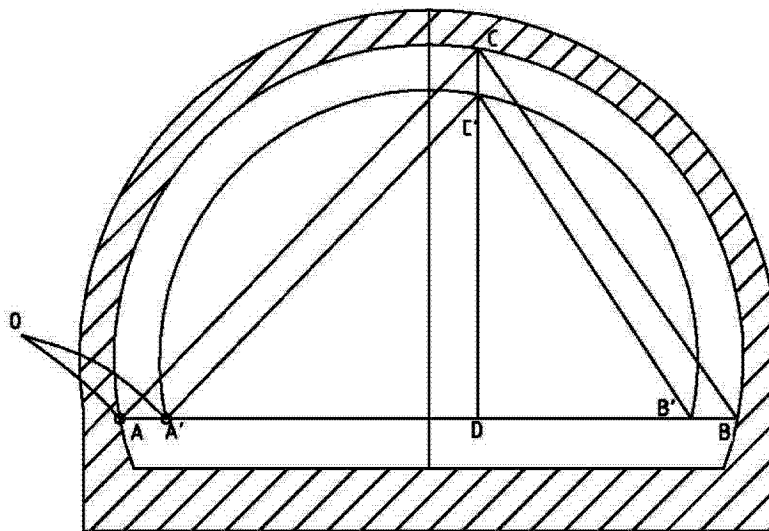


图 4