

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 1 月 4 日 (04.01.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/000561 A1

(51) 国际专利分类号:
G01M 7/08 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2016/096862

(22) 国际申请日: 2016 年 8 月 26 日 (26.08.2016)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201610510192.X 2016 年 6 月 30 日 (30.06.2016) CN

(71) 申请人: 东南大学 (SOUTHEAST UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号, Jiangsu 210096 (CN)。

(72) 发明人: 张建 (ZHANG, Jian); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号, Jiangsu 210096 (CN)。 夏琪 (XIA, Qi); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号, Jiangsu 210096 (CN)。 张博 (ZHANG, Bo); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号, Jiangsu 210096 (CN)。

(CN)。 郭双林 (GUO, Shuanglin); 中国江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号, Jiangsu 210096 (CN)。

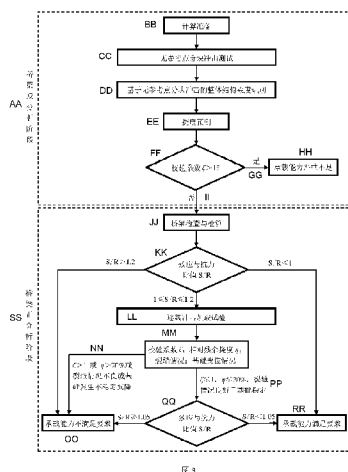
(74) 代理人: 南京经纬专利商标代理有限公司 (NANJING JINGWEI PATENT & TRADEMARK AGENCY CO., LTD); 中国江苏省南京市鼓楼区中山路 179 号 12 楼 B 座, Jiangsu 210005 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) Title: BRIDGE TESTING AND EVALUATION METHOD AND APPARATUS BASED ON IMPACT VIBRATION

(54) 发明名称: 一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法与设备



AA Bridge back analysis stage
BB Computation preparation
CC Reference-free sub-block impact test
DD Identification of overall structural flexibility based on reference-free sub-block impact
EE Deflection prediction
FF Verification coefficient $C > 1$?
GG Yes
HH Load carrying capacity is severely insufficient
II No
JJ Bridge inspection and checking
KK Action to resistance ratio S/R
LL Incremental impact loading test
MM Verification coefficient C , relative residual deflection η , crack condition, foundation displacement condition
NN $C > 1$, $\eta > 20\%$, unacceptable crack condition, or unstable settlement of foundation
OO Load carrying capacity does not meet requirement
PP $C \leq 1$, $\eta \leq 20\%$, acceptable crack condition, and stable foundation
RR Load carrying capacity meets requirement
SS Forward bridge analysis stage

(57) Abstract: A bridge testing and evaluation method and apparatus based on impact vibration. The method comprises: a bridge back analysis step based on reference-free sub-block impacting, and a forward bridge analysis step based on incremental impact loading, wherein the bridge back analysis step based on reference-free sub-block impacting is used to rapidly find and screen small- to medium-scale bridges having greatly insufficient load carrying capacity in a road network, and the forward bridge analysis step based on incremental impact loading is used to evaluate actual load carrying capacity of those bridges passing the back analysis screening and having better safety. The apparatus integrates testing and analysis functions, and mainly comprises a vehicle-mounted hydraulic impact device (6), a mobile hydraulic impact device (9), a signal transmitting and acquisition system (3), a data analysis system (4), etc. The apparatus is applied to back and forward bridge analysis. The method of the present invention enables low-cost and highly efficient testing and evaluation of small- to medium-scale bridges in a road network.

(57) 摘要: 一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法与设备, 其方法包括基于无参考点分块冲击的桥梁反分析的步骤与基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤, 其中基于无参考点分块冲击的桥梁反分析的步骤用于快速排查出公路网中承载能力严重不足的中小型桥梁, 基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤用于评估通过反分析排查的安全状况较好桥梁的实际承载能力。该设备将测试与分析功能融为一体, 主要包括车载液压冲击装置 (6), 移动液压冲击装置 (9), 信号发送与采集系统 (3), 数据分析系统 (4) 等, 该设备应用于桥梁的反分析与正分析。该方法实现了公路网中小型桥梁低成本、高效率的检测与评估。

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布：

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法与设备

技术领域

本发明涉及桥梁检测与评估领域，特别是涉及一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法与设备。

背景技术

近百年来，许多国家都在桥梁建设领域内取得了辉煌的成就。但与此同时桥梁损坏甚至坍塌事故也在世界各地频繁发生。这些事故给人们生命及财产都造成了巨大的损失，并造成了极其恶劣的社会影响，因此对桥梁及时进行检测与评估就显得尤为重要。目前对在用桥梁的检测与评估主要存在两方面的问题。

一方面中小型桥梁在公路网中占有很高比例，这些桥梁由于资金、所在地域等条件限制很难应用传统的方法实现其及时的检测与评估，因而导致很多桥梁出现漏检、少检，这将带来很大的安全隐患。而基于桥梁整体结构冲击振动的检测与评估方法需要同时获得整个桥面上所有测点的加速度反映，因而要在整个桥面布设大量传感器，同时还要封闭交通，成本高、效率低。为解决该难题，“一种基于分块冲击振动测试的中小型桥梁快速检测方法” CN102353509B 被提出。通过应用该方法可以排查出公路网中承载能力严重不足的中小型桥梁，为具有针对性的承载能力评估提供了对象。但该检测方法仍存在缺陷，即在应用中需在各测试子块交界处布设测点（参考点），从而导致测点布设不灵活，并且在同一参考点处需要获取两不同子块的加速度数据，测试效率还有待提高。

在桥梁的承载能力评估方面，目前采用的手段主要有基于大型加载车辆的人工检测及基于环境振动的结构健康监测，然而这两种方法都有各自的缺陷。基于大型加载车辆的人工检测在进行荷载试验时需要在桥面进行大型车辆的加载，这就要求多个部门协调工作，需调动大量的人力，此外这种荷载试验还存在一定的安全风险。而基于环境振动的结构健康监测主要利用风、海浪、车流等外界自然条件激励桥梁，无需激励设备，不影响结构的正常使用，其目前已在世界范围内的众多大跨桥梁上获得应用，如美国金门大桥、英国 Humber 大桥、苏通大桥等。但这种监测方法通常需要在桥上布设大量传感器，采用相对昂贵的监测系统，监测成本高。

发明内容

针对上述现有方法与技术存在的不足，本发明提供了一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法与设备，目的在于实现公路网中所有中小型桥梁低成本、高效率的检测与评估。

为实现上述目的，本发明采用的技术方案为：

一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法，包括基于无参考点分块冲击的桥梁反分析的步骤与基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤，其中基于无参考点分块冲击的桥梁反分析的步骤用于快速排查出公路网中承载能力严重不足的中小型桥梁，基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤用于评估通过反分析排查的安全状况较好桥梁的实际承载能力。

所述基于无参考点分块冲击的桥梁反分析的步骤中采用无参考点分块冲击测试，具体为：将桥梁整体结构分成若干子块，其中不同子块的冲击点与测点位置选取相互独立，之后对每个子块的冲击点进行逐点冲击，同时采集各子块冲击力时程数据与测点的加速度时程数据。

所述基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤中采用基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法，具体为：子块频响函数估计，子块模态参数识别，子块模态振型缩放调整，子块模态振型方向判别，整体结构柔度矩阵计算。

所述的基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法中，子块模态振型缩放调整时，以子块 S_1 的模态振型缩放程度为标准进行所有子块模态振型的缩放调整，采用的公式为：

$$\{\tilde{\phi}_r^{S_k}\} = \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_k}\}$$

式中： $\{\phi_r^{S_k}\}$ 、 $\{\tilde{\phi}_r^{S_k}\}$ 分别为子块 S_k 在模态振型缩放调整前后的第 r 阶模态振型， $Q_r^{S_k}$ 为子块 S_k 在模态振型缩放调整前的第 r 阶模态振型缩放系数， $Q_r^{S_1}$ 为子块 S_1 的第 r 阶模态振型缩放系数， $\eta_r^{S_k}$ 为子块 S_k 的第 r 阶模态振型方向系数（ $\eta_r^{S_k} = +1$ 或 $\eta_r^{S_k} = -1$ ）；之后将缩放调整后所有子块 $S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_n$ 的模态振型集成为桥梁整体结构模态振型，采用的公式为：

$$\begin{aligned} \{\tilde{\phi}_r\} &= \left(\{\tilde{\phi}_r^{S_1}\}^T \quad \{\tilde{\phi}_r^{S_2}\}^T \quad \dots \quad \{\tilde{\phi}_r^{S_k}\}^T \quad \dots \quad \{\tilde{\phi}_r^{S_n}\}^T \right)^T \\ &= \left(\{\phi_r^{S_1}\}^T \quad \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_2}\}^T \quad \dots \quad \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_k}\}^T \quad \dots \quad \eta_r^{S_n} \sqrt{\frac{Q_r^{S_n}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_n}\}^T \right)^T \end{aligned}$$

式中： $\{\tilde{\phi}_r\}$ 为按子块 S_1 的模态振型缩放程度确定的桥梁整体结构第 r 阶模态振型。

所述的基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法中，整体结构柔度矩阵计算

时,先计算桥梁整体结构势能,然后取其中最小势能对应的各子块的模态振型方向系数,基于该系数得到桥梁整体结构模态振型,其中包含各子块模态振型方向系数的桥梁整体结构势能表达式为:

$$\begin{aligned} \Pi_p = & -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \left(\{f^{S_1}\}^T \{\phi_r^{S_1}\} + \{f^{S_2}\}^T \{\phi_r^{S_2}\} \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} + \cdots + \{f^{S_k}\}^T \{\phi_r^{S_k}\} \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} + \cdots \right. \\ & \left. + \{f^{S_n}\}^T \{\phi_r^{S_n}\} \eta_r^{S_n} \sqrt{\frac{Q_r^{S_n}}{Q_r^{S_1}}} \right)^2 \left(\frac{Q_r^{S_1}}{-\lambda_r} + \frac{Q_r^{S_1*}}{-\lambda_r^*} \right) \end{aligned}$$

式中: Π_p 为桥梁整体结构势能, $\{f^{S_k}\}$ 表示任意子块 S_k 中的节点荷载向量, λ_r 为第 r 阶系统极点, λ_r^* 与 $Q_r^{S_1*}$ 分别为 λ_r 与 $Q_r^{S_1}$ 的共轭复数, m 表示计算的最高阶数。

所述基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤中采用逐级冲击加载试验,其包括:冲击加载点选取在计算静载加载点处;令每个冲击点上的最大冲击荷载与对应的计算静载相等;对冲击荷载的施加进行分级;将挠度控制截面上的加速度测点同时作为位移测点并在其上布设位移传感器,测量冲击荷载作用下各位移测点的最大动挠度,在冲击加载结束后,待桥梁稳定,再测量位移测点的残余挠度;根据最大动挠度与静挠度的对应关系,推得桥梁在计算静载作用下位移测点的真实静挠度,通过位移测点的真实静挠度与残余挠度并结合裂缝与基础变位情况进行桥梁承载能力评定。

一种基于冲击振动的桥梁检测评估一体化设备,包括牵引车, GPS 定位仪,信号发送与采集系统,数据分析系统,拖车,车载液压冲击装置,车轮旋转编码器,激光测距仪,移动液压冲击装置,无线加速度传感器,无线位移传感器;

其中,所述牵引车提供动力,其上安装有 GPS 定位仪,信号发送与采集系统及数据分析系统;

所述拖车挂于牵引车后方,其上安装有车载液压冲击装置,车轮旋转编码器与激光测距仪,并且用于运输若干台移动液压冲击装置及无线加速度传感器与无线位移传感器;

所述车载液压冲击装置固定于拖车的后部,采用无线控制方式,用于反分析中的无参考点分块冲击测试;

所述移动液压冲击装置采用无线控制方式,用于正分析中的逐级冲击加载试验;

所述信号发送与采集系统分别与移动液压冲击装置、车载液压冲击装置采用无线通

信连接，用于发送、采集信号，发送的信号包括移动液压冲击装置的移动指令与冲击指令，采集的信号包括车载液压冲击装置的冲击力时程数据，测点加速度时程数据与位移数据；

所述数据分析系统与信号发送与采集系统连接，利用内嵌的基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别算法及相关的安全与承载能力评定准则，对所采集的数据进行自动化分析，快速输出测试与评估结果；

所述 GPS 定位仪、车轮旋转编码器、激光测距仪组成整个设备的定位与测距系统，其中，所述 GPS 定位仪安装在牵引车上，用于引导整个设备到达桥面各子块，车轮旋转编码器设置于拖车的车轮上，激光测距仪设置于拖车上，车轮旋转编码器与激光测距仪分别用于确定测点及冲击点在桥面纵向与横向的精确位置；

所述无线加速度传感器用于获取加速度测点的加速度时程数据，无线位移传感器用于获取位移测点的动挠度与残余挠度数据。

进一步的，所述车载液压冲击装置包括信号发送与接收器，第一控制器，第一油泵，第一副液压缸，滑动轴，第一主液压缸，第一质量块，第一橡胶缓冲块，第一加载板，第一承载盘；其中，信号发送与接收器用于接收冲击指令与发送冲击力时程数据；第一控制器与信号发送与接收器连接，用于控制第一油泵的开关；第一油泵分别与第一主液压缸和第一副液压缸连接，用于给第一主液压缸和第一副液压缸提供动力；第一主液压缸用于提升放置于其顶部的第一质量块；第一副液压缸设置于拖车之上，用于提升设置于拖车的矩形开口内的第一加载板，拖车的矩形开口设置于拖车板位于车载液压冲击装置正下方的位置；第一加载板沿滑动轴上下移动，其上设置有第一橡胶缓冲块，第一橡胶缓冲块用于承载第一质量块的冲击；滑动轴为第一加载板提供垂直运动轴；第一承载盘设置于第一加载板的下方，用于将冲击荷载传递至桥面。

进一步的，所述移动液压冲击装置包括信号接收器，第二控制器，第二油泵，第二副液压缸，第二主液压缸，第二质量块，第二橡胶缓冲块，第二加载板，第二承载盘，驱动系统；其中，信号接收器用于接收移动及冲击指令，第二控制器与信号接收器连接，用于控制第二油泵的开关与驱动系统；第二油泵分别与第二主液压缸和第二副液压缸连接，用于给第二主液压缸和第二副液压缸提供动力；第二主液压缸用于提升放置于其顶部的第二质量块；第二副液压缸设置于移动液压冲击装置底部框架之上，用于提升第二加载板；第二加载板之上设置有第二橡胶缓冲块，第二橡胶缓冲块用于承载第二质量块

的冲击；第二承载盘用于将冲击荷载传递至桥面；驱动系统位于整个移动液压冲击装置的底部，用于实现移动液压冲击装置的自动移动。

有益效果：与现有技术相比，本发明具有以下优点：

（1）本发明提供一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法，在桥梁反分析阶段实现了在公路网中快速排查出承载能力严重不足的桥梁，避免了由于资金、人员等不足导致桥梁漏检、少检带来的安全隐患，而在桥梁正分析阶段弥补了传统检测与监测方法的缺陷，实现了高效、安全、低成本的桥梁承载能力评估。

（2）本发明中的基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法，较传统的基于桥梁整体结构冲击振动的柔度识别方法大大减少了所需传感器数目，并且测试中不需要封闭交通，而与基于有参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法相比其测点布设更加灵活，且每个测点只需获得本子块的加速度时程数据，测试效率更高。

（3）本发明中的逐级冲击加载试验，与传统的基于大型加载车辆的静载试验相比，没有车辆轴距的限制，所需人员少，效率高，更安全，而与基于环境振动的结构健康监测相比成本低，操作简便。

（4）本发明提出的一体化设备将测试与分析功能融为一体，自动化程度高，造作方便，可以快速高效地实现基于冲击振动的桥梁检测评估。

附图说明

图1是本发明具体实施方式中所述的无参考点分块冲击测试与整体结构柔度识别过程示意图；

图2a-图2c是本发明具体实施方式中所述的一体化设备的示意图；其中图2a为整体设备的示意图，图2b为移动液压冲击装置一个角度的示意图，图2c为移动液压冲击装置另一个角度的示意图；

图3是本发明具体实施方式中所述的基于冲击振动的桥梁检测评估流程图；

图4是本发明具体实施方式中所述的桥梁子块划分及测点与冲击点位置选取示意图；

图5是本发明具体实施方式中所述的势能排序折线图；

图6是本发明具体实施方式中所述的势能比较折线图；

图7是本发明具体实施方式中所述的前6阶模态振型缩放调整示意图；

图8是本发明具体实施方式中所述的预测挠度折线图；

图 2a-图 2c 中：1—牵引车，2—GPS 定位仪，3—信号发送与采集系统，4—数据分析系统，5—拖车，6—车载液压冲击装置，6.1—信号发送与接收器，6.2—第一控制器，6.3—第一油泵，6.4—第一副液压缸，6.5—滑动轴，6.6—第一主液压缸，6.7—第一质量块，6.8—第一橡胶缓冲块，6.9—第一加载板，6.10—第一承载盘，7—车轮旋转编码器，8—激光测距仪，9—移动液压冲击装置，9.1—信号接收器，9.2—第二控制器，9.3—第二油泵，9.4—第二副液压缸，9.5—第二主液压缸，9.6—第二质量块，9.7—第二橡胶缓冲块，9.8—第二加载板，9.9—第二承载盘，9.10—驱动系统，10—无线加速度传感器，11—无线位移传感器。

具体实施方式

下面结合附图对本发明作更进一步的说明。

本发明主要采用冲击振动的方式，首先对公路网中所有中小型桥梁进行基于无参考点分块冲击的桥梁反分析，快速排查出其中承载能力严重不足的桥梁，再对通过排查的安全状况较好的桥梁进行基于逐级冲击加载的桥梁正分析，经济高效地确定其实际承载能力是否满足要求，进而实现了完整的桥梁检测与评估。基于上述过程本发明共包含四个部分。

一、无参考点分块冲击测试与基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法

为实现快速排查出公路网中承载能力严重不足的中小型桥梁，本发明提出了无参考点分块冲击测试与基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法。其中的整体结构柔度识别方法包含子块频响函数估计，子块模态参数识别，子块模态振型缩放调整，子块模态振型方向判别，整体结构柔度矩阵计算。图 1 中以包含 3 个子块的具有 7 个自由度的悬臂梁为例，展示了无参考点分块冲击测试与整体结构柔度识别过程，其具体内容包

括：

（1）无参考点分块冲击测试

根据桥梁规模及测试精度，将桥梁整体结构分成子块 S_1 ，子块 S_2 ，…，子块 S_k ，…，子块 S_n ，并安排每个子块的冲击点及测点位置，其中不同子块的冲击点与测点位置选取相互独立。之后对一个子块内的一个冲击点进行冲击，同时采集冲击力时程数据与子块中所有测点的加速度时程数据，一点冲击完成后，进行同子块中其他冲击点的冲击从而完成一个子块的冲击测试。重复上述工作对其余子块依次进行冲击测试，最终完成全桥的冲击测试工作。

(2) 子块频响函数估计

对每个子块的冲击力时程数据与测点加速度时程数据进行加窗、滤波后，分别估计各子块的频响函数 $H_{S_1}(\omega)$, $H_{S_2}(\omega)$, $\dots$, $H_{S_k}(\omega)$, $\dots$, $H_{S_n}(\omega)$ 。

(3) 子块模态参数识别

根据各子块的频响函数，采用模态参数识别算法（如 CMIF 法、PolyMAX 法等）分别识别各子块的模态参数，对任意子块 S_k 识别出的参数包括：第 r 阶模态振型 $\{\phi_r^{S_k}\}$ 与对应的频率 $\omega_r^{S_k}$ 、阻尼比 $\xi_r^{S_k}$ 、模态缩放系数 $Q_r^{S_k}$ 、系统极点 $\lambda_r^{S_k}$ ，其中 $r=1,2,\dots,m$ 。

(4) 子块模态振型缩放调整

由于在同阶频率下各子块的模态振型缩放比例不同，在融合子块的模态振型时，需采用统一缩放标准对每个子块的模态振型进行缩放调整。首先选取任意子块 S_k ，根据结构在同阶时的留数矩阵在模态振型缩放调整前后保持不变，得到：

$$\{\phi_r^{S_k}\} \{\phi_r^{S_k}\}^T Q_r^{S_k} = \{\tilde{\phi}_r^{S_k}\} \{\tilde{\phi}_r^{S_k}\}^T \tilde{Q}_r^{S_k} \quad (1)$$

式中： $\{\phi_r^{S_k}\}$ 、 $\{\tilde{\phi}_r^{S_k}\}$ 分别为子块 S_k 在模态振型缩放调整前后的第 r 阶模态振型， $Q_r^{S_k}$ 、 $\tilde{Q}_r^{S_k}$ 分别为子块 S_k 在模态振型缩放调整前后的第 r 阶模态振型缩放系数。然后设模态振型缩放调整系数为 x_k ，即：

$$\{\tilde{\phi}_r^{S_k}\} = x_k \{\phi_r^{S_k}\} \quad (2)$$

令所有子块均以子块 S_1 的缩放水平为标准，即：

$$\tilde{Q}_r^{S_k} = Q_r^{S_1} \quad (3)$$

将公式 (2)、(3) 代入公式 (1) 可得：

$$x_k = \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} \quad (4)$$

式中： $\eta_r^{S_k}$ 为子块 S_k 的第 r 阶模态振型方向系数， $\eta_r^{S_k} = +1$ 或 $\eta_r^{S_k} = -1$ 。将公式 (4) 代入公式 (2) 中可得：

$$\{\tilde{\phi}_r^{S_k}\} = \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_k}\} \quad (5)$$

将每个子块的模态振型都按上述过程进行缩放调整，可得缩放调整后的整体结构模态振

型为:

$$\begin{aligned} \{\tilde{\phi}_r\} &= \left(\{\tilde{\phi}_r^{S_1}\}^T \ \{\tilde{\phi}_r^{S_2}\}^T \ \cdots \ \{\tilde{\phi}_r^{S_k}\}^T \ \cdots \ \{\tilde{\phi}_r^{S_n}\}^T \right)^T \\ &= \left(\{\phi_r^{S_1}\}^T \ \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_2}\}^T \ \cdots \ \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_k}\}^T \ \cdots \ \eta_r^{S_n} \sqrt{\frac{Q_r^{S_n}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_n}\}^T \right)^T \end{aligned} \quad (6)$$

(5) 子块模态振型方向判别

模态振型缩放调整后, 模态振型方向系数的正负还无法确定, 因而在融合子块的模态振型前还需要判别各子块模态振型的方向。由最小势能原理, 可知正确的模态振型方向所对应的位移能使整体结构的势能取得最小值, 因此最小势能所对应的各子块的模态振型方向系数即为真实值。基于该真实值便可完全确定缩放调整后各子块的模态振型, 之后经过集成便可以获得正确的整体结构模态振型。首先引入整体结构势能表达式:

$$\Pi_p = \frac{1}{2} \{\delta\}^T [K] \{\delta\} - \{\delta\}^T \{f\} \quad (7)$$

式中: Π_p 为整体结构的势能, $[K]$ 为结构的刚度矩阵, $\{\delta\}$ 为结构节点位移向量, $\{f\}$ 为结构节点荷载向量。而在结构平衡状态下, 结构节点位移的表达式为:

$$\{\delta\} = [F] \{f\} \quad (8)$$

式中: $[F]$ 为整体结构的柔度矩阵, 其表达式为:

$$[F] = \sum_{r=1}^m \left(\frac{\{\tilde{\phi}_r\} \{\tilde{\phi}_r\}^T Q_r^{S_1}}{-\lambda_r} + \frac{\{\tilde{\phi}_r^*\} \{\tilde{\phi}_r^*\}^T Q_r^{S_1^*}}{-\lambda_r^*} \right) \quad (9)$$

式中: $\{\tilde{\phi}_r^*\}$ 为 $\{\tilde{\phi}_r\}$ 的共轭向量, λ_r^* 与 $Q_r^{S_1^*}$ 分别为 λ_r 与 $Q_r^{S_1}$ 的共轭复数, m 表示计算的最高阶数。将公式 (8)、(9) 代入公式 (7) 并整理得:

$$\Pi_p = -\frac{1}{2} \{f\}^T \left[\sum_{r=1}^m \left(\frac{\{\tilde{\phi}_r\} \{\tilde{\phi}_r\}^T Q_r^{S_1}}{-\lambda_r} + \frac{\{\tilde{\phi}_r^*\} \{\tilde{\phi}_r^*\}^T Q_r^{S_1^*}}{-\lambda_r^*} \right) \right] \{f\} \quad (10)$$

由于桥梁结构为小阻尼结构, 所识别的模态振型均为实振型, 所以 $\{\tilde{\phi}_r^*\} = \{\tilde{\phi}_r\}$, 化简公式 (10) 得:

$$\Pi_p = -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \left[\left(\{f\}^T \{\tilde{\phi}_r\} \right)^2 \left(\frac{Q_r^{S_1}}{-\lambda_r} + \frac{Q_r^{S_1^*}}{-\lambda_r^*} \right) \right] \quad (11)$$

整体结构的节点荷载向量为:

$$\{f\} = \left(\{f^{S_1}\}^T \{f^{S_2}\}^T \cdots \{f^{S_k}\}^T \cdots \{f^{S_n}\}^T \right)^T \quad (12)$$

式中: $\{f^{S_k}\}$ 表示任意子块 S_k 中的节点荷载向量。将公式(6)与公式(12)代入公式(11)并展开得:

$$\begin{aligned} \Pi_p = & -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \left(\{f^{S_1}\}^T \{\phi_r^{S_1}\} + \{f^{S_2}\}^T \{\phi_r^{S_2}\} \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} + \cdots + \{f^{S_k}\}^T \{\phi_r^{S_k}\} \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} + \cdots \right. \\ & \left. + \{f^{S_n}\}^T \{\phi_r^{S_n}\} \eta_r^{S_n} \sqrt{\frac{Q_r^{S_n}}{Q_r^{S_1}}} \right)^2 \left(\frac{Q_r^{S_1}}{-\lambda_r} + \frac{Q_r^{S_1*}}{-\lambda_r^*} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

通过公式(13)计算整体结构势能,该势能最小值所对应的各子块的模态振型方向系数即为真实值。

(6) 整体结构柔度矩阵计算

得到各子块的模态振型方向系数后,将其代入公式(6)便可获得整体结构的模态振型,从而实现了各子块模态振型的融合,再由公式(9)便可计算得出整体结构的柔度矩阵。通过该矩阵可以预测桥梁挠度,之后将挠度预测值与理论计算值进行比较即可实现桥梁安全排查。

二、逐级冲击加载试验

对于通过反分析排查的安全状况较好的桥梁,需要对其进行进一步的实际承载能力评估。在承载能力评估中需要对桥梁施加荷载,本发明提出了逐级冲击加载试验,用来实现桥梁的加载。该试验主要包括:

(1) 最大冲击荷载选取

逐级冲击加载试验采用冲击荷载代替传统的车辆静载。冲击加载点选取在计算静载加载点处,令每个冲击加载点上的最大冲击荷载与对应的计算静载相等。

(2) 冲击荷载分级

为获取冲击荷载与其产生挠度的关系曲线以及防止结构意外损伤,对冲击荷载的施加进行分级。冲击加载级数根据最大冲击荷载与加载最小荷载增量而定。

(3) 挠度测量

将挠度控制截面上的加速度测点同时作为位移测点并在其上布设位移传感器,测量冲击荷载作用下各位移测点的最大动挠度,在冲击加载结束后,待桥梁稳定,再测量位

移测点的残余挠度。

(4) 结果分析

根据最大动挠度与静挠度的对应关系，推得桥梁在计算静载作用下位移测点的真实静挠度，通过位移测点的真实静挠度与残余挠度并结合裂缝与基础变位情况进行桥梁承载能力评定。

三、基于冲击振动的桥梁检测评估一体化设备

为实现对桥梁的反分析与正分析，本发明提出了一种基于冲击振动的桥梁检测评估一体化设备，如图 2a-图 2c 所示。该设备将测试与分析功能融为一体，包括牵引车 1，GPS 定位仪 2，信号发送与采集系统 3，数据分析系统 4，拖车 5，车载液压冲击装置 6，车轮旋转编码器 7，激光测距仪 8，移动液压冲击装置 9，无线加速度传感器 10，无线位移传感器 11；

其中，所述牵引车 1 提供动力，其上安装有 GPS 定位仪 2，信号发送与采集系统 3 及数据分析系统 4；

所述拖车 5 挂于牵引车 1 后方，其上安装有车载液压冲击装置 6，车轮旋转编码器 7 与激光测距仪 8，并且用于运输若干台移动液压冲击装置 9 及无线加速度传感器 10 与无线位移传感器 11；

所述车载液压冲击装置 6 固定于拖车 5 的后部，采用无线控制方式，用于反分析中的无参考点分块冲击测试；车载液压冲击装置 6 包括信号发送与接收器 6.1，第一控制器 6.2，第一油泵 6.3，第一副液压缸 6.4，滑动轴 6.5，第一主液压缸 6.6，第一质量块 6.7，第一橡胶缓冲块 6.8，第一加载板 6.9，第一承载盘 6.10；其中，信号发送与接收器 6.1 用于接收冲击指令与发送冲击力时程数据；第一控制器 6.2 与信号发送与接收器 6.1 连接，用于控制第一油泵 6.3 的开关；第一油泵 6.3 分别与第一主液压缸 6.6 和第一副液压缸 6.4 连接，用于给第一主液压缸 6.6 和第一副液压缸 6.4 提供动力；第一主液压缸 6.6 用于提升放置于其顶部的第一质量块 6.7；第一副液压缸 6.4 设置于拖车 5 之上，用于提升设置于拖车 5 的矩形开口内的第一加载板 6.9，拖车 5 的矩形开口设置于拖车板位于车载液压冲击装置 6 正下方的位置；第一加载板 6.9 沿滑动轴 6.5 上下移动，其上设置有第一橡胶缓冲块 6.8，用于承载第一质量块 6.7 的冲击；滑动轴 6.5 为第一加载板 6.9 提供垂直运动轴；第一承载盘 6.10 设置于第一加载板 6.9 的下方，用于将冲击荷载传递至桥面。

所述移动液压冲击装置 9 采用无线控制方式，用于正分析中的逐级冲击加载试验；移动液压冲击装置 9 包括信号接收器 9.1，第二控制器 9.2，第二油泵 9.3，第二副液压缸 9.4，第二主液压缸 9.5，第二质量块 9.6，第二橡胶缓冲块 9.7，第二加载板 9.8，第二承载盘 9.9，驱动系统 9.10；其中，信号接收器 9.1 用于接收移动及冲击指令，第二控制器 9.2 与信号接收器 9.1 连接，用于控制第二油泵 9.3 的开关与驱动系统 9.10；第二油泵 9.3 分别与第二主液压缸 9.5 和第二副液压缸 9.4 连接，用于给第二主液压缸 9.5 和第二副液压缸 9.4 提供动力；第二主液压缸 9.5 用于提升放置于其顶部的第二质量块 9.6；第二副液压缸 9.4 设置于移动液压冲击装置 9 底部框架之上，用于提升第二加载板 9.8；第二加载板 9.8 之上设置有第二橡胶缓冲块 9.7，用于承载第二质量块 9.6 的冲击；第二承载盘 9.9 用于将冲击荷载传递至桥面；驱动系统 9.10 位于整个移动液压冲击装置 9 的底部，用于实现移动液压冲击装置 9 的自动移动。

所述信号发送与采集系统 3 分别与移动液压冲击装置 9、车载液压冲击装置 6 采用无线通信连接，用于发送、采集信号，发送的信号包括移动液压冲击装置的移动指令与冲击指令，采集的信号包括车载液压冲击装置的冲击力时程数据，测点加速度时程数据与位移数据；

所述数据分析系统 4 与信号发送与采集系统 3 连接，利用内嵌的基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别算法及相关的安全与承载能力评定准则，对所采集的数据进行自动化分析，快速输出测试与评估结果；

所述 GPS 定位仪 2、车轮旋转编码器 7、激光测距仪 8 组成整个设备的定位与测距系统，其中，所述 GPS 定位仪 2 安装在牵引车 1 上，用于引导整个设备到达桥面各子块，车轮旋转编码器 7 设置于拖车 5 的车轮上，激光测距仪 8 设置于拖车 5 上，车轮旋转编码器 7 与激光测距仪 8 分别用于确定测点及冲击点在桥面纵向与横向的精确位置；

所述无线加速度传感器 10 用于获取加速度测点的加速度时程数据，无线位移传感器 11 用于获取位移测点的动挠度与残余挠度数据。

四、基于冲击振动的桥梁检测评估流程

结合以上发明内容一、二、三与相关评估方法形成了一套基于冲击振动的桥梁检测评估流程，如图 3 所示，该流程包含基于无参考点分块冲击的桥梁反分析与基于逐级冲击加载的桥梁正分析两大阶段，其主要步骤如下：

步骤一：计算准备

首先根据公路等级确定设计荷载，进而确定桥梁挠度控制截面与控制挠度的大小。再由待测桥梁规模以及测试精度，合理划分桥梁子块，并安排冲击点及加速度测点位置。其中冲击点应选择在结构反映较敏感处，而加速度测点应包含冲击点且需包含挠度控制截面上的点，这些挠度控制截面上的加速度测点同时作为位移测点。之后确定计算静载作用点及大小，计算静载作用点需在测点中选取并且宜选择在控制截面挠度影响线的峰值附近，其大小应保证计算加载后控制截面上的挠度计算值满足试验效率要求。

步骤二：无参考点分块冲击测试

GPS 定位仪引导一体化设备行驶至子块桥面，利用车轮旋转编码器与激光测距仪确定测点及冲击点位置，并在测点上布设无线加速度传感器。之后一体化设备中的信号发送与采集系统向车载液压冲击装置发出冲击指令对冲击点进行冲击，同时信号发送与采集系统采集冲击力时程数据与测点加速度时程数据。一点冲击完成后，进行同子块中其他冲击点的冲击从而完成一个子块的冲击测试。按相同的方式对其余子块依次进行冲击测试，最终完成整个桥梁的冲击测试工作。

步骤三：基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别

根据每个子块的冲击力时程数据与测点加速度时程数据估计各子块的频响函数，再采用模态参数识别算法分别识别各子块的模态参数，其中包括模态振型、频率、阻尼比、模态缩放系数、系统极点。之后进行模态振型缩放调整，为判断各子块模态振型方向系数的正负，通过公式（13）计算整体结构的势能，其中势能最小值所对应的各子块的模态振型方向系数即为真实值。将该真实值代入公式（6）即可获得整体结构的模态振型。再通过公式（9）便可计算得到整体结构的柔度矩阵。本步骤中的柔度识别算法已内嵌到数据分析系统之中，使用时不需要进行人工计算。

步骤四：桥梁安全状况初判

根据计算静载与桥梁整体结构的柔度矩阵预测控制截面上位移测点的挠度，并将该挠度预测值与位移测点上的挠度计算值进行比较。若预测值大于计算值，即校验系数 $\zeta > 1$ ，代表桥梁实际状况较理论状况要差，桥梁承载能力严重不足，反之，则认为桥梁安全状况较好需进行进一步的实际承载能力评估。

步骤五：桥梁检测与检算

对安全状况较好的桥梁，需进一步考虑桥梁实际缺损、材质状况等因素对其承载能力造成的影响。因此需要对桥梁相关指标进行检查与检测。然后通过考虑上述指标比较

作用效应与抗力效应，从而进行检算评定。当作用效应与抗力效应的比值小于 1 时，判定承载能力满足要求，若比值大于 1.2 时，则判定承载能力不满足要求，若该比值介于 1.0 至 1.2 之间时，则应进行逐级冲击加载试验。

步骤六：制定逐级冲击加载试验方案

冲击加载点选取在计算静载加载点处，并令每个冲击加载点上的最大冲击荷载与对应的计算静载相等。在加载试验中需对冲击荷载的施加进行分级，冲击加载级数根据最大冲击荷载与加载最小荷载增量而定。

步骤七：进行逐级冲击加载试验

将一体化设备行驶至冲击加载点附近，并在位移测点布设无线位移传感器。之后信号发送与采集系统分别对各移动液压冲击装置发出移动指令。当各移动液压冲击装置都到达冲击加载点位置后，信号发送与采集系统同时向各台移动液压冲击装置发出冲击指令，同时采集无线位移传感器发送的位移测点动挠度数据。一次加载结束后，逐级提高冲击荷载的大小，最终获得最大冲击荷载作用下控制截面上位移测点的最大动挠度。冲击加载结束后，待桥梁稳定，采集无线位移传感器发送的位移测点残余挠度值。在逐级冲击加载试验中还要检查裂缝与基础变位情况。

步骤八：桥梁承载能力评定

根据最大动挠度与静挠度的对应关系，推得桥梁在计算静载作用下位移测点的真实静挠度，再计算荷载试验校验系数即真实静挠度值与挠度计算值的比值及相对残余挠度值。如果出现校验系数 ζ 大于 1；相对残余挠度值 η 超过 20%；裂缝情况不良；基础发生不稳定沉降中的一条，则判定承载能力不满足要求。否则根据校验系数，再次确定检算系数，并基于该检算系数比较作用效应与抗力效应。当作用效应与抗力效应的比值小于 1.05 时，判定桥梁承载能力满足要求，否则判定承载能力不满足要求。

实施例

下面通过具体实施例对本发明作进一步说明，但不应以此限制本发明的保护范围。

以一座单跨简支梁桥为例，如图 4 所示，其跨径为 15.52m，整个桥面宽 6.5m，为双向两车道，车道两侧留有 1.07m 宽的人行道，桥面板下简支梁间距为 2.18 m。根据本发明对该桥进行检测与承载能力评估，并与传统的基于桥梁整体结构冲击振动测试的结果进行比较，其步骤如下：

（1）计算准备

根据设计荷载确定桥梁跨中截面为挠度控制截面，该截面的控制挠度值为 5.6mm。然后将整个桥梁划分为子块 S_1 与子块 S_2 。子块 S_1 包含加速度测点 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21 与冲击点 11, 14, 20；子块 S_2 包含加速度测点 1, 2, 3, 8, 9, 10, 15, 16, 17 与冲击点 10, 16, 17，其中 10, 11, 14, 16, 17, 20 既作为加速度测点又作为冲击点，而由于 4, 11, 18 在挠度控制截面上，所以 4, 11, 18 既作为加速度测点又作为位移测点，桥梁子块的划分方式及测点与冲击点位置如图 4 所示。根据跨中截面挠度影响线选取计算静载加载点为 11, 12, 18, 19，其对应的计算静载大小分别为 150kN, 50kN, 150kN, 50kN。计算静载引起的跨中截面最大挠度计算值为 5.5mm，位于位移测点 11 处，其荷载效率满足要求。

(2) 无参考点分块冲击测试

牵引车 1 上的 GPS 定位仪 2 引导一体化设备行驶至子块 S_1 桥面，利用拖车 5 上的车轮旋转编码器 7 与激光测距仪 8 分别确定子块 S_1 的测点及冲击点在桥面纵向与横向的精确位置，并在测点上布设无线加速度传感器 10。先对冲击点 14 进行冲击，将车载液压冲击装置 6 移到冲击点 14 位置，然后信号发送与采集系统 3 对车载液压冲击装置 6 发出冲击指令，车载液压冲击装置 6 上的信号发送与接收器 6.1 接收到冲击指令，并将该指令传递到第一控制器 6.2，第一控制器 6.2 控制第一油泵 6.3 先给第一副液压缸 6.4 提供动力，使第一承载盘 6.10 沿滑动轴 6.5 下落直至冲击点桥面，之后再给第一主液压缸 6.6 提供动力，使第一主液压缸 6.6 带动第一质量块 6.7 到达预定高度，然后令第一质量块 6.7 自由下落，撞击到第一加载板 6.9 上的第一橡胶缓冲块 6.8，同时信号发送与采集系统 3 采集信号发送与接收器 6.1 发送的冲击力时程数据与无线加速度传感器 10 发送的加速度时程数据。14 点冲击结束后，再对 20, 11 点分别进行冲击，进而完成子块 S_1 的冲击测试。按相同方式对子块 S_2 进行冲击测试，最终完成整个桥梁的冲击测试工作。

(3) 基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别

信号发送与采集系统 3 将采集到的子块 S_1 、子块 S_2 的冲击力时程数据与测点加速度时程数据导入数据分析系统 4 之中。数据分析系统 4 对数据进行加窗、滤波，估计各子块的频响函数，并采用 CMIF 法对得到的频响函数作模态参数识别。识别出的两个子块前 10 阶频率与相应的阻尼比已列在表 1 中，同时由传统的基于桥梁整体结构冲击振动测试得到的桥梁整体结构的频率与阻尼比也列在表 1 中作为比较。从表 1 中可以看到同阶时子块与整体结构的频率十分接近，说明参数识别比较准确。

表 1 前 10 阶频率与阻尼比的识别值

模态阶数	整体结构		子块 S_2		子块 S_1	
	频率(Hz)	阻尼比(%)	频率(Hz)	阻尼比(%)	频率(Hz)	阻尼比(%)
第 1 阶	7.16	6.53	7.25	7.91	7.13	5.71
第 2 阶	8.26	5.24	8.25	4.58	8.22	6.20
第 3 阶	10.14	1.38	10.12	1.38	10.14	1.32
第 4 阶	14.71	1.76	14.68	1.65	14.70	1.86
第 5 阶	20.76	0.56	20.57	0.31	20.80	0.66
第 6 阶	22.85	0.97	22.78	1.08	22.82	0.93
第 7 阶	26.50	4.04	26.57	3.92	26.64	4.23
第 8 阶	30.01	2.11	30.07	2.08	29.95	2.33
第 9 阶	33.99	1.63	33.98	1.84	33.89	1.57
第 10 阶	35.74	1.53	35.89	1.66	35.43	2.04

之后进行模态振型缩放调整。由于子块 S_2 中的测点数少于子块 S_1 ，所以以子块 S_1 的缩放水平为标准。由公式 (5) 得子块 S_2 在模态振型缩放调整后的第 r 阶模态振型为：

$$\{\tilde{\phi}_r^{S_2}\} = \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_2}\}$$

将上式代入公式 (6) 可得缩放调整后的整体结构模态振型为：

$$\{\tilde{\phi}_r\} = \left(\left\{ \tilde{\phi}_r^{S_1} \right\}^T \left\{ \tilde{\phi}_r^{S_2} \right\}^T \right)^T = \left(\left\{ \phi_r^{S_1} \right\}^T \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} \left\{ \phi_r^{S_2} \right\}^T \right)^T$$

为确定 $\eta_r^{S_2}$ 的正负，在整体结构每个测点上均作用 5kN 的节点荷载，即：

$$\{f\} = \left(\left\{ f^{S_1} \right\}^T \left\{ f^{S_2} \right\}^T \right)^T = \left((5 \ 5 \ \dots 5)_{1 \times 21} \right)^T \times 10^3 N$$

又由公式 (13) 可得：

$$\Pi_p = -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^{10} \left(\left\{ f^{S_1} \right\}^T \left\{ \phi_r^{S_1} \right\} + \left\{ f^{S_2} \right\}^T \left\{ \phi_r^{S_2} \right\} \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} \right)^2 \left(\frac{Q_r^{S_1}}{-\lambda_r} + \frac{Q_r^{S_1*}}{-\lambda_r^*} \right)$$

将节点荷载代入上式，计算整体结构势能。由于取 10 阶模态振型，所以势能值共有 $2^{10}=1024$ 种大小，该值已按从小到大的顺序表示在图 5 中。其中最小势能对应的子块 S_2 的模态振型方向系数即为真实值。由该真实值即可确定子块 S_2 在模态振型缩放调整后的第 r 阶模态振型。根据缩放调整后的模态振型逐阶计算整体结构势能并与由传统的基

于桥梁整体结构冲击振动测试方法计算得到的势能值在图 6 中进行比较。在图 6 中可以看出当模态阶数为 6 时, 势能已经收敛。图 7 中列出了子块 S_2 前 6 阶模态振型的缩放调整情况。引入按前 6 阶计算的整体结构柔度矩阵如下:

$$[F] = \sum_{r=1}^6 \left(\frac{\{\tilde{\phi}_r\}\{\tilde{\phi}_r\}^T Q_r^{S_1}}{-\lambda_r} + \frac{\{\tilde{\phi}_r^*\}\{\tilde{\phi}_r^*\}^T Q_r^{S_1^*}}{-\lambda_r^*} \right)$$

按上式计算可得 $[F]$ 。

(4) 桥梁安全状况初判

在点 11, 12, 18, 19 上分别作用 150kN, 50kN, 150kN, 50kN 的计算静载, 通过上述柔度矩阵, 即可得到各测点的挠度预测值。为了进一步展示本发明中挠度预测的准确度, 还计算了由前 1 阶, 前 2 阶模态参数得到的柔度矩阵, 并分别预测了其对应的挠度, 将这三个挠度预测结果与由传统的基于桥梁整体结构冲击振动测试方法在相同计算荷载作用下得到的挠度预测值进行比较, 如图 8 所示, 从中可以看出随着阶数的增加挠度预测结果与整体结构冲击测试得到的结果趋于一致, 证明本发明中的柔度识别方法是准确的。取前 6 阶计算得出的挠度作为预测值, 在跨中截面最大挠度预测值为 5.4mm, 位于位移测点 11 处。由于该预测值小于挠度计算值 5.5mm, 估计桥梁实际状况好于理论状况, 对桥梁进行进一步的承载能力评估。

(5) 桥梁检测与检算

对桥梁的实际缺损、材质状况等情况进行检查与检测, 其内容主要包括: 桥梁缺损状况、几何形态、恒载变异状况、材质强度、钢筋腐蚀情况、混凝土氯离子含量、混凝土电阻率、混凝土碳化状况、钢筋保护层厚度、结构自振频率、基础与地基状况、实际运营荷载状况等。由上述检查与检测结果得到了各指标的评定标度, 进而得到承载能力检算系数、承载能力恶化系数、混凝土结构截面折减系数、钢筋截面折减系数、活载影响修正系数。考虑上述系数后跨中截面弯矩抗力值为 9795 kN·m, 弯矩效应值为 10092 kN·m; 两端支座处剪力抗力值为 1255 kN, 剪力效应值为 1311 kN, 由于荷载作用效应与抗力效应的比值在 1.0 至 1.2 之间时, 则应进行逐级冲击加载试验。

(6) 制定逐级冲击加载试验方案

以计算静载加载点 11, 12, 18, 19 作为冲击加载点, 且每个冲击加载点上的最大冲击荷载与对应的计算静载相等, 即分别为 150kN, 50kN, 150kN, 50kN。冲击加载共

分为 5 级, 其中 11 与 18 点加载大小依次为 30kN, 60kN, 90kN, 120kN, 150kN, 12 与 19 点加载大小依次为 10kN, 20kN, 30kN, 40kN, 50kN。

(7) 进行逐级冲击加载试验

一体化设备行驶至冲击加载点 11, 12, 18, 19 附近, 并在位移测点 4, 11, 18 上布设无线位移传感器 11, 再将拖车 5 上的 4 台移动液压冲击装置 9 移至地面。之后信号发送与采集系统 3 分别对 4 台移动液压冲击装置 9 发出移动指令, 移动液压冲击装置 9 上的信号接收器 9.1 接收到移动指令, 并将该指令传递到第二控制器 9.2, 第二控制器 9.2 控制移动液压冲击装置 9 下部的驱动系统 9.10, 使 4 台移动液压冲击装置 9 分别到达指定冲击加载点。然后信号发送与采集系统 3 同时对 4 台移动液压冲击装置 9 发出冲击指令, 信号接收器 9.1 接收到冲击指令, 并将该指令传递到第二控制器 9.2, 第二控制器 9.2 控制第二油泵 9.3 先给第二副液压缸 9.4 提供动力, 使第二承载盘 9.9 下落直至冲击加载点桥面, 之后再给第二主液压缸 9.5 提供动力, 使第二主液压缸 9.5 带动第二质量块 9.6 到达预定高度, 然后令第二质量块 9.6 自由下落, 撞击到第二加载板 9.8 上的第二橡胶缓冲块 9.7, 同时信号发送与采集系统 3 采集无线位移传感器 11 发送的位移测点动挠度数据。之后逐级提高冲击荷载的大小, 最终获得最大冲击荷载作用下控制截面上位移测点的最大动挠度。冲击加载结束后, 待桥梁稳定, 信号发送与采集系统 3 再采集无线位移传感器 11 发送的位移测点残余挠度值。在逐级冲击加载试验中还要检查裂缝与基础变位情况。

(8) 桥梁承载能力评定

在 4 个冲击加载点都施加最大冲击荷载时, 位移测点 11 上的最大动挠度值大于位移测点 4 与 18, 根据最大动挠度与静挠度的对应关系, 推得桥梁在计算静载作用下位移测点 11 的真实静挠度为 5.2mm, 该值小于计算静载引起的位移测点 11 处的挠度计算值 5.5mm, 而测得的位移测点最大残余挠度为 0.8mm, 相对残余挠度值小于 20%, 并且裂缝情况良好, 基础稳定。然后根据校验系数获得检算系数, 并由该检算系数计算跨中弯矩效应值为 9937 kN·m, 支座处剪力效应值为 1295 kN。此时荷载作用效应与抗力效应的比值小于 1.05, 最终判定该桥梁承载能力满足要求。

综上, 根据本发明提出的一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法与设备完成了一座桥梁完整的检测与评估。

权 利 要 求 书

1、一种基于冲击振动的桥梁检测评估方法，其特征在于：包括基于无参考点分块冲击的桥梁反分析的步骤与基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤，其中基于无参考点分块冲击的桥梁反分析的步骤用于快速排查出公路网中承载能力严重不足的中小型桥梁，基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤用于评估通过反分析排查的安全状况较好桥梁的实际承载能力。

2、根据权利要求 1 所述的基于冲击振动的桥梁检测评估方法，其特征在于：所述基于无参考点分块冲击的桥梁反分析的步骤中采用无参考点分块冲击测试，具体为：将桥梁整体结构分成若干子块，其中不同子块的冲击点与测点位置选取相互独立，之后对每个子块的冲击点进行逐点冲击，同时采集各子块冲击力时程数据与测点的加速度时程数据。

3、根据权利要求 1 所述的基于冲击振动的桥梁检测评估方法，其特征在于：所述基于逐级冲击加载的桥梁反分析的步骤中采用基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法，具体为：子块频响函数估计，子块模态参数识别，子块模态振型缩放调整，子块模态振型方向判别，整体结构柔度矩阵计算。

4、根据权利要求 3 所述的基于冲击振动的桥梁检测评估方法，其特征在于：所述的基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法中，在子块模态振型缩放调整时，以子块 S_1 的模态振型缩放程度为标准进行所有子块模态振型的缩放调整，采用的公式为：

$$\{\tilde{\phi}_r^{S_k}\} = \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_k}\}$$

式中： $\{\phi_r^{S_k}\}$ 、 $\{\tilde{\phi}_r^{S_k}\}$ 分别为子块 S_k 在模态振型缩放调整前后的第 r 阶模态振型， $Q_r^{S_k}$ 为子块 S_k 在模态振型缩放调整前的第 r 阶模态振型缩放系数， $Q_r^{S_1}$ 为子块 S_1 的第 r 阶模态振型缩放系数， $\eta_r^{S_k}$ 为子块 S_k 的第 r 阶模态振型方向系数（ $\eta_r^{S_k} = +1$ 或 $\eta_r^{S_k} = -1$ ）；之后将缩放调整后所有子块 $S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_n$ 的模态振型集成为桥梁整体结构模态振型，采用的公式为：

$$\begin{aligned} \{\tilde{\phi}_r\} &= \left(\{\tilde{\phi}_r^{S_1}\}^T \quad \{\tilde{\phi}_r^{S_2}\}^T \quad \dots \quad \{\tilde{\phi}_r^{S_k}\}^T \quad \dots \quad \{\tilde{\phi}_r^{S_n}\}^T \right)^T \\ &= \left(\{\phi_r^{S_1}\}^T \quad \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_2}\}^T \quad \dots \quad \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_k}\}^T \quad \dots \quad \eta_r^{S_n} \sqrt{\frac{Q_r^{S_n}}{Q_r^{S_1}}} \{\phi_r^{S_n}\}^T \right)^T \end{aligned}$$

式中： $\{\tilde{\phi}_r\}$ 为按子块 S_1 的模态振型缩放程度确定的桥梁整体结构第 r 阶模态振型。

5、根据权利要求 3 所述的基于冲击振动的桥梁检测评估方法，其特征在于：所述的基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别方法中，在整体结构柔度矩阵计算时，先计算桥梁整体结构势能，然后取其中最小势能对应的各子块的模态振型方向系数，基于该系数得到桥梁整体结构模态振型，其中包含各子块模态振型方向系数的桥梁整体结构势能表达式为：

$$\begin{aligned} \Pi_p = & -\frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \left(\{f^{S_1}\}^T \{\phi_r^{S_1}\} + \{f^{S_2}\}^T \{\phi_r^{S_2}\} \eta_r^{S_2} \sqrt{\frac{Q_r^{S_2}}{Q_r^{S_1}}} + \cdots + \{f^{S_k}\}^T \{\phi_r^{S_k}\} \eta_r^{S_k} \sqrt{\frac{Q_r^{S_k}}{Q_r^{S_1}}} + \cdots \right. \\ & \left. + \{f^{S_n}\}^T \{\phi_r^{S_n}\} \eta_r^{S_n} \sqrt{\frac{Q_r^{S_n}}{Q_r^{S_1}}} \right)^2 \left(\frac{Q_r^{S_1}}{-\lambda_r} + \frac{Q_r^{S_1*}}{-\lambda_r^*} \right) \end{aligned}$$

式中： Π_p 为桥梁整体结构势能， $\{f^{S_k}\}$ 表示任意子块 S_k 中的节点荷载向量， λ_r 为第 r 阶系统极点， λ_r^* 与 $Q_r^{S_1*}$ 分别为 λ_r 与 $Q_r^{S_1}$ 的共轭复数， m 表示计算的最高阶数。

6、根据权利要求 1 所述的基于冲击振动的桥梁检测评估方法，其特征在于：所述基于逐级冲击加载的桥梁正分析的步骤中采用逐级冲击加载试验，其包括：冲击加载点选取在计算静载加载点处；令每个冲击点上的最大冲击荷载与对应的计算静载相等；对冲击荷载的施加进行分级；将挠度控制截面上的加速度测点同时作为位移测点并在其上布设位移传感器，测量冲击荷载作用下各位移测点的最大动挠度，在冲击加载结束后，待桥梁稳定，再测量位移测点的残余挠度；根据最大动挠度与静挠度的对应关系，推得桥梁在计算静载作用下位移测点的真实静挠度，通过位移测点的真实静挠度与残余挠度并结合裂缝与基础变位情况进行桥梁承载能力评定。

7.一种基于冲击振动的桥梁检测评估一体化设备，其特征在于：包括牵引车（1），GPS 定位仪（2），信号发送与采集系统（3），数据分析系统（4），拖车（5），车载液压冲击装置（6），车轮旋转编码器（7），激光测距仪（8），移动液压冲击装置（9），无线加速度传感器（10），无线位移传感器（11）；

其中，所述牵引车（1）提供动力，其上安装有 GPS 定位仪（2），信号发送与采集系统（3）及数据分析系统（4）；

所述拖车（5）挂于牵引车（1）后方，其上安装有车载液压冲击装置（6），车轮旋转编码器（7）与激光测距仪（8），并且用于运输若干台移动液压冲击装置（9）及无

线加速度传感器（10）与无线位移传感器（11）；

所述车载液压冲击装置（6）固定于拖车（5）的后部，采用无线控制方式，用于反分析中的无参考点分块冲击测试；

所述移动液压冲击装置（9）采用无线控制方式，用于正分析中的逐级冲击加载试验；

所述信号发送与采集系统（3）分别与移动液压冲击装置（9）、车载液压冲击装置（6）采用无线通信连接，用于发送、采集信号，发送的信号包括移动液压冲击装置的移动指令与冲击指令，采集的信号包括车载液压冲击装置的冲击力时程数据，测点加速度时程数据与位移数据；

所述数据分析系统（4）与信号发送与采集系统（3）连接，利用内嵌的基于无参考点分块冲击的整体结构柔度识别算法及相关的安全与承载能力评定准则，对所采集的数据进行自动化分析，快速输出测试与评估结果；

所述 GPS 定位仪（2）、车轮旋转编码器（7）、激光测距仪（8）组成整个设备的定位与测距系统，其中，所述 GPS 定位仪（2）安装在牵引车（1）上，用于引导整个设备到达桥面各子块，车轮旋转编码器（7）设置于拖车（5）的车轮上，激光测距仪（8）设置于拖车（5）上，车轮旋转编码器（7）与激光测距仪（8）分别用于确定测点及冲击点在桥面纵向与横向的精确位置；

所述无线加速度传感器（10）用于获取加速度测点的加速度时程数据，无线位移传感器（11）用于获取位移测点的动挠度与残余挠度数据。

8、根据权利要求 7 所述的基于冲击振动的桥梁检测评估一体化设备，其特征在于：所述车载液压冲击装置（6）包括信号发送与接收器（6.1），第一控制器（6.2），第一油泵（6.3），第一副液压缸（6.4），滑动轴（6.5），第一主液压缸（6.6），第一质量块（6.7），第一橡胶缓冲块（6.8），第一加载板（6.9），第一承载盘（6.10）；其中，信号发送与接收器（6.1）用于接收冲击指令与发送冲击力时程数据；第一控制器（6.2）与信号发送与接收器（6.1）连接，用于控制第一油泵（6.3）的开关；第一油泵（6.3）分别与第一主液压缸（6.6）和第一副液压缸（6.4）连接，用于给第一主液压缸（6.6）和第一副液压缸（6.4）提供动力；第一主液压缸（6.6）用于提升放置于其顶部的第一质量块（6.7）；第一副液压缸（6.4）设置于拖车（5）之上，用于提升设置于拖车（5）的矩形开口内的第一加载板（6.9），拖车（5）的矩形开口设置于拖车板位于车载液压冲击装置（6）正下方的位置；第一加载板（6.9）沿滑动轴（6.5）上下移动，其上设置有第一橡胶缓冲

块（6.8），第一橡胶缓冲块（6.8）用于承载第一质量块（6.7）的冲击；滑动轴（6.5）为第一加载板（6.9）提供垂直运动轴；第一承载盘（6.10）设置于第一加载板（6.9）的下方，用于将冲击荷载传递至桥面。

9、根据权利要求 7 所述的基于冲击振动的桥梁检测评估一体化设备，其特征在于：所述移动液压冲击装置（9）包括信号接收器（9.1），第二控制器（9.2），第二油泵（9.3），第二副液压缸（9.4），第二主液压缸（9.5），第二质量块（9.6），第二橡胶缓冲块（9.7），第二加载板（9.8），第二承载盘（9.9），驱动系统（9.10）；其中，信号接收器（9.1）用于接收移动及冲击指令，第二控制器（9.2）与信号接收器（9.1）连接，用于控制第二油泵（9.3）的开关与驱动系统（9.10）；第二油泵（9.3）分别与第二主液压缸（9.5）和第二副液压缸（9.4）连接，用于给第二主液压缸（9.5）和第二副液压缸（9.4）提供动力；第二主液压缸（9.5）用于提升放置于其顶部的第二质量块（9.6）；第二副液压缸（9.4）设置于移动液压冲击装置（9）底部框架之上，用于提升第二加载板（9.8）；第二加载板（9.8）之上设置有第二橡胶缓冲块（9.7），第二橡胶缓冲块（9.7）用于承载第二质量块（9.6）的冲击；第二承载盘（9.9）用于将冲击荷载传递至桥面；驱动系统（9.10）位于整个移动液压冲击装置（9）的底部，用于实现移动液压冲击装置（9）的自动移动。

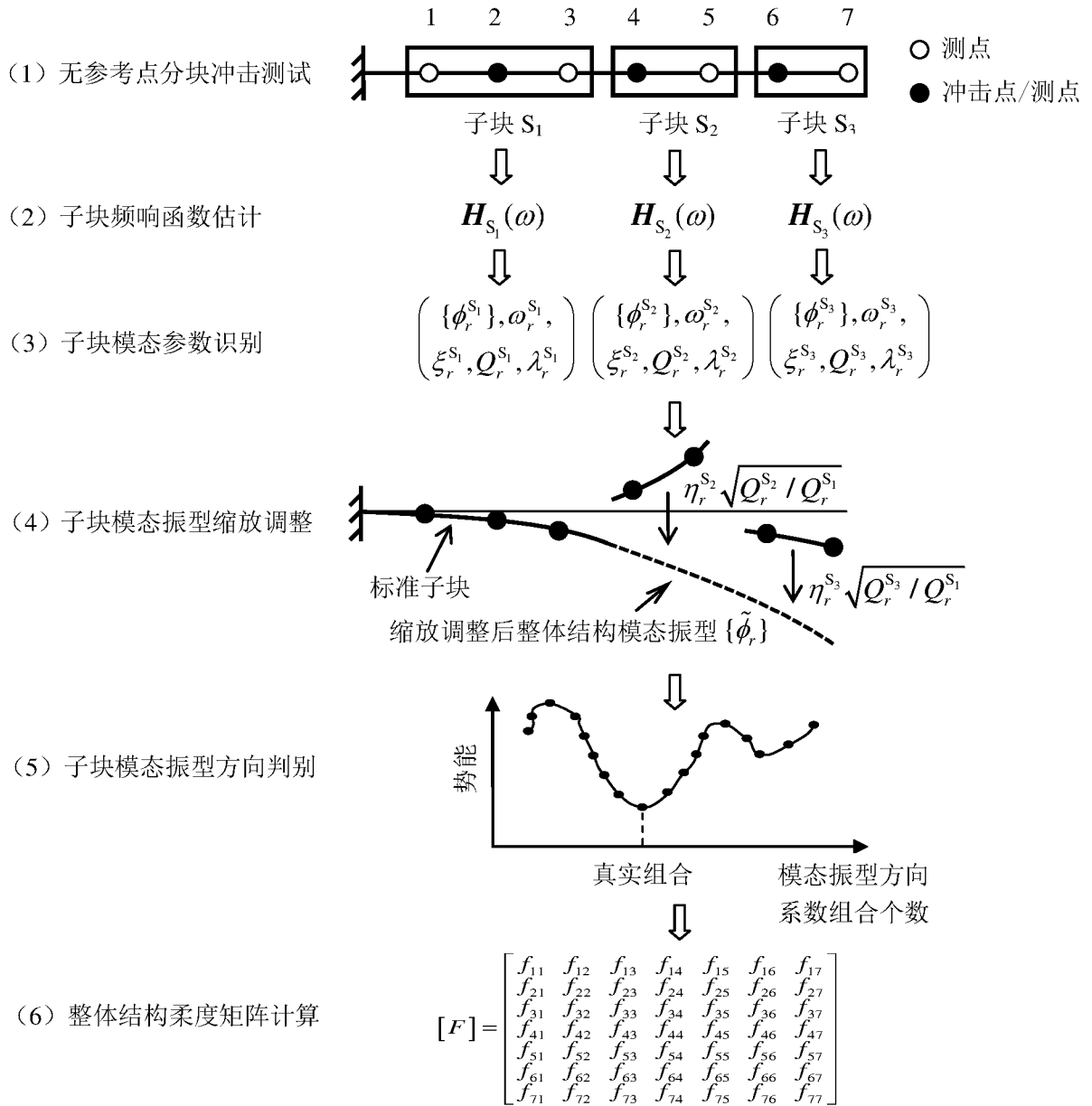


图 1

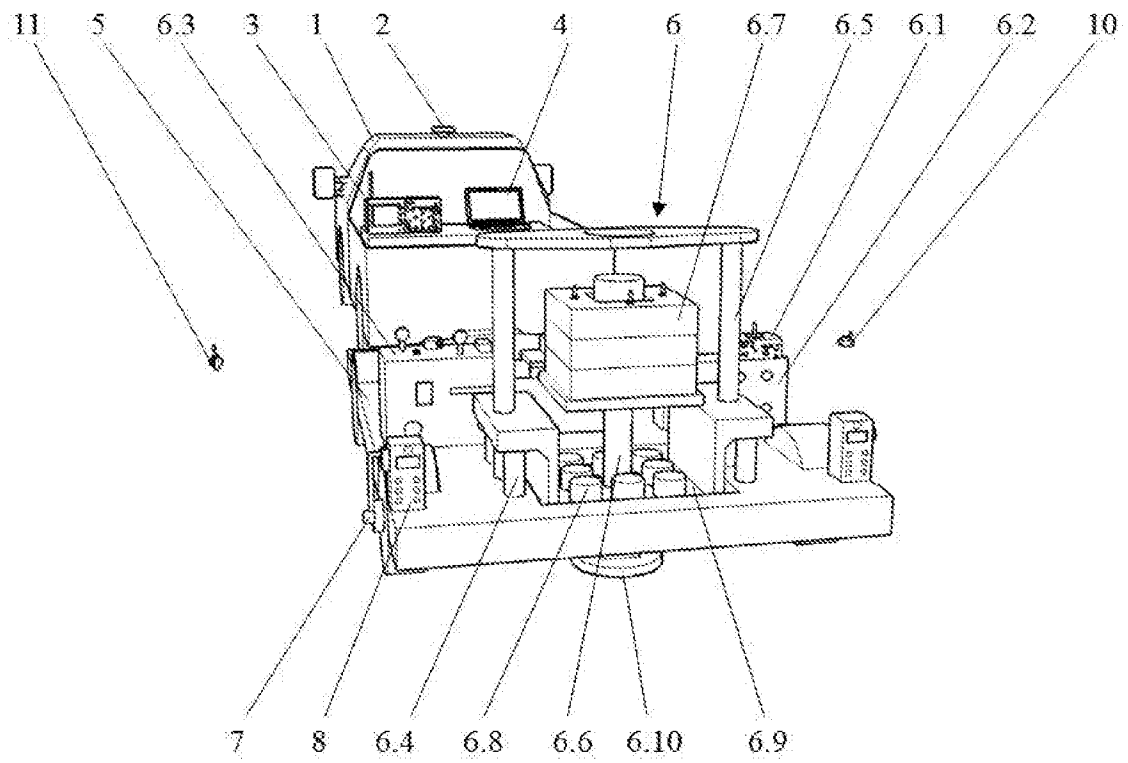


图 2a

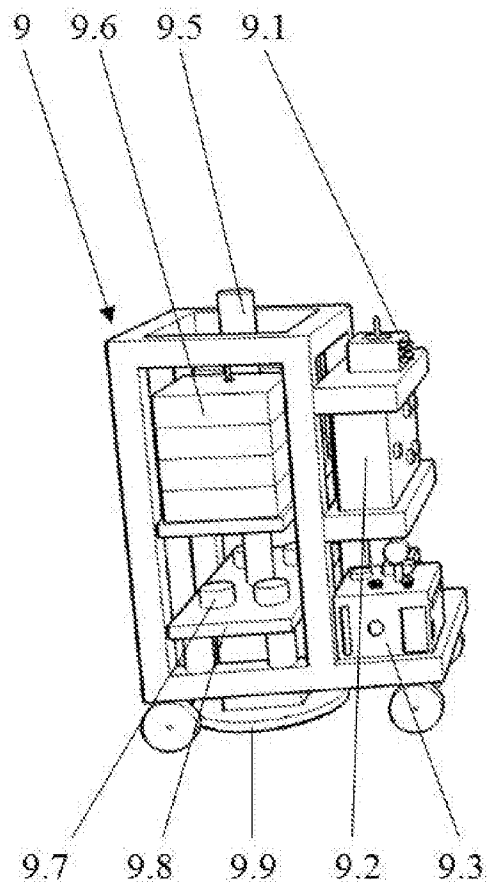


图 2b

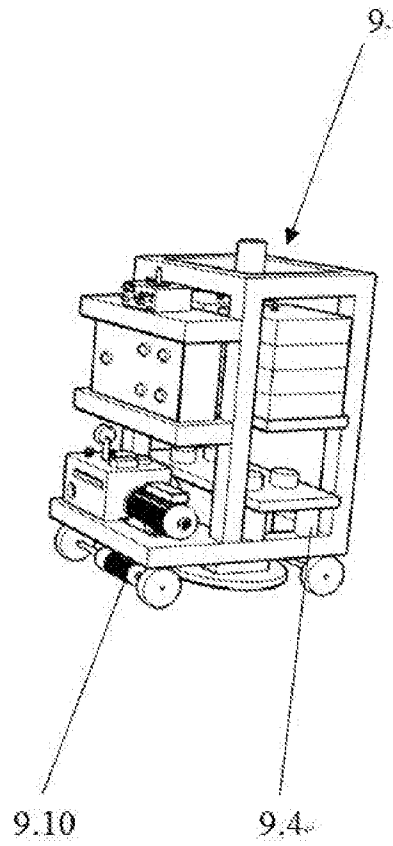


图 2c

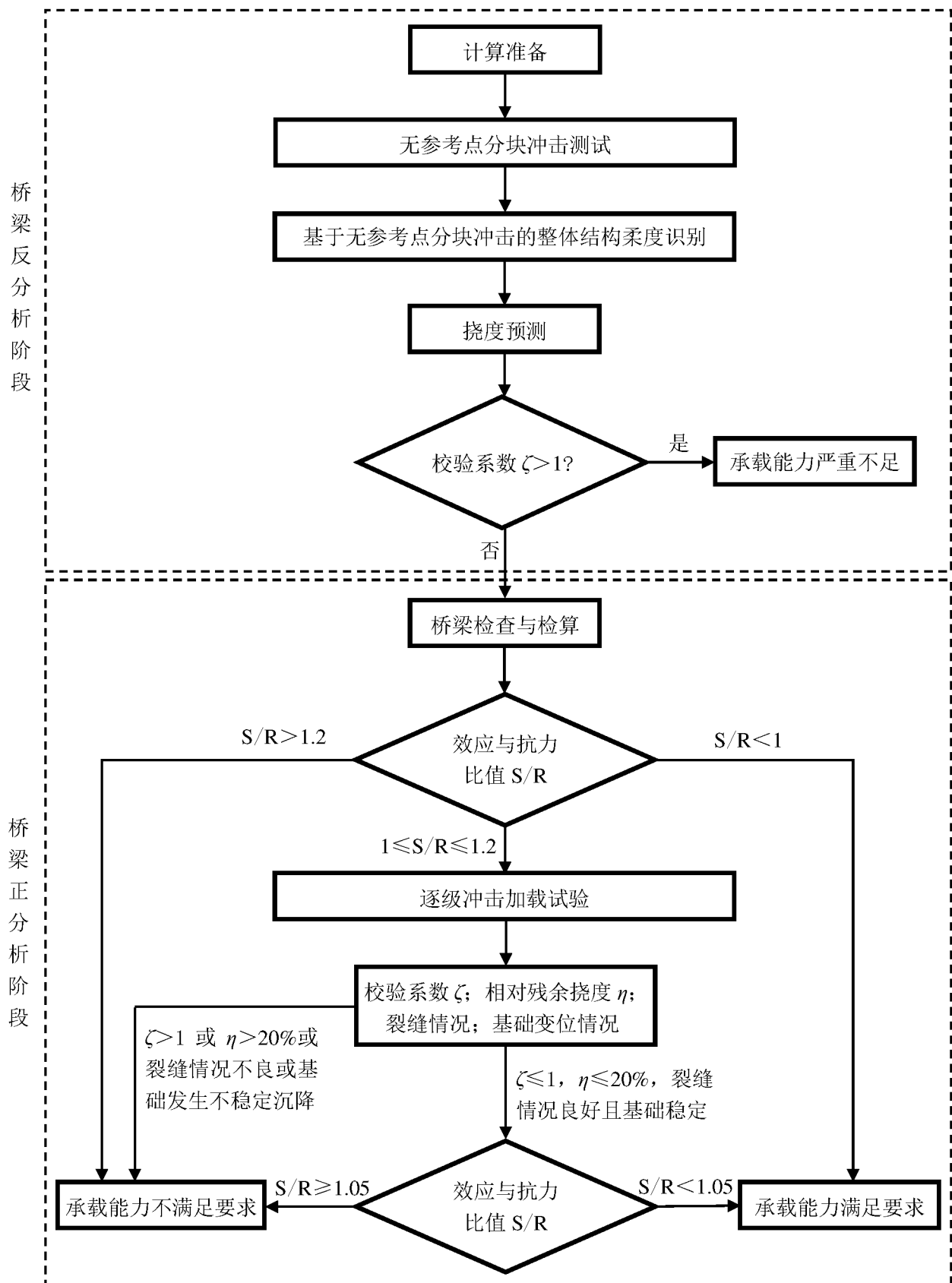


图 3

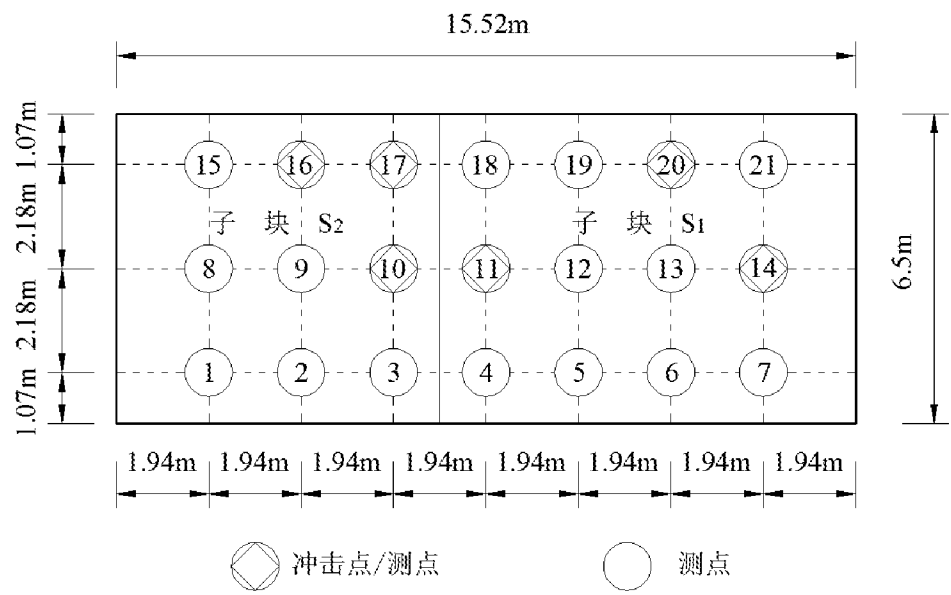


图 4

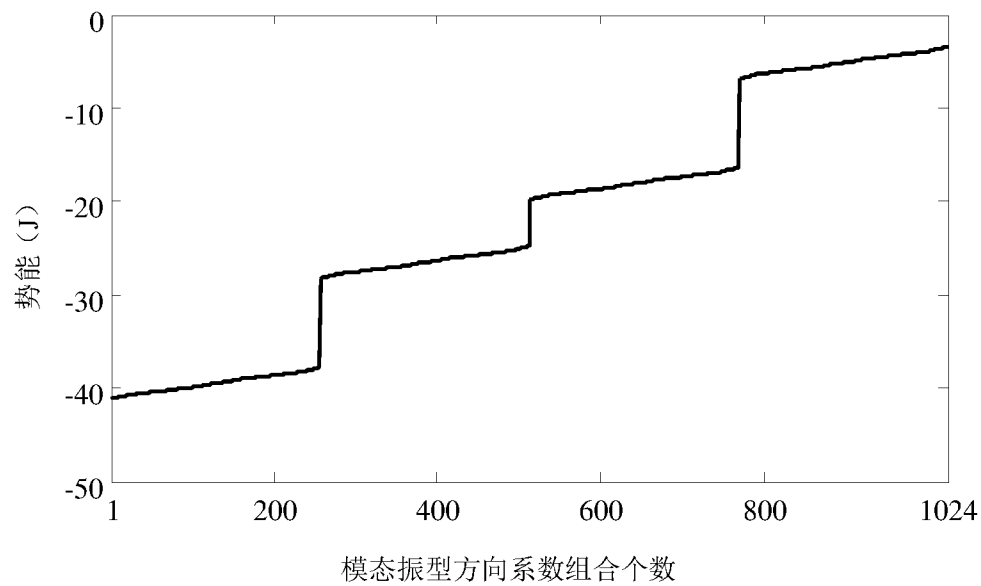


图 5

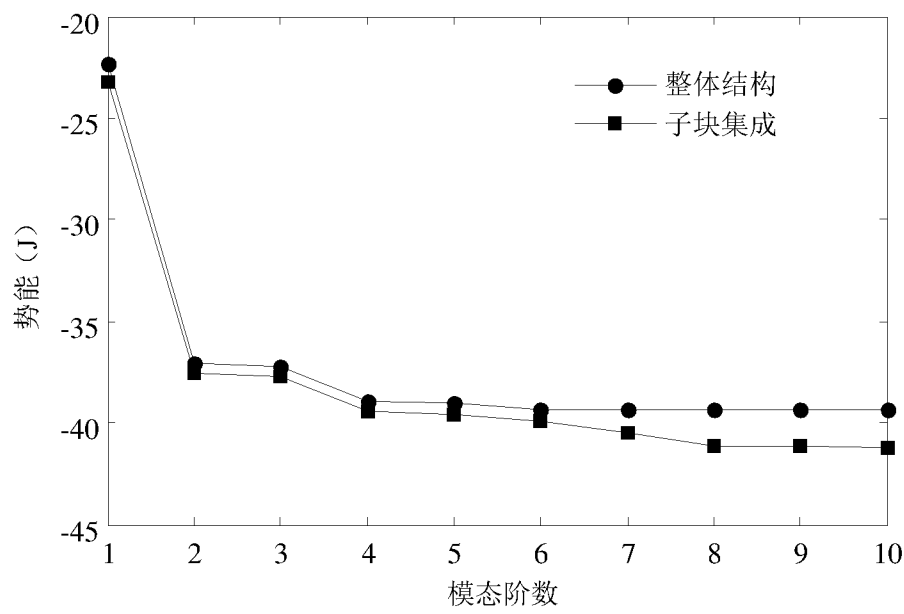


图 6

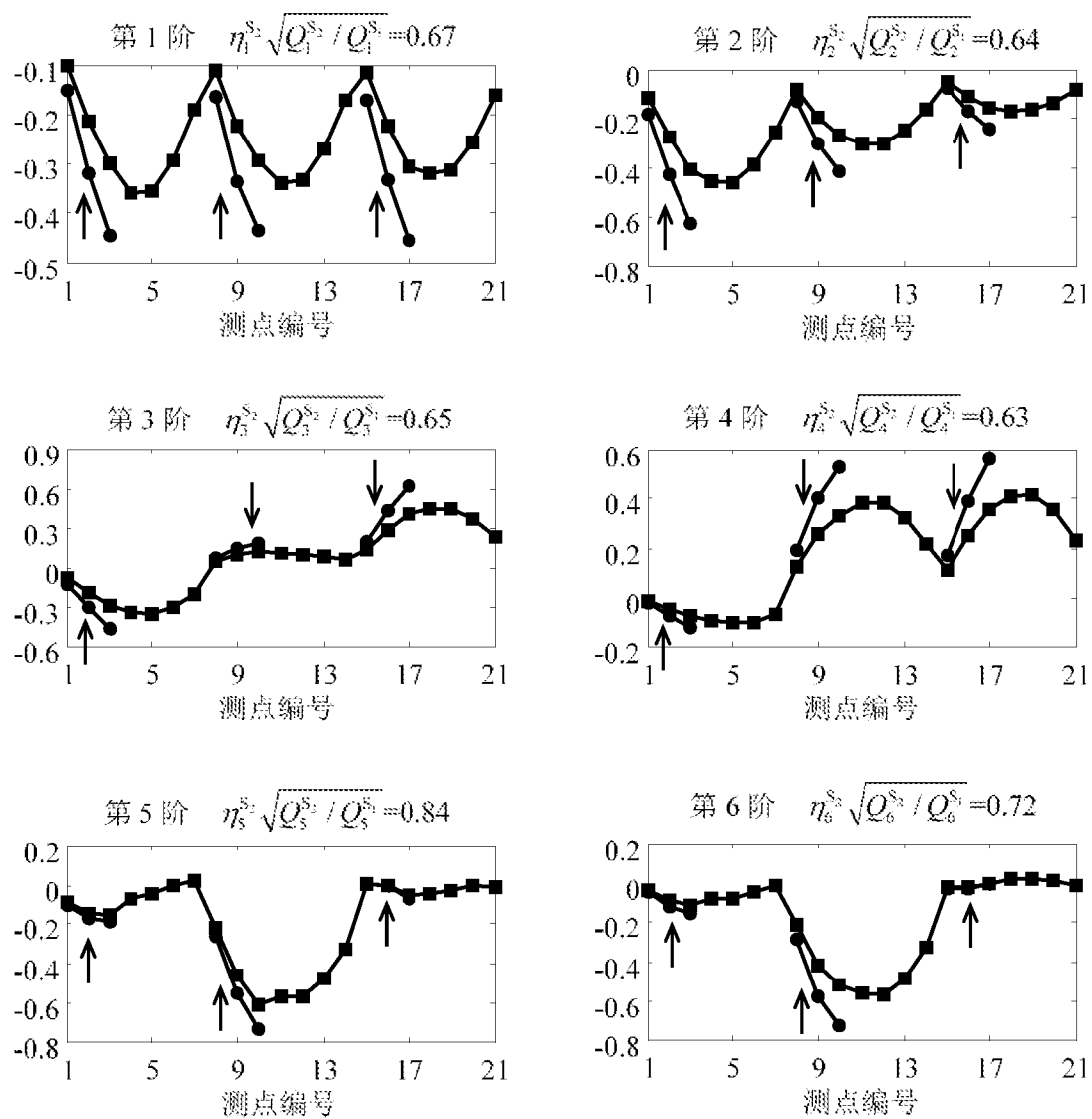


图 7

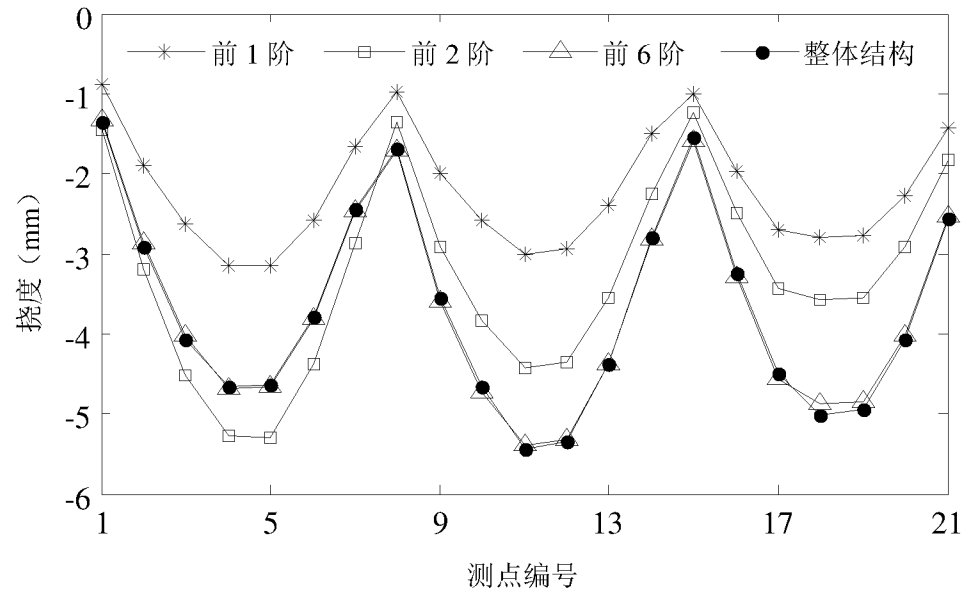


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/096862

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01M 7/08 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01M 7/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: SOUTHEAST UNIVERSITY; ZHANG, Jian; XIA, Qi; ZHANG, Bo; GUO, Shuanglin; without reference point, back analysis, step-by-step impact, forward analysis, carrying capacity, vibration, impact, bridge, detect, block, impact, reverse, analysis

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 102353509 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 15 February 2012 (15.02.2012), description, paragraphs 0014-0023, and figures 1-3	1-9
Y	CN 103411743 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 27 November 2013 (27.11.2013), description, paragraphs 0012-0019, and figures 1-3	1-9
Y	CN 104406757 A (SOUTHEAST UNIVERSITY), 11 March 2015 (11.03.2015), description, paragraphs 0069-0071, and figures 1 and 2	7-9
A	CN 1804563 A (BEIJING JIAOTONG UNIVERSITY), 19 July 2006 (19.07.2006), the whole document	1-9
A	CN 104713740 A (TIANJIN MUNICIPAL ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE), 17 June 2015 (17.06.2015), the whole document	1-9
A	US 2010242609 A1 (LEE, W.F. et al.), 30 September 2010 (30.09.2010), the whole document	1-9

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 17 February 2017 (17.02.2017)	Date of mailing of the international search report 01 March 2017 (01.03.2017)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer JIA, Jingjing Telephone No.: (86-10) 62413452

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2016/096862

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102353509 A	15 February 2012	CN 102353509 B	18 December 2013
CN 103411743 A	27 November 2013	CN 103411743 B	16 September 2015
CN 104406757 A	11 March 2015	CN 104406757 B	05 October 2016
CN 1804563 A	19 July 2006	None	
CN 104713740 A	17 June 2015	None	
US 2010242609 A1	30 September 2010	JP 2010229807 A	14 October 2010
		JP 5148589 B2	20 February 2013
		US 8290718 B2	16 October 2012
		TW 201035416 A	01 October 2010

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2016/096862

A. 主题的分类

G01M 7/08(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01M7/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI: 东南大学, 张建, 夏琪, 张博, 郭双林, 冲击, 振动, 桥梁, 检测, 无参考点, 分块, 反分析, 逐级冲击, 正分析, 承载能力, vibration, impact, bridge, detect, block, impact, reverse, analysis

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 102353509 A (东南大学) 2012年 2月 15日 (2012 - 02 - 15) 说明书第0014-0023段, 图1-3	1-9
Y	CN 103411743 A (东南大学) 2013年 11月 27日 (2013 - 11 - 27) 说明书第0012-0019段, 图1-3	1-9
Y	CN 104406757 A (东南大学) 2015年 3月 11日 (2015 - 03 - 11) 说明书第0069-0071段, 图1, 2	7-9
A	CN 1804563 A (北京交通大学) 2006年 7月 19日 (2006 - 07 - 19) 全文	1-9
A	CN 104713740 A (天津市市政工程研究院) 2015年 6月 17日 (2015 - 06 - 17) 全文	1-9
A	US 2010242609 A1 (LEE WEI-FENG 等) 2010年 9月 30日 (2010 - 09 - 30) 全文	1-9

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2017年 2月 17日

国际检索报告邮寄日期

2017年 3月 1日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

贾晶晶

电话号码 (86-10)62413452

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/096862

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	102353509	A	2012年 2月 15日	CN	102353509	B	2013年 12月 18日
CN	103411743	A	2013年 11月 27日	CN	103411743	B	2015年 9月 16日
CN	104406757	A	2015年 3月 11日	CN	104406757	B	2016年 10月 5日
CN	1804563	A	2006年 7月 19日	无			
CN	104713740	A	2015年 6月 17日	无			
US	2010242609	A1	2010年 9月 30日	JP	2010229807	A	2010年 10月 14日
				JP	5148589	B2	2013年 2月 20日
				US	8290718	B2	2012年 10月 16日
				TW	201035416	A	2010年 10月 1日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)