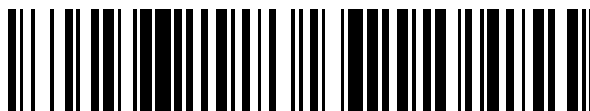


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 472 716**

51 Int. Cl.:

G01M 5/00 (2006.01)

G01N 3/32 (2006.01)

G01M 99/00 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.06.2011** **E 11305684 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **23.04.2014** **EP 2530449**

54 Título: **Procedimiento para la determinación del capital de fatiga de un cable**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.07.2014

73 Titular/es:

SOLETANCHE FREYSSINET (100.0%)
133 Boulevard National
92500 Rueil Malmaison, FR

72 Inventor/es:

HOVHANESSIAN, GILLES;
CHAPERON, ALEXANDRE y
MELLIER, ERIK

74 Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

ES 2 472 716 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para la determinación del capital de fatiga de un cable

5 Sector de la técnica

La presente invención se refiere a un procedimiento para determinar el capital de fatiga de un cable que sustenta una estructura de ingeniería civil, así como a un dispositivo que permita determinar el capital de fatiga de dicho cable.

10

Estado de la técnica

Un gran número de estructuras de ingeniería civil se sustentan con cables, en particular, pero no exclusivamente, los puentes sostenidos por cables o los puentes colgantes.

15

Estos cables, por lo general están anclados a la estructura de ingeniería civil mediante un medio de anclaje que podría asimilarse a un empotramiento eventualmente imperfecto. Como resultado, los cables están sujetos además de al esfuerzo de tensión longitudinal a esfuerzos de flexión parásitos que crean localmente unas tensiones de flexión.

20

Los cables están sujetos a varios tipos de solicitaciones, en particular las solicitaciones denominadas estáticas y dinámicas.

25

Las solicitaciones estáticas en general se deben a variaciones lentas, por ejemplo, a las variaciones de temperatura, o a las variaciones globales de carga de la estructura de ingeniería civil.

Las solicitaciones dinámicas corresponden a las variaciones más rápidas, por ejemplo, a ráfagas de viento o al paso de un camión sobre la estructura de ingeniería civil.

30

Las tensiones derivadas de estas solicitaciones, incluso si son inferiores a la capacidad de resistencia del cable, podrían provocar la ruptura de dicho cable si se repiten un número excesivo de veces. Se habla entonces de ruptura por fatiga del material que constituye el cable.

35

Existen reglas de cálculo que permiten comprobar si las dimensiones de los cables son compatibles con las solicitaciones a las que la estructura deberá someterse durante su vida útil.

40

En general, estas reglas de cálculo consisten, en primer lugar, en determinar el capital de fatiga o bien el capital inicial del cable. En segundo lugar, se evalúan las solicitaciones a las que se va a someter la estructura en el transcurso de su vida así como la frecuencia de estas solicitaciones. Para terminar, se comprueba que estas solicitaciones evaluadas sólo mermen parcialmente al capital inicial del cable.

45

Los cables están sujetos a la fatiga, en especial en su zona de anclaje donde las fluctuaciones de tensión o tensiones axiales se suman a las tensiones de flexión. Las tensiones de flexión pueden ser importantes ya que el cable está sometido a variaciones angulares que hacen que dicho cable no esté perfectamente en línea con el anclaje. La fluctuación de este ángulo de anclaje debido a los movimientos de la estructura, a las vibraciones del cable o incluso a la variación de su catenaria vinculada a las variaciones de tensión, hacen que las tensiones de flexión sean variables e importantes.

50

Si bien los cálculos permiten evaluar durante el diseño el daño por fatiga de los cables y por lo tanto su vida útil, esos cálculos están limitados por las hipótesis de partida.

Por ejemplo, en el caso de un puente, la fatiga de los cables vinculada al tráfico de vehículos sobre el puente se basa en las estimaciones que podrían sobrepasarse con el tiempo.

55

Además, los efectos dinámicos vinculados al paso de convoyes, especialmente convoyes de pesos pesados, a fecha de hoy no se determinan bien con los cálculos. Por último, ciertos efectos dinámicos, vinculados con el estado de la calzada, sencillamente no son predecibles.

60

Los efectos dinámicos del viento además, resultan difíciles de cuantificar. Las vibraciones, su amplitud y las frecuencias de ocurrencia se desconocen en gran medida a la hora de diseñar el sistema.

Resulta por tanto interesante poder seguir la evolución del capital de fatiga inicial del cable que sustenta una estructura, durante el transcurso de la vida de dicha estructura.

65

De esta manera, las acciones de mantenimiento o de mejora pueden planificarse en caso de producirse un consumo anormalmente rápido del capital de fatiga o cuando éste esté prácticamente agotado.

El artículo de Gilles Hovhanessian, "Health Monitoring of Cable Stayed Structures: Experience and Implementation", 2006 IMAC-XXIV, Conference & Exposition on Structural Dynamics, noviembre de 2010, XP55010940, describe técnicas de vigilancia de la carga y de observación de las respuestas de las estructuras atirantadas.

Objeto de la invención

Un objeto de la presente invención consiste en proporcionar un procedimiento que permita determinar el capital de fatiga de un cable que sustente una estructura de ingeniería civil.

La invención propone de este modo un procedimiento para determinar el capital de fatiga de un cable que sustenta una estructura de ingeniería civil, definiéndose el procedimiento en la reivindicación 1 adjunta. Además, se definen modos de realización de este procedimiento en las reivindicaciones 2-9.

Ventajosamente, el procedimiento de acuerdo con la invención permite conocer la carga real a la que se somete el cable y por extrapolación estimar la carga pasada y futura así como la evolución del capital de fatiga de dicho cable.

Un procedimiento para la determinación del capital de fatiga de un cable, de acuerdo con la invención, puede además incluir una o varias de las características opcionales indicadas más adelante, consideradas individualmente o según todas las combinaciones posibles:

- la medición del esfuerzo de flexión en el cable se realiza a partir de una o varias galgas de deformación colocadas sobre o en el anclaje o sobre el cable; y/o
- la medición de los desplazamientos se obtiene con la ayuda de mediciones acelerométricas integradas dos veces; y/o
- la medición de los desplazamientos se obtiene con la ayuda de velocidades obtenidas mediante un geófono integradas una vez; y/o
- la etapa de medición se realiza durante un período de medición lo más breve posible para que sea económica, pero lo suficientemente larga como para que sea representativa y permita una extrapolación realista de las cargas anteriores y posteriores al período de medición; dicha duración es típicamente de aproximadamente una semana o de un mes; y/o
- el sensor de movimiento utilizado para la medición de flexión está integrado en un amortiguador utilizado para limitar las vibraciones de los cables; y/o
- el sensor de movimiento integrado en el amortiguador se utiliza asimismo para medir el recorrido acumulado en el amortiguador y seguir su envejecimiento.

La invención se refiere asimismo a un dispositivo que permita determinar el capital de fatiga de un cable que sustenta una estructura de ingeniería civil, estando el dispositivo definido en la reivindicación 10, con un modo de realización particular definido en la reivindicación 11.

Descripción de las figuras

La invención se entenderá mejor tras la lectura de la siguiente descripción, que se proporciona únicamente a modo de ejemplo y que se hace con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 ilustra las diferentes etapas de un procedimiento de acuerdo con un modo de realización de la invención; y
- la figura 2 es una vista esquemática de un puente atirantado que consta de un dispositivo de acuerdo con la invención.

En aras de la claridad, los diferentes elementos representados en las figuras no están necesariamente a escala.

Descripción detallada de la invención

La invención tiene por objeto permitir la determinación del capital de fatiga de al menos un cable que sustenta una estructura de ingeniería civil. La estructura de ingeniería civil puede ser de cualquier naturaleza, en particular un puente colgante o un puente sostenido por cables. De acuerdo con un modo de realización, un procedimiento de acuerdo con la invención comprende:

- una etapa de medición en tracción S1;
- una etapa de medición en flexión S2;
- una etapa de recuento S3; y
- una etapa de determinación del capital de fatiga del cable S4.

En el transcurso de las etapas de medición en tracción S1 y de medición en flexión S2, las mediciones se realizan de manera que puedan estimarse las tensiones ahí donde los esfuerzos sean máximos, es decir por lo general, en la

zona de anclaje del cable de la estructura de ingeniería civil. Además, las etapas de medición en tracción S1 y de medición en flexión S2 se realizan sincronizadamente con el fin de obtener el esfuerzo compuesto en el cable.

Según un modo de realización de la invención, durante la etapa de medición en tracción S1, la medición del esfuerzo normal de tracción en el cable puede realizarse directamente mediante cualquier medio conocido por los expertos en la materia. Por ejemplo, la medición del esfuerzo normal en tracción puede realizarse mediante una celda de esfuerzo. En el presente documento se denomina "celda de esfuerzo" a un sensor diseñado específicamente para medir la tensión en el cable o en uno de los torones del cable. Existen muchos sensores de este tipo. Ventajosamente, este modo de realización proporciona una información que puede utilizarse directamente.

Según otro modo de realización de la invención, durante la etapa de medición en tracción S1, la medición del esfuerzo normal de tracción en el cable puede realizarse indirectamente mediante cualquier medio conocido por los expertos en la materia. Por ejemplo, la medición del esfuerzo normal en tracción puede realizarse mediante una galga de deformación colocada sobre el anclaje. En este documento se denomina "galga de deformación" a un sensor que permite medir la variación de la deformación del acero asociado a una variación del esfuerzo. Estos sensores a veces son, por abuso del lenguaje, denominados galgas de extensión, ya que al conocer el módulo del acero se puede calcular la elongación local a partir de la deformación, ($\sigma = E \epsilon$). Existe un gran número de sensores de este tipo, que funcionan basándose en principios eléctricos u ópticos. En este caso podrían ser necesarias una etapa de interpretación y eventualmente una etapa de calibración para estimar la tensión del cable a partir de las medidas proporcionadas por los sensores. Este método de realización en general se utiliza cuando la medición directa no es posible, por ejemplo, cuando no es posible colocar el sensor.

Otra manera de medir indirectamente el esfuerzo normal de tracción en un cable tendido de múltiples alambres, siguiendo un método de tipo isotensión que garantiza una tensión similar entre los alambres (por ejemplo como se describe en el documento EP0421862) podría basarse en una medición de fuerza en un alambre.

Otra manera más de medir indirectamente el esfuerzo normal de tracción en el cable podría ser aplicando el método de la cuerda vibrante y utilizar una medición de las frecuencias propia de vibración del cable.

En el transcurso de la etapa de medición en flexión, el esfuerzo de flexión en el cable se mide cerca del anclaje de dicho cable a la estructura, por ejemplo a la altura del anclaje.

De acuerdo con un modo de realización de la invención, la medición en flexión puede realizarse midiendo la inclinación relativa del cable con respecto a su anclaje en la estructura de ingeniería civil.

De acuerdo con un modo de realización de la invención, la medición del esfuerzo de flexión en el cable puede realizarse directamente mediante cualquier medio conocido por los expertos en la materia.

Por ejemplo a partir de una o varias galgas de deformación colocadas sobre o en el anclaje o sobre el cable. Ventajosamente se podría, por ejemplo, utilizar el mismo tipo de galgas que las usadas para la medición axial.

De acuerdo con un modo de realización de la invención, la medición del esfuerzo de flexión en el cable puede realizarse indirectamente mediante cualquier medio conocido por los expertos en la materia. Por ejemplo a partir de una medición de los desplazamientos del cable en un plano que corte su eje, por ejemplo perpendicular a su eje y a una distancia predeterminada del anclaje. Ventajosamente, este modo de realización no requiere un acceso a la zona de flexión máxima que con frecuencia es difícil, ni la colocación de sensores que permitan una medición directa, lo que con frecuencia resulta imposible en ese lugar.

El esfuerzo global de flexión puede determinarse mediante un sensor que permita medir el ángulo que forma el cable con su anclaje. Esta medición del ángulo permite hacer cálculos para conocer las tensiones de flexión a las que se somete el cable.

Con el fin de medir el esfuerzo de flexión en el cable, es posible utilizar inclinómetros. De acuerdo con un modo de realización de la invención, se dispone un primer inclinómetro sobre el cable a la salida del anclaje lo que permite conocer la inclinación absoluta de dicho cable.

Un segundo inclinómetro dispuesto sobre la estructura cerca del anclaje permite conocer la inclinación absoluta de dicha estructura. La diferencia en las inclinaciones permite conocer la inclinación relativa del cable en su anclaje, estando el anclaje unido a la estructura.

De acuerdo con otro modo de realización, es posible determinar el esfuerzo de flexión a la altura del anclaje midiendo el desplazamiento del cable con respecto a la estructura a una cierta distancia del anclaje.

Preferentemente, esta distancia es lo suficientemente grande como para que los desplazamientos sean significativos y mensurables y lo suficientemente pequeña como para poder simplificar el cálculo asimilando el cable a una viga encastrada sometida a un esfuerzo en el extremo. El orden de magnitud típico es de 1 a 10 m.

El cálculo del esfuerzo de flexión a partir del desplazamientos medido debe adaptarse a la configuración del cable y del anclaje (dimensiones, presencia de tensores desviadores,...)

- 5 Por ejemplo, para los cables cuyo anclaje bajo se sitúa en el tablero de un puente, la distancia correspondiente a la salida del tubo de encofrado está bien adaptada.

10 En algunos puentes, la salida del tubo de encofrado está equipado con un amortiguador. El sensor de desplazamientos puede entonces integrarse ventajosamente en el amortiguador. Permite entonces, además de evaluar el esfuerzo de flexión en el cable a la salida del anclaje, seguir el recorrido acumulado del amortiguador, parámetro importante para seguir su envejecimiento y programar su mantenimiento. Esta medición puede realizarse mediante unos sensores de desplazamiento, o bien mediante una toma de vídeo asociada con un análisis de imágenes o mediante cualquier otro medio conocido por los expertos en la materia.

- 15 De acuerdo con un modo de realización de la invención, las etapas de medición en tracción S1 y de medición en flexión S2 pueden realizarse a frecuencias superiores o iguales a 1 Hz, por ejemplo superiores o iguales a 10 Hz e inferiores o iguales a 1 kHz, por ejemplo inferiores o iguales a 500 Hz, o bien inferiores o iguales a 100 Hz.

20 En la práctica, un valor de unos cuantos Hz (digamos 10 Hz para una obra "flexible", 50 Hz para una obra "rígida") es en general suficiente para medir las vibraciones asociadas con los primeros modos propios de vibración. No obstante, podría resultar ventajoso efectuar un sobremuestreo para medir las vibraciones vinculadas con el tráfico o colocar filtros digitales y evitar los fenómenos de "aliasing" (solapamiento).

25 Preferentemente, la frecuencia de medición se adapta para poder tomar en cuenta el mayor número posible de variaciones de esfuerzo en el cable y en particular de los valores extremos alcanzados en el transcurso de cada ciclo.

30 Las frecuencias propias de vibración del cable y la velocidad de los convoyes cerca del cable pueden tenerse en cuenta. Lo típico es efectuar una cuarentena de medidas por cada ciclo de oscilación y tomar una medida cada 10 cm aproximadamente cuando pasa un convoy a velocidad máxima.

Por ejemplo, para un convoy que rueda a 100 km/h, es decir 100000/3600 m/s, tomando una medida cada 10 cm, los datos se registrarán con una frecuencia de $100000/0,1/3600 = 300$ Hz aproximadamente.

- 35 Las etapas de medición en tracción S1 y de medición en flexión S2 se realizan durante un periodo de medición lo más corto posible para abaratar costes, pero lo bastante largo como para ser representativo y permitir una extrapolación realista de las cargas anteriores y posteriores al periodo de medición. Típicamente, esta duración es de aproximadamente una semana o un mes.

40 El procedimiento de acuerdo con la invención además comprende una etapa de recuento en el transcurso de la cual, a partir del esfuerzo compuesto y medido, se realiza un recuento del número de ciclo de esfuerzo en función de la amplitud del esfuerzo.

45 Según un modo de realización de la invención, la etapa de recuento se realiza mediante un recuento de tipo gota de agua ("rainflow" en inglés).

50 El recuento de tipo gota de agua se utiliza para traducir la carga en tensión en función del tiempo en ciclos de tensiones simples, caracterizados por una tensión mínima y una tensión máxima. Se trata de descomponer la carga asociando por parejas los mínimos crecientes y los máximos decrecientes. No obstante, esta asociación requeriría analizar *a posteriori* la carga completa en función del tiempo y habría que guardar el registro histórico completo de las cargas. Para evitar este almacenamiento, un algoritmo asocia parejas de mínimos y máximos para obtener ciclos parciales durante la carga.

55 La etapa de determinación del capital de fatiga del cable permite determinar el capital de fatiga del cable, comparando el recuento efectuado durante la etapa de recuento con una curva de tipo Wöhler previamente establecida para el cable.

La curva de Wöhler define una relación entre la tensión aplicada a σ , *sigma*, en ocasiones denotada con una S, y el número de ciclos en la ruptura NR, es decir, el número de ciclos para el que se observa P% de rupturas. En la práctica, la curva de Wöhler en general viene dada para una probabilidad de ruptura $P = 0,5$.

60 Ventajosamente, el registro histórico o la extrapolación de los esfuerzos del pasado pueden compararse con la fatiga a la que realmente se ha sometido al cable con el fin de verificar las hipótesis previstas en el momento de la obra de construcción.

- 65 Además, es posible utilizar las extrapolaciones de esfuerzos futuros para estimar una capacidad o duración de vida útil residual del cable con respecto a la fatiga

La invención se refiere asimismo a un dispositivo que permite determinar el capital de fatiga de un cable que sustenta una estructura de ingeniería civil.

5 Un ejemplo de estructura de ingeniería civil soportada por cables se representa en la figura 2.

La figura 2 representa una vista esquemática de un puente atirantado 1. El puente atirantado 1 comprende cables oblicuos 2 que parten de un pilón 6 y sustentan el tablero 4.

10 El puente representado en la figura 2 está equipado con un dispositivo de acuerdo con un modo de realización de la invención.

Se disponen unos medios para medir el esfuerzo global en tracción 8 en el cable, a la altura del anclaje del cable 2 al tablero 4.

15 Se disponen a lo largo del cable 2, unos medios para medir el esfuerzo global en flexión 10 en el cable 2.

Los medios para medir el esfuerzo global en tracción 8 y en flexión 10 se conectan a un medio de recuento 12. El medio de recuento 12 permite contar el número de ciclos de esfuerzo en función de la amplitud de los esfuerzos de tracción y de flexión a los que el cable está sometido. El medio de recuento puede ser por ejemplo un procesador programado para calcular el remanente.

20 De acuerdo con el modo de realización de la figura 2, el medio de recuento 12 transmite a unos medios de comparación 14 el resultado del recuento efectuado. Los medios de comparación 14 permiten comparar el recuento efectuado por el medio de recuento con una curva de tipo Wöhler previamente establecida para el cable 2.

De acuerdo con un modo de realización, el dispositivo de acuerdo con la invención puede comprender unos medios de alerta 16 que permitan informar cuando la capacidad del cable o su vida útil residual se hayan reducido por debajo de un umbral 5 predeterminado.

30 La invención no se limita a los modos de realización descritos y debe interpretarse de manera limitada únicamente por las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para determinar el capital de fatiga de un cable que sustenta una estructura de ingeniería civil, comprendiendo el proceso:
 - 5 - una etapa de medición (S1, S2), en el transcurso de la cual se miden sincronizadamente el esfuerzo normal de tracción en el cable y el esfuerzo de flexión en el cable para obtener el esfuerzo compuesto en el cable;
 - una etapa de recuento (S3), en el transcurso de la cual a partir de los esfuerzos compuestos medidos, se realiza un recuento del número de ciclos de esfuerzo en función de la amplitud del esfuerzo;
 - 10 - una etapa de evaluación del capital de fatiga del cable (S4), en el transcurso de la cual el capital de fatiga del cable se determina comparando el recuento efectuado durante la etapa de recuento con una curva de tipo Wöhler establecida previamente para el cable,en el que la medición del esfuerzo de flexión en el cable se realiza indirectamente, por ejemplo a partir de una medición de los desplazamientos del cable en un plano que corta su eje y a una distancia conocida del anclaje, y en el que la medición de los desplazamientos del cable se realiza en un amortiguador colocado sobre el cable para amortiguar las vibraciones transversales.
- 15 2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación anterior, en el que la medición del esfuerzo normal de tracción en el cable se realiza directamente, por ejemplo, con la ayuda de una celda de esfuerzo.
- 20 3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la medición del esfuerzo normal de tracción en el cable se realiza indirectamente, por ejemplo con la ayuda de una galga de deformación colocada sobre el anclaje o sobre el cable, con la ayuda de una medición de fuerza sobre un alambre de entre la pluralidad de alambres del cable, o bien por el método de la cuerda vibrante y con la ayuda de una medición de las frecuencias propias de vibración del cable.
- 25 4. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las mediciones en tracción y/o en flexión se realizan a una frecuencia de aproximadamente 1 Hz a 1 kHz.
- 30 5. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de medición no se realiza de manera continuada desde la instalación del cable, y según la cual los datos medidos se utilizan para realizar una extrapolación de las cargas anteriores y posteriores al periodo de medición.
6. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de medición se realiza ininterrumpidamente desde la instalación del cable de manera que se midan los esfuerzo de tracción y de flexión en el cable desde su instalación.
- 35 7. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de recuento se realiza mediante un recuento de tipo gota de agua.
- 40 8. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se utiliza un registro histórico o una extrapolación de los esfuerzos pasados para comparar la fatiga a la que se ha sometido realmente el cable con las hipótesis previstas en el momento de la construcción.
- 45 9. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que se utilizan unas extrapolaciones de esfuerzos futuros para estimar una capacidad o duración de vida útil residual del cable con respecto a la fatiga.
10. Dispositivo que permite determinar el capital de fatiga de un cable (2) que sustenta una estructura de ingeniería civil (1), comprendiendo el dispositivo unos medios para aplicar un procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprenda, a saber:
 - 50 - unos medios de medición del esfuerzo global de tracción (8) en el cable (2);
 - unos medios de medición del esfuerzo global de flexión (10) en el cable (2) con la ayuda de un sensor integrado en un amortiguador que comprende un dispositivo de anclaje del cable a la estructura de ingeniería civil,
 - 55 - unos medios de recuento (12) del número de ciclos de esfuerzo en función de la amplitud de los esfuerzos en tracción y en flexión a los que el cable está sometido; y
 - unos medios de comparación (14) del recuento efectuado por los medios de recuento con una curva de tipo Wöhler previamente establecida para el cable.
- 60 11. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 10 que comprende además unos medios de alerta (16) que permitan informar automáticamente cuando la capacidad del cable o su vida útil residual se haya reducido por debajo de un umbral predeterminado.

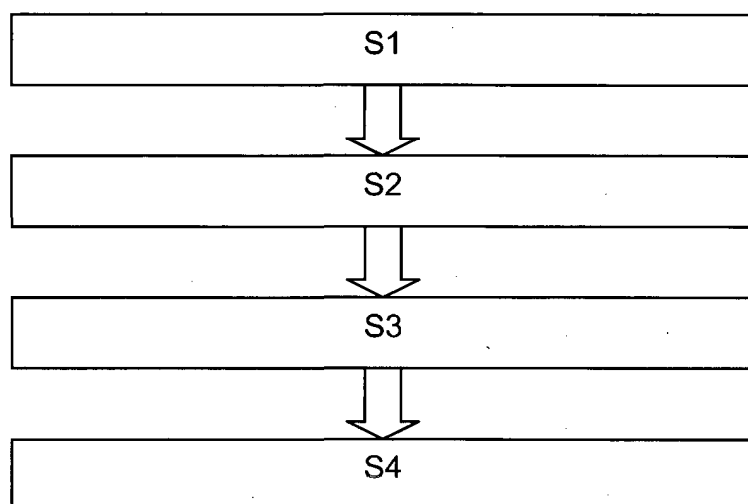


Fig. 1

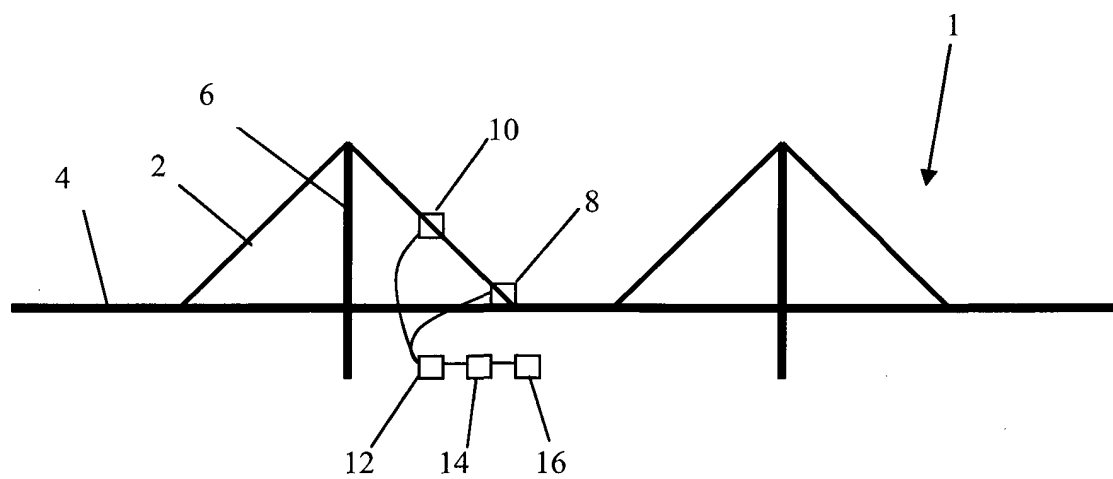


Fig. 2