

(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
2020 年 12 月 30 日 (30.12.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/258565 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01L 5/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/108841
- (22) 国际申请日: 2019 年 9 月 29 日 (29.09.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910576370.2 2019年6月28日 (28.06.2019) CN
- (71) 申请人: 大连理工大学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。
- (72) 发明人: 刘海波 (LIU, Haibo); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。
刘天然 (LIU, Tianran); 中国辽宁省大连凌工路

2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。 侯博 (HOU, Bo); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。 王永青 (WANG, Yongqing); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。 李亚鹏 (LI, Yapeng); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。 贾振元 (JIA, Zhenyuan); 中国辽宁省大连凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,

(54) Title: ULTRASONIC MEASURING METHOD FOR SURFACE STRESS OF COMPOSITE MATERIAL

(54) 发明名称: 一种复合材料表面应力超声测量方法

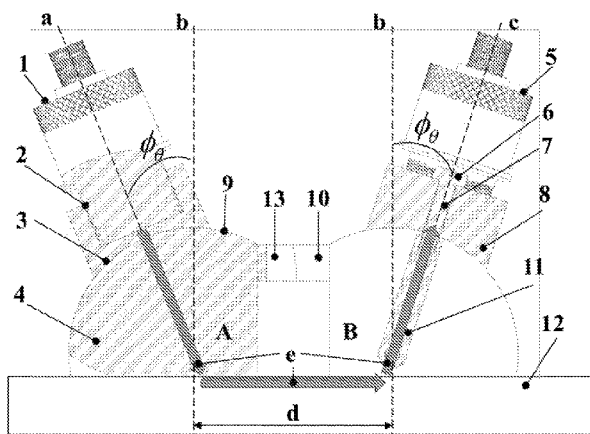


图 1

(57) Abstract: An ultrasonic measuring method for the surface stress of a composite material, related to the technical field of ultrasonic testing. For the present method, first, a variable-angle ultrasonic measuring device is designed and assembled and then integrated with an ultrasonic transducer. Secondly, the ultrasonic measuring device is connected to a distal end of a robot (C) via a flexible coupling (D), an ultrasonic pulse transceiver system is installed, and the ultrasonic pulse transceiver is connected with the ultrasonic transducer. Finally, an acoustic elastic constant is calibrated for the composite material, thus completing a surface stress measurement. The present method, by designing and assembling a variable-angle of incidence ultrasonic measuring device, and by means of variable adjustments of the angle of incidence for ultrasound, adapts to the anisotropy of the ultrasonic propagation speed of the composite material. The device is simple and compact and increases the measuring spatial resolution. The present method satisfies composite material surface stress measuring requirements for manufacturing site environments, and implements the automated ultrasonic scanning and measuring of the surface stress with the aid of the robot (C).

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,
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))。

(57) 摘要: 一种复合材料表面应力超声测量方法, 属于超声检测技术领域。本方法首先设计和组装变角度超声测量装置, 并集成超声换能器。其次, 将超声测量装置通过弹性联轴器(D)与机器人(C)末端相连接, 安装超声脉冲收发系统, 采用超声脉冲收发器与超声换能器相连接。最后, 标定复合材料声弹性常数, 完成表面应力测量。本方法设计和组装了可变入射角超声测量装置, 通过超声入射角的可变调整, 以适应复合材料超声传播速度的各向异性。装置简单紧凑, 提高了测量空间分辨率。本方法可满足面向制造现场环境的复合材料表面应力测量需求, 实现机器人(C)辅助的表面应力超声自动扫描测量。

一种复合材料表面应力超声测量方法

技术领域

本发明属于超声检测技术领域，特别涉及一种复合材料表面应力超声测量方法。

背景技术

复合材料具有比重小、比强度和比模量大等优点，广泛应用于航空航天等重要工业领域。然而，复合材料在生产制造及应用过程中，极易受温度、化学收缩和装配等影响，在复合材料表面产生残余应力，严重制约着零件的安全服役寿命，残余应力无损测量对评估复合材料性能具有重要意义。残余应力无损测量方法包括X射线衍射法，拉曼光谱法和超声法等，超声法具有装置简单、成本低、适用范围广等优点，是面向制造现场环境复合材料残余应力检测的有效手段。

基于临界折射纵波的检测方法对应力变化敏感性高，广泛应用于应力超声检测领域。临界折射纵波造波方法满足 Snell 定律，然而，复合材料声速传播具有严重各向异性，超声不同传播方向具有不同的传播速度，因此，为获得不同方向应力状态需要多组不同入射角度测量装置，花费巨大，且测量期间频繁拆卸，过程繁琐，难以保证测量过程中不同装置的测量重复性。通过装置设计，形成可变入射角度，以适应复合材料超声传播速度的各向异性，实现面向制造现场环境的复合材料表面应力测量。

2016 年，刘菲菲等在发明专利 CN201410275857.4 中公开了“一种复合材料超声-声发射检测信号的获取方法”，该方法采取左声束和右声束零接近距离布局构成超声-声发射复合声束，直接接收来自被测复合材料零件中的声发射信号，然而，该方法主要应用于复合材料缺陷检测；2017 年，张宇民等在发明专利 CN201710154020.8 中公开了“一种测量各向异性材料平面应力的装置”，该方法基于各向异性三向法，设计了正八边形的超声斜入射楔块，采用六个超声换能器组成三个“一发一收”结构形式，但是，该测量装置体积大且昂贵，测量空间分辨率低。

发明内容

本发明主要解决的技术难题是克服现有方法的不足，面向制造现场环境的复合材料表面应力测量需求，发明了一种复合材料表面应力超声测量

方法。该方法中，创新设计了可变入射角超声测量装置，实现了超声入射角的可变调整，以适应复合材料超声传播速度的各向异性，只需一个发射探头和一个接收探头便可以测量任意方向超声传播速度。将可变入射角超声测量装置集成至机器人末端连接，可实现表面应力超声自动扫描测量。

本发明采用的技术方案是一种复合材料表面应力超声测量方法，其特征是，首先，设计并组装变角度超声测量装置，并集成超声换能器；其次，将超声测量装置通过弹性联轴器与机器人末端相连接；然后，安装超声脉冲收发系统，采用超声脉冲收发器与超声换能器相连接；最后，标定复合材料声弹性常数，完成表面应力测量。

具体步骤如下：

第一步，设计并组装可变角度超声测量装置

采用的可变角度超声测量装置为“一发一收”结构形式，一发指发射探头 1，一收指接收探头 5；固定连接超声测量装置的发射端 A 与接收端 B，保证每次测量过程中超声传播路径长度 d 相同；在滑动组件 8 上部加工安装发射探头 1 和接收探头 5 的螺纹孔 2 与紧固用圆通孔 7，长螺钉 6 通过圆通孔 7 与基体部分摇杆螺纹 11 连接；加工滑动组件下部 3 与基体上部 9，并保证两者曲率相等；参考基体分度线调节滑动组件 8 满足入射轴线 a 和接收轴线 c 与基面法线 b 成第一临界折射角 ϕ_θ ，且三个轴线均在同一平面内，第一临界折射角 ϕ_θ 满足如下条件，

$$\phi_\theta = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_\theta}\right) \quad (1)$$

其中， v_1 为超声波在基体 4 中的传播速度， v_θ 为超声波在被测材料 12 中的传播速度， θ 为超声传播方向与纤维方向夹角。

第二步，基于机器人的超声测量功能集成

加工机器人末端长轴 E 与超声测量装置端长轴 F，并通过弹性联轴器 D 与超声测量装置连接；示教与设计机器人 C 运动轨迹，优化机器人 C 测量时间；控制机器人 C 末端下降深度，保证超声测量装置与被测表面 12 充分接触。

发射探头 1 与脉冲发生器 G 相连接，示波器 J 与接收探头 2 相连接显示超声信号，并通过 USB 线 I 与 PC 端 H 连接采集并存储数据。

第三步，复合材料表面应力超声检测计算

首先，将超声测量装置放在参考点处，超声传播方向与纤维方向夹角为 θ ；根据第二步确定此时的第一临界折射角 ϕ_θ ，通过紧固组件 6 调整与固定滑动组件 8 的位置；被测材料表面 12 产生临界折射纵波 e；设置脉冲发生器 G 频率与增益；然后，通过机器人 C 控制，设置测量位置间隔距离，平移扫描测量并记录超声传播时间 t_θ ；最后将声时 t_θ 代入如下公式，计算获得固定距离 d 间的表面应力 σ_θ ，

$$\sigma_\theta = K_\theta(t_\theta - t_\theta^0) \quad (2)$$

式中， K_θ 为与纤维方向夹角为 θ 的声弹性系数， t_θ^0 为与纤维方向夹角为 θ 测量距离 d 间无应力时的传播时间；实际测量中，声时 t_θ^0 与声弹性系数 K_θ 需经过实验标定获得。

本发明的有益效果是该方法设计了可变入射角超声测量装置，实现了超声入射角的可变调整，以适应复合材料超声传播速度的各向异性，只需一个发射探头和一个接收探头便可以测量任意方向超声传播速度。并建立了一种复合材料表面应力超声适应测量方法，解决了复合材料超声传播速度各向异性问题，减少了探头的使用数量，提高了测量空间分辨率。采用弹性联轴器与机器人末端相连，装置简单紧凑，提高了测量空间分辨率。该方法可满足面向制造现场环境的复合材料表面应力测量需求。实现了机器人辅助的表面应力超声自动扫描测量。

附图说明

附图 1-超声测量装置图；其中 1-发射探头，2-螺纹孔，3-滑动组件下部，4-基体，5-接收探头，6-紧固组件，7-圆通孔，8-滑动组件，9-基体上部，10-固定连接块，11-摇杆，12-被测材料，a-入射轴线，b-基面法线，c-接收轴线，d-传播路径，e-临界折射纵波，A-发射端，B-接收端。

附图 2-超声自动扫描系统图；C-机器人，D-弹性联轴器，E-机器人末端长轴，F-超声测量装置端长轴，G-脉冲发生器，H-PC 端，I-USB 线，J-示波器，1-发射探头，5-接收探头。

具体实施方式

结合附图和技术方案详细说明本发明的具体实施方案。

常温 25℃ 条件下, 超声纵波在基体中的传播速度为 2586.43m/s, 在 T700 碳纤维复合材料中沿纤维方向时有最大速度为 8971.02m/s, 垂直于纤维方向有最小速度为 3638.4m/s, 因此根据公式 (1) 可知第一临界折射角 ϕ_0 最大为 45.31°, 最小为 16.76°。

变角度超声测量装置关键参数为: 滑动组件 8 宽为 20mm, 基体组件 4 半径为 14mm, 装置发射端 A 与接收端 B 固定间隔距离为 8mm, 调节滑动组件 8 可实现入射轴线 a 和接收轴线 c 与基面法线 b 间的角度最大为 70°, 最小为 0°, 基体组件 4 分度划线间隔为 5°, 满足 T700 碳纤维复合材料第一临界折射角区间要求。

采用 2.25MHz 发射探头 1 与接收探头 5, 通过螺纹 2 沿入射轴线 a 与滑动组件 8 连接; 紧固组件 6 通过滑动组件 8 的两侧圆通孔 7 与摇杆 11 螺纹连接, 实现紧固功能; 装置发射端 A 与接收端 B 间的固定连接块 10 中心加工直径 6mm 圆孔 13, 超声测量装置端长轴 F 与圆孔 13 配合并用胶粘; 弹性联轴器 D 采用夹紧顶丝式, 孔径为 6mm×6mm, 两端分别与机器人末端长轴 E 和超声测量装置端长轴 F 连接。

发射探头 1 与脉冲发生器 G 连接, 接收探头 5 与示波器 J 连接, 脉冲发生器 G 与示波器 J 连接实现信号同步, 脉冲发生器 G 频率设置为 2.25MHz, 脉冲发生器 G 和示波器 J 均与 PC 端 H 连接实现信号处理与存储。

将复合材料制成拉伸件并在材料拉伸机进行阶梯形式拉伸, 标定获得公式 (2) 中的声弹性系数 K_θ , 测量与纤维方向夹角为 θ 测量距离 d 间无应力时的传播时间 t_θ^0 , 以及与纤维方向夹角为 θ 测量距离 d 间应力状态下的传播时间 t_θ , 计算获得固定距离 d 间的表面应力 σ_θ 。

本发明提出的复合材料表面应力超声适应测量方法解决了超声传播速度各向异性问题, 装置简单紧凑, 提高了测量空间分辨率; 实现了机器人辅助的表面应力超声自动扫描测量。

权 利 要 求 书

1.一种复合材料表面应力超声测量方法，其特征是，首先，设计和组装变角度超声测量装置，并集成超声换能器；其次，将超声测量装置通过弹性联轴器与机器人末端相连接；然后，安装超声脉冲收发系统，采用超声脉冲收发器与超声换能器相连接；最后，标定复合材料声弹性常数，完成表面应力测量；具体步骤如下：

第一步，设计并组装可变角度超声测量装置

采用的可变角度超声测量装置为“一发一收”结构形式，一发指发射探头（1），一收指接收探头（5）；固定连接超声测量装置的发射端（A）与接收端（B），保证每次测量过程中超声传播路径长度 d 相同；在滑动组件（8）上部加工安装发射探头（1）和接收探头（5）的螺纹孔（2）与紧固用圆通孔（7），长螺钉（6）通过圆通孔（7）与基体部分摇杆螺纹（11）连接；加工滑动组件下部（3）与基体上部（9），并保证两者曲率相等；参考基体分度线调节滑动组件（8）满足入射轴线 a 和接收轴线 c 与基面法线 b 成第一临界折射角 ϕ_θ ，且三个轴线均在同一平面内，第一临界折射角 ϕ_θ 满足如下条件：

$$\phi_\theta = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_\theta}\right) \quad (1)$$

其中， v_1 为超声波在基体（4）中的传播速度， v_θ 为超声波在被测材料（12）中的传播速度， θ 为超声传播方向与纤维方向夹角；

第二步，基于机器人的超声测量功能集成

加工机器人末端长轴（E）与超声测量装置端长轴（F），并通过弹性联轴器（D）与超声测量装置连接；示教与设计机器人（C）运动轨迹，优化机器人（C）测量时间；控制机器人（C）末端下降深度，保证超声测量装置与被测表面（12）充分接触；

发射探头（1）与脉冲发生器（G）相连接，示波器（J）与接收探头（2）相连接显示超声信号，并通过 USB 线（I）与 PC 端（H）连接采集并存储数据；

第三步，复合材料表面应力超声检测计算

首先，将超声测量装置放在参考点处，超声传播方向与纤维方向夹角为 θ ；根据第二步确定此时的第一临界折射角 ϕ_θ ，通过紧固组件（6）调整

与固定滑动组件（8）的位置；被测材料表面（12）产生临界折射纵波 e ；设置脉冲发生器（G）频率与增益；然后，通过机器人（C）控制，设置测量位置间隔距离，平移扫描测量并记录超声传播时间 t_θ ；最后将声时 t_θ 代入公式（2），计算获得固定距离 d 间的表面应力 σ_θ ：

$$\sigma_\theta = K_\theta(t_\theta - t_\theta^0) \quad (2)$$

式中， K_θ 为与纤维方向夹角为 θ 的声弹性系数， t_θ^0 为与纤维方向夹角为 θ 测量距离 d 间无应力时的传播时间；

实际测量中，声时 t_θ^0 与声弹性系数 K_θ 需经过实验标定获得。

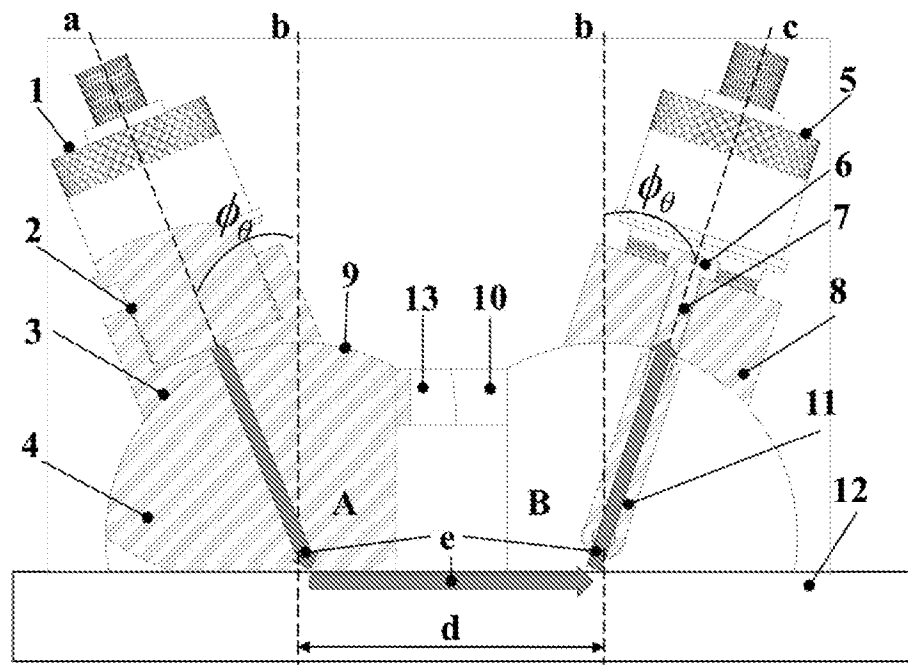


图 1

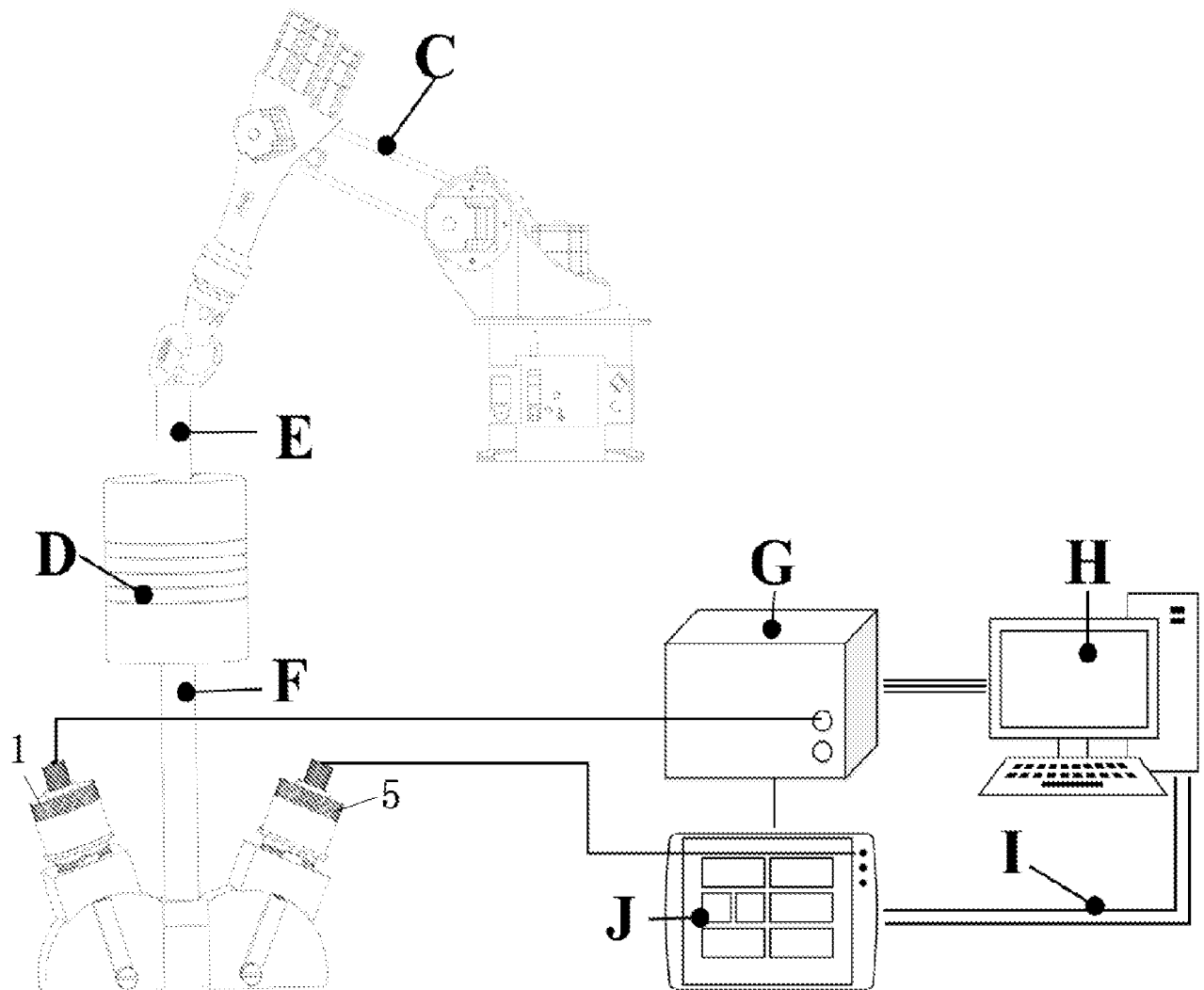


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/108841

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01L 5/00(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)

G01L, G01N

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)

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI: 应力, 超声, 可调, 可变, 发射, 接收, 机器人, stress, ultrasonic, adjust+, emission, receive+, robot

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110231116 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 13 September 2019 (2019-09-13) claim 1, description, paragraphs [0005]-[0028], and figures 1-2	1
Y	赵翠华 (ZHAO, Cuihua). "残余应力超声波测量方法研究 (Study on Ultrasonic Measurement of Residual Stresses)" "中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程技术I辑 (Engineering Science and Technology I, Chinese Master's Theses Full-Text Database)", 15 December 2011 (2011-12-15), pages 11-20	1
Y	CN 105699487 A (BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 22 June 2016 (2016-06-22) description, paragraphs [0022]-[0065], and figures 1-2	1
A	CN 108168746 A (CHEN, Yiwen) 15 June 2018 (2018-06-15) entire document	1
A	CN 206132284 U (CHENGDU GOODALL TECHNOLOGY CO., LTD.) 26 April 2017 (2017-04-26) entire document	1
A	JP 2017032478 A (KOBELITE LTD.) 09 February 2017 (2017-02-09) entire document	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"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

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

18 February 2020

Date of mailing of the international search report

02 April 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/108841

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	110231116	A	13 September 2019	None			
CN	105699487	A	22 June 2016	None			
CN	108168746	A	15 June 2018	None			
CN	206132284	U	26 April 2017	None			
JP	2017032478	A	09 February 2017	JP	6529853	B2	12 June 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/108841

A. 主题的分类

G01L 5/00 (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)

G01L, G01N

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))

CNPAT, CNKI, EPDOC, WPI: 应力, 超声, 可调, 可变, 发射, 接收, 机器人, stress, ultrasonic, adjust+, emission, receive+, robot

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
PX	CN 110231116 A (大连理工大学) 2019年 9月 13日 (2019 - 09 - 13) 权利要求第1项、说明书第[0005]-[0028]段、附图1-2	1
Y	赵翠华. “残余应力超声波测量方法研究” 《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技I辑》, 2011年 12月 15日 (2011 - 12 - 15), 第11-20页	1
Y	CN 105699487 A (北京理工大学) 2016年 6月 22日 (2016 - 06 - 22) 说明书第[0022]-[0065]段、附图1-2	1
A	CN 108168746 A (陈一文) 2018年 6月 15日 (2018 - 06 - 15) 全文	1
A	CN 206132284 U (成都古道尔科技有限公司) 2017年 4月 26日 (2017 - 04 - 26) 全文	1
A	JP 2017032478 A (KOBELITE LTD.) 2017年 2月 9日 (2017 - 02 - 09) 全文	1

☐ 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

2020年 2月 18日

国际检索报告邮寄日期

2020年 4月 2日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (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

李佳

电话号码 86-(10)-53962600

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/108841

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	110231116	A	2019年 9月 13日	无	
CN	105699487	A	2016年 6月 22日	无	
CN	108168746	A	2018年 6月 15日	无	
CN	206132284	U	2017年 4月 26日	无	
JP	2017032478	A	2017年 2月 9日	JP 6529853 B2	2019年 6月 12日