

# (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 5 月 7 日 (07.05.2020)



(10) 国际公布号  
**WO 2020/087679 A1**

(51) 国际专利分类号:  
**G06F 17/50** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/121013

(22) 国际申请日: 2018 年 12 月 14 日 (14.12.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:  
201811281683.7 2018年10月31日 (31.10.2018) CN  
201811290783.6 2018年11月1日 (01.11.2018) CN  
201811295375.X 2018年11月1日 (01.11.2018) CN  
201811305468.6 2018年11月5日 (05.11.2018) CN  
201811325115.2 2018年11月8日 (08.11.2018) CN  
201811329963.0 2018年11月9日 (09.11.2018) 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 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(72) 发明人: 霍军周 (HUO, Junzhou); 中国辽宁省大连凌工路2号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 徐兆辉 (XU, Zhaohui); 中国辽宁省大连凌工路2号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 张占葛 (ZHANG, Zhange); 中国辽宁省大连凌工路2号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 孙德滨 (SUN, Debin); 中国辽宁省大连凌工路2号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 孟智超 (MENG, Zhichao); 中国辽宁省大连凌工路2号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(54) Title: VIBRATION-ABSORPTION AND OPTIMIZATION METHOD FOR MAIN MACHINE SYSTEM OF TUNNEL BORING MACHINE

(54) 发明名称: 全断面岩石掘进机主机系统的减振优化方法

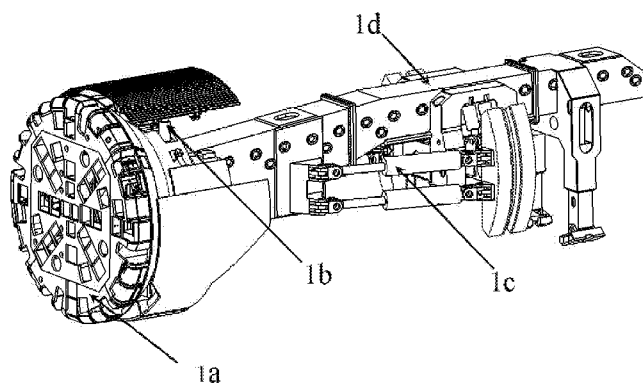


图 1

(57) Abstract: Provided is a vibration-absorption and optimization method for a main machine system of a tunnel boring machine, wherein same is used for reducing the vibration of a main machine and preventing a fatigue failure from occurring at a key and weak site on the main machine system of the TBM. Damping alloy material is used to replace the material of a cutterhead system and a connecting flange, and magnetorheological dampers are added to a support cylinder and a propulsion cylinder to realize vibration-absorption and optimization of the main machine system of the TBM, preventing the occurrence of an emergent accident to the cutterhead system of the TBM, and ensuring safe and reliable operation of the TBM. Thus, a whole set of vibration-absorption and optimization methods for the main machine system of the TBM is constructed.

(57) 摘要: 本发明提出了一种全断面岩石掘进机主机系统的减振优化方法, 来减少主机的振动, 防止TBM主机系统关键薄弱位置发生疲劳破坏。采用阻尼合金材料对刀盘系统和连接法兰处进行材料替换, 并在支撑油缸与推进油缸处添加磁流变阻尼器来实现TBM主机系统的减振优化, 防止TBM刀盘系统突发事故的发生, 确保TBM安全可靠地工作, 从而构建了一整套TBM主机系统的主机系统减振优化方法。

(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, 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))。

## 全断面岩石掘进机主机系统的减振优化方法

### 技术领域

本发明涉及一种全断面岩石掘进机主机系统减振优化方法，属于全断面岩石掘进机减振设计技术领域。

### 背景技术

全断面掘进装备（简称 TBM），是机、电、液、光、气等系统集成化的工厂化流水线隧道施工装备，具有掘进速度快、综合效益高等优点，在铁道、水电、交通、矿山等隧洞工程中得到广泛应用。由于 TBM 掘进环境复杂，再加上 TBM 滚刀多点冲击破岩的特点，滚刀切削岩石过程中将产生强冲击载荷，这就会造成 TBM 主机剧烈的振动，最终造成 TBM 某些关键部位发生磨损甚至断裂，因此如何实现主机系统的减振优化显得尤为重要。

TBM 主机（如图 1）系统主要由刀盘系统、支撑系统、推进系统和主梁等组成，恶劣的载荷条件是造成 TBM 主机系统剧烈的振动，进而造成主机系统的故障，影响 TBM 正常的运行，为了保证 TBM 安全可靠的运行和减少故障的发生，必须降低 TBM 主机掘进时的剧烈振动。建立一套 TBM 主机系统减振动优化方法，既可以降低故障的发生率，减少工程施工人员检修次数，同时又能保证 TBM 安全可靠地运行。

由于 TBM 的掘进环境十分恶劣，虽然目前学者们对 TBM 的减振优化已经做了一些研究，但国内外对 TBM 主机系统的减振优化尚没有一套完整的方案。并且由于 TBM 主机系统结构复杂且需要考虑的耦合因素较多，目前虽也有一些学者也做过一定的理论研究来进行减振优化，但往往存在模型简化严重、分析不全面、工程应用性不强等问题，具有一定的局限性。

基于以上情况，本发明采用材料替换和合理布置磁流变阻尼器（如图 2）的

方式对 TBM 主机系统进行了减振优化设计。对于刀盘系统，提出了刀盘筋板（如图 3）的材料替换模型和 TBM 滚刀-刀座的连接结构（如图 4 所示）的楔形块阻尼材料替换模型；对于支撑和推进系统，提出了相应的磁流变阻尼器添加方案；对于连接法兰，提出了一种法兰和连接螺栓的材料替换方法。通过制定以上方案，构建了套用于 TBM 主机系统的减振优化方案。

## 发明内容

本发明的目的在于提供一套完整的 TBM 主机系统的减振优化方案。

本发明的技术方案：

全断面岩石掘进机主机系统的减振优化方案，步骤如下：

全全断面岩石掘进机主机系统的减振优化方案，包含用于材料替换的阻尼合金、磁流变阻尼器、刀盘筋板材料替换模型、滚刀楔形块阻尼材料替换模型、支撑油缸和推进油缸处磁流变阻尼器添加方案、法兰和连接螺栓的材料替换方案。其特征在于，通过对刀盘系统和连接法兰处进行材料替换以及对支撑油缸和推进油缸处添加磁流变阻尼器来实现 TBM 主机系统的减振优化设计。具体的系统分为以下两个方面：刀盘系统材料优化替换模型；支撑和推进系统磁流变阻尼器添加方案；连接法兰材料替换方案。

### I、刀盘系统材料优化替换模型

#### 模型 1，刀盘筋板材料替换模型

本模型的目的在于提出一种阻尼合金替换刀盘筋板材料的减振优化方案，实现对筋板材料的优化替换，从传递过程方面减少刀盘整体的振动，进而减少 TBM 的振动，防止 TBM 突发事件的产生，确保 TBM 安全可靠地工作。采用部分替换阻尼合金材料来实现最大限度的减少筋板的振动，来减少 TBM 的振动，进而提出阻尼合金替换筋板材料的优化布局模型（如图 5），优化布局模型公式

如下:  $y = \alpha \left( ae^{bx} + \cos(cx + d) + \frac{ex^2 + f}{x + g} \right)$

式中:  $a$  和  $b$  为指数项系数, 它们的取值范围分别为  $-6.1 \sim -4.3$  和  $0.11 \sim 0.150$ , 以上参数随分块区域的增多而减小;

$c$  和  $d$  为余弦系数, 它们的取值范围分别为  $0.7 \sim 0.93$  和  $1.3 \sim 2.5$  以上参数随所分块区域的增多而增大;

$e$ 、 $f$  和  $g$  为主项系数, 它们的取值范围分别为  $2.6 \sim 5.2$ ,  $-4.4 \sim -4.1$  和  $-1.2 \sim -0.9$ , 以上参数随所分块区域的增多而增大;

$\alpha$  为区域划分系数,  $1.1 \sim 1.72$ , 随着分块区域的增多而增大;

$x$  和  $y$  分别为区域编号和替换区域编号, 其范围为  $1 \sim n$ ;

模型说明: 本优化布局模型以刀盘所在的区域为划分区域, 以刀盘的中心为圆心  $O$ , 围绕着圆心  $O$  的 4 把中心滚刀分别横向和纵向对称, 形成以  $O$  为圆心的第一圈椭圆; 在第一圈椭圆的长、短轴上布置的正滚刀, 形成多个同心椭圆; 最外圈椭圆与边缘筋板作为最后一层, (模型图 5 中小圆圈为所述的横纵滚刀位置); 按照  $\theta^\circ$  等分圆周划分区域, 以横向中心滚刀的方向为中心线, 向上和向下各转动  $(\theta/2)^\circ$ , 并将其定义为 1 号替换编号 (如图 5 阴影部分), 以逆时针方向继续编号, 依次从内向外进行替换编号, 直接替换编号  $n$  结束编号; 如果筋板位于替换和不替换两个区域之间, 则采用混合替换方法, 一部分替换一部分保留; 当计算的替换区域编号非整时做近位处理; 当最后计算替换区域编号超出了替换编号的区域则舍掉即可。

## 模型 2, 滚刀楔形块阻尼材料替换模型

本模型将刀盘振动剧烈区域内的滚刀连接楔形块材料更换为阻尼合金, 来降低了减振刀盘滚刀造成的振动, 将部分滚刀连接楔形块材料更换为阻尼合金来减振的目的, 滚刀楔形块阻尼材料替换模型 (如图 6), 具体材料优化模型公

$$\text{式如下: } y = \delta \left[ ax^2 + be^{-\left(\frac{x-R_1}{R_2}\right)^2} + c(\sin(x-d))^2 \right]^\varphi$$

式中： $\delta$ 为划分角度系数，其取值范围为 0.95~1.12，在刀盘的圆周方向上划分的单位角度值越小，其值越小；

$\varphi$ 为刀盘结构系数，其取值范围为 0.91~1.04，刀盘本体分块越多， $\varphi$ 值越大；

$R_1$ 和 $R_2$ 分别为正滚刀区域和边滚刀区域的直径系数，其取值范围分别为 2.603~3.535 和 0.346~1.705，圆周直径越大，其取值越大；

$a, b, c, d$  分别为二项系数,指数系数,正弦系数和初相系数，它们的取值范围分别为 0.415~0.487，2.92~6.99，3.209~8.063 和 3.224~3.649，以上系数均随刀盘在圆周方向上划分的单位角度值的减小而增大；

$x$  和  $y$  分别为区域编号和替换区域编号，其范围为 1~ $n$ ；

模型说明：本模型以刀盘中心为圆心，分别以中心滚刀与刀盘圆心的最大距离、边滚刀与刀盘圆心的最小距离为半径做圆，将刀盘在径向方向上划分为三个区域，从内向外分别为中心滚刀区域 6a、正滚刀区域 6b 和边滚刀区域 6c；以通过刀盘中心的水平线作为第一块薄板，以第一块薄板为基准，按照一定的角度值（本模型以 30°为例）将刀盘在圆周方向上等分为若干区域，按顺时针方向由内向外依次编写刀盘区域的序号  $x$ ， $x=1、2、3、\dots、n$ ；在正滚刀区域 6b 中，从左侧开始，将位于第一块薄板上方的区域的序号记为 1，编写完正滚刀区域 6b 后，按照同样的方式编写边滚刀区域 6c；现将步骤（2）已经编写的序号带入材料优化模型，求解  $f(x)$  值，若其值为非整数时，取整数部分即可；所求得的值便为需要将滚刀连接楔形块材料更换为阻尼合金区域的序号（图中阴影区域）；直到  $f(x) \geq x$  停止带入，得到的结果即为全部需要替换的区域。

## II、支撑和推进系统磁流变阻尼器添加方案

在靠近原有支撑油缸的位置并根据实际空间的可操作性添加磁流变阻尼器，

新增的磁流变阻尼器包括右侧磁流变阻尼器 2、右上侧斜上磁流变阻尼器 5、右下侧磁流变阻尼器 7、左下侧磁流变阻尼器 10、左上侧斜上磁流变阻尼器 12、左侧磁流变阻尼器 15、左上侧斜上磁流变阻尼器 18 和右上侧斜上磁流变阻尼器 21,方案示意图 (如图 7), 具体的添加方案如下:

位于顶护盾 1 与主驱动 16 之间, 分别存在左侧顶油缸 14 与右侧顶油缸 3, 距左侧顶油缸 14 主机掘进方向一侧 90~600mm 范围内添加左侧磁流变阻尼器 15, 距右侧顶油缸 3 主机掘进方向一侧 90~600mm 范围内添加右侧磁流变阻尼器 2, 此一组磁流变阻尼器轴线与主机竖直方向的角度范围为 0~60°, 其功能主要是降低主机系统的纵向振动。位于左上侧护盾 13 与主驱动 16 之间存在左上侧斜上油缸 19, 距左上侧斜上油缸 19 左侧 0~500mm 范围内添加左上侧斜上磁流变阻尼器 18, 距左上侧斜上油缸 19 右侧 0~400mm 范围内添加左上侧斜上磁流变阻尼器 12; 位于右上侧护盾 4 与主驱动 16 之间存在右上侧斜上油缸 20, 距右上侧斜上油缸 20 左侧 0~400mm 范围内添加右上侧斜上磁流变阻尼器 5, 距右上侧斜上油缸 20 右侧 0~500mm 范围内添加右上侧斜上磁流变阻尼器 21; 此两组磁流变阻尼器的安装轴线与原有支撑油缸轴线相平行, 其添加功能主要是分别降低主机系统的纵向振动与横向振动。位于左侧护盾 11 与主驱动 16 之间存在左下侧油缸 9, 距左下侧油缸 9 主机掘进方向一侧 300~600mm 范围内添加左下侧磁流变阻尼器 10; 位于右侧护盾 6 与主驱动 16 之间存在右下侧油缸 8, 距离右下侧油缸 8 主机掘进方向一侧 300~600mm 范围内添加右下侧磁流变阻尼器 7; 此一组磁流变阻尼器的安装轴线与主机竖直方向角度范围为-10~90°, 其添加功能主要是降低主机系统的纵向振动, 也可一定程度上降低主机系统的横向振动。另外, 在 TBM 两端的推进油缸处分别添加磁流变阻尼器 (如图 8)。

### III、连接法兰材料替换方案

为了减少 TBM 连接处的振动采用了一种高分子夹层阻尼减振钢板以及局部替换螺栓材料的方法来实现连接处减振的目的，具体方案如下：

对于 TBM 连接法兰的减振优化主要采用高分子夹层阻尼减振钢板(如图 9)的方法，高分子夹层阻尼减振钢板分三层，上下层为钢板，内层为阻尼减振夹层（以刀盘圆形连接法兰为例）。通过构建全断面硬岩掘进机刀盘动力学模型，对模型结果进行分析对比，确定减振钢板的阻尼减振夹层厚度 $t_1$ 与钢板厚度尺寸 $t_2$ ；对于螺栓材料的替换，法兰螺栓结构中螺栓每间隔一组螺栓组进行一次螺栓材料变换。

本发明的有益效果：本发明提出了一种全断面岩石掘进机主机系统的减振优化方法，来减少主机的振动，防止 TBM 主机系统关键薄弱位置发生疲劳破坏。采用阻尼合金材料对刀盘系统和连接法兰处进行材料替换和在支撑油缸与推进油缸处添加磁流变阻尼器的方式来实现 TBM 主机系统的减振优化，这也降低了 TBM 结构优化难度，防止 TBM 刀盘系统突发事件的产生，确保 TBM 安全可靠地工作。

## 附图说明

图 1 是 TBM 总体图。

图 2 是磁流变阻尼器图。

图 3 是刀盘筋板。

图 4 是 TBM 滚刀与刀座的连接结构。

图 5 是刀盘筋板材料替换模型。

图 6 是滚刀楔形块阻尼材料替换模型。

图 7 是支撑系统磁流变阻尼器添加方案。

图 8 是推进系统磁流变阻尼器添加方案。

图 9 是高分子夹层阻尼减振钢板。

图中：1a-刀盘系统；1b-支撑系统；1c-推进系统；1d-主梁；2a-耳环；2b-活塞杆；2c-缸筒；2d-活塞；2e-磁流变液体；2f-线圈；2g-阻尼通道线圈；2h-活塞；2i-线圈引线；4a-上楔形块；4b-下楔形块；6a-中心滚刀区域；6b-正滚刀区域；6c-边滚刀区域；7a-主驱动与护盾系统结构；7b-左侧磁流变阻尼器添加位置；7c-右侧磁流变阻尼器添加位置；8a-推进液压缸；8b-磁流变阻尼器；1-顶护盾；2-右侧磁流变阻尼器；3-右侧顶护盾；4-右上侧护盾；5-右上侧斜上磁流变阻尼器；6-右侧护盾；7-右下侧磁流变阻尼器；8-右下侧油缸；9-左下侧油缸；10-左下侧磁流变阻尼器；11-左侧护盾；12-左上侧斜上磁流变阻尼器；13-左上侧护盾；14-左侧顶油缸；15-左侧磁流变阻尼器；16-主驱动；17-驱动电机；18-左上侧斜上磁流变阻尼器；19-左上侧斜上油缸；20-右上侧斜上油缸；21-右上侧斜上磁流变阻尼器。

## 具体实施方式

下面结合附图及技术方案详细说明本发明的具体实施方式，图 1 为某工程的 TBM 主机系统示意图，包含刀盘、支撑盾体、主梁及支撑靴等主要部件，TBM 在工作过程中，滚刀具有多点冲击破岩的特点，滚刀切削岩石过程中将产生强冲击载荷，这就会造成 TBM 剧烈的振动，最终造成 TBM 某些关键部位发生磨损甚至断裂。

对于刀盘系统，主要采用对刀盘筋板和刀座-滚刀连接结构中的楔形块进行材料替换达到减振优化的目的，主要采用刀盘筋板材料替换模型和滚刀楔形块阻尼材料替换模型，完成对刀盘筋板和楔形块的材料替换，来实现刀盘系统的减振。对于支撑和推进系统，采用支撑和推进系统磁流变阻尼器添加方案来进行相应的磁流变阻尼器的添加来实现支撑和推力系统的减振优化。对于各部件

之间的连接法兰处，采用高分子夹层阻尼减振钢板和局部替换螺栓材料的方法来实现连接处的减振优化。通过以上措施可以实现了刀盘系统、支撑和推进系统和连接位置的减振优化，从掘进部位、支撑部位、推进部位和连接部位四个部分的相应减振措施来实 TBM 主机系统的整体减振要求。

## 工业实用性

本发明提出了一种全断面岩石掘进机主机系统的减振优化方法，来减少主机的振动，防止 TBM 主机系统关键薄弱位置发生疲劳破坏。采用阻尼合金材料对刀盘系统和连接法兰处进行材料替换，并在支撑油缸与推进油缸处添加磁流变阻尼器来实现 TBM 主机系统的减振优化，防止 TBM 刀盘系统突发事件的产生，确保 TBM 安全可靠地工作。

## 权利要求书

1.一种全断面岩石掘进机主机系统减振优化方法，其特征在于，所述的全断面岩石掘进机主机系统减振优化方法包括刀盘系统材料优化替换模型、支撑和推进系统磁流变阻尼器添加方案和连接法兰材料替换方案三部分，具体步骤如下：

### I、刀盘系统材料优化替换模型

#### 模型 1，刀盘筋板材料替换模型

本模型采用部分替换阻尼合金材料来实现最大限度的减少筋板的振动，来减少 TBM 的振动，进而提出阻尼合金替换筋板材料的优化布局模型，优化布局模型公式如下：

$$y = \alpha \left( ae^{bx} + \cos(cx + d) + \frac{ex^2 + f}{x + g} \right)$$

式中： $a$ 和 $b$ 为指数项系数，它们的取值范围分别为-6.1~-4.3 和 0.11~0.150，以上参数随分块区域的增多而减小； $c$ 和 $d$ 为余弦系数，它们的取值范围分别为 0.7~0.93 和 1.3~2.5 以上参数随所分块区域的增多而增大； $e$ 、 $f$ 和 $g$ 为主项系数，它们的取值范围分别为 2.6~5.2, -4.4~-4.1 和-1.2~-0.9，以上参数随所分块区域的增多而增大； $\alpha$ 为区域划分系数，1.1~1.72，随着分块区域的增多而增大； $x$ 和 $y$ 分别为区域编号和替换区域编号，其范围为 1~ $n$ ；

模型说明：本模型以刀盘所在的区域为划分区域，以刀盘的中心为圆心 O，围绕着圆心 O 的 4 把中心滚刀分别横向和纵向对称，形成以 O 为圆心的第一圈椭圆；在第一圈椭圆的长、短轴上布置的正滚刀，形成多个同心椭圆；最外圈椭圆与边缘筋板作为最后一层；按照  $\theta^\circ$  等分圆周划分区域，以横向中心滚刀的方向为中心线，向上和向下各转动  $(\theta/2)^\circ$ ，并将其定义为 1 号替换编号，以逆时针方向继续编号，依次从内向外进行替换编号，直接替换编号  $n$  结束编号；如果筋板位于替换和不替换两个区域之间，则采用混合替换方法，一部分替换一部分保留；当计算的替换区域编号非整时做近位处理；当最后计算替换区域

编号超出了替换编号的区域则舍掉即可；

### 模型 2，滚刀楔形块阻尼材料替换模型

本模型将刀盘振动剧烈区域内的滚刀连接楔形块材料更换为阻尼合金，来降低了减振刀盘滚刀造成的振动，将部分滚刀连接楔形块材料更换为阻尼合金来减振的目的，滚刀楔形块阻尼材料替换模型，具体材料优化模型公式如下：

$$y = \delta \left[ ax^2 + be^{-\left(\frac{x-R_1}{R_2}\right)^2} + c(\sin(x-d))^2 \right]^\varphi$$

式中： $\delta$ 为划分角度系数，其取值范围为 0.95~1.12，在刀盘的圆周方向上划分的单位角度值越小，其值越小； $\varphi$ 为刀盘结构系数，其取值范围为 0.91~1.04，刀盘本体分块越多， $\varphi$ 值越大； $R_1$ 和 $R_2$ 分别为正滚刀区域和边滚刀区域的直径系数，其取值范围分别为 2.603~3.535 和 0.346~1.705，圆周直径越大，其取值越大； $a, b, c, d$ 分别为二项系数、指数系数、正弦系数和初相系数，它们的取值范围分别为 0.415~0.487，2.92~6.99，3.209~8.063 和 3.224~3.649，以上系数均随刀盘在圆周方向上划分的单位角度值的减小而增大； $x$ 和 $y$ 分别为区域编号和替换区域编号，其范围为 1~ $n$ ；

模型说明：本模型以刀盘中心为圆心，分别以中心滚刀与刀盘圆心的最大距离、边滚刀与刀盘圆心的最小距离为半径做圆，将刀盘在径向方向上划分为三个区域，从内向外分别为中心滚刀区域、正滚刀区域和边滚刀区域；以通过刀盘中心的水平线作为第一块薄板，以第一块薄板为基准，按照一定的角度值将刀盘在圆周方向上等分为若干区域，按顺时针方向由内向外依次编写刀盘区域的序号 $x$ ， $x=1、2、3、\dots、n$ ；在正滚刀区域中，从左侧开始，将位于第一块薄板上方的区域的序号记为 1，编写完正滚刀区域后，按照同样的方式编写边滚刀区域；现将上一步已经编写的序号带入材料优化模型，求解 $f(x)$ 值，若其值为非整数时，取整数部分即可；所求得的值便为需要将滚刀连接楔形块材料更

换为阻尼合金区域的序号；直到 $f(x) \geq x$ 停止带入，得到的结果即为全部需要替换的区域；

## II、支撑和推进系统磁流变阻尼器添加方案

在靠近原有支撑油缸的位置并根据实际空间的可操作性添加磁流变阻尼器，新增的磁流变阻尼器包括右侧磁流变阻尼器（2）、右上侧斜上磁流变阻尼器（5）、右下侧磁流变阻尼器（7）、左下侧磁流变阻尼器（10）、左上侧斜上磁流变阻尼器（12）、左侧磁流变阻尼器（15）、左上侧斜上磁流变阻尼器（18）和右上侧斜上磁流变阻尼器（21），具体的添加方案如下：

位于顶护盾（1）与主驱动（16）之间，分别存在左侧顶油缸（14）与右侧顶油缸（3），距左侧顶油缸（14）主机掘进方向一侧 90~600mm 范围内添加左侧磁流变阻尼器（15），距右侧顶油缸（3）主机掘进方向一侧 90~600mm 范围内添加右侧磁流变阻尼器（2），此一组磁流变阻尼器轴线与主机竖直方向的角度范围为 0~60°，其功能主要是降低主机系统的纵向振动；位于左上侧护盾（13）与主驱动（16）之间存在左上侧斜上油缸（19），距左上侧斜上油缸（19）左侧 0~500mm 范围内添加左上侧斜上磁流变阻尼器（18），距左上侧斜上油缸（19）右侧 0~400mm 范围内添加左上侧斜上磁流变阻尼器（12）；位于右上侧护盾（4）与主驱动（16）之间存在右上侧斜上油缸（20），距右上侧斜上油缸（20）左侧 0~400mm 范围内添加右上侧斜上磁流变阻尼器（5），距右上侧斜上油缸（20）右侧 0~500mm 范围内添加右上侧斜上磁流变阻尼器（21）；此两组磁流变阻尼器的安装轴线与原有支撑油缸轴线相平行，其添加功能主要是分别降低主机系统的纵向振动与横向振动；位于左侧护盾（11）与主驱动（16）之间存在左下侧油缸（9），距左下侧油缸（9）主机掘进方向一侧 300~600mm 范围内添加左下侧磁流变阻尼器（10）；位于右侧护盾（6）与主驱动（16）之间存在右下侧

油缸（8），距离右下侧油缸（8）主机掘进方向一侧 300~600mm 范围内添加右下侧磁流变阻尼器（7）；此一组磁流变阻尼器的安装轴线与主机竖直方向角度范围为-10~90°，其添加功能主要是降低主机系统的纵向振动，也可一定程度上降低主机系统的横向振动；另外，在 TBM 两端推进油缸处分别添加磁流变阻尼器；

### III、连接法兰材料替换方案

为了减少 TBM 连接处的振动采用了一种高分子夹层阻尼减振钢板以及局部替换螺栓材料的方法来实现连接处减振的目的，具体方案如下：

对于 TBM 连接法兰的减振优化主要采用高分子夹层阻尼减振钢板的方法，高分子夹层阻尼减振钢板分三层，上下层为钢板，内层为阻尼减振夹层；通过构建全断面硬岩掘进机刀盘动力学模型，对模型结果进行分析对比，确定减振钢板的阻尼减振夹层厚度 $t_1$ 与钢板厚度尺寸 $t_2$ ；对于螺栓材料的替换，法兰螺栓结构中螺栓每间隔一组螺栓组进行一次螺栓材料变换。

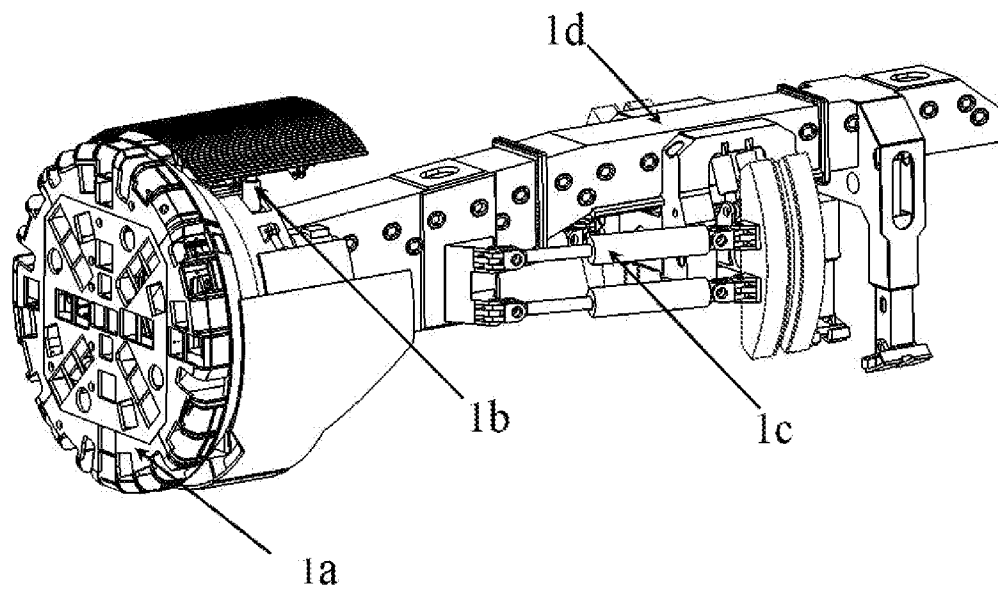


图 1

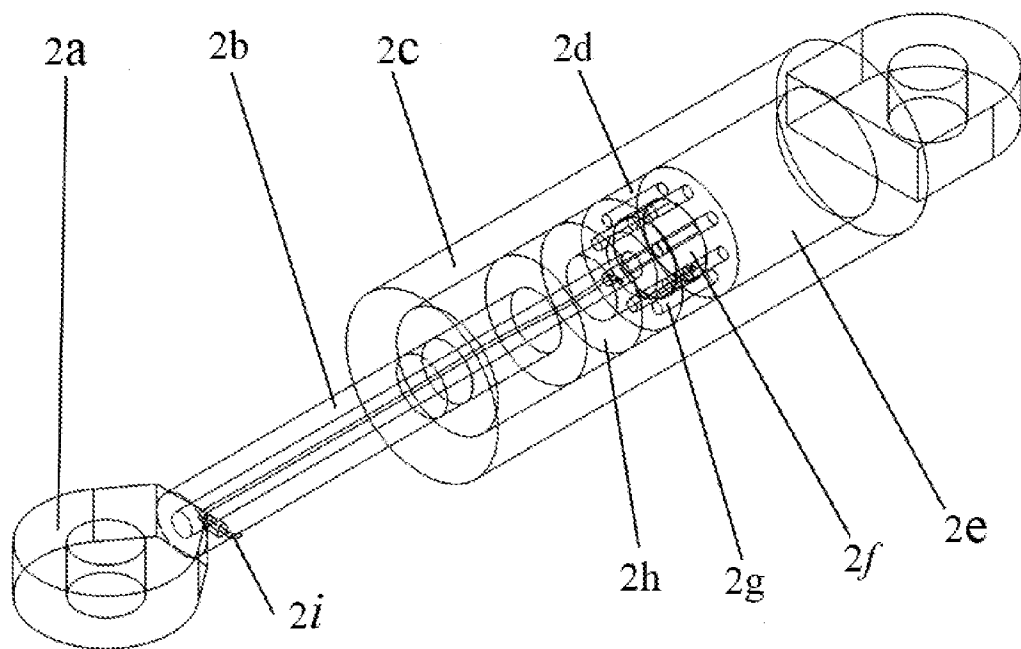


图 2

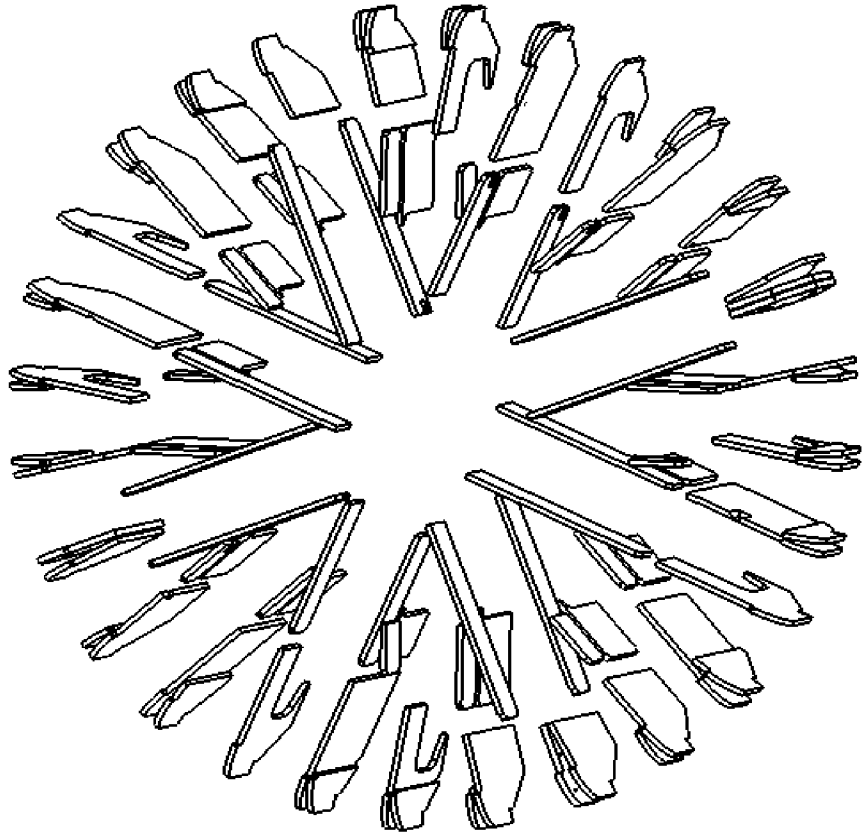


图 3

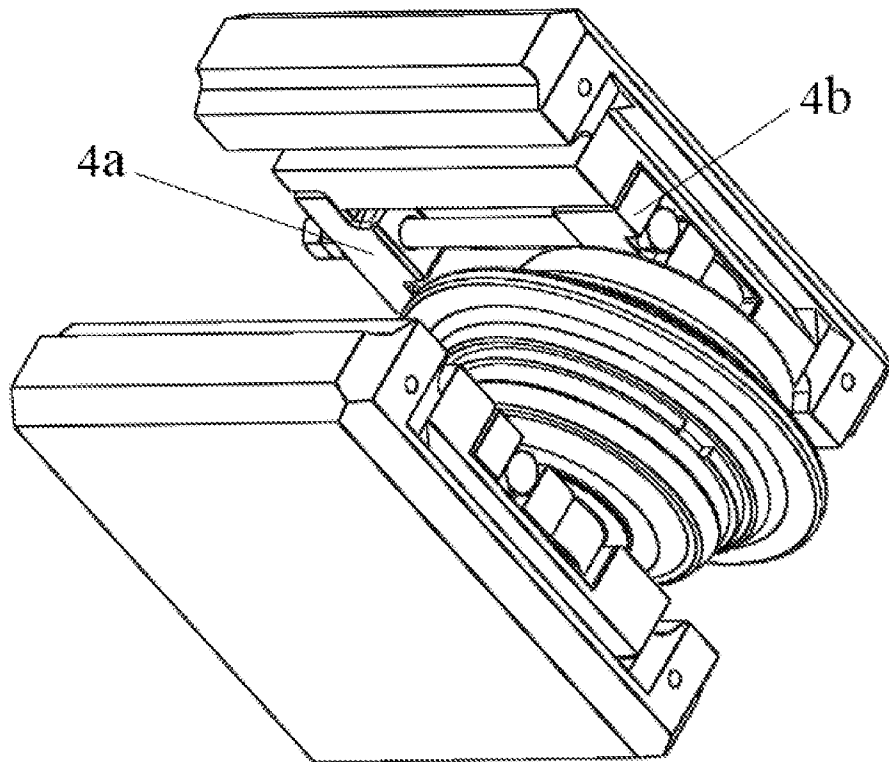


图 4

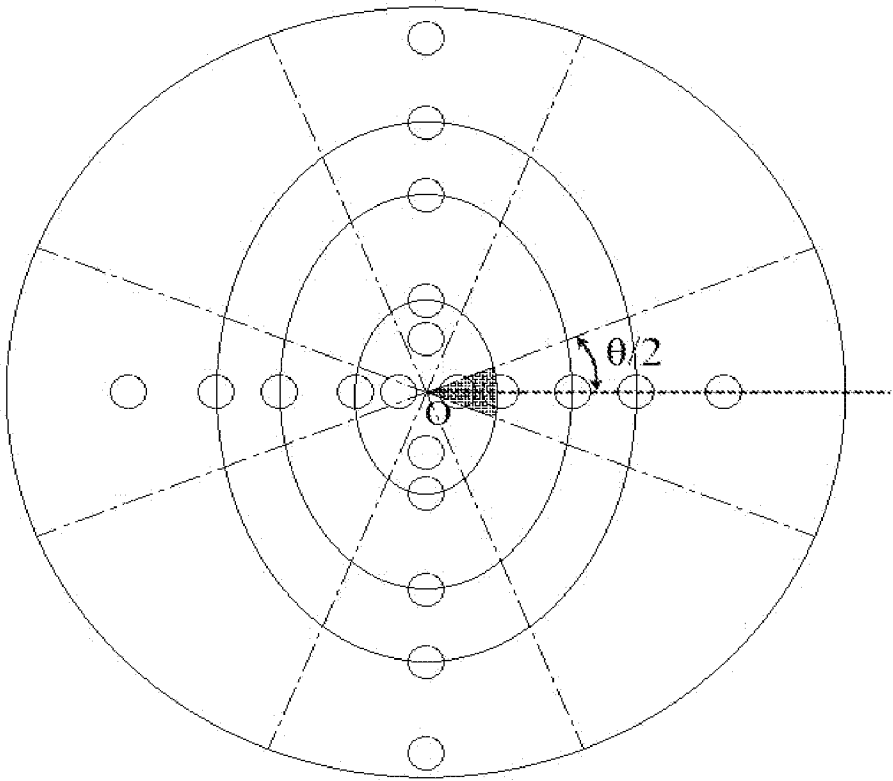


图 5

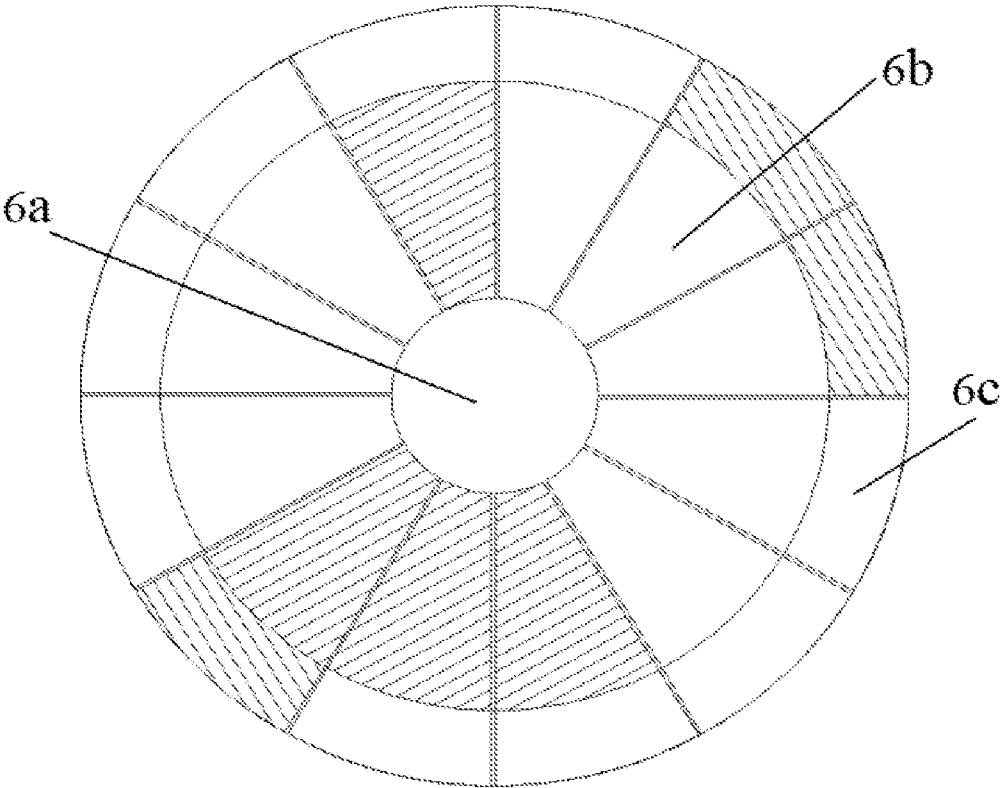


图 6

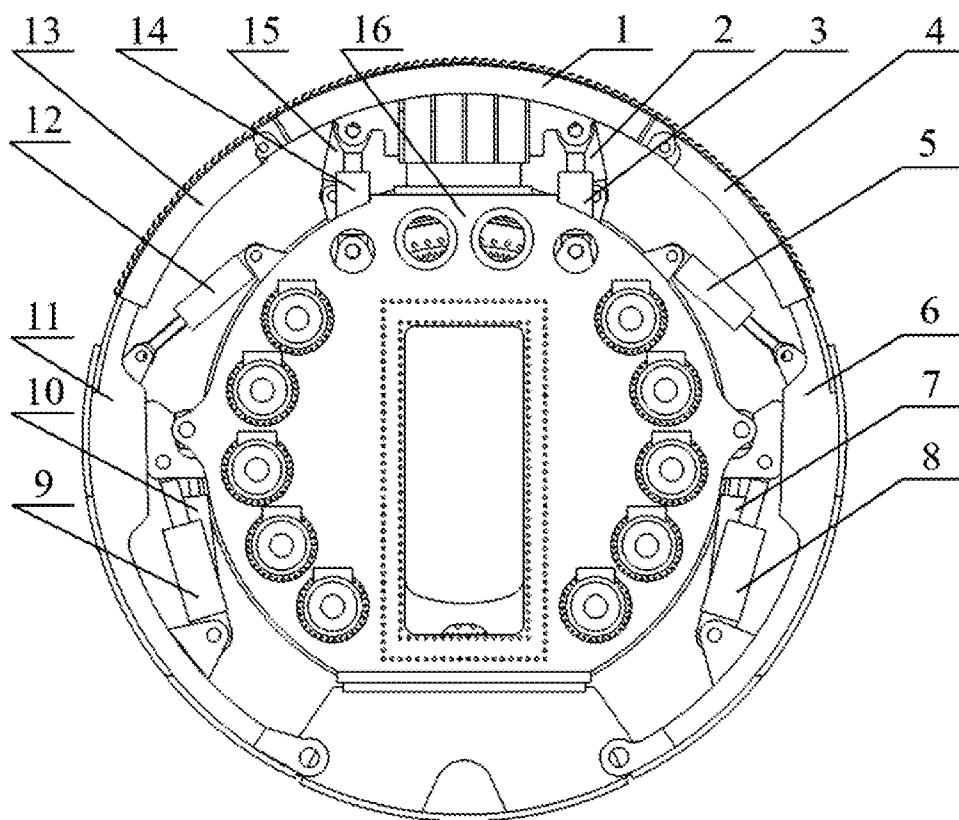


图 7a

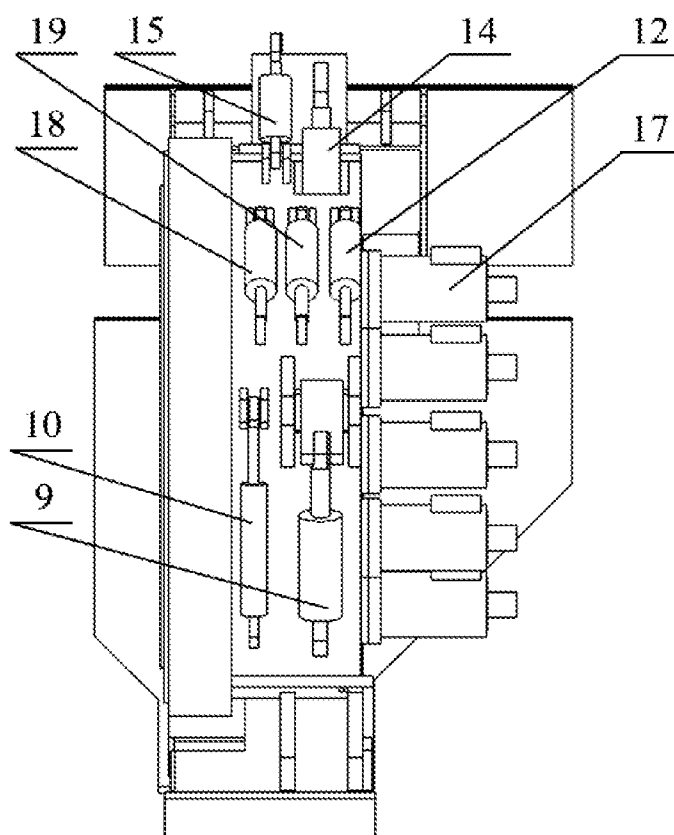


图 7b

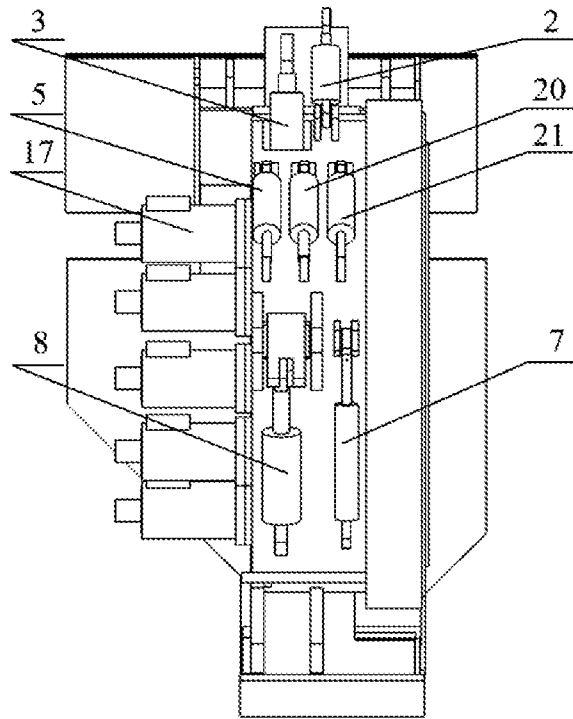


图 7c

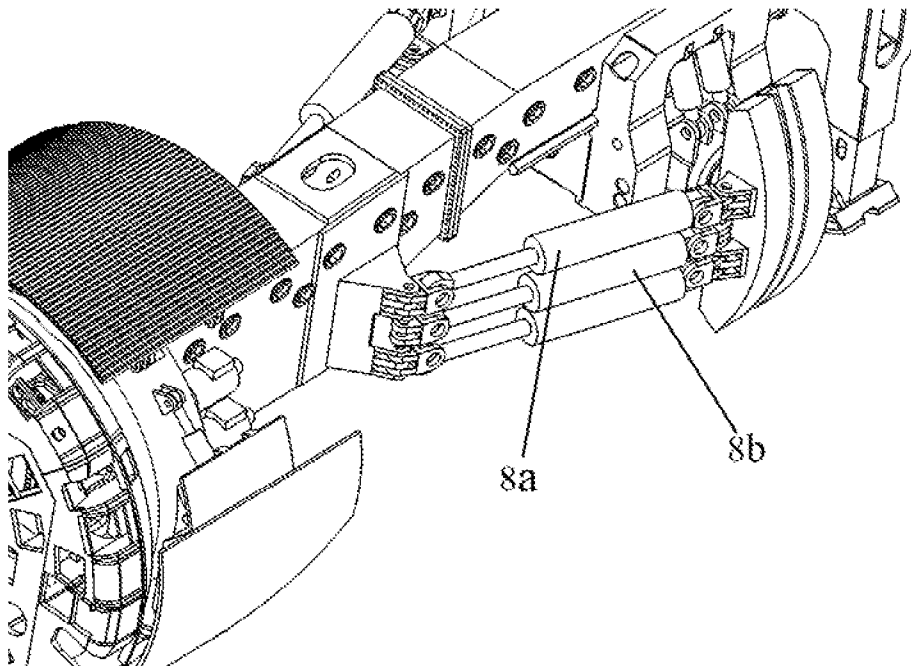


图 8

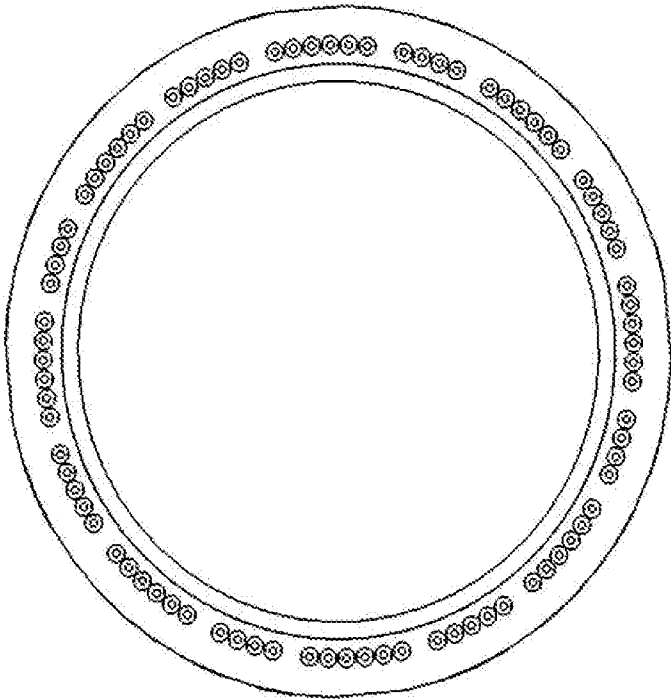


图 9a



图 9b

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/121013

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G06F 17/50(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)

G06F; G05B

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)

CPEA; CNMED; PLABS; AUABS; DWPI; TWABS; CPRSABS; FRABS; TWMED; HKABS; CNABS; SGABS; LEXIS; MOABS; ILABS; SIPOABS; 磁流变阻尼器, 掘进机, 优化, 减振优化, 减振, 振动, 刀盘, 阻尼, optim+, vibration, cutter, optimiz+, damping, tunnel boring machine, damper, TBM

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                | Relevant to claim No. |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | CN 107480400 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 15 December 2017 (2017-12-15)<br>description       | 1                     |
| A         | CN 101710349 A (CENTRAL SOUTH UNIVERSITY) 19 May 2010 (2010-05-19)<br>description                 | 1                     |
| A         | CN 107918279 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 17 April 2018 (2018-04-17)<br>description          | 1                     |
| A         | CN 107608211 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 19 January 2018 (2018-01-19)<br>description | 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

17 January 2019

Date of mailing of the international search report

25 January 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

National Intellectual Property Administration, PRC (ISA/  
CN)  
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing  
100088  
China

Authorized officer

Facsimile No. (86-10)62019451

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/CN2018/121013**

| Patent document<br>cited in search report |           |   | Publication date<br>(day/month/year) | Patent family member(s) |           |   | Publication date<br>(day/month/year) |
|-------------------------------------------|-----------|---|--------------------------------------|-------------------------|-----------|---|--------------------------------------|
| CN                                        | 107480400 | A | 15 December 2017                     | None                    |           |   |                                      |
| CN                                        | 101710349 | A | 19 May 2010                          | CN                      | 101710349 | B | 28 March 2012                        |
| CN                                        | 107918279 | A | 17 April 2018                        | None                    |           |   |                                      |
| CN                                        | 107608211 | A | 19 January 2018                      | None                    |           |   |                                      |

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/121013

| <b>A. 主题的分类</b><br>G06F 17/50 (2006.01) i<br><br>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>B. 检索领域</b><br>检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)<br>G06F; G05B<br><br>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献<br><br>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))<br>CPEA; CNMED; PLABS; AUABS; DWPI; TWABS; CPRSABS; FRABS; TWMED; HKABS; CNABS; SGABS; LEXIS; MOABS; ILABS; SIPOABS; 磁流变阻尼器, 掘进机, 优化, 减振优化, 减振, 振动, 刀盘, 阻尼, optim+, vibration, cutter, optimiz+, damping, tunnel boring machine, damper, TBM                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                     |                                            |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| <b>C. 相关文件</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 107480400 A (上海交通大学) 2017年 12月 15日 (2017 - 12 - 15)<br/>说明书全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 101710349 A (中南大学) 2010年 5月 19日 (2010 - 05 - 19)<br/>说明书全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107918279 A (上海交通大学) 2018年 4月 17日 (2018 - 04 - 17)<br/>说明书全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107608211 A (华南理工大学) 2018年 1月 19日 (2018 - 01 - 19)<br/>说明书全文</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>            |                                                                                                                                                                                     |                                            | 类 型*                                                                                                                                                                                                       | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                                                                                                                   | 相关的权利要求 | A | CN 107480400 A (上海交通大学) 2017年 12月 15日 (2017 - 12 - 15)<br>说明书全文 | 1 | A | CN 101710349 A (中南大学) 2010年 5月 19日 (2010 - 05 - 19)<br>说明书全文 | 1 | A | CN 107918279 A (上海交通大学) 2018年 4月 17日 (2018 - 04 - 17)<br>说明书全文 | 1 | A | CN 107608211 A (华南理工大学) 2018年 1月 19日 (2018 - 01 - 19)<br>说明书全文 | 1 |
| 类 型*                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                                                                                                                   | 相关的权利要求                                    |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | CN 107480400 A (上海交通大学) 2017年 12月 15日 (2017 - 12 - 15)<br>说明书全文                                                                                                                     | 1                                          |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | CN 101710349 A (中南大学) 2010年 5月 19日 (2010 - 05 - 19)<br>说明书全文                                                                                                                        | 1                                          |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | CN 107918279 A (上海交通大学) 2018年 4月 17日 (2018 - 04 - 17)<br>说明书全文                                                                                                                      | 1                                          |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | CN 107608211 A (华南理工大学) 2018年 1月 19日 (2018 - 01 - 19)<br>说明书全文                                                                                                                      | 1                                          |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| <input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                     |                                            |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| <table border="0"> <tr> <td>           * 引用文件的具体类型:<br/>           “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件<br/>           “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利<br/>           “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)<br/>           “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件<br/>           “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         </td> <td>           “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<br/>           “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<br/>           “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<br/>           “&amp;” 同族专利的文件         </td> </tr> </table> |                                                                                                                                                                                     |                                            | * 引用文件的具体类型:<br>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件<br>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利<br>“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)<br>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件<br>“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<br>“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<br>“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<br>“&” 同族专利的文件 |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| * 引用文件的具体类型:<br>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件<br>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利<br>“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)<br>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件<br>“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<br>“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<br>“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<br>“&” 同族专利的文件 |                                            |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| 国际检索实际完成的日期<br><br>2019年 1月 17日                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                     | 国际检索报告邮寄日期<br><br>2019年 1月 25日             |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |
| ISA/CN的名称和邮寄地址<br><br>中国国家知识产权局 (ISA/CN)<br>中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088<br><br>传真号 (86-10) 62019451                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                     | 受权官员<br><br>黄渊<br><br>电话号码 86-010-62411769 |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |         |   |                                                                 |   |   |                                                              |   |   |                                                                |   |   |                                                                |   |

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/121013

| 检索报告引用的专利文件 |           |   | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利         | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|-----------|---|----------------|--------------|----------------|
| CN          | 107480400 | A | 2017年 12月 15日  | 无            |                |
| CN          | 101710349 | A | 2010年 5月 19日   | CN 101710349 | B 2012年 3月 28日 |
| CN          | 107918279 | A | 2018年 4月 17日   | 无            |                |
| CN          | 107608211 | A | 2018年 1月 19日   | 无            |                |