(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110202425 A
(43)申请公布日 2019.09.06

(21)申请号 201910414458.4

(22)申请日 2019.05.17

(71)申请人 河南理工大学
地址 454010 河南省焦作市高新区世纪大道2001号

(72)发明人 赵波 常宝琪 王晓博 赵重阳 焦锋 高国富 向道辉 原路生 王毅

(74)专利代理机构 郑州金成知识产权事务所（普通合伙）41121
代理人 郭增欣

(51)Int.Cl.
B24B 1/04(2006.01)
G06F 17/50(2006.01)

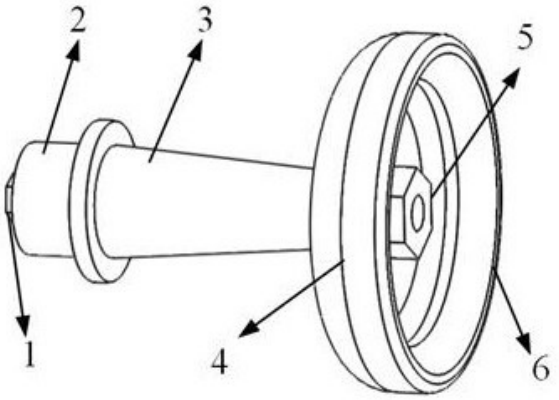
权利要求书3页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

超声单激励椭圆振动磨削设计方法及装置

(57)摘要

本发明公开了一种超声单激励椭圆振动磨削设计方法及装置，其换能器、变幅杆和杯形磨削工具通过预应力螺栓和螺帽连接在一起，换能器将超声波发生器提供的电信号转换为纵向传递的机械振动，通过变幅杆的传递作用，将纵向振动的声波传递至杯形磨削工具，杯形磨削工具分为圆盘段和圆管段，变幅杆纵振激励使得杯形磨削工具圆盘段作横向弯曲的节圆型振动，并耦合形成圆管段的纵向振动，实现“纵-弯-纵”三种不同振型的复合，通过圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动，在圆管段末端耦合表现出纵向和径向振动的复合振动，在纵径平面内，纵向及径向振动的耦合形成椭圆型振动轨迹，简化谐振系统的设计，使砂轮盘的振动更加理想。



CN 110202425 A

1.一种超声单激励椭圆振动磨削设计方法,包括以下步骤:

a、确定椭圆振动磨削系统的振动模式及振动轨迹:

椭圆振动磨削系统由换能器、变幅杆和杯形磨削工具组成,其中变幅器由变幅杆与杯形磨削工具构成,换能器将超声波发生器提供的电信号转换为纵向传递的机械振动,通过变幅杆的传递作用,将纵向振动的声波传递至杯形磨削工具,杯形磨削工具分为圆盘段和圆管段,变幅杆纵振激励使得杯形磨削工具圆盘段作横向弯曲的节圆型振动,并耦合形成圆管段的纵向振动,实现"纵-弯-纵"三种不同振型的复合,通过圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动,在圆管段末端耦合表现出纵向和径向振动的复合振动,在纵径平面内,纵向及径向振动的耦合形成椭圆型振动轨迹,即参与磨削加工的磨粒是以椭圆型轨迹周期运动的;

b、建立变幅器中各段的动力学方程:

建立变幅杆、圆盘段和圆管段的动力学方程,再根据边界条件将三者联立耦合,得到变幅器的整体频率方程,其中纵振变幅杆是直杆型、圆锥型和复合型,是四分之一波长或是其整数倍,根据圆盘段厚度与直径比值的大小,确定是按照薄板振动计算,还是中厚板振动计算,变幅杆和圆管段可根据声波的纵振传播理论确定两者的位移和应力函数,圆盘段根据板的振动理论获得位移函数和应力函数;

c、确定工件连接处的边界条件:

若变幅杆是四分之一波长,则变幅杆左端满足位移函数为零,圆管形段右端为自由状态,满足应力函数为零,变幅杆、圆盘段和圆管段连接处振动耦合,满足位移相等和力相等;若圆盘段属于中厚板,则需考虑圆板的径向转角、剪力和弯矩的边界状态;

d、建立变幅器的整体频率方程:

通过确定的边界条件,将各段的位移函数和应力函数进行联立、整合,求得变幅器的整体频率方程;

e、确定椭圆振动磨削系统参数:

需要根据使用要求确定椭圆振动磨削系统的参数包括:变幅杆和杯形磨削工具材料的密度、泊松比、弹性模量、剪切模量和声速,变幅杆两端的直径,杯形磨削工具的内径、外径、高度和底厚,根据实际要求确定设计频率,以及换能器的谐振频率;

f、计算变幅杆的长度并进行优化设计:

根据实际使用要求,将已确定的杯形磨削工具磨削系统参数带入到变幅器的整体频率方程中,求得可以使杯形磨削工具实现谐振的变幅杆长度,若求得变幅杆与杯形磨削工具组成的变幅器与设计频率相差太多,在使用要求以及超声波发生器频率调节范围内改变设计频率,以得到更好的设计效果。

2.根据权利要求1所述的超声单激励椭圆振动磨削设计方法,其特征在于:杯形磨削工具以不同于振动系统的谐振频率而独自谐振,避免了传统设计方法下工件全谐振与同一频率的难度,杯形磨削工具为杯形或碗形,是具有圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动的磨削工具。

3.根据权利要求1所述的超声单激励椭圆振动磨削设计方法,其特征在于:单一纵振型换能器产生一定频率的机械振动,经过变幅杆的传递与放大,再形成圆盘段的弯曲振动与圆管段的纵向振动,耦合表现出杯形磨削工具末端特有的椭圆型振动轨迹,此种振动形式

不同于多个方向激振形成椭圆振动，而是通过振动模态的耦合形成磨粒的椭圆型运动。

4.根据权利要求1所述的超声单激励椭圆振动磨削设计方法，其特征在于：椭圆型运动轨迹是由纵向及径向振动耦合而得，通过改变杯形磨削工具的直径及高度可改变纵向和径向的振幅比，从而获得不同形状的椭圆运动轨迹，超声椭圆振动形式可改变单颗磨粒普通磨削状态下的单纯直线运动，增加了磨削轨迹的干涉程度以及磨粒与工件的分离时间，增加砂轮有效磨粒数的同时也促进了磨削液的流通，从而在一定程度上减小了单颗磨粒的磨削力和磨削热，且在单位时间内，增大了磨痕的宽度，这导致磨除体积增加，因而材料去除率提高。

5.根据权利要求1所述的超声单激励椭圆振动磨削设计方法，其特征在于：通过建立变幅杆、圆盘段和圆管段的动力学方程，然后利用边界条件将三段的动力学方程耦合成变幅器的整体频率方程，此种方法适用于一些特殊场合，例如工件或刀具的质量和体积较大，其材料、结构、尺寸等是由其使用要求决定的，不能按照系统谐振频率来设计，此方法设计下可以使大负载工具获得较好的振动效果，实现例如杯形磨削工具类的良好谐振，并在磨削端形成椭圆型运动轨迹。

6.根据权利要求1所述的超声单激励椭圆振动磨削设计方法，其特征在于：变幅杆的动力学方程即位移函数和应力函数应根据变幅杆形状的不同而改变，同样圆盘段的动力学方程也应根据圆盘按照薄圆盘或中厚盘振动计算而改变；所述边界条件是动力学方程耦合的关键，不同振动情况及几何尺寸下，边界条件的表达式都不同，设计时应根据实际情况确定相应的边界条件。

7.根据权利要求1所述的超声单激励椭圆振动磨削设计方法，其特征在于：所述变幅器的整体频率方程中包含变幅杆和杯形磨削工具的几何尺寸，设计时把变幅杆长度或者杯形磨削工具某一尺寸作为求解变量，以达到不同的设计要求；换能器通过预应力螺栓与变幅杆直接连接，形成一体式结构；或按传统换能器增加前盖板与变幅杆相连，换能器可以是两片或四片，其谐振频率应与变幅器的设计频率相同，以使磨削系统出现良好的振动状态。

8.根据权利要求1所述的超声单激励椭圆振动磨削设计方法，其特征在于：杯形磨削工具通过螺帽与变幅杆末端螺柱配合，达到与变幅杆固连的效果，杯形磨削工具末端可根据加工要求电镀不同大小、不同类型的磨粒，杯形磨削工具圆盘段也可作镂空处理，以减小变幅杆的负载，杯形磨削工具末端可开设对称分布的沟槽，提高磨削液流通的性能。

9.一种超声单激励椭圆振动磨削装置，包括换能器、变幅杆和杯形磨削工具，其特征是：所述换能器、变幅杆和杯形磨削工具通过预应力螺栓和螺帽连接在一起，实际装配时需精确计算螺栓所需的预紧力，根据实际加工要求在杯形磨削工具的末端涂覆磨粒，形成一个圆周磨料层；换能器将超声波发生器提供的电信号转换为纵向传递的机械振动，通过变幅杆的传递作用，将纵向振动的声波传递至杯形磨削工具，杯形磨削工具分为圆盘段和圆管段，变幅杆纵振激励使得杯形磨削工具圆盘段作横向弯曲的节圆型振动，并耦合形成圆管段的纵向振动，实现“纵-弯-纵”三种不同振型的复合，通过圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动，在圆管段末端耦合表现出纵向和径向振动的复合振动，在纵径平面内，纵向及径向振动的耦合形成椭圆型振动轨迹，即参与磨削加工的磨粒是以椭圆型轨迹周期运动的。

10.根据权利要求9所述的超声单激励椭圆振动磨削装置，其特征在于：所述换能器通

过预应力螺栓与变幅杆直接连接，形成一体式结构；或者，所述换能器增加前盖板与变幅杆相连；所述换能器是两片或四片，其谐振频率应与变幅器的设计频率相同，以使磨削系统出现良好的振动状态；所述杯形磨削工具通过螺帽与变幅杆末端螺柱配合，达到与变幅杆固连的效果，所述杯形磨削工具末端根据加工要求电镀不同大小、不同类型的磨粒，杯形磨削工具圆盘段也可作镂空处理，以减小变幅杆的负载，杯形磨削工具末端可开设对称分布的沟槽，提高磨削液流通的性能。

超声单激励椭圆振动磨削设计方法及装置

[0001] 技术领域：

本发明涉及一种超声磨削设备，特别是涉及一种超声单激励椭圆振动磨削设计方法及装置。

[0002] 背景技术：

超声磨削是在传统磨削加工方法的基础上对刀具或工件施以高频振动而形成的加工技术，是一种对复合材料、硬脆材料等难加工材料都有效的精加工工艺。超声椭圆振动磨削是在普通超声磨削磨粒单一直线往复运动的基础上，又增加了一个垂直方向的超声高频运动，以此耦合形成了磨粒的椭圆型周期运动轨迹。超声椭圆振动形式可以减小单颗磨粒的磨削力和磨削热，增加材料的去除率。

[0003] 传统超声振动系统的设计方法大多采用全谐振理论进行设计，所适用的范围为，工具质量、体积小，可以忽略对系统的影响。但在一些特殊场合，工件或刀具是变幅杆的直接负载，由于其材料、结构、尺寸等是由其使用要求决定的，不能按照系统谐振频率来设计，是非谐振单元。因此需要一种更好适应性的设计方法，满足大负载类工具的超声谐振及设计。

[0004] 发明内容：

本发明所要解决的技术问题是：克服现有技术的不足，提供一种设计合理、结构紧凑、简化谐振系统且形成椭圆振动轨迹的超声单激励椭圆振动磨削设计方法及装置。

[0005] 本发明的技术方案是：

一种超声单激励椭圆振动磨削设计方法，包括以下步骤：

a、确定椭圆振动磨削系统的振动模式及振动轨迹：

椭圆振动磨削系统由换能器、变幅杆和杯形磨削工具组成，其中变幅器由变幅杆与杯形磨削工具构成，换能器将超声波发生器提供的电信号转换为纵向传递的机械振动，通过变幅杆的传递作用，将纵向振动的声波传递至杯形磨削工具，杯形磨削工具分为圆盘段和圆管段，变幅杆纵振激励使得杯形磨削工具圆盘段作横向弯曲的节圆型振动，并耦合形成圆管段的纵向振动，实现“纵-弯-纵”三种不同振型的复合，通过圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动，在圆管段末端耦合表现出纵向和径向振动的复合振动，在纵径平面内，纵向及径向振动的耦合形成椭圆型振动轨迹，即参与磨削加工的磨粒是以椭圆型轨迹周期运动的；

b、建立变幅器中各段的动力学方程：

建立变幅杆、圆盘段和圆管段的动力学方程，再根据边界条件将三者联立耦合，得到变幅器的整体频率方程，其中纵振变幅杆是直杆型、圆锥型和复合型，是四分之一波长或是其整数倍，根据圆盘段厚度与直径比值的大小，确定是按照薄板振动计算，还是中厚板振动计算，变幅杆和圆管段可根据声波的纵振传播理论确定两者的位移和应力函数，圆盘段根据板的振动理论获得位移函数和应力函数；

c、确定工件连接处的边界条件：

若变幅杆是四分之一波长，则变幅杆左端满足位移函数为零，圆管形段右端为自由状

态，满足应力函数为零，变幅杆、圆盘段和圆管段连接处振动耦合，满足位移相等和力相等；若圆盘段属于中厚板，则需考虑圆板的径向转角、剪力和弯矩的边界状态；

d、建立变幅器的整体频率方程：

通过确定的边界条件，将各段的位移函数和应力函数进行联立、整合，求得变幅器的整体频率方程；

e、确定椭圆振动磨削系统参数：

需要根据使用要求确定椭圆振动磨削系统的参数包括：变幅杆和杯形磨削工具材料的密度、泊松比、弹性模量、剪切模量和声速，变幅杆两端的直径，杯形磨削工具的内径、外径、高度和底厚，根据实际要求确定设计频率，以及换能器的谐振频率；

f、计算变幅杆的长度并进行优化设计：

根据实际使用要求，将已确定的杯形磨削工具磨削系统参数带入到变幅器的整体频率方程中，求得可以使杯形磨削工具实现谐振的变幅杆长度，若求得变幅杆与杯形磨削工具组成的变幅器与设计频率相差太多，在使用要求以及超声波发生器频率调节范围内改变设计频率，以得到更好的设计效果。

[0006] 杯形磨削工具以不同于振动系统的谐振频率而独自谐振，避免了传统设计方法下工件全谐振与同一频率的难度，杯形磨削工具为杯形或碗形，是具有圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动的磨削工具。

[0007] 单一纵振型换能器产生一定频率的机械振动，经过变幅杆的传递与放大，再形成圆盘段的弯曲振动与圆管段的纵向振动，耦合表现出杯形磨削工具末端特有的椭圆型振动轨迹，此种振动形式不同于多个方向激振形成椭圆振动，而是通过振动模态的耦合形成磨粒的椭圆型运动。

[0008] 椭圆型运动轨迹是由纵向及径向振动耦合而得，通过改变杯形磨削工具的直径及高度可改变纵向和径向的振幅比，从而获得不同形状的椭圆运动轨迹，超声椭圆振动形式可改变单颗磨粒普通磨削状态下的单纯直线运动，增加了磨削轨迹的干涉程度以及磨粒与工件的分离时间，增加砂轮有效磨粒数的同时也促进了磨削液的流通，从而在一定程度上减小了单颗磨粒的磨削力和磨削热，且在单位时间内，增大了磨痕的宽度，这导致磨除体积增加，因而材料去除率提高。

[0009] 通过建立变幅杆、圆盘段和圆管段的动力学方程，然后利用边界条件将三段的动力学方程耦合成变幅器的整体频率方程，此种方法适用于一些特殊场合，例如工件或刀具的质量和体积较大，其材料、结构、尺寸等是由其使用要求决定的，不能按照系统谐振频率来设计，此方法设计下可以使大负载工具获得较好的振动效果，实现例如杯形磨削工具类的良好谐振，并在磨削端形成椭圆型运动轨迹。

[0010] 变幅杆的动力学方程即位移函数和应力函数应根据变幅杆形状的不同而改变，同样圆盘段的动力学方程也应根据圆盘按照薄圆盘或中厚盘振动计算而改变；所述边界条件是动力学方程耦合的关键，不同振动情况及几何尺寸下，边界条件的表达式都不同，设计时应根据实际情况确定相应的边界条件。

[0011] 所述变幅器的整体频率方程中包含变幅杆和杯形磨削工具的几何尺寸，设计时把变幅杆长度或者杯形磨削工具某一尺寸作为求解变量，以达到不同的设计要求；换能器通过预应力螺栓与变幅杆直接连接，形成一体式结构；或按传统换能器增加前盖板与变幅杆

相连，换能器可以是两片或四片，其谐振频率应与变幅器的设计频率相同，以使磨削系统出现良好的振动状态。

[0012] 杯形磨削工具通过螺帽与变幅杆末端螺柱配合，达到与变幅杆固连的效果，杯形磨削工具末端可根据加工要求电镀不同大小、不同类型的磨粒，杯形磨削工具圆盘段也可作镂空处理，以减小变幅杆的负载，杯形磨削工具末端可开设对称分布的沟槽，提高磨削液流通的性能。

[0013] 一种超声单激励椭圆振动磨削装置，包括换能器、变幅杆和杯形磨削工具，所述换能器、变幅杆和杯形磨削工具通过预应力螺栓和螺帽连接在一起，实际装配时需精确计算螺栓所需的预紧力，根据实际加工要求在杯形磨削工具的末端涂覆磨粒，形成一个圆周磨料层；换能器将超声波发生器提供的电信号转换为纵向传递的机械振动，通过变幅杆的传递作用，将纵向振动的声波传递至杯形磨削工具，杯形磨削工具分为圆盘段和圆管段，变幅杆纵振激励使得杯形磨削工具圆盘段作横向弯曲的节圆型振动，并耦合形成圆管段的纵向振动，实现“纵-弯-纵”三种不同振型的复合，通过圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动，在圆管段末端耦合表现出纵向和径向振动的复合振动，在纵径平面内，纵向及径向振动的耦合形成椭圆型振动轨迹，即参与磨削加工的磨粒是以椭圆型轨迹周期运动的。

[0014] 所述换能器通过预应力螺栓与变幅杆直接连接，形成一体式结构；或者，所述换能器增加前盖板与变幅杆相连；所述换能器是两片或四片，其谐振频率应与变幅器的设计频率相同，以使磨削系统出现良好的振动状态；所述杯形磨削工具通过螺帽与变幅杆末端螺柱配合，达到与变幅杆固连的效果，所述杯形磨削工具末端根据加工要求电镀不同大小、不同类型的磨粒，杯形磨削工具圆盘段也可作镂空处理，以减小变幅杆的负载，杯形磨削工具末端可开设对称分布的沟槽，提高磨削液流通的性能。

[0015] 本发明的有益效果是：

1.本发明采用的设计方法可以避免按整个系统全谐振设计时带来的复杂性，简化谐振系统的设计，使砂轮盘的振动更加理想。

[0016] 2.本发明采用的设计方法下实现了杯形磨削工具的良好的超声振动，更重要的是形成了杯形磨削工具末端的椭圆型振动轨迹。

[0017] 3.本发明方法合理，实现了大型负载工具的超声辅助椭圆型振动磨削，结构紧凑、易于设计制造，易于推广实施，具有良好的经济效益。

[0018] 附图说明：

图1是超声单激励椭圆振动磨削装置的结构图之一；

图2是超声单激励椭圆振动磨削装置的结构图之二；

图3 是磨粒椭圆振动轨迹示意图；

图4是图1中杯形磨削工具砂轮的示意图；

图5 是图2中碗型工具砂轮的示意图。

[0019] 具体实施方式：

实施例：参见图1-图5，图中，1-预应力螺栓，2-换能器，3-锥形变幅杆，4-杯形磨削工具砂轮，5-螺帽，6-磨粒层，7-碗形工具砂轮。

[0020] 超声单激励椭圆振动磨削装置由预应力螺栓1、换能器2、变幅杆3、杯形磨削工具砂轮4和螺帽5组成。换能器2通过螺栓1与变幅杆3相连，实际装配时需精确计算螺栓所需的

预紧力，以达到良好的装配效果。杯形磨削工具砂轮4通过螺帽5与变幅杆3固连。根据实际加工要求在杯形磨削工具砂轮4末端涂覆磨粒，形成一个圆周磨料层6。

[0021] 超声单激励椭圆振动磨削设计方法，包括以下步骤：

a、确定椭圆振动磨削系统的振动模式及振动轨迹：

椭圆振动磨削系统由换能器、变幅杆和杯形磨削工具组成，其中变幅器由变幅杆与杯形磨削工具构成，换能器将超声波发生器提供的电信号转换为纵向传递的机械振动，通过变幅杆的传递作用，将纵向振动的声波传递至杯形磨削工具，杯形磨削工具分为圆盘段和圆管段，变幅杆纵振激励使得杯形磨削工具圆盘段作横向弯曲的节圆型振动，并耦合形成圆管段的纵向振动，实现“纵-弯-纵”三种不同振型的复合，通过圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动，在圆管段末端耦合表现出纵向和径向振动的复合振动，在纵径平面内，纵向及径向振动的耦合形成椭圆型振动轨迹，即参与磨削加工的磨粒是以椭圆型轨迹周期运动的；

b、建立变幅器中各段的动力学方程：

建立变幅杆、圆盘段和圆管段的动力学方程，再根据边界条件将三者联立耦合，得到变幅器的整体频率方程，其中纵振变幅杆是直杆型、圆锥型和复合型，是四分之一波长或是其整数倍，根据圆盘段厚度与直径比值的大小，确定是按照薄板振动计算，还是中厚板振动计算，变幅杆和圆管段可根据声波的纵振传播理论确定两者的位移和应力函数，圆盘段根据板的振动理论获得位移函数和应力函数；

c、确定工件连接处的边界条件：

若变幅杆是四分之一波长，则变幅杆左端满足位移函数为零，圆管形段右端为自由状态，满足应力函数为零，变幅杆、圆盘段和圆管段连接处振动耦合，满足位移相等和力相等；若圆盘段属于中厚板，则需考虑圆板的径向转角、剪力和弯矩的边界状态；

d、建立变幅器的整体频率方程：

通过确定的边界条件，将各段的位移函数和应力函数进行联立、整合，求得变幅器的整体频率方程；

e、确定椭圆振动磨削系统参数：

需要根据使用要求确定椭圆振动磨削系统的参数包括：变幅杆和杯形磨削工具材料的密度、泊松比、弹性模量、剪切模量和声速，变幅杆两端的直径，杯形磨削工具的内径、外径、高度和底厚，根据实际要求确定设计频率，以及换能器的谐振频率；

f、计算变幅杆的长度并进行优化设计：

根据实际使用要求，将已确定的杯形磨削工具磨削系统参数带入到变幅器的整体频率方程中，求得可以使杯形磨削工具实现谐振的变幅杆长度，若求得变幅杆与杯形磨削工具组成的变幅器与设计频率相差太多，在使用要求以及超声波发生器频率调节范围内改变设计频率，以得到更好的设计效果。

[0022] 杯形磨削工具以不同于振动系统的谐振频率而独自谐振，避免了传统设计方法下工件全谐振与同一频率的难度，杯形磨削工具为杯形或碗形，是具有圆盘段的弯曲振动和圆管段的纵向振动的磨削工具。

[0023] 单一纵振型换能器产生一定频率的机械振动，经过变幅杆的传递与放大，再形成圆盘段的弯曲振动与圆管段的纵向振动，耦合表现出杯形磨削工具末端特有的椭圆型振动

轨迹，此种振动形式不同于多个方向激振形成椭圆振动，而是通过振动模态的耦合形成磨粒的椭圆型运动。

[0024] 椭圆型运动轨迹是由纵向及径向振动耦合而得，通过改变杯形磨削工具的直径及高度可改变纵向和径向的振幅比，从而获得不同形状的椭圆运动轨迹，超声椭圆振动形式可改变单颗磨粒普通磨削状态下的单纯直线运动，增加了磨削轨迹的干涉程度以及磨粒与工件的分离时间，增加砂轮有效磨粒数的同时也促进了磨削液的流通，从而在一定程度上减小了单颗磨粒的磨削力和磨削热，且在单位时间内，增大了磨痕的宽度，这导致磨除体积增加，因而材料去除率提高。

[0025] 通过建立变幅杆、圆盘段和圆管段的动力学方程，然后利用边界条件将三段的动力学方程耦合成变幅器的整体频率方程，此种方法适用于一些特殊场合，例如工件或刀具的质量和体积较大，其材料、结构、尺寸等是由其使用要求决定的，不能按照系统谐振频率来设计，此方法设计下可以使大负载工具获得较好的振动效果，实现例如杯形磨削工具类的良好谐振，并在磨削端形成椭圆型运动轨迹。

[0026] 变幅杆的动力学方程即位移函数和应力函数应根据变幅杆形状的不同而改变，同样圆盘段的动力学方程也应根据圆盘按照薄圆盘或中厚盘振动计算而改变；所述边界条件是动力学方程耦合的关键，不同振动情况及几何尺寸下，边界条件的表达式都不同，设计时应根据实际情况确定相应的边界条件。

[0027] 所述变幅器的整体频率方程中包含变幅杆和杯形磨削工具的几何尺寸，设计时把变幅杆长度或者杯形磨削工具某一尺寸作为求解变量，以达到不同的设计要求；换能器通过预应力螺栓与变幅杆直接连接，形成一体式结构；或按传统换能器增加前盖板与变幅杆相连，换能器可以是两片或四片，其谐振频率应与变幅器的设计频率相同，以使磨削系统出现良好的振动状态。

[0028] 杯形磨削工具通过螺帽与变幅杆末端螺柱配合，达到与变幅杆固连的效果，杯形磨削工具末端可根据加工要求电镀不同大小、不同类型的磨粒，杯形磨削工具圆盘段也可作镂空处理，以减小变幅杆的负载，杯形磨削工具末端可开设对称分布的沟槽，提高磨削液流通的性能。

[0029] 以上所述，仅是本发明的较佳实施例而已，并非对本发明作任何形式上的限制，凡是依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰，均仍属于本发明技术方案的范围内。

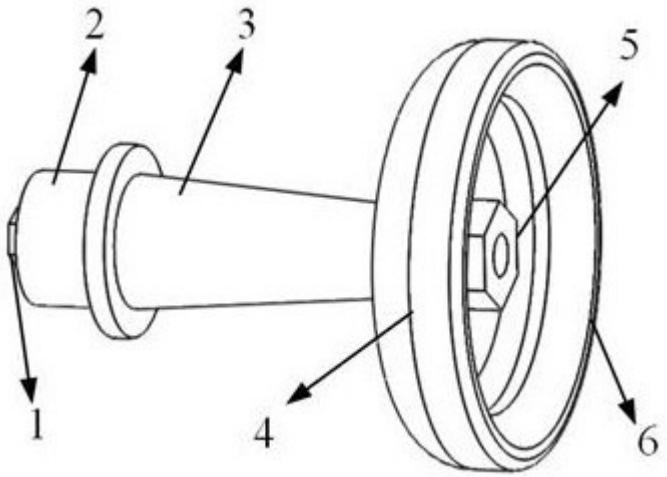


图1

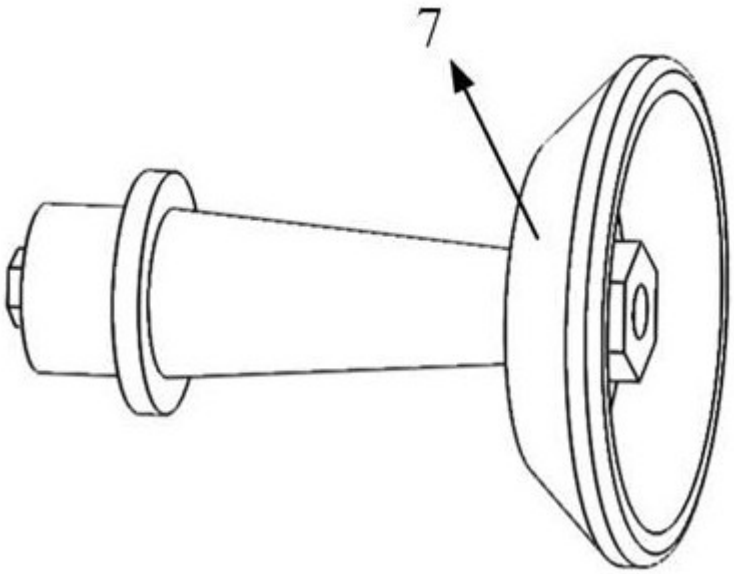


图2

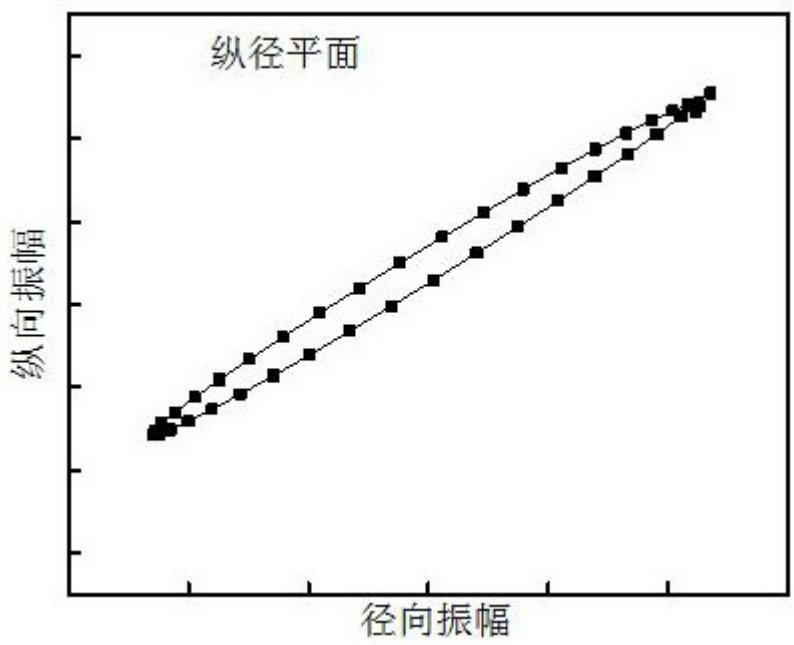


图3

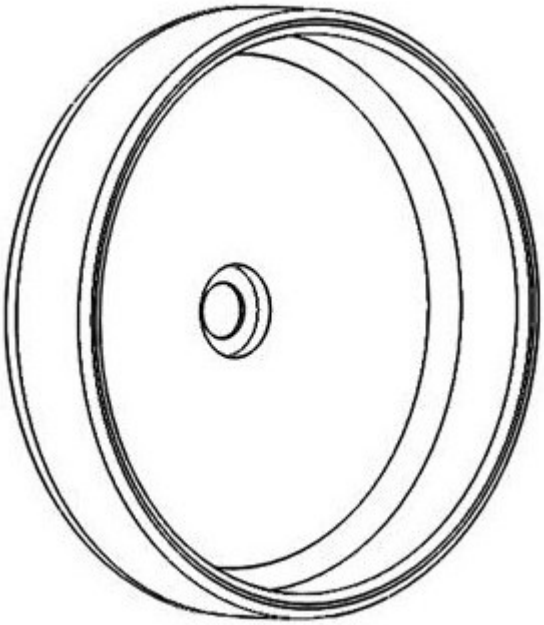


图4

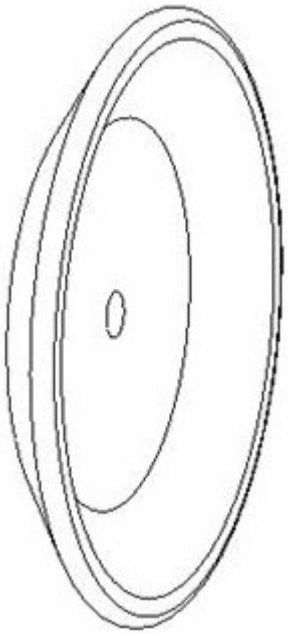


图5