

不同材质仿生凸齿镇压器滚动件的模态分析

张智泓^{1,2}, 佟金^{1,2*}, 陈东辉^{1,2}, 孙霁宇^{1,2}, 马云海^{1,2}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 为了探讨由不同材质组成的仿生凸齿滚动件, 在镇压作业时对脱土和土壤表面微形貌加工性能的影响, 利用 Autodesk Algor Simulation 软件, 对铸铁材料和 UHMWPE—铸铁组合材料仿生结构滚动部件进行了模态分析。取前 8 阶模态, 对 2 种滚动部件的固有频率和最大振幅做出对比, 并考察滚动部件不同位置处的振幅。结果表明, UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在前 8 阶模态下各阶模态的最大振幅均大于铸铁材料滚动部件, 增幅为 5.716~30.077 mm; UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件更容易在相对较低的频率下获得更大振幅; 在靠近辐板圈中部, 即传递到牵引机构件处, UHMWPE—铸铁材料滚动部件平均振幅比铸铁材料滚动部件小 0.213 mm。由此可得出以下结论: 相对于铸铁材料滚动部件, UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件可在更好地保证牵引稳定性的前提下, 在镇压作业时, 能增强其仿生凸齿尖端处的脱土潜力, 并保障对土壤表面所加工微形貌的强度。这为仿生凸齿镇压器材料的选择、牵引装置行驶速度的设定以及滚动部件上激励装置的设置提供了参考。

关键词: 仿生学, 振动, 模态分析, Algor, 微形貌加工

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.13.002

中图分类号: S222.23; TB533⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-13-0008-08

张智泓, 佟金, 陈东辉, 等. 不同材质仿生凸齿镇压器滚动件的模态分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 8-15. Zhang Zhihong, Tong Jin, Chen Donghui, et al. Modal analysis of bionic convex teeth rolling component composed of different materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 8-15. (in Chinese with English abstract)

0 引言

在中国东北垄作区, 春播玉米前, 对已耕耘土壤适当的压实可提高作物产量^[1-5], 农田土壤表面层镇压后形成具有许多凹槽或凹坑的表面微形貌, 这些凹槽或凹坑可像微小水库一样储存水, 具有水库效应和集水作用, 能提高农田对水资源的使用效率, 减小水土流失, 特别在干旱、半干旱地区及年降水量分布不均的地区, 提高土壤蓄水保墒能力并有效提高作物产量^[6-11]。

用于镇压的仿生凸齿滚动件以臭蜚螂前足胫节外缘齿状结构为模仿对象, 因为土壤洞穴动物臭蜚螂前足胫节外缘所具有齿状形态^[12-13], 使其能够利用其前足行走, 利用前足在松软土壤上行走来推滚粪球, 表明其齿状结构对土壤具有很好的限流固土作业能力, 而产生足够的推进力。

对于农业机械滚动触土部件, 如传统土壤镇压辊, 主要采用石材、铸铁或钢材制作成实心或骨架式。该类滚动部件在作业的过程中, 容易发生土壤粘附现象, 导致作业能耗增加。对于土壤表面微形貌加工的滚动部件,

严重的土壤粘附会使土壤镇压作业无法实施。滚动触土部件的脱土减阻应当成为该类部件的重要技术要求, 否则不仅会增大作业能耗, 而且会显著降低作业质量和效果。另外, 经镇压加工的土壤微形貌需具有一定强度, 不然在自然界外力作用下微形貌容易被破坏, 所以这也要求地表土壤必需压实到一定的坚实度。

研究表明, 对田间作业机具施加一定的振动激励, 能有效地实现机具的脱土, 提高农机具的地面通过能力, 进而保证作业质量^[14-17]。

另外, 因为土壤均有合适的共振频率范围, 在该振动频率范围内, 振动能量被土壤充分吸收, 所以在一定的共振频率范围内, 土壤能获得最佳的压实效应。并且, 土壤的动力刚度值随载荷振幅的增加而增加。随载荷振幅的增加, 土壤塑性压缩变形也逐渐增大, 材料间颗粒排列更加紧密, 导致材料内摩擦力的增大、结构阻尼增加, 故动力刚度值也逐渐增加, 土壤密实度增大, 土壤颗粒排列致一定的紧密程度^[18-21], 也有利于所加工土壤表面微形貌形态的保持。

然而, 就振动的有效利用而言, 该滚动部件存在着振动与减振的矛盾, 一方面要利用与土壤作用的齿状结构的振动, 以实现滚动部件的脱土, 并将振动作用于被加工土壤, 使土壤具备所需的形貌和性能; 另一方面要避免振动向牵引机构的传递, 以降低振动对牵引稳定性的影响。所以为了获得良好的脱土性能及行走稳定性, 理想的仿生凸齿滚动部件在作业时, 应在触土位置有较大振幅, 但对牵引机构连接位置引起的振幅又应较小。

收稿日期: 2011-11-19 修订日期: 2012-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075185)。

作者简介: 张智泓(1986—), 男, 白族, 云南昆明人, 博士生。研究方向: 主要从事地面机械仿生理理论与技术研究。长春市 人民大街 5988 号 吉林大学生物与农业工程学院, 130022。Email: zhzhang09@mails.jlu.edu.cn

*通信作者: 佟金(1957—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事仿生摩擦学研究。长春市 人民大街 5988 号 吉林大学生物与农业工程学院, 130022。Email: jtong@jlu.edu.cn

本文使用 Autodesk Algor Simulation 2011 有限元软件,对采用铸铁材料和 UHMWPE—铸铁组合材料的 2 种仿生凸齿滚动部件的镇压作业进行模态分析,探索不同材质对滚动部件动力学特性的影响,并分析和预测其在作业过程中的行走稳定性、脱土和压实土壤性能,为仿生凸齿镇压器材料的选择、牵引装置行使速度的设定以及滚动部件上激励装置的设置提供了参考。

1 有限元模型建立

1.1 滚动部件的三维几何模型

如图 1 所示,滚动部件有 6 个凸齿,齿形截面为曲边三角形,两腰均为外凸的圆弧。滚动部件的厚度为 150 mm。

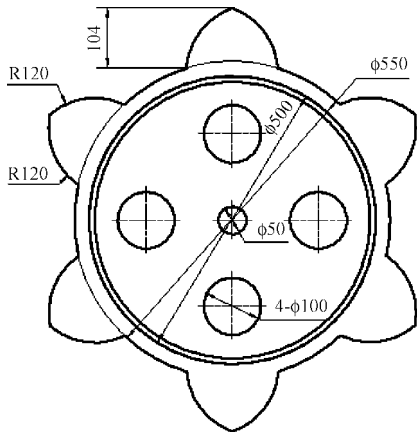


图 1 滚动部件的结构尺寸

Fig.1 Structural size of rolling component

针对不同的耕作模式,整个机具采用不同的组合方式,对于平作模式,如图 2a 所示,可将多个滚动部件串联于同一轴上进行作业;对与垄作模式,如图 2b 所示,可将滚动部件连接于各自独立的机架,再由各自机架连接到总机架,以在作业时实现对垄沟和垄台的单独仿形。

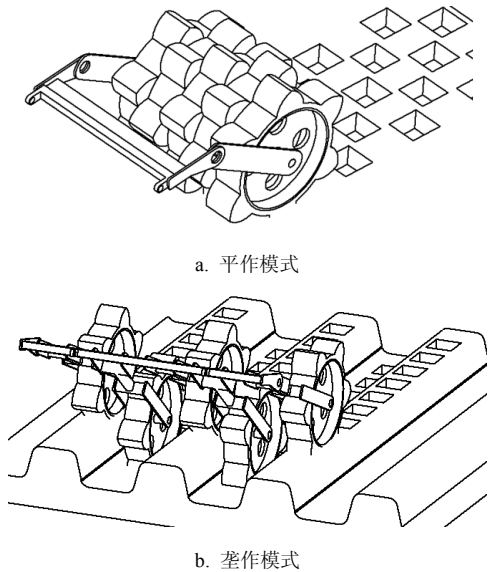


图 2 滚动部件的作业方式

Fig.2 Operation mode of rolling components

仿生凸齿滚动件在镇压作业时,辐板圈中轴通过牵引机构,由拖拉机牵引,部件绕中轴滚动前进,此时,滚动部件外缘的齿状结构(如图 3)和土壤相互作用,通过挤压土壤使土壤发生流动和变形,不仅在一定程度上压实土壤,并在土壤表面形成一系列的微坑阵列,在镇压的同时实现土壤表面微形貌的加工。

本文采用的 2 种不同材料构成的仿生凸齿结构滚动部件均由 Autodesk Inventor 2011 软件完成三维建模,如图 3 中所示,图 3a 为内部辐板圈和外缘仿生凸齿齿圈均采用铸铁材料的滚动部件,图 3b 所示的滚动部件内部辐板圈采用铸铁材料,外缘仿生凸齿齿圈采用工程塑料 UHMWPE。

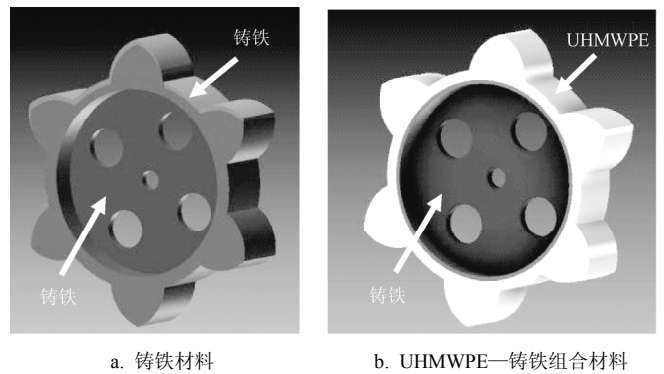


图 3 2 种采用不同材料的滚动部件
Fig.3 Two types of rolling components composed of different materials

1.2 材料属性设置并网格划分

将建立好的模型导入 Autodesk Algor Simulation 2011 软件中。

设置 UHMWPE 材料属性^[22]:

- 1) 密度: $9.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- 2) 弹性模量: 820 N/mm^2 ;
- 3) 泊松比: 0.46;
- 4) 剪切弹性模量: 33 N/mm^2 。

设置铸铁材料属性^[23]:

- 1) 密度: $7.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- 2) 弹性模量: $1.43 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$;
- 3) 泊松比: 0.367;
- 4) 剪切弹性模量为: $5.24 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。

实体网格类型选择块体和四面体,并划分网格,以完全用铸铁构成的滚动部件为例:划分后的有限元模型如图 4 所示。

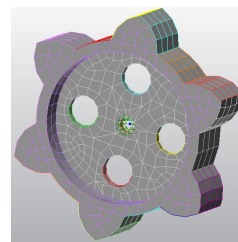


图 4 网格划分后的滚动部件
Fig.4 Rolling component after mesh generation

1.3 约束及加载

由于仿生凸齿滚动部件的辐板圈中部为与牵引机构连接处, 为比较 2 种滚动部件的振型和不同位置振幅, 对 2 种滚动部件, 均固定辐板圈中间圆孔内表面的 3 个平动自由度 X, Y, Z 和 3 个转动自由度 R_X, R_Y, R_Z 。由于模态由系统的固有特性决定, 与外载荷无关, 所以不需要设定载荷的边界条件。

2 模态分析

2.1 运动微分方程的建立

根据弹性力学有限元理论, 可得滚动部件模型系统的运动微分方程^[24]

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中, $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\ddot{X}\}$ 为加速度向量; $\{\dot{X}\}$ 为速度向量; $\{X\}$ 为位移向量; $\{F(t)\}$ 为激振力矢量。

若无外力作用, 则 $\{F(t)\} = 0$, 故得到系统的自由振动方程。在求滚动部件的固有频率和固有振型时, 因为阻尼对所求结果影响不大, 因此, 阻尼项 $[C]\{\dot{X}\}$ 可略去, 得到无阻尼自由振动运动方程

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} = 0 \quad (2)$$

式 (2) 对应的特征方程为

$$[[K] - \omega_i^2[M]]\{x_i\} = 0 \quad (3)$$

在式 (3) 中, 当 $\{x_i\}$ 非 0 时, 是一个广义特征值问

题, ω_i^2 为特征值, $\{x_i\}$ 为特征向量。该式也是以 $\{x_i\}$ 中元素为变量的 n 阶代数齐次方程组, $[[K] - \omega_i^2[M]]$ 为其系数矩阵, 该方程有非 0 解的充要条件是其系数矩阵行列式为 0, 即方程 (4)。

$$|K - \omega_i^2 M| = 0 \quad (4)$$

方程 (4) 称为特征问题式的特征方程, 该式是关于 ω_i^2 的 n 次代数方程。假设没有重根, 解此方程得 ω 的 n 个互异正根 $\omega_i \{i=1, 2, \dots, n\}$, 通常按照升序排列, 见方程 (5)。

$$0 < \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n \quad (5)$$

所得到的 ω_i 便为第 i 阶模态的固有频率, $i=1, 2, \dots, n$ 。

这时, 振动系统一般存在 n 个固有频率和 n 个主振型, 对于特定的频率和振型, 代表一个单自由度系统的自由振动, 这种在自由振动时, 模型所具有的基本振动特征称为模型的模态。

2.2 铸铁材料滚动部件的模态分析

对于该仿生凸齿滚动部件模型, 低阶振型对模型结构的振动影响较大, 且在实际作业中该系统容易在低频被激励, 所以, 前几阶振型对模型的动态特性起决定作用。对于仿生凸齿滚动部件, 取前 8 阶振型可达到比较动态特性的目的^[25-28]。分析铸铁材料的滚动部件前 8 阶模态下固有频率数值、振型及最大振幅。根据振型特征, 将铸铁材料的滚动部件前 8 阶振型归纳为 3 类, 并选取 1 阶, 3 阶和 5 阶模态给出模态分析结果 (由图 5 示出)。前 8 阶固有频率数值和最大振幅如表 1 所示。

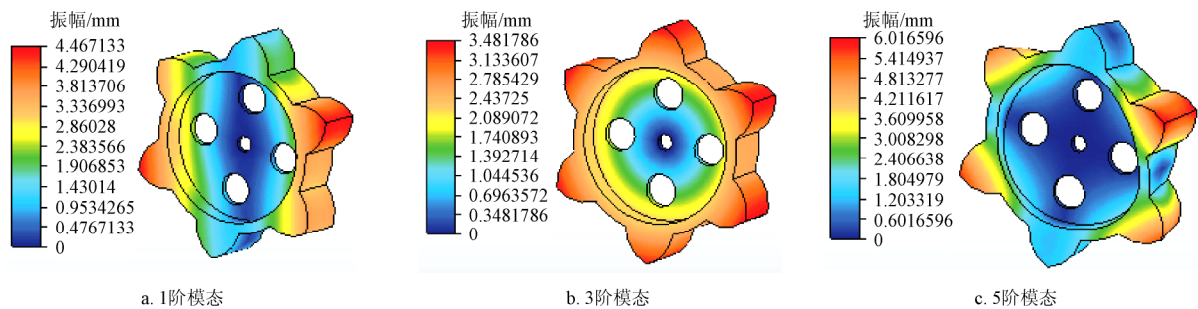


图 5 铸铁材料滚动部件振型
Fig.5 Vibration mode of cast iron combinatorial material rolling component

表 1 铸铁材料前 8 阶固有频率和最大振幅

Table 1 Natural frequency and maximum amplitude at anterior eight ranks

模态阶数	固有频率/Hz	振幅最大值/mm
1	105.445	4.76713
2	106.275	4.85499
3	149.361	3.48179
4	201.737	3.09169
5	465.508	6.01660
6	467.471	6.55157
7	780.297	3.00905
8	799.270	3.19168

铸铁材料滚动部件前 8 阶振型分为 3 种:

1) 在 1 阶、2 阶和 6 阶模态, 有一对径向的 2 个齿状结构振幅达到最大值: 如图 5a。该振型可达到的最大振幅为 6.552 mm。

2) 在 3 阶、4 阶、7 阶和 8 阶模态, 外缘上的所有齿状结构振幅均达到最大值: 如图 5b。该振型可达到的最大振幅为 3.482 mm。

3) 在 5 阶模态, 有 2 对径向的 4 个凸齿振幅达到最大值: 如图 5c 所示。最大振幅为 6.017 mm。

对于铸铁材料的滚动部件, 在前 8 阶振型中, 外缘上的所有齿的振幅均达到最大值的可能性最大。然而, 由于振动时能量分散在每个齿上, 故该振型所具有的最

大振幅 (3.482 mm) 小于该滚动部件其他 2 种振型 (在同一径向的 2 个齿状结构振幅达到最大值和在 2 个径向的 4 个齿状结构振幅达到最大值) 可达到的最大振幅 (6.552 mm 和 6.017mm)。在这几种振型中, 只有在同一径向的 2 个齿状结构振幅达到最大值的振型有利于在滚动部件齿状结构尖端处激发较大振幅, 其他 2 种振型都因为振动时能量分散在多个齿上而不利于激发较大振幅, 从而不利于滚动部件获得更好的脱土性能和压实土壤的能力。

2.3 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件的模态分析

分析 UHMWPE—铸铁组合材料的滚动部件前 8 阶固有频率数值、振型及最大振幅。根据振型特征, 将 UHMWPE—铸铁组合材料的滚动部件前 8 阶振型归为 4 类, 并选取

1 阶, 3 阶, 5 阶及 7 阶模态给出模态分析结果, 结果见图 4。前 8 阶固有频率数值和最大振幅见表 2 所示。

UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件的前 8 阶振型分为 4 种:

- 1) 在 1 阶、2 阶、4 阶、6 阶和 8 阶模态, 有一对径向对称的 2 个齿振幅达到最大值: 如图 6a 所示, 该振型最大振幅为 33.269 mm。
- 2) 在 3 阶模态, 外缘单侧半圆上的齿振幅均达到最大值: 振型如图 6b 所示, 振幅为 9.262 mm。
- 3) 有 2 对径向对称的 4 个齿振幅达到最大值: 在 5 阶模态, 振型如图 6c 所示, 最大振幅为 22.095 mm。
- 4) 在 7 阶模态, 外缘上的齿振幅均达到最大值: 如图 6d 所示, 振幅为 19.910 mm。

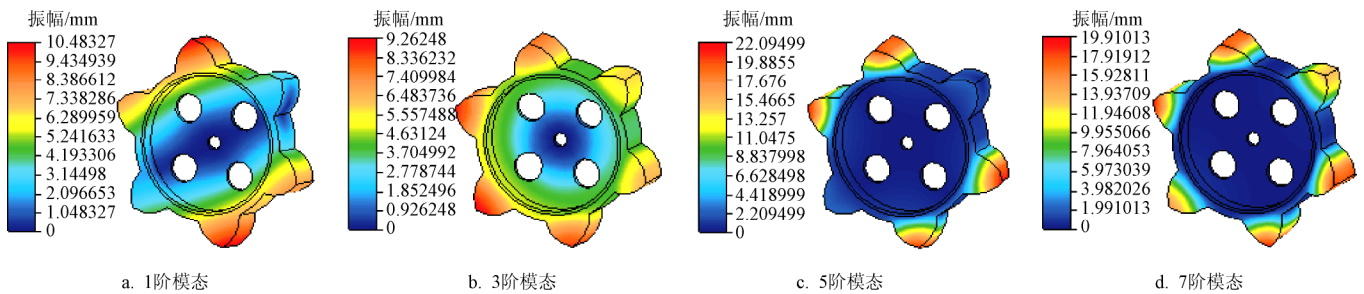


图 6 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件振型

Fig.6 Vibration modes of UHMWPE-cast iron combinatorial material rolling component

表 2 前 8 阶固有频率和最大振幅

Table 2 Natural frequency and maximum amplitude at anterior eight ranks

模态阶数	频率/Hz	振幅最大值/mm
1	140.544	10.48330
2	148.057	11.10040
3	261.599	9.26248
4	275.353	9.51703
5	421.331	22.09500
6	435.140	21.65370
7	450.732	19.91010
8	510.408	33.26870

对于 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件, 有一对径向对称的 2 个齿振幅达到最大值的可能性最大。这是由于滚动部件在该振型下振动时, 能量集中在同一径向的 2 个齿上, 故与该滚动部件其他 3 种振型 (外缘单侧半圆上的齿振幅达到最大值, 在一对径向的 4 个齿振幅达到最大值和外缘上的齿振幅均达到最大值) 的最大振幅 (9.262, 22.095 和 19.910 mm) 相比, 该振型具有振幅的最大值 (33.269 mm)。

因此, 不同材质的组成对滚动部件的振型有一定影响。与铸铁材料滚动部件相比, UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件更容易获得激发具有较大振幅的振型, 且该振型的最大振幅位置位于滚动部件触土作业并完成土壤表面微形貌加工的仿生凸齿齿尖部位, 所以在作业时

UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在镇压作业时具有更好的脱土潜力和增加所加工土壤表面微形貌强度的能力。

2.4 2 种滚动部件的振幅比较

2.4.1 2 种滚动部件不同模态阶数下的振幅比较

滚动部件的脱土效果不仅与振型有关, 还与振幅的最大值有关。如图 7 所示, 对于铸铁材料滚动部件, 模态阶数为 3, 4, 7 及 8 时, 振幅在 3 mm 左右, 在 1, 2, 5 阶模态, 振幅为 5 mm 左右, 在第 6 阶模态, 振幅达到最大值 6 mm。

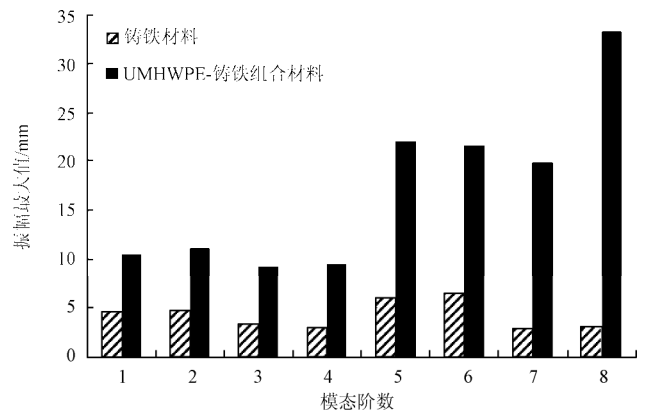


图 7 2 种滚动部件在不同模态阶数下的振幅最大值

Fig.7 Maximum amplitude under different ranks of modal of two types of rolling components

UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在第 1 阶到第 4 阶模态阶下, 振幅在 10 mm 左右, 在第 5 阶到第 7 阶模

态阶数振幅在 20 mm 左右，在模态阶数为第 8 阶时，振幅达到最大值 33 mm。

UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在前 8 阶模态的平均振幅 (17.161 mm) 约是铸铁材料滚动部件前 8 阶模态的平均振幅 (4.371 mm) 的 4 倍。并且，UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件的各阶模态下的最大振幅均明显大于铸铁材料滚动部件。这也进一步说明了 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件比铸铁材料滚动部件有更好的潜在脱土性能和保持所加工土壤表面微形貌形态的能力。

2.4.2 2 种滚动部件不同固有频率下振幅的比较

如图 8 所示，UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件的前 8 阶模态固有频率在 130~550 Hz 之内，铸铁材料滚动部件的前 8 阶模态固有频率在 100~800 Hz 之内，可见，UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在相对较低频率下更容易被激励并获得更大振幅，而且，该较低频率范围更接近与牵引机具和耕作机具作业时产生的频率^[29-32]，故 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在作业时更容易获得更好的脱土和压实土壤性能。

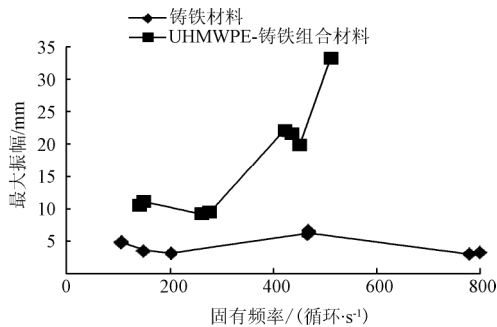


图 8 2 滚动部件在不同固有频率下的最大振幅

Fig.8 Maximum amplitude under different natural frequency of two types of rolling components

2.4.3 滚动部件上不同位置的振幅比较

若整个滚动部件完全采用 UHMWPE 材料,会导致辐板圈位置刚度不够而影响滚动部件工作时运动的稳定性。另外，为使滚动部件通过振动获得较好的脱土性能和适当压实土壤的能力的同时，不影响牵引部件的稳定工作，理想的滚动部件振幅分布情况应如下：在滚动部件外缘部分，特别是齿状结构的尖端位置处振幅较大，而在靠近辐板圈中部位置振幅较小。

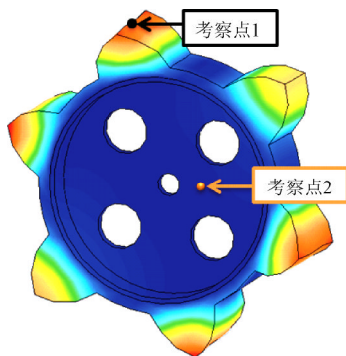
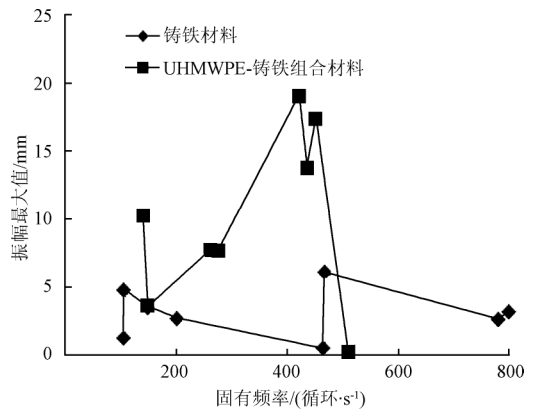


图 9 考察点 1 和考察点 2 的位置

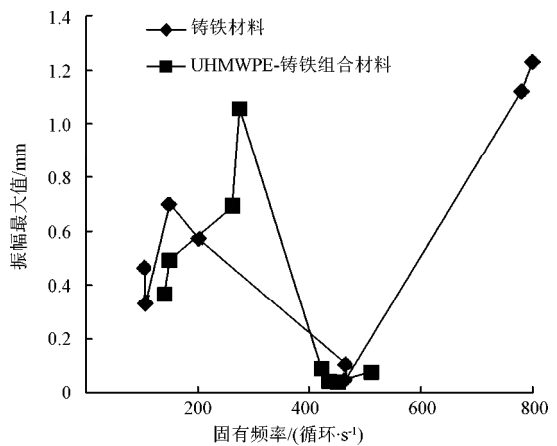
Fig.9 Location of investigative point-1 and point-2

取滚动部件的齿状结构尖端的点（如图 9 中所示的考察点 1）和滚动部件靠近辐板圈中间位置的点（如图 9 中所示的考察点 2），分析其在前 8 阶模态下的振幅。

如图 10a 所示，在滚动部件齿状结构的尖端点处，UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在前 8 阶模态下最大振幅均值为 9.966 mm，约为铸铁材料滚动部件在同一点处的最大振幅均值(3.056 mm)的 3 倍，增幅为 6.910 mm，在前 7 阶模态下，UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件的齿尖端点处最大振幅均大于或等于铸铁材料滚动部件，在第 8 阶模态，由于振型分布原因，最大振幅发生在另外一对齿上，故第 8 阶模态 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在该点的振幅相对较小。



a. 考察点 1



b. 考察点 2

图 10 考察点 1, 2 在不同固有频率下的最大振幅

Fig.10 Maximum amplitude under different natural frequency of investigative point-1 and point-2

如图 10b 所示为在靠近辐板圈中间位置所分析点在前 8 阶的振幅，UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在该点处的振幅平均值为 0.358 mm，略小于铸铁材料滚动部件的振幅平均值 (0.571 mm)，降幅为 0.213 mm，所以 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在与牵引机构连接处附近具有更小的平均振幅。另外，在前 8 阶模态下，UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件尽管在考察点 1 处最大振幅达到了约 19 mm，但考察点 2 位置处各阶模态下振幅均小于 1.2 mm，所以采用 UHMWPE 材料的外缘齿

状结构的振动对牵引机构连接位置处的稳定性影响较小。验证了 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件可保证牵引机构运动传递的稳定。

3 结 论

通过 Autodesk Algor Simulation 2011 软件对铸铁材料和 UHMWPE—铸铁组合材料仿生凸齿滚动部件前 8 阶模态的分析, 并比较不同模态阶数下最大振幅、固有频率、以及不同位置点的振幅后得出如下结论。

1) UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在前 8 阶模态下, 各阶模态的最大振幅均大于铸铁材料滚动部件, 增幅为 5.716~30.077 mm, 且 2 种滚动部件最大振幅发生位置均位于实施土壤表面微形貌加工的仿生凸齿的尖端处。

2) 相对与铸铁材料滚动部件前 8 阶模态的频率范围(100~800 Hz), UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件更容易在相对较低的频率下(130~550 Hz)获得更大振幅。

3) UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件在前 8 阶模态下, 在仿生凸齿位置处获得的平均振幅显著大于铸铁材料滚动部件, 增幅为 6.910 mm; 然而在靠近辐板圈中部(即传递给牵引机构), 振幅比铸铁材料滚动部件小, 降幅为 0.213 mm。

以上结论表明 UHMWPE—铸铁组合材料滚动部件具有更优异的潜在脱土性能, 并且该滚动部件所加工的土壤表面微形貌可具有更高的强度, 同时滚动部件在被牵引时有更好的行走稳定性。结论为实施土壤表面微形貌加工的镇压作业时牵引机构转速及前进速度的选择, 以及在滚动部件上增加其他激励装置, 提供了设计参考依据。

[参 考 文 献]

- [1] 于希臣, 孙占祥, 郑家明, 等. 不同镇压方式对玉米生长发育及产量的影响[J]. 杂粮作物, 2002, 22(5): 271—273. Yu Xichen, Sun Zhanxiang, Zhen Jiaming, et al. Effects of different methods of compaction on corn's growth and production[J]. Rain Fed Crops, 2002, 22(5): 271—273. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郭颖杰, 李云飞, 袁月明, 等. 春播镇压对淡黑钙土含水量影响的试验研究[J]. 吉林农业大学学报, 1999, 21(2): 66—69. Guo Yingjie, Li Yunfei, Yuan Yueming, et al. Effect of rolling in spring seeding time on the moisture content of light chernozem soil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1999, 21(2): 66—69. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李云飞, 张盛文, 袁月明. 垄作种床松散土壤力学特性的研究[J]. 农业机械学报, 1995, 26(4): 68—72. Li Yunfei, Zhang Shengwen, Yuan Yueming. Study on mechanics characteristics of porous soil around ridge culture seed bed[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 1995, 26(4): 68—72. (in Chinese with English abstract)
- [4] 周钧, 姜谋余, 陈文猛, 等. 冲压机密实土壤灌溉节水新技术试验及应用[J]. 农村水利, 2009(17): 34—36. Zhou Jun, Jiang Mouyu, Cheng Wenmeng, et al. Experiment and application on new technology for compacted soil irrigation with punching machines[J]. China Water Resources, 2009(17): 34—36. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘广勤, 张金宏, 俞青荣, 等. 土壤压实节水对水稻生长及土壤生态的影响[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(3): 284—287. Liu Guangqin, Zhang Jinhong, Yu Qingrong, et al. Effect of soil compacting and water saving irrigation on rice growth and soil biological activities[J]. Jiang Su Journal of Agricultural Science, 2008, 24(3): 284—287. (in Chinese with English abstract)
- [6] Truman C C, Nuti R C. Improved water capture and erosion reduction through furrow diking[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(7): 1071—1077.
- [7] Truman C C, Nuti R C. Furrow diking in conservation tillage[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(6): 835—840.
- [8] C. Patrick, C. Kechavarzi, I. T. James, et al. Developing reservoir tillage technology for semi-arid environments. Soil Use and Management, 2007, 23(2): 185—191.
- [9] Nuti R C, Lamb M C, Sorensen R B, et al. Agronomic and economic response to furrow diking tillage in irrigated and non-irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(7): 1078—1084.
- [10] R.J. Gordona, A.C. VanderZaagd, P.A. Dekkera, et al. Impact of modified tillage on runoff and nutrient loads from potato fields in Prince Edward Island[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98, (12): 1782—1788.
- [11] Hackwell S G, Rochester E W, Yoo K H, et al. Impact of reservoir tillage on water intake and soil erosion[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(2): 436—442.
- [12] Jin Tong, Jiyu Sun, Donghui Chen, et al. Geometrical features and wettability of dung beetles and potential biomimetic engineering applications in tillage implements[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80(1): 1—12.
- [13] Ren Luquan, Tong Jin, Li Jianqiao, et al. SW-Soil and Water: Soil Adhesion and Biomimetics of Soil-engaging Components: a Review. 2001, 79(3): 239—263.
- [14] Bandalan E P, Salokhe V M, Gupta C P, et al. Performance of an oscillating subsoiler in breaking a hardpan[J]. Journal of Terramechanics, 1999, 36(2): 117—125.
- [15] Wang X L, N Ito, K Kito, P P Garcia, et al. Study on use of vibration to reduce soil adhesion[J]. Journal of Terramechanics, 1998, 35(2): 87—101.
- [16] 邱立春, 李宝筏. 自激振动深松机减阻试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 72—75. Qiu Lichun, Li Baofa. Experimental study on the self excited vibration subsoiler for reducing draft force[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2000, 16(6): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李霞, 付俊峰, 张东兴. 基于振动减阻原理的深松机牵引阻力试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 32—36.
Li Xia, Fu Junfeng, Zhang Dongxing. Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张志峰, 郝飞, 冯忠绪. 振动轮下土壤的动态响应分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 94—97.
Zhang Zhifeng, Hao Fei, Feng Zhongxu. Its influencing factors on stress distribution of soil under vibration drum[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(7): 94—97. (in Chinese with English abstract)
- [19] 谢欣然. 振动加速度与土壤压实状况关系分析[D]. 重庆交通大学, 2009.
Xie Xinran. Vibratory Acceleration and Soil's Compaction Status Connection Analysis[D]. Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [20] 马学良. 振荡压路机压实动力学及压实过程控制关键技术的研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
Ma Xueliang. Study on Compaction Dynamics and Key Technology of Compaction Process Control of Oscillatory Roller[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [21] 秦四成, 程悦菘, 李忠, 等. 土壤振动压实下动态性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 26—29.
Qin Sicheng, Chen Yuesun, Li Zhong, et al. Dynamic study on the soil compaction by vibratory roller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2001, 17(4): 26—29. (in Chinese with English abstract)
- [22] 石安富, 龚云表. 工程塑料手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001.
- [23] Francois Cardarelli. Materials Handbook A Concise Desktop Reference 2nd edition[M]. London: Springer, 2008
- [24] 管迪华. 模态分析技术[M]. 清华大学出版社, 1996.
- [25] 权龙哲, 佟金, 曾百功, 等. 玉米根茬收获系统的有限元模态分析与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 15—20.
Quan Longzhe, Tong Jin, Zeng Baigong, et al. Finite element mode analysis and experiment of corn stubble harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 15—20. (in Chinese with English abstract)
- [26] 韩志武, 吕尤, 董立春. 仿生表面形态齿轮的模态分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(3): 1604—1608.
Han Zhiwu, Lü You, Dong Lichun. Modal analysis of gear with bionic surface morphology[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(3): 1604—1608. (in Chinese with English abstract)
- [27] 闻荻江, 张力, 张恒. 聚合物基复合材料发动机体的模态试验分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 22—24.
Wen Dijiang, Zhang Li, Zhang Heng. Modal experiment and analysis of resin based composite engine block[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2005, 21(2): 22—24. (in Chinese with English abstract)
- [28] 钟江, 乔欣, 王扬渝, 等. 快速精确获取设计中农业机械模态模型的方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 129—134.
Zhong Jiang, Qiao Xin, Wang Yangyu, et al. Fast and accurate obtaining modal model for designing agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2010, 26(1): 129—134. (in Chinese with English abstract)
- [29] Gholamhossein Shahgoli, John Fielke, Jacky Desbiolles, et al. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 202—210.
- [30] 张海鹰, 廖建勇. 改进的模糊化神经网络的土壤振动掘削阻力软测量模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 188—192.
Zhang Haiying, Liao Jianyong. Soft-sensing model on vibration cutting resistance from rock and soil based on improved fuzzy neural networks theory. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 188—192. (in Chinese with English abstract)
- [31] 陈江南, 马成林, 左春桢, 等. 用频谱分析方法研究农机土壤部件的随机受力[J]. 农业机械学报, 1998, 29(2): 11—15.
Chen Jiangnan, Ma Chenglin, Zuo Chuncheng, et al. The spectral analysis method of random forces on the soil-working tool[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1998, 29(2): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [32] 蒋建东, 高洁, 赵颖娣. 土壤旋切振动减阻的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 58—62.
Jiang Jiandong, Gao Jie, Zhao Yingdi. Finite element simulation and analysis on soil rotary tillage with external vibration excitation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 58—62. (in Chinese with English abstract)

Modal analysis of bionic convex teeth rolling component composed of different materials

Zhang Zhihong^{1,2}, Tong Jin^{1,2*}, Chen Donghui^{1,2}, Sun Jiyu^{1,2}, Ma Yunhai^{1,2}

(1. School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University (Nanling Campus), Changchun 130022, China;

2. The Key Laboratory of Bionic Engineering (Ministry of Education, China), Jilin University (Nanling Campus),
5988 Renmin Street, Changchun 130022, China)

Abstract: To investigate effects of bionic convex teeth rolling component composed of different materials, on adhesion-reducing and micro-basin processing performance, with the assist of Autodesk Algor Simulation software, modal analysis of rolling components made from cast iron material and UHMWPE-cast iron combinatorial material was performed. Using the anterior 8 ranks of modals, the natural frequency and maximum amplitude of the two types of rolling components were compared. It was found that at the anterior eight ranks of modal, the maximum amplitude at each ranks of UHMWPE-cast iron combinatorial material rolling component was higher than that of cast iron material, the increment was between 5.716 and 30.077 mm. Moreover, combinatorial material rolling component could reach higher amplitude at relatively lower natural frequency. Furthermore, near the center of the wheel disk, the average amplitude was 0.213 mm less than that of cast iron rolling component. The results show that compare with cast iron material rolling component, UHMWPE-cast iron combinatorial material rolling component can acquire the better adhesion reduction ability on the convex teeth, ensure the structural strength of the depressions on soil surface and have enhanced stability at the center of the wheel disk. These findings can give indications to the choice of materials for bionic convex teeth rolling component, speed setting for tractor and design of the excitation device on rolling components.

Key words: bionics, vibration, modal analysis, Algor, micro-basin tillage