

割草机传动系统弧齿锥齿轮分析与优化

冯杰, 王娟, 张立勇, 李同杰

安徽科技学院智能制造学院, 安徽 滁州

收稿日期: 2026年1月5日; 录用日期: 2026年3月4日; 发布日期: 2026年3月24日

摘要

以背负式割草机传动系统为研究对象, 使用HyperMesh处理绘制的三维模型, 并在Abaqus中对壳体进行多模态分析, 取前20阶模态, 校核壳体与齿轮的振动相关性; 使用KISSsoft对齿轮力学性能展开仿真分析, 获得齿轮的齿面安全系数与齿根安全系数, 以及啮合过程中的接触斑点; 然后对产品进行耐久实验, 完成后显微观察弧齿锥齿轮齿面磨损印迹, 并验证仿真模型的正确性; 针对观察到的齿轮偏载, 使用KISSsoft进行齿轮的鼓型修型和螺旋角修型, 优化接触斑点。研究表明: 传动系统的壳体与齿轮在实测工况下不存在共振, 齿轮的齿面和齿根安全系数合格, 齿轮工作齿面存在偏磨现象, 通过齿轮修型将接触应力转移至齿面中心, 可以降低接触应力, 减少齿面磨损, 提升割草机传动系统的运行平稳性。

关键词

背负式割草机, 弧齿锥齿轮, 模态分析, 强度分析, 齿轮修型

Analysis and Optimization of Spiral Bevel Gear in Mower Transmission System

Jie Feng, Juan Wang, Liyong Zhang, Tongjie Li

College of Intelligent Manufacturing, Anhui Science and Technology University, Chuzhou Anhui

Received: January 5, 2026; accepted: March 4, 2026; published: March 24, 2026

Abstract

Taking the transmission system of a backpack lawn mower as the research object, a 3D model was processed and drawn using HyperMesh, and a multimodal analysis was conducted on the shell in Abaqus. The first 20 modes were selected to verify the vibration correlation between the shell and the gear; using KISSsoft to conduct simulation analysis on the mechanical properties of gears, obtain the tooth surface safety factor and tooth root safety factor of gears, as well as the contact spots during meshing process; then, a durability test is conducted on the product, and after completion, the wear

imprint on the tooth surface of the spiral bevel gear is observed microscopically to verify the correctness of the simulation model; to address the observed gear misalignment, KISSsoft was used to perform drum and helix angle modifications on the gears, optimizing the contact spots. The research results show that there is no resonance between the housing of the transmission system and the gear under actual operating conditions, and the safety factors of the gear teeth and roots are qualified. There is a phenomenon of eccentric wear on the working tooth surface of the gear. By modifying the gear to transfer the contact stress to the center of the tooth surface, the contact stress can be reduced, the tooth surface wear can be reduced, and the operation stability of the lawn mower transmission system can be improved.

Keywords

Shoulder Carrying Mower, Spiral Bevel Gear, Modal Analysis, Strength Analysis, Gear Modification

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现今的割草装备中,背负式割草机因为体积小、移动性强、操作简便而受到众多用户的青睐。根据动力来源不同,目前主要有汽油式和电动式两种类型,其中汽油式由于功率高、价格低、适合野外作业的优点大约占市场的65%至70%,其缺点是噪音较大,使用场景如农田、丘陵、山地等野外环境。随着电驱动技术的发展,电动割草机比例正在快速上升,其优点是低噪音、零排放,缺点是需要较大的储能装置且价格较高,更适合城市园林、家庭庭院等场景。在设备中无论使用哪种能源驱动方式,都会使用弧齿锥齿轮副进行动力传递,因为弧齿锥齿轮具有承载能力强且动力可以在交错轴中传递等优点。然而,在实际工作中,弧齿锥齿轮常面临复杂工况,可能会出现异常振动,易出现偏磨、点蚀等问题,导致传动性能下降,甚至引发故障。因此,对割草机传动系统弧齿锥齿轮进行深入研究,优化其设计与性能具有重要的现实意义。

弧齿锥齿轮作为空间交错轴传动系统的关键部件,广范应用在船舶动力系统、飞机发动机、汽车变速箱或者减速器中。在如今工业化发展的过程中,对锥齿轮传动有着比以往更高的要求,例如噪声低、效率高、强度高、寿命长等,这就使得弧齿锥齿轮受到更多关注,对其的研究也日益受到学术界和工程界的重视。在齿轮相关啮合理论研究的方面,Litvin和Fuentes[1]创建齿轮几何学理论,为齿轮的精确建模提供了理论支撑。孔瑞杰等[2]探索了弧齿锥齿轮啮合传动过程中的温度变化问题,并进行了热-结构间接耦合的仿真分析,得到了单齿热变形的情况。孙莉等[3]研究了航空发动机的锥齿轮传动系统,开展了非线性动力学的探究。在加工制造方面,王李想等[4]分析了锻打速度和工件加热温度等工艺参数对温锻成形应力应变的影响规律。王浩等[5]探究了弧齿锥齿轮铣齿加工过程,对加工表面的残余应力影响规律展开了研究。Habibi等[6]研究了在加工过程中,锥齿轮刀具与工件之间的位置关系,建立模型并计算了铣削力。Jiang等[7]对弧齿锥齿轮切削加工的切削力和加工效率进行了计算,建立了多齿动态切削力模型,仿真和试验都证明了其正确性。Wu等[8]通过仿真探索了覆盖率对18CrNiMo7-6钢三维粗糙度的影响,100%覆盖率后,再增加喷丸时间 Sa 值、 Sq 值会减小。在设计领域,王应远等[9]对齿轮进行遗传算法多目标优化,改善齿轮对变形及受力情况。徐文博等[10]结合遗传算法与传递误差计算方法,获得了稳健修型参数。Bruyère和Velex[11]研究并提出了能够获得最佳齿廓修型和螺旋线修型参数的齿轮副无量

纲性能图谱。Bonori 等[12]使用遗传算法与静态非线性的有限元法最终获得了最佳齿廓修型参数。

在许多专家和学者的努力研究下,推动了齿轮行业的快速发展,尤其是随着计算机技术的深度应用,通过数值模拟与实验结合的方法,可以在弧齿锥齿轮研究方面进行更多的探索。本文结合数值仿真与实验测试,研究割草机弧齿锥齿轮啮合性能,并提出优化设计方法,以为高性能齿轮传动系统的开发提供参考。

2. 割草机传动系统结构

割草机的动力源通常为汽油机或电动机,动力经传动系统传递至刀头,实现草坪的修剪作业。割草机动力通过传动系统中的弧齿锥齿轮副进行传递并改变动力传递方向,以满足工作角度要求。传动过程中,弧齿锥齿轮减速增扭承受着较大的载荷,其性能的优劣直接影响着割草机的整体工作效率与稳定性。如图 1 所示,为市面上的一款背负式割草机的传动系统。

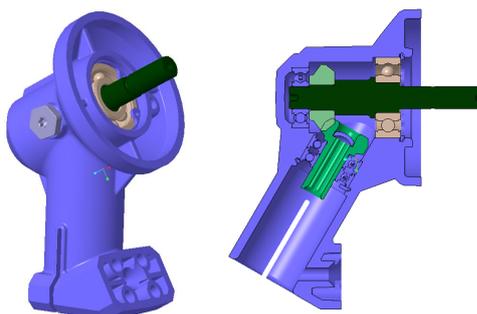


Figure 1. Transmission system structure of backpack lawn mower
图 1. 背负式割草机传动系统结构

此传动系统由壳体 and 一对弧齿锥齿轮副两个部分组成,其核心为齿轴部分,对其拆解后实物如图 2 所示。水平放置的是输出轴,通过两个轴承与壳体相连,斜着放置的是输入轴,通过同一侧的两个轴承与壳体相连。



Figure 2. Backpack lawn mower gear shaft
图 2. 背负式割草机齿轴

3. 壳体模态分析

图 1 是三维模型,在此基础上,将模型文件导入 HyperMesh 进行几何清理。主要工作是去除在三维模型绘制中产生的多余、重叠的线、面,并补充模型上破损的面,完成后进行体网格划分,划分的同时检验网格质量。本次共划分了 479,641 个单元,单元类型是四面体 C3D4,质量合格后保存。因为 Abaqus 具

有强大的求解能力，所以将处理后的文件导入到 Abaqus 中，并对此进行数值模型的建立，如图 3 所示。



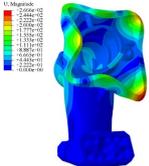
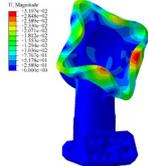
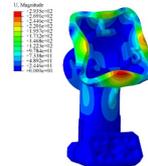
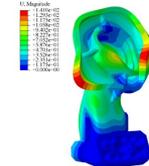
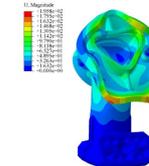
Figure 3. Numerical model of the lawn mower casing in Abaqus
图 3. Abaqus 中割草机壳体数值模型

在此软件提供的前处理面板中进行参数设置。材料的杨氏模量 $E = 210 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ ，质量密度为 7850 kg/m^3 ，由于壳体通过底部四个螺栓位置进行连接固定，所以在边界条件中将螺栓连接位置完全约束，然后创建频率分析来计算壳体的模态。壳体模态的分析结果可以用于校核此传动装置的噪音与振动性能。在一些高端应用如航空航天、精密机床中要求分析至 20 阶以上，并且在以往的研究中发现可能存在某阶模态对噪声贡献率非线性增长，为了更加具有说服力，本次进行壳体的前 20 阶模态分析，以排除所有潜在共振点，其结果如下表 1 所示。

Table 1. Modal analysis of the first 20 modes of the lawn mower casing
表 1. 割草机壳体前 20 阶模态分析

Order	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
f/Hz	2052.3	2291.3	4468.8	6862.9	7719.4
Mode					
Order	6 th	7 th	8 th	9 th	10 th
f/Hz	8262.1	9472.8	10,682	12,725	13,992
Mode					
Order	11 st	12 nd	13 rd	14 th	15 th
f/Hz	15,190	15,538	16,373	17,255	19,025
Mode					

续表

Order	16 st	17 nd	18 rd	19 th	20 th
f/Hz	19,129	19,761	21,675	23,582	24,415
Mode					

从表中分析结果的振型来看，壳体的位移主要集中在上面输出端，其结构更易受到不同频率激励源的影响。另一方面，随着阶数的增加，壳体对应的约束模态频率也会一直增长，且分布区间跨度十分宽广，这就要求传动中齿轮的啮合频率必须控制在这个区间之外，否则会引起不必要的自身振动激励源。

传动系统利用弧齿锥齿轮进行动力传递，可以在改变动力传递方向的同时达到减速增扭的目的，其本质上是一个可以改变动力路径的一级减速器。输入轴的小齿轮齿数 Z_1 为 15，输出轴的大齿轮齿数 Z_2 为 21，速比 $i = Z_2/Z_1 = 1.4$ 。由发动机传递的输入转速区间 n 为 0~2000 r/min，齿轮的啮合频率计算公式为：

$$f = \frac{n \times Z}{60}$$

式中， f 是齿轮的啮合频率， n 是输入轴转速， Z 是一级传动中的输入轴齿数。通过计算传动系统的最大啮合频率为 500 Hz，与壳体模态分析中的最小频率 2052.3 Hz 相差甚远，所以传动系统与壳体之间不会产生共振激励，不会影响传动的稳定性和静谧性。证明了壳体结构与齿轮齿数配置不存在冲突。

4. 弧齿锥齿轮仿真与实验

4.1. KISSsoft 建模仿真

KISSsoft 软件是一款专门用于传动系统设计、分析与优化的专业软件，具有强大的建模、仿真功能。在对割草机传动系统弧齿锥齿轮进行建模时，首先需要输入齿轮的基本参数，其中齿数为 15 和 21，模数为 1.25，螺旋角 35° ，齿宽都为 6.26，法截面压力角为 20° ，同时还需定义齿轮的材料属性、热处理工艺等相关信息。利用 KISSsoft 软件的几何 3D 功能，能够快速构建出精确的弧齿锥齿轮模型，如图 4 所示。在建模过程中，充分考虑齿轮的实际结构与加工工艺，确保模型的真实性与可靠性。

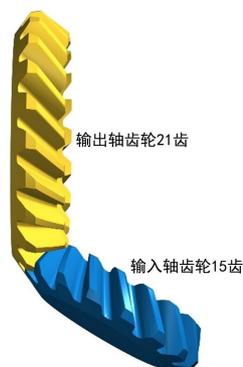


Figure 4. Geometric model of spiral bevel gear
图 4. 弧齿锥齿轮几何模型

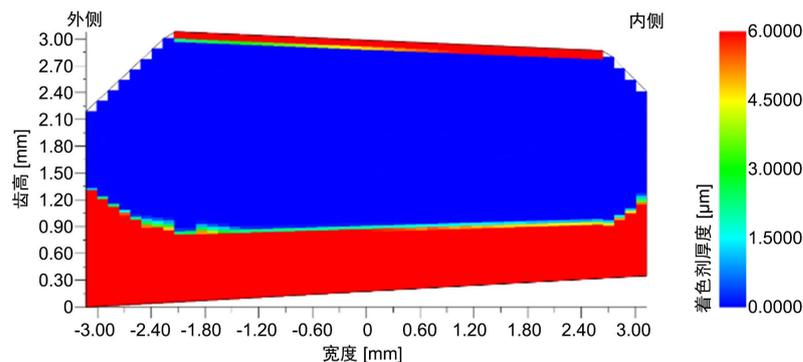
根据厂家的产品要求, 需要进行台架耐久测试, 以检验其性能参数是否符合设计标准。测试工况为输入功率 1.5 kW, 输入轴转速 2000 r/min 持续运行 1200 个小时, 关注齿轮传动情况。本次使用实际测试工况参数进行仿真, 在软件中进入强度仿真模块输入工况数值, 进行强度仿真, 依据 ISO 10300 经计算得出齿轮的齿根和齿面安全系数如表 2 所示。

Table 2. Gear safety factors
表 2. 齿轮安全系数

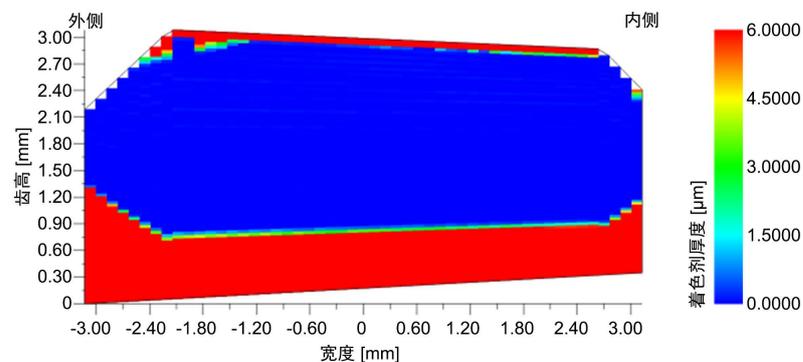
	齿轮 1	齿轮 2
齿根安全系数	1.491	1.556
齿面安全系数	1.103	1.114

如上表所示, 齿根安全系数和齿面安全系数均超过了设计标准要求的 1.0 系数, 达到了设计目标, 齿面和齿根强度均合格, 理论上不会出现断齿与齿面点蚀剥落的情况。

除了齿轮强度之外, 还应该考虑齿轮的啮合质量, 而齿轮接触斑点是评价齿轮啮合质量的重要指标。它指的是齿轮副在啮合过程中, 齿面实际接触区域在齿面上形成的可见痕迹。其形状、大小和位置反映了齿面载荷分布状态, 斑点面积过小可能导致局部应力集中, 影响疲劳寿命, 不均匀的接触还易引发振动和噪声, 斑点优化可改善动态性能。实践中通常在齿轮表面涂抹普鲁士蓝染料或红丹粉, 然后转动相互啮合的齿轮副, 染料被抹去的区域即为接触斑点。这里通过 KISSsoft 可以进行同样的着色剂仿真, 着色剂涂抹厚度为 6 μm , 在未加载载荷的情况下, 仿真后的弧齿锥齿轮接触区域如下图 5 所示。



(a) 小齿轮着色剂分布区域



(b) 大齿轮着色剂分布区域

Figure 5. Contact spot area of spiral bevel gear
图 5. 弧齿锥齿轮接触斑点区域

上图显示, 无论小齿轮还是大齿轮, 它们的接触斑点区域都在中部偏齿顶位置, 并不处于整个齿面的中心。为了进一步探究符合实际接触斑点以及接触区域的应力大小, 给齿轮加上实际测试的工况载荷, 并进行接触应力的仿真, 其加载后的接触斑点应力结果如下图 6 所示。

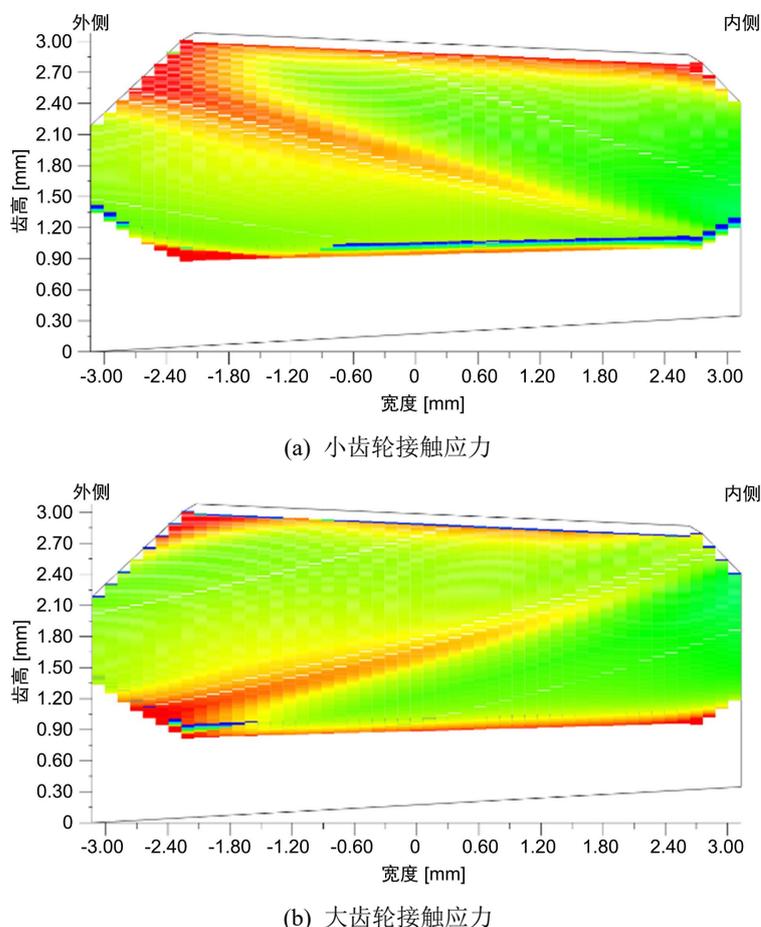


Figure 6. Distribution of contact stress in spiral bevel gear
图 6. 弧齿锥齿轮接触应力分布

计算结果表明, 小齿轮外侧齿根存在应力集中, 在上端齿顶部分的高应力区域较大; 对于大齿轮而言, 齿面下端的应力较高, 区域较大, 在啮合时与小齿轮的外侧上端高应力区域相接触, 这部分承担了较大载荷压力, 是齿轮齿面偏载的体现。由此看来, 在实际测试工况下, 齿面的载荷分布并不均匀, 不能较为集中地分布在齿面中心。相较于图 5 未加载荷时的接触, 图 6 由于增加了实际工况下的荷载, 其结果是模拟真实运行情况产生的, 可以与实验产生的结果进行对比。为了进一步验证仿真结果, 需要进行实验对照。

4.2. 测试及分析

通过 KISSsoft 仿真校核了齿轮的齿面安全系数及齿根安全系数, 得到了齿轮齿面的接触应力, 为了与仿真进行对照, 验证模型的正确性, 需要对实物进行台架测试, 测试工况使用之前的真实工况, 本次测试在某企业内进行。测试完成后从壳体中取出齿轮副并进行适当清理, 然后两个齿轮轴拿到工业显微镜下进行观察, 如图 7 所示。



Figure 7. Microscopic observation of gear arc-shaped surface
图 7. 齿轮弧形表面显微观察

割草机没有反转工况，运转时接触齿面不变，所以在观察时只需要关注保持接触的驱动齿面和被驱动齿面即可。将小齿轮和大齿轮分别放置在工作台上进行观察，结果如图 8 所示。



(a) 小齿轮磨损 (b) 大齿轮磨损

Figure 8. Tooth surface wear state
图 8. 齿面磨损状况

图中小齿轮驱动表面的上端观察到较大的磨损，这与图 5 中的染色剂显示的接触斑点位置高度重合，齿顶部分有些许缺失，这与图 6 小齿轮顶端的高应力区域一致；在大齿轮上，由于齿数较多，单齿参与啮合的次数相对小齿轮少，所以表面磨损较轻，但依然可以清晰地看到图(b)中相对集中的接触斑点，这与图 5 的染色剂显示的接触斑点相同，并且在齿轮顶部位置也存在较大的磨损，可以清晰地看到较深的划痕，这与图 6 中的大齿轮齿顶位置的高应力接触区域相吻合，是齿轮载荷偏载所导致的异常磨损。

通过台架实验得到的齿轮接触斑点、磨损情况与 KISSsoft 软件的仿真结果一致，这说明了仿真模型的正确性。另一方面，对于观察到的偏载问题，还需要对齿轮的微观几何进行修型，降低偏载提高齿轮强度、寿命及稳定性。

4.3. 齿轮修型

通过实验发现齿轮存在偏磨情况，仿真结果也表明，齿轮在加载荷和未加载荷情况下的接触斑点都偏离齿面中心，尤其是在加载工况下，出现了一些偏离中心的高应力接触区域，这些证明了齿轮偏载的发生。齿轮偏载会导致齿面承受不均匀的载荷，局部区域承受过大的应力，从而引起齿面磨损和点蚀，其次长期偏载会导致齿面剥落或断齿。偏载还会使齿轮啮合不良，传动不平稳，引起设备的振动和噪音，影响设备的稳定性和使用寿命。为了解决偏载问题，在使用工况下针对接触齿面进行齿面修型工作。参考实验与仿真的高应力磨损区域，需要对齿轮的齿形齿向进行鼓型修型和螺旋角修型。

通过实验已经验证了 KISSsoft 模型的正确性，这里继续使用 KISSsoft 模型来进行修型工作。针对图

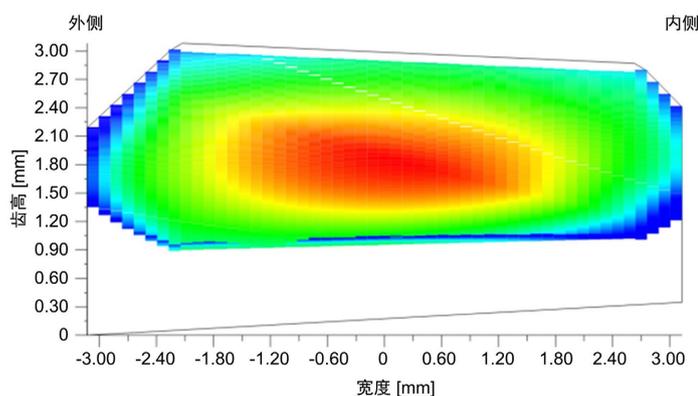
6 中显示的高应力偏载区域, 需要通过修型的方式将高应力接触区域调整至齿面中心位置, 并降低最大接触应力, 减少齿面磨损。在图 6 中, 小齿轮最大应力位于齿轮外侧的齿根位置, 大齿轮最大应力位于齿轮外侧的齿顶位置, 在啮合过程中这两个区域相互接触, 产生最大应力值为 2108.1 MPa, 远高于其他位置应力, 且偏离齿面中心位置, 为此采用螺旋角修型与鼓型修型对齿面接触应力位置进行调整。具体修型参数如下表 3 所示。

Table 3. Gear type modification parameters

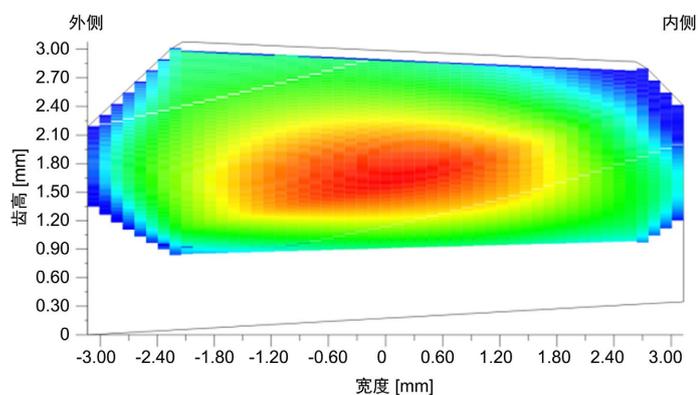
表 3. 齿轮修型参数

齿轮	齿面	修型方式	量(μm)
小齿轮	左齿面	齿向鼓型	3
小齿轮	左齿面	齿廓鼓型	5
小齿轮	左齿面	螺旋角修型	3
大齿轮	左齿面	齿向鼓型	5
大齿轮	左齿面	齿廓鼓型	3

在 KISSsoft 通过螺旋角修型可以调节载荷往齿侧方向的偏载, 齿向和齿廓的鼓型可以将应力往齿面中心调整, 多次调整参数, 对模型的真实工况进行仿真, 可以得到如下图 9 所示的齿面应力云图。



(a) 修型后小齿轮接触应力



(b) 修型后大齿轮接触应力

Figure 9. Distribution of contact stress in spiral bevel gear after type modification
图 9. 修型后弧齿锥齿轮接触应力分布

图中,小齿轮与大齿轮的接触应力均集中在工作齿面的中心位置,最大接触应力也下降到了 1573 MPa,下降幅度高达 25.4%,极大地降低了齿轮的磨损,减少了由于传动误差引起的噪音问题。

5. 结论

对背负式割草机的传动系统进行拆解建模,并对于可能产生噪音的壳体进行了模态分析,基于耐久测试进行了齿轮修型,由此可以得到以下结论:

- 1) 割草机传动系统的壳体模态分析结果显示,其与齿轴在真实工况下不会发生共振,其大小与结构设计合理。
- 2) KISSsoft 进行齿轮强度校核,齿面安全系数、齿根安全系数均合格。
- 3) 耐久测试后的齿面显微观察结果显示的偏载磨损区域与 KISSsoft 仿真结果一致,证明了仿真模型的正确性。
- 4) 真实工况下齿面存在偏载磨损,需要进行齿轮修型,修型后可以大幅度降低齿面接触应力,减少齿轮偏磨,从而提高使用寿命。

基金项目

侧挂割草机的整机外观设计、关键技术开发及工程化应用(tzy202322);安徽省自然科学基金面上项目(2108085ME167)。

参考文献

- [1] Litvin, F.L. and Fuentes, A. (2004) *Gear Geometry and Applied Theory*. 2nd Edition, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511547126>
- [2] 孔瑞杰,孙月海,王明阳. 线接触弧齿锥齿轮传动的温度场与热变形研究[J]. 机械传动, 2025, 49(5): 1-9.
- [3] 孙莉,刘峰峰,杨光荣,等. 考虑齿侧间隙的弧齿锥齿轮系统非线性动力学特性研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(8): 1-8.
- [4] 王理想,蒋闯,邓静,等. 弧齿锥齿轮温锻成形数值模拟及工艺参数优化[J]. 机械传动, 2025, 49(11): 17-24.
- [5] 王浩,张丰收,蒋闯. 基于斜角切削模型的弧齿锥齿轮加工残余应力仿真分析[J]. 机械传动, 2023, 47(9): 96-102.
- [6] Habibi, M. and Chen, Z.C. (2016) A Semi-Analytical Approach to Un-Deformed Chip Boundary Theory and Cutting Force Prediction in Face-Hobbing of Bevel Gears. *Computer-Aided Design*, **73**, 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.12.001>
- [7] Jiang, C., Deng, X., Zhang, H., Geng, L. and Nie, S. (2017) Prediction and Simulation of Cutting Force in Hypoid Gear Machining Using Forming Method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **93**, 2471-2483. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0656-8>
- [8] Wu, J.Z., Liu, H.J., Wei, P.T., et al. (2020) Effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress and Surface Roughness of 18CrNiMo7-6 Steel. *International Journal of Mechanical Sciences*, **183**, Article ID: 105785. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105785>
- [9] 王应远,袁玉佳,费凌. 基于遗传算法的重型齿轮性能优化设计[J]. 机械研究与应用, 2025, 38(1): 123-127.
- [10] 徐文博,袁冰,马国亮,等. 考虑载荷变化域的斜齿轮副齿面组合修形稳健设计[J]. 机械传动, 2024, 48(8): 89-96.
- [11] Bruyère, J. and Velez, P. (2022) Towards General Performance Diagrams to Define Optimum Profile and Lead Modifications with Regard to Transmission Error in Spur and Helical Gears. *Mechanism and Machine Theory*, **176**, Article ID: 105021. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105021>
- [12] Bonori, G., Barbieri, M. and Pellicano, F. (2008) Optimum Profile Modifications of Spur Gears by Means of Genetic Algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, **313**, 603-616. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.12.013>