

朱超,符晓玲,王苗,等. 基于 SolidWorks 的齿轮传动结构分析与设计[J]. 江苏农业科学,2020,48(16):241-250.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.16.047

基于 SolidWorks 的齿轮传动结构分析与设计

朱超¹,符晓玲¹,王苗²,张红欣¹

(1. 昌吉学院物理系,新疆昌吉 831100; 2. 新疆农业职业技术学院,新疆昌吉 831100)

摘要:在齿轮设计制造加工过程中,为了进一步提高齿轮的传动性能,通过 SolidWorks 对齿轮传动进行设计、三维建模及虚拟装配分析,利用参数化方法改变齿轮材料和参数来观察传动过程中的物理效应,从而找出最佳传动性能参数。利用 simulation 插件对齿轮施加静载荷生成模态云图,根据模态云图中薄弱点不断对齿轮材料和参数设计进行优化,优化结果显示,改变材料、齿轮设计参数、载荷大小后齿轮传动特性产生了明显的变化,最终根据传动特性对比分析找出最佳的材料和参数,本试验的结果可为机械设计制造相关产业提供理论依据。

关键词:SolidWorks; 齿轮传动; 参数化; 三维建模; 模态云图

中图分类号: TH132.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)16-0241-09

齿轮传动具有结构紧凑、精确度高、效率高、寿命长等优点,是机械应用中最可靠的一种传动方式^[1]。齿轮传动可以实现变速、变向、分配动力及一些操纵控制功能,现代机械设计中主要采用大型三维软件的模拟仿真设计。SolidWorks 软件功能强大,简单易学,可以满足大多数公司的设计研发需求,该软件提供模型建立、材料应用及应力分析等实用功能,可将理论与实际设计结合并用,有效缩减设计周期。SolidWorks 软件可对齿轮类型进行设计、装配、仿真,也可对齿轮进行应力分析与结构分

析。通过模拟仿真分析可以提前发现齿轮的薄弱环节,并针对设计中的不足及时修正从而有效提高设计效率降低制造成本。

1 建模设计思路

理论上能够使 2 个齿轮啮合的曲线有很多种,同时将有多种齿轮的建模方法,但大多数曲线生产加工非常困难,只有少数曲线能满足齿轮的完全啮合且具有易加工等特点,如渐开线齿廓、摆线齿廓、圆弧齿廓、抛物线齿廓等^[2],它们各自的优缺点见表 1。

表 1 齿廓类型特点

齿廓名称	应用范围与特点
渐开线齿廓	应用广,传动比恒定、工作稳定可靠、可分离性、齿轮之间具有相对的滑动,便于制造、安装、互换使用等优点有利于齿轮参数测量与模拟仿真分析
摆线齿廓	应用较少,齿廓重合度较大、传动平稳、磨损较小、润滑良好、最小齿数几乎不受限制,但是互换性很差、制造困难、不具可分性、中心距要求精准、传动过程啮合角大小不断变化、受力不平稳
圆弧齿廓	应用较多,接触强度大、应力集中、传动的效率高、润滑效果好、磨损较为均匀,但容易跑合、制造安装精度要求高、加工困难
抛物线齿廓	应用很少,采用凸凹齿廓形式传动、接触强度高、载荷分布均匀,但易弯曲、难加工、难安装

收稿日期:2020-01-01

基金项目:新疆维吾尔自治区普通高等学校教学改革研究项目(编号:2017JG118);新疆维吾尔自治区本科教育教学研究和改革项目。

作者简介:朱超(1986—),男,新疆奇台人,硕士,讲师,主要从事机械设计制造研究。E-mail:277502286@qq.com。

通信作者:王苗,讲师,从事水力学及河流动力学研究。E-mail:2745044757@qq.com。

对比不同类型齿廓的优缺点之后选用渐开线齿廓进行研究。由于齿轮传动的设计涉及到许多参数变量与材料变化因素,因此,将齿轮传动结构上的关键参数与特征作为研究重点,建立一个参数化模型库,对齿轮传动系统进行参数化建模^[3]。使用 Geartrax 按照模型库中对应的参数进行几何建模,建造符合模型库参数的齿轮,然后进行啮合传动仿真,通过对比齿轮啮合传动物理效应之后进行

有效分析,然后改变齿轮结构参数进行传动效果优化^[4]。以 SolidWorks 为开发平台,打开 Geartrax 生成的工程图与装配图,通过 SolidWorks 工具将装配图中的接触面进行配合定义,选取合理的设计变量,再通过 SolidWorks 的 motion 与 simulation 插件模拟齿轮传动中的力学性能特征,生成相应的应力、形变、应变系数色谱图,通过分析色谱图查找不同参数齿轮的薄弱部位,再针对薄弱部位进行优化改进。同时,改变齿轮材料来适应齿轮在不同环境下的应力载荷要求,最后综合分析,选择能满足实际工况的材料和参数,设计流程见图 1。

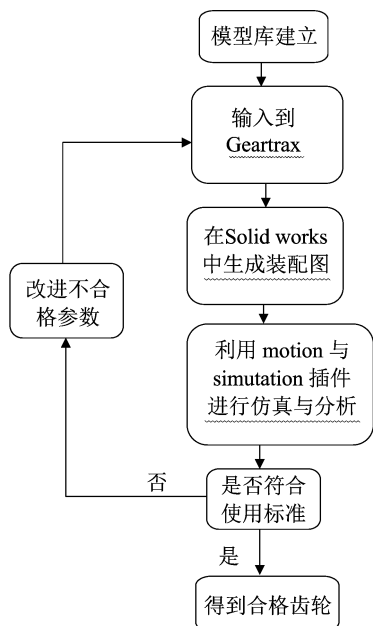


图1 设计流程

1.1 齿轮的参数选择

影响齿轮参数的主要因素有模数、齿数、压力角等,模数主要衡量齿轮规模,决定齿轮分度圆大小;齿数一定,模数越小齿轮的径向尺寸也会越小^[5]。压力角决定齿轮传动性能,我国齿轮标准压力角为 20° ,除此之外还有非标准压力角: 14.5° 、 15.0° 、 17.5° 、 22.5° 等^[5]。齿轮的强度会随着压力角的减小而降低;压力角增大将会使齿轮齿根部分渐开线增长、齿根厚度增大、强度增强,对齿轮传动性能有一定的提高,但压力角过大会导致齿顶齿厚减小而降低齿轮的啮合系数^[6]。该研究选用标准压力角为 20.0° 的齿轮进行建模、分析、设计,通过改变模数、齿数与尺寸大小进行比较分析。

1.2 齿轮材料的选择及处理方法

选取不同模数、齿数的齿轮进行有限元分析,在 SolidWorks 中切换不同材料进行 simulation 应力

分析,通过色谱图可清晰地看到不同参数齿轮的应力分布,对于屈服强度不符合要求的部分进行分析改进,从而制造出满足实际工况的齿轮。在齿轮设计制造过程中选取材料应具备以下几点:(1)高强度、高硬度;(2)高塑性、高韧性、高耐磨性;(3)齿面接触应力载荷承受能力强;(4)轮齿弯曲强度载荷高等;(5)良好的工艺性能;(6)较高的经济性能;齿轮在投入使用之前须进行应力、形变、磨损、应变等校核分析,还要对齿轮的工作环境、失效形式等进行全方位分析,并根据齿轮的几何形状和尺寸、工作中可能受到的最大载荷及使用寿命等,通过应力校核公式分析计算该类型的齿轮是否满足实际工况^[7]。如果校核不满足要求,可能要(1)改变材料种类,选取性能更好的材料;(2)改变齿轮尺寸,前提是满足实际工作环境条件下;(3)对当前齿轮进行高性能热处理来提高力学性能;(4)优化齿轮结构,改变应力分布;通过 SolidWorks 2016 研究平台,将不同参数导入 Geartrax 插件就可以呈现出性能不同的齿轮模型。将中国机械制造标准材料库导入 SolidWorks 2016 利用 simulation 可选择不同的材料,如图 2 所示,该功能的优点是能够模拟测试不同的材料、模数、齿数的齿轮所能适应的应力场合,清晰地看到影响材料的重要参数,从而能够有效地选择齿轮材料,缩短设计周期,最大程度地降低成本,提高齿轮传动的精度与效率。

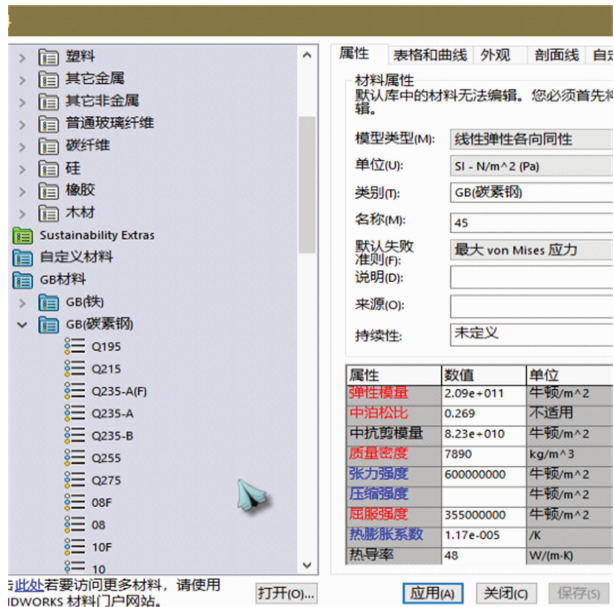


图2 SolidWorks材料选择

1.3 Geartrax 齿轮建模

Geartrax 是一款基于 SolidWorks 软件的齿轮快

速建模软件,通过输入齿轮的各项参数,就可在 SolidWorks 中快速生成三维零件图与装配图,操作界面简单且直观,功能丰富,为齿轮传动机构设计建模提供了便利,同时能够创建各种传动元件实体模型,同时可以根据设计要求随时调整相关参数。

建模思路:(1)将模型库中齿轮的各项参数输入 Geartrax 软件,如图 3 所示;(2)通过 SolidWorks 创建零件图与装配图,生成的齿轮传动机构相对误差很小;(3)对生成的装配图进行约束,采用 motion 与 simulation 插件静应力模态分析;(4)针对应力薄弱区域修改相应参数之后快速生成零件装配图再次进行对比分析,直到满足设计要求。

2 基于 SolidWorks 插件的齿轮模拟分析过程

2.1 模型库的建立

将齿轮分成 2 组进行啮合传动分析, Geartrax 软件可生成一对大小不同的齿轮进行啮合传动,全部采用 20° 标准压力角,模型库见表 2。首先对比分析大节距渐开线齿轮(图 4)与短齿渐开线齿轮(图 5),短齿齿轮的顶高系数为 0.8,顶隙系数为 0.2,此类齿轮可采取较大的正变位,使齿轮的最小齿数不再是最少 17 齿,且不会造成齿顶变尖、根切等问题,

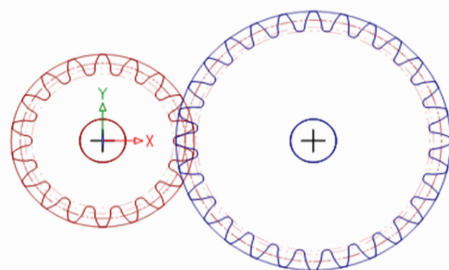


图3 Geartrax 软件截图

表 2 模型库

分组	齿轮模型	齿数	齿宽 (mm)	模数	孔径 (mm)	齿轮速比	节径 (mm)	齿顶高 (mm)	齿根高 (mm)	基圆直径 (mm)	齿厚 (mm)
1	大节距渐开线(20°) 齿轮	30	30	2.0	30	1.0 : 3.3	60	2.0	2.5	56.38	3.14
		100	30	2.0	60	1.0 : 3.3	200	2.0	2.5	187.90	3.14
2	大节距渐开线(20°) 齿轮	30	30	2.5	30	1.0 : 3.3	75	2.5	3.1	70.48	3.93
		100	30	2.5	60	1.0 : 3.3	250	2.5	3.1	234.90	3.93
3	短齿渐开线(20°) 齿轮	30	30	2.0	30	1.0 : 3.3	60	1.6	2.0	56.38	3.14
		100	30	2.0	60	1.0 : 3.3	200	1.6	2.0	187.90	3.14
4	短齿渐开线(20°) 齿轮	30	30	2.5	30	1.0 : 3.3	75	2.0	2.5	70.48	3.93
		100	30	2.5	60	1.0 : 3.3	250	2.0	2.5	234.90	3.93



图4 大节距渐开线(20°) 齿轮

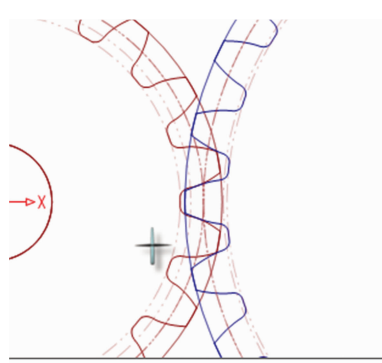


图5 短齿渐开线(20°) 齿轮

但是短齿齿轮会降低齿轮啮合的重合系数。

压力角恒定,选择大节距渐开线齿轮与短齿渐开线齿轮时径向尺寸不同,为了使不同参数齿轮在相同的工作空间进行比较分析,须要修改齿轮模数来确保齿轮的啮合空间。齿轮材料选取 45#钢,选出色谱图结果最佳的一组之后进行材料的最佳选取。

2.2 基于 Geartrax 的齿轮建模过程

将表 2 模型库中的 4 组参数逐一输入到 Geartrax 插件中建模,在 Geartrax 中点击 CAD 建立

模型,该插件将在 SolidWorks 中会自动完成建模操作,生成的齿轮模型完全符合模型库中的参数,齿轮啮合装配效果见图 6。材料选择 45#钢,小齿轮节径控制在 60 mm,大齿轮节径为 200 mm,第 1 组与第 3 组进行对比分析。第 2 组对比为大节距渐开线(20°)(第 2 组齿轮)与短齿渐开线(20°)(第 4 组齿轮)在模数为 2.5 的条件下生成模型,第 2 组与第 4 组进行对比分析,大小齿轮的尺寸都相同,小齿轮节径为 75 mm,大齿轮节径为 250 mm,能够在相同的工作空间内运行。

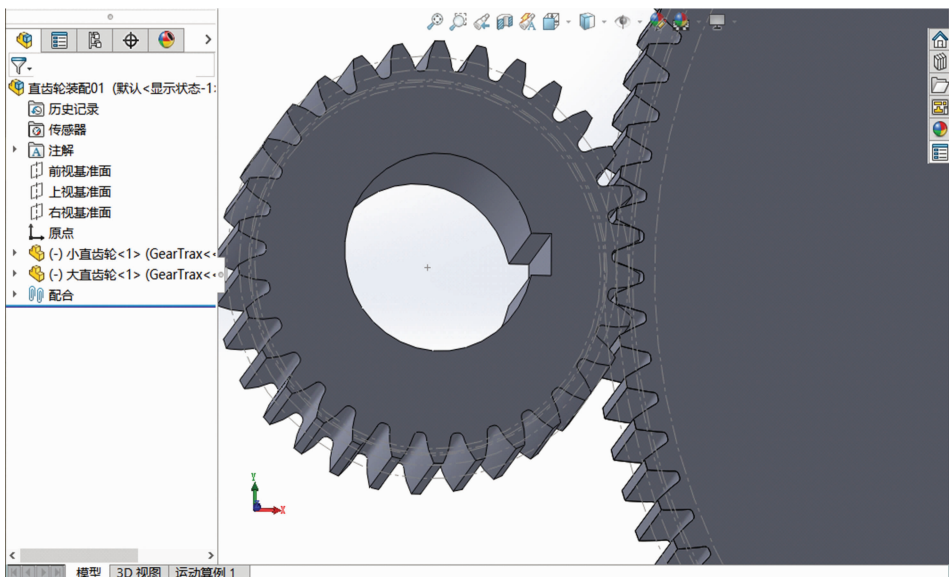


图6 SolidWorks 中大节距渐开线第 1 组齿轮

3 传动性能受力分析

利用 SolidWorks 中的 simulation 软件分别对四组传动模型进行静应力模拟,材料为 45#钢,将齿轮受力设置为扭矩,使用夹具将齿轮固定,生成随曲率变化的网格,通过运行算例运行后生成应力色谱图、形变色谱图及应变色谱图,观察色谱图颜色分布可发现齿轮的扭矩传递过程中应力比较集中的区域,该区域是齿轮最易发生失效的部位,可通过改变材料类型或齿轮参数对其进行优化改进。静应力分析过程如下:接触面组选项内选取 2 个齿轮的接触面,定义 2 个齿轮的接触面,夹具选项内将小齿轮中间应用固定夹具;大齿轮为从动轮,中间应用固定铰链夹具,将扭矩设定在小齿轮上,方向为逆时针^[8];扭矩大小为 20 N/m,在网格菜单内选择应用网格控制,将 2 个齿轮啮合接触的地方进行选取,在参数设定里将网格品质提高,网格参数设定

为 0.3 mm,网格密度越大,色谱图的精确度就越高,能够帮助更清晰地分析静应力强度,之后对其他相对不重要的地方应用 3 mm 的网格,网格划分如图 7,最后一步点击运行算例选项,通过软件的解算器计算,得到应力、形变、应变色谱图,应力色谱图见图 8。由图 8 可以清晰地观察齿轮应力的分布,根据颜色分布可发现模数为 2.0 的大节距渐开线齿轮啮合传动中应力比较集中的区域是齿面中部附近,通过应力色谱图最大应力标注显示为 44.95 MPa,而 45#钢的许用应力为小于 120 MPa,因此该类型齿轮传动的应力大小符合安全设计。

为了能够更清楚地观察到应力应变的详细分布,可在色谱图功能选项卡中选择离散显示,应变色谱图如图 9 所示,最大应变量为 0.000 171 mm。应变主要指在外力的作用下物体形状发生相对变形的程度,通过查阅齿轮应变曲线得知该类型齿轮的应变变量在安全范围内,符合设计要求。

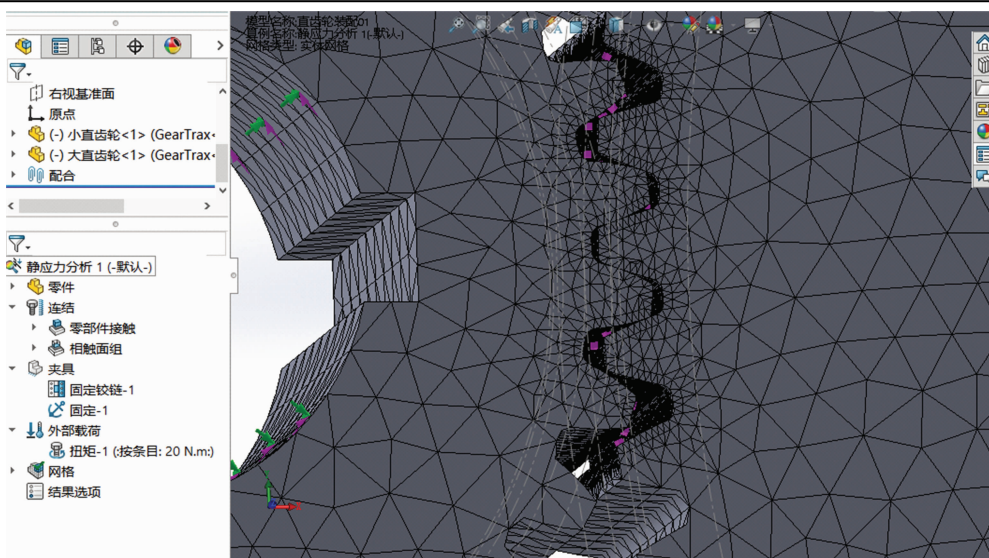


图7 齿轮网格模型

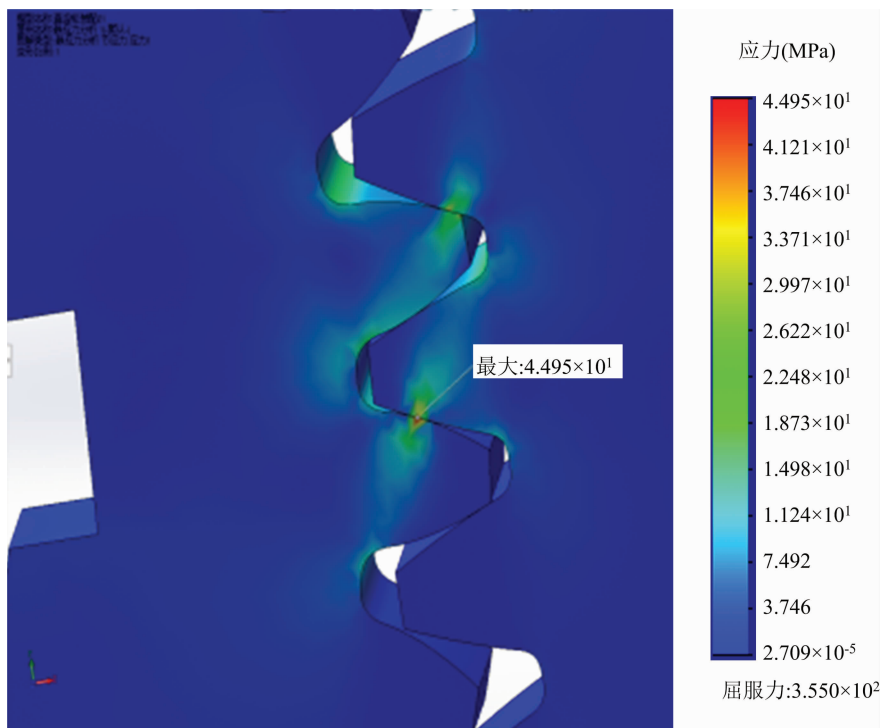


图8 大节距渐开线齿轮(模数:2.0)应力色谱图

同理,在 SolidWorks 中对第 3 组短齿渐开线齿轮(模数:2.0)创建新的算例,步骤与第 1 组齿轮相同,运行算例结果见图 10。

通过观察应力色谱图,短齿渐开线齿轮(模数:2.0)齿面最大应力为 36.67 MPa,远远小于许用应力,相对于大节距渐开线齿轮(模数:2.0),短齿渐开线齿轮在相同扭矩下比大节距渐开线受到的集中应力更小,最大应变量为 0.000 176 mm,与大节

距渐开线齿轮相仿,符合设计要求^[9]。

同理,对大节距渐开线(20°)齿轮与短齿渐开线(20°)齿轮在模数为 2.5 的条件下进行力学性能分析对比。在 Geartrax 软件中将 2 组齿轮的模数调为 2.5,在相同齿数下齿轮的尺寸大小相应增大,如果力学性能有比较大的提升,也可将工作环境扩大而达到更好的运行效果。静应力分析步骤与第 1 组齿轮的相同,设置条件相同情况下运行该算例,运

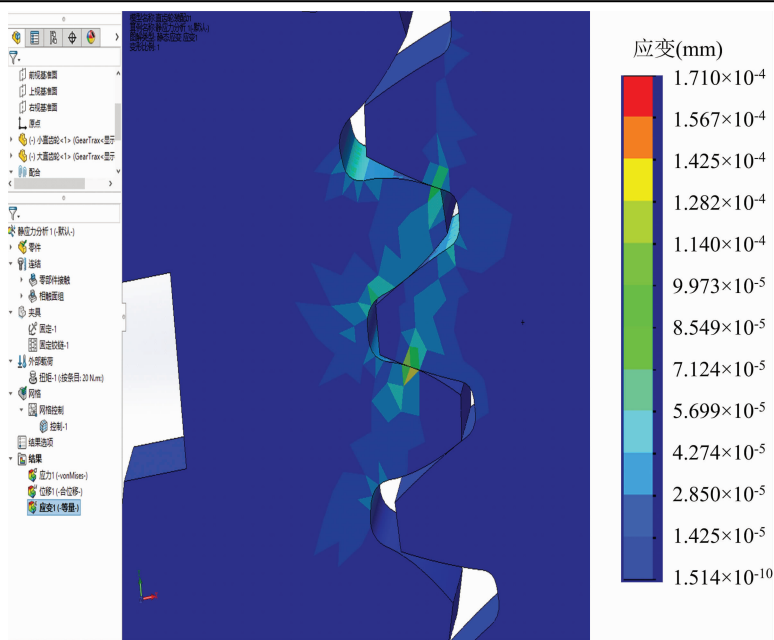


图9 大节距渐开线齿轮(模数:2.0)应变色谱图(离散)

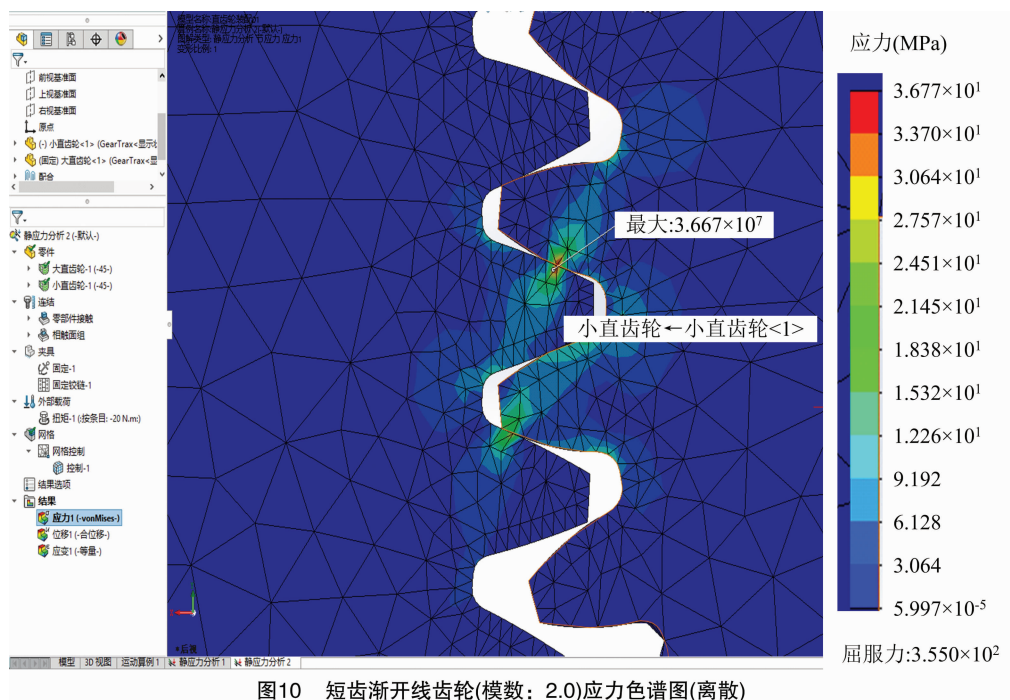


图10 短齿渐开线齿轮(模数:2.0)应力色谱图(离散)

行结果分别见图 11、图 12。

通过分析应力应变色谱图得到大节距渐开线齿轮(模数:2.5)受到的最大静应力为 44.95 MPa,与大节距渐开线齿轮(模数:2.0)相同,应变同为 0.000 171 mm,虽然齿轮模数增大尺寸增大,但力学性能却没有提升。

同理,对短齿渐开线齿轮(模数:2.5)进行静应力算例,进行相同的条件设置,运行算例,应力、应

变色谱图分别见图 13、图 14。

通过分析应力应变色谱图,发现短齿渐开线齿轮(模数:2.5)的最大静应力变为 67.89 MPa,与短齿渐开线齿轮(模数:2.0)相比,在相同扭矩下,模数增大之后应力集中现象比较明显,最大应力超过了该材料的许用应力,应变也增大到 0.000 264 8 mm,很明显此类齿轮设计不符合实际工况运行需求,需要对其改进优化设计,究其原因

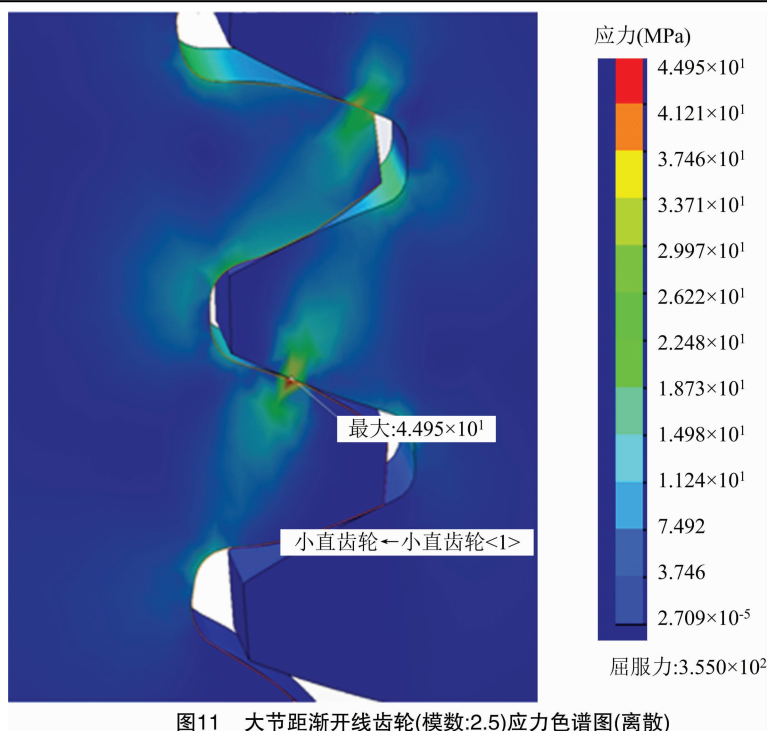


图11 大节距渐开线齿轮(模数:2.5)应力色谱图(离散)

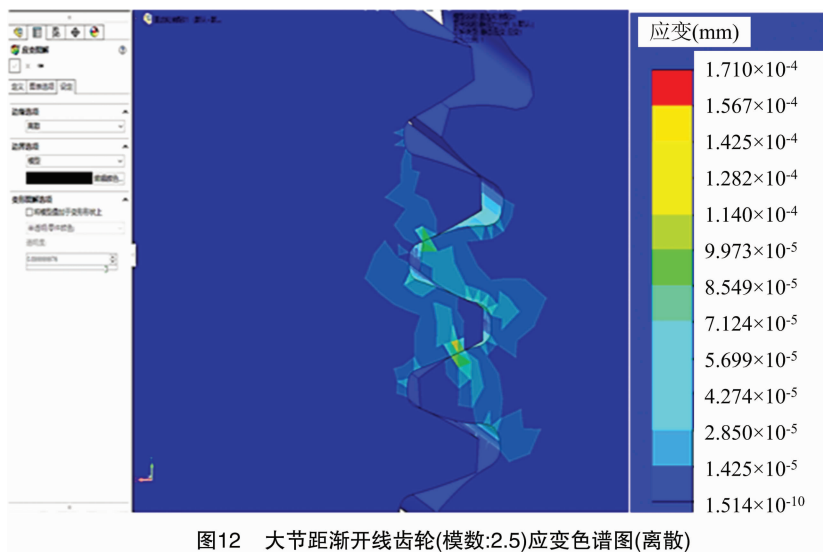


图12 大节距渐开线齿轮(模数:2.5)应变色谱图(离散)

主要是短齿渐开线齿轮本身模数较大、重合系数不高,导致单齿受力过于集中而超过许用应力^[10]。

4 优化设计

通过 4 组齿轮的力学性能对比,在此齿数下,4 组齿轮受到相同的扭矩,短齿渐开线齿轮(模数:2.0)受到的集中应力更小,在此工况下的力学性能优于其他 3 组齿轮,接下来将对短齿渐开线齿轮(模数:2.0)再次进行优化。优化后的齿轮参数见表 3。

将短齿渐开线(模数:2.0)通过 SolidWorks 把

原来的 45#钢切换为 20CrMnTi, 20CrMnTi 适用于高速、中载、有冲击的场景,再次利用 simulation 插件进行新的静应力算例,使用相同的夹具与扭矩,对啮合部位进行网格控制,将啮合部位的齿轮网格控制在 0.3 mm, 剩余网格设置为 3 mm, 生成网格,运行算例,得到的结果如图 15 所示,材料为 20CrMnTi 的短齿渐开线齿轮应力色谱图(左)与离散应力色谱图(右),大齿轮应力细节与小齿轮应力色谱对比见图 16, 齿轮啮合应变色谱见图 17。

将原来的 45#钢改为 20CrMnTi 后,通过观察静应力色谱图,发现集中应力降低到 19.23 MPa, 相对

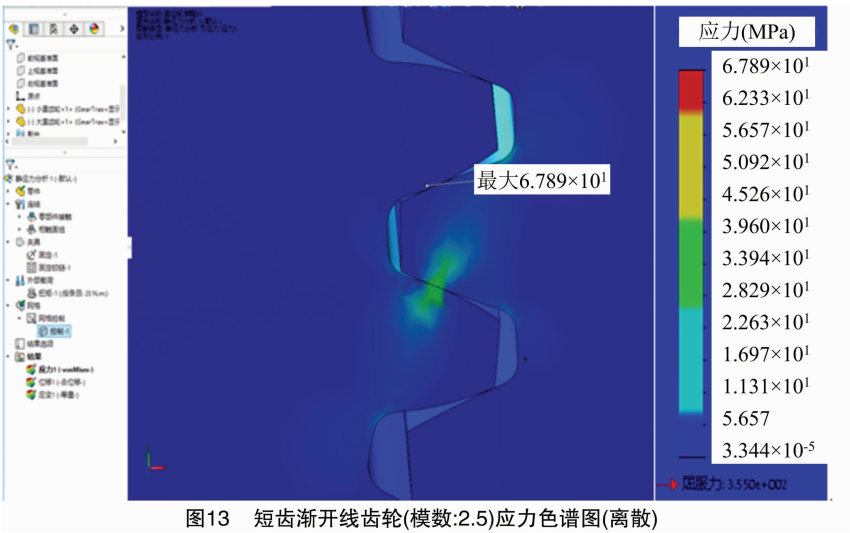


图13 短齿渐开线齿轮(模数:2.5)应力色谱图(离散)

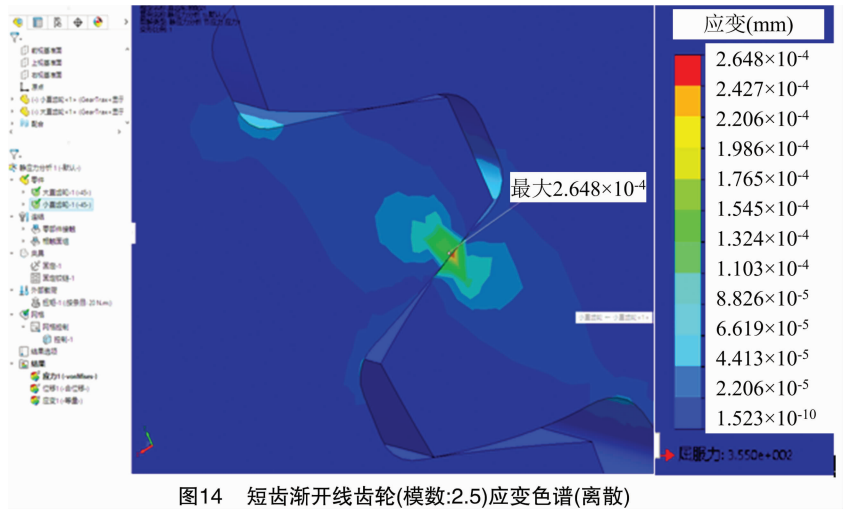


图14 短齿渐开线齿轮(模数:2.5)应变色谱图(离散)

表 3 材料优化后短齿渐开线 20° 压力角齿轮参数

齿数	齿宽 (mm)	模数	孔直径 (mm)	齿轮速比	节径 (mm)	齿顶高 (mm)	齿根高 (mm)	基圆直径 (mm)	齿厚 (mm)
30	30	2.0	30	1.0 : 3.3	60	1.6	2	56.382	3.141 6
100	30	2.0	60	1.0 : 3.3	200	1.6	2	187.939	3.141 6

于优化前减少 47.7%, 因变量也降低到 0.000 069 04 mm, 性能大幅提升。

5 结论

本研究利用 SolidWorks 与 Geartrax 对齿轮进行了参数化的建模设计, 运用 simulation 插件对模型库中的齿轮进行了静应力模拟分析, 结果表明, 大节距渐开线在相同条件下, 在增大模数的情况下, 力学性能不会发生太大变化; 在传动比与齿数确定时, 选取大节距渐开线 (20°) 齿轮可以更好地改变

其尺寸以适应工作环境, 传动稳定, 重合系数高, 尺寸选择灵活, 易于加工; 短齿渐开线 (20°) 的齿轮模数越大重合系数越低, 传动将更不平稳, 将会受到更多因重合度低而出现的应力集中, 导致运行安全系数下降, 造成安全隐患; 短齿渐开线齿轮大多数适合在低齿数 (小于 17) 的情况下应用, 模数应相应减少, 相对于大节距渐开线齿轮, 短齿齿轮更不易发生根切与齿顶变尖等问题; 当遇到高速、中载、有冲击的工作环境, 比如拖拉机变速箱内齿轮, 可采用 20CrMnTi 材料进行短齿渐开线齿廓制造, 大幅度

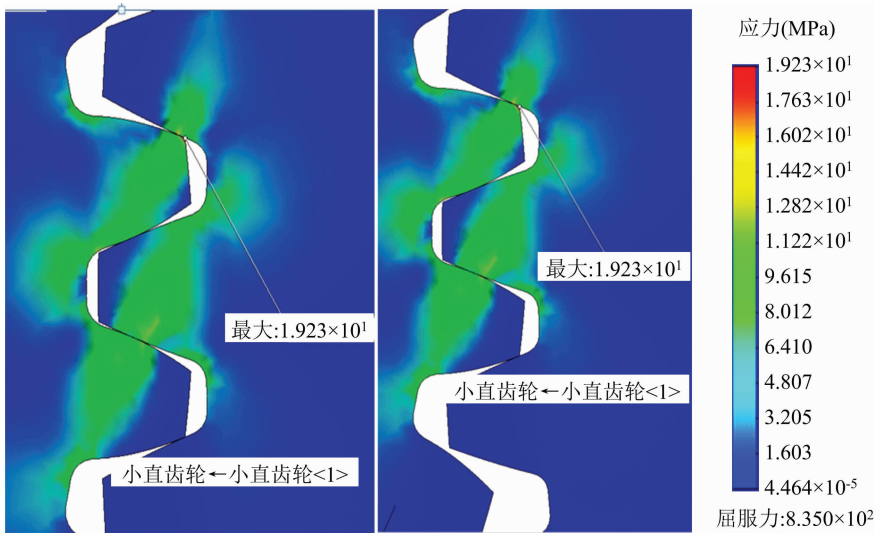


图15 应力色谱图(左)与离散应力色谱图(右)

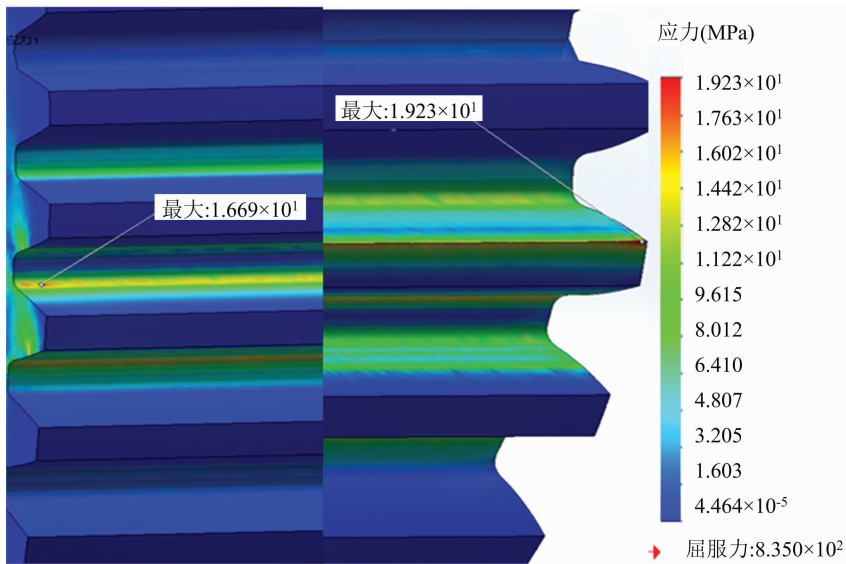


图16 大齿轮(左)和小齿轮(右)应力细节色谱对比

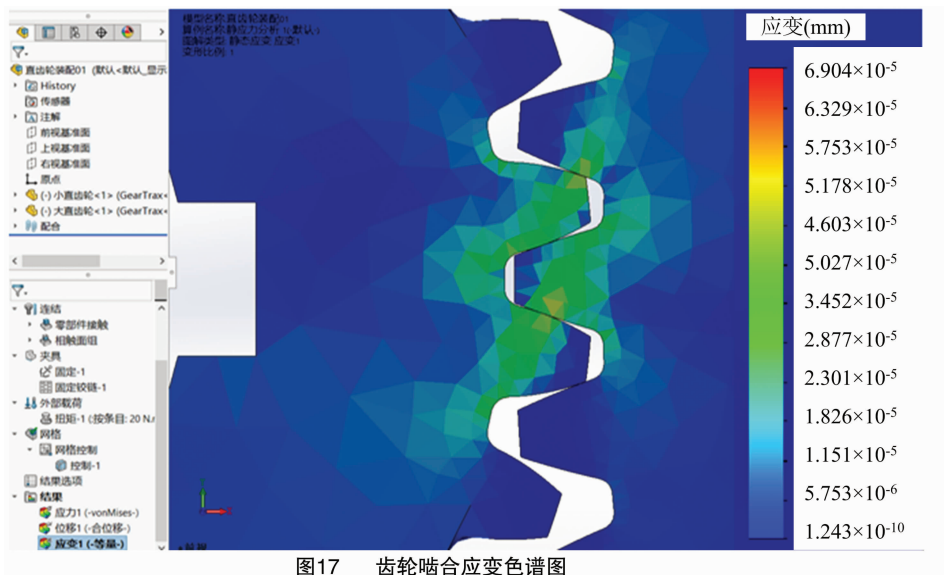


图17 齿轮啮合应变色谱图

吴彦澎. 一种基于网格的空间聚类算法及在基本农田规划中的应用[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(16): 250–254.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.16.048

一种基于网格的空间聚类算法及在基本农田规划中的应用

吴彦澎

(北京市农林科学院, 北京 100097)

摘要:针对当前基本农田划定过程中主观干预过多的问题,在综合考虑耕地质量情况、交通区位条件和耕地连片性等因素的基础上,提出一种基于网格的基本农田保护规划空间聚类算法。该算法以网格作为分析单元,首先以 K-Means 算法对网格的属性进行初步聚类;然后利用网格间的空间关系和相似性进行最大相似区的确定;最后再以模糊聚类方法对细碎区聚合归并,最终得到基本农田保护区域,可用于指导基本农田保护规划的实施。并通过具体案例分析证明了该算法的可行性和实用性,且具有较高的计算效率。

关键词:基本农田保护;网格;空间聚类;耕地质量;交通区位;连片性

中图分类号: S126 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)16-0250-05

耕地入选基本农田就是将总体规划确定的耕地按一定的面积指标有选择地划分为基本农田的过程。目前,在实际划定过程中主观随意性过强,缺乏一定的科学决策,只从经济建设的需求考虑,而忽视耕地的质量要求和耕地连片需求、忽视农田保护的政策规定,使基本农田保护流于形式,不能形成合理优化的空间布局^[1]。

鉴于基本农田划定中存在的问题,如何划定基本农田保护区成为学术研究的热点。国内已有学

者进行了大量的研究工作,获得了丰富的基本农田划定的理论结果和经验。宇向东等在耕地分等的基础上,将综合评价算法模型移植到基本农田空间配置过程中^[2];唐宽金等以粮食生产能力为基础进行了基本农田保护区的划定^[3-4];金志丰利用 GIS 空间分析技术提出依据土地适宜性指数和土地等引入农用地连片性的概念确定了基本农田划定的空间范围^[5]。在已有的基本农田划定研究中,主要依据单一的因素进行划定,同时涉及多个因素进行综合分析的研究很少,主要原因是缺乏一种有效的统计单元和综合评价算法。

空间聚类分析可以对耕地地块对象进行聚类,将“属性相似,空间临近”的耕地地块对象划分在同一类别中,即把基本农田的划定看成是基于耕地地

收稿日期:2020-04-08

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(编号:201011006)。

作者简介:吴彦澎(1986—),男,辽宁营口人,硕士,高级工程师,主要从事农业信息技术研究、农业科研管理工作。E-mail: wuyanpeng.cau@163.com。

降低了集中应力,延长齿轮的使用寿命,降低经济成本。

参考文献:

- [1] 杨可桢,程光蕴,李仲生,等. 机械设计基础[M]. 北京:高等教育出版社,2013.
- [2] 杨帆. 点线啮合齿轮齿廓修形的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
- [3] 李魁,张洪,丁海霞,等. 全地面起重机分动器传动系的建模及动力学仿真[J]. 起重运输机械,2015(6):78-82.
- [4] 宋宝玉,张锋. 机械设计学习指导与自选题选[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2010.

- [5] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [6] Li W, Zhai P F, Tian J Y, et al. Thermal analysis of helical gear transmission system considering machining and installation error[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 149: 1-17.
- [7] Zhang J, Liu X Z. Effects of misalignment on surface wear of spur gears[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer, Part J (Journal of Engineering Tribology), 2015, 229(9): 1145-1158.
- [8] 季景方,黎遗铃. 基于 ANSYS 软件的齿轮接触强度分析[J]. 汽车实用技术, 2018(8): 36-38.
- [9] 王秋实. 渐开线直齿轮接触动态特性有限元分析[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [10] 卢永勇,郑锐聪,罗晓园. 基于有限元的船用推进器传动齿轮强度计算方法的研究[J]. 汽车实用技术, 2014(4): 84-88.