

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.015

基于 Design-Expert 的电链锯锯齿结构参数优化

刘九庆¹, 张天翼¹, 金攀², 朱斌海^{1*}

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 永康市自然资源和规划局, 浙江 永康 321300)

摘要:为提高电链锯的锯切效率,对电链锯锯齿的齿形结构参数进行研究,以单位锯切功为电链锯锯切效率的衡量指标,通过对电链锯锯切过程的仿真研究,得出不同结构锯齿的单位锯切功。以电链锯锯齿中的外形前角、侧刃楔角和顶刃楔角等结构参数作为影响因子,采用 Box-Behnken 中心组合试验方法设计多因素正交试验,使用 Design-expert 软件进行数据分析得出最优齿形结构参数组合。研究结果表明,所选取的齿形结构参数对单位锯切功影响程度由大到小顺序依次为外形前角、侧刃楔角、顶刃楔角,并获得最优齿形结构参数组合,外形前角为 10.92°、侧刃楔角为 45.7°、顶刃楔角为 45.41°。

关键词:电链锯;锯切效率;齿形结构参数;Design-expert;单位锯切功

中图分类号:S776.2

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0142-09

Optimization of Sawtooth Structure Parameters for Electric Chain Saws Based on Design-Expert

LIU Jiuqing¹, ZHANG Tianyi¹, JIN Pan², ZHU Binhai^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. Yongkang Natural Resources and Planning Bureau, Yongkang 321300, China)

Abstract: In order to improve the cutting efficiency of the electric chain saw, the tooth structure parameters of the saw teeth of the electric chain saw were studied, and the unit cutting power was used as the measurement index of the cutting efficiency of the electric chain saw, through simulation research on the cutting process of the electric chain saw, the unit cutting power of different structure sawteeth was obtained. Using the structural parameters of the external front angle, side edge wedge angle, and top edge wedge angle in the sawtooth of the electric chain saw as influencing factors, a Box-Behnken center combination test method was used to design a multi factor orthogonal experiment, and the optimal combination of tooth shape structural parameters was obtained through data analysis using Design-expert software. The research results indicated that the selected tooth shape structural parameters had the following order of influence on the unit sawing power, from large to small: external front angle, side edge wedge angle, and top edge wedge angle. The optimal combination of tooth shape structural parameters was obtained, with external front angle of 10.92°, side edge wedge angle of 45.7°, and top edge wedge angle of 45.41°.

Keywords: Electric chain saw; sawing efficiency; tooth structure parameters; Design-expert; unit sawing power

0 引言

电链锯是一种以电动机为动力来源的手提式轻型林业机械,在电动机的驱动下,通过锯链围绕

在导板上的高速回转运动进行伐木和造材工作,随着人们对木材需求量的增加,链锯成为了木材采伐中重要的设备^[1]。

目前,国内的一些科研人员对链锯的结构、功能进行了研究。刘九庆等^[2-3]分析了电链锯锯齿结构对切削温度的影响因素;余光宇等^[4]、赵民等^[5]研究了锯链硬度对链锯工作过程的影响;杨绍荣等^[6-7]对液压驱动链锯锯链的受力情况进行了分析,并得出了链轮直径和链轮转速对锯链动载荷的影响;余光宇等^[8]、王振东等^[9]针对油锯锯链的制动进行了分析,并提高了油锯在使用过程中的安全性。国外的一些研究人员也对链锯的锯切过程进行了研究:Orlowski 等^[10]研究了木材硬度对锯切功率的影响;Otto 等^[11]设计了一种能够测定输入扭矩、驱动链轮角速度、进给力以及切削力的锯切试验台;Romoli^[12]研究了刀具前角对锯切过程中切削力的影响;Korman 等^[13]研究了链速度和惯性对链

收稿日期:2023-10-24

基金项目:中央财政林业科技推广示范资金项目(黑[2022]TG13)。

第一作者简介:刘九庆,博士,教授。研究方向为林业智能装备、农林机械设计。E-mail: nefujdljq@163.com

*通信作者:朱斌海,硕士,副教授。研究方向为林业智能装备。E-mail: zhubinhai1987@163.com

引文格式:刘九庆,张天翼,朱斌海,金攀,等. 基于 Design-Expert 的电链锯锯齿结构参数优化[J]. 森林工程, 2024, 40(2):142-150.

LIU J Q, ZHANG T Y, JIN P, et al. Optimization of sawtooth structure parameters for electric chain saws based on Design-Expert[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):142-150.

锯切割过程的影响。

由此可以看出,国内外的科研人员主要对电链锯切割过程的工作参数、受力情况以及使用寿命进行了分析和研究^[14-19]。但是对电链锯齿形结构参数的研究相对较少,因此,本研究以单位锯切功^[20]为衡量锯切效率的指标,研究锯齿齿形结构参数对单位锯切功的影响,获得最优齿形结构参数组合,进而提高电链锯的锯切效率。

1 电链锯主体结构及锯切理论分析

1.1 电链锯的构成和齿形结构参数

电链锯在锯切过程中,直接参与切削工作的锯切机构主要由锯链、导板和驱动链轮组成,如图 1 所示。图 1 中:1 为驱动链轮;2 为导板;3 为锯链。

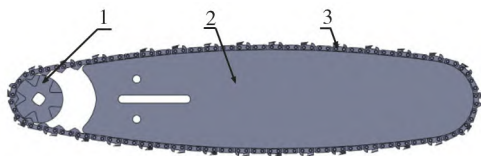


图 1 电链锯锯切机构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of electric chain saw cutting mechanism

其中锯链是锯切机构中最重要的组成部分之一,锯切效率的高低很大程度上取决于锯链的结构组成,其结构组成与连接方式如图 2 所示。图 2 中:1 为左切齿;2 为传动片;3 为连接片;4 为铆钉;5 为右切齿。

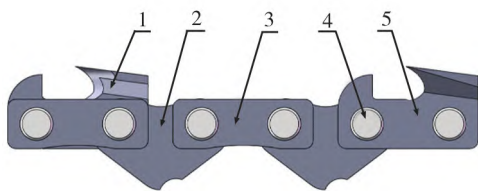


图 2 电链锯锯链结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the electric chain saw chain

锯链中的切削刀齿是最重要的结构,如图 3 所示。图 3 中:1 为护刀齿;2 为切削侧刃;3 为切削顶刃。

切削刀齿也被称为锯齿,由切削刃和护刀齿组成:切削刃的形状呈“L”形,分别为锯齿的顶刃和侧刃,护刀齿又称限位齿,其作用是限制电链锯锯齿切入木材纤维的深度。

电链锯的切削刀齿中有众多的结构参数,主要包括限位量(m)、外形前角(γ)、侧刃后角(α_1)、顶刃后角(α_2)、侧刃楔角(β_1)、顶刃楔角(β_2)、侧刃切削角(δ_1)和顶刃偏斜角(ψ_1),如图 4 所示。其中,侧刃楔角、顶刃楔角以及外形前角这 3 个齿形结构

参数直接影响到电链锯锯齿的锋利程度,因此本研究将以这 3 个参数作为分析对象进行电链锯锯切效率的研究。

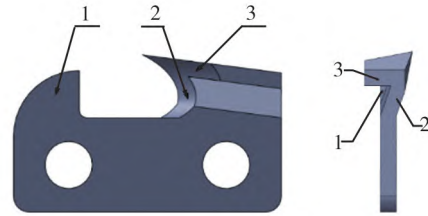


图 3 电链锯锯齿结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of sawtooth structure of electric chain saw

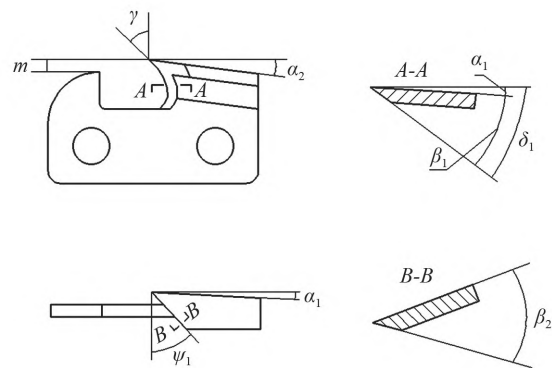


图 4 锯齿齿形结构参数示意图
Fig. 4 Schematic diagram of sawtooth structure parameters

1.2 锯链传动过程分析

在锯链的传动过程中,锯链与驱动链轮之间的啮合过程尤为复杂,若要对其传动过程进行分析,首先需要对该过程进行适当简化:忽略锯链中各零件之间的间隙、安装误差以及切削过程中产生的振动,并且将锯链与链轮的啮合轨迹视为标准的多边形。最终确定驱动链轮与锯链过渡区域的各关键点初始位置,如图 5 所示。

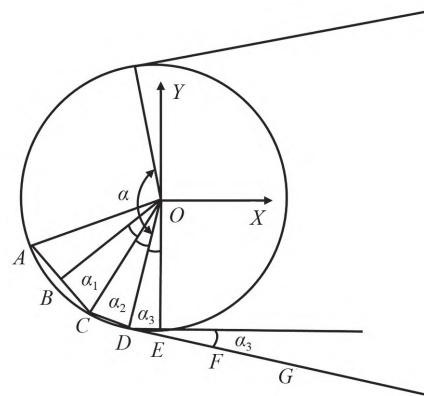


图 5 驱动链轮过渡区运行轨迹
Fig. 5 Running trajectory of the transition zone of the drive sprocket

驱动链轮节圆圆弧 AD 与直线 DG 共同组成锯链的运动轨迹,点 F 、 G 为待啮合传动片的两销轴中心点,点 A 、 C 为完全进入啮合传动片的两销轴中心点。点 D 为驱动链轮节圆的切点,点 B 为线段 AC 的中点,点 E 为运动轨迹与坐标系 Y 轴的交点。根据图 5 中的几何关系可得

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arcsin\left(\frac{l_{BC}}{2R}\right) \\ \alpha_2 = \frac{\pi}{z} - \alpha_3 - \alpha_1 \\ \alpha_3 = \frac{(\pi - \alpha)}{2} \\ \beta = \pi - \frac{\alpha_2}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: β 为直线 GD 和直线 DC 的夹角; l_{BC} 为 BC 长度; R 为驱动链轮节圆半径; z 为驱动链轮齿数。

点 $C(C_x, C_y)$ 、 $D(D_x, D_y)$ 、 $F(F_x, F_y)$ 、 $G(G_x, G_y)$ 在坐标系中的坐标为

$$\begin{cases} C_x = R\sin(\alpha_2 + \alpha_3) \\ C_y = -R\cos(\alpha_2 + \alpha_3) \\ D_x = R\sin\alpha_3 \\ D_y = -R\cos\alpha_3 \\ F_x = -l_{EF}\cos\alpha_3 \\ F_y = -l_{OE} - l_{EF}\sin\alpha_3 \\ G_x = -(l_{EF} + t)\cos\alpha_3 \\ G_y = -l_{OE} - (l_{EF} + t)\sin\alpha_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: l_{EF} 为 EF 的长度; l_{OE} 为 OE 的长度。

根据上述分析可以得出锯链的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} y = \tan\alpha_3(x - D_x) + D_y \\ R^2 = x^2 + y^2 \end{cases} \quad (3)$$

1.3 锯切效率的衡量指标

根据对木材切削理论的研究发现,电链锯的锯切效率可通过单位锯切功来衡量,单位锯切功表示切削单位体积的木材所消耗的功,由式(4)表示。且单位锯切功越小,锯切性能越好。

$$K = \frac{F \times V \times T}{L \times h \times b} \quad (4)$$

式中: K 为单位锯切功, J/cm^3 ; F 为锯链切削力, N ; V 为切削速度, m/s ; T 为锯切时间, s ; L 为锯口长度, cm ; h 为切削厚度, cm ; b 为锯切宽度, cm 。

2 电链锯锯切过程仿真模型的建立

2.1 几何模型建立与网格划分

通过使用 SolidWorks 软件建立了电链锯锯切过程的几何模型。将三维几何模型另存为 .step 格式的文件导入到 hypermesh 软件中,对其进行单元网格的划分,该软件具有强大的单元网格划分及前处理功能,划分好的单元网格模型如图 6 所示。

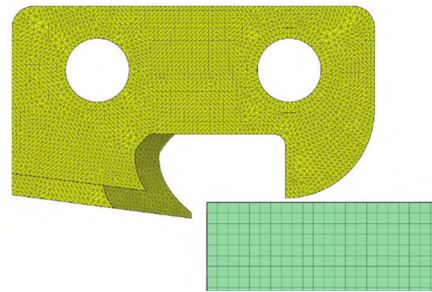


图 6 锯切模型的网格划分

Fig. 6 Meshing of sawing model

其中切削刀齿的单元网格数为 81 897 个、节点数为 17 036 个,切削刀齿的各齿形结构参数见表 1。

表 1 切削刀齿结构参数

Tab. 1 Structural parameters of cutting tool teeth

侧刃楔角/(°)	侧刃切削角/(°)	侧刃后角/(°)	侧刃外形前角/(°)	顶刃楔角/(°)	顶刃后角/(°)	顶刃偏斜角/(°)	限量/mm	节距/mm
Edge wedge angle	Side cutting angle	Side edge back angle	Front corner of side blade shape	Top edge wedge angle	Top edge back angle	Top edge deviation angle	Material limit	Pitch
48.6	50.6	2.8	1.7	43.2	7.6	30.5	0.87	10

2.2 仿真模型的处理与结果分析

将处理好的网格模型 k 文件导入到 LS-PrePost 软件中进行前处理工作,在所建立的电链锯锯切过

程仿真模型中,选取木材种类为松木试材,其材料属性见表 2。

电链锯锯齿材料为 65Mn,其材料属性见表 3。

表 2 松木物理力学性能

Tab. 2 Physical and mechanical properties of pine wood

树种	横向弹性模量/MPa	泊松比	横向抗弯强度/MPa	密度/($g \cdot cm^{-3}$)
Varieties of trees	Transverse elastic modulus	Poisson's ratio	Transverse bending strength	Density
松木 Pine wood	1 103	0.33	66	0.55

表 3 65Mn 力学性能参数
Tab. 3 65Mn mechanical properties parameters

材料名称 Material name	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Density	弹性模量/MPa Elastic modulus	泊松比 Poisson's ratio
65Mn	7 850	1.97×10^{11}	0.282

在电链锯锯切过程中,切削刀齿与木材之间产生接触,使木材发生侵蚀破坏,因此,需要在关键词 * CONTACT - ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 选项中设定二者之间的接触方式,将切削刀

齿与木材之间的静态摩擦系数设置为 0.4、动态摩擦系数设置为 0.5;由于电链锯锯切过程中木材是固定的,因此要先对木材的底部节点建立节点组,在关键词 * SET-NODES_LIST 选项中进行边界条件设置,然后在关键词 * BOUNDARY-SPC_SET 选项中添加 3 个方向的位移约束与 3 个方向的旋转约束。在求解任务完成后,便可以观察整个锯切过程中锯齿上的等效应力及其分布情况,如图 7 所示。

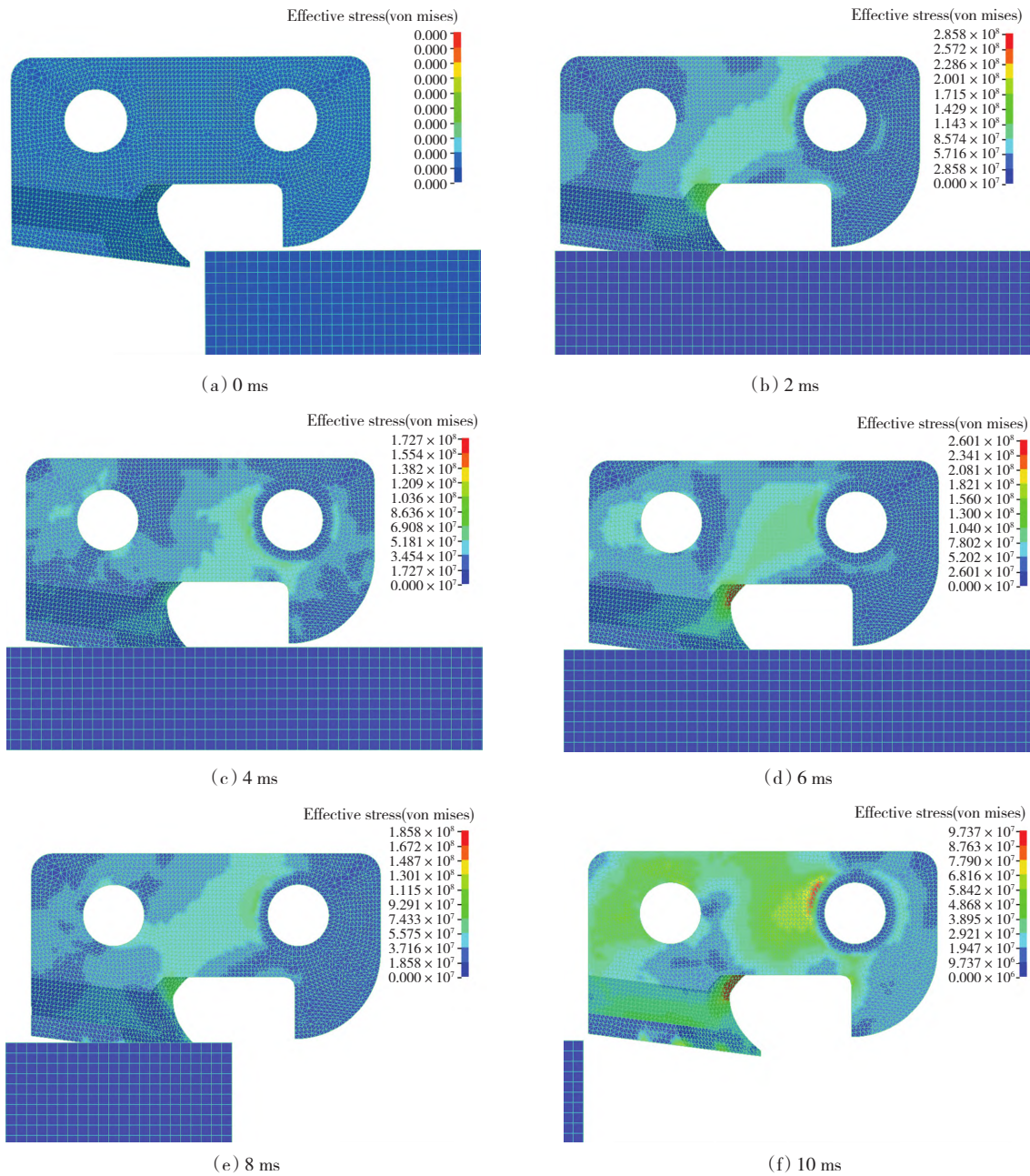


图 7 不同时刻锯齿中等等效应力的分布

Fig. 7 Distribution of equivalent stress in sawtooth at different times

图 7 中, (a) 图对应的时刻为 0 ms, 此时锯齿与木材的距离为 0.1 mm, 锯齿静止, 两者未发生接触, 锯齿各部位的等效应力均为 0 MPa; (b) 图对应的时刻为 2 ms, 锯齿与木材发生接触, 造成应力突然升高, 从应力云图中可发现, 该时刻锯齿的最大等效应力为 285.8 MPa; (c) 图、(d) 图对应的时刻分别为 4 ms 和 6 ms, 此时锯齿进一步切入木材, 锯齿与木材的等效应力发生波动, 这是由于当锯齿切下木材单元使其失效时, 锯齿的受力减小因此其等效应力也减小, 随着锯齿继续接触到未被切下的木材单元时, 其等效应力又开始增加, 在该过程中锯齿上的最大应力分别为 172.7 MPa 和 260.1 MPa; (e) 图、(f) 图对应的时刻分别为 8 ms 和 10 ms, 此时木材进一步被破坏最终完全整个切削过程, 该时刻切削刀齿的最大等效应力也出现明显下降, 其值为 97.3 MPa。

3 齿形结构参数多因素正交试验

3.1 试验方法

在完成电链锯锯切过程的仿真后, 可以得出不同齿形结构参数的锯齿产生的应力, 再将各组仿真结果代入到式(4)中便可得到相应的单位锯切功大小。于是以外形前角、侧刃楔角和顶刃楔角等齿形结构参数为影响因素, 利用 Box-Behnken 中心组合试验方法设计多因素正交试验, 通过 Design-expert 软件进行数据分析并建立相应的多元二次回归方程来确定各影响因素对锯切效率的影响规律。

通过对常规的电链锯锯齿的齿形参数进行测量分析, 取外形前角为 5°~15°, 侧刃楔角、顶刃楔角为 40°~50°, 进行 3 因素 3 水平正交试验, 试验参考因素及水平见表 4。

表 4 试验参考因素水平表

Tab. 4 Test reference factor level table (°)

水平 Level	外形前角(A) Front corner of appearance (A)	侧刃楔角(B) Edge wedge angle (B)	顶刃楔角(C) Top edge wedge angle (C)
-1	5	40	40
0	10	45	45
1	15	50	50

3.2 试验结果

3.2.1 多因素正交试验结果

通过 Box-Behnken 中心组合试验设计理论, 设计三因素三水平正交试验表, 共计 17 组试验,

其中 12 组为因子分析, 5 组为零点误差估计, 每组试验重复 3 次, 取 3 组试验结果的算术平均值作为试验最终值, 一共进行 51 次试验, 试验方案与结果见表 5。

表 5 多因素正交试验结果

Tab. 5 Multifactor orthogonal test results

序号 Serial number	外形前角(A) Front corner of side blade shape (A)	侧刃楔角(B) Edge wedge angle (B)	顶刃楔角(C) Top edge wedge angle (C)	单位锯切功/ (kg·cm ⁻³) Unit sawing power
1	0	0	0	19.31
2	0	0	0	18.76
3	-1	-1	0	25.12
4	-1	1	0	25.86
5	0	-1	1	20.86
6	0	-1	-1	21.64
7	0	1	-1	19.67
8	1	1	0	22.73
9	-1	0	1	24.87
10	0	0	0	18.25
11	-1	0	-1	25.36
12	0	0	0	19.64
13	0	1	1	20.26
14	1	-1	0	23.47
15	1	0	1	21.56
16	1	0	-1	21.86
17	0	0	0	18.67

正交试验结果的预测试验值与实际试验值的相关程度描述如图 8 所示。

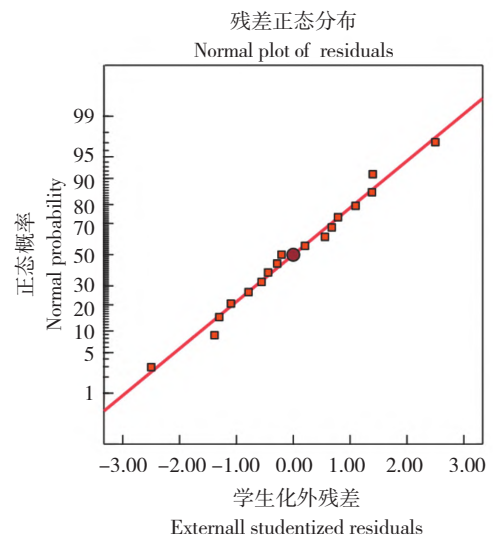


图 8 预测值与实际值关系图

Fig. 8 Relationship between predicted and actual values

3.2.2 回归模型建立与显著性检验

根据表 4,建立单位锯切功 Y_1 的二次多项式以及外形前角 (A)、侧刃楔角 (B)、顶刃楔角 (C) 等 3 个试验因素的回归模型,见式 (5),分析结果见表 6。

$$Y_1 = 18.93 - 1.45 \times A - 0.32 \times B - 0.12 \times C - 0.37 \times AB + 0.05 \times AC + 0.34 \times BC + 4.09 \times A^2 + 1.28 \times B^2 + 0.4 \times C^2。 \quad (5)$$

表 6 Y_1 回归方程方差分析

Tab. 6 Analysis of variance for Y_1 regression equation

方差来源 Source of variance	单位锯切功 Y_1 Unit sawing power Y_1				
	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	100.62	9	11.18	30.18	<0.000 1
A	16.79	1	16.79	45.33	0.000 3
B	0.825 6	1	0.825 6	2.23	0.179 1
C	0.120 1	1	0.120 1	0.324 1	0.587 0
AB	0.547 6	1	0.547 6	1.48	0.263 5
AC	0.009 0	1	0.009 0	0.024 4	0.880 4
BC	0.469 2	1	0.469 2	1.27	0.297 5
A^2	70.33	1	70.33	189.86	< 0.000 1
B^2	6.92	1	6.92	18.68	0.003 5
C^2	0.672 0	1	0.672 0	1.81	0.220 0
残差 Residual	2.59	7	0.370 4	—	—
失拟 Lack of fit	1.39	3	0.461 9	1.53	0.336 5
误差 Error	1.21	4	0.301 8	—	—
总和 Sum	103.21	16	—	—	—

根据表 6,单位锯切功 Y_1 模型的 P 小于 0.01,表明关于 Y_1 的数学模型高度显著相关。失拟项的显著水平 P 大于 0.05,试验结果表明 Y_1 的数学模型是合理的。在单位锯切功 Y_1 的回归模型中, A 、 A^2 、 B^2 的 P 均小于 0.01,表明以上回归项对回归模型的影响极为显著。而 B 、 C 、 AB 、 AC 、 BC 、 C^2 的 P 均大于 0.05,表明以上回归项对回归模型的影响不显著。去除回归模型影响不显著的各回归项,对已建立的回归模型进行优化,优化后的模型如式 (6) 所示,对优化后的模型进行方差分析,得出单位锯切功 Y_1 模型的 P 小于 0.000 1,失拟项的显著水平 P 大于 0.05,说明优化后的回归模型可靠。

$$Y_1 = 18.93 - 1.45 \times A + 4.09 \times A^2 + 1.28 \times B^2。 \quad (6)$$

3.2.3 各单因素影响规律分析

各单因素的影响程度可用贡献率 (K) 作为参考, K 的计算公式见式 (7)、式 (8)。通过计算可得出各因素的贡献率见表 7。其中各齿形结构参数对单位锯切功的影响程度为:外形前角 A 对单位锯切功影响最大,其次为侧刃楔角 B ,顶刃楔角 C 对单位锯切功影响最小。

$$\delta = \begin{cases} 0 (F \leq 1) \\ 1 - \frac{1}{F} (F > 1) \end{cases}。 \quad (7)$$

$$K_i = \delta_i + \frac{1}{2} \sum_{\substack{j=A \\ i \neq j}}^c \delta_j + \delta_{i^2} (j = A, B, C)。 \quad (8)$$

式中: F 为回归方程中各回归项的检测统计量; δ 为回归项对 F 的考核; K 为各因素的贡献率。

表 7 各因素贡献率分析

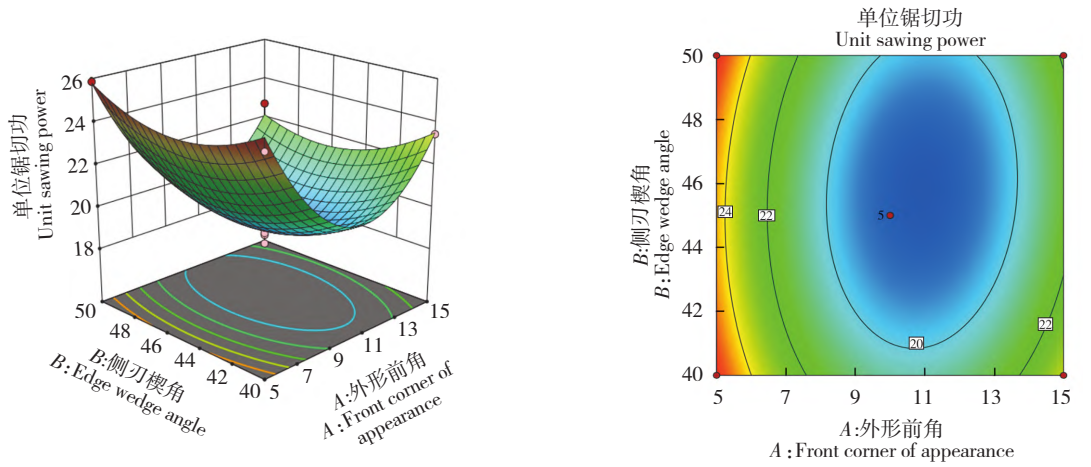
Tab. 7 Analysis of contribution rates of various factors

齿形结构参数 Tooth structure parameters	外形前角 (A) Front corner of appearance (A)	侧刃切削角 (B) Side cutting angle (B)	限量量 (C) Material limit (C)	贡献率排序 Contribution ranking
单位锯切功 Y_1 Unit sawing power Y_1	2.24	1.77	0.72	$A > B > C$

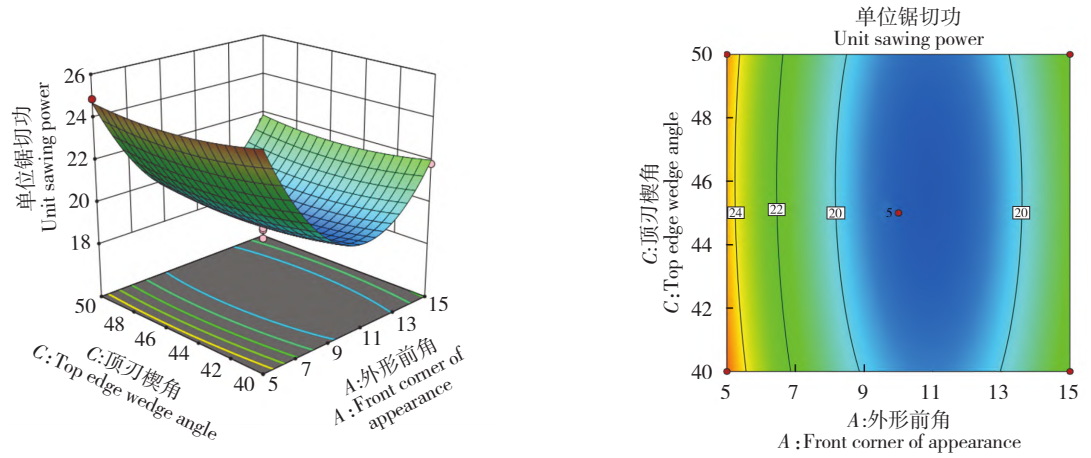
3.2.4 交叉因素影响规律分析

通过对数学模型方差分析,探究外形前角(A)、侧刃楔角(B)和顶刃楔角(C)等影响因素之间的相

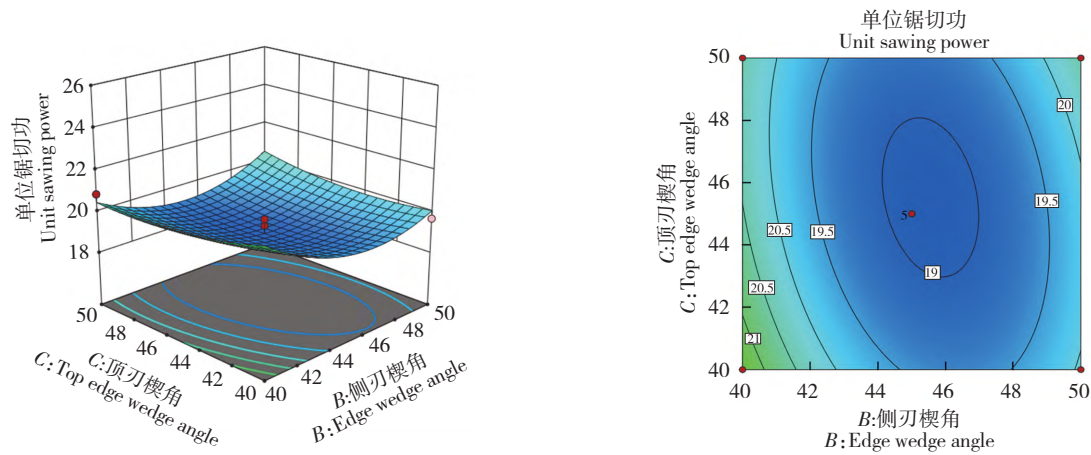
互作用对单位锯切功 Y_1 的影响规律,使用 Design-expert 软件绘制出响应面图及交互因素对单位锯切功的响应曲线,如图9所示。



(a) A 与 B 对 Y_1 相互作用的响应面图
(a) Response surface diagram of the interaction between A and B and Y_1



(b) A 与 C 对 Y_1 相互作用的响应面图
(b) Response surface diagram of the interaction between A and C and Y_1



(c) B 与 C 对 Y_1 相互作用的响应面图
(c) Response surface diagram of the interaction between B and C and Y_1

图9 交互因素对单位锯切功的影响

Fig.9 The influence of interactive factors on unit sawing power

图9(a)为顶刃楔角(C)位于中心水平 45° 时,外形前角(A)与侧刃楔角(B)对单位锯切功 Y_1 相互作用的响应面图。从图(a)中可以看出,当外形前角在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 、侧刃楔角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 区间内逐渐增大时,单位锯切功出现先减小后增大的趋势。

图9(b)为侧刃楔角(B)位于中心水平 45° 时,外形前角(A)与顶刃楔角(C)对单位锯切功 Y_1 相互作用的响应面图。从图(b)中可以看出,当外形前角在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 、顶刃楔角(C)在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 逐渐增大时,单位锯切功出现先减小后增大的趋势。

图9(c)为外形前角(A)位于中心水平 10° 时,侧刃楔角(B)和顶刃楔角(C)对单位锯切功 Y_1 相互作用的响应面图,从图(c)中可以看出,当侧刃楔角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 、顶刃楔角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 逐渐增大时,单位锯切功出现先减小后增大的趋势。

3.3 齿形结构参数优化

为了提高电链锯的锯切效率,要求尽可能低的单位锯切功,通过分析单位锯切功受上述交互因素的影响规律可得:外形前角、侧刃楔角和顶刃楔角等参数均须处在一个大小适中的数值范围内才能获得较低的单位锯切功。由于各影响因素对单位锯切功的影响程度不完全相同,因此必须进行多目标参数优化才能获得可以提高锯切效率的最佳齿形参数组合。

通过正交试验中所得出的结果,利用 Design-expert 软件中的 Optimization 功能对齿形结构参数进行优化,同时需要达到齿形结构合理、单位锯切功较低的目的,根据实际的切削条件以及理论分析,约束条件为

$$\begin{cases} Y_1 \rightarrow Y_{\min} > 0 \\ -1 \leq A \leq 1 \\ -1 \leq B \leq 1 \\ -1 \leq C \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

由此可以得出,当外形前角为 10.92° 、侧刃楔角为 45.7° 、顶刃楔角为 45.41° 时,单位锯切功取得可以取得最小值 18.77 J/cm^3 。

4 结论

1) 本研究对电链锯锯齿的外形前角、侧刃楔角和顶刃楔角等结构参数进行了研究,并建立了电链锯锯切系统的仿真模型,通过 Box-Behnken 中心组合试验方法并使用 Design-Expert 软件,得出了这些

参数对电链锯锯切效率的影响规律。

2) 研究发现,以上3个齿形结构参数对单位锯切功的影响程度为:外形前角对单位锯切功的作用效果最为显著,其次是侧刃楔角和顶刃楔角。

3) 对所选取的齿形结构参数进行约束和优化分析可以得出:当外形前角为 10.92° 、侧刃楔角为 45.7° 、顶刃楔角为 45.41° 时为最优齿形结构参数组合。

【参 考 文 献】

- [1] 张文文,闫想想,王秋华. 油锯产品研究进展及在森林防火中的应用[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(1): 4-8.
ZHANG W W, YAN X X, WANG Q H. Research progress of chainsaw products and their application in forest fire prevention[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2020, 48(1): 4-8.
- [2] 刘九庆,张骏杰,朱斌海. 电链锯锯切试验台设计及影响锯切性能因素的遴选[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(11): 116-120.
LIU J Q, ZHANG J J, ZHU B H. Design of sawing test bench for electric chain saw and selection of factors affecting sawing performance[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(11): 116-120.
- [3] 刘九庆,张骏杰,朱斌海. 电链锯锯齿温度场的仿真分析与实验探究[J]. 林产工业, 2022, 59(2): 33-38.
LIU J Q, ZHANG J J, ZHU B H. Study simulation analysis and experimental research on the temperature field of saw chain of electric chain saw[J]. China Forest Products Industry, 2022, 59(2): 33-38.
- [4] 余光宇,王振东,魏娜,等. 链锯锯链切齿链片硬度测量不确定度分析[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(9): 51-52, 57.
SHE G Y, WANG Z D, WEI N, et al. Analysis of uncertainty in measurement of hardness of chain saw chain cutter links[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2021, 49(9): 51-52, 57.
- [5] 赵民,柳松, H Copur, 等. 链锯切割石材性能研究[J]. 石材, 2020(4): 21-24.
ZHAO M, LIU S, COPUR H, et al. Analyzing the performance of stones cutting by chain sawing machine[J]. Stone, 2020(4): 21-24.
- [6] 杨绍荣,田立权,应鸿烈,等. 液压驱动链锯之锯链受力分析[J]. 超硬材料工程, 2020, 32(1): 27-31.
YANG S R, TIAN L Q, YING H L, et al. Force analysis

- for saw chain of hydraulically powered chainsaw[J]. Superhard Material Engineering, 2020, 32(1): 27-31.
- [7] 杨绍荣,田立权,应鸿烈,等. 液压驱动链锯切割研究[J]. 超硬材料工程,2020,32(2):16-19.
YANG S R, TIAN L Q, YING H L, et al. Research on sawing of hydraulic driven chain saw[J]. Superhard Material Engineering, 2020, 32(2): 16-19.
- [8] 余光宇,王振东,魏娜,等. 油锯安全标准中锯链制动性能测试方法综述[J]. 林业机械与木工设备,2014,42(9):12-13,18.
SHE G Y, WANG Z D, WEI N, et al. Summary of saw chain brake performance testing methods in chainsaw safety standards[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2014, 42(9): 12-13, 18.
- [9] 王振东,余光宇,魏娜,等. 油锯锯链制动器试验台的研制[J]. 林业机械与木工设备,2016,44(5):46-48.
WANG Z D, SHE G Y, WEI N, et al. Development of saw chain brake test benches[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2016, 44(5): 46-48.
- [10] ORLOWSKI K A, OCHRYMIUK T, HLASKOVA L, et al. Revisiting the estimation of cutting power with different energetic methods while sawing soft and hard woods on the circular sawing machine: a Central European case[J]. Wood Science and Technology, 2020, 54(2): 457-477.
- [11] OTTO A, PARMIGIANI J P. Cutting performance comparison of low-kickback saw chain[J]. International Journal of Forest Engineering, 2018, 29(2): 83-91.
- [12] ROMOLI L. Cutting force monitoring of chain saw machines at the variation of the rake angle[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 101: 33-40.
- [13] KORMAN T, KUJUNDZIC T, KUHINEK D. Simulation of the chain saw cutting process with a linear cutting machine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 78: 283-289.
- [14] 贾诚心,李海连,王铭伟,等. 行走式油锯割灌机的研制[J]. 南方农机,2018,49(9):70.
JIA C X, LI H L, WANG M W, et al. Development of walking chainsaw cutting and irrigation machine[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 70.
- [15] 李文飞. 一种链锯过载保护机构的设计[J]. 内燃机与配件,2019(20):68-69.
LI W F. Design of overload protection mechanism for chain saw[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(20): 68-69.
- [16] 周子鸣,张春文,赵宁,等. 油锯不等节距锯链系统的动力学分析[J]. 中国制造业信息化,2012,41(19):59-62.
ZHOU Z M, ZHANG C W, ZHAO N, et al. Dynamic analysis on variable pitch chain system of oil saw[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2012, 41(19): 59-62.
- [17] 张建伟,段铁成,王立海. 油锯采伐作业中身体稳定性的生物力学分析[J]. 森林工程,2012,28(2):26-29.
ZHANG J W, DUAN T C, WANG L H. Biomechanical analysis on physical stability in chainsaw logging operation[J]. Forest Engineering, 2012, 28(2): 26-29.
- [18] 桂炳中,孙玲,杨红卫. 油锯的使用和维护保养[J]. 科学种养,2016(7):60-62.
GUI B Z, SUN L, YANG H W. Use and maintenance of chain saw[J]. Scientific Breeding, 2016(7): 60-62.
- [19] 张春文,彭雄奇,赵宁,等. 油锯锯链多边形效应动力学分析新方法[J]. 机械科学与技术,2012,31(3):392-396.
ZHANG C W, PENG X Q, ZHAO N, et al. A new method for dynamics analysis on polygon effect of oil saw chain[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(3): 392-396.
- [20] 孔德刚. 链锯锯木参数的研究[J]. 东北林业大学学报,1985,13(4):86-93.
KONG D G. Research of China's saw cutting data[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1985, 13(4): 86-93.