

基于遗传算法的瓦楞辊齿形参数优化

樊令强¹, 张炜²

(1. 太原科技大学, 山西 030024; 2. 浙江大学 宁波理工学院, 宁波 315100)

摘要: **目的** 研究降低钙塑瓦楞复合纸板生产成本的问题。**方法** 通过对瓦楞齿形参数的研究, 建立以压楞系数为目标函数的数学模型, 利用 MATLAB 平台中的遗传算法工具箱对数学模型进行优化计算, 并将优化后的结果与现有瓦楞辊参数进行对比。**结果** 优化后, 瓦楞辊的齿顶圆弧半径、齿根圆弧半径和楞高减小, 楞数增加, 压楞系数减小, 原纸耗材降低, 生产成本降低。**结论** 通过利用 MATLAB 平台中的遗传算法工具箱对压楞系数齿形参数模型进行优化, 齿顶圆弧半径减小 0.161 mm, 齿根圆弧半径减小 0.111 mm, 楞数增加 1.268, 楞高减小 0.955 mm, 压楞系数减小 0.1801。压楞系数的减小表明原纸的耗材的减小, 可以明显降低生产成本。

关键词: 钙塑瓦楞复合纸板生产线; 瓦楞辊齿形; 压楞系数; MATLAB; 遗传算法工具箱

中图分类号: TB486

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)07-0044-05

Optimization of Corrugated Roller Tooth Profile Parameters Based on Genetic Algorithm

FAN Ling-qiang¹, ZHANG Wei²

(1. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China)

ABSTRACT: **Objective** To reduce the production cost of paper plastic composite corrugated cardboard. **Methods** Through the study of the corrugated tooth profile parameters, a mathematical model was established using corrugating coefficient as the target function, which was then optimized using the genetic algorithm toolbox in MATLAB platform, and the optimized results were compared with the existing corrugated roller parameters. **Results** After optimization, the top radius, fillet radius and flute height of the corrugated roller teeth were reduced, the flute number was increased, the corrugating coefficient was decreased, the paper consumption was reduced and the production cost was decreased. **Conclusion** By optimizing the tooth profile parameter model of the corrugating coefficient using the genetic algorithm toolbox in MATLAB platform, the top radius and fillet radius of the corrugated roller teeth were reduced by 0.161 mm, 0.111 mm, the flute number was increased by 1.268, the flute height was decreased by 0.955 mm, and the corrugating coefficient was decreased by 0.1801. The decrease in the corrugating coefficient indicated the decrease in paper consumption, which can significantly reduce the cost of production.

KEY WORDS: production line of paper plastic composite corrugated cardboard; corrugated roller tooth; corrugating coefficient; MATLAB; genetic algorithm toolbox

近年来,随着工业技术的发展,钙塑材料因其投资成本低、劳动环境好,且其产品具有强度高、美观、

防潮、无毒、耐腐蚀、回收率高等优点被广泛应用^[1]。用钙塑材料替代传统的木材、纸板等包装材料已成为

收稿日期: 2013-12-30

基金项目: “十二五”科技支撑计划项目(2011BAD24B01)

作者简介: 樊令强(1986—),男,山东人,太原科技大学硕士生,主攻机械工程。

一种趋势^[2-3],但是较纸板其印刷性能和弹性较低,因而研究一种综合两者优点的新型包装材料迫在眉睫,纸塑复合新型瓦楞纸板就应运而生^[4]。瓦楞辊作为纸塑复合新型瓦楞纸板生产线的关键功能性部件^[5],其设计制造直接影响瓦楞纸板的力学性能和生产的经济性能。我国在20世纪80年代引进瓦楞生产线,但是瓦楞辊的主要参数、楞型历来为外商所隐晦,国内厂家视为禁区^[2]。现阶段我国瓦楞生产厂家基本上以引进国外瓦楞纸板生产线为样机,测绘后仿制,在瓦楞部件方面的设计理论还不够完善。另外,在瓦楞纸板生产线设计过程中,存在设计周期长、人力物力消耗大、设计制造精度低等问题^[6]。随着PC和辅助设计软件的发展,现在越来越多的人青睐参数化设计,因为它能大大地缩短设计周期,并提高设计的准确性,保证产品的质量,降低不必要的消耗等。

基于上述原因,文中对直接影响生产成本的瓦楞辊参数进行了数学建模,分析了瓦楞辊参数对纸板成本和性能的影响,并利用MATLAB平台中的遗传算法工具箱^[7]对压楞系数齿形参数模型进行优化。该优化过程大大缩减了优化计算的时间,并可达到优化齿形参数的目的,为瓦楞辊的制造提供一定的依据。

1 瓦楞辊齿形的分析

目前瓦楞辊的齿型齿廓曲线可分为以下3种。

1) 准渐开线齿廓,是在标准渐开线齿形的基础上适量加大齿沟宽,减小齿厚得到的。我国的老式瓦楞机主要采用这种齿形,但这种齿形不能在连续生产线上使用,因为它不仅不能提高车速,而且生产出来的纸板有破裂、成楞不充分。

2) 圆弧-直线齿廓,齿顶、齿根均为圆弧,两齿侧为与齿顶、齿根圆弧相切的直线。这种齿形不仅可以提高纸板的性能,而且可以提高生产效率。文中研究的正是圆弧-直线齿形。

3) 三圆弧两直线相连的齿型,如德国Koppeste公司采用的骨架形楞型,其生产的纸板平压强度较低,加工磨削齿形比较困难,但对高速线适应性很强^[8]。

按波形形状分,瓦楞齿型可分为U型、V型、UV型。UV型以耐压强度高、承载能力强、粘结强度好、在制楞过程中瓦楞辊不易磨损等优点被广泛应用。

2 模型的建立

2.1 压楞系数数学模型的建立

在纸塑复合新型瓦楞纸板生产中,影响其生产成本的主要因素是单面钙塑纸板的生,而单面钙塑纸板的生成本由芯纸决定。纸塑复合新型瓦楞纸板的芯纸首先是钙塑原纸经加热辊双面加热后,通过上、下瓦楞辊的啮合运动形成的^[9]。如果假设由瓦楞辊生产出的芯纸不变形,那么芯纸的楞型可看作是瓦楞辊齿形的复制。由此可见,研究纸塑复合新型瓦楞纸板生成本的问题主要是研究瓦楞辊的楞型问题。

瓦楞原纸在进入瓦楞辊前后其长度发生了变化,压楞前瓦楞原纸的长度与压楞后瓦楞芯纸的长度之比称为压楞系数。在不考虑钙塑纸厚度和弹性变形的情况下,压楞系数由齿形决定。下面建立压楞系数的数学模型^[10-13]。

如图1—2所示, O 为瓦楞辊外圆圆心, O_1 为瓦楞辊齿顶圆圆心, O_2 为瓦楞辊齿根圆圆心, C, D 分别为 O_1, O_2 到两圆弧切线的垂足, R 为瓦楞辊外圆半径, R_1 为齿顶圆半径, R_2 为齿根圆半径, r_1 为齿顶圆圆弧半径, r_2 为齿根圆圆弧半径, α 为分度圆夹角, H 为楞高, T 为单楞芯纸长。

单楞原纸长 L (L 指的是圆弧 AC 、切线 CD 、圆弧 BD 组成的曲线长度的2倍),即:

$$L=2 \times (L_{AC} + L_{CD} + L_{BD}) \quad (1)$$

在 $\triangle O_1 O_2 O$ 中,由余弦定理得:

$$L_{O_1 O_2} = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos \alpha} \quad (2)$$

$$\text{式中: } \alpha = \frac{180^\circ}{Z}, R_1 = R - r_1, R_2 = R - r_2。$$

由 $\triangle O_1 CP$ 和 $\triangle O_2 DP$ 为相似直角三角形,则切线 CD 的长度:

$$L_{CD} = \sqrt{L_{O_1 P}^2 - r_1^2} + \sqrt{L_{O_2 P}^2 - r_2^2} \quad (3)$$

弧 BD 的长度:

$$L_{BD} = r_2 \cdot \frac{\angle DO_2 B}{180^\circ} \pi \quad (4)$$

$$\text{式中: } \angle DO_2 B = \angle O_1 O_2 O - \angle PO_2 D, \angle O_1 O_2 O = \arccos \frac{L_{O_1 O_2}^2 + R_2^2 - R_1^2}{2L_{O_1 O_2} R_2}, \angle PO_2 D = \arccos \frac{r_2}{L_{O_2 P}}。$$

弧 AC 的长度:

$$L_{AC} = r_1 \cdot \frac{\angle CO_1 A}{180^\circ} \pi \quad (5)$$

式中: $\angle CO_1A = \angle O_2O_1A - \angle PO_1C$, $\angle O_2O_1A =$

$$\angle O_1O_2O + \alpha, \angle PO_1C = \arccos \frac{r_1}{L_{O_1P}}$$

将公式(2)—(4)代入公式(1)得:单楞原纸长度

L :

$$L = 2 \left(r_1 \frac{\angle CO_1A}{180^\circ} \pi + \sqrt{L_{O_1P}^2 - r_1^2} + \sqrt{L_{O_2P}^2 - r_2^2} + r_2 \frac{\angle DO_1A}{180^\circ} \pi \right) \quad (6)$$

单楞芯纸长:

$$T = \frac{2R-H}{Z} \pi \quad (7)$$

式中: Z 为齿数, $Z = 2R \frac{\pi}{T_0}$, 理论齿距 $T_0 = \frac{300}{N}$; N

为每 300 mm 长度上所含的瓦楞数。

由公式(5)—(6)得压楞系数的方程为:

$$\gamma = \frac{L}{T} \quad (8)$$

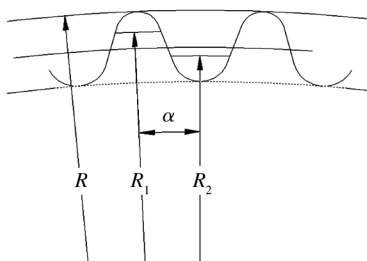


图1 纸塑复合新型瓦楞纸板瓦楞辊齿形

Fig.1 A new corrugated board corrugated plastic composite tooth profile

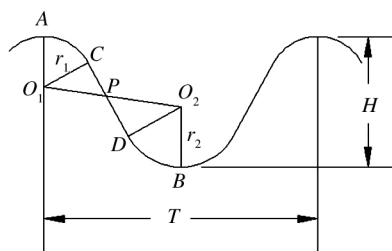


图2 瓦楞芯纸楞型^[7]

Fig.2 Flute shape of corrugating medium

2.2 齿形参数对压楞系数的影响

钙塑瓦楞复合纸板的性能和生产成本与芯纸的楞形有直接关系,而楞形是由瓦楞辊经过加热压延加工成形的,由此研究瓦楞辊齿形参数具有重要意义。关于瓦楞辊齿形参数的研究,目前世界各国对芯纸的楞形规定了2个主要参数,即瓦楞高度 H 和每 300 mm 长度上所含瓦楞数 N ,楞高 H 是瓦楞纸板后序加

工和设计箱型的必要数据,楞数 N 决定了压楞后瓦楞芯纸单楞长。因为楞形是圆弧加直线的结构,所以齿顶圆弧半径和齿根圆弧半径同样重要。关于齿顶圆弧半径和齿根圆弧半径的关系,智书平、王振林^[12] 教授指出在钙塑芯纸成形时,钙塑原纸夹在上、下瓦楞辊之间,如果瓦楞辊齿顶圆弧半径 r_1 和齿根圆弧半径 r_2 相等,在瓦楞成形时,由于钙塑原纸具有一定的厚度,使得实际的 r_2 小于 r_1 ,在啮合过程中会出现卡死现象,所以齿根圆弧半径应略大于齿顶圆弧半径,其差值约为瓦楞纸的厚度 k ,即 $r_2 = r_1 + k$ 。有关文献指出:压楞系数随着楞高、楞数和齿顶圆弧半径的增大而增大,而楞高是影响压楞系数最大的参数,楞高越高,压楞系数越大,耗纸率越高;楞高减小,压楞系数降低,耗纸率减少。由此可见,楞高参数是实现高强度、低克重,在进行楞形结构优化中影响最大的参数。

3 遗传算法的优化问题

遗传算法提供了一种求解复杂系统优化问题的通用框架,是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的高度并行、随机、自适应搜索的方法^[14-15]。它以群体中所有的个体为对象,对个体进行选择、交叉和变异等3种基本运算,结合适应度函数构成了算法的主题。用遗传算法求解包括:把问题的可能解用遗传编码作为染色体表示;建立可能解的初始体;建立评价解优劣的适应度函数;用遗传操作改变后代染色体组成;选取遗传算法中各种参数。

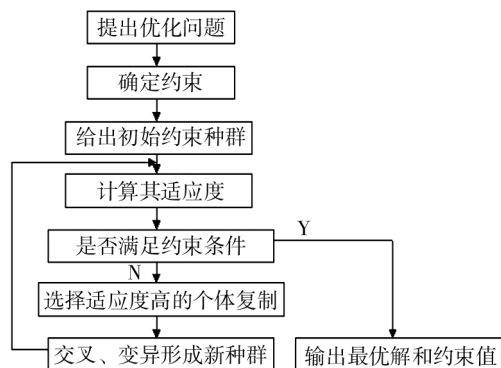


图3 遗传算法基本流程

Fig.3 The basic flowchart of the genetic algorithm

4 优化算例及结果分析

针对现有的瓦楞热粘合机组的瓦楞辊齿形参数,

参考 GB 1270—89《中低速瓦楞纸板》中对生产线楞形参数的规定,通过建立以压楞系数为目标函数的数学模型^[16],利用 MATLAB 中的遗传算法工具箱对其进行优化^[17—18]。

- 1) 通过对瓦楞辊齿形参数的分析,确定优化参数为: H, N, r_1 。
- 2) 建立优化函数,综合前述分析可知,压楞系数参数的优化问题是单目标优化问题,即: $F(H, N, r_1) = \min \gamma(H, N, r_1)$
- 3) 确定优化参数的范围: $2.6 \leq H \leq 3.9, 36 \leq N \leq 52, 1.0 \leq r_1 \leq 1.8, k = 0.3$ 。
- 4) 编写 MATLAB 程序^[17]。
- 5) 利用遗传算法工具箱进行计算,设置见图 4。

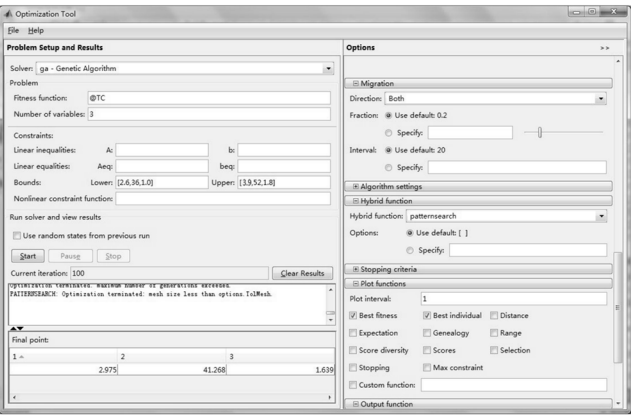


图 4 遗传算法工具箱设置

Fig. 4 Settings of the genetic algorithm toolbox

- 6) 优化结果输出,见图 5。

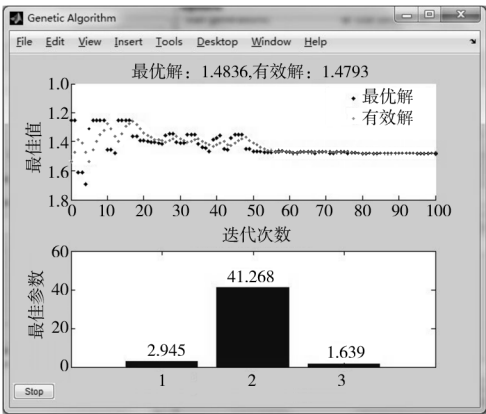


图 5 优化结果

Fig. 5 The optimization results

由图 5 可知,利用 MATLAB 编程,调用遗传算法工具箱,对参数进行设置,在参数的取值范围内,经选

择、交叉、变异过程,组成一个个数组并进行计算,最终得到最优解,同时给出得到最优解时各优化参数的取值。其中浅色点代表选取不同的参数得到的有效值,黑点代表选取不同参数得到的最优解。由图 5 可看出,在初始阶段选取不同参数组合,得到的有效值和最优解相差很大,并且变化范围较大,随着运算次数的增加,淘汰不合适的取值,经多次循环后,结果趋于平稳,得到最优解。

- 7) 优化结果对比,见表 1。

表 1 优化前后参数的比较

Tab. 1 Comparison of parameters before and after optimization

参数	r_1/mm	r_2/mm	$N/\text{个}$	H/mm	γ
优化前	1.80	2.05	40	3.9	1.6594
优化后	1.639	1.939	41.268	2.945	1.4793

从表 1 可以看出,优化后的齿形参数比优化前小,同时压楞系数明显减小,达到了对瓦楞辊齿形参数优化的目的。虽然增加了每 300 mm 内的楞数,但是却明显地降低了楞高。优化后纸板的压楞系数减小了 0.1801,在生产中可以明显降低生产成本,达到节约成本的目的。

5 结语

通过对瓦楞辊齿形参数的分析,利用 MATLAB 平台中的遗传算法工具箱对压楞系数数学建模进行优化,压楞系数减小了 0.1801,达到了节约成本的目的,同时提高了齿形设计的效率,为瓦楞辊参数的设计提供了一定的参考。由于瓦楞辊的设计影响因数较多,所以设计时还需根据具体情况进行设计。

参考文献:

[1] MARKEVICIUS G, STOLL J D, MALHOTRA V M, et al. Structural Composites from Recycled Hdpe and Calcium Sulfite Crystallites [J]. Annual Technical Conference—ANTEC, Conference Proceedings, 2009, 64(4): 2001—2005.

[2] SCHUT J H. From Paper Mill Sludge to Plastic Decking [J]. Plastic Technology, 2004, 50(10): 96.

[3] 李祥刚, 刘跃军. 塑料瓦楞板发展现状及研究方向 [J]. 株洲工学院学报, 2006, 20(6): 4—7.

LI Xiang-gang, LIU Yue-jun. The Present Situation and the Trend of the Study of the Plastic Corrugated Sheet [J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2006, 20(6):

- 4—7.
- [4] 冯军,高德. 钙塑瓦楞复合纸板性能的实验研究[J]. 包装工程,2013,34(11):53—55.
FENG Jun, GAO De. Experimental Study on Properties of Calcium Plastic Composite Corrugated Board[J]. Packaging Engineering,2013,34(11):53—55.
- [5] 孙振军,陈文奇,郑红艳. 瓦楞辊技术探析[J]. 包装工程,2005,26(3):83—85.
SUN Zhen-jun, CHEN Wen-qi, ZHENG Hong-yan. Exploration of Corrugated Roller Technology[J]. Packaging Engineering,2005,26(3):83—85.
- [6] 郭彦峰,张燕,王家民. 瓦楞辊参数化设计及 CAD 系统[J]. 包装工程,2004,25(5):179—181.
GUO Yan-feng, ZHANG Yan, WANG Jia-min. The Corrugated Roller Parametric Design and CAD System[J]. Packaging Engineering,2004,25(5):179—181.
- [7] 高玉根,王国彪,丁予展. 遗传算法在机械优化设计中的应用现状及展望[J]. 机械,2002,29(3):8—11.
GAO Yu-gen, WANG Guo-biao, DING Yu-zhan. Present Station and Perspective of Genetic Algorithms' Application in Mechanical Optimization Design[J]. Machinery,2002,29(3):8—11.
- [8] 吴德满. 瓦楞辊性能研究与应用(二)[J]. 中国包装工业,2001(9):33—40.
WU De-man. Function Research & Application of the Corrugated Roller(Two)[J]. China Packaging Industry,2001(9):33—40.
- [9] 黄孝成,廖道训. 瓦楞辊运动的确定性[J]. 湖北工业大学学报,2008,23(2):1—3.
HUANG Xiao-cheng, LIAO Dao-xun. On the Determinacy of Corrugated Roller's Movement[J]. Journal of Hunan University of Technology,2008,23(2):1—3.
- [10] 周义军. 瓦楞辊的齿形设计[J]. 包装与食品机械,2007,25(4):17—19.
ZHOU Yi-jun. Tooth Shape Design of Corrugate Roller[J]. Packaging and Food Machinery,2007,25(4):17—19.
- [11] 张蓬山. 瓦楞辊的齿形设计[J]. 包装工程,1998,19(3):34—35.
ZHANG Peng-shan. Tooth Shape Design of Corrugate Roller[J]. Packaging Engineering,1998,19(3):34—35.
- [12] 智书平,王振林. 瓦楞辊的齿形设计[J]. 中国包装工业,1999(12):11—13.
ZHI Shu-ping, WANG Zhen-lin. Tooth Shape Design of Corrugate Roller[J]. China Packaging Industry,1999(12):11—13.
- [13] 孟建新. 以折楞率为设计目标的瓦楞辊齿形几何参数的设计程序[J]. 包装与食品机械,1996,14(1):15—18.
MENG Jian-xin. The Designing Program about Geometry Data of Tooth Shape of Corrugate Roller that Take Design Aim at the Rolling over Rate of Corrugate[J]. Packaging and Food Machinery,1996,14(1):15—18.
- [14] GOLDBERG D E, HOLLAND J H. Genetic Algorithms and Machine Learning[J]. Machine Learning,1988,3(2):95—99.
- [15] HOLLAND J H. Genetic Algorithms[J]. Scientific American,1992,4:44—50.
- [16] 柯辉,周世堂. 单面瓦楞机高速瓦楞辊齿形参数的优化设计[J]. 湖北工学院学报,2000,15(1):10—13.
KE Hui, ZHOU Shi-tang. The Variable Optimization of the Teeth Profile of High-speed Corrugating Pollor[J]. Journal of Hubei Institute of Technology,2000,15(1):10—13.
- [17] KOZA J R. Genetic Programming on the Programming of Computers by Means of Natural Selection[M]. Cambridge: MIT Press,1992.
- [18] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
LEI Ying-jie, ZHANG Shan-wen, LI Xu-wu, et al. Genetic Algorithm Toolbox and Its Application MATLAB[M]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University Press,2005.

(上接第 43 页)

- [11] ASTM D5764—97a, Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood-Based Products[S].
- [12] ASTM D5652—95, Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-based Products[S].
- [13] ASTM D1761—06, Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood[S].
- [14] 王春明,刘一楠,孟黎鹏,等. 木结构销钉类紧固件连接试验方法简介[J]. 林业机械与木工设备,2011(11):28—32.
WANG Chun-ming, LIU Yi-nan, MENG Li-peng, et al. A Brief Introduction to Test Methods for the Connections of Dowel Type Fasteners for Wood Structures[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2011(11):28—32.
- [15] 靳伟,孙熙军. 第二次全国托盘现状调研报告[J]. 物流技术与应用,2009(1):31—32.
JIN Wei, SUN Xi-jun. The Second National Report On Pallet Status Quo Survey[J]. Logistics Technology and Application,2009(1):31—32.