

一种傅里叶非圆齿轮驱动横封机构设计

叶军^{1,2}, 孙新城¹, 赵雄², 高奇峰¹

(1. 浙江工业职业技术学院, 绍兴 312000; 2. 浙江理工大学, 杭州 200125)

摘要: **目的** 设计一种符合块状包装物横封要求的横封机构, 以更好满足横封的工艺要求。**方法** 在分析块状物体横封工艺过程基础上建立傅里叶非圆齿轮数学模型, 根据工艺要求建立目标函数以及横封机构参数优化模型, 并通过实例进行验证。**结果** 通过实例计算可知, 优化设计得到的傅里叶非圆齿轮能更好满足设计要求, 比原有传统偏心圆具有更高的灵活性。**结论** 采用更加灵活的傅里叶非圆齿轮副驱动横封机构对横封机构参数进行优化设计, 能够更好地满足块状物体横封工艺要求。

关键词: 横封机构; 傅里叶非圆齿轮; 参数优化; 传动比

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)11-0129-05

Design of Transverse Sealing Mechanism Driven by Fourier Noncircular Gears

YE Jun^{1,2}, SUN Xin-cheng¹, ZHAO Xiong², GAO Qi-feng¹

(1. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China;

2. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 200125, China)

ABSTRACT: The work aims to design a transverse sealing mechanism that conforms to the transverse sealing requirements for massive packages, so as to better meet the requirements of transverse sealing process. Based on the analysis of transverse sealing process of the massive objects, the mathematical model for the Fourier non-circular gear was established. According to the process requirements, the objective function was established, the parameter optimization model for the transverse sealing mechanism was established, and the correctness of the model was verified by an example. It can be seen from the example that the optimally designed Fourier non-circular gears could better satisfy the design requirements and have higher flexibility than the conventional traditional eccentric circles. The transverse sealing mechanism parameters are optimally designed by adopting the more flexible transverse sealing mechanism of Fourier non-circular gear pair drive, which can better meet the transverse sealing requirements for massive objects.

KEY WORDS: transverse sealing mechanism; Fourier noncircular gears; parameter optimization; transmission ratio

随着社会的发展, 人们对食品的要求越来越高。对食品进行包装是储藏、运输的重要前提, 包装机械性能的好坏直接决定包装的质量^[1-2]。枕式自动包装机是一种常见的包装设备, 广泛用于各类食品的包装, 其中横封机构能够实现包装袋的加热横封和切断, 是包装机上重要的机构^[3-4]。现有横封机构多采用2个旋转的封切器实现功能, 然而横封器在旋转1周过程中, 横封过程只占小部分的时间, 因此选用偏心圆齿轮、偏心链轮等非匀速传动驱动, 可以提高生产效率^[5-6]。

当横封机构用于包装块状物体时, 由于块状物体具有一定的高度, 因此对横封工艺提出了更高的要求。偏心圆齿轮、偏心链轮传动只有2个可调的设计参数, 不能很好满足要求^[7-8]。相较于偏心圆齿轮, 傅里叶非圆齿轮具有更多的设计参数、更好的设计灵活性^[9-10]。文中在分析块状物体横封工艺过程的基础上, 采用傅里叶非圆齿轮驱动横封机构, 建立傅里叶非圆齿轮的数学模型及横封机构设计优化模型, 并设计实例。

收稿日期: 2017-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51275481); 浙江省自然科学基金(LY15E050025); 浙江省教育厅一般科研项目(Y201534005)

作者简介: 叶军(1989—), 助教, 浙江理工大学在读博士, 主要研究方向为机构与结构创新设计。

1 横封工艺及机构分析

典型的旋转式横封机构见图 1^[4], 由偏心圆齿轮副、链传动、齿轮传动、对滚封切器等组成。该机构动力由偏心圆齿轮副、链传动传递至对滚封切器, 通过被加热的对滚封切器旋转实现包装袋的热封和切断。具体的工艺过程 (见图 2): 被加热的封切器在动力作用下做旋转运动, 包装袋在传送带输送下做水平运动, 当封切器压向包装物中间间隙时, 包装材料被热封, 与此同时封切器中的切刀切断包装材料, 成为独立包装袋; 当完成切断后, 对滚封切器应加速退出热封位置, 让包装物能够通过对滚封切器; 对滚封切器旋转 1 周分为空程区、封切区及退让区。

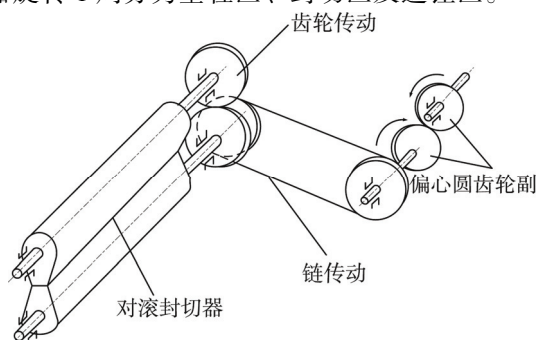


图1 典型的横封机构

Fig.1 Typical transverse sealing mechanism

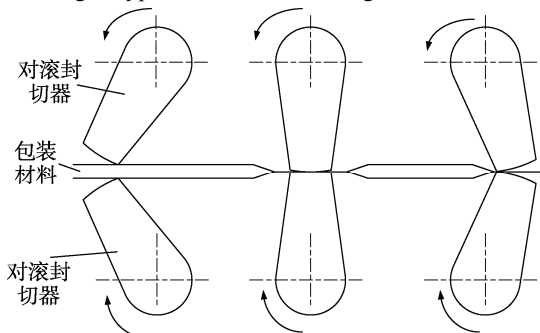


图2 卧式枕形自动包装机横封运动过程

Fig.2 Transverse sealing process of horizontal pillow-type automatic packaging machine

横封过程中的工艺要求: 在封切区, 要求匀速或近似匀速转动, 使封切器线速度与包装袋输送的速度相等; 在空程区, 速度应尽量快, 以提高效率; 在退让区, 封切器切断包装袋后需加速退让, 以保证具有一定包装高度的物品通过对滚封切器。

当采用非圆齿轮驱动横封机构包装块状物体时, 其运动分析见图 3。包装物由左往右运动, 封切器处在中间位置时切断包装袋。对滚封切器在热封时与包装袋速度保持同步, 同时封切器旋转 1 周为 1 个袋长, 可得:

$$\begin{cases} QL/60 = \frac{1}{2} w_1 L_1 i_{21\min} = v \\ w_1 60/Q = 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 为包装袋的速度; w_1 为非圆齿轮主动轮的转速; L_1 为对滚封切器的中心距; $i_{21\min}$ 为非圆齿轮传动的最小传动比; Q 为每分钟生产的袋数; L 为袋的长度。

要使包装过程能够连续进行, 包装袋应能顺利通过滚封切器。即当对滚封切器离开包装袋时, 其边缘离包装物边缘应有一定距离。如果用对滚封切器的转角表示, 应满足如下要求:

$$\beta < \int_0^{\frac{2\pi(L_2 + \sqrt{L_1 h - h^2})}{L}} i_{21} d\varphi_1 \quad (2)$$

式中: φ_1 为对滚封切器的转角, 速度最小的位置 $\varphi_1 = 0$; L 为包装袋长度; L_2 为包装物边缘离切断位置的长度; β 为横封器由切断位置到离开包装袋的转角; i_{21} 为非圆齿轮传动比。

设所需的包装高度为 h 时, 由几何关系可得:

$$\beta = \alpha + \arccos((L_1 - h)/L_1) \quad (3)$$

式中: α 为横封器边缘和对称中心线的夹角。

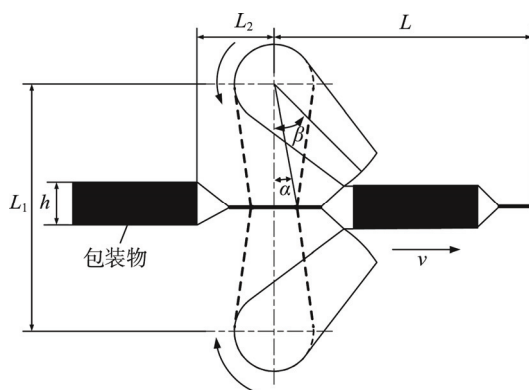


图3 非圆齿轮驱动横封机构运动分析

Fig.3 Kinematic analysis of transverse sealing mechanism driven by non-circular gear

2 傅里叶非圆齿轮数学模型

2.1 傅里叶非圆齿轮节曲线模型

傅里叶非圆齿轮副主动轮节曲线的表达式为:^[11]

$$r_1(\varphi_1) = a_0 + a_1 \sin \varphi_1 + b_1 \cos \varphi_1 + a_2 \sin(2\varphi_1) + b_2 \cos(2\varphi_1) \quad (4)$$

式中: r_1 为节曲线上任意点的极径; φ_1 为极径 r_1 所对应的转角; a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 为傅里叶非圆齿轮主动轮节曲线的调节参数。为了实现傅里叶非圆齿轮副的连续传动, 要求傅里叶非圆齿轮的主动轮节曲线和共轭的从动轮节曲线都是封闭的。由式 (4) 可知, $r_1(\varphi_1)$ 是以 φ_1 变化 2π 为周期的周期函数, 可见该方程构成的曲线是封闭的。

根据非圆齿轮传动比原理, 要使傅里叶非圆齿轮的从动轮节曲线封闭, 需要主动轮节曲线转动 1 周时相应的从动轮也转动 1 周, 因此满足以下的条件:

$$2\pi = \int_0^{2\pi} \frac{r_1(\varphi_1)}{a - r_1(\varphi_1)} d\varphi_1 \quad (5)$$

式中: a 为傅里叶非圆齿轮副中心距。

傅里叶非圆齿轮的从动非圆齿轮节曲线方程:^[12]

$$\begin{cases} r_2(\varphi_1) = a - r_1(\varphi_1) \\ \varphi_2 = \int_0^{\varphi_1} \frac{r_1(\varphi_1)}{a - r_1(\varphi_1)} d\varphi_1 \end{cases} \quad (6)$$

在傅里叶非圆齿轮副节曲线建模过程中,采用式(5)求中心距,但无法直接求出,因此采用变步长、牛顿-柯特斯(Newton-Cotes)法等数值计算方法求解,流程见图4。

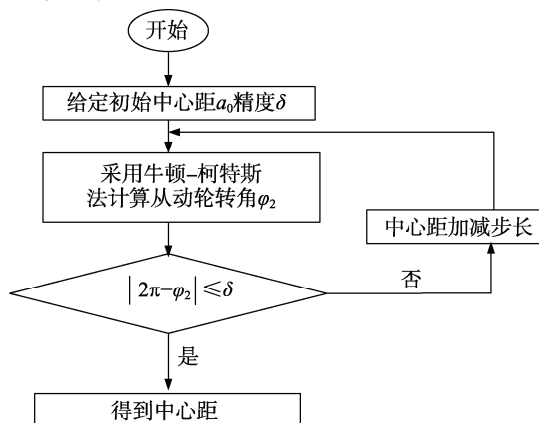


图4 傅里叶非圆齿轮副中心距计算流程

Fig.4 Calculation process of the center distance of Fourier noncircular gear pair

2.2 傅里叶非圆齿轮节曲线凹凸性

为了方便实现傅里叶非圆齿轮加工,需保证其节曲线是凸的,即傅里叶非圆齿轮的主动轮节曲线和从动轮节曲线的曲率半径大于0。主动轮节曲线曲率半径计算公式^[13]:

$$\rho_1 = \frac{a \left[1 + \left(\frac{i'_{12}}{1 + i_{12}} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{1 + i_{12} + i''_{12}} \quad (7)$$

从动轮节曲线曲率半径计算公式:

$$\rho_2 = \frac{a i_{12} \left[1 + \left(\frac{i'_{12}}{1 + i_{12}} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{1 + i_{12} - i_{12} \cdot i''_{12} + (i'_{12})^2} \quad (8)$$

式中: i_{12} 为傅里叶非圆齿轮副传动比, $i_{12} = r_1(\varphi_1)/r_2(\varphi_2)$; i'_{12} 为 i_{12} 的一阶导数; i''_{12} 为 i_{12} 的二阶导数。

由上可得,式(7)和式(8)中的分子部分恒大于0,只要使得 ρ_1 , ρ_2 分母部分分别大于0即可。由此,对于傅里叶非圆齿轮副,齿轮副节曲线无内凹的条件为:

$$\begin{cases} 1 + i_{12} + i''_{12} \geq 0 \\ 1 + i_{12} - i_{12} \cdot i''_{12} + (i'_{12})^2 \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

3 横封机构优化模型

在横封机构设计中,对滚封切器的结构参数由具体应用情况决定,因此横封机构优化主要是对非圆齿轮参数进行设计。当采用偏心圆齿轮作为驱动时,只有2个设计参数,选取其中一个参数后,另一个参数就随之确定,无需进行参数优化。傅里叶非圆齿轮共有5个设计参数,其中 a_0 不影响传动比的变化趋势^[11],因此文中只对其他4个参数进行优化。具体优化过程如下所述。

1) 目标函数建立。根据上述可知,包装物由切断位置水平运动 L_2 长度所对应的对滚封切器转角越大,则能包装的物品越高,因此优化的目标函数为:

$$F_1(x)_{\min} = - \int_0^{\phi} r_2(\varphi_2)/r_1(\varphi_1) d\varphi_1 \quad (10)$$

其中 $\varphi_1 = 0$, 对滚封切器速度最小。

$$\phi = \frac{2\pi(L_2 + 0.5\sqrt{2L_1h - h^2})}{L}$$

2) 约束条件。为了保证非圆齿轮齿廓的加工,傅里叶非圆节曲线应该是凸的,应满足式(9)以保证傅里叶非圆齿轮主、从动轮节曲线曲率 ρ_1 , ρ_2 大于0。为保证热封、切断时匀速或近似匀速转动,傅里叶非圆齿轮传动比最小值应满足 $i_{21\min} = L/(\pi L_1)$ 。

3) 优化方法。Matlab 优化工具箱中的 `fmincon` 函数是求解非线性有约束极值优化问题的一个有效方法。利用目标函数以及约束函数的一阶导数信息,从给定初始点开始,在满足约束的条件下,沿着目标函数下降的方向迭代,最后收敛到最优解^[14-15]。文中的优化问题是非线性有约束极值优化问题,因此采用格式 `[X,FVAL]=fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)`, 其中, `fun` 为最小值的目标函数; `x0` 为初值; `A`, `b` 为线性不等式约束; `Aeq`, `beq` 为线性等式约束; `lb` 为下边界; `ub` 为上边界; `nonlcon` 为非线性约束条件。

4 实例设计

某雪糕包装的设计要求:袋长 $L=150$ mm,生产能力 $Q=90$ 袋/min,对滚封切器中心距 $L_1=60$ mm,包装物边缘离切断位置的长度 $L_2=10$ mm,包装物的高度 $h=25$ mm,横封器边缘和中心线的夹角 $\alpha=20^\circ$ 。由式(1)和式(3)计算可知 $i_{21\min} = 0.796$, $\beta = 74.3^\circ$ 。

由上述公式可知,该横封机构的优化目标为:

$$F_1(x)_{\min} = - \int_0^{0.458\pi} r_2(\varphi_2)/r_1(\varphi_1) d\varphi_1 \quad (11)$$

约束条件为:

$$i_{21\min} = 0.796, \quad 1 + i_{12} + i_{12}'' \geq 0, \quad (12)$$

$$1 + i_{12} - i_{12} \cdot i_{12}'' + (i_{12}')^2 \geq 0$$

给定傅里叶非圆齿轮参数 $a_0 = 30$ mm, 通过Matlab的优化算法得出 $a_1 = 0$, $b_1 = 3.5$, $a_2 = 0$, $b_2 = 2.2$, 目标函数值为 $-80.2 > -\beta$ 。通过上述参数得到傅里叶非圆齿轮, 建立齿轮副齿廓, 得到该齿轮啮合图, 见图5。

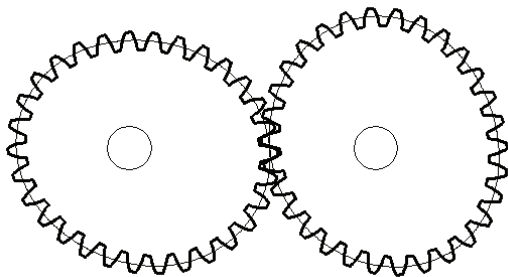


图5 新型横封机构的傅里叶非圆齿轮副
Fig.5 Fourier noncircular gear pair of new transverse sealing mechanism

按文献[5]公式, 给定偏心圆齿轮半径为30 mm, 得到偏心距为3.536 mm, 按式(11)计算得到值为 $-70.76 < -\beta$, 雪糕无法通过封切器。通过优化所得傅里叶非圆齿轮与偏心圆齿轮传动比见图6。通过传动对比图可知, 傅里叶非圆齿轮在退让区的加速度比偏心圆齿轮大, 因此能让更高的物体通过, 而偏心圆齿轮加速度较小。

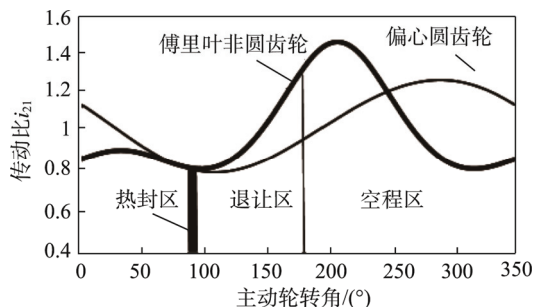


图6 傅里叶非圆齿轮与偏心圆齿轮传动比
Fig.6 Comparison of Fourier noncircular gear and eccentric circular gear transmission

5 结语

分析了具有一定高度的包装物横封工艺要求, 并提出采用更加灵活的傅里叶非圆齿轮副驱动横封机构。建立了傅里叶非圆齿轮节曲线模型, 并进一步建立了横封机构的优化模型。通过实例验证傅里叶非圆齿轮具有更好的灵活性, 能够更好满足块状物体包装要求。

参考文献:

[1] 黄志刚, 刘凯, 刘科. 食品包装新技术与食品安全

[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 161—166.

HUANG Zhi-gang, LIU Kai, LIU Ke. New Technologies in Food Packaging and Food Safety[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 161—166.

[2] 黎英. 食品包装安全开启的人机设计[J]. 包装工程, 2013, 34(4): 34—36.

LI Ying. Ergonomics Design of Food Packaging Safe Opening[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(4): 34—36.

[3] 段能全, 杜文华, 赵惠文, 等. 枕形包装机旋转往复横封机构的运动分析[J]. 包装工程, 2014, 35(21): 54—58.

DUAN Neng-quan, DU Wen-hua, ZHAO Hui-wen. Motion Analysis of Transverse Sealing Mechanism of Pillow Type Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(21): 54—58.

[4] 赵惠文. 枕形包装机横封器的性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2014: 8—17.

ZHAO Hui-wen. Study on the Performance of Pillow Type Packaging Machine Transverse Sealing Device [D]. Taiyuan: North University of China, 2014: 8—17.

[5] 韩继光, 高德, 于影. 偏心渐开线齿轮在高速包装机上的应用[J]. 包装工程, 1997, 18(2): 72—74.

HAN Ji-guang, GAO De, YU Ying. The Eccentric Involute Gear is Applied in High Velocity Packing Machine[J]. Packaging Engineering, 1997, 18(2): 72—74.

[6] AHMED D, HIROAKI M. General Design of the Forming Col-lar of the Vertical Form, Fill and Seal Packaging Machine Us-ing the Finite Element Method [J]. Packaging Technology and Science, 2011, 24(1): 31—47.

[7] 赵匀, 高林弟, 陈建能, 等. 变形偏心非圆齿轮行星系分插机构设计和参数优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 74—77.

ZHAO Yun, GAO Lin-di, CHEN Jian-neng, et al. Design and Parameters Optimization of Deformed Eccentric Non-circular Geartransplanting Mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 74—77.

[8] ZHAO Yun, SUN Liang, YU Gao-hong. Properties and Applications of the Eccentric-gear Drive[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(2): 323—331.

[9] 徐高欢, 陈建能, 童志鹏. 混合高阶傅里叶非圆齿轮驱动的差速泵多目标参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 384—390.

XU Gao-huan, CHEN Jian-neng, TONG Zhi-peng. Multi-objective Optimization of Mixed High-order Fourier Non-circular Gear-driven Differential Pump[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural

- Machinery, 2016, 47(1): 384—390.
- [10] 李健, 王乐炯, 徐高欢, 等. 傅里叶非圆齿轮驱动的六叶片差速泵: 中国, 201420052513.2[P]. 2014-01-27.
LI Jian, WANG Le-jiong, XU Gao-huan, et al. Fourier Non-circular Gear-driven Differential 6-vane Pump: China, 201420052513.2[P]. 2014-01-27.
- [11] 徐高欢, 陈建能, 张国凤. 傅里叶非圆齿轮驱动四叶片差速泵设计与特性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 42(12): 80—87.
XU Gao-huan, CHEN Jian-neng, ZHANG Guo-feng. Design and Performance Analysis of Fourier Non-circular Gear-driven Differential Pump[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 42(12): 80—87.
- [12] 吴序堂, 王贵海. 非圆齿轮及非匀速比传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
WU Xu-tang, WANG Gui-hai. Noncircular Gear and Non Uniform Ratio Drive [M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [13] CHEN Jian-neng, ZHAO Hua-cheng, WANG Ying, et al. Kinematic Modeling and Characteristic Analysis of Eccentric Conjugate Non-circular Gear & Crank-rocker & Gears Train Weft Insertion Mechanism[J]. Journal of Donghua University, 2013, 30(1): 15—20.
- [14] 龚水明, 詹小刚. 基于 MATLAB 优化工具箱的机械优化设计[J]. 机械工程师, 2008(10): 92—94.
GONG Shui-ming, ZHAN Xiao-gang. Mechanical Optimal Design Based on MATLAB Optimization Toolbox[J]. Mechanical Engineers, 2008(10): 92—94.
- [15] 陈园园, 詹少华, 霍家林. 基于 MATLAB 优化工具箱的螺栓组联接的优化设计[J]. 煤矿机械, 2012, 33(3): 28—29.
CHEN Yuan-yuan, ZHAN Shao-hua, HUO Jia-lin. Optimization Design of Bolt-group Connection Based on MATLAB Optimization Toolbox[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(3): 28—29.