

基于包络理论的谐波传动共轭齿廓求解和啮合分析

Conjugate tooth profile solution and meshing analysis of harmonic drive based on envelope theory

李鹏超^{1,2} 何雪明^{1,2} 卢立新^{1,2} 林自东³

LI Peng-chao^{1,2} HE Xue-ming^{1,2} LU Li-xin^{1,2} LIN Zi-dong³

(1. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

2. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 3. 山东碧海包装材料有限公司, 山东 临沂 276600)

(1. Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. Shandong Bihai Packaging Materials Co., Ltd., Linyi, Shandong 276600, China)

摘要:针对数值求解谐波传动共轭齿廓推导复杂, 不易求解等问题, 运用一种根据柔轮运动轨迹包络的方法求解共轭齿廓, 同时调整柔轮齿廓的沿轴向的不同齿高, 使柔轮齿与共轭钢轮齿啮合时不发生干涉。为分析柔轮的齿根圆半径和转矩对柔轮应力的影响, 通过 Ansys Workbench 建立了多体接触模型, 探究了齿根圆半径和加载不同转矩对柔轮应力的影响规律。结果表明: 柔轮应力对齿廓参数变化的敏感度高于所加载的转矩, 因为谐波传动为多齿啮合传动, 单个齿所受的应力较小, 载荷对柔轮应力的影响相对小于齿廓参数的影响。

关键词: 共轭齿廓; 包络理论; 谐波传动; 运动学仿真; 齿廓参数; 应力

Abstract: In order to solve the problem of complex derivation of conjugate tooth profile in harmonic drive, a method based on the trajectory envelope of flexspline is used to solve the conjugate tooth profile, and the different tooth height along the axial direction of the flexspline profile is adjusted to avoid interference between the flexible gear and the conjugate steel gear. In order to analyze the influence of tooth root circle radius and torque on the

stress of flexspline, a multi-body contact model was established by ANSYS Workbench to explore the influence of root circle radius and torque on the stress of flexspline. The results show that the sensitivity of flexspline stress to tooth profile parameters is higher than that of torque, because harmonic drive is multi tooth meshing transmission, the stress of single tooth is smaller, and the influence of load on flexspline stress is less than that of tooth profile parameters.

Keywords: conjugate tooth profile; envelope theory; harmonic drive; kinematics simulation; tooth profile parameters; stress

随着机器人技术的快速发展, 传统的食品加工工厂向智能化, 无人化迈进。其中, 工业机器人是实现智能化食品加工工厂的重点装备, 而其中谐波减速器主要作用于工业机器人机械臂的关节处, 是影响机器人性能的重要部件之一。谐波减速器由柔轮、钢轮和波发生器组成, 其传动主要依靠柔轮的可控的弹性变形来传递运动, 通常以钢轮固定, 柔轮作为输入, 波发生器作为输出来实现运动的传递。

谐波传动中, 齿形齿廓是影响谐波减速器高精密度的主要因素, 柔轮与钢轮高性能的啮合取决于其齿廓的良好设计。目前关于齿形的研究有图解分析法^{[1]56-59}、等速曲线法^{[1]61-63}、幂级数法^{[1]63-68}、改进运动学法^[2]、包络法^[3]和速度瞬心法^[4]。20 世纪 50 年代由美国学者 Musser 发明的谐波减速器, 所用的齿廓即是直线齿廓, 后来被工艺较好的渐开线齿廓代替^{[1]99-102}。Ishikawa 等^[5]采用齿条近似法简化的方法提出了 S 型齿廓。辛洪兵^[6]在圆弧齿廓的基础上提出了谐波传动双圆弧齿廓的设计

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 51275210, 51975251); 省产学研联创项目 (编号: 1078081606192480); 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目 (编号: FMZ2018Y2); “六大人才高峰”项目 (编号: 1076010241131350)

作者简介: 李鹏超, 男, 江南大学在读硕士研究生。

通信作者: 何雪明 (1966—), 男, 江南大学教授, 博士。

E-mail: hxuem2003@163.com

收稿日期: 2020-10-28

方法。王家序等^[7-8]对不同共轭原理的双圆弧齿廓谐波传动的共轭齿廓和共轭区域进行了对比分析。张宁等^[9]基于柔轮装配后实际齿廓线与理论齿廓线在空间位置上存在差异,为避免啮合干涉或啮合不充分情况,提出柔轮齿廓的修形方法模型来对柔轮齿廓进行设计优化。张雷等^[10-12]对双圆弧谐波传动进行啮合优化和仿真分析,探究其柔轮应力的影响规律。肖季常等^[13]在基于谐波传动共轭方法的基础上提出三圆弧齿廓的设计方法,并探究三圆弧柔轮齿廓参数对共轭区间的影响。余金宝等^[14]根据椭圆凸轮波发生器的运动规律推导柔轮的变形函数,并运用运动轨迹包络求解钢轮齿廓,通过啮合仿真验证所求钢轮齿廓的合理性。前面几篇文献对谐波传动共轭齿廓的求解主要是运用传统的数值解法去推导共轭齿廓,未与运动仿真相结合。余金宝等^[14]虽然结合了运动仿真去求解共轭齿廓,但是未考虑柔轮齿在空间的变形情况。

试验拟以公切线式双圆弧齿廓为研究对象,采用包络理论运动学仿真的方法,根据柔轮运动轨迹的包络,对包络线进行最小二乘拟合求解出共轭钢轮齿廓。同时,基于 Matlab 分析柔轮齿在空间的真实啮合状态调整柔轮齿沿轴向的不同齿高,并在 Ansys workbench 中建立谐波减速器完整的三维弹性接触模型,分析柔轮的齿根圆半径和加载的转矩对其应力和变形的影响规律,以期优化其参数来降低柔轮的应力,提高柔轮的疲劳强度。

1 谐波传动共轭齿廓设计

1.1 公切线双圆弧齿廓

图 1 为公切线双圆弧柔轮齿廓坐标系,其由凸圆弧齿廓 AB,公切线 BC,凹圆弧齿廓 CD 组成。以柔轮中心线为 Y 轴,齿廓两侧公切线中点的连线为 X 轴,则 X 和 Y 轴的交点为公切线双圆弧齿廓的坐标原点 O。其各段齿廓相应的参数方程表达式为:

(1) AB 段凸圆弧齿廓:

$$\begin{cases} x_1 = \rho_a \cos \alpha_1 + X_1 \\ y_1 = \rho_a \sin \alpha_1 + Y_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

x_1 ——柔轮凸齿廓横坐标,mm;

y_1 ——柔轮凸齿廓纵坐标,mm;

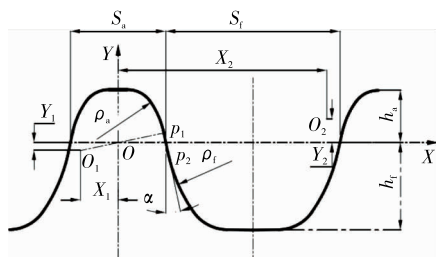


图 1 公切线双圆弧齿廓示意图

Figure 1 Schematic diagram of common tangent double circular arc tooth profile

ρ_a ——凸圆弧齿廓半径,mm;

α_1 ——凸圆弧角度参数变量, $^\circ$;

X_1 ——凸齿廓 X 偏心距, $X_1 = -[\rho_a - (S_a \cos \alpha)/2] \cos \alpha$, mm;

Y_1 ——凸齿廓 Y 偏心距, $Y_1 = -[\rho_a - (S_a \cos \alpha)/2] \sin \alpha$, mm.

(2) BC 段公切线:

$$\begin{cases} x_2 = (S_a \cos \alpha)/2 + l \sin \alpha \\ y_2 = (S_a \sin \alpha)/2 - l \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中:

x_2 ——公切线段横坐标,mm;

y_2 ——公切线段纵坐标,mm;

S_a ——齿厚,mm;

α ——公切线夹角, $^\circ$;

l ——公切线长度参数变量,mm;

l_p ——为公切线长度,mm.

(3) CD 段凹圆弧齿廓:

$$\begin{cases} x_3 = \rho_i \cos \alpha_2 + X_2 \\ y_3 = \rho_i \sin \alpha_2 + Y_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

x_3 ——柔轮凹齿廓横坐标,mm;

y_3 ——柔轮凹齿廓纵坐标,mm;

ρ_i ——凹圆弧齿廓半径,mm;

α_2 ——凹圆弧角度参数变量, $^\circ$;

X_2 ——凹齿廓 X 偏心距, $X_2 = (1 + \sin^2 \alpha) S_a / 2 + \rho_i \cos \alpha$, mm;

Y_2 ——凹齿廓 Y 偏心距, $Y_2 = \rho_i \sin \alpha - (S_a \sin \alpha \cos \alpha) / 2$, mm.

1.2 基于包络理论和运动学仿真的共轭齿廓设计

为表达谐波减速器各构件之间的相对运动关系,以钢轮固定,波发生器输入,柔轮输出建立如图 2 所示的坐标系统,其中坐标系 $C_G(X_G, Y_G)$ 与钢轮固连,坐标原点 O_G 与谐波传动的回转中心重合, Y_G 为钢轮齿槽的对称线;坐标系 $C_R(X_R, Y_R)$ 与柔轮固连,坐标原点 O_R 为柔轮齿的对称线与柔轮原始曲线 S_R (原始曲线是指位于受载平面内柔轮的中线在波发生器作用下形成的弹性变形曲线)的交点, Y_R 为柔轮轮齿齿廓的对称线;坐标系 $C_0(X_0, Y_0)$ 与波发生器固连,坐标原点 O_0 作用在谐波传动的回转中心,与 O_G 重合, Y_0 与波发生器的长轴重合。

柔轮原始曲线在极坐标下的方程表达式为:

$$\rho = r_m + \omega(\varphi) \quad (4)$$

式中:

ρ ——柔轮极坐标半径,mm;

r_m ——柔轮未变形时的半径,mm;

$\omega(\varphi)$ ——柔轮径向变形量(以波发生器为标准椭圆波发生器), $\omega(\varphi) = \omega_0 \cos 2\varphi$, mm;

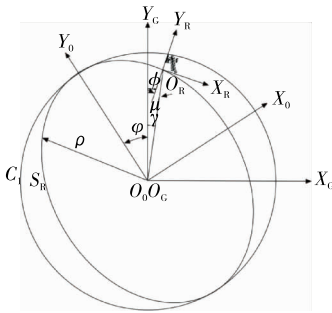


图2 谐波传动转角关系

Figure 2 Angle relation of harmonic drive

ω_0 ——柔轮最大径向变形量,mm。

图2坐标系中其余各参数表达式:

$$\begin{cases} \nu = -\int \omega(\varphi) d\varphi \\ \mu = \arctg \left| \frac{\rho'}{\rho} \right| = \arctg \frac{\rho'}{r_m + \omega} \approx \frac{1}{r_m} \frac{d\omega}{d\varphi}, \\ \gamma = \frac{U\phi}{z_1} + \frac{\nu}{r_m} \\ \phi = \mu + \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中:

ν ——柔轮的切向变形量,mm;

μ ——柔轮轮齿的偏转角,°;

γ ——柔轮的转角,°;

U/z_1 ——广义传动比;

U ——柔轮的变形波数,取2;

z_1 ——柔轮齿数;

ϕ ——柔轮的 Y_R 轴与钢轮的 Y_G 轴的夹角,°。

基于包络理论,与柔轮齿廓相共轭的钢轮齿廓表达式为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ 1 \end{bmatrix} = M_{RG} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & \rho\sin\gamma \\ -\sin\phi & \cos\phi & \rho\cos\gamma \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ 1 \end{bmatrix} \\ \frac{\partial x_G}{\partial \alpha} \frac{\partial y_G}{\partial \phi} - \frac{\partial y_G}{\partial \alpha} \frac{\partial x_G}{\partial \phi} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

将式(1)~式(5)代入式(6)以求解共轭钢轮齿廓,式(6)包含有隐函数的偏导求解,其数值解不易求解,通过结合运动仿真可以简化其求解过程。由柔轮坐标系到钢轮坐标系的坐标映射关系,通过 Matlab 编程,以柔轮的一个单齿相对于钢轮的一个完整的啮入、啮出过程,得到柔轮轮齿相对于钢轮轮齿的运动轨迹,再对运动轨迹中的一系列曲线族进行数学包络,通过最小二乘法拟合曲线族即可求得所需的钢轮齿廓。图3中的粗曲线即为与柔轮齿廓相共轭的钢轮齿廓。

2 公切线双圆弧谐波传动啮合分析

2.1 共轭柔轮空间齿廓计算实例

以模数 $m = 0.311$ 、柔轮齿数 $z_1 = 160$ 、钢轮齿数 $z_2 =$

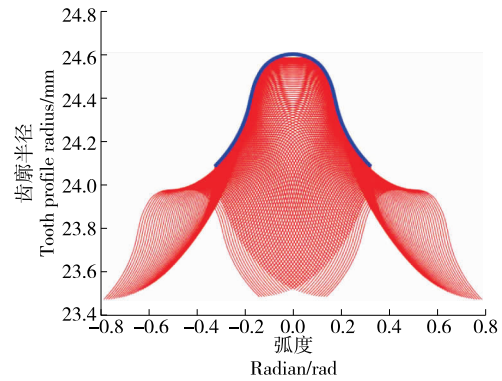


图3 柔轮运动轨迹的包络

Figure 3 Envelope of flexspline trajectory

162,钢轮固定、波发生器(以椭圆凸轮代替)输入、柔轮输出、单极传动比为80的公切线双圆弧齿廓的谐波减速器为例,柔轮齿廓参数如表1所示。

图4为一个柔轮齿的沿轴向侧面的齿廓图。由 Matlab 仿真分析可得修形角 $\beta = 0.679^\circ$,此时共切线双圆弧柔轮齿廓相对于共轭钢轮齿廓啮合轨迹不会发生齿廓干涉现象。图5为柔轮齿齿廓在前端面和后端面的运动轨迹。

2.2 谐波传动三维实体建模

建立谐波传动三维模型,将模型以 x_t 格式导入 Ansys workbench 中。柔轮材料选用 30 CrMnSiA,材料密度为 $7\,750\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $1.96 \times 10^5\text{ GPa}$,泊松比为 0.3;钢轮和椭圆凸轮材料选用 40# 碳素结构钢,材料密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $2.10 \times 10^5\text{ GPa}$,泊松比为 0.269。选用八节点六面体单元对模型进行网格划分,网格质量的好坏直接影响模型的分析结果,柔轮和钢轮啮合轮齿网格划分应该更为精密,此处选用 size 为

表1 柔轮齿廓参数

Table 1 Profile parameters of Flexspline

符号	参数	符号	参数
m	0.311	α	12
ρ_a	0.311	r_a	0.1
ρ_f	0.591	r_f	0.15
h_a	0.187	l_p	0.073
h_f	0.311	X_1	-0.137

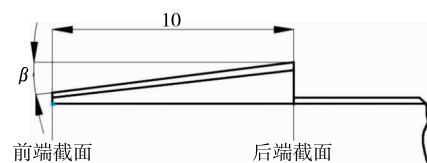


图4 柔轮轴向轮齿修形示意图

Figure 4 Schematic diagram of flexspline gear modification

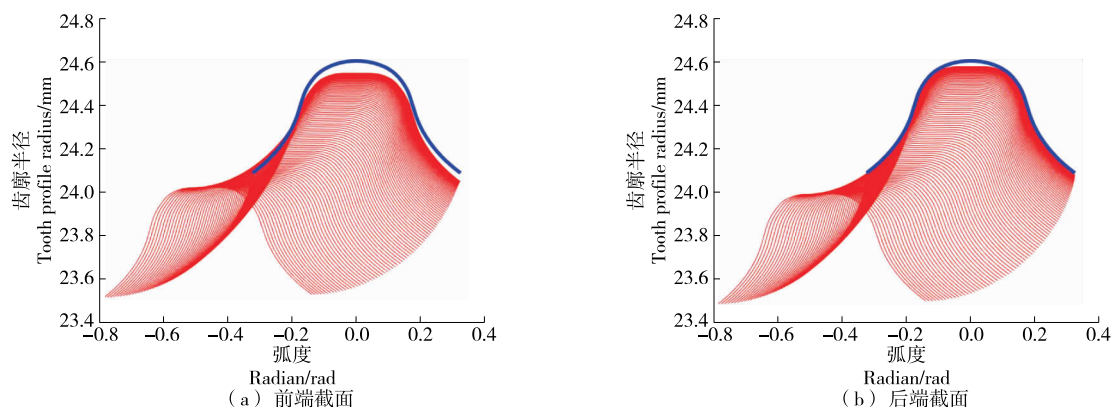


图 5 柔轮各截面的运动轨迹

Figure 5 The motion track of each section of Flexspline

0.6 mm 对柔轮和钢轮齿进行网格加密。波发生器和柔轮内侧壁面的接触 size 选用 1 mm 进行加密,其他区域选用 2 mm 进行网格划分,网格划分效果图如图 6 所示。

考虑柔轮的结构特点,模型中存在的接触面为:椭圆凸轮的外表面和柔轮内壁表面,椭圆凸轮外表面为“接触面”,柔轮内壁表面为“目标面”;柔轮齿面和钢轮齿面,柔轮齿面为“接触面”,钢轮齿面为“目标面”。接触面的摩擦因数取 0.1,钢轮设置固定约束,柔轮和椭圆凸轮设置位移约束(只释放其轴向的旋转约束)。由于柔轮的应力求解为非线性大变形问题求解,所以求解时开启“大变形”设置,同时为提高求解的收敛性,最小增量步调整为 10^0 。

2.3 柔轮应力与变形分析

通过 Ansys 进行谐波减速器的三维弹性接触有限元分析,建立谐波传动 3 种装配状态:① 柔轮和波发生器装配;② 柔轮,波发生器和钢轮装配;③ 柔轮,波发生器和钢轮装配同时加载负载转矩。分析其在柔轮长轴处的应力和变形,图 7 为谐波减速器 3 种装配状态应力云图,图 8 为柔轮径向变形量,图 9 为柔轮齿在长轴处沿轴向变形量。由图 8~图 9 可知,在无转矩的情况下,波发生器装配和钢轮装配使柔轮变形量相近,而转矩的施加使柔轮的变形量产生明显的变化,因此转矩是影响柔轮变

形量的重要因素。

3 基于响应面模型柔轮应力分析优化

3.1 响应面模型建立

为探究转矩和柔轮齿根圆半径对柔轮应力的影响规律,现建立以转矩和齿根圆半径为参数的响应面模型,探

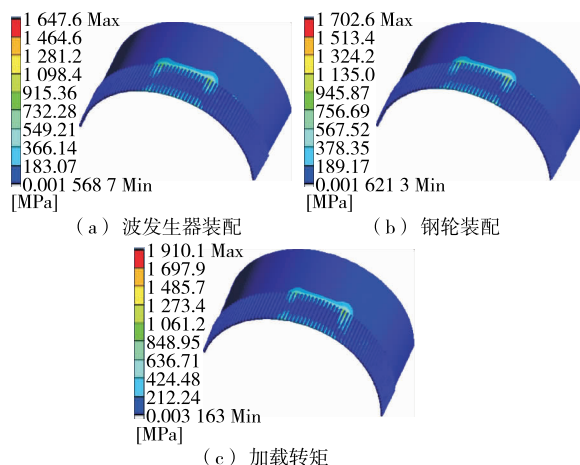


图 7 柔轮齿应力云图

Figure 7 Stress nephogram of flexible gear teeth

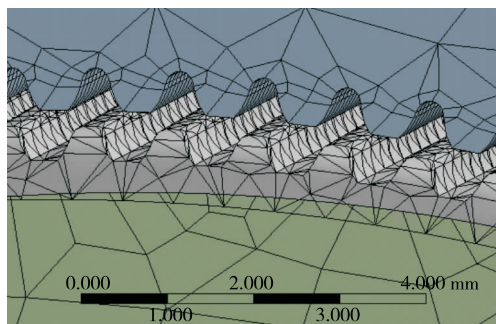


图 6 局部网格划分效果图

Figure 6 Local meshing rendering

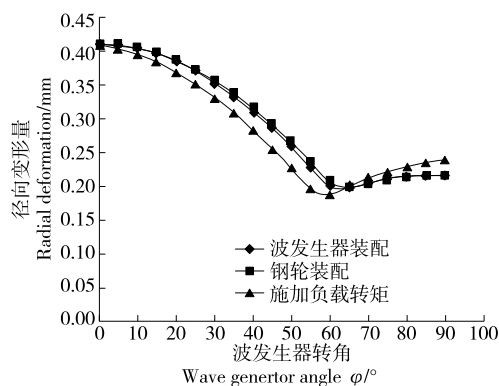


图 8 柔轮径向变形量

Figure 8 Radial deformation of Flexspline

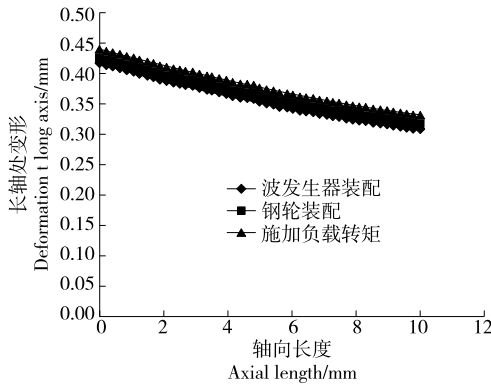


图9 柔轮齿长轴处沿轴向变形量

Figure 9 Axial deformation of flexible gear tooth at long axis

究其对柔轮应力的影响。设计参数分析试验,转矩以两个力 Force1 和 Force2 的形式施加在柔轮齿面上,这两个力大小相等方向相反,参数如表 2 所示。

图 10 为转矩和柔轮齿根圆半径对柔轮最大等效应力敏感度分析图。由图 10 可知,转矩对柔轮应力的影响呈正相关,柔轮齿根圆半径对应力的影响呈负相关。而且转矩和柔轮齿根圆半径都对柔轮应力有着较大的影响,所以如何在转矩和柔轮齿根圆半径所选用的取值范围内取得合适的值,使得柔轮的应力最小还需要进一步探究。

3.2 柔轮参数对柔轮应力影响规律

由图 11 可知,柔轮应力随着负载转矩的增加而增加,随着齿根圆半径的增加而下降。柔轮齿廓参数(柔轮齿根圆半径)对应力的影响比负载转矩更加明显,这是由于谐波传动为多齿啮合传动,单齿所受到的应力较小。当柔轮半径取 0.09 mm,负载 Force1=100 N 时,柔轮等效应力最大;当柔轮半径取 0.11 mm,负载 Force1=90 N 时,柔轮等效应力最小。

表 2 柔轮参数设计点表

Table 2 Design points of flexspline parameters

节点数	Force 1/Force 2/N	半径 R/mm	应力/MPa
1	90	0.09	2 603.9
2	90	0.10	2 507.7
3	90	0.11	2 432.2
4	100	0.09	2 645.1
5	100	0.10	2 552.2
6	100	0.11	2 475.5
7	110	0.09	2 686.2
8	110	0.10	2 594.7
9	110	0.11	2 518.7

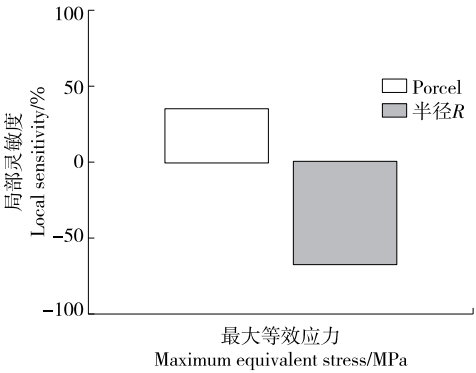


图 10 柔轮参数应力敏感度

Figure 10 Stress sensitivity of flexspline parameters

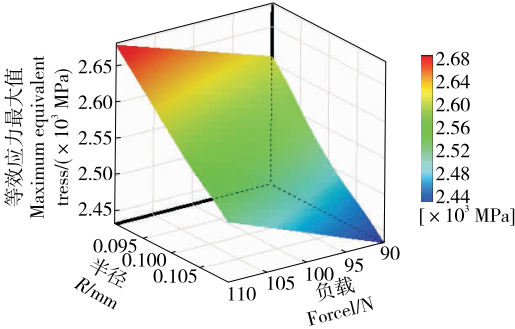


图 11 柔轮参数对应力影响云图

Figure 11 Influence of flexspline parameters on stress

4 结论

(1) 基于包络理论,结合运动仿真的数值解法,是一种可行的求解谐波传动共轭齿廓的方法。

(2) 由柔轮的一个单齿相对于共轭的钢轮齿廓以一个完成的啮入啮出过程画出的运动轨迹,通过调节柔轮的齿形,使其啮合过程在钢轮齿廓的包络下,无干涉发生。当柔轮齿主截面相对于后截面调节角度为 $\beta = 0.679^\circ$ 时,柔轮齿轨迹与钢轮齿无干涉发生。

(3) 由于谐波传动为多齿啮合传动,单齿所受的载荷较小,所以柔轮转矩相较于齿廓参数对应力的影响较小。

(4) 试验仅为理论分析,所求共轭齿廓的啮合性能还需进一步验证。

参考文献

[1] 沈允文,叶庆泰. 谐波齿轮传动的理论和设计[M]. 北京:机械工业出版社,1985.

[2] 辛洪兵. 研究谐波齿轮传动啮合原理的一种新方法[J]. 中国机械工程,2002,13(3):181-183.

[3] 范元勋,王华坤,宋德锋. 谐波齿轮传动共轭齿廓的计算机数值模拟研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2002,26(4):389-392.

[4] 董惠敏. 基于柔轮变形函数的谐波齿轮传动运动几何学及其啮合性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2008:55-77.

(下转第 128 页)

4 结论

试验对 YJ19 卷烟机烟支导板装置结构、尺寸和通道内空气相对湿度进行分析,得出烟支导板装置结构不合理,烟支在输送过程中抖动且水蒸气在通道内易聚集液化。重新设计了一种新型烟支导板装置,利用圆弧凹槽对烟支进行导向,并采用负压吸附烟支,解决了烟支抖动和水蒸气液化问题。通过随机抽样 40 组 8 000 支样本进行试验验证,结果表明,改进后的烟支导板装置使用效果良好,皱纹烟支缺陷率从 1.16% 下降到 0.30%,烟支搭口不洁缺陷率从 1.45% 下降到 0。

参考文献

- [1] 许昌烟草机械有限责任公司. YJ19B 卷烟机机器说明书[Z]. 许昌: 许昌烟草机械有限责任公司, 2016: 5-20.
- [2] 中国国家标准化管理委员, 中华人民共和国国家标准. 卷烟第三部分: 包装、卷制技术要求及贮运: GB 5606.3—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 21-28.
- [3] 刘舒畅, 张峻松, 翟义龙, 等. 浅谈烟支表面黄斑缺陷的产生原因及预防管控[J]. 轻工科技, 2015(9): 109.
- [4] 杨蓝, 周沅桢, 刘泽, 等. 烟支黄斑污染物的追溯与鉴别[J].

贵州农业科学, 2019, 47(5): 132-137.

- [5] 杜赫, 李晓波, 马俊, 等. 基于 ATR-FTIR 技术的黄斑烟污染源鉴别[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 85-88.
- [6] 蔡雨铮, 闫绍峰, 赵彬, 等. 蒸汽冷凝传热特性的研究[J]. 化工管理, 2017(21): 190.
- [7] 王猛. 卷烟机产生烟支表面各类问题的研究与处理方法[J]. 中国科技博览, 2018(20): 2-5.
- [8] 赵梅生, 陈锐, 伍先, 等. 消除黄斑烟质量隐患的研究[J]. 价值工程, 2013, 32(18): 174.
- [9] 舒奎武, 李宪成, 于帅, 等. 卷烟机产生烟支表面水渍、黄斑问题分析与处理[J]. 轻工科技, 2015, 31(12): 69-70.
- [10] 张卫宾, 简金领. PASSIM 接装机水松纸夹末及冷凝水分析与改进[J]. 设备管理与维修, 2015(1): 64-66.
- [11] 彭永刚, 刘德凯, 曲飏, 等. Φ 5.25 mm 烟支皱纹的形成及解决办法[J]. 设备管理与维修, 2014(7): 29-31.
- [12] 王志魁, 向阳, 王宇. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018: 289-292.
- [13] 梅自强. 纺织辞典[S]. 北京: 中国纺织出版社, 2007: 147-155.
- [14] 何立明, 赵罡, 程邦勤. 气体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 174-180.

(上接第 107 页)

- [5] IISHIKAWA Shoichi, KANAGAWA Yokohama, KIYOSAWA Yoshihide, et al. Flexible meshing gearing having three-dimensional, non-interactive wide-area intermeshing tooth profile: 5458023[P]. 1995-04-17.
- [6] 辛洪兵. 双圆弧谐波齿轮传动基本齿廓设计[J]. 中国机械工程, 2011, 22(6): 656-662.
- [7] 王家序, 周祥祥, 李俊阳, 等. 杯形柔轮谐波传动三维双圆弧齿廓设计[J]. 浙江大学学报(工学), 2016, 50(4): 616-624.
- [8] 王家序, 袁攀, 李俊阳, 等. 基于不同啮合原理的谐波传动齿廓研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 58-64.
- [9] 张宁, 张英杰, 李阳帆, 等. 考虑齿轮形变的谐波减速器齿

廓优化方法[J]. 西安交通大学学报(自然科学版), 2019, 53(12): 31-37.

- [10] 张雷, 杨伟超, 蒋倩倩, 等. 谐波减速器核心部件结构应力分析[J]. 机械传动, 2018, 42(12): 114-122.
- [11] 蒋倩倩, 弓安, 李晓峰, 等. 谐波传动中凸轮径向变形量对齿廓修形的影响[J]. 机械传动, 2019, 43(6): 1-5.
- [12] 王家序, 蒋倩倩, 李俊阳, 等. 双圆弧谐波传动柔轮齿形参数多目标优化设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1 194-1 202.
- [13] 肖季常, 贺小飞, 王家序, 等. 三圆弧谐波齿轮传动齿廓设计[J]. 机械传动, 2019, 43(10): 51-55.
- [14] 余金宝, 范元勋. 谐波传动柔轮变形及共轭齿廓的研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(5): 34-38, 56.

(上接第 123 页)

- [5] 程华利, 樊可清. 异音检测的机器学习方法及其在电机质检中的应用[J]. 测控技术, 2015, 34(4): 55-58, 62.
- [6] 温浩, 刘力源. 基于小波包和 SVM 一类学习在电机异音检测中的应用[J]. 测控技术, 2015, 34(2): 35-38.
- [7] 张新, 郑燕萍, AUGEIX Antoine, 等. 基于小波包分解与机器学习的汽车调光电机异音识别[J]. 森林工程, 2019, 35(1): 59-63.
- [8] 常嘉树. 汽车零部件异音异响信号检测系统[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(9): 6-8.
- [9] 李春阳, 李楠, 冯涛, 等. 基于深度学习的洗衣机异常音检测[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(2): 108-117.
- [10] YANG Bo-suk, HWANG Won-woo, KIM Dong-jo, et al.

Condition classification of small reciprocating compressor for refrigerators using artificial neural networks and support vector machines[J]. Elsevier Ltd, 2005, 19(2): 371-390.

- [11] HE Chang-bo, LI Hong-kun, LI Zhi-xiong, et al. An improved bistable stochastic resonance and its application on weak fault characteristic identification of centrifugal compressor blades[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 442: 677-697.
- [12] LI Ying, WANG Jin-dong, ZHAO Hai-yang, et al. Fault diagnosis method based on modified multiscale entropy and global distance evaluation for the valve fault of a reciprocating compressor [J]. Strojinski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2019, 65(2): 123-135.