

doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.201704006

偏心圆弧型超越离合器工作型面设计方法及误差分析

宋宁宁¹,胡凯杰^{1,2},王 平¹

(1.盐城工学院 机械工程学院,江苏 盐城 224002;
2.江苏大学 机械工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:为克服现有超越离合器工作型面加工难度大、加工成本高以及加工精度低等缺点,在分析超越离合器结构及工作条件的基础上,提出一种偏心圆弧型超越离合器工作型面的设计方法;以某家用汽车使用的对数螺线型超越离合器为例,应用提出的方法完成了该离合器偏心圆弧工作型面的设计,通过比较前后两种工作型面楔角及中心距等方面的误差,对该方法的可行性进行了验证。结果表明,该方法设计的偏心圆弧型面与原有对数螺线型面相比,误差较小,且因改进后的超越离合器工作型面采用圆弧面,加工难度大为降低、加工精度较好,从而在保证加工质量的前提下降低了加工成本。

关键词:超越离合器;工作型面设计;曲线拟合;误差分析

中图分类号:TG376 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2017)04-0026-05

滚柱式超越离合器是一种内、外星轮速度或方向变换时能实现自动接合或脱开的机构,广泛应用在原动机和工作机之间。滚柱式超越离合器通过滚柱与工作型面间的摩擦力实现内外星轮的楔合。随着滚柱的磨损,滚柱与型面间的楔合位置及摩擦接触角会发生变化,从而影响超越离合器的使用寿命。近年来国内外学者对滚柱磨损的影响因素及工作型面的参数优化等进行了相关研究,如王松林等^[1]对超越离合器的工作型面进行了分析与结构优化;李志杰等^[2]对超越离合器滚柱进行了优化设计,得到最优鼓形曲线的鼓形量,使接触应力更为合理,从而提高了超越离合器的使用寿命;石光林等^[3]针对目前滚柱式超越离合器动力学研究不足的现状,对装载机用滚柱式超越离合器的工作过程进行了仿真分析。

目前,超越离合器工作型面形状主要采用偏心圆弧、对数螺线及阿基米德螺线。采用具有定角特性的对数螺旋曲线及阿基米德螺线作为超越离合器的工作型面时,零件在使用过程中工作楔角不随滚柱磨损而变化,能够在一定程度上提高零件的使用寿命,但工作型面加工难度较大,精度

难以保证;偏心圆弧曲线与对数螺旋曲线相似,两者误差较小,常用于多种机构中替代对数螺旋曲线作为超越离合器的工作型面,但目前为止偏心圆弧型超越离合器还缺乏简单精确的设计方法。因此研究出能够代替对数螺线型工作型面的型面对超越离合器的生产制造具有重要意义。

1 工作型面设计条件

图 1 为滚柱式超越离合器在楔合状态下滚柱与内外星轮间的位置关系图。图 1 中 O 点为超越离合器中心点, O_1 为滚柱中心, A 、 B 两点为滚柱同工作型面以及超越离合器内星轮外表面的接触点, $\angle O_1AB$ 、 $\angle O_1BA$ 分别为滚柱与工作型面以及滚柱与超越离合器内星轮外表面间的摩擦接触角 ν 、 ω , $\angle OAC$ 为向径 AO 与公切线 AC 的夹角 β (AC 为滚柱与工作型面的公切线), BD 为滚柱与超越离合器内星轮外表面的公切线, AO 为对数螺线的极径 ρ , BO 为超越离合器内星轮外表面半径 R , AO_1 为滚柱半径 r , AC 与 BD 的夹角为超越离合器的工作楔角 α 。

收稿日期:2017-10-20
基金项目:江苏省产学研合作前瞻性联合研究项目(BY2015057-28)
作者简介:宋宁宁(1996—),女,江苏靖江人,主要研究方向为汽车零部件优化设计。
通讯作者:王平(1964—),男,江苏盐城人,教授,博士,主要研究方向为汽车冷锻件精密成形。

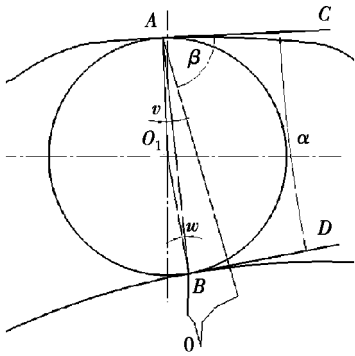


图 1 超越离合器滚柱几何模型

Fig.1 The geometric model of roller overrunning clutch

1.1 自锁条件

滚柱式超越离合器楔合位置处的滚柱受力情况如图 2 所示。滚柱式超越离合器实现楔合功能的关键是滚柱与工作型面间的摩擦力,若超越离合器楔合所需的力大于滚柱与工作型面间的最大摩擦力,则该零件无法正常工作。因此若要离合器实现自锁,滚柱与内、外星轮间的实际摩擦力 F_A, F_B 必须小于或等于滚柱与外星轮和内星轮间的最大静摩擦力,即

$$F_A \leq \mu_A N_A \quad (1)$$

$$F_B \leq \mu_B N_B \quad (2)$$

式中: F_A, F_B 分别为滚柱与内外星轮间的摩擦力, $N; N_A, N_B$ 分别为滚柱与内外星轮间的最大压应力, $N; \mu_A, \mu_B$ 分别为接触面的滑动摩擦系数。

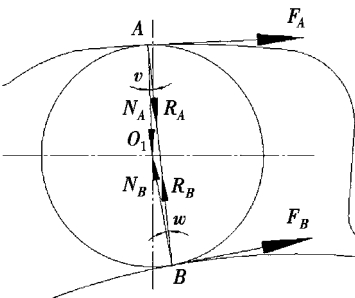


图 2 滚柱受力图

Fig.2 Force diagram of roller

图 2 中, $\triangle O_1AB$ 为等腰三角形,摩擦角 $v = \omega$, 即工作楔角 $\alpha = v + \omega = 2v = 2\omega$, 此时滚柱处于平衡状态, $F_A = F_B, N_A = N_B$ 。将公式 1 和公式 2 化简,得超越离合器自锁条件为

$$\alpha = v + \omega \leq \arctan \mu_A + \arctan \mu_B \quad (3)$$

在超越离合器中,由于内外星轮材料相同,滚柱与内外星轮间的摩擦系数 $\mu_A = \mu_B$, 因此将公式 3 化简后可得

$$\tan \frac{\alpha}{2} \leq \mu_A \quad (4)$$

1.2 应力条件

超越离合器工作型面的形状尺寸对滚柱与工作型面间的夹角有着直接的影响,也直接决定了作用在滚柱上的接触应力。当超越离合器处于楔合状态时,滚柱所受的压应力不能大于滚柱的许用应力。基于 Hertz 接触理论的线接触应力基本公式,接触应力关系式可表示为

$$\sigma_H = 0.418 \sqrt{\frac{N \times E_v}{l \times \rho_v}} \leq [\sigma_H] \quad (5)$$

式中: σ_H 为滚柱所受的接触应力, MPa; N 为滚柱与内外星轮间的正压力, $N; E_v$ 为材料之间的弹性模量, GPa; l 为滚柱长度, mm; ρ_v 为滚柱与外星轮接触点的当量半径, mm, $\rho_v = R \cdot r / (R - r)$ 。

2 偏心圆弧工作型面设计

2.1 设计流程

偏心圆弧工作型面设计是在对数螺旋线型工作型面设计方法的基础上,结合偏心圆弧曲线的拟合方法,最终设计出偏心圆弧工作型面曲线,其设计流程如图 3 所示。

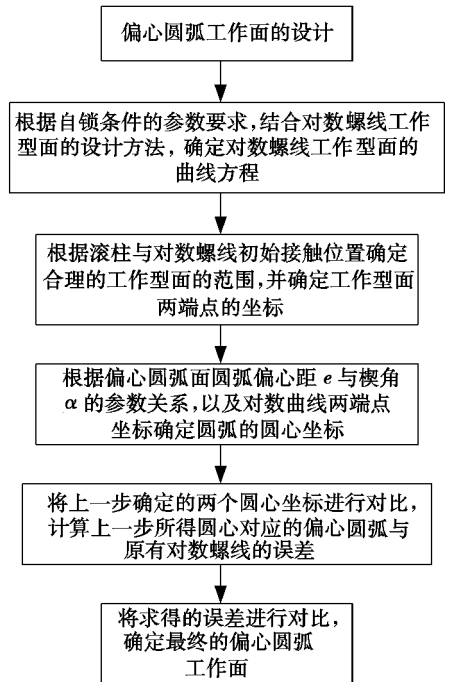


图 3 设计方法流程图

Fig.3 Flow chart of design method

2.2 对数螺旋线工作型面设计

对数螺旋曲线具有定角特性,即曲线上任意一点处的切线与该点和圆心连线之间的夹角始终

保持不变,其形状特征如图 4 所示。当超越离合器工作型面采用对数螺旋线时,其工作型面数学方程可表示为:

$$\rho = \rho_0 \frac{\theta}{\tan \beta} \tag{6}$$

式中: ρ 为对数螺旋曲线向径,mm; ρ_0 为曲线初始点向径,mm; β 为曲线上任意点的向径与该点切线间的夹角, $(^\circ)$; θ 为极坐标角, $(^\circ)$ 。

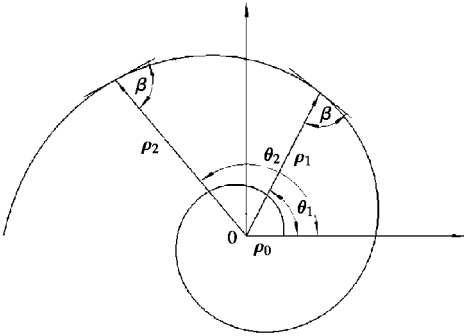


图 4 对数螺旋示意图

Fig. 4 Schematic diagram of logarithmic spiral

在对数螺旋线型工作型面中,曲线上任意点的向径与该点切线间的夹角 β 与超越离合器的工作楔角 α 存在如下关系:

$$\alpha = (90^\circ - \beta) + \arcsin \frac{\sin(90^\circ - \beta)}{\frac{R}{r} - 1} \tag{7}$$

根据超越离合器材料、工况以及零件尺寸参数,结合公式 3 ~ 公式 7,可以确定对数螺旋工作型面方程及工作型面曲线区间。

2.3 偏心圆弧拟合

偏心圆弧工作型面曲线方程是根据对数螺旋工作型面的曲线方程及两端点坐标计算获得的。在偏心圆弧拟合时,首先将对数螺旋曲线方程两端点 A、B 的坐标转换为直角坐标,即 $A(\rho_0 e^{\frac{\theta_1}{\tan \varphi}} \times \cos \theta_1, \rho_0 e^{\frac{\theta_1}{\tan \varphi}} \sin \theta_1)$, $B(\rho_0 e^{\frac{\theta_2}{\tan \varphi}} \cos \theta_2, \rho_0 e^{\frac{\theta_2}{\tan \varphi}} \sin \theta_2)$, 然后根据 A、B 两点的直角坐标,计算确定两端点中垂线的函数方程为:

$$\begin{cases} y - y_0 = k(x - x_0) \\ y_0 = \frac{\rho_0 e^{\frac{\theta_2}{\tan \varphi}} \sin \theta_2 + \rho_0 e^{\frac{\theta_2}{\tan \varphi}} \sin \theta_1}{2} \\ x_0 = \frac{\rho_0 e^{\frac{\theta_1}{\tan \varphi}} \cos \theta_1 + \rho_0 e^{\frac{\theta_2}{\tan \varphi}} \cos \theta_1}{2} \\ k = \frac{\rho_0 e^{\frac{\theta_2}{\tan \varphi}} \cos \theta_1 - \rho_0 e^{\frac{\theta_2}{\tan \varphi}} \cos \theta_1}{\rho_0 e^{\frac{\theta_2}{\tan \varphi}} \sin \theta_2 - \rho_0 e^{\frac{\theta_1}{\tan \varphi}} \sin \theta_1} \end{cases} \tag{8}$$

在偏心圆弧型超越离合器中,偏心圆弧工作型面的偏心距 e 与工作楔角 α 关系如下:

$$e = 2(R + r) \sin \frac{\alpha}{2} \tag{9}$$

根据 A、B 两端点的中垂线方程及偏心距 e , 计算以 e 为半径、离合器中心为圆心的圆与中垂线的交点,确定偏心圆弧工作型面的圆心。在计算过程中,通常会有 2 个交点,这时需要通过比较确定误差较小的点为偏心圆弧曲线的圆心。

3 误差分析及曲线选择

3.1 比较对象

以某家用轿车滚柱式超越离合器为例,该离合器是一种粉末冶金制成的用于家用轻载汽车的液力变矩器离合器。根据对数螺旋工作型面设计方法完成对数螺旋型工作型面的设计。其曲线方程如下:

$$\rho = 30 \frac{\theta}{\tan 83^\circ} \tag{10}$$

式中:工作型面到离合器中心的距离 ρ 为 30.6 ~ 31.4 mm, θ 为 $9.24^\circ \sim 21.28^\circ$; 工作楔角 $\alpha = 7.956^\circ$, $\varphi = 83^\circ$ 。

应用上述拟合方法将对数螺旋工作型面拟合为偏心圆弧型,拟合后的偏心圆弧方程为:

$$(x + 1.085)^2 + (y - 3.667)^2 = 31.313^2 \tag{11}$$

为方便比较,将偏心圆弧方程由直角坐标转换为极坐标,转换后的偏心圆弧方程为:

$$(r \cos \theta + 1.085)^2 + (r \sin \theta - 3.667)^2 = 31.313^2 \tag{12}$$

3.2 接触角误差

滚柱式超越离合器中,接触角 v 和 ω 以及工作楔角 α 间存在如下关系:

$$\alpha = v + \omega = 2v = 2\omega \tag{13}$$

因此只需要比较拟合前后的工作楔角误差,便能确定拟合后偏心圆弧的工作型面与对数螺旋工作型面的接触角误差。考虑滚柱在长时间工作后的磨损,本文在滚柱磨损量达到 0.05、0.1、0.15 mm……时进行楔角比较,直至滚柱失效,比较结果如图 5 所示。由图 5 可知,拟合后的偏心圆弧曲线工作楔角随着滚柱磨损量的增大而不断减小;拟合后的曲线与对数螺旋型面相比,工作楔角大致相等,其误差在合理范围内。

3.3 曲线误差

为比较拟合前后的曲线误差,现以超越离合

器中心 O 为中心,在拟合前后的工作型面上每隔 1° 取一个点,求出该点到离合器中心 O 的距离 ρ (图 6),通过比较拟合前后 ρ 值的误差确定上述方法拟合的曲线误差。拟合前后曲线 ρ 值如表 1 所示。

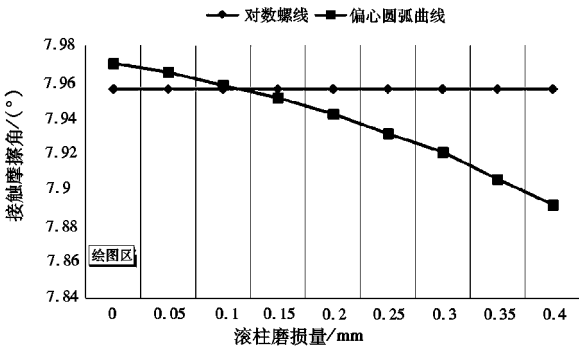


图 5 工作楔角误差对比图

Fig.5 Contrast diagram of working wedge angle error

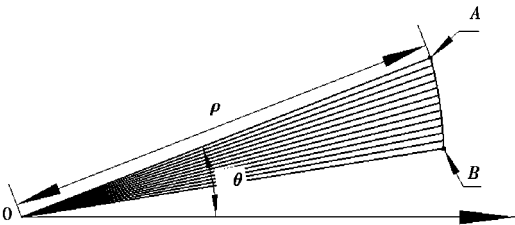


图 6 曲线误差对比的划分方法示意图

Fig.6 Schematic diagram of division method for the curve error comparison

表 1 拟合前后曲线误差表

Table 1 Curve error of before and after fitting

极坐标角 $\theta/(^\circ)$	对数螺线 ρ_0/mm	偏心圆弧 ρ_1/mm
9.24	30.6	30.6
10.28	30.6682	30.6679
11.28	30.734	30.7335
12.28	30.8	30.7993
13.28	30.866	30.8654
14.28	30.9323	30.9317
15.28	30.9986	30.9982
16.28	31.0651	31.0648
17.28	31.1318	31.1316
18.28	31.1985	31.1985
19.28	31.2655	31.2655
20.28	31.3325	31.3326
21.28	31.4	31.4

由表 1 可知,在超越离合器某个滚柱工作型面的极坐标角 θ 为 $9.24^\circ \sim 21.28^\circ$ 时, ρ_0 与 ρ_1 在各点处相差较小,两者最大误差为 0.0012 mm 。

根据国家标准及零件精度要求,该拟合方案可行。

4 超越离合器结果分析

4.1 有限元模型

4.1.1 网格模型

在超越离合器中,滚柱质量对超越离合器整体的影响较小,每个滚柱的受力情况基本相同,因此选取单个楔合结构作为有限元分析模型,并采用四面体单元对拟合前、后的结构进行网格划分,对接触位置处的网格进行细化。网格模型及细化情况如图 7 所示。

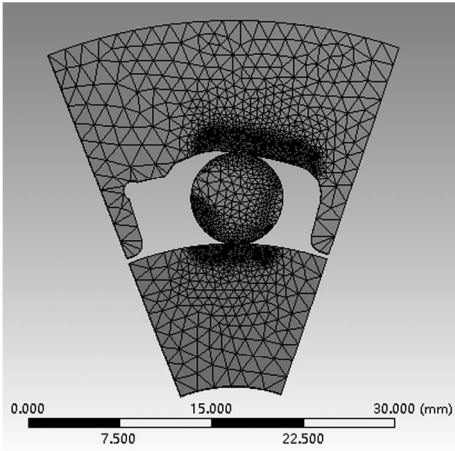


图 7 有限元模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of the finite element model

4.1.2 边界条件及载荷

为了模拟超越离合器在实际工况下滚柱与内外圈的接触及应力情况,在有限元软件中将超越离合器的边界条件设置如下:(1)根据超越离合器的实际工作状况,在将超越离合器外星轮的外表面固定,即对其施加固定约束的基础上,对超越离合器内星轮施加远端位移约束,使其只能围绕超越离合器的中心转动;(2)在超越离合器内星轮外表面施加转矩 $335\text{ N}\cdot\text{m}$,方向沿楔合方向;(3)将滚柱与内外星轮接触类型定义为摩擦接触,摩擦系数 $f=0.1$ 。

4.2 应力应变情况

闭锁状态下偏心圆弧型超越离合器的应力、应变情况如图 8 所示。由图 8 可知,超越离合器在锁定状态下的应力和应变都集中在滚柱和内外星轮的接触位置;由于滚柱质量的影响,滚子和内星轮接触位置的应力和应变略大于滚子的上接触位置。总体来说,采用上述拟合方法得到的偏心圆

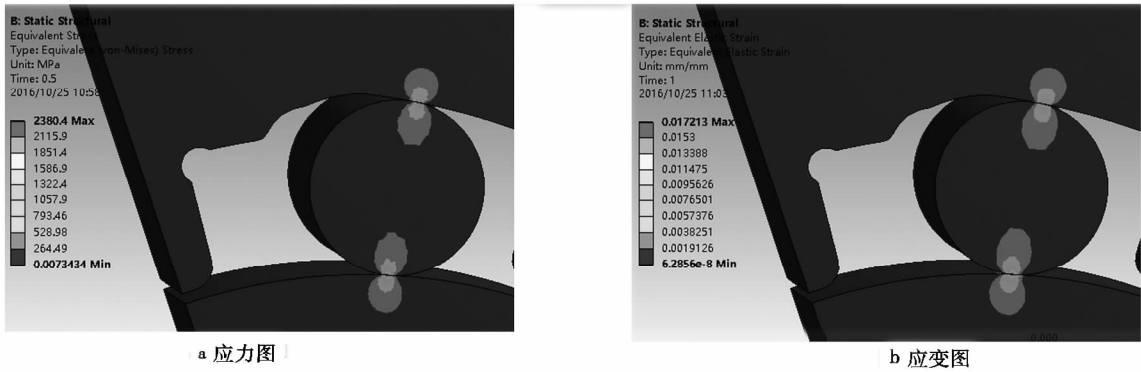


图 8 零件应力应变图
Fig. 8 Stress and strain diagram of parts

弧型超越离合器的应力和应变都是合理而均匀的。

5 结论

- (1)工作型面拟合后的超越离合器与原有超越离合器相比,其工作楔角以及“极值”尺寸的变化都较小,应力和应变的状态也基本相同。
- (2)拟合后的工作型面,其工作楔角仍然有

一定变化,并且随着滚柱的磨损,其变化量不断增加。因此,本方法不适用于使用寿命要求较高的情况。

- (3)改进后的超越离合器工作型面采用圆弧面,克服了现有超越离合器对数螺线及阿基米德螺线工作型面加工难度大、加工成本高以及加工精度低等缺点。

参考文献:

[1] 王松林,马文星,胡晶,等. 双涡轮液力变矩器超越离合器的改进及分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2013,43(4): 922-927.

[2] 李志杰,石光林,温全明. 超越离合器鼓形滚柱的优化设计[J]. 机械传动,2013,37(4):53-54.

[3] 石光林,陈章维,聂超,等. 基于 ADAMS 的滚柱式超越离合器工作过程仿真分析[J]. 机械传动,2017,41(6):150-153.

Design Method and Error Analysis of Working Surface of Eccentric Circular Arc Type Overrunning Clutch

SONG Ningning¹,HU Kaijie^{1,2},WANG Ping¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224002, China;)
(2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the existing working surface of the overrunning clutch, such as high machining difficulty, high processing cost and low machining accuracy, in view of the design method of the working face of the logarithmic spiral type overrunning clutch, on the basis of the analysis of the overrunning clutch structure and working conditions, a design method for the working surface of eccentric circular arc type overrunning clutch is proposed. Taking a logarithmic spiral type overrunning clutch used in a domestic automobile as an example, the design of the eccentric circular arc working surface of the clutch is completed by using the proposed method. The feasibility of the method is verified by comparing the errors of the two types of working surfaces, such as wedge angle and center distance. The results show that the error of the eccentric circular arc surface designed by this method is smaller than that of the original logarithmic spiral surface. In addition, the machining difficulty is greatly reduced and the machining precision is better because of the use of the circular arc surface for the improved overrunning clutch working surface. And the processing cost is reduced under the premise of guaranteeing the processing quality.

Keywords: overrunning clutch; working surface design; curve fitting; error analysis

(责任编辑:李华云)