

渐开线齿面串联弹性器件传动机理研究

蒋建东 李明贵 乔欣

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310023)

摘要: 串联弹性器件广泛应用于外骨骼机器人驱动关节,有利于重载荷情况下的电机软启动。针对旋转类串联弹性器件转动刚度变化引起的传动力矩波动,弹性传动和刚性传动两种状态转换时的传动冲击等问题,提出了一种渐开线齿面弹性器件,建立了传动力学模型,并对器件的弹性-刚性传动过程进行了动力学分析与仿真,研究轴心装配偏差对渐开线齿面啮合滑动率与接触面接合冲击的影响,通过对弹性器件安装倾角参数优化保证了传动件转动刚度变化率最小,有效控制了弹性传动过程中的转矩波动。最后对器件进行了下肢外骨骼驱动关节工程验证和传动静特性实验,结果表明,轴心装配偏差会导致接触面接合时转矩激增,当偏差在 0.05 mm 内时(渐开线齿面啮合滑动率最大为 0.0065),与平面矩形弹性器件相比,转矩激增值平均降低 43.55%。

关键词: 外骨骼机器人; 串联弹性驱动器; 柔性关节; 渐开线齿廓

中图分类号: TP215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)01-0425-07

OSID:



Transmission Mechanism of Involute Tooth Surface Series Elastic Device

JIANG Jiandong LI Minggui QIAO Xin

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Series elastic devices are widely used in driving joints of exoskeleton robots, because they are conducive to the soft start of motors under heavy loads. Aiming at the problems of the transmission torque fluctuation caused by the change of the rotation stiffness of the rotating series elastic device, and the transmission shock during the transition between the elastic transmission and the rigid transmission, an involute tooth surface elastic device was proposed. Firstly, the characteristic that the involute tooth profile transmission would not change due to the deviation of the axis center can make a smooth transition when the elastic-rigid transmission was converted. Secondly, the transmission dynamics model of the involute tooth surface elastic device was established, and the elastic-rigid transmission process of the device was mechanically analyzed. By optimizing the installation inclination angle parameters of the elastic device, the minimum change rate of the rotational stiffness of the transmission part was 0.117 57, and torque fluctuation in the elastic transmission process was effectively controlled. Then, under the optimal installation inclination angle ($\pi/4 \pm 1.337\ 85$ rad) model, the dynamic simulation of the transmission process and the mesh process finite element simulation were carried out to analyze the effect of the axis assembly deviation on the sliding rate of the involute tooth mesh and the contact surface joint impact. Finally, the device was verified by the lower limb exoskeleton drive joint engineering verification and the transmission static characteristics test. The results showed that the axis deviation would cause the torque to increase sharply when the contact surface was engaged. Compared with the flat rectangular elastic device, the torque excitation value was reduced by 43.55% on average when the axis deviation was within 0.05 mm (the maximum involute tooth surface meshing sliding ratio was 0.006 5).

Key words: exoskeleton robot; series elastic actuator; flexible joint; involute tooth profile

0 引言

随着机器人技术的发展,外骨骼机器人在各领域有着广泛应用,在农业领域中,上肢外骨骼可协助果民采摘果蔬动作,下肢外骨骼则能帮助果民在果园中搬运,可减轻农民腰、背部等肌肉的负载^[1-5]。关节作为外骨骼机器人的重要部件,其结构一直以来都被重点关注。在传统机器人关节设计中,为实现精准控制,常对关节的传动性能有很高的要求,而随着户外机器人逐渐普及,此类机器人的设计更偏向轻量化、节能化,以降低机器人传动时的启动功率,PRATT等^[6]提出了串联弹性驱动(Series elastic actuators, SEA)结构模型,即在驱动机构与执行机构之间串联一个弹性器件。串联弹性驱动模型提出后,国内外学者相继对其展开了研究。SEO等^[7]提出了一种平面橡胶型的串联弹性器件,将驱动与外圈相连接,负载与内圈相连接,外圈与内圈之间嵌有4组橡胶,当外圈转动时,压缩橡胶,橡胶压缩至能驱动负载时,内圈与负载开始运动实现弹性启动。LEE等^[8]提出的模型中外圈与驱动相连,内圈与负载相连,线性滑块安装在外圈上,可在外圈上滑动,内圈上安有一个滚轮,滚轮可沿着线性滑块内壁滑动,当外圈开始转动时,线性滑块相对外圈移动,同时压缩弹簧,滚轮沿着滑块内壁滑动,从而驱动内圈。

CHAICHAOWARAT等^[9]在周转轮系上内嵌一个扭簧使其构成并联弹性驱动模型,其中扭簧外圈与行星架固定,扭簧内圈与机架固定,负载安装在行星架上,中心轮连接驱动,当负载正向运动时,储存一部分能量于扭簧的弹性势能,用于补充负载反向运动,此模型能储存部分运动周期的能量在其他运动周期中释放,更适用于非对称负载中。

在各种的串联弹性驱动结构中,有两种结构被更多的学者采用,一种为文献[10-14]中的模型,由内圈、外圈与3或4组弹簧组成,内圈连接驱动,外圈连接负载,当启动时由内圈开始转动,内圈转动压缩弹簧,当弹簧压缩一定时,与负载相连的外圈开始转动;另一种为文献[15-17]中采用的模型,驱动与负载之间通过弹性的金属梁相连,当驱动的内圈转动时先拉伸或压缩弹性梁,弹性梁再拉或推动外圈转动。

串联弹性驱动模型通过弹性传动启动,能降低启动功率而被广泛应用于机器人、外骨骼关节处^[18-21],而目前大多数研究探讨了串联弹性驱动模型的弹性启动过程,其结构共性为内圈(或外圈)与驱动相连,外圈(或内圈)与负载相连,外圈、内圈之

间安有弹性器件如直线圆柱弹簧、扭簧、橡胶等。而此类结构现有两处不足:由线性弹簧组成的旋转元件,几何结构差异导致等效转动刚度不恒定,造成转矩与转角呈较差的线性关系;弹性传动结束后弹性器件被压缩至极限后没有良好的过渡环节。针对上述不足,本文提出一种启动时采用弹性传动,当负载较大时,则转换成刚性传动的传动方案,从而保留弹性传动的软启动特性,又扩大传动负载范围、提高传动的稳定性。

1 渐开线齿面弹性器件结构设计

1.1 渐开线齿面弹性器件结构与传动原理

渐开线齿面弹性器件(齿面弹性器件)由内圈、弹簧与外圈构成,内圈与外圈通过3根弹簧相连接。齿面弹性器件的传动可分为弹性传动、齿面啮合与刚性传动阶段。在弹性传动中,主动件内圈转动,逐渐压缩弹簧,弹簧弹力作用于外圈,当弹簧力能驱动执行机构外圈运动时,齿面弹性器件将通过弹簧将内圈的转动传动至外圈,实现弹性传动;而齿面啮合阶段是内圈转动至与外圈接合时,由于内外圈轴心装配偏差,使得内外圈通过内齿轮啮合方式传动;当啮合阶段结束后,则内外圈将通过接触的方式实现刚性传动。

1.2 弹性传动受力分析

图1为齿面弹性器件弹性传动单根弹簧受力分析图,将弹簧力看作作用在弹簧中心线上的集中力,弹簧中心线与圆心距离为 R_s 、与竖直方向倾角为 θ_s (弹簧安装倾角),启动时弹簧初始长度为 l_0 ,随着主动内圈相对外圈转动 φ 时,弹簧逐渐被压缩至 l ,依据几何关系,可得

$$\begin{cases} R_1 = \frac{R_s}{\sin\theta_s} \\ R_2 = \frac{R_s}{\cos\theta_s} \\ l_0^2 = R_1^2 + R_2^2 \\ l^2 = R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \\ F_s = k(l_0 - l) \\ T = 3F_s\cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)R_1 \\ \frac{\sin\beta}{R_2} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{l} \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_1 ——内圈弹簧安装位置,mm

R_2 ——外圈弹簧安装位置,mm

k ——弹簧刚度,取1.36 N/mm

β ——弹簧与内圈夹角, rad

F_s ——弹簧力, N

T ——转矩, N·mm

通过式(1)可知,在弹性传动中,转矩 T 与相对转角 φ 的关系为

$$T = \frac{3kR_s^2 \cos\varphi}{\sin\theta_s \cos\theta_s} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 2\sin\theta_s \cos\theta_s \cos\varphi}} - 1 \right) \quad (2)$$

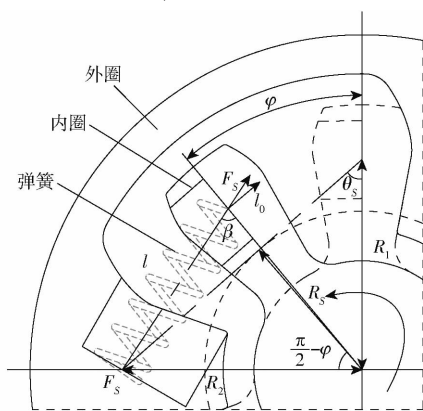


图 1 弹性传动单根弹簧受力分析

Fig.1 Mechanic analysis on elastic drive single spring

为使得弹性传动中转矩与转角更具有线性关系,以降低弹性传动的顿挫感,提出转动刚度变化率 δ_k ,表示转动刚度相对变化程度,计算式为

$$\delta_k = \frac{\int_0^{\pi/3} |K - K_{\text{mean}}| d\varphi}{\int_0^{\pi/3} K_{\text{mean}} d\varphi} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} K = \frac{dT}{d\varphi} \\ K_{\text{mean}} = \frac{\int_0^{\pi/3} K d\varphi}{\pi/3} \end{cases}$$

式中 K ——转动刚度, N·mm/rad

K_{mean} ——平均转动刚度, N·mm/rad

转动刚度变化率 $\delta_k \in [0, +\infty)$,当 $\delta_k = 0$ 时,表示转动刚度为恒定不变的常数,当 δ_k 越大时,表示转动刚度变化程度越大,弹性传动过程中顿挫感越强。

由式(2)与式(3)可知,弹簧产生的转矩 T 与弹簧刚度 k 成正比,与弹簧离圆心距离 R_s 的平方成正比,而对于转动刚度 K , k 与 R_s 仅作为一个比例增益,故转动刚度变化率 δ_k 仅与弹簧切线倾角 θ_s 有关。

图 2 为转动刚度变化率与弹簧切线倾角曲线,其中理论曲线由式(2)与式(3)得出,仿真数据通过不同倾角模型进行 ADAMS 动力学仿真得出(受模型尺寸限制,不考虑弹簧倾角过大或过小情况)。可以看出,转动刚度变化率以弹簧倾角 $\theta_s = \pi/4$ 对

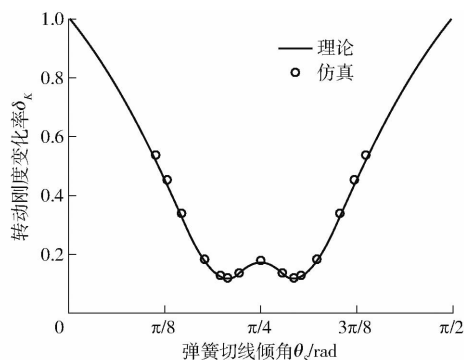


图 2 转动刚度变化率与弹簧倾角理论与仿真曲线

Fig.2 Theoretical and simulation curves of rotational stiffness rate of change and spring inclination

称,当倾角为 $\pi/4 \pm 1.33785$ rad 时,转动刚度变化率为最小 0.11757。

图 3 为不同弹簧倾角的转矩启动曲线(纵坐标以 kR_s^2 的倍数表示转矩),虚线为各弹簧倾角下以平均刚度为斜率的对照直线,实线与对照虚线越贴合,表明弹簧转矩与相对转角越呈线性关系。可以看出,当弹簧倾角过大时,则弹簧转矩始终与对照直线有正偏差,其转动刚度前期会大于平均刚度,后期会小于平均刚度,弹性传动开始时,则随着相对转角的增大,前期启动缓慢,后期启动急促的顿挫感;当弹簧倾角过小时,则弹簧转矩始终与对照直线有负偏差,其转动刚度前期会小于平均刚度,后期会大于平均刚度,弹性传动开始时,则会造成前期启动迅速,后期启动缓慢的顿挫感。参考图 2 与图 3,可采用合适的弹簧倾角使弹性启动的顿挫感降为最低。

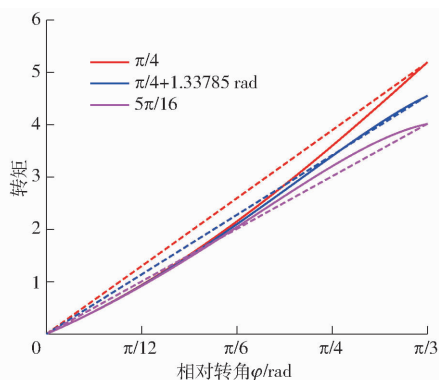


图 3 不同弹簧倾角的转矩启动曲线

Fig.3 Spring torque starting curves for different spring inclination angles

1.3 齿面啮合滑动率分析

为降低从弹性传动到刚性传动转换的冲击影响,在内圈接触面设有外渐开线齿廓,在外圈接触面设有内渐开线齿廓,使得在弹性传动与刚性传动之间增加一个齿面内啮合过程。

在渐开线齿廓啮合过程中,啮合接触点的相对滑动越大,则齿面磨损越严重,更容易发生胶合破

坏^[22]。图4为齿面内啮合过程, $l_{O_1O_2}$ 为内外圈的轴心装配偏差, γ_{12} 为内外圈的轴心偏差角(偏角, 图4中 $\angle xO_2O_1$), 啮合线同时与内圈基圆、外圈基圆相切, 且切点分别为 N_1 、 N_2 , 啮合点为点 K , 啮合起点 B_2 为啮合线与内渐开线齿廓的交点, 啮合过程接触终点 B_1 为啮合线与内圈齿顶圆的交点, 内渐开线与内圈基圆相交且始于点 A 。啮合线同时与内外基圆相切, 故 O_1O_2 与 N_1N_2 平行, 长度相等。

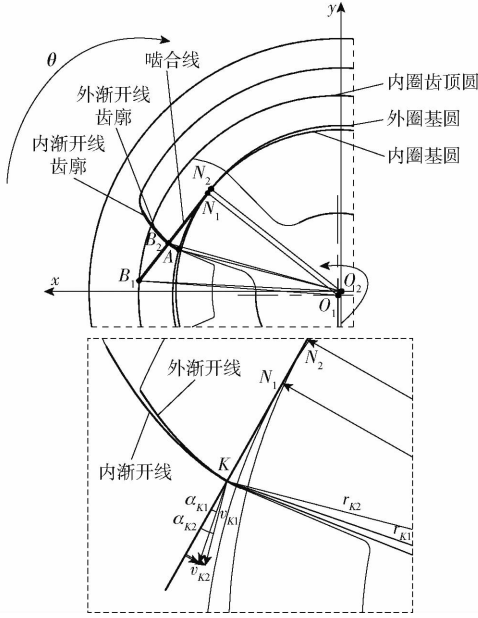


图4 齿面啮合过程

Fig. 4 Tooth surface meshing process

渐开线齿廓啮合过程中, 滑动率为啮合点处的相对滑动速度与切向速度比, 根据啮合过程的几何关系, 内圈滑动率 η_1 为

$$\eta_1 = \frac{v_{t2} - v_{t1}}{v_{t1}} = \frac{v_{k2} \sin \alpha_{k2} - v_{k1} \sin \alpha_{k1}}{v_{k1} \sin \alpha_{k1}} = \frac{\omega_2 r_{k2} \sin \alpha_{k2} - \omega_1 r_{k1} \sin \alpha_{k1}}{\omega_1 r_{k1} \sin \alpha_{k1}} = \frac{\omega_2 l_{N_2K} - \omega_1 l_{N_1K}}{\omega_1 l_{N_1K}} \quad (4)$$

式中 v_{t1} 、 v_{t2} ——内、外圈啮合点切向速度, mm/s
 v_{k1} 、 v_{k2} ——内、外圈啮合点线速度, mm/s
 α_{k1} 、 α_{k2} ——内、外圈啮合点压力角, rad
 r_{k1} 、 r_{k2} ——啮合点距内、外圈中心长, mm
 ω_1 、 ω_2 ——内、外圈角速度, rad/s

齿面弹性器件内外圈啮合传动比为1, 当内外圈存在轴心装配偏差时, 根据渐开线中心距可分性^[23], 其传动比在啮合过程中保持不变, 即 $\omega_1 = \omega_2$ 不会因为存在偏差而改变, 故内圈滑动率 η_1 为

$$\eta_1 = \frac{\omega_2 l_{N_2K} - \omega_1 l_{N_1K}}{\omega_1 l_{N_1K}} = \frac{l_{N_1N_2}}{l_{N_1K}} = \frac{l_{O_1O_2}}{l_{N_1K}} \quad (5)$$

同理, 可以得出外圈滑动率 η_2 为

$$\eta_2 = -\frac{l_{N_1N_2}}{l_{N_2K}} = -\frac{l_{O_1O_2}}{l_{N_2K}} \quad (6)$$

结合式(5)、(6)与图4可知, 内外圈的滑动率与偏差成正比, 啮合点 K 在 B_1B_2 中移动, 故当安装位置确定后, 啮合过程中最大滑动率 η_{\max} 发生在啮合起点 B_2 处, 即

$$\eta_{\max} = \frac{l_{O_1O_2}}{l_{N_1B_2}} \quad (7)$$

啮合起始点 B_2 直接影响着齿面啮合传动的最大滑动率, 分析其具体位置(图4), 以外圈圆心为中心, 建立直角坐标系与极坐标系, x 轴顺时针旋转为极角 θ 增大方向, Ox 为极轴, 极径为 ρ , 则由渐开线函数与几何关系可知

$$\begin{cases} \rho = \frac{r_b}{\cos \alpha_K} \\ \theta = \text{inv} \alpha_K + \theta_A \\ y = -\tan \gamma_{12} x + \frac{r_b}{\cos \gamma_{12}} \\ x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中 r_b ——内外圈基圆半径, 取 28.19 mm

θ_A ——内渐开线起点极角($\angle AO_2x$), 取 0.016 4 rad

γ_{12} ——轴心偏差角

齿面弹性器件为3组周向均匀分布的“内齿”啮合, 故只需讨论 γ_{12} 为 $0 \sim \pi/3$, 当 $\gamma_{12} > \pi/3$ 时, 啮合起始点将在点 A 以下, 齿面滑动将从点 A 开始, 滑动率将与 $\gamma_{12} = \pi/3$ 一致。从式(8)可得最大滑动率与内外圈轴心装配偏差的关系如图5所示。

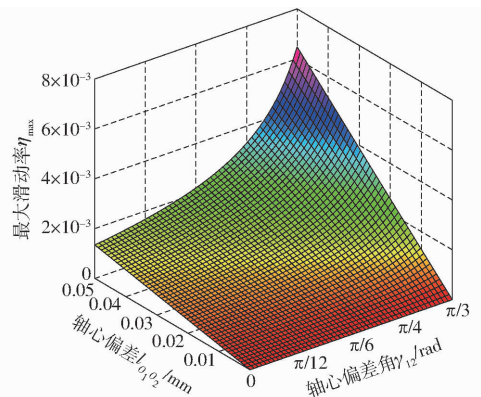


图5 最大滑动率与轴心装配偏差关系

Fig. 5 Relationship between maximum slip rate and axis assembly deviation

由图5可知, 内外圈的安装偏差与偏差角均会影响啮合过程的最大滑动率, 当内外圈轴心无偏差时, 最大滑动率为0, 即无滑动, 而由于内外圈需要相对转动, 在安装过程中将不可避免地造成轴心装配偏差。在内外圈安装偏差小于0.05 mm时, 齿面啮合过程中最大滑动率为0.006 5。

2 齿面弹性器件仿真

采用最佳弹簧安装倾角结构对齿面弹性器件进行 ADAMS 仿真, 仿真模型结构参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型结构参数

Tab. 1 Structural dimensions of simulation model

参数	数值
内圈弹簧安装位置 R_1 /mm	25
外圈弹簧安装位置 R_2 /mm	32.78
外渐开线齿顶圆直径/mm	68
外渐开线齿根圆直径/mm	28
内渐开线齿顶圆直径/mm	57
内渐开线齿根圆直径/mm	76
渐开线模数/mm	10
渐开线理论齿数	6
渐开线压力角 α /($^\circ$)	20
外圈表面直径/mm	86

图 6 为齿面弹性器件仿真模型, 为研究渐开线齿面接合对传动力矩的影响, 设置平面矩形对照组作为对比。内圈与外圈通过弹簧连接, 弹簧参数设置为弹性系数 1.36 N/mm、圈数 12、直径 10 mm; 内圈与外圈分别对大地添加转动副, 并设置内圈为主动件, 添加转动驱动, 且将外圈与大地的转动副添加转动摩擦力, 通过设置转动摩擦预载荷构造外圈负载; 考虑后续将以 3D 打印进行进一步实验验证, 故仿真的接触力参考尼龙材料接触设置。

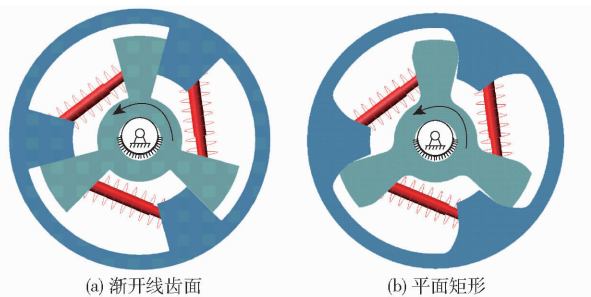


图 6 齿面弹性器件仿真模型

Fig. 6 Simulation model of tooth surface elastic device

图 7 为内外圈轴心偏差角为 $\pi/3$ 时不同转矩曲线, 在传动的弹性过程中, 转矩随时间呈近似线性增大; 随后内圈与外圈接触, 然后含有渐开线齿面的弹性器件进行齿面啮合过程, 而平面矩形则是一个冲击, 在内外圈刚接触时, 转矩会激增, 从图 7 可以看出, 在偏差角 $\pi/3$ 下轴心偏差在 0.05 mm 内, 设有渐开线齿面的齿面弹性器件冲击转矩均小于平面矩形组; 在齿面啮合过程结束后, 传动则转为刚性传动, 转矩与负载相等且保持不变。在此结构模型下, 通过式(2)可知, 齿面弹性器件传动从弹性启动到

刚性传动的临界转矩为 2 446.13 N·mm。

可依据不同负载场合选用合适弹性系数的弹簧来提高传动性能。

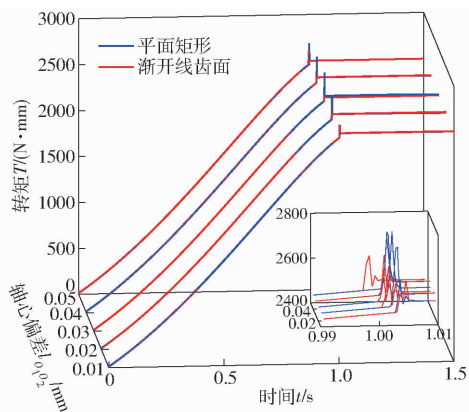


图 7 偏差角为 $\pi/3$ 时启动转矩仿真曲线

Fig. 7 Simulation curves of starting torque when deflection angle was $\pi/3$

以传动过程冲击产生的最大转矩减去恢复稳定传动后的转矩(匀速转动下的负载)为转矩激增值, 表 2 为平面矩形对照关节转矩激增值, 表 3 为渐开线齿面弹性器件的转矩激增值。

表 2 平面矩形模型转矩激增值

Tab. 2 Torque excitation value of plane rectangular model

偏差	偏差角 γ_{12} /rad				N·mm
	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	
$l_{01,02}$ /mm	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$
0	91.15				
0.01	218.14	152.02	93.23	244.33	217.06
0.02	248.32	255.48	208.26	177.65	220.75
0.03	238.52	279.07	251.26	364.08	247.86
0.04	266.07	224.74	223.80	277.43	252.10
0.05	237.27	195.67	191.90	173.36	208.37

表 3 渐开线齿面模型转矩激增值

Tab. 3 Torque excitation value of involute tooth surface model

偏差	偏差角 γ_{12} /rad				N·mm
	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	
$l_{01,02}$ /mm	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$
0	85.23				
0.01	116.64	117.49	89.46	139.09	103.02
0.02	151.76	148.72	122.72	153.94	100.60
0.03	130.21	180.82	100.66	120.44	145.21
0.04	116.20	147.29	118.62	84.68	130.39
0.05	188.63	132.65	109.85	116.34	133.24

由表 2、3 可知, 在内外圈理想安装中心无偏差时, 渐开线齿面模型与平面矩形模型的转矩激增值相差不大, 结合图 4, 此时啮合线长度为 0, 即无啮合过程, 内渐开线曲面与外渐开线曲面完全贴合, 平面矩形模型通过平面实现面接触, 故两种模型均通过

面接触传动;当内外圈中心出现偏差时,渐开线齿面模型激增转矩小于平面矩形模型激增转矩,平均减小43.55%,原因为一且内外圈中心出现偏差,平面矩形模型接触将从原来的面接触变为线接触,而渐

开线齿面模型则有一个内齿啮合过程过渡(图8),啮合点从齿根处滑移至齿顶处,啮合过程中同时使外圈转动,减小内外圈直接碰撞的刚性冲击,从而减小内外圈冲击造成的转矩激增。

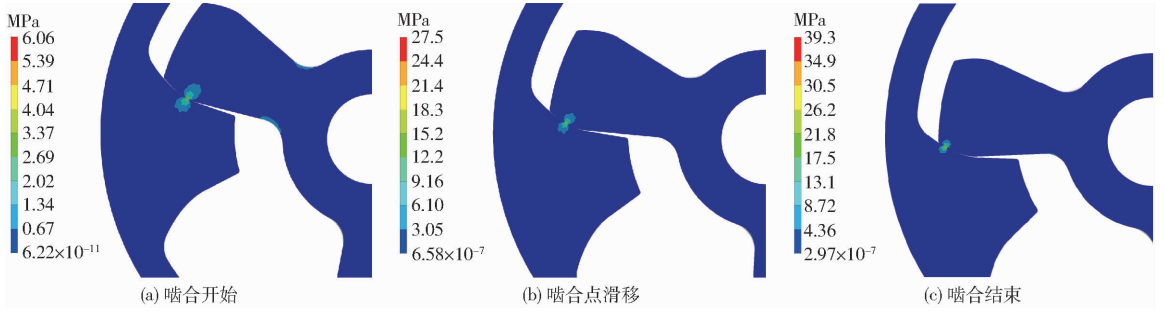


图8 啮合过程仿真应力分布

Fig. 8 Meshing process simulation stress distribution

图9为网格尺寸为0.5mm的有限元仿真与理论分析(图4)的啮合轨迹对比,仿真的啮合点分布在理论啮合线 B_2B_1 附近,且均在最小网格单元之间。

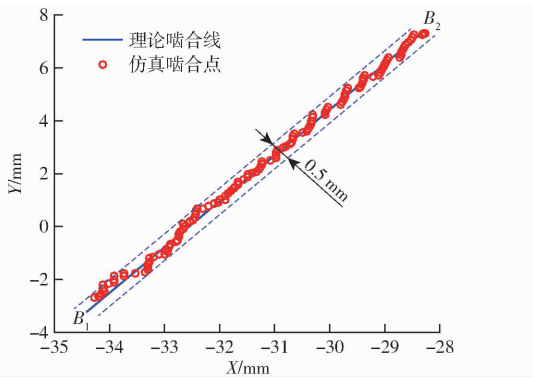


图9 仿真与理论啮合轨迹

Fig. 9 Simulation and theoretical meshing trajectory

3 齿面弹性器件实验

齿面弹性器件可应用于搬运助力外骨骼机器人的关节(图10),安装在减速器与负载之间,内圈与减速器输出轴相连,外圈与负载相连,实验的齿面弹性器件模型各结构尺寸与仿真模型一致(表1),采用3D打印制造,材料为白色尼龙(FS3300PA),材料机械性能:拉伸强度46MPa、拉伸模量1602MPa、弯曲强度46.3MPa、弯曲模量1300MPa,弹簧参数为:线径1mm、直径10mm、弹性系数1.36N/mm。

实验平台如图11所示,主要由变频电机(YP-50-055-4型)、转矩转速传感器1(JN338A-10A型)、齿面弹性器件、转矩转速传感器2(JN338A-50A型)、磁粉制动器(DZF-5型)组成。齿面弹性器件输入轴与转矩转速传感器1相连,输出轴与转矩转速传感器2相连,变频电机作为驱动提供输入

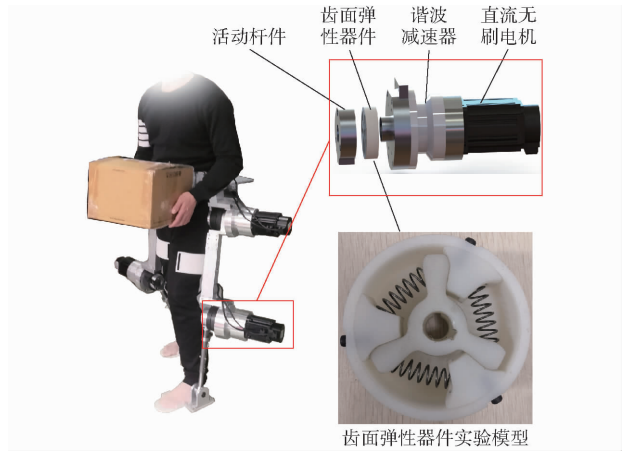


图10 齿面弹性器件及其应用

Fig. 10 Tooth surface elastic device and its application

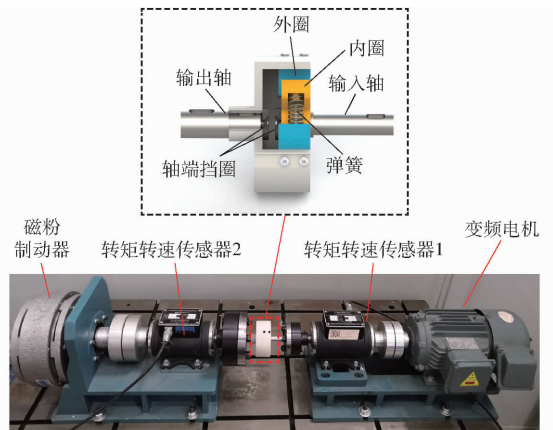


图11 齿面弹性器件实验台

Fig. 11 Tooth surface elastic device test bench

动力,磁粉制动器提供负载。实验过程为:设置电机输入使得每组实验的输入(转矩转速传感器1)转速一致,调节磁粉制动器,记录不同负载下的转矩启动数据。

图12为不同负载下实验与仿真的转矩启动曲线,可以看出实验与仿真的转矩曲线趋势一致,均有弹性启动过程;但在相同负载下,实验转矩均大于仿

真转矩,这使得实验的弹性启动更长,实验转矩平均比仿真转矩大 $277.58 \text{ N}\cdot\text{mm}$, 原因为实验传动过程中磁粉制动器、转矩转速传感器等含有一定的摩擦阻力,造成实际负载比设定负载偏大。

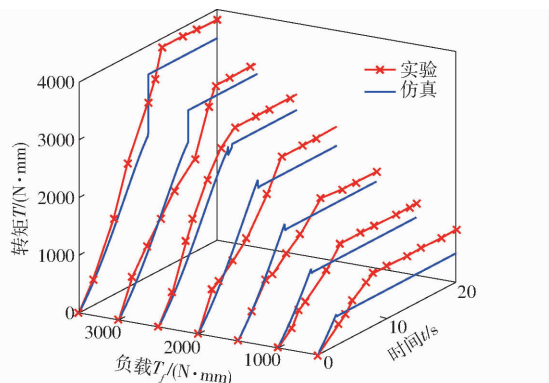


图 12 实验与仿真转矩曲线

Fig. 12 Experiment and simulation torque curves

由图 12 可知,随着负载的增大,实验转矩与仿真转矩的偏差存在先减小后增大趋势,其原因为:当负载 $T_j \leq 1000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 时,摩擦阻力对传动力矩占比较大,导致实验测得转矩较仿真偏差较大;随着负载的增加,摩擦阻力对传动力矩的占比逐渐减小,实验与仿真的偏差减小;而当负载增至 $T_j \geq 2000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 时,齿面弹性器件驱动此负载内外圈贴合后未能立即驱动,负载过大内外圈产生一定的变形后传动,传动力矩有一部分作用在器件本身,导致实验测得转矩与理论偏差较大。

表 4 为不同负载实验下的齿面弹性器件的传动效率,随着负载的增大传动效率逐渐增大,在负载较小时,内圈仅压缩了部分弹簧,外圈即可发生转动,

此时内圈与外圈并没接触,完全通过弹簧进行弹性传动,传动稳定性与效率较低;在负载较大时,内圈压缩弹簧,还不足以驱动负载,内圈与负载刚接触时首先通过齿面啮合传动,啮合结束后进入刚性传动阶段,传动稳定性与效率较高。

表 4 不同负载的传动效率

Tab. 4 Transmission efficiency of different loads

负载 $T_j / (\text{N}\cdot\text{mm})$	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
效率/%	81.33	89.37	87.97	91.42	95.73

4 结论

(1) 齿面弹性器件的转动刚度和弹簧中心线与圆心距离的平方成正比,与弹簧刚度成正比,而转动刚度变化率与弹簧安装倾角有关,即通过改变齿面弹性器件结构尺寸与弹簧刚度来改变转动刚度,通过改变弹簧安装倾角,来降低转动刚度变化率,当安装倾角为 $\pi/4 \pm 1.33785 \text{ rad}$ 时,转动刚度变化率最小。

(2) 齿面啮合的最大滑动率受齿面弹性器件轴心装配偏差影响,当偏角一定时,最大滑动率与轴心装配偏差成正比,当轴心装配偏差在 0.05 mm 内时,最大滑动率为 0.0065 。

(3) 在弹性传动与刚性传动转换时,传动转矩会发生一个激增现象,内外圈的轴心装配偏差使得转矩激增更大,采用渐开线齿面啮合过渡,利用渐开线齿廓中心距的可分性在啮合的同时使内外圈等角速度转动,当轴心偏差在 0.05 mm 内时,较平面模型转矩激增值平均降低 43.55% 。

参 考 文 献

- [1] WANG H M, LE D K L, LIN W C. Evaluation of a passive upper-limb exoskeleton applied to assist farming activities in fruit orchards[J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 757.
- [2] 赵智睿, 李醒, 张航, 等. 面向单臂弯举的气动肌肉上肢外骨骼系统设计与实验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 423-430. ZHAO Zhirui, LI Xing, ZHANG Hang, et al. Design and experiment of upper-limb exoskeleton robot system driven by pneumatic artificial muscle in lifting task by single arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 423-430. (in Chinese)
- [3] HARITH H H, MOHD M F, SOWAT S N. A preliminary investigation on upper limb exoskeleton assistance for simulated agricultural tasks[J]. Applied Ergonomics, 2021, 95: 103455.
- [4] 陈庆诚, 朱世强, 蒋瑜, 等. 液压外骨骼机器人非线性模糊滑模控制方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 355-361. CHEN Qingcheng, ZHU Shiqiang, JIANG Yu, et al. Nonlinear fuzzy SMC algorithm for hydraulic-driven exoskeleton robot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 355-361. (in Chinese)
- [5] THAMSUWAN O, MILOSAVLJEVIC S, SRINIVASAN D, et al. Potential exoskeleton uses for reducing low back muscular activity during farm tasks[J]. American Journal of Industrial Medicine, 2020, 63(11): 1017-1028.
- [6] PRATT G A, WILLIAMSON M M. Series elastic actuators[C] // Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots. IEEE, 1995: 399-406.
- [7] SEO H T, PARK J I, PARK J. A compact series elastic element using a rubber compression mechanism[J]. Rev. Sci. Instrum., 2021, 92(6): 65004.
- [8] LEE S H, LEE H J, LEE K H, et al. A novel variable stiffness scotch yoke series elastic actuator for enhanced functional stiffness[J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(11): 3395-3402.

manual-black-bruin-en. pdf.

- [19] 张小龙,张军辉,方梓帆,等. 内曲线径向柱塞马达滚柱-柱塞配合间隙优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021,49(8):8-13.
ZHANG Xiaolong, ZHANG Junhui, FANG Zifan, et al. Optimization of roller-piston fitting clearance of cam lobe radial-piston motor[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 8-13. (in Chinese)
- [20] 泮健,施光林. 数字配流与调速式液压马达的建模与实现[J]. 上海交通大学学报,2011,45(11):1607-1612.
PAN Jian, SHI Guanglin. Modeling and implementation of hydraulic motor with digital distribution and speed adjusting mechanism[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(11): 1607-1612. (in Chinese)
- [21] 陈卓如. 低速大扭矩液压马达理论、计算与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
- [22] 全国液压气动标准化技术委员会. JB/T 10829—2008: 液压马达[S]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [23] 湛从昌,陈新元. 液压元件性能测试技术与试验方法[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.
- [24] 张广庆,汪开鑫,肖茂华,等. 基于液压机械传动扭矩比的HMCVT稳态传动效率研究[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):533-541.
ZHANG Guangqing, WANG Kaixin, XIAO Maohua, et al. HMCVT steady state transmission efficiency based on HST EGT torque ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 533-541. (in Chinese)

(上接第431页)

- [9] CHAICHAOWARAT R, KINUGAWA J, SEINO A, et al. A spring-embedded planetary-gear parallel elastic actuator[C]//2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2020: 952-959.
- [10] FERNANDEZ J D G, YU B, BARGSTEN V, et al. Design, modelling and control of novel series-elastic actuators for industrial robots[J]. Actuators, 2020, 9(1): 6.
- [11] ZHANG Q, SUN D, QIAN W, et al. Modeling and control of a cable-driven rotary series elastic actuator for an upper limb rehabilitation robot[J]. Front Neurorobot, 2020, 14: 13.
- [12] 张秀丽,谷小旭,赵洪福,等. 一种基于串联弹性驱动器的柔顺机械臂设计[J]. 机器人,2016, 38(4): 385-394.
ZHANG Xiuli, GU Xiaoxu, ZHAO Hongfu, et al. Design of a compliant robotic arm based on series elastic actuator[J]. Robot, 2016, 38(4): 385-394. (in Chinese)
- [13] TSAGARAKIS N G, LAFFRANCHI M, VANDERBORGH T B, et al. A compact soft actuator unit for small scale human friendly robots[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009: 4356-4362.
- [14] 史延雷,张明路,张小俊,等. 一种旋转型机器人柔性关节设计与分析[J]. 中国机械工程,2016, 27(18): 2494-2499, 2500.
SHI Yanlei, ZHANG Minglu, ZHANG Xiaojun, et al. Design and analysis of a rotary-type robot flexible joint[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(18): 2494-2499, 2500. (in Chinese)
- [15] ZHOU M. A method to determine the topology of custom torsional elastic element for the lightweight rotary series elastic actuator[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1939(1): 012080.
- [16] HU B, CHENG G, LU H, et al. Optimal design of the elastic unit for the serial elastic hip joint of the lower extremity exoskeleton[C]//International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering. Springer, Singapore, 2019: 85-94.
- [17] CARPINO G, ACCOTO D, SERGI F, et al. A novel compact torsional spring for series elastic actuators for assistive wearable robots[J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 134(12): 1-10.
- [18] ROOZING W, REN Z, TSAGARAKIS N G. An efficient leg with series-parallel and biarticular compliant actuation: design optimization, modeling, and control of the eLeg[J]. The International Journal of Robotics Research, 2021, 40(1): 37-54.
- [19] 孙宁,程龙. 串联弹性驱动器设计、建模及在机器人上的应用[J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1467-1483.
SUN Ning, CHENG Long. Design and modeling of series elastic actuators with applications in robot[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1467-1483. (in Chinese)
- [20] BANG J, KWON Y, LEE J. Safety improvement in the turning motion using the series elastic actuator[C]//2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2020: 940-945.
- [21] 曲祥旭,曹东兴,张姗. 一种扭簧变刚度柔性关节的设计与研究[J]. 机械工程学报,2021, 57(13): 114-123.
QU Xiangxu, CAO Dongxing, ZHANG Shan. Design and research of a variable stiffness compliant joint based on torsional spring[J]. Journal of Mechanical Engineering,2021, 57(13): 114-123. (in Chinese)
- [22] 李华敏. 渐开线齿轮的几何原理与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
- [23] 陈兵奎,李海翔. 渐开弧面齿轮的形成原理及数学模型[J]. 机械工程学报,2012, 48(3): 57-62.
CHEN Bingkui, LI Haixiang. Generation principle and mathematical models of involute-circular gear [J]. Journal of Mechanical Engineering,2012, 48(3): 57-62. (in Chinese)