

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.218

引用格式:胡升阳,王世宇,沈刚,等.柔性内齿圈啮合特性及动态性能对比分析[J].重庆大学学报,2025,48(5): 28-40.



柔性内齿圈啮合特性及动态性能对比分析

胡升阳^{1,2,3},王世宇¹,沈刚²,曾云³,方宗德⁴

(1. 天津大学机械工程学院,天津 300072; 2. 安徽理工大学机电工程学院,安徽淮南 232001;

3. 浙江通力传动科技有限公司,浙江温州 324004; 4. 西北工业大学机电学院,西安 710072)

摘要:内齿圈作为行星齿轮传动系统的关键部件,对行星传动系统的均载和动载特性具有至关重要的作用。柔性内齿圈行星轮系借助齿圈自身柔性,可显著补偿由于系统部件加工误差和安装误差所导致的各行星轮传递扭矩的不均匀性。文中深入剖析柔性内齿圈结构特性,对比表明:柔性内齿圈较传统齿圈结构具备更加优良的柔性,可改善系统均载与动载性能,但同时也存在齿面接触应力偏载、应力分布不均匀、承载传动误差波动幅值增大和结构应力集中等弊端,相关解析结果可为明确柔性齿圈设计及改良齿圈结构提供理论支持。

关键词:行星轮系;柔性齿圈;啮合特性;结构特性;动态性能

中图分类号:TH132.41

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)05-028-13

Comparative analysis of meshing characteristics and dynamic performance of flexible ring gears

HU Shengyang^{1,2,3}, WANG Shiyu¹, SHEN Gang², ZENG Yun³, FANG Zongde⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China; 2. School of Mechatronics

Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P. R. China; 3. Zhejiang Kone

Transmission Technology Limited Company, Wenzhou, Zhejiang 324004, P. R. China; 4. School of Mechanical

Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

Abstract: As a key component of planetary transmission systems, the ring gear plays an important role in load sharing and influencing the system's dynamic load factor. The inherent flexibility of the ring gear can significantly compensate for the transmission torque imbalance among planetary gears caused by manufacturing and assembly errors. This paper presents a detailed analysis of the structural characteristics of flexible ring gears. Comparative studies show that flexible ring gears exhibit superior adaptability compared to conventional ring

收稿日期:2023-11-14 网络出版日期:2024-07-11

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52305045, 52005402, 52105060);安徽省高校科研研究项目-重点项目(2023AH051224);安徽理工大学高层次引进人才科研启动基金项目(2022yjrc19);国家自然科学基金重点项目(U21A20125)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52305045, 52005402, 52105060), University Scientific Research Project of Anhui Province-Key Project (2023AH051224), Scientific Research Foundation for High-level Talents of Anhui University of Science and Technology (2022yjrc19), and Key Project of National Natural Science Foundation of China (U21A20125).

作者简介:胡升阳(1990—),男,博士,主要从事机械传动及机械系统动力学研究,(E-mail) hushengyangnwp@163.com。

gear, improving load sharing capacity and reducing dynamic load factors. However, this flexibility also introduces certain drawbacks, such as unbalanced loading, uneven stress distribution, increased amplitude of loaded transmission errors, and structural stress concentrations. The findings offer theoretical insights for optimizing flexible ring gear design and guiding structural improvements in planetary transmission systems.

Keywords: planetary transmission system; flexible ring gear; meshing characteristics; structural characteristics; dynamic performance

研究表明,内齿圈的柔度对系统动态特性的影响是不容忽视的^[1-6]。增加行星轮系中内齿圈的柔性将使行星齿轮之间的载荷分配更加均匀。Hidaka等^[3]对传统的内齿圈结构进行了深入的研究,得出了轮缘厚度对变形、应力和载荷分担系数的影响。结果表明,当轮缘厚度较小时,内齿圈的弯曲变形起主导作用。随着齿厚的增加,内齿圈上的最大应力逐渐从齿槽向齿根转移,但对其载荷分担性能的影响不显著。Kahraman等^[4-6]利用有限元法建立了行星轮系的准静态模型,分析传统内齿圈的柔度对齿轮应力和载荷分布的影响,研究了传统内齿圈的柔度对系统动态特性的影响,结果表明减小内齿圈的厚度有助于补偿齿轮制造安装误差造成的不均匀载荷效应。然而,由于传统内齿圈结构轮缘较厚并呈现刚度高的特点,并不利于行星传动系统的均载和动载性能。

为获取更加优良的系统动态性能,学者们对传统内齿圈的结构进行了优化,提出了柔性内齿圈结构,但目前有关柔性内齿圈的国内外研究较少,且关于柔性内齿圈的概念亦较为混乱。部分文献中柔性内齿圈^[7-9]定义为离散的传统内齿圈结构段,以便于动力学模型中进一步考虑传统内齿圈的结构柔性,然而该定义与文中所提的柔性内齿圈存在概念上的差异。文中所指代的柔性内齿圈是全新的结构形式,通过提升自身柔性,实现行星轮系均载性能的大幅提升^[10-12],目前国内外有关全新结构形式柔性内齿圈的文献甚少,亟待明确其静态与动态性能。

1 模型构建及传统内齿圈特性分析

1.1 模型构建

齿轮的齿廓分为渐开线部分与过渡曲线部分。通常外啮合齿轮的齿廓依照齿条刀具(滚刀或蜗杆砂轮)切齿方式生成,内啮合齿轮的齿廓则采用插齿加工方式生成。采用滚刀加工的齿轮,其过渡曲线是延伸渐开线,而用轮形插刀加工的齿轮,过渡曲线则是延伸外摆线。计算渐开线部分各点坐标并不困难,计算过渡曲线上各点的坐标并且使之和渐开线部分正确连接是重点,通过编排模拟范成过程的计算方程,可准确得到整个齿廓的坐标,相关推导过程可参见文献[12]。

结合有限元模型创建思想,依据分析构建的齿轮齿廓和过渡曲线方程,获取各节点坐标,采取8节点三维等参单元按照节点顺序连接,可建立齿轮单齿精确三维有限元模型,环形阵列并合并轮齿间网格截断误差后生成所需的齿轮全齿网格模型,经精确装配和工况环境设置,从而搭建起传动系统全有限元求解模型,如图1所示。

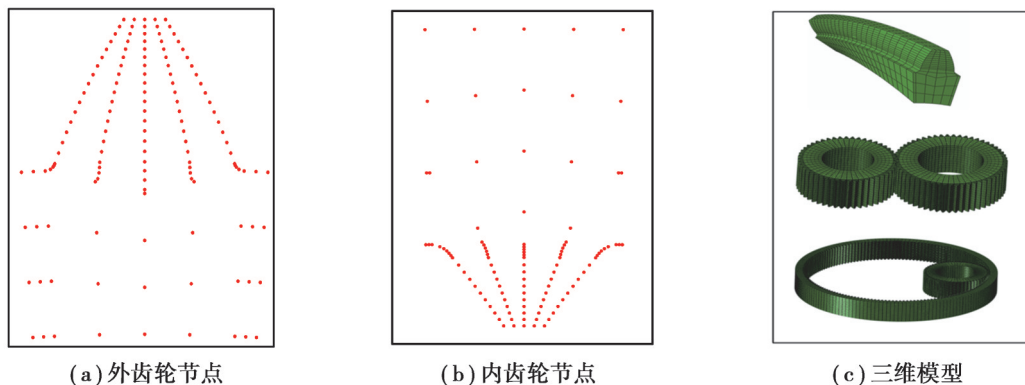


图1 内外齿轮建模

Fig. 1 Internal and external gear modeling

1.2 传统内齿圈特性分析

为对比了解柔性内齿圈结构与传统内齿圈在特性上的差异性,文中以某行星传动系统为例,分别开展了2种内齿圈结构类型的特性分析,某行星传动系统相关参数见表1所示。

表 1 行星轮系基本参数
Table 1 Basic parameters of planetary gear train

基本构件	齿数	模数/mm	压力角/(°)	齿宽/mm	太阳轮转速/ (r·min ⁻¹)	输入功率/ kW	输入扭矩/ (N·m)	法向啮合力/N
太阳轮	48	3.8	22.5	90	1 128.0	2 985.8	25 278.7	60 003.2
行星轮	55	3.8	22.5	88	1 128.0	2 985.8	25 278.7	60 003.2
内齿圈	162	3.8	22.5	88	1 128.0	2 985.8	25 278.7	60 003.2

依据工况及柔性齿圈结构参数,设定相应的传统内齿圈参数(见表2),文中将从承载传动误差、齿面最大接触应力、啮合区齿面接触应力分布及结构影响因素等多个方面,开展柔性齿圈和传统内齿圈的特性对比。

表 2 传统内齿圈结构参数
Table 2 Conventional ring gear structure parameters

参数	传统内齿圈	参数	传统内齿圈
齿数	162	轮缘厚度/mm	24
模数/mm	3.8	质量/kg	31.25
压力角/(°)	22.5	转动惯量/(kg·m ²)	2.960 6
变位系数	0.151 6	固定方式	周向
齿宽/mm	88		

如图2所示,传统内齿圈的承载传动误差均值与波动幅值均较小,其变形主要为轮齿部分受载变形;齿面最大接触应力位于内啮合齿轮副的单齿啮合区范围;传统内齿圈的齿面接触应力沿齿宽对称分布,齿宽两端未出现应力偏载,与最大接触应力相差甚小,且齿面接触应力波动值较小,齿面接触状态良好。

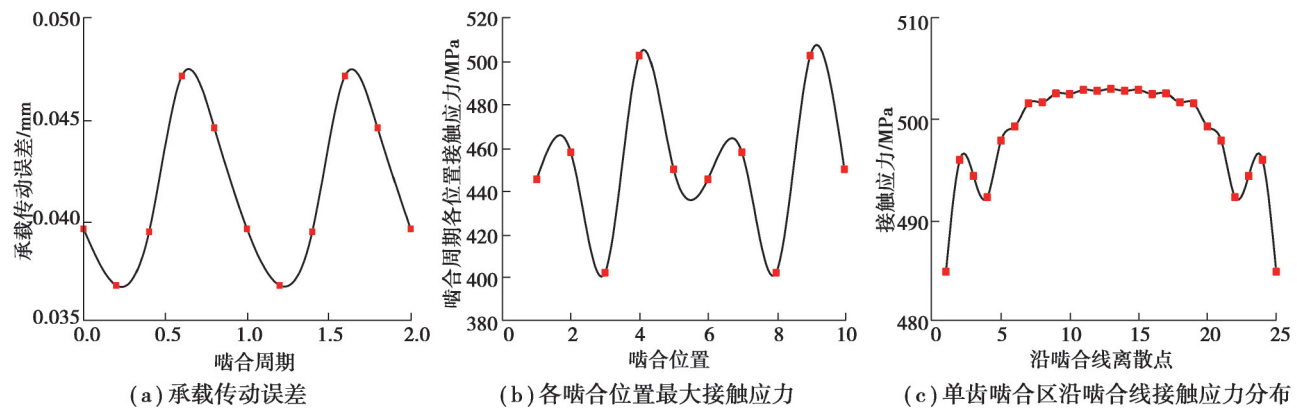


图 2 传统内齿圈啮合特性
Fig. 2 Meshing characteristics of traditional ring gear

传统内齿圈的结构简单,轮缘厚度是影响其特性的最重要结构因素。如图3所示,随着传统内齿圈轮缘厚度的增加,其承载传动误差最大值、均值及波动幅值均不断减小,但降低趋势不断放缓。齿面接触应力分布均匀,齿向两端接触应力值相等,无齿面应力偏差。齿面最大接触应力随轮缘厚度增加不断减小,但变化幅值较小。

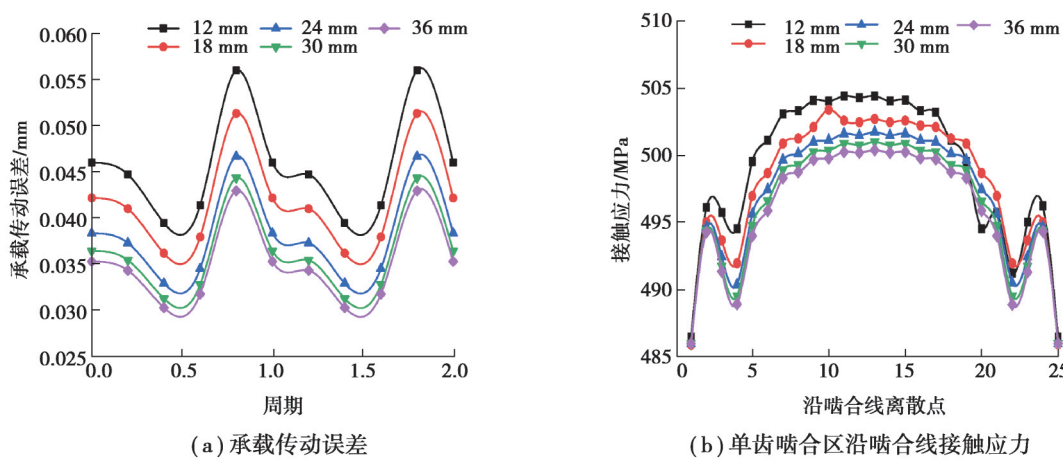


图 3 承载传动误差与接触应力随轮缘厚度变化规律

Fig. 3 Variation law of loaded transmission error and contact stress with rim thickness

2 柔性内齿圈特性分析

柔性内齿圈与薄壁内齿圈结构具备相似的设计理念,可视为薄壁内齿圈结构的改进形式,通过将固定形式转为内齿轮下端面固定,并辅助以“延伸柔性圈”结构后,使结构的柔性得到了极大的提升。国外某型号直升机主减速器中率先采用柔性齿圈行星齿轮传动系统,使得传动系统的动态性能较采用传统内齿圈结构时得到了显著提升,所采用的柔性齿圈结构形式如图 4 所示。

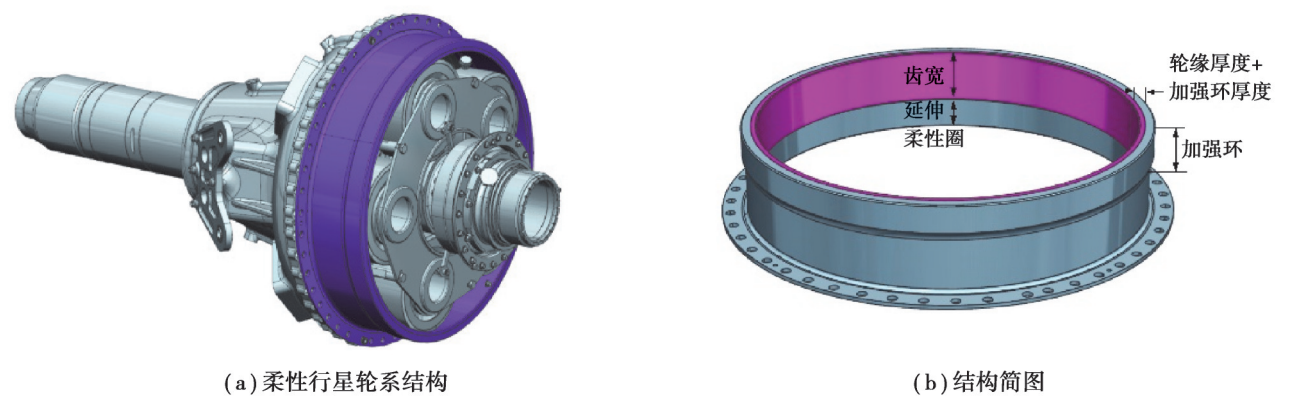


图 4 主减速器与柔性行星轮系三维图

Fig. 4 Three-dimensional diagram of the main reducer and planetary gear train

2.1 啮合特性分析

表 3 为上述柔性行星传动系统中所采用的柔性内齿圈结构参数。

表 3 柔性内齿圈结构参数			
Table 3 Structural parameters of L-type flexible ring gear			
参数	柔性齿圈	参数	柔性齿圈
齿数	88	加强环长度/mm	44
轮缘厚度/mm	24	加强环厚度/mm	12
延伸柔性圈长度/mm	58	固定方式	底部
延伸柔性圈厚度/mm	6		

通过构建柔性内齿圈参数化有限元模型,准确获悉了该柔性内齿圈的齿面最大接触应力、承载传动误差,以及“原单齿啮合区”沿啮合线方向齿面接触应力分布,如图 5 所示。

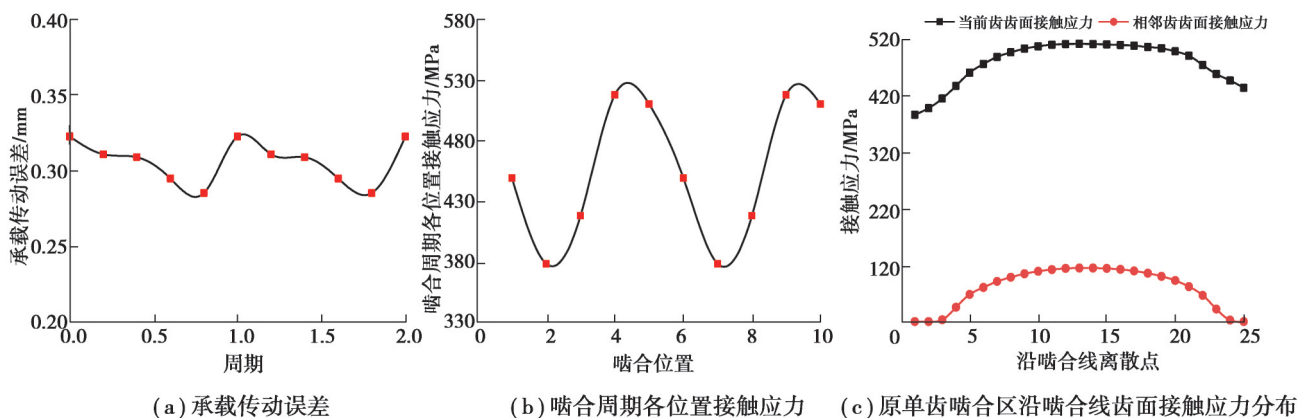


图 5 柔性齿圈啮合特性

Fig. 5 Meshing characteristics of L-shaped flexible ring gear

由图 5 可知,柔性内齿圈的结构柔性较传统内齿圈明显增大,有助于改善行星传动系统的均载性能,但承载传动误差波动幅值、齿面接触应力最大值及波动幅值均较传统内齿圈增大。此外,柔性内齿圈采用底部固定,于顶端设计加强环结构,但仍难以避免齿圈上下端面出现喇叭口状变形,沿啮合线的齿面接触应力出现偏载,且齿面接触应力分布不再均匀对称,齿面接触应力均值与最大接触应力之间的差距加大,表明齿面接触应力更加集中于齿宽的中部位置。齿面接触应力波动幅值较传统内齿圈增幅明显,且齿面应力开始向齿圈下端一侧倾斜。由图 6 可知,由于柔性内齿圈齿宽部分的轮缘厚度与“延伸柔性圈”厚度存在较大差异,直接造成了柔性齿圈在位于齿宽与延伸柔性圈交界部分的位置产生了应力集中区域,将直接影响柔性齿圈结构的可靠性。相关数据分析结果见表 4 所示。

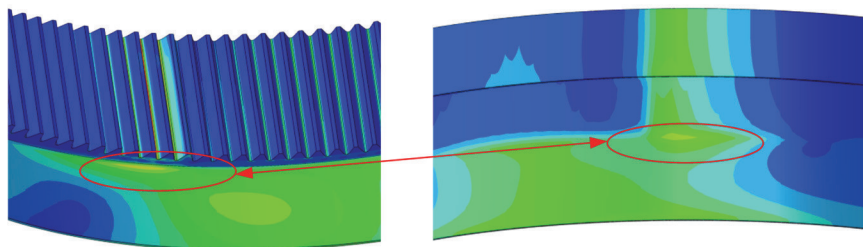


图 6 Von-mises 应力云图

Fig. 6 Von-mises stress cloud image

表 4 承载传动误差与齿面接触应力分析

Table 4 Loaded transmission error and tooth surface contact stress analysis

参数	承载传动误差/mm	齿面接触应力/MPa
最大值	0.322 59	518.4
平均值	0.306 07	486.8
波动值	0.037 49	138.4/113.5
应力偏载值	—	32.6

2.2 轮缘厚度影响规律分析

柔性内齿圈结构形式复杂,影响其啮合特性的结构部分较多。为进一步了解各结构部分对啮合特性所产生影响的程度和规律,故对柔性内齿圈各结构部分予以分组讨论分析。齿轮轮缘厚度作为影响轮齿啮合

的重要因素之一,轮缘厚度的减薄会增加结构柔性并可改善系统的均载性能。

通过等间距设置柔性齿圈的轮缘厚度,经分析获得了柔性齿圈随轮缘厚度变化的规律特点。由图7可知,随着柔性内齿圈轮缘厚度的减薄,轮齿啮合产生的承载传动误差随之不断增大,且增幅不断增快,表明轮缘厚度对于柔性齿圈结构柔性的影响较大。与传统内齿圈对比可知,柔性齿圈的结构柔性明显更大,且受轮缘厚度的影响更加明显,表明柔性齿圈更加有助于提升行星传动系统的均载性能,但其较大的承载传动误差波动幅值,也将对系统的动载性能产生影响。

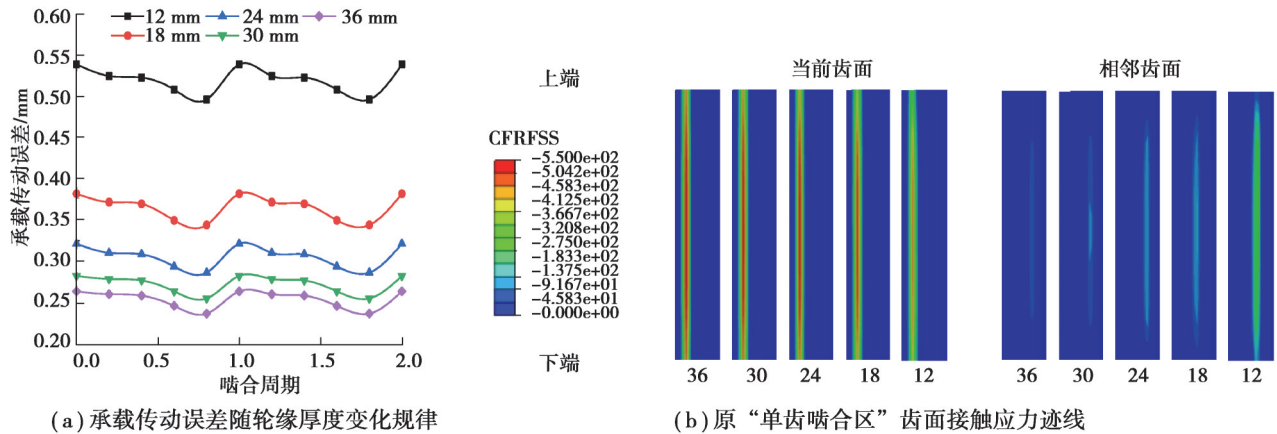


图7 柔性齿圈啮合特性

Fig. 7 Mesh characteristics of the flexible ring gear

由图8可知,随着轮缘厚度的减小,当前齿面接触应力的值和接触面积皆不断减小,而相邻齿面的接触应力值和接触面积则不断增加,并且当前齿面的接触应力呈现由齿顶逐渐向轮齿中部移动的特点,而相邻齿面的接触应力则呈现由齿根向轮齿中部不断移动的趋势。

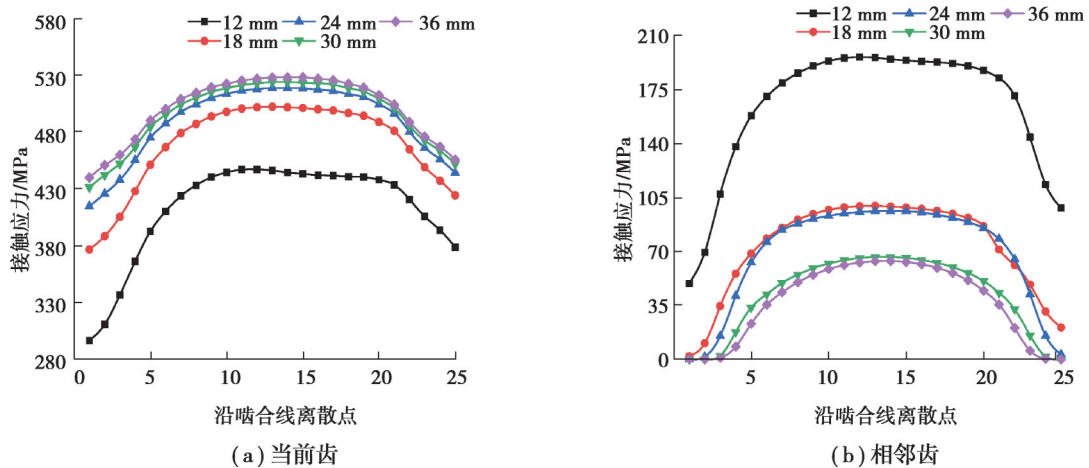


图8 原“单齿啮合区”沿啮合线接触应力随轮缘厚度变化趋势

Fig. 8 Trend of contact stress of original "single tooth engagement zone" along tooth width direction with rim thickness

随着轮缘厚度的不断减小,“单齿啮合区”中当前齿面的接触应力与相邻齿面的接触应力变化呈现相反的趋势,当前齿面的接触应力随着轮缘厚度的减小不断降低,而相邻齿面的接触应力则随着轮缘厚度的减小不断增加,并且齿面两端的偏载值随着轮缘厚度的减小不断递增。

此外,随着轮缘厚度的增加,当前齿面最大接触应力呈现上升趋势,相邻齿面最大接触应力则呈现下降趋势,但变化速度皆不断放缓,随着轮缘厚度的增加导致结构刚性增强,减少了相邻齿面的接触。齿面两端接触应力偏载值随着轮缘厚度的增加而不断降低,表明改变轮缘厚度可改善齿面载荷的偏载效果。相关分析数据如表5所示。

表 5 齿面接触应力对比分析(轮缘厚度)
Table 5 Comparative analysis of tooth surface contact stress (rim thickness)

轮缘厚度/mm	当前齿			相邻齿		
	最大值/MPa	平均值/MPa	两端偏载值/MPa	最大值/MPa	平均值/MPa	两端偏载值/MPa
12	446.8	412.3	82.2	250.2	203.8	70.1
18	502.0	468.3	47.7	92.5	73.8	26.7
24	518.4	488.4	32.6	87.9	66.9	4.7
30	523.8	495.6	19.5	45.0	29.4	0
36	528.1	500.3	15.7	41.3	22.9	0

2.3 延伸柔性圈长度与厚度影响规律分析

柔性内齿圈通过将传统内齿圈的外侧周向固定转化为底部固定,并于内齿圈下端面设计了延伸柔性圈结构。承载传动误差与接触应力随延伸柔性圈长度变化规律如图 9 所示,齿面接触应力对比分析如表 6 所示。

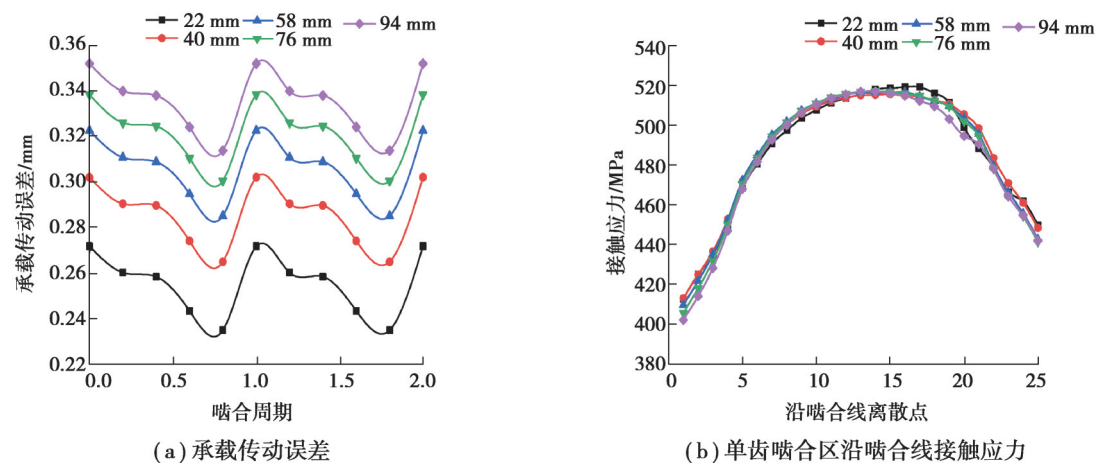


图 9 承载传动误差与接触应力随延伸柔性圈长度变化规律
Fig. 9 Trend of loaded transmission error and contact stress with the length of extended ring

表 6 齿面接触应力对比分析(延伸柔性圈长度)
Table 6 Comparative analysis of contact stress on tooth surface (length of extended ring)

延伸柔性圈长度/mm	最大值/MPa	平均值/MPa	两端偏载值/MPa
22	519.2	486.4	34.1
40	515.3	487.5	35.3
58	516.5	486.7	32.6
76	516.9	485.8	34.5
94	517.1	483.9	38.7

由图 9 可知,通过增加延伸柔性圈长度可以进一步提升结构的柔性,承载传动误差波动幅值增幅较小。随着延伸柔性圈长度的减小,齿面接触应力偏载有所增强,齿面载荷开始向齿圈下端一侧移动倾斜,但影响较小。随延伸柔性圈长度的增加,齿面最大接触应力逐渐减小,幅值变化较小。齿宽两端偏载值则随着延伸柔性圈长度的增加,呈现先平稳而后逐步增强的趋势。

为进一步了解延伸柔性圈厚度的影响规律,等间距设置了延伸柔性圈厚度,以分析延伸柔性圈厚度对柔性内齿圈啮合性能的影响。承载传动误差与接触应力随延伸柔性圈厚度变化规律如图 10 所示。

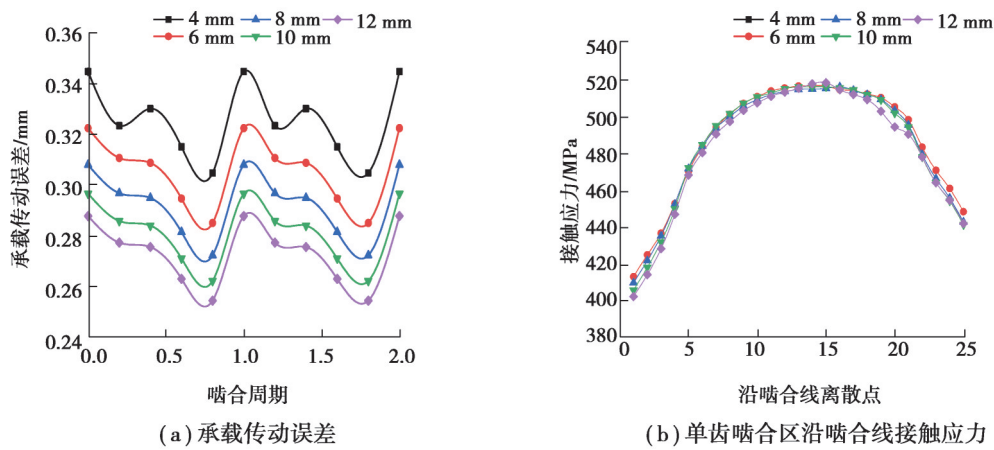


图 10 承载传动误差与接触应力随延伸柔性圈厚度变化规律

Fig. 10 Trend of loaded transmission error and contact stress with the thickness of extended ring

由图 10 可知,通过减小延伸柔性圈的厚度同样可以提升结构柔性,且随着延伸柔性圈厚度的不断减小,结构柔性的提升速度不断增大。齿面接触应力受延伸柔性圈厚度改变的影响较小,随着延伸柔性圈厚度的减小,齿面接触应力偏载现象有所增强,齿面载荷开始向齿圈下端一侧移动并倾斜。具体数据见表 7 所示。

表 7 齿面接触应力对比分析(延伸柔性圈厚度)

Table 7 Comparative analysis of contact stress on tooth surface (thickness of extended ring)			
延伸柔性圈厚度/mm	最大值/MPa	平均值/MPa	两端偏载值/MPa
4	517.0	487.4	34.9
6	516.9	488.0	34.6
8	515.6	486.2	33.1
10	515.9	485.8	33.5
12	518.7	483.4	32.6

2.4 加强环厚度与长度影响规律分析

为改善内齿圈存在的齿面接触应力偏载现象,于内齿圈的顶端设计了加强环,以减少齿圈顶端变形,使沿啮合线上的载荷分布更加均匀且靠近齿宽中部。承载传动误差与接触应力随加强环厚度变化规律如图 11 所示。

由图 11 可知,随着加强环厚度的减小,承载传动误差均值与波动值均不断增加,但增速不断减缓。齿面两端偏载值随着加强环厚度的增加得到改善,呈线性减小,并且齿面接触应力分布变得更加均匀,而当加强环厚度为零时,沿啮合线的齿面接触应力分布明显偏向一侧。沿啮合线上的齿面接触应力呈现先增后降的趋势,且增加的趋势强于降低趋势。此外,随着加强环厚度的增加,齿面最大接触应力呈现不断递增的趋势。以上分析充分表明加强环对于柔性内齿圈轮齿表面接触应力的偏载状况具有显著的改善作用。具体分析数据如表 8 所示。

为进一步了解加强环长度对柔性内齿圈啮合特性的影响规律,等间距设置了 5 种加强环长度,以分析齿面接触应力和承载传动误差等随加强环长度变化的规律,如图 12 所示。

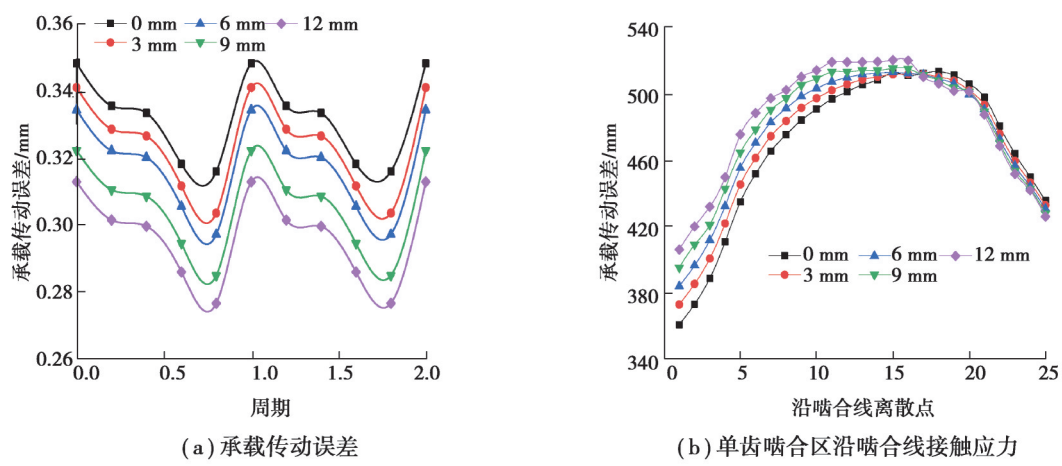


图 11 承载传动误差与接触应力随加强环厚度变化规律

Fig. 11 Trend of loaded transmission error and contact stress with thickness of reinforcing ring

表 8 齿面接触应力对比分析(加强环厚度)

Table 8 Comparative analysis of contact stress on tooth surface (thickness of reinforcing ring)			
加强环厚度/mm	最大值/MPa	平均值/MPa	两端偏载值/MPa
0	513.4	470.1	75.5
3	512.5	473.5	61.3
6	513.8	477.1	47.1
9	516.2	480.8	33.2
12	521.2	484.9	20.1

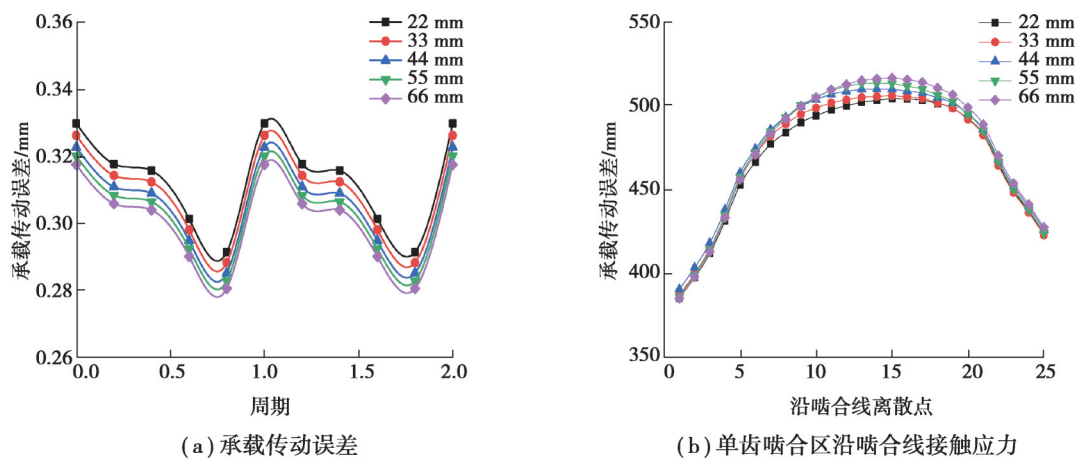


图 12 承载传动误差与接触应力随加强环长度变化规律

Fig. 12 Trend of loaded transmission error and contact stress with length of reinforcing ring

由图 12 可知,随着加强环长度的减小,承载传动误差有小幅增大,较改变加强环厚度时所产生的影响明显减弱。随着加强环长度的增加,齿面接触应力更加集中,齿面接触应力最大值不断增加,且齿面载荷向齿圈下端一侧小幅移动倾斜,齿向两端偏载值则随着加强环长度的增加先有所降低后升高的变化。由此可知,加强环厚度较加强环长度对于改善轮齿表面接触应力的偏载状况具有更加显著的效果。具体分析数据如表 9 所示。

表 9 齿面接触应力对比分析(加强环长度)

Table 9 Comparative analysis of contact stress on tooth surface (length of reinforcing ring)

加强环长度/mm	最大值/MPa	平均值/MPa	两端偏载值/MPa
22	510.5	476.7	35.6
33	512.2	478.8	32.8
44	516.1	482.5	32.6
55	519.4	482.4	35.3
66	522.7	483.8	39.6

3 系统均载与动载特性对比

为进一步了解分别采用传统内齿圈与柔性内齿圈后行星传动系统在均载和动载特性上的差异性。在查阅《实用齿轮设计计算手册》后,依据航空齿轮 5 级精度要求设置了如表 10 所示的行星传动系统各构件误差,以方便对比两者在相同误差及工况条件下的动态性能表现。相关动力学方程建模过程详见文献[13-15]。

表 10 各构件误差设置

Table 10 Error setting of each component

构件	偏心误差/ μm	偏心误差角/($^{\circ}$)	安装误差/ μm	安装误差角/($^{\circ}$)
太阳轮	6	1/6	7	1/6
内齿圈	9	1/5	8	1/5
星轮 1	6	1/3	6	1/2
星轮 2	8	1/3	7	1/2
星轮 3	5	1/3	8	1/2
星轮 4	9	1/3	7	1/2
星轮 5	7	1/3	9	1/2

3.1 传统齿圈与柔性齿圈均载特性对比

经由承载传动误差获取 2 类齿圈的时变啮合刚度,并作为激励引入行星传动系统动力学模型,经仿真分析后获取了 2 类内齿圈结构在相同误差设置下系统各内外啮合副的均载系数情况,如图 13 和图 14 所示。

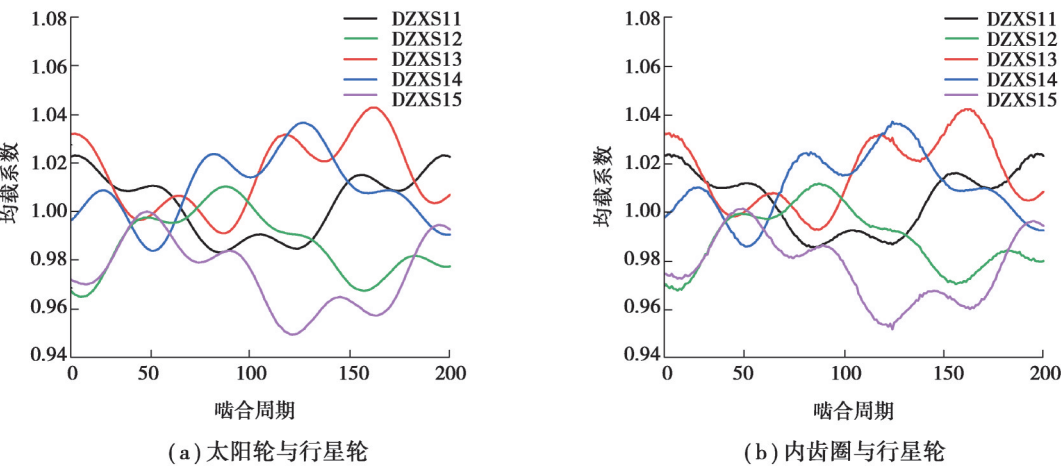


图 13 系统各支路均载系数(传统内齿圈)

Fig. 13 Load sharing of system each branch(traditional ring gear)

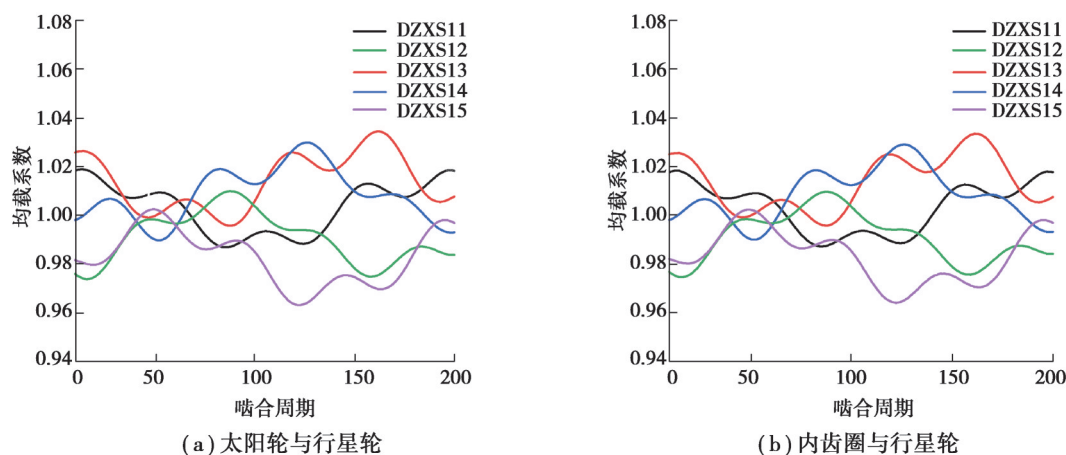


图14 系统各支路均载系数(柔性内齿圈)

Fig. 14 Load sharing of system each branch (flexible ring gear)

图13中,JZXS表示系统各支路的瞬时均载系数,第1个数字中的1代表太阳轮,2代表内齿圈,第2个数字则代表第*i*个行星轮,以此代表不同的内外啮合副。

由图13与图14可知,采用柔性内齿圈后系统的均载系数较原传统内齿圈得到了明显的改善,系统均载系数降低25.88%。同时,采用柔性内齿圈后系统内啮合副均载系数曲线平滑过渡,避免了采用传统内齿圈时内啮合副均载系数存在跳动的弊端,系统传动更加平稳,这将有助于改善系统传动过程中的振动噪声。

3.2 传统齿圈与柔性齿圈动载特性对比

传统齿圈与柔性齿圈动载特性对比如图15和图16所示。

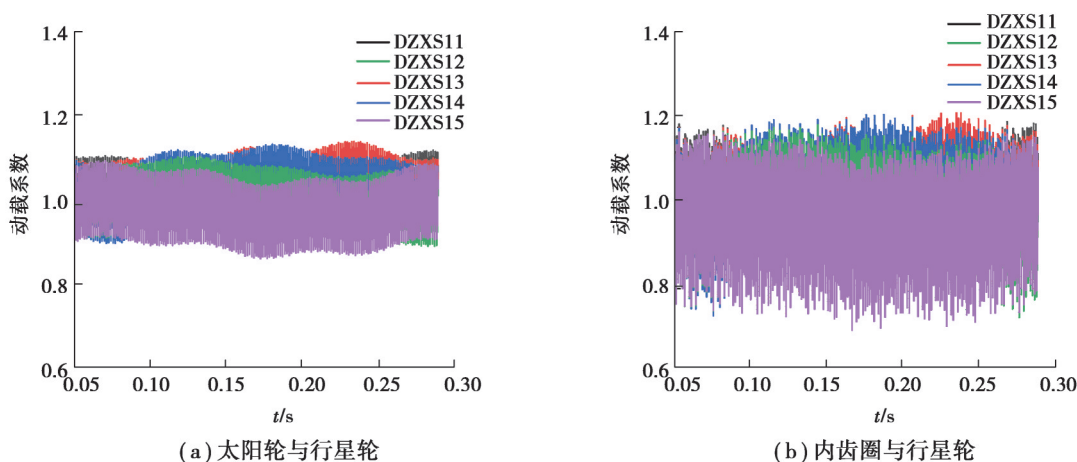


图15 系统各支路动载系数(传统内齿圈)

Fig. 15 Dynamic load factor of system each branch (traditional ring gear)

图中,DZXS表示系统各支路瞬时动载系数,第1个数字中的1代表太阳轮,2代表内齿圈,第2个数字代表第*i*个行星轮,以此代表不同的内外啮合副。

由图15与图16可知,采用传统内齿圈时行星传动系统各支路动载曲线波动剧烈,这将导致行星传动系统在传动过程中的振动和噪声增大。改用柔性内齿圈后系统中内啮合齿轮副的动载系数出现了明显的降低,较传统内齿圈中内啮合齿轮副的动载系数降低了56.1%,但外啮合齿轮副的动载系数也增大了18.2%。这是由于柔性内齿圈承载传动误差波动幅值波动较大,故而导致传动系统在传动时的动载荷波动小幅增强,但由于其结构柔性较大,将使内齿圈与行星轮间的振动有所缓解,内啮合各支路动载系数波动趋向于均匀。相关对比数据如表11所示。

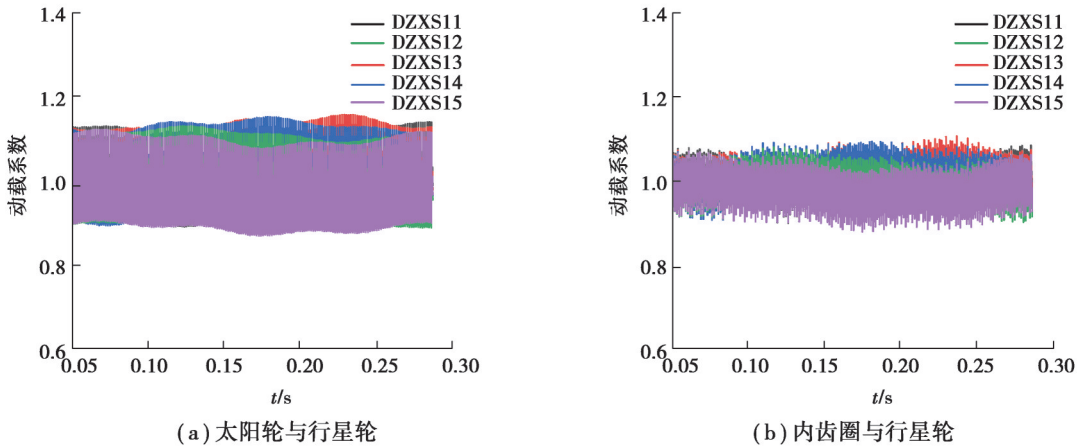


图 16 系统各支路动载系数(柔性内齿圈)
Fig. 16 Dynamic load factor of system each branch (flexible ring gear)

表 11 系统均载系数与动载系数对比
Table 11 Comparison between system load sharing and dynamic load factor

类型	均载系数		动载系数	
	外啮合	内啮合	外啮合	内啮合
传统内齿圈	1.049 52	1.047 91	1.131 94	1.243 43
柔性齿圈	1.036 70	1.035 88	1.156 03	1.106 98

4 结 论

1)柔性内齿圈具备优良结构柔性的同时也存在齿面接触应力偏载、应力分布不均匀、应力向齿圈下端倾斜、承载传动误差波动幅值增大和存在结构应力集中等弊端。此外,随着轮缘厚度减薄,柔性齿圈结构柔性将进一步提升,从而改变轮齿间重合度,令原单齿啮合区变为双齿啮合区,并影响齿面接触应力幅值与分布。柔性齿圈的“延伸柔性圈”和“加强环”部分则分别具备进一步提升内齿圈结构柔性和抑制齿面偏载的作用。

2)采用柔性内齿圈后系统的均载系数较原传统内齿圈降低 25.88%,系统内啮合副均载系数曲线平滑过渡,避免了采用传统内齿圈时内啮合副均载系数存在跳动的弊端,系统传动更加平稳。此外,改用柔性内齿圈后系统中内啮合齿轮副的动载系数出现了明显的降低,较传统内齿圈中内啮合齿轮副的动载系数降低了 56.1%,各支路动载曲线波动显著改善,行星传动系统在传动过程中的振动噪声得到进一步抑制。

参考文献

[1] 许华超,秦大同. 内激励下弹性边界柔性直齿内齿圈振动响应研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 161-167.
Xu H C, Qin D T. Vibration response of flexible spur ring gear with elastic foundation under internal excitation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 161-167. (in Chinese)

[2] 秦大同. 国际齿轮传动研究现状[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(8): 1-10.
Qin D T. Review of research on international gear transmissions[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(8): 1-10. (in Chinese)

[3] Hidaka T, Terauchi Y, Nagamura K. Dynamic behavior of planetary gear: 7th report, influence of the thickness of the ring gear [J]. Bulletin of JSME, 1979, 22(170): 1142-1149.

[4] Kahraman A, Ligata H, Singh A. Influence of ring gear rim thickness on planetary gear set behavior[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(2): 021002.

[5] Kahraman A, Vijayakar S. Effect of internal gear flexibility on the quasi-static behavior of a planetary gear set[J]. Journal of Mechanical Design, 2001, 123(3): 408-415.

- [6] Kahraman A, Kharazi A A, Umrani M. A deformable body dynamic analysis of planetary gears with thin rims[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 262(3): 752-768.
- [7] 梁雁昆, 刘世军, 李志胜, 等. 行星齿轮增速器高速内齿圈模态分析[J]. *机械传动*, 2015, 39(7): 158-160.
Liang Y K, Liu S J, Li Z S, et al. Modal analysis of the high speed inner gear ring in planetary gear speeder[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2015, 39(7): 158-160. (in Chinese)
- [8] 王立新, 吴双马, 刘军辉, 等. 具有柔性内齿圈的行星齿轮系统动态特性分析[J]. *机械设计与制造*, 2018(1): 40-43.
Wang L X, Wu S M, Liu J H, et al. Dynamic characteristics analysis of the planetary gear system with the flexible ring[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(1): 40-43. (in Chinese)
- [9] 鲍和云, 周兴军, 朱如鹏, 等. 考虑柔性齿圈的节点外啮合行星齿轮均载特性分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(9): 3005-3010.
Bao H Y, Zhou X J, Zhu R P, et al. Load sharing analysis of planetary gear train with meshing beyond pitch point considering flexible deformable ring[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(9): 3005-3010. (in Chinese)
- [10] 李蕾. 行星轮系柔性内齿圈均载设计技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
Li L. Research on load-sharing design technology of flexible gear ring of planetary gear train[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (in Chinese)
- [11] 胡升阳, 方宗德, 徐颖强, 等. 内齿圈结构类型柔性及均载与动载特性对比分析[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(12): 1-14.
Hu S Y, Fang Z D, Xu Y Q, et al. Analysis and comparison of the flexible and load sharing and dynamic load factor of the type of ring gear[J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(12): 1-14. (in Chinese)
- [12] Hu S Y, Fang Z D, Xu Y Q, et al. Characteristics analysis of the new flexible ring gear for helicopter reducer[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 2021, 235(3): 353-374.
- [13] Ren F, Li A S, Shi G Q, et al. The effects of the planet gear manufacturing eccentric errors on the dynamic properties for herringbone planetary gears[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(3): 1060.
- [14] Mo S, Zhang T, Jin G G, et al. Influence mechanism of multi-coupling error on the load sharing characteristics of herringbone gear planetary transmission system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 2019, 233(4): 792-816.
- [15] Hu S Y, Fang Z D, Xu Y Q, et al. Meshing impact analysis of planetary transmission system considering the influence of multiple errors and its effect on the load sharing and dynamic load factor characteristics of the system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 2021, 235(1): 57-74.

(编辑 詹燕平)