

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.003

# 面向直升机主减速器的锥齿轮分路系统静力学均载特性分析

贺茂扬, 朱如鹏, 王昕翔

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对直升机主减速器的锥齿轮分路系统, 建立载荷传递的静力学模型并分析均载特性。由力的平衡条件, 推导出锥齿轮分路系统的静力学平衡方程。在考虑齿轮安装误差的情况下, 分析支撑刚度、扭转刚度、啮合刚度等因素对锥齿轮分路系统静力学均载特性的影响。研究结果表明: 通过降低输入级长轴和双联轴的支撑刚度, 或通过增加输入级长轴的扭转刚度和降低双联轴的扭转刚度, 均有助于提高锥齿轮分路系统的均载特性, 其中输入轴的扭转刚度对均载性能的影响更大些。适当增大左分支主动锥齿轮的安装误差或增大偏置距安装误差, 使综合误差相等, 此时锥齿轮分路系统达到静态均载。

**关键词:** 直升机; 主减速器; 锥齿轮; 均载; 静力学

**中图分类号:** TH132.42    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2026)01-0013-08

## Analysis of Static Load Sharing Characteristics of Bevel Gear Splitting System for Helicopter Main Reducer

HE Maoyang, ZHU Rupeng, WANG Xinxiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A static model for load transfer was established for the bevel gear split system of the helicopter main reducer, and its load sharing characteristics were analyzed. Based on the equilibrium conditions of force, the static equilibrium equation of the bevel gear split system was derived. In consideration of gear installation errors, the influence of factors such as support stiffness, torsional stiffness, and meshing stiffness on the static load sharing characteristics of the bevel gear split system was analyzed. The research results indicate that the reduction of the support stiffness of the input stage long shaft and the dual shaft, or increase of the torsional stiffness of the input stage long shaft and reduce of the torsional stiffness of the dual shaft can help improve the load sharing characteristics of the bevel gear split system, and the torsional stiffness of the input shaft has a greater impact on the load sharing performance. Appropriately increasing the installation error of the left branch active bevel gear or the offset distance installation error, equalling the comprehensive errors, makes the bevel gear split system accomplish static load sharing.

**Keywords:** helicopters; main reducer; bevel gear; load sharing; statics

### 0 引言

共轴式双旋翼高速直升机既具备常规直升机的垂直起降、空中悬停以及良好的近地面机动性能, 又弥补了常规直升机所不具备的高速飞行能力, 它是目前高速直升机的主要研究方向之一<sup>[1]</sup>。如图 1 所示, 共轴高速直升机的传动系统主要分为两部分: 主传动系统和尾推传动系统<sup>[2]</sup>。发动机的输出转速通过内外旋翼轴分路减速、换向后传递给内外旋翼轴。共轴反转锥齿轮分路传动系统属于主传动的第 1 级, 主要完成减速、换向任务, 并实现内、外旋翼轴反向输出。如果分扭传动中载荷分配不均匀, 会造成齿轮偏载, 从而使其中某一路齿轮磨损甚至失效<sup>[3]</sup>。因此, 对共轴反转

锥齿轮分路传动系统进行均载分析, 对改善系统的均载性能具有重要意义。

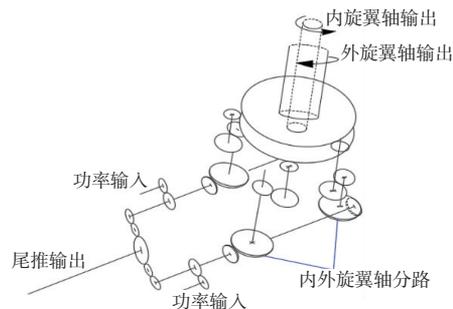


图 1 共轴双旋翼直升机传动系统结构示意图

为了达到均载的目的, 国内外学者开展了大量研究。基于分扭传动系统, WHITE<sup>[4]</sup> 提出了柔

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52275061)

**第一作者简介:** 贺茂扬(1998—), 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为机械传动, hemaoyang@nuaa.edu.cn。

性轴的概念并将其应用到一种双输入双输出直升机齿轮箱中,成功减少了功率损失,改善了系统均载性能。BODAS 等<sup>[5]</sup>以行星齿轮系统为研究对象,研究了在准静态条件下 3 种不同齿轮安装误差对行星齿轮系统均载性能的影响,并提出了改善行星齿轮系统均载性能的设计建议。GMIRYA 和 YURIY 等<sup>[6-9]</sup>研究了弹性扭力轴对分扭传动系统的静力学均载性能的影响,研究结果表明弹性扭力轴可显著改善传动系统的均载性能,提高载荷分配能力。VILÁN 等<sup>[10]</sup>对功率分流传动系统以及含有惰轮的齿轮箱进行结构设计,研究了两分支与输入齿轮之间的位置角对均载性能的影响。TING<sup>[11]</sup>针对大功率齿轮传动系统,研究了制造误差和安装误差对二分支齿轮传动系统均载性能的影响规律,得到了误差与均载系数间的函数关系,为功率二分支齿轮传动系统的静态均载设计提供了理论基础。董皓等<sup>[12]</sup>以双路功率分扭传动系统为对象,分析了安装误差、花键间隙、花键轴摩擦因数对均载效果的影响并得到间隙浮动能提高系统的均载特性的结论。GARCIA<sup>[13]</sup>设计了新型单输入的共轴双旋翼直升机主减速器三级传动构型。该传动构型可分别完成减速换向、分扭传动和共轴反转输出,提高传动系统的均载性能。MO 等<sup>[14]</sup>研究了由啮合齿隙变化引起的浮动啮合误差,建立了考虑位移的两级-三次分流载荷分配系数的精细数学计算模型,并最终得出了浮动轨迹和中心轮浮动量的变化规律。冯正玖<sup>[15]</sup>研究了各齿轮副中心距误差、同轴度误差、轴倾斜误差和齿侧间隙等对系统静力学均载系数的影响。鲍和云等<sup>[16]</sup>基于某直升机主减构型设计了两级变转速传动系统,进行动力学特性、动载和均载特性分析,研究了摩擦因数、输入转速和功率等参数的影响。PLEGUEZUELOS 等<sup>[17]</sup>对某功率分扭圆柱齿轮传动系统建立准静态传动误差计算模型,研究均载系数和传动误差的大小,得到一定规律。钱晓立研究了弹性轴刚度、相位差、轴线偏移、轴承游隙等因素对两种不同构型分扭传动结构均载特性的影响规律。董皓、张建文等申请了锥齿轮构型共轴双旋翼变速传动机构发明专利,该机构包括分级减速装置和共轴减速装置具有承载能力强、效率高等优点,可应用于高速直升机、舰艇传动系统等领域。丁景伟<sup>[18]</sup>以单输入双输出齿轮传动系统为研究对象,探究了各参数交互作用时,对单输入双输出齿轮传动系统静力学均载特性的影响和各种误差对系统动力学动态特性

的影响规律,并开展了相关的敏感度分析和参数匹配分析。叶佩佩<sup>[19]</sup>研究了共轴双旋翼两次功率分流传动系统的动态响应固有特性、动载特性、动力学均载性能以及多目标优化。

已有研究多以圆柱齿轮为基础实现共轴反转输出的传动构型,以锥齿轮为基础实现共轴反转输出的传动构型研究较少。本文以锥齿轮分路系统为研究对象,建立静力学模型,推导其静力学平衡方程,研究其支撑刚度、扭转刚度、啮合刚度、安装误差等对锥齿轮分路系统静力学均载特性的影响,为锥齿轮分路系统的设计提供理论依据。

## 1 锥齿轮分路系统静力学模型

如图 2 为直升机主减速器部分传动系统。发动机的转矩首先传递给输入级长轴,然后经输入级长轴上的锥齿轮副减速、换向传递给双联轴,最后通过并车轴传递输出。锥齿轮分路系统包含输入级长轴和左右二分支双联轴。

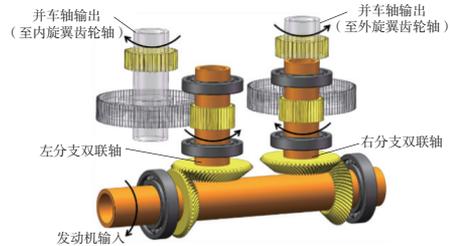


图 2 共轴双旋翼直升机主减速器部分传动系统

图 3 为锥齿轮分路系统结构示意图。发动机的输出转矩经输入级长轴分两路分别传递给齿轮  $Z_1$  和齿轮  $Z_2$ ,再经由双联轴分别传递给齿轮  $Z_3$  和齿轮  $Z_4$ 。其中,齿轮  $Z_1$ 、齿轮  $Z_2$ 、齿轮  $Z_3$  和齿轮  $Z_4$  为弧齿锥齿轮,齿轮  $Z_5$  和齿轮  $Z_6$  为圆柱齿轮。齿轮  $Z_3$  和齿轮  $Z_5$  位于左分支双联轴,齿轮  $Z_4$  和齿轮  $Z_6$  位于右分支双联轴。

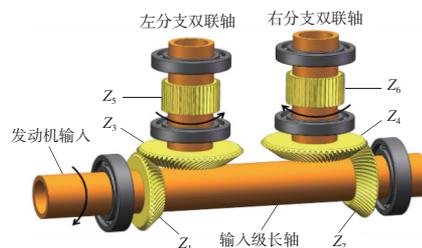


图 3 弧齿锥齿轮传动分路系统结构示意图

根据锥齿轮分路系统结构示意图,建立锥齿轮分路系统静力学模型如图 4 所示,啮合齿轮副、

传动轴和支撑轴承等效为弹簧连接,不考虑阻尼的计算。 $K_{1x}$ 、 $K_{1y}$ 、 $K_{1z}$ 、 $K_{2x}$ 、 $K_{2y}$ 、 $K_{2z}$ 、 $K_{3x}$ 、 $K_{3y}$ 、 $K_{3z}$ 、 $K_{4x}$ 、 $K_{4y}$ 、 $K_{4z}$ 、 $K_{5x}$ 、 $K_{5y}$ 、 $K_{5z}$ 、 $K_{6x}$ 、 $K_{6y}$ 、 $K_{6z}$ 分别为齿轮 $Z_1$ 、齿轮 $Z_2$ 、齿轮 $Z_3$ 、齿轮 $Z_4$ 、齿轮 $Z_5$ 和齿轮 $Z_6$ 在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个方向的支撑刚度; $K_{i1-2}$ 、 $K_{i3-5}$ 、 $K_{i4-6}$ 分别为齿轮 $Z_1$ 和齿轮 $Z_2$ 之间轴段、左分支双联轴和右分支双联轴的扭转刚度; $K_{n1}$ 、 $K_{n2}$ 分别为齿轮 $Z_1$ 和齿轮 $Z_3$ 、齿轮 $Z_2$ 和齿轮 $Z_4$ 的平均啮合刚度; $b_1$ 、 $b_2$ 分别为齿轮 $Z_1$ 和齿轮 $Z_3$ 、齿轮 $Z_2$ 和齿轮 $Z_4$ 的侧隙; $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 、 $\theta_5$ 、 $\theta_6$ 分别为齿轮 $Z_1$ 、齿轮 $Z_2$ 、齿轮 $Z_3$ 、齿轮 $Z_4$ 、齿轮 $Z_5$ 和齿轮 $Z_6$ 的转角; $T_1$ 为输入转矩。为方便计算,齿轮 $Z_5$ 和齿轮 $Z_6$ 的转角为0,则 $\theta_6 = \theta_7 = 0$ 。

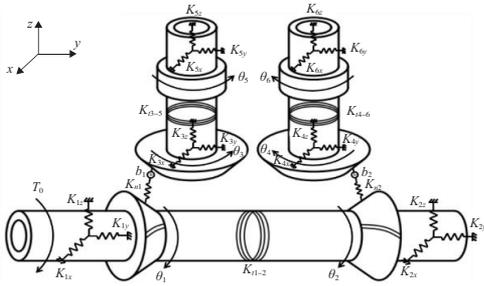


图4 锥齿轮传动分路系统静力学模型

查阅机械设计手册得锥齿轮理论受力计算公式:

$$\begin{cases} F_{tm} = \frac{2000T_1}{d_{m1}} = \frac{2000T_1}{d_1(1-0.5\phi_R)} \\ F_{r1} = \frac{F_{tm}}{\cos\beta_m} (\tan\alpha\cos\delta_1 - \sin\beta_m\sin\delta_1) \\ F_{a1} = \frac{F_{tm}}{\cos\beta_m} (\tan\alpha\sin\delta_1 + \sin\beta_m\cos\delta_1) \\ F_n = \sqrt{F_{tm}^2 + F_{r1}^2 + F_{a1}^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_{tm}$ 为齿宽中点处分度圆上的切向力; $F_{r1}$ 为齿宽中点处的径向力; $F_{a1}$ 为齿宽中点处的轴向力; $F_n$ 为齿宽中点处的法向力; $T_1$ 为主动轮转矩,单位Nm; $d_{m1}$ 为主动轮齿宽中点处的直径,单位mm; $d_1$ 为主动轮大端分度圆直径,单位mm; $\phi_R$ 为齿宽系数; $\alpha$ 为压力角; $\beta_m$ 为齿宽中点处的螺旋角; $\delta_1$ 为主动轮分锥角。

对于锥齿轮的安装误差大致上可分为4类:1)轴交角安装误差 $\Delta\Sigma$ ;2)小齿轮(主动轮)轴向安装误差 $\Delta P$ ;3)大齿轮(从动轮)轴向安装误差 $\Delta G$ ;4)偏置距安装误差 $\Delta E$ 。4种不同类型安装误差示意如图5所示。

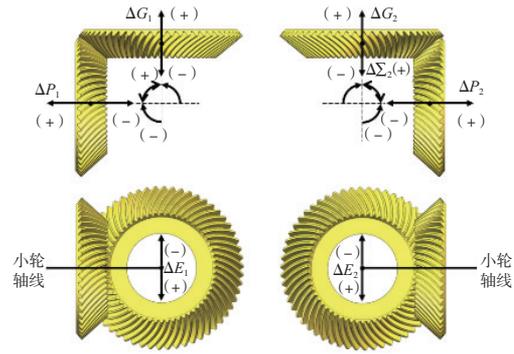


图5 弧齿锥齿轮安装误差定义

锥齿轮的安装误差取值按GB11365—89中规定的5级精度齿轮所允许的安装极限偏差值确定。本文取小齿轮轴向安装误差 $\Delta P$ 和大齿轮轴向安装误差 $\Delta G$ 为 $30\mu\text{m}$ ,偏置距安装误差 $\Delta E$ 为 $30\mu\text{m}$ ,轴交角安装误差 $\Delta\Sigma$ 为 $0.00116^\circ$ 。

## 2 锥齿轮分路系统静力学方程

在图3中,将左、右两分支双联轴的齿轮 $Z_5$ 和齿轮 $Z_6$ 固定,给锥齿轮分路系统施加一个输入转矩 $T_0$ ,可得分路系统的力矩平衡方程为

$$\begin{cases} T_0 - F_{1x}r_{b1} - T_1 = 0 \\ T_L - F_{1x}r_{b3} = 0 \\ T_R - F_{2x}r_{b4} = 0 \\ i_{13}T_0 - T_L - T_R = 0 \\ T_1 = k_{i1-2}(\theta_1 - \theta_2) \\ T_L = k_{i3-5}(\theta_3 - \theta_5) \\ T_R = k_{i4-6}(\theta_4 - \theta_6) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_1$ 、 $T_L$ 、 $T_R$ 分别为长轴、左分支双联轴和右分支双联轴上的转矩,单位Nm; $i_{13}$ 为锥齿轮副的传动比; $r_{bi}$ ( $i=2,3,4,5$ )为锥齿轮齿宽中点的基圆半径; $F_{1x}$ 、 $F_{2x}$ 分别为齿轮 $Z_2$ 和齿轮 $Z_4$ 、齿轮 $Z_1$ 和齿轮 $Z_3$ 之间的啮合力在 $x$ 方向的分力。

为方便计算啮合力沿坐标轴的分力,将锥齿轮副的啮合力分解成切向力、径向力和轴向力可表示为

$$\begin{cases} F_{1x} = F_1 a_1 \\ F_{1y} = F_1 a_2 \\ F_{1z} = F_1 a_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 分别为啮合力所需乘以的系数。 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 的具体表达式为

$$\begin{cases} a_1 = \cos\alpha\cos\beta_m \\ a_2 = \sin\alpha\sin\delta_0 + \cos\alpha\sin\beta_m\cos\delta_0 \\ a_3 = \sin\alpha\cos\delta_0 - \cos\alpha\sin\beta_m\sin\delta_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\delta_0$  为小锥齿轮分锥角。

齿轮中心因轴承弹性变形而产生位移,导致齿轮啮合侧隙的变化。取位移离开啮合线方向引起的侧隙改变量为“+”,反之为“-”,则锥齿轮安装误差和轴承弹性变形相对位移在啮合线上的综合侧隙改变量  $b_1$ 、 $b_2$  表示为

$$\begin{cases} b_1 = (x_4 - x_2 + \Delta E_1) a_1 + (y_4 - y_2 + \Delta P_1) a_2 + \\ (z_4 - z_2 + \Delta G_1) a_3 \\ b_2 = (x_5 - x_3 + \Delta E_2) a_1 + (y_3 - y_5 + \Delta P_2) a_2 + \\ (z_5 - z_3 + \Delta G_2) a_3 \end{cases} \quad (5)$$

啮合力  $F_1$ 、 $F_2$  与啮合刚度  $k_{n1}$ 、 $k_{n2}$  的关系表示为

$$\begin{cases} F_1 = k_{n1} (r_{12} \theta_2 - r_{14} \theta_4) a_1 - b_1 \\ F_2 = k_{n2} (r_{13} \theta_3 - r_{15} \theta_5) a_1 - b_2 \end{cases} \quad (6)$$

联立力矩平衡方程、齿轮受力平衡方程,建立含误差影响下的系统静力学平衡方程,可以求得锥齿轮传动分路系统左右两分支双联轴上的传递转矩  $T_L$ 、 $T_R$ ,用  $\Omega_L$ 、 $\Omega_R$  分别表示左、右两分支的均载系数, $\Omega_L$ 、 $\Omega_R$  的表达式为

$$\begin{cases} \Omega_L = \frac{2T_L}{T_L + T_R} \\ \Omega_R = \frac{2T_R}{T_L + T_R} \end{cases} \quad (7)$$

### 3 锥齿轮分路系统影响因素分析

基于以上计算方法,对直升机主减速器的锥齿轮分路系统进行了计算分析。以恒定的输入转矩,当支撑刚度、扭转刚度、啮合刚度等影响因素单独变化时,绘制出左、右两分支双联轴上的转矩和均载系数变化图。锥齿轮分路系统的基本参数如表 1 所示。

表 1 锥齿轮分路系统基本参数

参数	数值
输入转矩/(Nm)	4 881
锥齿轮模数/mm	3.17
主/从锥齿轮齿数	50/58
锥齿轮齿宽/mm	40
压力角/(°)	20
螺旋角/(°)	25
长轴支撑刚度/(N/m)	$8.0 \times 10^7$
双联轴支撑刚度/(N/m)	$7.0 \times 10^7$
长轴扭转刚度/(Nm/rad)	$8.0 \times 10^5$
双联轴扭转刚度/(Nm/rad)	$4.0 \times 10^5$
锥齿轮副啮合刚度/(N/m)	$8.0 \times 10^8$

### 3.1 支撑刚度对锥齿轮分路系统静力学均载特性的影响

锥齿轮分路系统的支撑刚度包含输入级长轴支撑刚度和双联轴支撑刚度。在分路系统其他基本参数不变的情况下,分别单独改变输入级长轴支撑刚度和双联轴支撑刚度,得到载荷分配与支撑刚度的变化和均载系数与支撑刚度的变化。

如图 6 所示,左分支双联轴的均载系数大于右分支双联轴上的均载系数,随着输入级长轴支撑刚度的增大,左分支双联轴上的均载系数逐渐增大,右分支双联轴上的均载系数逐渐减小,锥齿轮分路系统均载性能变差。

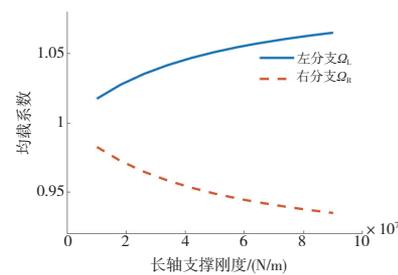


图 6 均载系数与长轴支撑刚度关系

如图 7 所示,随着输入级长轴支撑刚度的增大,齿轮  $Z_2$  和齿轮  $Z_3$  在  $x$  方向的齿轮中心径向位移较大,在  $z$  方向的齿轮中心径向位移变化不明显,负值表示在  $x$  方向的负方向。这表明随着输入级长轴支撑刚度增大,依靠大变形进行变形协调能力逐渐减弱,这使得锥齿轮分路系统的均载性能变差。

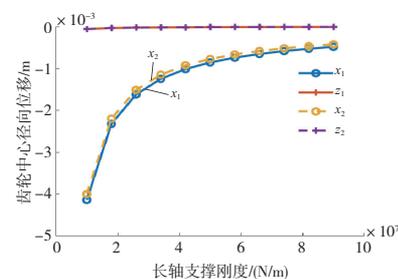


图 7 小齿轮中心径向位移

如图 8 所示,左分支双联轴的转矩大于右分支双联轴上的转矩,随着双联轴支撑刚度的增大,左分支双联轴上的转矩逐渐增大,右分支双联轴上的转矩逐渐减小,传动分路的均载系数逐渐增大,传动分路均载性能变差。

如图 9 所示,随着双联轴支撑刚度的增大,齿轮  $Z_4$  和齿轮  $Z_5$  的齿轮中心径向位移逐渐减小,变形协调能力变差,传动分路的均载性能也变差。

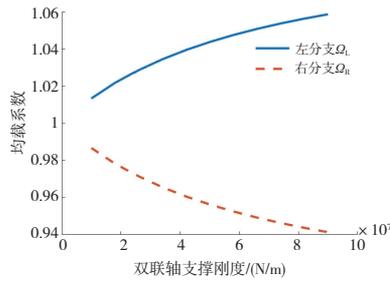


图 8 均载系数与双联轴支撑刚度关系

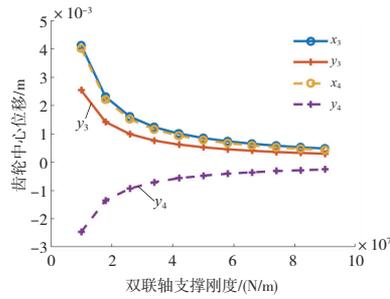


图 9 大齿轮中心径向位移

### 3.2 扭转刚度对锥齿轮分路系统静力学均载特性的影响

锥齿轮分路系统的扭转刚度包含输入级长轴扭转刚度和双联轴扭转刚度。保持其他参数不变,分别单独改变输入级长轴扭转刚度和双联轴扭转刚度,得到载荷分配与扭转刚度的变化和均载系数与扭转刚度的变化。

如图 10 所示,左分支双联轴的均载系数大于右分支双联轴上的均载系数,随着长轴扭转刚度的增大,左分支双联轴均载系数逐渐减小,右分支双联轴均载系数逐渐增大,传动分路均载性能逐渐变好。

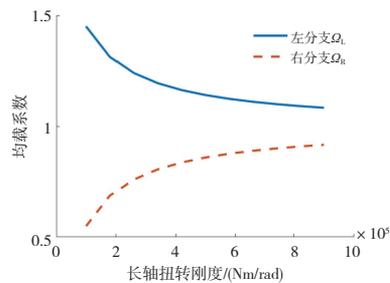


图 10 均载系数与长轴扭转刚度关系

如图 11 所示,随着长轴扭转刚度的增大,齿轮 Z2 和齿轮 Z3、齿轮 Z4 和齿轮 Z5 的转角差值减小,齿轮更同步,传动分路均载性能更好。

如图 12 所示,左分支双联轴的均载系数大于右分支双联轴上的均载系数,随着长轴扭转刚度的增大,左分支双联轴均载系数逐渐增大,右分支

双联轴均载系数逐渐减小,传动分路均载性能变差。

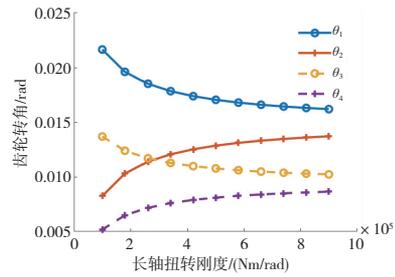


图 11 齿轮转角与长轴扭转刚度关系

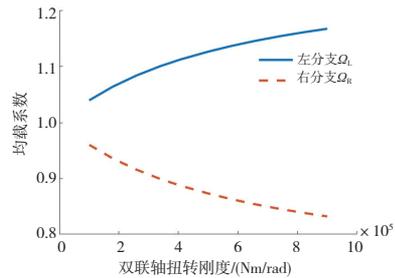


图 12 均载系数与双联轴扭转刚度关系

如图 13 所示,随着双联轴扭转刚度的增大,齿轮 Z2 和齿轮 Z3、齿轮 Z4 和齿轮 Z5 的转角差值增大,齿轮更加不同步,传动分路均载性能变差。

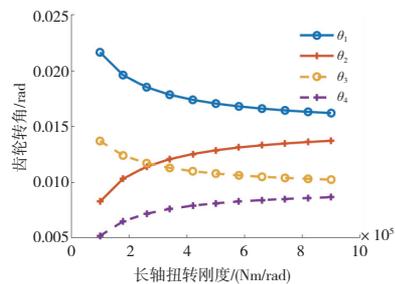


图 13 齿轮转角与双联轴扭转刚度关系

### 3.3 啮合刚度对锥齿轮分路系统静力学均载特性的影响

保持其他参数不变,单独改变弧齿锥齿轮啮合刚度,可得左右两分支均载系数随啮合刚度的关系。

如图 14 所示,左分支双联轴的均载系数大于右分支双联轴上的均载系数,随着啮合刚度的增大,左分支双联轴均载系数逐渐增大,右分支双联轴均载系数逐渐减小,传动分路均载性能变差。

如图 15 所示左、右两分支锥齿轮综合误差与啮合刚度的关系,随着啮合刚度的增大,虽然左、右两分支的综合误差均随之减小,但左、右两分支

综合误差的差值减小速度小于其各自综合误差的减小速度,轮齿变形协调能力减弱,锥齿轮分路系统更加不均载。

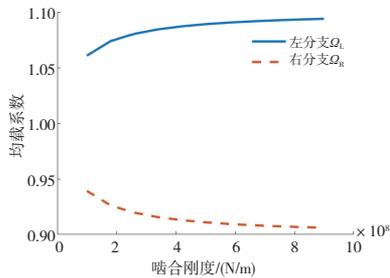


图 14 均载系数与啮合刚度的关系

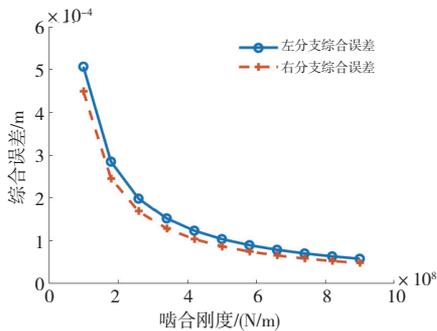


图 15 综合误差与啮合刚度的关系

### 3.4 安装误差刚度对锥齿轮分路系统静力学均载特性的影响

锥齿轮安装误差包含小齿轮轴向安装误差、大齿轮轴向安装误差、偏置距安装误差和轴交角误差。保持其他参数不变,单独改变弧齿锥齿轮一个安装误差,可得传动分路均载系数与各个安装误差的关系。由于安装误差较多,且左右两分支安装误差对传动分路均载的影响具有相似性,以下仅分析左分支传动分路安装误差对均载系数的影响。

如图 16 所示,随着左分支小齿轮(主动轮)安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴均载系数逐渐减小,右分支双联轴均载系数逐渐增大,在左分支小齿轮安装误差大概在  $300 \mu\text{m}$  时,传动分路两分支均载。随着右分支小齿轮(主动轮)安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴均载系数逐渐增大,右分支双联轴均载系数逐渐减小,在右分支小齿轮安装误差大概在  $-300 \mu\text{m}$  时,分路系统的两分支均载。

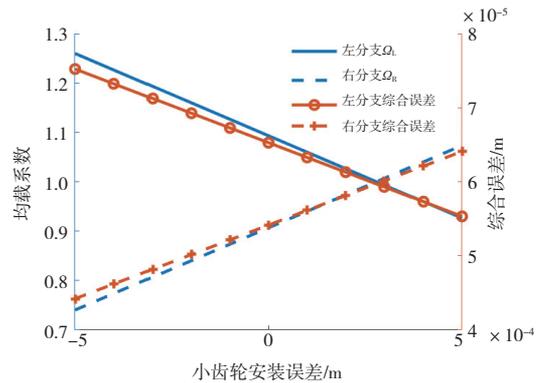


图 16 均载系数、综合误差与小齿轮安装误差关系

随着左分支小齿轮安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴综合误差逐渐减小,右分支双联轴综合误差逐渐增大,在左分支小齿轮安装误差大概在  $300 \mu\text{m}$  时,左右两分支的综合误差相等。综合误差是各种误差在锥齿轮啮合线方向的投影,是由齿轮转角、齿轮中心位移和安装误差综合决定的。综合误差相等时,左右两分支所承担的载荷相等,此时传动分路均载。安装误差在一定程度上可改变综合误差的大小,即通过调节误差,有可能实现传动分路静态均载。

如图 17 所示,随着左分支大齿轮(从动轮)安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴均载系数逐渐增大,右分支双联轴均载系数逐渐减小。随着右分支大齿轮(从动轮)安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴均载系数逐渐减小,右分支双联轴均载系数逐渐增大。

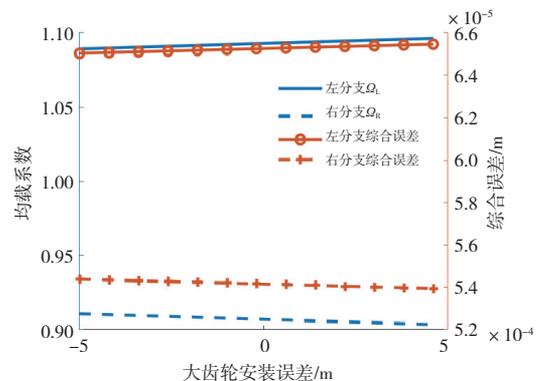


图 17 均载系数、综合误差与大齿轮安装误差关系

随着左分支小齿轮安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴综合误差逐渐增大,右分支双联轴综合误差逐渐减小。大齿轮安装误差对综合误差的改变程度要小于小齿轮,即大齿轮安装误差

对传动分路的影响小于小齿轮。

如图 18 所示,随着左分支齿轮偏置距安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴均载系数逐渐减小,右分支双联轴均载系数逐渐增大,在左分支小齿轮安装误差大概在  $200\ \mu\text{m}$  时,锥齿轮分路系统两分支均载。随着右分支齿轮偏置距安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴均载系数逐渐增大,右分支双联轴均载系数逐渐减小,在右分支小齿轮安装误差大概在  $-200\ \mu\text{m}$  时,传动分路两分支均载。

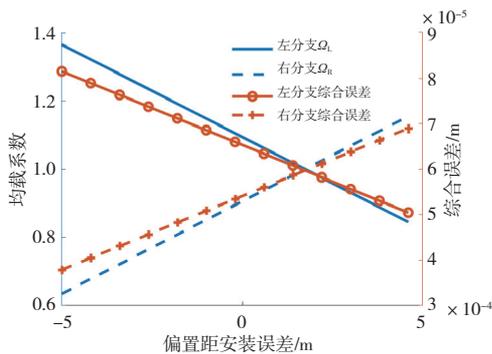


图 18 均载系数、综合误差与偏置距安装误差关系

如图 19 所示,随着左分支小齿轮安装误差由负到正逐渐增大,左分支双联轴综合误差逐渐减小,右分支双联轴综合误差逐渐增大,在左分支小齿轮安装误差大概在  $200\ \mu\text{m}$  时,左右两分支的综合误差相等。偏置距安装误差和小齿轮安装误差一样,在一定程度上可改变综合误差的大小,即通过调节偏置距安装误差,有可能实现锥齿轮分路系统静态均载。

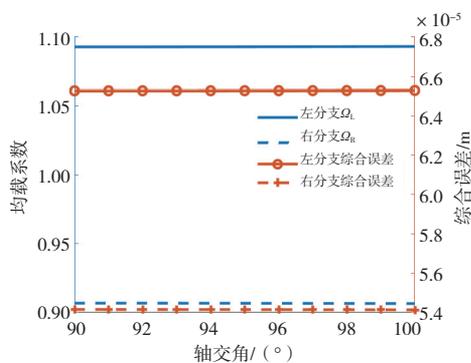


图 19 均载系数、综合误差与轴交角关系

随着左分支齿轮轴交角逐渐增大,左分支双联轴均载系数大于右分支,但两分支均载系数变化不明显。随着右分支齿轮轴交角逐渐增大,左分支双联轴均载系数大于右分支,但两分支均载系数变化也不明显。随着左分支齿轮轴交角逐渐

增大,两分支综合误差变化不明显,轴交角误差对该传动分路均载的影响较小。

## 4 结语

针对共轴双旋翼直升机主减速器弧齿锥齿轮传动分路,建立了静力学模型,推导了静力学平衡方程,得到了弧齿锥齿轮传动分路均载特性变化的规律,在考虑弧齿锥齿轮安装误差的情况下,分析了支撑刚度、扭转刚度和啮合刚度对锥齿轮分路系统均载特性的影响。主要结论如下。

1) 减小输入级长轴和双联轴的支撑刚度,左、右两分支的均载系数均逐渐接近于 1,锥齿轮分路系统的变形协调能力增强,静力学均载性能得到改善。

2) 增大输入级长轴的扭转刚度或减小双联轴的扭转刚度,左、右两分支的均载系数均逐渐接近于 1。左分支锥齿轮与右分支锥齿轮转动更加同步,锥齿轮分路系统静力学均载性能得到改善,且增大输入级长轴的扭转刚度对提高静力学均载性能更加显著。

3) 减小锥齿轮副的啮合刚度,有助于提高锥齿轮分路系统的静力学均载性能。

4) 通过调节小齿轮轴向安装误差和偏置距安装误差的大小来改变综合误差的值,当综合误差值相等时,左、右两分支均载;大齿轮安装误差和轴交角误差对锥齿轮分路系统均载的影响较小。

## 参考文献:

- [1] 吴希明. 高速直升机发展现状、趋势与对策[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(2): 173-179.
- [2] 倪德, 李苗苗, 胡志安, 等. 共轴反转直升机传动系统构型现状[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(2): 226-235.
- [3] 钱晓立. 齿轮传动分扭均载特性研究与优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [4] WHITE G. Design study of a split-torque helicopter transmission [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 1998, 212(2): 117-123.
- [5] BODAS A, KAHRAMAN A. Influence of carrier and gear manufacturing errors on the static load sharing behavior of planetary gear sets [J]. JSME International Journal Series C, 2004, 47(3): 908-915.
- [6] GMIRYA Y. Split torque gearbox for rotary wing aircraft with translational thrust system; US7413142 [P]. 2008-08-19.
- [7] GMIRYA Y. Multi-path rotary wing aircraft gearbox; US7918146 [P]. 2011-04-05.

- [8] YURIY GMIRYA, SHULIN HE, GREGORY BYZEL, et al. Load sharing test of the CH-53K split torque main gearbox [C]. The American Helicopter Society 65th Annual Forum. The American Helicopter Society International, Grapevine Texas, May 27-29, 2009: 977-986.
- [9] YURIY GMIRYA, MATTHEW ALULIS, PETER PALCIC, et al. Design and development of a modern transmission baseline configuration of the CH-53K drive system [C]. The American Helicopter Society 67th Annual Forum, The American Helicopter Society International, Virginia Beach, VA, May 3-5, 2011: 2323-2334.
- [10] VILÁN VILÁN J A, ROBLEDA A S, LAGO M L, et al. Feasible geometrical configurations for split torque gearboxes with idler pinions [J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(12): 121011.
- [11] TING Z. Research on Static Load Sharing of the Dual Power Path Gear Transmission [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, (3): 18-20.
- [12] 董皓, 方宗德, 杜进辅. 双路功率分流传动系统的静态均载特性分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(9): 94-99.
- [13] GARCIA T A. Torque split gearbox for rotary wing aircraft: US9278760 [P]. 2016-03-08.
- [14] MO S, MA S, JIN G G, et al. Research on multiple-split load sharing characteristics of 2-stage external meshing star gear system in consideration of displacement compatibility [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017(1): 1037479.
- [15] 冯正玖. 直升机圆柱齿轮分扭传动系统的均载特性影响因素分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [16] 鲍和云, 李丰波, 陆凤霞, 等. 某型变转速直升机传动系统动力学特性分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50(10): 2403-2416.
- [17] PLEGUEZUELOS M, SÁNCHEZ M B, PEDRERO J I. Control of transmission error of high contact ratio spur gears with symmetric profile modifications [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 149: 103839.
- [18] 丁景伟. 单输入直升机主减功率分流传动系统的动态特性分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [19] 叶佩佩. 共轴双旋翼两次功率分流传动系统的均载特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.

收稿日期: 2023-10-18

(上接第6页)

- [21] LIAO XT, JIA X Y, YAO Z Y, et al. Research on distribution grid line defect identification based on UAV visual fusion technology [C]//2024 Boao New Power System International Forum - Power System and New Energy Technology Innovation Forum (NPSIF). Qionghai, China: IEEE, 2024: 488-492.
- [22] FANG GZ, AN X, FANG Q, et al. Insulator defect detection based on YOLOv5s-KE [J]. Electronics, 2024, 13(17): 3483.
- [23] WANG T, ZHAI Y D, LI Y H, et al. Insulator defect detection based on ML-YOLOv5 algorithm [J]. Sensors, 2023, 24(1): 204.
- [24] MOSLEMI A, BRISKINA A, DANG Z, et al. A survey on knowledge distillation: recent advancements [J]. Machine Learning with Applications, 2024, 18: 100605.
- [25] BAI Y, SUN H T, ZHANG L L, et al. Hybrid CNN-transformer network for electricity theft detection in smart grids [J]. Sensors, 2023, 23(20): 8405.
- [26] SANTOS T, CUNHA T, DIAS A, et al. UAV visual and thermographic power line detection using deep learning [J]. Sensors, 2024, 24(17): 5678.
- [27] YANG J W, HE Y Q, MIAO Z L, et al. Digital real scene intelligent inspection platform for power distribution ring network based on artificial reality [C]//2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). Chongqing, China: IEEE, 2022: 1486-1489.
- [28] XIN L, TANG Z M, GAI W Q, et al. Vision-based autonomous landing for the UAV: a review [J]. Aerospace, 2022, 9(11): 634.
- [29] XIONG Y, TIAN H Y, TANG J N, et al. Task planning and optimization for multi-region multi-UAV cooperative inspection [J]. Drones, 2025, 9(11): 762.
- [30] ZHU Z P, DU Q W, WANG Z P, et al. A survey of multi-agent cross domain cooperative perception [J]. Electronics, 2022, 11(7): 1091.
- [31] NAGASUBRAMANIAM P, WU C, SUN Y Y, et al. Privacy-preserving live video analytics for drones via edge computing [J]. Applied Sciences, 2024, 14(22): 10254.
- [32] WANG X J, ZHAO Z H, YI L, et al. A survey on security of UAV swarm networks: attacks and countermeasures [J]. ACM Computing Surveys, 2025, 57(3): 1-37.
- [33] TANG D Z, TANG S Y, WANG Y L, et al. A global object-oriented dynamic network for low-altitude remote sensing object detection [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 19071.

收稿日期: 2025-12-08