

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.001

复合行星轮系均载特性仿真研究*

彭则明¹, 巫世晶^{1*}, 王晓笋¹, 李成洋¹, 李洪武², 潜波², 程燕²
(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 针对复合行星轮系均载特性的问题,以 Ravigneaux 式复合行星轮系统的典型结构为研究对象,基于 ADAMS 建立了系统的虚拟样机模型,通过对齿轮动态啮合力进行仿真分析,计算出了各啮合副的均载系数,分析了齿轮偏心误差、负载以及输入转速对于系统均载性能的影响。研究表明:增加偏心误差、提高转速会降低系统的均载性能;当行星轮偏心误差呈辐射状对称时,系统的均载性能会得到极大提高;太阳轮 s_1 偏心误差对于系统均载性能的影响较 s_2 偏心误差的影响更为明显;增加负载能提高系统的均载性能。

关键词: 复合行星轮系; 虚拟样机; 动态啮合力; 均载特性

中图分类号: TH132.41; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)02-157-07

Virtual prototype simulation of load sharing characteristics of compound planetary gear sets

PENG Ze-ming¹, WU Shi-jing¹, WANG Xiao-sun¹, LI Cheng-yang¹,
LI Hong-wu², QIAN Bo², CHENG Yan²

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to study the load sharing characteristics of compound planetary gear sets, a virtual prototype of the typical structure of Ravigneaux compound planetary gear train sets was set up based on ADAMS software. By the simulation analysis of the dynamic gear meshing force, the load sharing coefficients of the gear sets were calculated, and the impact of gear eccentric errors, load and input speed on the load sharing characteristic were analyzed. The research results show that the increase of gear eccentric error or the speed of rotation will exacerbate the uneven load of the system. By reasonable distributing the errors of the planet gears in radial symmetry, it will be able to reduce the effect of mesh errors of the planet gears. The load sharing coefficients of the system is more sensitive to the eccentric error of sun gear 1 than sun gear 2. Heavy load makes the load sharing performance better.

Key words: compound planetary gear train sets; virtual prototype; dynamic mesh force; load sharing characteristics

0 引 言

复合行星齿轮传动系统作为行星轮系的一种,与简单行星齿轮传动系统相比,具有结构紧凑、重量轻、大扭矩质量比以及可实现多种功率传递路径等优点,

被广泛应用于交通运输、航空航天以及能源开发领域中。在行星传动系统中,由于行星轮相对于太阳轮、行星架、齿圈等中心构件呈对称分布,轴承的径向力被相互抵消掉,轴承寿命得到了提高。各个行星轮间载荷分配的均匀性是发挥复合行星轮系这些优点的重要前提。然而在实际工作过程中,由于存在制造、

收稿日期: 2014-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375350)

作者简介: 彭则明(1988-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事机械系统动力学方面的研究. E-mail: pzm0302@gmail.com

通信联系人: 巫世晶,男,教授,博士生导师. E-mail: wsj@whu.edu.cn

安装误差等因素的影响,载荷在各路传动上的分配很不均匀,使复合行星轮系传动的性能受到影响。

当前对于复合行星轮系的研究多是针对动态特性,对于其均载特性的研究则较少,而针对均载特性的研究对象则主要为简单行星轮系。20世纪80年代,日本学者日高照晃^[1]用静力学的方法,分析了简单行星轮系各构件的误差对于系统均载特性的影响;1994年,KAHRAMAN^[2]在考虑制造、安装误差,轮齿分离以及时变啮合刚度影响的情况下,分析了行星轮系的动力学均载问题,提出了用动态均载系数来评价行星齿轮传动的均载效果;1999年,KAHRAMAN^[3]对行星齿轮传动装置进行了静力学分析和实验,在该模型中考虑了齿轮的位置度偏差和齿形误差;2000年袁茹等^[4]在考虑中心构件浮动情况下,研究了支承刚度对行星轮系均载特性的影响;2004年BODAS^[5]研究了行星架和齿轮的制造误差对行星齿轮静态均载特性的影响;SINGH^[6]以及LIGATA^[7]先后用平面有限元-接触模型和三维GSAM模型研究了行星架和齿轮制造误差对系统的静态不均载系数的影响;2008年SINGH^[8]和LIGATA^[9]通过实验研究了行星轮误差对系统均载的影响;周建星等^[10]研究了2K-H行星轮系太阳轮和内齿圈的浮动轨迹,误差对载荷分配系数的灵敏度以及零件各项误差对系统均载特性的影响;2009年陆俊华等^[11]建立2K-H行星轮系的动力学计算模型,分析了安装误差、制造误差对系统均载性能的影响,并利用试验验证了计算结果。

以上的这些研究都只是针对简单行星轮系,关于复合行星轮系均载特性的研究还未见报道。本研究以Ravigneaux式复合行星轮系为研究对象,基于ADAMS建立系统的虚拟样机模型,通过对齿轮动态啮合力进行仿真分析,计算出各啮合副的均载系数,研究齿轮偏心误差、负载以及输入转速对于系统均载性能的影响。

1 系统的基本结构

Ravigneaux式复合行星齿轮传动系统是以简单行星轮系的结构为基础,经过巧妙组合而成,其结构相较简单行星轮系而言更为复杂。

常见的Ravigneaux式复合行星轮系结构如图1所示。

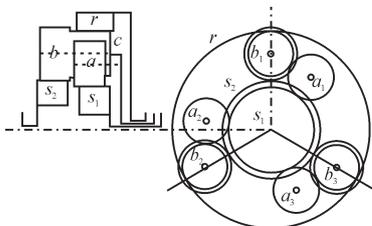


图1 Ravigneaux式复合行星齿轮传动系统

该系统由两个太阳轮 s_1 、 s_2 ,一个齿圈 r ,一个行星架 c 和 N 组行星轮组成。其中每组行星轮包括 a 、 b 两个不同的行星轮;其中行星轮 a 同时与行星轮 b 以及太阳轮 s_1 相啮合;行星轮 b 除了与行星轮 a 啮合外,还同时与太阳轮 s_2 以及齿圈 r 相啮合;以上所有的齿轮都由行星架 c 所支撑。该结构总共能实现 $P_4^3=24$ 种不同的功率流传递路径,选择不同的输入、输出以及固定构件就能实现不同的传递比。因此Ravigneaux式复合行星轮系常用于车辆传动系统中。笔者所研究对象的具体参数如表1所示。

表1 系统结构参数

	s_1	s_2	a_n	b_n	r	c
齿数	21	24	15	14	57	17
压力角/(°)				20		
模数/mm				2		
齿侧间隙/ μm				20		
行星轮组数/ N				3		
质量/kg	0.1	0.69	0.01	0.1	1.65	2.09
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	2.61×10^{-5}	1.63×10^{-3}	5.56×10^{-6}	1.09×10^{-5}	5.75×10^{-3}	3.99×10^{-3}

注:齿轮有变位

2 虚拟样机的建立

2.1 模型的建立

由于ADAMS所提供的实体造型功能并不适合于复杂结构的构建,一般情况下,研究人员都以三维CAD软件作为几何前处理器,将三维CAD软件中所建模型导入到ADAMS中进行分析。本研究采用同样基于parasolid内核的三维CAD软件Solidworks建立系统的三维实体模型。通过parasolid接口文件将模型导入ADAMS,导入后的虚拟样机模型如图2所示。



图2 Ravigneaux式复合行星轮系虚拟样机模型

本研究将各个构件重命名,选取构件的材料,ADAMS将自动生成构件的质量与转动惯量等信息。

2.2 约束的添加

本研究对Ravigneaux式复合行星齿轮传动系统中

的各个构件添加约束,有关情况如表2所示。通过改变旋转副旋转中心的位置,可以分别得到理想模型和含偏心误差的模型。

表2 对系统各构件添加的约束

编号	约束零件	约束类型
1	齿圈 r 与大地 ($ground$)	固定副
2	小太阳轮 s_1 与大地 ($ground$)	旋转副
3	大太阳轮 s_2 与大地 ($ground$)	旋转副
4	行星架 c 与大地 ($ground$)	旋转副
5	行星轮 a 与行星架 c	旋转副
6	行星轮 b 与行星架 c	旋转副

偏心误差如图3所示。偏心误差 E_{bn} 为偏心旋转中心 O_{Ebn} 与理想旋转中心 O_{bn} 之间的距离大小,正方向为从 O_{bn} 指向 O_{Ebn} ; E_{s1} 、 E_{s2} 是太阳轮 s_1 、 s_2 的偏心误差,正方向为从其几何中心指向 O_{b1} 。

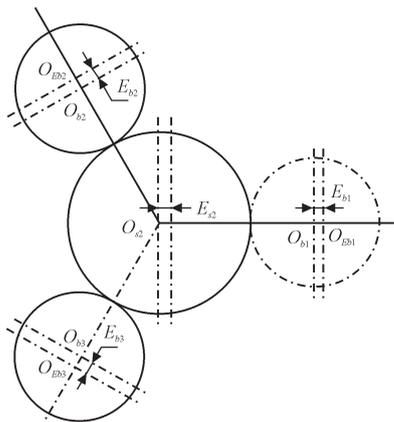


图3 齿轮偏心误差

2.3 接触的定义

在齿轮传动系统中,一对轮齿啮合刚度会随着啮合点位置的变化而变化,因而一对轮齿的啮合刚度是啮合位置的函数。轮齿啮合所引起的接触力可视为两个变曲率半径圆柱体撞击问题^[12]。在ADAMS中,可由CONTACT接触函数实现。该函数以Hertz弹性接触理论为基础,以啮合节点为计算位置。该位置将变曲率转化为定曲率,计算简便,且接触力大小与最大点差别不大,因此得以广泛采用^[13-15]。

在ADAMS中,接触力的定义为:

$$\begin{cases} \max[0, K(x_1 - x)^e - STEP(x, x_1 - d, C, x_1, 0)x] & x < x_1 \\ x \geq x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: K —接触刚度, x —碰撞过程中两物体的实际距离, d —穿透深度, C —阻尼系数, x_1 —实常数。

式(1)表示:当 $x \geq x_1$ 时,两物体不发生接触,其碰撞力值为零;当 $x < x_1$ 时,表示两物体发生碰撞,其碰撞力大小与刚度系数 K 、变形量 $x_1 - x$ 、碰撞力非线性指数项 e 、阻尼系数 C 和穿透深度 d 有关。

根据Hertz接触理论,齿面接触的法向力与变形的关系为:

$$P = K\delta^{1/3} \quad (2)$$

其中,接触刚度系数 K 取决于接触物体的材料与形状,其表达式可写为:

$$K = \frac{4}{3} \sqrt{RE^*} \quad (3)$$

式中: ρ_1 , ρ_2 —轮齿啮合点处的当量半径; $1/R = 1/\rho_1 + 1/\rho_2$ 。

对于直齿轮而言, $\rho = (1/2)mz \sin \alpha$, 其中, α —分度圆压力角。因此:

$$R = \frac{mz_1 z_2 \sin \alpha}{2(z_1 + z_2)} \quad (4)$$

E^* 的值可由下式获得:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (5)$$

式中: E_1 , E_2 —两个齿轮的弹性模量; μ_1 , μ_2 —两个齿轮材料的泊松比。

根据系统的结构参数,由式(2~5)可计算得到小太阳轮 s_1 与行星轮 a 、大太阳轮 s_2 与行星轮 b 、齿圈 r 与行星轮 b 、行星轮 a 与 b 啮合副的接触刚度系数分别为: $K_{s_1 a} = 8.2425 \times 10^9 \text{ N/m}^{3/2}$, $K_{s_2 b} = 8.7901 \times 10^9 \text{ N/m}^{3/2}$, $K_{rb} = 1.0083 \times 10^{10} \text{ N/m}^{3/2}$, $K_{ab} = 7.4984 \times 10^9 \text{ N/m}^{3/2}$ 。

根据经验,穿透深度取0.1 mm,阻尼系数取接触刚度大小的1%,非线性指数 e 取1.5。

3 动力学仿真

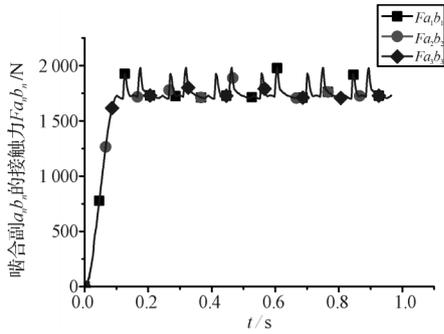
本研究基于上述建立的虚拟样机模型,通过太阳轮 s_2 输入,太阳轮 s_1 输出,分别仿真计算了12种不同工况情况下各啮合副间的动态啮合力。12种工况如表3所示。

表3 12种计算工况

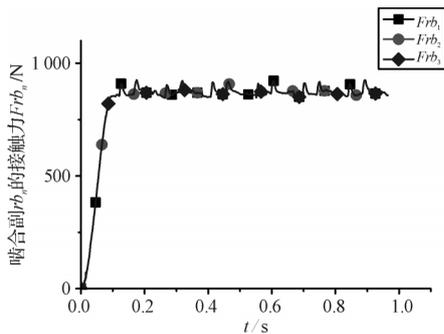
	E_{s1} / μm	E_{s2} / μm	E_{bn} / μm	负载 T_{s1} /($\text{N}\cdot\text{m}$)	转速 n_{s2} /($^\circ\cdot\text{s}^{-1}$)
工况1	0	0	0	100	180
工况2	0	0	$E_{b1}=20$	100	180
工况3	0	0	$E_{b1}=30$	100	180
工况4	0	0	$E_{b1}=40$	100	180
工况5	0	0	$E_{b1}=20$	50	180
工况6	0	0	$E_{b1}=20$	100	360
工况7	0	0	$E_{b1}=20$	100	720
工况8	0	0	$E_{b1}=20$	100	1 080
工况9	0	0	$E_{b1}=20$	150	180
工况10	0	0	$E_{b1}=E_{b2}=E_{b3}=20$	100	180
工况11	20	0	0	100	180
工况12	0	20	0	100	180

为了减小样机在运动初始阶段的冲击,本研究采用STEP函数使负载和转速分别在0.1 s内由0逐渐增加到仿真的最大值。

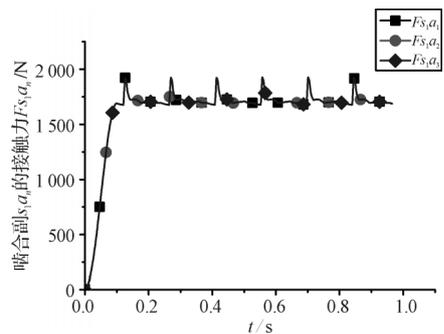
工况1条件下,系统是没有偏心误差的理想模型,由于结构参数原因使得各个啮合副的啮合相位角相同,因此各啮合副的接触力几乎完全重合,计算结果如图4所示。



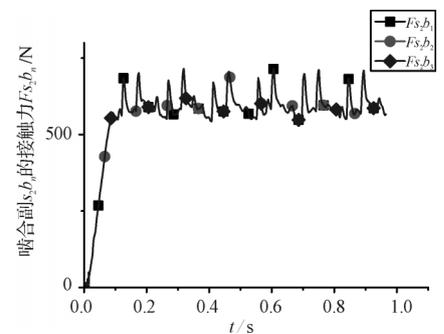
(a) 啮合副 $a_n b_n$



(b) 啮合副 $r b_n$



(c) 啮合副 $s_1 a_n$



(d) 啮合副 $s_2 b_n$

图4 啮合力(工况1)

仿真计算得到系统的输入输出转速如图5所示。

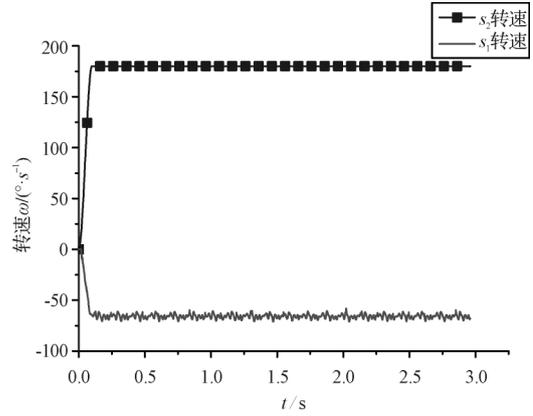


图5 输入输出转速(工况1)

根据传动系统结构可算出系统理论传动比:

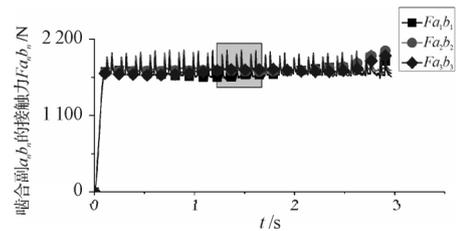
$$i_{s_2,s_1} = -\frac{(z_{bA} \cdot z_{s_2} + z_{bB} \cdot z_r) \cdot z_{s_1}}{(-z_{s_1} + z_r) \cdot z_{bA} \cdot z_{s_2}} = -\frac{145}{64} \quad (6)$$

其中, $z_{bA}=14, z_{bB}=17$ 。

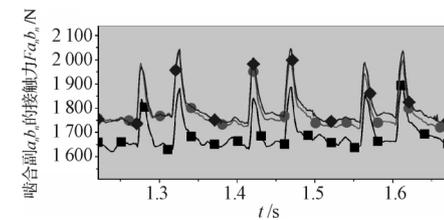
由此可见,仿真结果与理论计算值非常接近。

4 均载特性研究

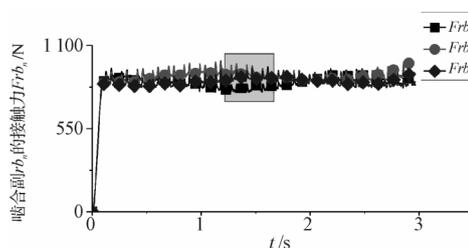
齿轮的误差会使得系统在运动过程中各对称分布啮合副间的接触力不相等,即出现载荷分配不均匀的现象。当行星轮 b_i 存在偏心误差时(工况2),各啮合副间的接触力如图6所示。



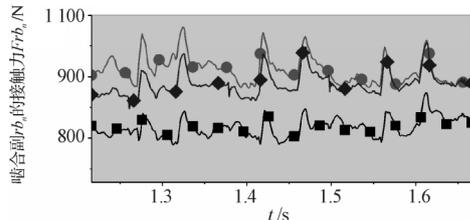
(a) 啮合副 $a_n b_n$ (整体图)



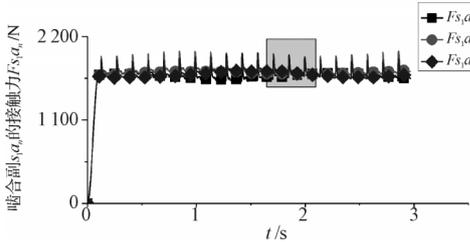
(b) 啮合副 $a_n b_n$ (局部放大图)



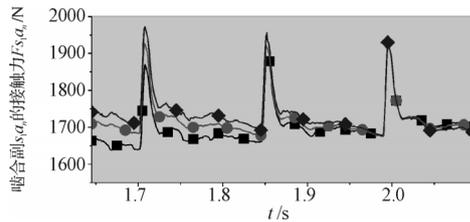
(c) 啮合副 $r b_n$ (整体图)



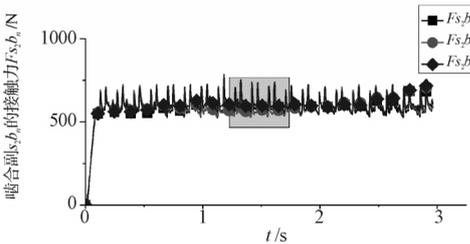
(d) 啮合副 $s_1 a_n$ (局部放大图)



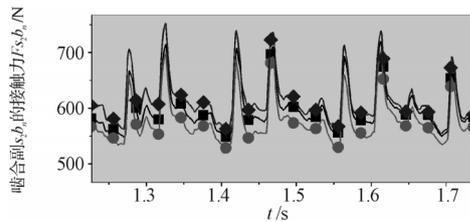
(e) 啮合副 $s_1 a_n$ (整体图)



(f) 啮合副 $s_2 a_n$ (局部放大图)



(g) 啮合副 $s_2 b_n$ (整体图)



(h) 啮合副 $s_2 b_n$ (局部放大图)

图6 啮合力(工况2)

行星齿轮传动系统载荷分配的均匀性用均载系数来表示,均载系数越大,则意味着传动系统载荷分配越不均匀。行星齿轮传动系统在一个啮合齿频周期内的均载系数定义为:

$$\begin{cases} b_{s_1 a_n} = \frac{N(F_{s_1 a_n})_{\max}}{\sum_{n=1}^N (F_{s_1 a_n})_{\max}} & b_{s_2 b_n} = \frac{N(F_{s_2 b_n})_{\max}}{\sum_{n=1}^N (F_{s_2 b_n})_{\max}} \\ b_{a_n b_n} = \frac{N(F_{a_n b_n})_{\max}}{\sum_{n=1}^N (F_{a_n b_n})_{\max}} & b_{r b_n} = \frac{N(F_{r b_n})_{\max}}{\sum_{n=1}^N (F_{r b_n})_{\max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: N —行星轮的组数。

而系统在整个运动周期中的均载系数则定义为各个啮合齿频周期中最大的均载系数:

$$\begin{cases} B_{s_1 a_n} = |b_{s_1 a_n} - 1|_{\max} + 1 & B_{s_2 b_n} = |b_{s_2 b_n} - 1|_{\max} + 1 \\ B_{a_n b_n} = |b_{a_n b_n} - 1|_{\max} + 1 & B_{r b_n} = |b_{r b_n} - 1|_{\max} + 1 \end{cases} \quad (8)$$

4.1 偏心误差对均载系数的影响

在不改变扭矩和转速的条件下,笔者通过改变不同齿轮均载误差的大小,计算各啮合副的均载系数,研究偏心误差对均载系数的影响。工况1、2、3、4、10、11、12的转速与扭矩保持不变,偏心误差对均载系数的影响如表4所示。

表4 偏心误差对均载系数的影响

	$B_{a_n b_n}$	$B_{r b_n}$	$B_{s_1 a_n}$	$B_{s_2 b_n}$
工况1	1.000 346	1.000 325	1.000 126	1.000 295
工况2	1.051 935	1.082 325	1.049 076	1.042 577
工况3	1.085 756	1.129 338	1.077 945	1.069 494
工况4	1.131 971	1.178 923	1.107 792	1.115 815
工况10	1.000 168	1.000 119	1.000 127	1.000 255
工况11	1.105 414	1.167 293	1.107 335	1.094 102
工况12	1.024 316	1.045 822	1.034 304	1.028 177

当 b_1 的偏心误差大小从0增加至40 μm 时,各啮合副的均载系数呈上升趋势,行星轮 b_1 偏心误差对均载系数的影响如图7所示。

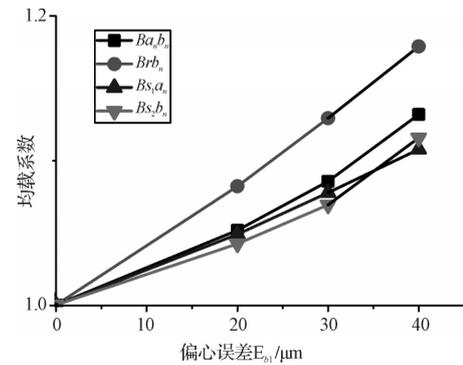


图7 行星轮 b_1 偏心误差对均载系数的影响(工况1、2、3、4)

当行星轮 b_1 、 b_2 、 b_3 都存在偏心误差,且呈辐射对称时(工况10),则各啮合副的均载系数会趋近于1,即系统处于“均载状态”。

对比工况11、12可以发现,在相同转速和扭矩条件下,太阳轮 s_1 偏心误差对于系统均载性能的影响较太阳轮 s_2 偏心误差的影响更为明显,有关情况如图8所示。

由此可以预测,对于本研究所研究的复合行星轮系,使太阳轮 s_1 可浮动会比太阳轮 s_2 可浮动更能改善系统的均载性能。

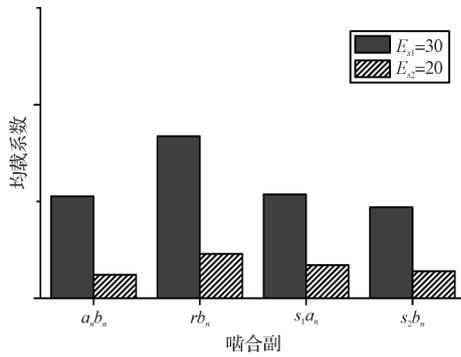


图 8 太阳轮偏心误差对均载系数的影响(工况 11、12)

4.2 负载对均载系数的影响

通过对比工况 5、工况 2 和工况 9 各啮合副的均载系数可以发现,当齿轮偏心误差、输入转速不变时,随着负载扭矩的增加,各啮合副的均载系数呈下降趋势。计算结果如表 5、图 9 所示。

表 5 负载对均载系数的影响

	Ba_1b_1	Brb_1	Bs_1a_1	Bs_2b_1
工况 5	1.086 137	1.129 091	1.084 668	1.070 323
工况 2	1.051 935	1.082 325	1.049 076	1.042 577
工况 9	1.038 494	1.060 253	1.034 275	1.032 795

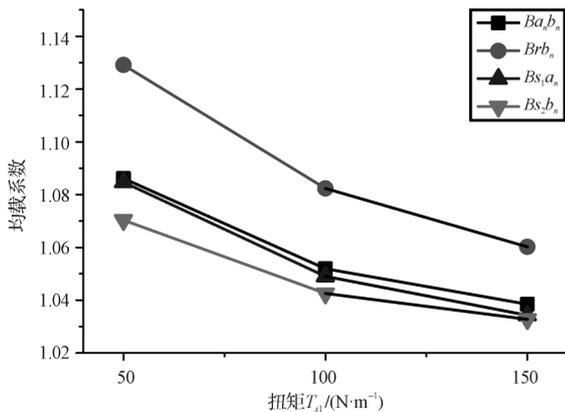


图 9 负载对均载系数的影响

4.3 转速对均载系数的影响

通过对比工况 2、工况 6、工况 7 和工况 8 各啮合副的均载系数可以发现,当齿轮偏心误差、输出扭矩不变时,随着输入转速的增加,各啮合副的均载系数呈上升趋势。计算结果如表 6、图 10 所示。

5 结束语

本研究以 Ravigneaux 式复合行星齿轮传动系统

表 6 转速对均载系数的影响

	Ba_1b_1	Brb_1	Bs_1a_1	Bs_2b_1
工况 2	1.051 935	1.082 325	1.049 076	1.042 577
工况 6	1.058 869	1.092 042	1.068 03	1.044 934
工况 7	1.074 479	1.129 018	1.071 579	1.069 197
工况 8	1.086 821	1.156 513	1.082 232	1.090 337

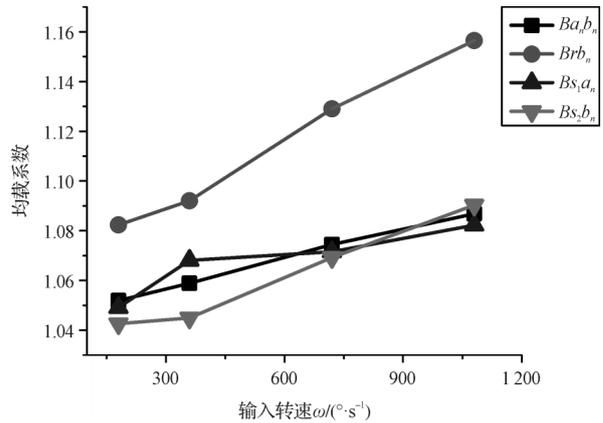


图 10 转速对均载系数的影响

的典型结构为研究对象,以三维 CAD 软件 Solidworks 与动力学分析软件 ADAMS 为平台,建立了 Ravigneaux 式复合行星齿轮传动系统的虚拟样机模型,验证了系统的传动比。通过对齿轮动态啮合力进行仿真分析,计算出各啮合副的均载系数,得出以下结论:

- (1) 偏心误差的增加会加剧系统各啮合副不均载的现象;
 - (2) 当行星轮偏心误差呈辐射状对称时,系统的均载性能可以得到极大提高,各啮合副的均载系数趋近于 1;
 - (3) 对于本研究所研究的 Ravigneaux 式复合行星齿轮传动系统结构,太阳轮 s_1 偏心误差对于系统均载性能的影响较太阳轮 s_2 偏心误差的影响更为明显,由此可以预测,使太阳轮 s_1 可浮动会比太阳轮 s_2 可浮动更能改善系统的均载性能;
 - (4) 增加负载会使得啮合副间载荷的分配变得均匀;
 - (5) 提高转速会增加系统载荷分配不均的趋势。
- 本研究的研究工作对复合行星轮系均载性能的优化提供了指导依据。

(下转第 174 页)

本文引用格式:

彭则明,巫世晶,王晓笋,等. 复合行星轮系均载特性仿真研究[J]. 机电工程,2015,32(2):157-162,174.
 PENG Ze-ming, WU Shi-jing, WANG Xiao-sun, et al. Virtual prototype simulation of load sharing characteristics of compound planetary gear sets[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 157-162, 174
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>