

文章编号: 1674-8085 (2023) 01-0079-06

基于 CAE 仿真的行星齿轮减速器行星齿轮载荷分布特性研究

*陈为欢^{1,2}, 曾建邦³

(1.江铃汽车股份有限公司产品开发总院, 江西, 南昌 330000; 2.华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西, 南昌 330000)

3. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西, 南昌 330000)

摘要: 研究一种高效精确求解行星齿轮系统, 在有误差情况下系统的不均载力学特性。应用有限元软件 ABAQUS 的 PYTHON 参数化设计语言, 对含有 5 个行星齿轮的新能源汽车行星齿轮减速器, 进行齿轮系统基于六面体网格单元的的参数化有限元建模; 利用非线性接触分析方法求解减速器系统在有零部件制造和装配误差情况下, 分析系统中行星齿轮的载荷分布特性, 包括误差大小对不均载的影响, 太阳轮输入载荷对不均载的影响。有限元分析结果与参考文献中的试验结果具有完全一致的结论, 从而证明了分析方法的正确性。所提供的方法可以方便求解行星齿轮传动系统的不均载系数, 对提高行星齿轮设备整机传动性能、寿命及新产品开发具有重要意义。

关键词: 行星齿轮系; 载荷特性; 位置误差; 参数化建模; 不均载系数

中图分类号: TH11

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1674-8085.2023.01.012

LOAD SHARING CHARACTERISTICS OF PLANETARY GEARS OF PLANETARY GEAR SETS BASED ON CAE SIMULATION

*CHEN Wei-huan^{1,2}, ZENG Jian-bang³

(1. Jiangling Motors Co, Ltd., Nanchang, Jiangxi 330000 China;

2. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330000, China;

3. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330000, China)

Abstract: Parametric modeling with PYTHON of ABAQUS of the planetary gear sets used in the transmission of the new energy vehicle was studied in this paper. Based on the previous modeling, the finite element analysis was used to predict the unequal planet load sharing behavior of the planetary gear sets, when the planets are subjected to position errors due to certain gear and carrier manufacturing errors and assembly variations. This study also made a research into the relationship between input sun torque and load sharing performance among the planets. The approach can serve as a significant guidance for designing to improve the performance of the planetary transmission device.

Key words: planetary gear sets; load sharing characteristic; position error; parametric modeling; load-sharing factor

收稿日期: 2022-01-08; 修改日期: 2022-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51206171); 载运工具与装备教育部重点实验室基金项目(KLCE2021-08); 江西省自然科学基金项目(20192BAB206033); 江西省创新创业大学生训练计划省级重点项目(202110404029)

作者简介: *陈为欢(1983-), 男, 福建泉州人, 工程师, 博士生, 主要从事结构仿真优化及深度学习研究(E-mail: b30156@163.com).

0 引言

行星齿轮减速器具有大功率、大传动和结构紧凑等诸多优点,使其广泛应用于地铁用的盾构机和汽车减速器中。然而,行星齿轮减速器却由于各个行星齿轮的受力不均使其性能大打折扣,文献[1-11]通过理论研究,文献[12]通过试验研究,说明了行星齿轮减速器系统由于行星架、行星齿轮、太阳轮、内齿圈、行星齿轮轴等零部件的制造和装配误差,造成行星齿轮减速器中的各个行星齿轮存在着受力不均。

文献[9-11]对含有三个到六个行星齿轮的行星减速器的行星齿轮的承载特性做了理论研究,Bodas and Kahraman^[9]应用齿轮系的二维弹性体模型从理论上证明了由于制造和装配误差导致行星齿轮不均载随着行星齿轮的个数的增加而增大,这三篇文章还指出,作用在行星齿轮上的不同类型的误差,最后都可以等效计算为该行星齿轮各个行星齿轮中心所构成的圆的切向方向上的有效位置误差,即切向综合误差。Singh^[10]也得出了相似的结论,指出行星齿轮中心的位置误差的方向非常关键,当误差方向在各个行星轮中心所构成的圆的切向方向上时,误差对行星齿轮的载荷分布影响最大,即对不均载影响最大,同时又指出,如果没有恰当的控制行星齿轮的切向综合误差,即使增加行星轮的个数,也不能有效地降低行星齿轮的载荷。Singh在文献[10]中还指出如果没有有效控制行星齿轮的切向综合误差,在含有 n ($n > 3$)个行星轮的减速器中,含行星齿轮个数较多的减速器系统中的某些行星轮的最大承载载荷会比含行星齿轮个数较少的减速器系统中的行星齿轮的最大受载载荷大。文献[12]在做了大量的试验的基础上,指出了含有三个到六个行星齿轮的减速器在行星齿轮有切向综合误差的情况下的行星齿轮的承载分布特性,指出了随着太阳轮输入扭矩的增加,各个行星齿轮之间的不均载将会

减少,并和文献[11]的理论研究的预测值相比较,结构证明二者有着很好的吻合。文献[13-15]基于理论模型研究了装配误差、太阳轮浮动及行星齿轮系统级间浮动、齿轮啮合相位跟不均载的关系。

本研究基于 ABAQUS 软件,通过参数化创建含有五个行星轮的新能源汽车行星齿轮减速器的有限元模型,精确地计算出行星齿轮减速器在有零部件制造和装配误差时行星齿轮之间载荷不均系数的数值,此外,并对太阳轮输入扭矩大小与行星齿轮之间的载荷分布关系做了研究。采用的有限元方法研究所得结论和文献[12]所做试验的结论完全一致(本研究的减速器类型和文献中的减速器类型完全一致,只是齿轮的具体参数不同),证明了有限元方法的正确性,对开发行星齿轮减速器具有较大的工程价值。

1 行星齿轮减速器建模

1.1 齿轮的端面建模

假定材料是各向同性的、连续、均匀的,设弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ Mpa}$,泊松比 $\mu = 0.3$,齿轮啮合时的齿面上的切向摩擦力为零。据机械原理,可确定渐开线在直角坐标系下的方程(见图1):

$$x_i = r_i * \cos\left(\frac{\varphi_i}{2}\right), y_i = r_i * \sin\left(\frac{\varphi_i}{2}\right).$$

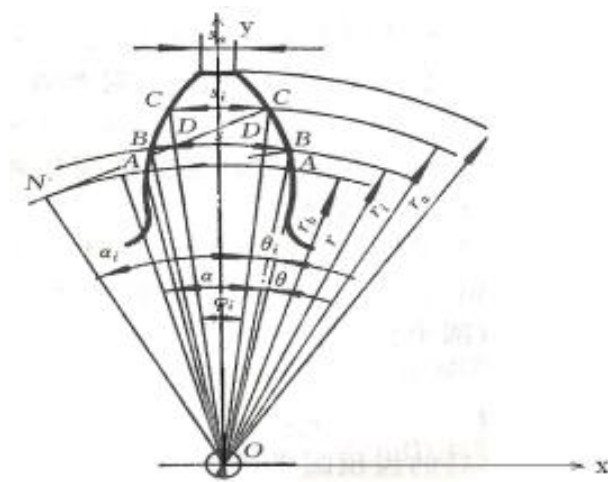


图1 齿轮相关参数

Fig.1 Variable of gear

PYTHON 是 ABAQUS 前处理编程语言,它简

单易懂，而且可以面向对象编程，基于它对行星齿轮系统进行参数化建模效率非常高。行星齿轮系统通过 PYTHON 参数化编程建模，可以方便通过修改程序中行星齿轮系统的特征参数来生成具有不同尺寸参数的有限元模型，从而可以对具有相似结构但尺寸参数不同的行星齿轮系统进行快速建模和力学特性分析。我们所述行星齿轮系的具体参数如表1，将表中参数定义为 PYTHON 变量，基于齿廓的直角坐标方程及 ABAQUS 中的 PYTHON 应用程序接口（API）命令及 PYTHON 的 for 循环命令，先创建齿廓上的点，然后将其连成渐开线曲线，先获得一个齿形，然后基于齿数变量对单个齿进行复制，获得整个齿轮端面；基于 ABAQUS 中的 PYTHON 应用程序接口（API）命令对齿轮的端面进行合理切割分块，用四节点单元对其进行网格划分。结果为图2所示的齿轮端面有限元模型。

表 1 齿轮系参数

Table 1 Parameters of gear set

参数	太阳轮	行星轮	内齿圈
齿数	21	23	69
模数 (mm)	7	7	7
压力角(deg)	20	20	20
螺旋角 (deg)	0	0	0
变位系数	0.5	0.65	0.65
齿宽 (mm)	105	105	105
齿顶高系数	1	1	1
齿根系数	0.25	0.25	0.25

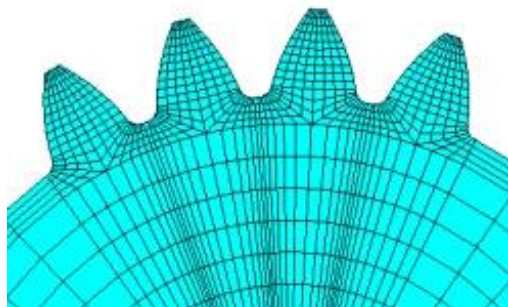


图 2 齿轮端面有限元模型

Fig.2 FEM of gear face

1.2 齿轮系的建模

用上述的编程方法创建太阳轮、行星轮和内

齿圈的齿轮端面模型，然后用六面体单元对端面网格进行拉伸，则可完成行星齿轮系统的参数化建模；用同样的方法建立行星齿轮轴的有限元模型。整个齿轮系的有限元模型如图3。



图 3 齿轮系有限元模型

Fig.3 FEM of gear set

2 切向综合误差和不均载关系研究

2.1 行星轮系的有限元边界处理

建立有限元模型之后，求解之前必须对有限元模型定义边界条件。为了方便和文献[12]的试验结果进行比较，将边界条件的设置与文献[12]试验相对应。

(1) 太阳轮约束

将太阳轮的边界条件全部加到轴孔的所有节点上，因为太阳轮是浮动的，约束太阳轮延其轴线方向的自由度，保留其它自由度。本研究假设太阳轮所受的驱动扭矩为逆时针方向，将输入扭矩转化为节点力施加到轴孔的所有节点上。

(2) 内齿圈约束

选定的内齿圈是固定的，所以取出内齿圈径向方向最外表面的所有节点并约束所有的自由度。

(3) 自由度约束

各个行星齿轮轴线方向约束自由度。

(4) 齿轮系接触定义

本文齿轮系的动力传递是通过接触算法来实现的，故定义太阳轮和行星轮、行星轮和内齿圈、行星齿轮轴孔和行星轮轴三对接触对。

(5) 行星齿轮轴约束

文献[9-10]指出,制造误差和装配误差最后都可以等效计算到行星齿轮内各个行星齿轮中心所构成的圆的切向方向的有效位置误差,即切向综合误差。本文针对行星齿轮 P1 存在切向综合误差(如图4所示),而其它的行星轮均处在理想的位置(与文献[12]试验对应),进行了行星齿轮间载荷分布特性分析。在前述模型的基础之上,创建五个不同边界条件的有限元模型:在有限元模型中,边界条件施加于行星齿轮轴上,取出行星齿轮 P1 轴的中心所有节点,约束 Y, Z 方向自由度, X 方向(即行星齿轮中心所在的圆的切向方向)分别施加-70、-35、0、35、70 μm 的切向综合误差(因为太阳轮逆时针转动,当 P1 轴在 X 方向正向移动的时候,使得 P1 先于其他行星轮受力,误差表示为正值,反之, X 负方向移动的时候表示 P1 落后于其它的行星齿轮受力,表示为负值);取出 P1 以外的所以行星齿轮轴,约束所有自由度。

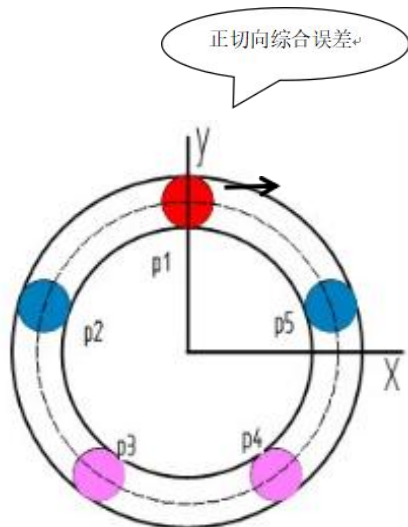


图4 行星齿轮切向误差示意图

Fig.4 Diagram of planet's position error

2.2 求解

接触分析是典型的非线性分析,打开大变形分析选择。为了提高收敛,加大子步,打开线性搜索。对行星齿轮 P1 轴的中心所有节点的切向综合误差值分别为-70、-35、0、35、70 μm 时的有限元模型进行求解,取出结果并进行分析。

3 结果分析

3.1 应力比的定义

本文将不均载以应力比的形式来表示。定义为应力比(S_{r-i})为减速器中行星齿轮 Pi(i 为行星齿轮的编号)在 P1 有切向综合误差时所受最大 von Mises 应力比 Pi 在 P1 切向综合误差为0时所受最大 von Mises 应力,即: $S_{r-i} = S_{peak-i} / S_{no\ minalak-i}$, S_{peak-i} 表示在行星齿轮 Pi 在 P1 有切向综合误差时的最大的 von Mises 应力, $S_{no\ minalak-i}$ 表示在行星齿轮 Pi 在 P1 切向综合误差为0时的最大的 von Mises 应力。当应力比等于1时,表示该行星齿轮所受的载荷刚好等于额定载荷,大于1时表示它所受载荷大于额定载荷,小于1表示所受载荷小于额定载荷。

本文对太阳轮输入扭矩分别为 $T_1=25\text{ kN.m}$ 和 $T_2=50\text{ kN.m}$ 时,减速器系统在行星齿轮 P1 有不同切向综合误差数值的情况下,行星齿轮的不均载进行分别求解。结果以应力比形式表示在表2中。

表2 行星齿轮的应力比

Table 2 Stress ratio of planets

扭矩	齿轮编号	切向综合误差(μm)				
		-70	-35	0	35	70
T1	P1	0.54	0.81	1.00	1.15	1.37
	P2	1.27	1.13	1.00	0.85	0.72
	P3	0.94	0.95	1.00	1.05	1.07
	P4	0.92	0.95	1.00	1.05	1.04
	P5	1.24	1.13	1.00	0.85	0.67
T2	P1	0.79	0.88	1.00	1.14	1.28
	P2	1.25	1.12	1.00	0.89	0.81
	P3	0.91	0.96	1.00	1.04	1.09
	P4	0.91	0.95	1.00	1.05	1.09
	P5	1.23	1.11	1.00	0.89	0.81

3.2 应力比分析

通过对应力比进行仔细分析,可以知道在 P1 的切向综合误差为正值时(其它行星齿轮无切向综合误差),行星齿轮的受力分布图(见图5),其中●表示受力增大很多,●表示受力稍约增大,●

表示受力减小很多。

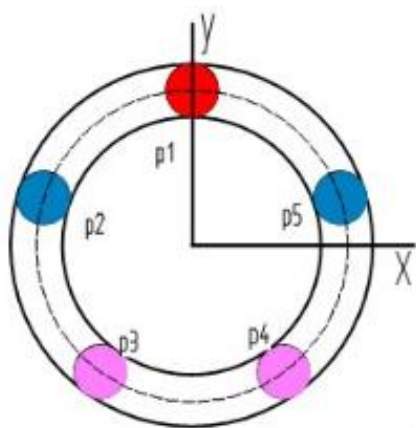


图5 行星齿轮承载分布图

Fig.5 Load distribution among planets

为了清晰描述行星齿轮的切向综合误差和均载的关系, 本文将太阳轮输入扭矩分别为 T1 和 T2 时的齿轮系统在特定切向综合误差时的各个行星齿轮的应力比绘制为曲线图(图6、图7), 可以清晰知道, 应力比随着太阳轮输入扭矩增大, 最大应力比下降, 即载荷大有利于均载。

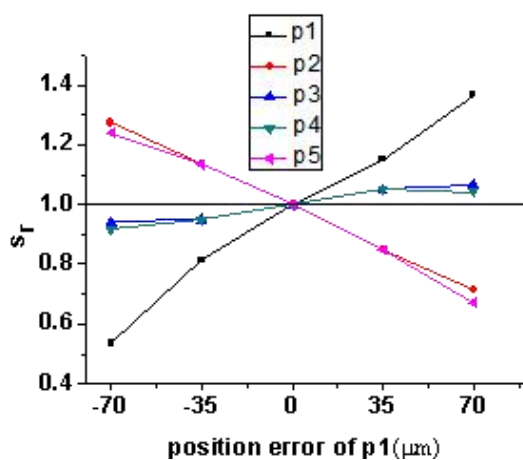


图6 太阳轮扭矩为 T1 的应力比曲线图

Fig.6 Stress ratio with T1 as input torque

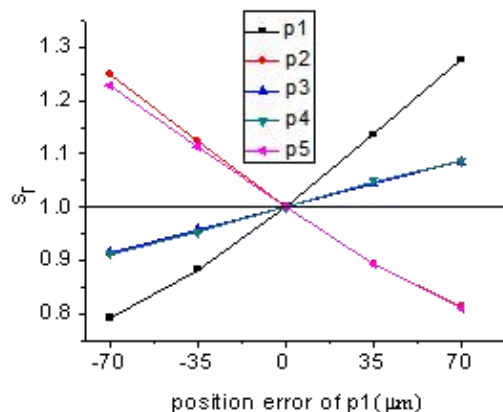


图7 太阳轮扭矩为 T2 的应力比曲线图

Fig.7 Stress ratio with T2 as input torque

4 结论

(1) 通过对新能源汽车行星齿轮减速器齿轮系(太阳轮、行星轮、内齿圈和轴)的参数化设计, 可以方便对齿轮特征参数的更改来实现不同尺寸的行星齿轮系统的实体建模和有限元模型建立。可以避免重复、枯燥的建模, 从而很大程度上提高有限元建模分析的速度, 提高工作效率。

(2) 当 P1 的切向误差为正值, P1 受力先于其他行星轮, 所受载荷大于额定载荷; 当 P1 的切向误差为负值时, P1 受力滞后其他行星轮, 所受的载荷小于额定的载荷。

(3) P1 在切向误差为正值时, P1 受载最大, 相邻的 P2 和 P5 受载最小而且小于额定载荷, P3 和 P4 大于额定载荷; 误差为负时, P1 受载最小。P2 和 P5 受载最大, P3 和 P4 小于额定载荷; P2 和 P5, P3 和 P4 受力分别相等。分布图见图5。

(4) 太阳轮输入扭矩越大, 越有利于均载。

(5) 通过本研究的方法可以方便的求解不均载系数, 从而可以在设计过程中, 控制系统的零部件公差带, 并对疲劳耐久寿命进行更加准确地预测。

参考文献:

- [1] Hidaka T, Terauchi Y. Distribution in planetary Gear[J]. Dynamic Behavior of Planetary Gear, 1976, 19: 690-698.
- [2] Hidaka T, Terauchi Y, Dohi K. On the relation between the run out errors and the motion of the center of sun gear in a stoekicht planetary Gear [J]. Dynamic Behavior of Planetary Gear, 1979, 22: 748-754.
- [3] Hidaka T, Terauchi Y, Nagamura K. Influence of the thickness of ring gear[J]. Dynamic Behavior of Planetary Gear, 1979, 22: 1142-1149.
- [4] Seager D L. Load sharing among planet gears[J]. SAE, 1970: 1-78.
- [5] Ma P, Botman M. Load Sharing in a planetary gear stage in the presence of gear errors and misalignments [J]. ASME, 1985, 54: 23-35.
- [6] Hayashi T, Li Y, Endou K. Measurement and some discussions on dynamic load sharing in planetary [J]. Gears Bull, 1986, 29: 2290-2297.
- [7] Kahraman A. Load sharing characteristics of planetary transmissions[J]. Mech Theory, 1994, 29: 1151-1165.
- [8] Kahraman A. Static load sharing characteristics of transmission planetary gear sets [J]. Modeland Experiment SAE, 1999: 01-1050.
- [9] Bodas A, Kahraman A. Influence of carrier and gear manufacturing errors on the static load sharing behavior of planetary gear sets [J]. ASME Int.J, 2004, 47, : 908-915.
- [10] Singh A. Application of a system level model to study the planetary load sharing behavior[J]. Mech, Des., 2005, 127: 469-476.
- [11] Singh A, Kahraman A, Ligata H. Internal gear strains and load sharing in planetary transmissions-model and Experiments [J]. Mech. Des., 2008, 130: 72-82.
- [12] Ligata H, Kahraman A, Singh A. An experimental study of the influence of manufacturing errorson the planetary gear stresses and planet load sharing [J]. Mech. Des., 2008, 130: 41-60.
- [13] Hu Y, Talbot D, Kahraman A, A load distribution model for planetary gear sets [J]. Mech. Des., 2018, 107(10): 41-60.
- [14] 陆崇山, 王晓笋, 冷晓鲁. 含级间相对浮动的两级行星传动系统均载特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 77-84.
- [15] 沈瑞, 扶碧波, 黄臻荣, 等. 含级间相对浮动的两级行星传动系统均载特性研究[J]. 机械强度, 2021, 41(4): 998-1001.