

# 基本构件浮动式行星轮系的振动特性

尹华魁<sup>1</sup>, 蒋玲莉<sup>2</sup>, 张锐<sup>2</sup>, 李学军<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**基本构件浮动是解决行星轮系均载问题的有效方法,基本构件浮动会改变整个行星轮系的模态,此类轮系设计过程中,需首先开展其固有特性研究,以规避共振区.研究了圆盘行星架浮动、太阳轮浮动、太阳轮与圆盘行星架同时浮动以及无构件浮动4种情况下行星轮系的振动特性,利用CATIA对行星轮系进行了参数化实体三维建模与干涉分析,通过有限元软件WORKBENCH进行了模态分析,分别提取了前10阶固有频率与振型,并对结果进行了分析和对比.论文研究可为基本构件浮动式行星轮系设计时共振区的规避提供参考和依据.

**关键词:**基本构件浮动;行星轮系;CATIA;WORKBENCH;模态分析

**中图分类号:**TH132.425 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)04-0039-05

## Vibration characteristic of basic building block floating planetary gear train

YIN Huakui<sup>1</sup>, JIANG Lingli<sup>2</sup>, ZHANG Rui<sup>2</sup>, LI Xuejun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Floating of the basic building blocks is the effective method to solve the problem that planetary gear train is uneven load, but it change the mode of planetary gear train. Firstly, it is necessary for this kind of gear train to research their inherent characteristics in design process. So the resonance region will be avoided. Therefore, vibration characteristics of planetary gear train in four conditions were researched, which included the disc planet carrier floating, the sun wheel floating, the sun wheel and disc of planet carrier floating and without floating. The three-dimensional modeling software CATIA was used to establish the parametric three-dimensional solid model of the planetary gear train. Then interference was analysed. Through the finite element software WORKBENCH, the modal analysis was carried on that of planetary gear train in four conditions, and respectively to extract the first ten steps natural frequency and vibration mode of this four conditions, and the results was analyzed and compared. The reference and basis was provided for avoiding resonance region of the basic building blocks floating planetary gear train in the design phase.

**Key words:** basic building blocks floating; planetary gear train; CATIA; WORKBENCH; modal analysis

行星轮系是一种先进的齿轮传动机构,具有结构紧凑、体积小、承载能力大、传动范围大及效率高等特点,因此被广泛应用于国防、冶金、起重运输、矿山、化工、轻纺、建筑工业等领域.在实际工作中,

行星轮系可能发生共振、变形,影响传动的平稳性和准确性,甚至造成整个传动系统的破坏,所以在设计行星传动系统时,不仅仅要使其满足刚度和强度条件,而且要防止其发生共振.

行星轮系的均载问题一直是齿轮制造领域中重要的研究课题,载荷不均易导致轮系过早失效,影响传动稳定性和使用寿命,基本构件浮动是解决行星轮系均载问题的有效方法<sup>[1-2]</sup>.基本构件的浮动会导致原行星轮系模式的改变,因此在基本构件浮动式行星轮系设计时,需首先开展其固有特性研究,以规避共振区.国外对行星轮系的振动特性研究比较多,如 Kahraman<sup>[3-4]</sup>和 Guo<sup>[5]</sup>建立了某类行星轮系纯扭转动力学模型分析了其固有特性,Dhouib<sup>[6]</sup>等建立了 Ravingneaux 型复合行星轮系平移-扭转耦合动力学模型研究了系统的固有特性;国内现有的研究一般只对单个齿轮的模式<sup>[7-9]</sup>和无构件浮动行星轮系的模式<sup>[10-12]</sup>进行了分析,对构件浮动式行星轮系的模式分析目前只有太阳轮浮动的相关研究<sup>[13]</sup>.圆盘行星架浮动及太阳轮与圆盘行星架同时浮动也是行星轮系均载问题解决的常用方法<sup>[1]</sup>.基于此,论文开展圆盘行星架浮动、太阳轮浮动、太阳轮与圆盘行星架同时浮动以及无构件浮动的行星轮系振动特性研究.

本研究以 2K-H 型的行星轮系为对象,利用三维建模软件 CATIA 进行了参数化实体三维建模、装配与干涉分析,再利用 WORKBENCH 进行了 4 种不同构件浮动条件下行星轮系的模式分析,分别提取了前 10 阶固有频率与振型,并进行了对比分析.全面了解基本构件浮动式行星轮系的固有特性,此项研究结果可以使基本构件浮动式的行星轮系在整个设计过程中避开这些区域以免产生共振,从而达到提高行星轮系的品质的目标,也为基本构件浮动式行星轮系的改进设计及浮动结构的选取提供参考和依据.

## 1 行星轮系 CATIA 参数化建模

CATIA 是法国达索开发的一款 CAD/CAE/CAM 一体化软件,位居世界 CAD/CAE/CAM 领域的领导地位,广泛应用于航空航天、汽车制造、造船、机械制造、电子/电器、等领域.由于行星轮系的齿轮有复杂的 3D 曲面,所以采用 CATIA 对齿轮进行参数化建模.

### 1.1 行星轮系中齿轮的几何参数

行星轮系中各个齿轮的几何参数,如表 1 所示.所有齿轮的齿顶高系数  $h_a^* = 1$ ,顶隙系数  $c^* = 0.25$ .

表 1 行星轮系中的齿轮几何参数

	齿数	模数/mm	压力角/(°)	齿宽/mm
太阳轮	92	2.5	20	12
行星轮	32	2.5	20	12
齿圈	28	2.5	20	12

## 1.2 行星轮系参数化建模

行星轮系中圆柱直齿轮参数化建模的具体步骤:

1) 在 CATIA 中利用知识库的  $f(x)$  把圆柱直齿轮的模数、齿数、压力角设置为可以改变的参数.

2) 利用已设的参数,根据圆柱直齿轮的几何尺寸公式,分别计算出其基圆、分度圆、齿根圆、齿顶圆半径,然后画出相应的圆.

3) 利用规则库 fog 建立  $x, y$  渐开线参数方程,绘制出渐开线.再创建一个镜像平面,镜像渐开线.

4) 根据齿廓的边界线,画出一个完整的齿形,然后拉伸为实体.

5) 将这个轮齿沿分度圆阵列,得到完整的圆柱直齿轮实体.

通过改变设置的参数就可以得到太阳轮、行星轮的三维实体模型.齿圈的模式化建模,与圆柱直齿轮的建模方法相似,这里就不介绍了.画出圆盘行星架后,再进行装配和干涉分析,得到完整行星轮系三维实体模型,如图 1 所示.

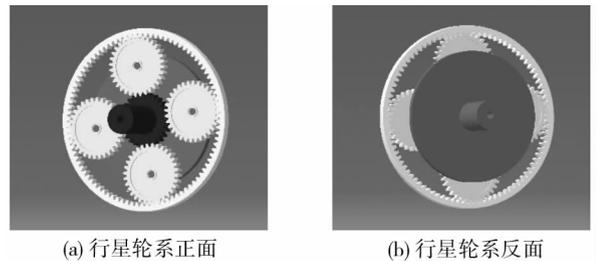


图 1 行星轮系三维实体模型

## 2 基本构件浮动式行星轮系的模式分析

由于在实际工作条件下,内齿圈通常是固定的,所以只研究圆盘行星架浮动,太阳轮浮动,太阳轮和圆盘行星架同时浮动这三种情况下的行星轮系的模式,然后再与无构件浮动的行星轮系模式结果进行对比分析.

### 2.1 有限元模式分析理论

对于一般多自由度的结构系统而言,任何运动皆可以由其自由振动的模式来合成<sup>[14]</sup>.有限元的模式分析就是建立模式模型并进行数值分析的过程.由于结构的阻尼对其模式频率及振型的影响很小,可以忽略,所以模式分析的实质就是求解具有有限个自由度的无阻尼及无外载荷状态下的运动方程的模式矢量.系统的无阻尼多自由度的自由振动系统方程<sup>[15]</sup>为

$$M\ddot{X} + KX = 0. \quad (1)$$

式中,  $M, K$  分别为结构的总质量矩阵和总刚度矩阵;  $\ddot{X}, X$  分别为结构的加速度向量和位移向量。

设整个结构作如下简谐振动:

$$X = \varphi_i \cos(\omega_i t). \quad (2)$$

式中,  $\varphi_i$  为结构第  $i$  阶振型;  $\omega_i$  为结构第  $i$  阶模态的固有频率,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

式(2)代入式(1)中可得:

$$(K - \omega_i^2 M) = 0. \quad (3)$$

然后再根据(3)式就可以求出整个结构的固有频率及其相应的振型。

## 2.2 实体模型的导入及接触设置

将 CATIA 建好的三维实体模型数据转换为 igs 的格式, 然后导入 WORKBENCH, 如图 2 所示。它会自动识别太阳轮与行星轮、行星轮与圆盘行星架之间的接触, 且默认为绑定接触。由于模态分析是纯粹的线性分析, 所以可供选择的线性接触只有绑定和不分离 2 种。绑定接触是不允许面或线间有相对滑动或分离; 不分离接触不允许接触区域的面分离, 但是沿着接触面可以有小的无摩擦滑动。所以选择不分离接触, 更符合实际情况。

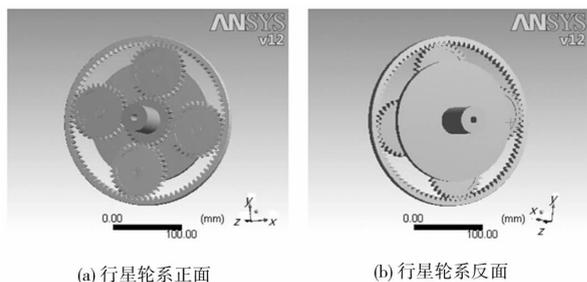


图 2 导入 WORKBENCH 后的三维实体模型

## 2.3 模型材料属性的设置

在 Engineering Data 里面按表 2 设置各个部件材料的属性

表 2 各个部件的材料属性

	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	泊松比	弹性模量/Pa
太阳轮	7 910	0.27	2.02 × 10 <sup>11</sup>
行星轮	7 910	0.27	2.02 × 10 <sup>11</sup>
齿圈	7 850	0.28	2.12 × 10 <sup>11</sup>
圆盘行星架	7 850	0.28	2.12 × 10 <sup>11</sup>

## 2.4 模型的网格划分

材料属性设置好后, 再对整个行星轮系划分网格。在本文采用自由网格划分, 得到 167 120 个单元, 280 566 个节点。网格划分后的模型如图 3 所示。

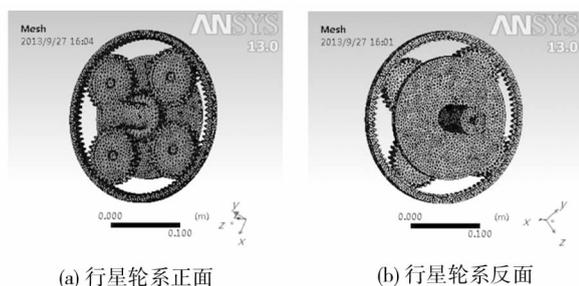


图 3 划分网格后的模型

## 2.5 对模型施加自由度约束

对行星轮系做模态分析, 不考虑预应力, 所以只需根据 4 种情况下行星轮系的实际工作条件, 在 WORKBENCH 里面分别对太阳轮、行星轮、内齿圈、圆盘行星架施加相应的约束即可。

1) 无构件浮动的行星轮系自由度约束施加情况

①内齿圈约束: 由于内齿圈在实际工作中是固定不动的, 所以在内齿圈的外表圆柱面上添加 Fixed Support, 就约束了外表圆柱面上节点的所有自由度。

②太阳轮约束: 由于太阳轮是动力输入齿轮, 具有转动自由度, 所以在太阳轮中心孔添加 Cylindrical Support, 并设置切向为 Free, 轴向以及径向为 Fixed, 使太阳轮具有转动自由度。

③行星轮约束: 由于行星轮具有绕自身轴线的自转和绕太阳轮的公转, 所以在行星轮中心孔添加 Cylindrical Support, 并设置轴向为 Fixed, 切向及径向设置为 Free。

④圆盘行星架约束: 由于圆盘行星架与行星轮是通过固定在圆盘行星架的小轴连接的, 所以在 4 个小轴的圆柱外表面都添加 Cylindrical Support, 并设置轴向为 Fixed, 切向及径向为 Free。又因为圆盘行星架本身具有转动自由度, 所以在圆盘行星架的中心孔添加 Cylindrical Support, 并设置切向为 Free, 径向及轴向为 Fixed。

2) 基本构件浮动式行星轮系自由度约束施加情况

①行星架浮动: 只需把圆盘行星架的径向约束 Radial 设置为 Free, 其他构件自由度约束与无构件浮动的行星轮系一样。

②太阳轮浮动: 只需把太阳轮的径向约束 Radial 设置为 Free, 其他构件自由度约束与无构件浮动的行星轮系一样。

③太阳轮和行星架同时浮动: 只需把圆盘行星架和太阳轮的径向约束 Radial 均设置为 Free。其他

构件自由度约束与无构件浮动的行星轮系一样。

## 2.6 求解

在添加好约束后,然后设置模态的提取方法为子空间法。高阶固有频率和振型对系统的影响很小,可以忽略不计,通常取5~10阶,精度就已足够,再考虑到实际情况和计算时间,这里设置求解

的模态阶数为10阶。分别对圆盘行星架浮动、太阳轮浮动、太阳轮和圆盘行星架同时浮动、无构件浮动4种情况下的行星轮系有限元模型求解。4种情况下的前10阶固有频率见表3及对比结果如图4所示。限于篇幅本文只给出了4种情况的第1阶、第3阶和第8阶振型分别如图5、图6和图7所示。

表3 4种情况下行星轮系的前10阶固有频率

参数	频率/Hz									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
圆盘行星架浮动	1 711.6	2 663.7	2 694.7	2 695.5	3 301.5	3 305.0	3 519.0	3 562.4	3 579.9	3 580.4
太阳轮浮动	1 711.6	2 568.3	2 573.1	2 668.2	3 254.1	3 259.6	3 519.0	3 561.0	3 578.1	3 578.2
太阳轮和圆盘行星架同时浮动	1 711.6	2 286.7	2 288.8	2 663.7	2 755.6	2 758.4	3 231.9	3 235.6	3 519.0	3 560.9
无构件浮动	1 711.6	2 668.2	3 257.6	3 263.0	3 519.0	3 305.0	3 519.0	3 562.4	3 579.9	3 580.4

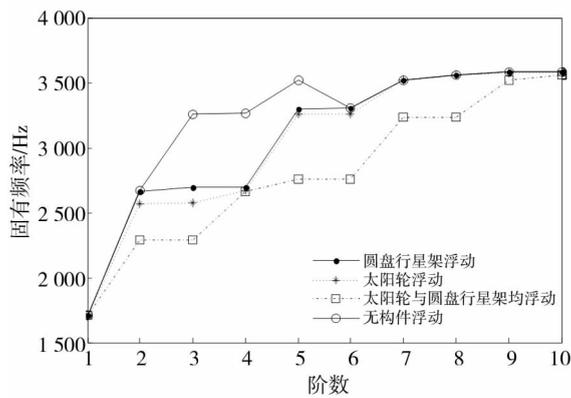


图4 4种情况的固有频率折线对比图

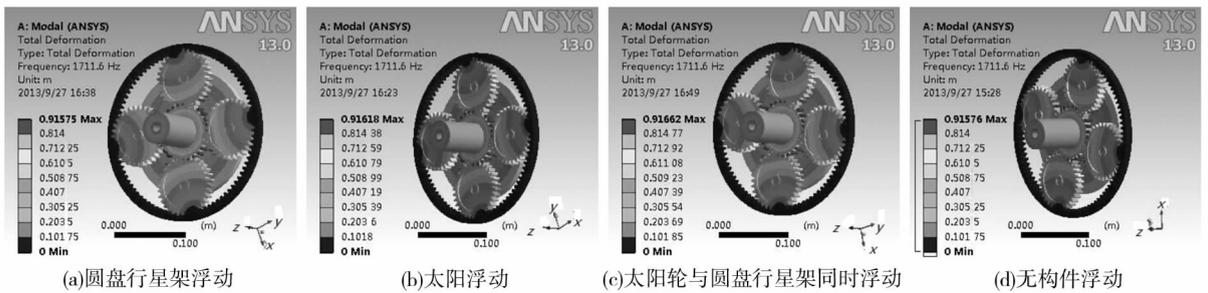


图5 4种情况的第1阶振型

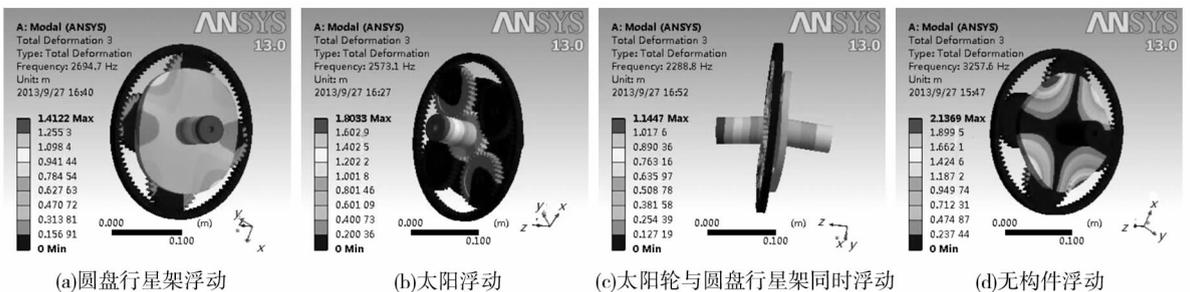


图6 4种情况的第3阶振型

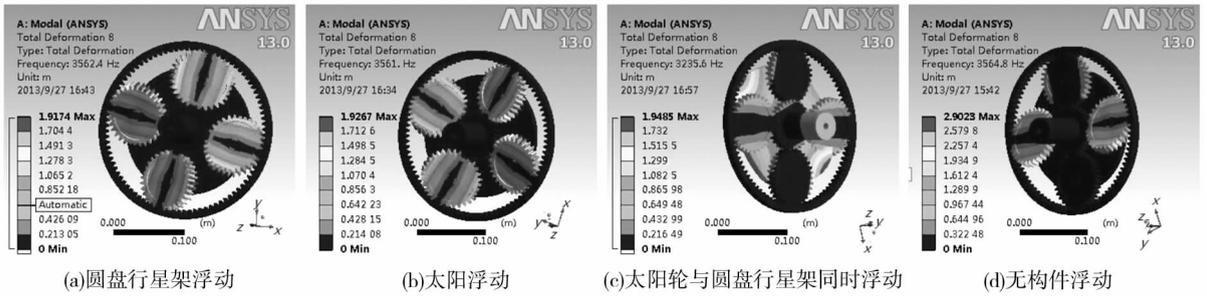


图7 4种情况的第8阶振型

### 2.7 结果分析

从图5、图6、图7可以看出4种情况下的行星轮系前10阶的振型主要是太阳轮、行星轮、圆盘行星架这三个基本构件的扭转和摆动振动,内齿圈相对来说振动较小。

从表3、图4和图5可以看出4种情况下的第1阶的固有频率始终不变,振型也几乎是一样的,说明基本构件的浮动对第1阶模态几乎没有影响。但整体上,有构件浮动的行星轮系的固有频率的比无构件浮动的固有频率低,在相同阶数下,行星轮系固有频率由大到小的顺序是无浮动、圆盘行星架浮动、太阳轮浮动、太阳轮和圆盘行星架同时浮动。在实际应用中,为了避免发生共振,这四种情况下的行星轮系要选择好各自适用的转速条件。

从图6和图7可以看出,在相同阶数的情况下有构件浮动的行星轮系的振动比无构件浮动的行星轮系要明显大一些,因此,根据多自由度系统的自由振动是n个固有模态振动的线性组合的原理,可知基本构件浮动式行星轮系一旦发生共振,振动会很大,从而破坏性强。

### 3 结论

利用三维建模软件CATIA对行星轮系进行参数化实体建模,经数据转换后导入有限元软件WORKBENCH中,通过模态分析来确定行星轮系的频率响应和模态,分别计算出4种情况下的前10阶的固有频率和相应的振型,从而得到固有频率的分布状态以及对应的振型,可以在设计这4种情况下行星轮系的过程中避开各自的相应的频率区域,以免发生共振,提高了行星轮系的品质。研究发现,有构件浮动的行星轮系的固有频率(除开第1阶)整体上比无构件浮动的固有频率低,在相同阶数下,行星轮系固有频率的由大到小的顺序是无浮动、圆盘行星架浮动、太阳轮浮动、太阳轮和圆盘行星架同时浮动,在实际应用中,为了避免发生共振,这4种情况下的行星轮系应选择好各自的适用转速条件。论文研究对基本构件浮动式行星轮系的改进设计和浮动构件的选择有很好的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 田磊. 行星传动的均载分析与疲劳寿命预测[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [2] 朱龙英. 星形齿轮传动的均载研究[J]. 研究探讨, 2003(7): 43-45.
- [3] Kahraman A. Natural modes of planetary gear trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 173(1): 125-130.
- [4] Kahraman A. Free torsional vibration characteristics of compound planetary gear sets[J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(8): 953-971.
- [5] Guo Y C, Parker R G. Purely rotational model and vibration modes of compound planetary gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(3): 365-377.
- [6] Dhoubi S, Hbaieb R, Chaari F, et al. Free vibration characteristics of compound planetary gear train sets[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C - Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222(8): 1389-1401.
- [7] 张媛, 冷崇杰, 王晶. 行星齿轮减速器内齿圈模态分析[J]. 食品与机械, 2010, 26(1): 110-112.
- [8] 叶友东, 周哲波. 基于ANSYS直齿圆柱齿轮有限元模态分析[J]. 机械传动, 2006, 30(5): 63-65.
- [9] 宋凯健, 代星军. 采煤机截部行星机构行星轮模态分析[J]. 煤矿机械, 2013, 34(1): 109-111.
- [10] Bu Z H, Liu G, Wu L. Modal analyses of herringbone planetary gear train with journal bearings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 54(1): 99-115.
- [11] 卜忠红, 刘更, 吴立言. 滑动轴承支承人字齿轮行星传动固有特性分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 80-88.
- [12] 王珺, 郭语. 基于ANSYS的行星轮系模态分析方法[J]. 机械制造与研究, 2010, 39(5): 21-22, 25.
- [13] 陈俊峰, 刘晓辉, 谭长均. 行星传动系统的振动特性研究[J]. 机械传动, 2012, 36(7): 35-37, 71.
- [14] 曹妍妍. 有限元模态分析理论及其应用[J]. 机械工程与自动化, 2007(1): 73-74.
- [15] 孙妍. 基于有限元法的直齿圆柱齿轮振动模态分析[J]. 机械研究与应用, 2012(5): 10-11.