

# 两级行星齿轮断齿故障的动态特性分析

陈宝庆,叶福民

(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:**以风电齿轮箱两级行星齿轮传动系统为研究对象,运用 ADAMS 软件建立系统的动力学模型,比较了第一级行星齿轮系统在健康状态下和太阳轮、行星轮、内齿圈分别发生故障时系统的动态响应以及断齿故障下的太阳轮啮合力的频域特性。结果表明,随着断齿程度的增加,啮合力的幅值明显增加,且太阳轮啮合力频域响应的倍频幅值会增大并伴随着低频区边频带越来越密集,第一级太阳轮断齿故障对第二级齿轮传动影响不明显。

**关键词:**风力发电;齿轮箱;两级行星齿轮传动系统;动力学;断齿

中图分类号:TH132.425 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2019)06-0051-04

## Dynamic Characteristic Analysis of Two-stage Planetary Gear with Broken Tooth Fault

CHEN Baoqing, YE Fumin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** This paper takes the two-stage planetary gear system of wind turbine gearbox as object of study, establishes the dynamic simulation model of gear transmission system by ADAMS and compares the dynamic response of the first stage planetary gear system in normal operation condition with that in broken teeth fault of sun gear, planetary gear and ring gear and the frequency domain characteristics of the sun gear meshing force under the broken tooth fault. The results show with the damage increase, the meshing force increases obviously, and the frequency multiplication of the meshing force of the sun gear in frequency domain increase and the mesh force side bands in the low frequency area become intensive, the first stage sun gear broken tooth fault has no obvious effect on the second stage gear.

**Keywords:** wind power generation; gear box; two-stage planetary gear system; dynamics; broken tooth

## 0 引言

行星齿轮因其体积小、结构紧凑、传动比大以及效率高优点被广泛应用于风力发电机齿轮箱。风力机齿轮箱作为风力发电机组的关键部件,其可靠性的高低以及动力学特性的优劣直接决定着风力发电机能否正常工作<sup>[1]</sup>。根据对风力发电机的故障统计显示,齿轮箱的故障占到大约 60%,而齿轮箱故障中大约 54%是行星齿轮传动引起的故障<sup>[2]</sup>,因此很有必要对两级行星齿轮传动系统故障下的动态特性进行分析研究。

近几年,国内外很多学者对齿轮正常以及故障状态下的动态特性进行了研究<sup>[3-8]</sup>,但没有同时考虑多级行星齿轮传动系统的第一级行星齿轮系太阳轮、行星轮、内齿圈分别发生故障时系统的动态响应以及各级之间故障存在时的影响关系。

本文采用虚拟样机技术,建立好动力学模型并进行动力学仿真,得到了系统分别在太阳轮、行星轮、内齿圈轮齿故障时的动态特性,为后续的齿轮故障检测诊断提供了参考。

## 1 风电齿轮箱两级行星齿轮传动系统

机构由两级行星齿轮系组成。一级、二级行星轮系均由 1 个太阳轮、3 个行星轮和 1 个内齿圈组成,其结构简图如图 1 所示。

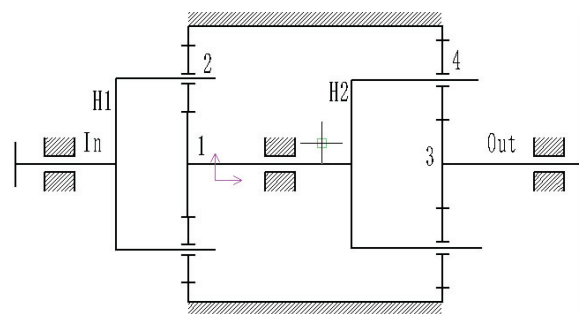


图 1 两级行星齿轮传动系统结构简图

系统工作时,各级内齿圈均固定,动力首先由第一级行星架 H1 输入,然后通过均匀分布的 3 个行星轮传递给

该级太阳轮,再由太阳轮通过与一级太阳轮连接的轴联接传递至下一级的行星架 H2,最后经与第二级的太阳轮相连的输出轴输出转矩。

应用 UG 软件建立三维模型<sup>[9]</sup>,其中齿轮的主要参数如表 1 所示(括号外为一级齿轮系参数,括号内为二级齿轮系参数)。

表 1 两级行星齿轮传动系统齿轮参数

齿轮名称	齿数 $z$	压力角 $\alpha/(\circ)$	齿宽 $b/\text{mm}$	模数 $m$
太阳轮	25(31)	20	330(130)	14(9)
行星轮	32(50)	20	330(130)	14(9)
内齿圈	89(131)	20	330(130)	14(9)

## 2 动力学模型的建立

### 2.1 动力学模型的参数设置

1) 约束的设置。两级行星齿轮传动系统共需要添加运动副 12 个,每一级添加 6 个,即:内齿圈对大地的 1 个固定副,太阳轮和行星架相对于内齿圈的 2 个旋转副,行星齿轮相对于行星架的 3 个旋转副。

2) 接触力中参数的设置。设置接触刚度、阻尼系数、力指数、最大穿透深度等参数。

3) 模型驱动的设置

由于行星架为输入动力的一端,因此行星架施加驱动。设置转速为  $1700^\circ/\text{s}$ ,高速级输出轴负载转矩为  $7587\text{ N}\cdot\text{m}$ ,求解器的仿真时间设置为  $t=0.1\text{ s}$ ,仿真步数为 1 000。由于系统的转速及负载出现突变会干扰仿真结果,因而驱动和负载均采用渐进函数的函数施加,用 `step(time,0,0,0.05,1700d)` 给齿轮箱添加缓慢增大的驱动,使用 `step(time,0,0,0.05,7587000)` 给齿轮箱添加缓慢增大的负载转矩。建立好的动力学模型如图 2 所示。

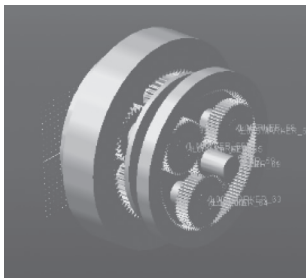


图 2 两级行星齿轮传动系统动力学模型图

### 2.2 仿真结果分析

图 3 和图 4 分别是输入和输出的角速度,由图像可知,发动机启动以后,在  $0\sim 0.05\text{ s}$ ,低速级行星架转速增加;在  $0.05\sim 0.1\text{ s}$  之间,转速趋于平稳,维持在  $1700^\circ/\text{s}$  左右,相应的输出转速保持平稳。根据行星轮传动比的计算公式可得, $i_1=4.56$ , $i_2=162/31$ ,模型中设置的输入转速为 `step(time,0,0,0.05,1700d)`,输出转速在  $0.05\text{ s}$  后的仿真平均值为  $40500^\circ/\text{s}$ ,所以由输入和输出的仿真

值可以得出两级行星齿轮系传动比为 23.82,而理论传动比  $i=4.56\times 162/31=23.83$ 。仿真值与理论值相对误差为  $0.04\%$ ,在误差允许范围之内,由此验证了动力学模型的正确性。

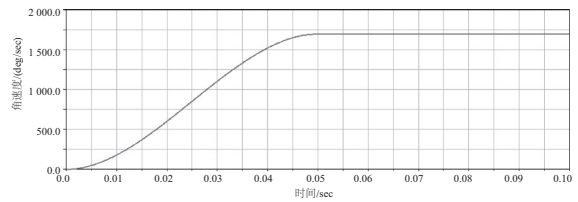


图 3 低速级行星架输入转速

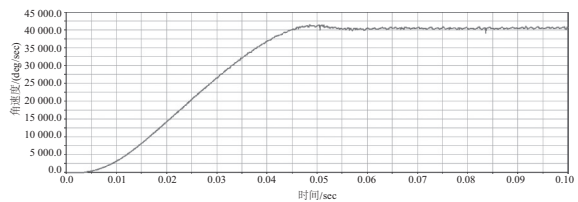


图 4 高速级输出转速

## 3 传动系统的断齿故障分析

### 3.1 断齿故障的三维模型

考虑当传动系统不均载时会产生断齿失效,依据文献[10]分别建立第一级行星齿轮传动系在太阳轮断齿故障、行星轮断齿故障、内齿圈断齿故障情况下的三维模型,其中行星轮的断齿故障模型如图 5、图 6 所示。

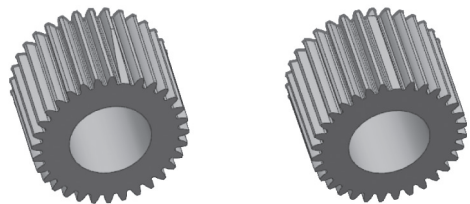
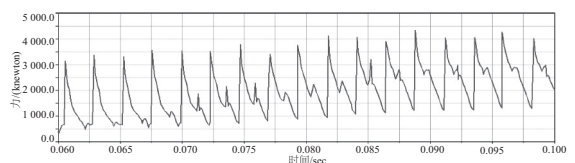


图 5 断齿 1/2 三维模型 图 6 全断齿三维模型

### 3.2 断齿故障啮合力时域分析

第一级太阳轮、行星轮和内齿圈在健康状态以及 2 种断齿故障下的啮合力随时间变化情况,如图 7-图 9 所示。通过分析比较可以得出:随着断齿故障的不断变严重,太阳轮啮合力在  $0.08\sim 0.09\text{ s}$  内、行星轮啮合力在  $0.07\sim 0.075\text{ s}$  内、内齿圈啮合力在  $0.09\sim 0.095\text{ s}$  内的幅值明显突变和增加,啮合反映出明显的啮合进出冲击。



a) 健康状态

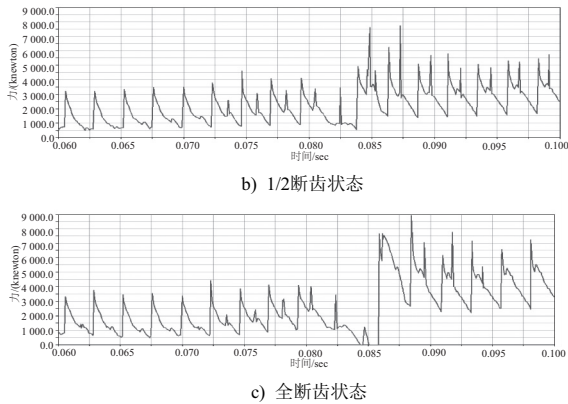


图7 一级行星传动太阳轮3种状态啮合力时域图

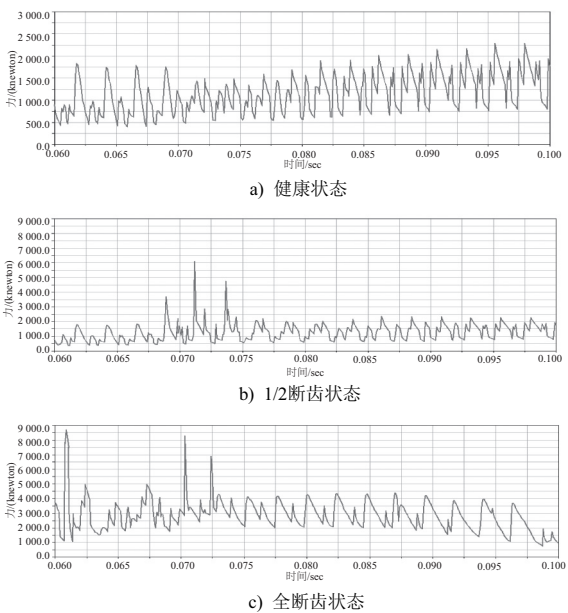


图8 一级行星传动行星轮3种状态啮合力时域图

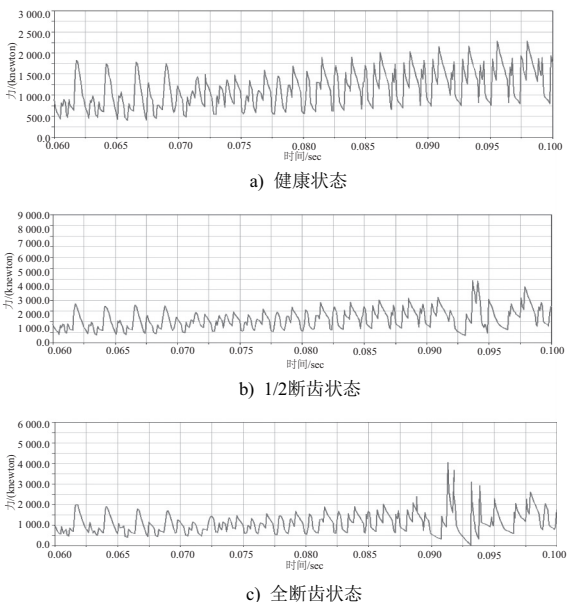


图9 一级行星传动内齿圈3种状态啮合力时域图

### 3.3 太阳轮断齿故障啮合力频域分析

选取对行星传动均载影响最大<sup>[11]</sup>的一级太阳轮为研究对象,得到其在健康状态以及2种断齿故障下的啮合力随频率变化的情况如图10所示。

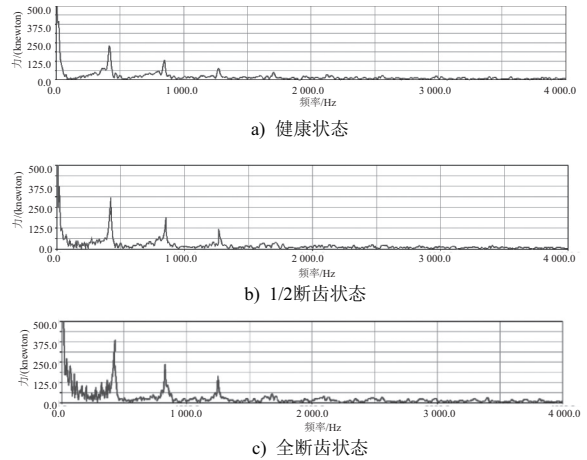


图10 一级行星传动太阳轮3种状态啮合力频域图

通过分析比较可以得出:

- 1) 健康状态下,由计算可得一级行星传动的啮合频率为420.276 Hz,一级太阳轮啮合力的频谱呈现出符合第一级行星传动的啮合频率以及啮合倍频,且主频和2倍、3倍频成分明显,高倍频成分越来越不明显;
- 2) 随着断齿故障的出现及越来越严重,其主啮合频率、2倍和3倍频的峰值呈现出明显增大的趋势,且故障越严重,峰值越大,可以以此作为判断故障频率和故障大小的依据;
- 3) 在断齿故障出现后,在0~500 Hz的低倍频率区间内出现边频带,且随着断齿故障的越来越严重,其边频带越来越明显,边频带的幅值随着断齿故障严重程度的增大而增加。

### 3.4 故障对第二级行星传动的影响

选取一级太阳轮健康、1/2断齿、全断齿3种状态,在其影响下的第二级行星齿轮传动太阳轮的啮合力时域、频域图如图11、图12所示。通过分析比较可以得出以下结论:第一级太阳轮的断齿故障对第二级太阳轮啮合力的时频域特性影响并不明显,在整个仿真周期内,其啮合力的幅值没有出现明显的增大或者减小,啮合进出的冲击也不明显,啮合频率的幅值变化不大,没有明显的边频带特征。

## 4 结语

本文以风电齿轮箱两级行星齿轮传动系统为研究对象,对虚拟样机模型进行动力学仿真后,得到了太阳轮、行星轮、内齿圈轮齿故障时的系统动态特性,研究表明:

- 1) 第一级行星齿轮系在健康状态下和太阳轮、行星轮、内齿圈分别故障时,随着断齿故障不断变严重,太阳轮啮合力在0.08~0.09 s内、行星轮啮合力在0.07~0.075 s内、内齿圈啮合力在0.09~0.095 s内的幅值明显突变和增

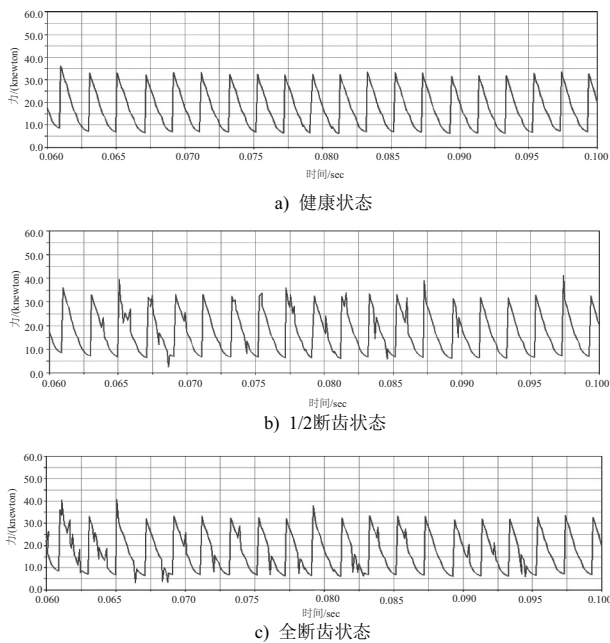


图 11 第二级太阳轮在一级太阳轮健康及其 2 种断齿故障下的啮合力时域图

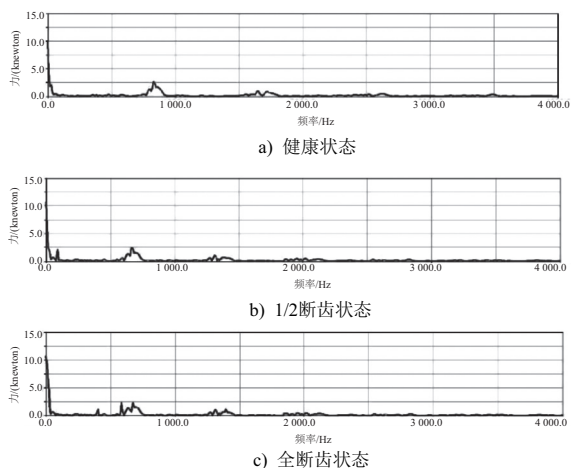


图 12 第二级太阳轮在一级太阳轮健康及其 2 种断齿故障下的啮合力频域图

加,啮合反映出明显的啮合进出冲击;

2) 选取的第一级太阳轮啮合力频域图表明,健康状态下,一级太阳轮啮合力的频谱呈现出符合第一级行星传动的啮合频率以及啮合倍频,且主频和低倍频成分明显,高倍频成分越来越不明显。随着断齿故障的出现及越来越严重,其主频、2 倍和 3 倍频的峰值逐渐增大,故障越严重,峰值越大,0~500 Hz 低倍频部分边频带更明显,且边频带的幅值随着断齿故障严重程度的增大而增大;

3) 第一级行星齿轮系构件的断齿故障对二级行星齿轮系的啮合力时频域影响并不明显。仿真结果可以为风电齿轮箱两级行星齿轮传动系统的故障诊断和检测提供理论依据。

参考文献:

[1] 邱星辉,韩勤锴,褚福磊. 风力机行星齿轮传动系统动力学研究综述[J]. 机械工程学报,2014,50(11):23-36.  
 [2] 刘忠明,段守敏,王长路. 风力发电齿轮箱设计制造技术的发展与展望[J]. 机械工程学报,2006,3(6):1-6.  
 [3] 陈汉新,刘岑,杨诗琪. 检测与诊断齿轮裂纹故障的一种方法[J]. 武汉工程大学学报,2014,36(9):53-58.  
 [4] 陈裴,荆建平. 行星齿轮断齿故障动力学仿真与故障提取[J]. 噪声与振动控制,2014,34(5):182-186.  
 [5] CHENG Zhe, HU Niaoqing, ZHANG Xiaofei. Crack level estimation approach for planetary gearbox based on simulation signal and GRA[J]. Journal of Sound and Vibration,2012,331(26):5853-5863.  
 [6] ABBOUDI Kamel, WALHA Lassaad, DRISS Yassine, et al. Dynamic behavior of a two-stage gear train used in a fixed-speed wind turbine[J]. Mechanism and Machine Theory,2011,46(2):1888-1900.  
 [7] 李贺,丁克勤,赵军,等. 桥式起重机减速器断齿故障仿真与试验研究[J]. 起重运输机械,2015(8):118-121.  
 [8] 韩天,史琳,赵爱国. 基于 Adams 的风力发电机齿轮故障分析[J]. 计算机辅助工程,2013(S1):256-260,264.  
 [9] 江志祥,朱增宝,季军. 基于 UG 与 ADAMS 的行星齿轮减速器动力学仿真分析[J]. 煤矿机械,2013,34(6):43-44.  
 [10] 刘晓乐,刘后广,程刚,等. 基于 ADAMS 的两级行星齿轮断齿故障动态特性分析[J]. 机械设计,2015,39(6):98-102.  
 [11] 陆俊华,朱如鹏,靳广虎. 行星传动动态均载特性分析[J]. 机械工程学报,2009,45(5):85-90.

收稿日期:2018-09-03

重要告示

尊敬的作者与读者:近期发现有一些假网站冒充我刊拦截稿件和骗取钱财,请您投稿时认真识别,谨防受骗上当。本刊严正声明,对此侵权行为保留对侵权者追究法律责任的权利!

本刊合法的、唯一的正式官方网站网址为:www.jxzyzd.com;

投稿邮箱为:editor@njmes.org;

微信公众号为:机械制造与自动化期刊。

《机械制造与自动化》编辑部  
2019年12月