

安装误差对风电机组传动系统载荷分配的影响

陈钟华¹, 蔡新添², 韩雪梅², 薛 喆³

(1. 上海电力环保设备总厂有限公司, 上海, 200072;

2. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;

3. 中广核能集团公司, 广东 深圳 518028)

摘 要: 为研究风电机组传动系统的均载性能,以常用的 2K-H 型行星轮系为对象,对包含安装误差的行星轮系有限元模型进行动力学仿真分析,得出了具体安装误差对系统载荷分配的影响。结果表明:安装误差会导致轮系在传动过程中出现“不均载”,对轮齿啮合产生冲击。如果合理安装风电机组的传动系统,将能降低其对风电机组传动系统的不利影响。

关键词: 风电机组; 传动系统; 2K-H 行星轮系; 载荷分配; 安装误差

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2014)05-0064-05

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2014.05.015>

Influence of installation error on load distribution of driven system in wind turbine set

CHEN Zhonghua¹, CAI Xintian^{2*}, HAN Xuemei², XUE Zhe³

(1. Shanghai Power Environmental Protection Equipment Factory Ltd., Shanghai 200072, China;

2. Power & Machine College, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China;

3. Zhongguang Nuclear Power Group Company, Shenzhen Guangdong 518028, China)

Abstract: In order to study the load sharing capability of driven system in wind turbine set, takes the object of 2K-H planetary gear train to make dynamic simulation analysis on finite element planetary gear train model with installation error, definitudes the influence of definite installation errors on load distribution. The result shows that installation errors cause non-balancing in the driven process of planetary gear train, and impact gear teeth meshing. If the driven system is well installed, the adverse effects on driven system will be reduced.

Key words: wind turbine set; driven system; 2K-H planetary gear train; load distribution; installation error

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2014.05.015

风力发电是新能源中发展迅猛并具有规模化开发条件的风能利用方式。仅从风力发电装机容量

量看,我国已成为世界风电大国,但风电机组的国产率有待提高。因此,如何提高风电机组的制造和

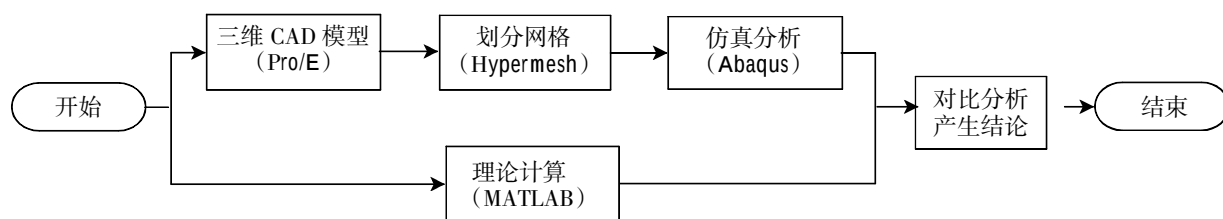


图 1 计算仿真技术路线

安装能力是一项重要的课题。

本文以风力发电机组 2K-H 行星轮系为研究对象,重点分析行星轮系的均载特性。采用理论计算和有限元仿真相结合的方法,研究太阳轮和行星轮的安装误差对行星轮系中不同行星轮间载荷分配的影响,计算仿真技术路线如图 1 所示。

其中,2K-H (由 2 个中心轮和 1 个行星架组成的行星传动类型,简称 2K-H)行星轮系参数为:太阳轮齿数 27,行星轮齿数 27,内齿圈齿数 81;模数 4 mm,齿宽 20 mm。

运动条件:太阳轮转速为 0.2 r/s,1 个行星轮有 40 μm 安装误差。

1 理论计算安装误差对 2K-H 行星轮系均载性能的影响

行星轮系的均载是发挥封闭差动行星传动系统优点的保证,行星传动均载特性已发展成行星传动系统研究的一个重要方向^[1]。德国学者 Jarchow 对不同方案的均载系数作了对比分析^[2]。日本学者日高照晃等研究了行星轮的偏心误差对行星轮间载荷分配的影响^[3]。美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的两位工程师 Krantz 和 Delgado 对双路功率分流减速器的均载问题进行了研究^[4-5]。1992 年,我国肖铁英^[6]等对行星齿轮传动装置的静态均载机理进行了研究。2000 年,袁茹、王三民和沈允文^[7]就浮动构件的支承刚度对行星齿轮均载性能的影响进行了研究。袁擎宇和朱如鹏^[8]在 2004 年用静力学方法研究了行星齿轮系统均载问题,并分析了误差对系统均载性能的影响。

本文运用工程计算软件 Maple 进行行星齿轮在啮合周期内的 10 000 个接触力计算。由于接触力数量太多,为了清晰地查看接触力的变化规律,

取太阳轮转动 1 圈过程中的 540 个接触力的值,在科学计算软件 MATLAB (矩阵实验室, matrix & laboratory 两个单词的组合) 中画出齿轮啮合力曲线,如图 2 所示。图中曲线 P1 代表具有安装误差的行星轮在啮合 1 圈的过程中与太阳轮的接触力, P2 和 P3 分别代表另 2 个行星轮与太阳轮的接触力。

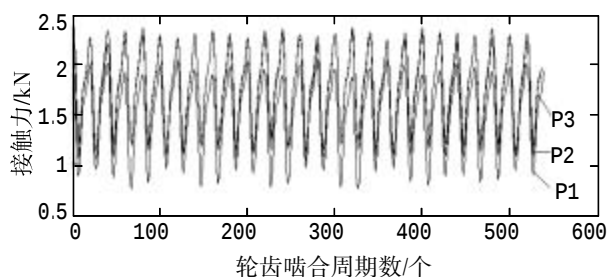


图 2 理论计算 1 个行星轮有安装误差时的接触力曲线

由图 2 可以看出,具有 40 μm 安装误差的行星轮由于脱离了与太阳轮啮合的正确位置,导致它与太阳轮的啮合力低于理论值;并且由于 1 个行星轮的安装误差,导致另 2 个行星轮与太阳轮的啮合力高于理论值,出现了系统不均载的情况。

在 MATLAB 中,计算出此时系统的均载系数为 1.1415。

2 Pro/E 建模与 HyperMesh 前处理

利用 CAD/CAM/CAE 一体化三维软件 Pro/Engineer (简称 Pro/E) 建立行星齿轮传动系统的各零部件实体模型,并完成装配,进行全局干涉检查保证模型无干涉之后将模型导入工程模拟有限元软件 ABAQUS 中进行动力学分析。

2.1 2K-H 行星轮系的建模与装配

在 Pro/E 中打开参数化直齿圆柱齿轮模型,在软件的菜单栏中选择“再生模型”,点击“输入”,从提供的齿轮各个参数中勾选要修改的参数,点击“完成选取”,在弹出的信息栏内分别输入齿轮的

各项参数,软件便会自动生成新的齿轮模型。

例如,选取需要修改的行星轮模型参数 Z、MN、WIDTH、R,输入齿数 27、模数 4 mm、齿厚为 20 mm,孔半径 20 mm,软件自动生成的行星轮模型如图 3 所示。然后通过上述同样的方法,分别输入太阳轮和内齿圈的参数,生成太阳轮和内齿圈的模型。



图 3 参数化齿轮模型的生成

ABAQUS 自带的三维建模和装配功能十分有限,仿真之前,本文选择在 Pro/E 中完成 2K-H 行星轮系的装配(如图 4 所示)。



图 4 2K-H 行星齿轮传动系统装配

装配好之后,对该装配体进行全局干涉检查,软件显示没有干涉零件,说明实现了行星轮系的成功装配。

2.2 HyperMesh 网格划分

用有限元网格划分前处理软件 HyperMesh 划分网格的主要步骤为:几何模型清理、分割模型、划分面网格、生成 3D 网格、复制网格和网格清理

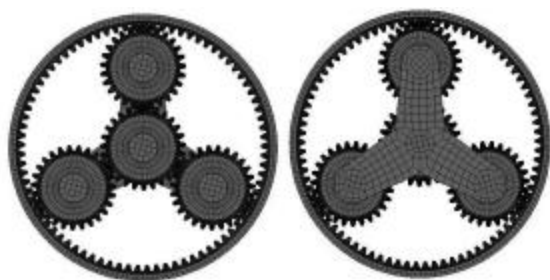


图 5 装配体网格模型

等几个步骤。画好网格的模型如图 5 所示。

3 2K-H 行星轮系的 ABAQUS 仿真分析

ABAQUS 动力学仿真分析主要有 3 个阶段:模型的前处理、ABAQUS 处理和分析结果后处理。前处理主要是在 HyperMesh 等图形软件中对需要分析的模型进行模型清理,网格划分等步骤,然后生成 ABAQUS 的接口文件,将模型导入 ABAQUS 进行处理。

在处理阶段,需要有设置材料属性、添加边界条件和载荷、定义分析步和输出变量等环节,这些步骤完成之后提交分析作业,然后计算机对模型进行运算,得到计算结果。ABAQUS 自身具有简单的后处理功能,可以在 Visualization 模块查看处理结果。由于本文主要利用 ABAQUS 计算齿轮的接触力,所以还需要在 MATLAB 中对结果进行处理,才能得到轮系的均载系数。

将标准装配的模型导入到 ABAQUS 之后,首先要在太阳轮中心建立 1 个参考点 RP1,然后用 Create Datum CSYS 命令在 RP1 的位置建立 1 个局部坐标系,使坐标系的 X 轴方向指向行星轮 1 与太阳轮的中心线方向,这个 X 轴就是行星轮 1 需要移动的方向。在软件的 Assembly 模块中,点击 Instance-Linear Pattern 命令,对模型中行星轮 1 的位置进行移动,移动方向选择局部坐标系的 X 轴,移动距离输入 0.04 mm。这时行星轮 1 已经沿与太阳轮中心线并远离太阳轮的方向移动了 0.04 mm,但是观察到原始模型依然还在,这时需要从模型树中把原来的行星轮 1 的模型删掉。进行完这个处理之后,现在的行星轮系统就是具有 1 个行星轮安装误差的模型,然后对模型进行同样的材料设置、分析步的定义、接触定义和自由度约束等设置过程,对太阳轮施加的角速度值为 1.256 6 rad/s。设置完成之后提交分析作业进行分析。

4 仿真结果

当分析作业完成之后,监控系统显示 Completed,

说明分析处理完毕,结果被保存在工作目录中。点击 Job Manager 右边的 Results 按钮,软件进入结果后处理界面。

由于本文的主要研究对象是啮合时齿轮接触力的合力,因此选择 Result-History Output,在弹出的对话框中选择 1 个行星轮与太阳轮接触对的接触力,即 Total force due to contact pressure and frictional stress:CFTM,点击 Plot 按钮,可以得到 1 个行星轮与太阳轮接触力的合力。但 ABAQUS 的后处理功能仅限于此,不能够直接计算轮系的均载系数。因此将计算出的所有接触力的值导入 MATLAB 进行处理。通过 XY Data Manager 菜单中的 Edit 命令,可以得到 1 个具有时间和接触力具体值的表。选择表中接触力的所有值,通过右键 Copy 命令将所有 1 000 个值复制下来,保存在 txt 文件中,这样就能够利用 MATLAB 处理数据了。

4.1 运用 MATLAB 进行数据处理

将仿真分析得到的 3 个行星轮的接触力值保存在同一个 txt 文档中,导入 MATLAB,通过 MATLAB 的画图功能得到模型的接触力曲线,如图 6 所示。

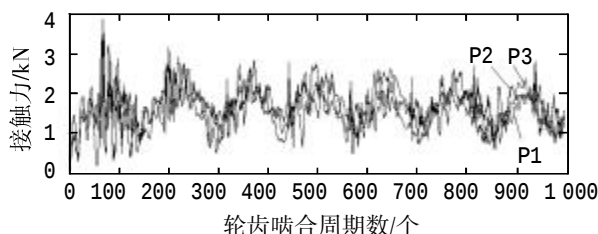


图 6 有限元仿真得到的接触力曲线

通过系统均载系数的处理办法对上述模型进行均载系数求解,得到结果为 1.2872。

4.2 仿真分析与理论计算的结果对比

在太阳轮转速为 0.2 r/s, 1 个行星轮具有 $40\ \mu\text{m}$ 安装误差条件下,理论计算得出的 2K-H 行星轮系均载系数为 1.1415,仿真分析得到的结果为 1.2872。从二者的对比可以看出,有限元仿真得到的行星轮系均载系数在 1 个行星轮具有安装误差条件下高于理论计算结果。分析原因为:有限元仿真采用的是有限元模型,与理论计算的集中质量模型有明显不同。

仿真分析与理论计算的结果都表明:安装误

差会导致轮系在传动过程中出现“不均载”,对轮齿啮合产生冲击。如果合理安装风电机组的传动系统,将能降低其对风电机组传动系统的不利影响。

5 结论

(1) 行星齿轮传动系统的载荷分配对风力发电机的噪声和振动影响重大,关系到风电机组传动部件的寿命^[9]。

(2) 本文运用 Pro/E 完成参数化建模和精确装配;针对 2K-H 行星轮系建立动力学模型,理论计算安装误差对系统均载性能的影响;并运用 ABAQUS 有限元软件,结合 HyperMesh 网格划分和 MATLAB 数据处理,通过仿真分析得到 2K-H 行星轮系的均载系数。结果表明安装误差会导致轮系在传动过程中出现“不均载”,对轮齿啮合产生冲击。如果合理布局行星轮系的安装误差,将能降低其对风电机组传动系统的不利影响^[10]。

(3) 在风电机组传动系统的设计、制造和安装中,多种因素都会影响载荷分配。将来还可以针对其他安装误差、系统的制造和装配误差、行星轮个数、齿侧间隙等进行动力学仿真分析,为进一步提高风电机组传动系统的均载性能,从而提高风电机组的自主研发设计能力打下基础。

参考文献

- [1] 朱增宝,朱如鹏,李应生等. 安装误差对封闭差动人字齿轮传动系统动态均载特性的影响[J]. 机械工程学报,2012,(03):16-24.
- [2] Jarchow F,Vonderschmidt R. Gearing Power Transmission [J]. Proc. Int. Symp. 1981,327.
- [3] 日高照晃,山本信行,& 石田武. 行星齿轮装置均载机构中的各种误差和载荷分配的关系 [J]. 日本机械学会论文集,1986,2200-2206.
- [4] Kish J G. Sikorsky Aircraft Advanced Rotorcraft Transmission (ART) Program-Final Report[R]. NASA CR-191079, NASA Lewis Research Center,1993.
- [5] KRANTZ T L,DELGADO I R. Experimental Study of Split-Path Transmission Load Sharing[R]. NASA Technical Memorandum 107202,Lewis Research center,1996.

- [6] 肖铁英,袁盛治,陆卫杰.行星齿轮机构均载系数的计算方法[J].东北重型机械学院学报,1992,16(4):290-295.
- [7] 袁茹,王三民,沈允文.行星齿轮传动的功率分流动态均衡优化设计[J].航空动力学报,2000,15(1):410-412.
- [8] 袁擎宇,朱如鹏,朱自冰等.两级星型齿轮传动静力学均载分析[J].机械科学与技术,2004,23(7):789-792.
- [9] 王晓笋,巫世晶,陈杰,彭则明.考虑动载荷与动态磨损系数的直齿轮传动系统动态磨损特性[J].中南大学学报(自然科学版),2014,(02):408-413.
- [10] 王晓笋,巫世晶,周旭辉,胡基才.含磨损故障的齿轮传动系统非线性动力学特性[J].振动与冲击,2013,(16):37-43,69.

(上接第 41 页)

(2)改进后,电网计算模型不再采用离线计算软件的典型计算模型,依靠 D5000 数据平台,实现了各网、省电网实时计算模型的上传与下发,电网模型更贴近于真实模型,计算准确度更高;

(3)改进后,系统实现了 3/2 母线接线方式下的故障判别,在 3/2 母线接线存在不完整串运行时,系统可正确识别一旦发生母线故障后所有应跳闸线路,故障影响更加准确;

(4)改进后,系统实现了多组计算服务器同时并行进行计算,计算速度有了质的飞跃。

参考文献

- [1] 陈珩.电力系统稳定分析[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 王葵.电力系统分析学习指导书[M].北京:中央广播电视大学出版社,2000.
- [3] 王梅义.大电网事故分析与技术应用[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [4] 孙秋野.电力系统分析[M].北京:人民邮电出版社,2012.
- [5] 王成山.微电网分析与仿真实理论[M].北京:科学出版社,2012.

(上接第 63 页)

按照是否编制预算、是否存在未清项挂账等条件再次进行严格校验,避免出现重复发起支付申请、未挂帐先付款等现象,降低资金安全风险。

4.5 银行承兑汇票、现金统筹运作,提升了资金预测准确性

将银行承兑汇票纳入月度现金流量管理,编制预算及资金支付时与现金一体化运作,降低了票据风险,提高了资金缺口预测准确性。

5 结论

(1)通过全面推进月度现金流量预算及资金支付优化功能,实现了未清项自动清帐和往来款项的全过程监控,解决了财务管控系统编制预算繁琐及预算编制不准确的问题,有效提升月度现金流量预算管理水。

(2)通过全面推进月度现金流量预算及资金支付优化功能,加强资金支付的合理性和规范性,强化了关口控制,有效防范资金支付风险。统筹资金票据资源,提升了资金运作和保障能力。

(3)月度现金流量预算及资金支付功能的优化,提升了财力集约化建设及深化应用过程中财务对业务前端的管控能力和管控效率,以及整体财务信息化水平。

参考文献

- [1] (美)罗伯·莱德.现金流量预算编辑[M].北京:经济科学出版社,2006.
- [2] 国家电网公司.国家电网公司物资集约化[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [3] 国务院法制办公室.中华人民共和国票据法[M].北京:中国法制出版社,2013.