

基于 UG 的燃气轮机起动离合器动力学仿真

宋万成, 吴 森

(海军驻沈阳地区发动机专业军事代表室, 沈阳 110043)

摘要: 为了解某燃气轮机起动离合器的工作过程, 采用 UG 运动仿真技术对该离合器的起动和脱离过程进行了动力学仿真研究。根据离合器的结构建立了 3 维实体模型并设置了载荷输入, 计算了在起动瞬间制动爪的受力情况和在脱离阶段各零件的运动状态。研究表明: 在起动瞬间, 棘轮和制动爪之间的空程导致了主动与从动部件之间较大的冲击作用, 可能引起零件失效; 在脱离阶段, 制动爪能与棘轮的棘齿平稳地脱离, 没有因为起动电机的扭矩作用或燃机自身的加速而产生刮碰现象。分析了影响最大冲击力的主要因素, 并通过仿真得出了空程距离与最大冲击力之间的关系, 对离合器的设计和使用提出了建议。

关键词: UG 仿真; 离合器; 燃气轮机

中图分类号: V260.5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.01.004

Study on Dynamic Simulation of a Starting Clutch in Gas Turbine Based on UG

SONG Wan-cheng, WU Sen

(Naval Consumer Representative Office of Engine in Shenyang, Shenyang 110043, China)

Abstract: In order to understand the working process of a gas turbine starting clutch, a dynamic simulation study during starting and releasing was performed with the dynamic simulation technique of UG. According to the clutch structure, a 3D model was established and the loads input was made. Then the force conditions of brake ratchets at starting and the motion states of each part in the releasing process were calculated. The result shows that at starting, a heavy impact between driving and driven components caused by the back play between the brake ratchets and the ratchet wheel may lead to a part failure. In the releasing process, the brake ratchets can release the wheel teeth smoothly, and there is no scratch caused by the torque of the starting motor or by the acceleration of the gas turbine itself. The main factors that affect the maximum impact force are analyzed. The relationship between the idle distance and the maximum impact force are given by simulation. Some suggestions for the design and operation of the clutch are put forward.

Key words: UG simulation; clutch; gas turbine

0 引言

某燃气轮机的起动离合器采用的是棘轮与制动爪组合的结构, 并依靠离心力使制动爪在特定转速下脱离, 这种设计使得在燃气轮机工作时离合器主、从动部件没有物理接触, 从而使机构的寿命延长和可靠性提高^[1]。但在实际使用过程中, 该离合器出现多次零件断裂的故障。由于结构的封闭性, 较难在实物中观察到离合器的工作过程。目前的故障分析方法是分析零件的断口形貌并测量电机电流, 从而推测故障的产生原因。而分析结果表明, 离合器受力零件的强度满

足设计要求, 电机的电流波动与故障出现并无直接联系, 可能存在其他设计阶段未预料到的载荷。

为分析离合器的工作过程是否存在未知的载荷情况, 本文采用 UG 动力学仿真技术对其进行了模拟, 记录模拟过程中可能出现的冲击、刮碰等情况, 分析它们的影响因素和影响效果。

1 离合器的结构和原理

离合器由棘轮、制动爪、销和传动齿轮组成, 如图 1 所示。棘轮与起动电机连接, 将扭矩通过棘齿传递给制动爪。制动爪通过销将载荷传递给传动齿轮, 从

收稿日期: 2017-05-18

作者简介: 宋万成(1971), 男, 高级工程师, 从事装备监造工作; E-mail: swc760318@163.com。

引用格式: 宋万成, 吴森. 基于 UG 的燃气轮机起动离合器动力学仿真[J]. 航空发动机, 2018, 44(1): 18-21. SONG Wancheng, WU Sen. Study on dynamic simulation of a starting clutch in gas turbine based on UG[J]. Aeroengine, 2018, 44(1): 18-21.

而驱动附件机匣中的齿轮系和燃气轮机转子。

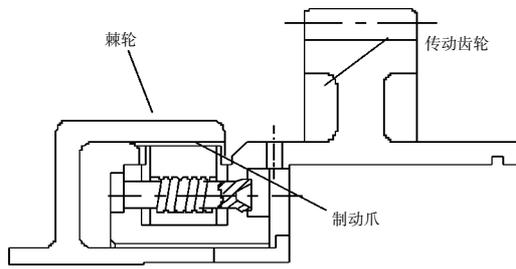


图 1 离合器的结构

起动时,传动齿轮处于静止状态,制动爪(如图 2 所示)被弹簧弹出,与棘轮的齿面接触。当起动电机旋转时,棘轮带动制动爪和传动齿轮旋转。当传动齿轮达到某一转速时,制动爪配重部分的离心力使其绕销孔旋转,制动爪与棘轮分离并贴靠在支承销上。

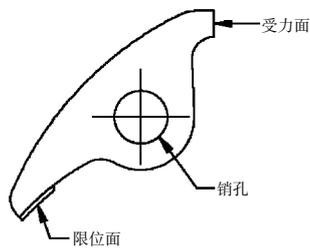


图 2 制动爪

2 仿真模型的建立

UG 的动力学仿真给 3 维实体模型的各个部件赋予一定的运动学特性,再在各个零部件之间设立运动副、传动副以及约束即可建立 1 个运动仿真模型^[2]。UG 集成 RECURDYN 动力学分析模块,采用相对坐标系运动方程理论和完全递归算法,适用于求解多体系统的碰撞问题,广泛用于航空、航天及其他通用机械行业^[3-4]。

本文使用 UG 建立棘轮、制动爪、传动齿轮和销的 3 维模型,如图 3 所示。UG 的运动仿真具有理想的约束功能,因此忽略轴承、定距套等与离合动作无关的零件,以便加快计算过程,提高分析精度。

在本文的运动仿真中不考虑零件的应力和变形,因此制动爪与销的连接关系可以用旋转副定义,并在旋转副上添加扭簧以模拟实际的弹簧作用。扭簧的刚度系数为 $4.5 \text{ N}\cdot\text{mm}/(\text{°})$,预压缩角度为 18° 。

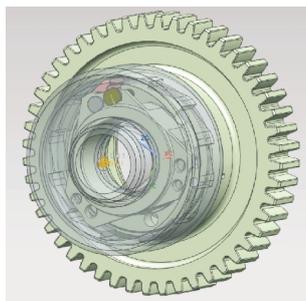


图 3 3 维模型

制动爪与棘轮、传动齿轮和支承销之间均存在接触的可能,因此依次设置 3 处 3 维接触。

本文采用接触函数(Impact)来模拟 3 维接触并求解碰撞力^[5-6]

Impact=

$$\begin{cases} 0 & q > q_0 \\ K(q_0 - q)^e - c_{\max} \times (dq/dt) \times \text{step}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) & q \leq q_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_0 为 2 个碰撞物体的初始距离; q 为 2 个物体碰撞过程中的实际距离; d/q_t 为 2 个物体间距离随时间的变化率; K 为刚度系数; e 为碰撞指数; c_{\max} 为最大阻尼系数; d 为切入深度。

在 UG 仿真中,主要对刚度系数(Stiffness)、碰撞指数(Force Exponent)、最大阻尼系数(Damping)和切入深度(Penetration Depth)等 4 个参数进行设置^[7]。

刚度系数是指在接触时因变形而产生的力,取决于碰撞物体的材料和结构形状;碰撞指数是指物体材料在碰撞时所表现出的非线性程度;最大阻尼系数表示 2 个物体碰撞时的能量损失;切入深度是指 2 个物体碰撞至最大阻尼时的侵入深度^[8]。本文使用 UG 默认推荐的钢 - 钢碰撞参数,如图 4 所示。



图 4 碰撞参数的设定

为模拟发动机转子的质量特性,赋予传动齿轮质量 400 kg ,轴向转动惯量 $1.2 \times 10^7 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$ 。为模拟起动电机转子和棘轮的质量特性,赋予棘轮质量 35 kg ,轴向转动惯量 $55066 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$ 。

棘轮与起动电机连接,因此在棘轮的转动副上设置扭矩,以模拟起动过程的扭矩输入。按照设计原理,3 组制动爪应同时与棘轮接触传力,但在实际工作时常因精度误差出现单个制动爪传力的情况,本文模拟这种极端条件下的状态。

棘轮与起动电机连接,因此在棘轮的转动副上设置扭矩,以模拟起动过程的扭矩输入。按照设计原理,3 组制动爪应同时与棘轮接触传力,但在实际工作时常因精度误差出现单个制动爪传力的情况,本文模拟这种极端条件下的状态。

起动瞬间的仿真。某型燃气轮机对起动时间有严格的要求,在起动初始阶段即向起动系统输入较大的电机扭矩。为了模拟该工况,本文使用 STEP 函数^[9],在 $0\sim 13 \text{ s}$ 内输入扭矩从 0 增加至 $420 \text{ N}\cdot\text{m}$,棘轮的空程则设置为结构所能容纳的最大角度 22° 。仿真设置时间为 3 s ,步数 10000,以获得准确的起动瞬间结果。

离合器脱开的仿真。在 $0\sim 13 \text{ s}$ 内棘轮所受扭矩(T001_Math)从 0 增加至 $420 \text{ N}\cdot\text{m}$,在第 13 s 时,给予

传动齿轮 94 N·m/s 的递增扭矩(T2_1),使其自行加速以模拟燃气轮机点火后转子获得的燃气动力^[10-11],如图 5 所示。仿真设置时间为 25 s,步数为 20000,以观察起动过程^[12]。

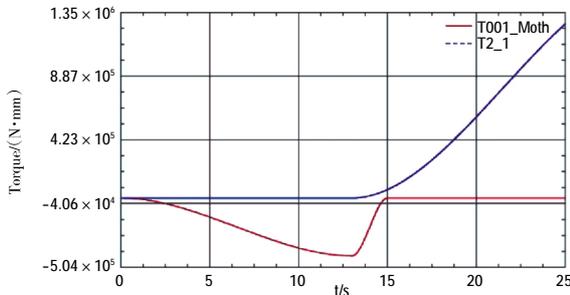


图 5 扭矩的加载

3 仿真结果与分析

起动瞬间制动爪销孔的受力曲线如图 6 所示。起动时制动爪与棘轮间有 22°的空程,因此棘轮在电机的驱动下加速撞向制动爪。由于与制动爪相连的传动齿轮具有更大的惯性,棘轮被反向弹开,随后在扭矩的作用下棘轮再次撞击制动爪,直至二者贴合一同运动。

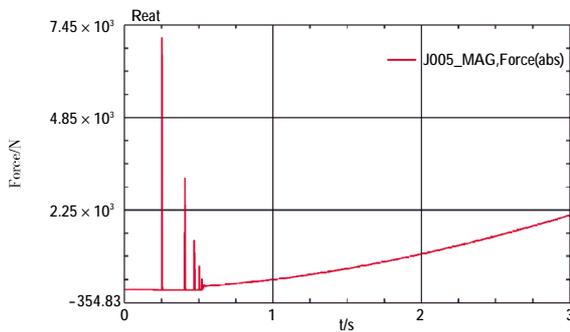


图 6 起动瞬间制动爪销孔的受力

从图中可见,由于空程的存在,棘轮对制动爪有较大的冲击力,该冲击力经过制动爪传递给销,在销孔位置形成较大的剪切力。

脱离过程的模拟动画截图如图 7 所示。考虑到离合器内部经过充分润滑,本文的模型中没有设置摩擦因数。从模拟动画中可以看到,当制动爪与棘轮逐渐脱开后,制动爪在离心力的作用下继续旋转,并没有

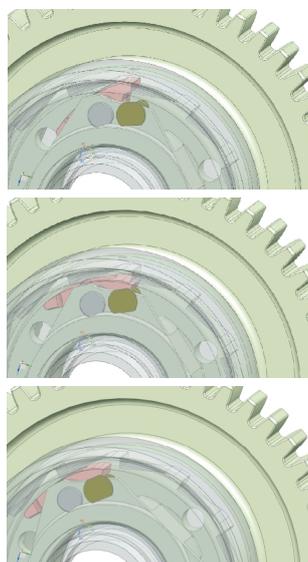


图 7 脱离过程

与棘轮再次刮碰,此时的传动齿轮转速约为 2950 r/min,与设计状态的 3000 r/min 接近。

制动爪与棘轮之间的碰撞现象是棘轮式离合器的特征^[13-14]。为便于研究,将燃气轮机起动系统传动链变换为直线运动的力学模型,如图 8 所示。

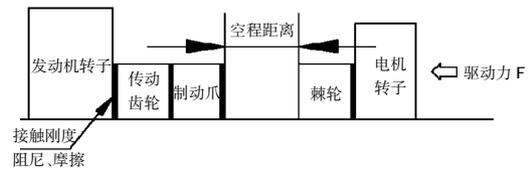


图 8 力学模型

从图中可见,每个存在接触的位置都会产生碰撞力,但在现有的起动系统结构下,制动爪与棘轮之间的碰撞是产生冲击力的主要原因。根据式(1)的求解可知,影响该处碰撞力大小的主要因素有:棘轮和制动爪的空程距离(空程角度),驱动力 F,各零件的质量特性和它们之间的接触刚度、阻尼和摩擦。其中空程距离、驱动力 F 和转子的转动惯量决定了碰撞瞬间的速度。

对于此离合器,空程距离在 0~22° 区间内随机变化,其大小取决于制动爪和棘轮的初始位置。对 3 种空程距离进行仿真计算,得到空程距离与最大冲击力的关系,见表 1。

$\alpha/(\text{°})$	F/N
22	7191
18	5759
12	3875

从表中可见,随着空程距离的增大,冲击力最大值增大。为减小冲击力,可以在离合器的设计阶段在满足强度的前提下增加棘轮中棘齿的数量,减小齿间的分度,从而减小空程距离。

在起动的初始阶段,电机的力矩(驱动力 F)决定了冲击瞬间制动爪与棘轮之间的相对速度,因此应严格控制空程阶段电机的力矩。但所研究燃气轮机采用了开关磁阻电机,其低速下的控制精度较差^[15],在实际应用中也发现该电机在 200 r/min 以下时转矩有剧烈的波动,产生了较大的冲击,造成了多次超扭和离合器制动爪断裂故障。因此,当起动系统选用开关磁阻电机作为动力源,棘轮式离合器作为脱离装置时,应在二者之间设置缓冲器,以避免电机直接驱动离合器,减小离合器受到的扭矩冲击。

4 结论

通过仿真试验可以观察到离合器的接合和脱开过程,在传动齿轮达到脱开转速时,可以发现制动爪与棘轮能够迅速分离,没有反复接合现象,验证了设计的正确性。

在起动瞬间,制动爪及销轴受到多次冲击载荷作用,尤其是空程较大的起动条件下,这种现象应被充分考虑。通过增强强度储备或调整起动电机扭矩的加载规律可以避免破坏或减小冲击力,也可在设计阶段增加棘齿数量,减小分度,有效地降低冲击力度。在起动电机的选型上应考虑其低速的控制精度是否满足要求,电机与离合器之间应设置缓冲装置。

参考文献:

- [1] 孙新杰. 浅谈棘轮离合器设计 [J]. 中国科技信息, 2011, 8(15): 111-116.
SUN Xinjie. Introduction to the design of a ratchet clutch [J]. China Science and Technology Information, 2011, 8(15): 111-116. (in Chinese)
- [2] 李志尊. UG NX7.5 基础应用与范例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 323.
LI Zhizun. Based application with examples of UG NX7.5[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 323. (in Chinese)
- [3] 程明. 基于 Recurdyn 链传动的仿真与分析 [J]. 机械设计, 2013, 30(9): 42-46.
CHENG Ming. Simulation and analysis of chain drive based on Recurdyn[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(9): 42-46. (in Chinese)
- [4] 薛珊, 徐龙, 赵运来, 等. 基于 Adams 与 Recurdyn 的机械结构 Hertz 接触仿真对比分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(4): 73-77.
XUE Shan, XU Long, ZHAO Yunlai, et al. Comparative analysis of Hertz contact simulation based on Adams and Recurdyn [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural science edition), 2016, 39(4): 73-77. (in Chinese)
- [5] 吴海宝, 吴金强. 基于 UG 和 ADAMS 的风力发电机组齿轮箱动力学仿真研究[J]. 机械传动, 2011, 35(2): 13-16.
WU Haibao, WU Jinqiang. Studying on dynamic simulation of wind turbine gearbox based on UG and ADAMS [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2011, 35(2): 13-16. (in Chinese)
- [6] 周亮, 胡愈刚, 王晓平. 基于 UG 软件的起落架收放机构运动仿真分析技术研究[J]. 航空制造技术, 2013(3): 92-94.
ZHOU Liang, HU Yugang, WANG Xiaoping. Motion simulation analysis technology of landing gear based on UG[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(3): 92-94. (in Chinese)
- [7] 刘苗. 基于虚拟样机技术的齿轮啮合分析 [J]. 装备制造技术, 2014(4): 12-14.
LIU Miao. Dynamics simulation of gear meshing based on virtual prototype[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(4): 12-14. (in Chinese)
- [8] 杨南. 基于 UG NX 的空间两岸机构运动仿真分析 [J]. 大众科技, 2011(9): 129-130.
YANG Nan. Motion display analysis for spatial linkages based on UG NX[J]. Cumulatively, 2011(9): 129-130. (in Chinese)
- [9] 陈正水, 邓益民. 基于 UG 的 STEP 运动仿真函数对运动时间的控制分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2012, 25(4): 103-106.
CHENG Zhengshui, DENG Yimin. UG-based STEP motion simulation function on motion time [J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2012, 25(4): 103-106. (in Chinese)
- [10] 赵曼莉, 严海华. 气垫船燃气轮机的起动系统简介[J]. 船舶, 2008(4): 38-40.
ZHAO Manli, YAN Haihua. Gas starter in hovercraft gas turbine[J]. Ship&Boat, 2008(4): 38-40. (in Chinese)
- [11] 栾永军, 孙鹏, 俞世康. 船用三轴燃气轮机起动特性研究[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(8): 105-109.
LUAN Yongjun, SUN Peng, YU Shikang. Analysis of start behavior of triaxial marine gas turbine[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(8): 105-109. (in Chinese)
- [12] 孙晓军, 刘德宏. 液压起动系统在燃气轮机上的应用[J]. 航空发动机, 2007(增刊 1): 74-75.
SUN Xiaojun, LIU Dehong. Application of hydraulic starting system in the gas turbine[J]. Aeroengine, 2007(S1): 74-75. (in Chinese)
- [13] 周晓, 马秋城, 张跃春, 等. 大功率自动同步离合器棘轮棘爪碰撞过程仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(6): 836-839.
ZHOU Xiao, MA Qiucheng, ZHANG Yuechun, et al. Simulation analysis of ratchet and pawl collision process in highpower synchronous-self-shifting clutch [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(6): 836-839. (in Chinese)
- [14] 沈小刚, 刘永文. 船用同步离合器棘轮棘爪碰撞问题的仿真分析 [J]. 船舶工程, 2010, 32(3): 24-26.
SHEN Xiaogang, LIU Yongwen. Simulation analysis of the collision problem to the ratchet and pawl mechanism in marine synchronous clutch[J]. Ship Engineering, 2010, 32(3): 24-26. (in Chinese)
- [15] 赵沛群. 浅谈某型燃气轮机起动机特点及应用 [J]. 科技创新导报, 2014(30): 40.
ZHAO Peiqun. The characteristics and application of a gas turbine starter [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014(30): 40. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)