

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.019

# 面齿轮的超静定支撑对传动扭矩的影响

戴先葵<sup>1</sup>, 吴 价<sup>2</sup>, 胡锡文<sup>1</sup>, 赵庆彬<sup>1</sup>

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 浙江大学 现代制造工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:**某反应器转轮由超静定支架支撑,电机经减速器后带动同轴的小齿轮转动,小齿轮和转轮一侧的面齿轮啮合驱动其转动。为了研究和分析面齿轮的传动扭矩和超静定支撑对传动扭矩的影响,对电机的输出扭矩进行了现场测试。通过对测试数据的分析,发现最大的瞬态传动扭矩是因为超静定支撑系统引起的,而且远大于传动扭矩的平均值。在此基础上,提出了后期面齿轮的弯曲和接触强度校核时要考虑到最恶劣的工况,同时建议在后期超静定支撑优化过程中,提高辊子组件的加工精度,改善超静定支撑系统的安装工艺,使各个滚轮的承载情况尽可能接近理想工况,从而降低传动扭矩的瞬态峰值,保证系统能够安全可靠地运行。

**关 键 词:**超静定结构;面齿轮;扭矩测试;瞬态峰值

中图分类号:TB12 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2016)03-0080-04

## Effect of Statically Indeterminate Support on Driving Torque in Face Gear

DAI Xiankui<sup>1</sup>, WU Jia<sup>2</sup>, HU Xiwen<sup>1</sup>, ZHAO Qingbin<sup>1</sup>

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China;

2. Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The runner of a reactor is supported by a statically indeterminate support, the face gear of which is driven by the motor and the reducer. In order to study and analyze the driving torque of the face gear and the effect of the statically indeterminate support on the driving torque, the output torque of the motor was tested on the spot. Through the analysis of the test data, it was found that the maximum transient driving torque was caused by the statically indeterminate support system, and was much higher than the average value of the driving torque. Based on this, the bending and contact strength of the face gear in the worst working condition should be considered, and it was suggested that the machining accuracy of the roller components and the installation technology of the system should be improved in the further statically indeterminate support optimization process, making the load situations of the rollers close to the ideal condition, thus to reduce the transient peak of the driving torque, and to guarantee operating of the system safely and reliably.

**Key words:** statically indeterminate structure; face gear; torque test; transient peak

某反应器采用转轮结构,包括若干装物料接收装置和用于传动的面齿轮,电机经减速机构并通过小齿轮和面齿轮啮合驱动转轮旋转。在传动系统设计中,轮齿强度能否满足要求是关键问题<sup>[1-4]</sup>。而轮齿强度又直接和传动扭矩成正比关系,本文将通过对该转轮传动扭矩的测量,估算面齿轮传动扭矩,为面齿轮的弯曲和接触强度校核提供实验数据;同时分析研究超静定结构对面齿轮传动扭矩的影响,为后期进一步优化

该机构的设计提供扎实的依据。

为了确保转轮工作时具有较高的安全性和可靠性,设计了由8个支撑杆(辊子)组件组成的支撑机构,转轮悬挂在该机构上,形成了一种无法用理论方法进行受力计算的超静定结构。这种超静定结构的受力分析极其复杂<sup>[5-8]</sup>,受到各种不确定工况以及加工安装工艺的影响,8个辊子组件承受的载荷在超静定条件下不再是相等的静载荷,辊子组件所承受的载荷会影

收稿日期:2015-12-07;修回日期:2016-03-07

作者简介:戴先葵(1983),男,湖南安乡人,工程师,硕士,从事核化工设备方面的研究工作。通信作者:吴价,E-mail:wujiachn@126.com

响面齿轮的摩擦力矩,在极端情况下会使传动扭矩成倍增加,严重影响面齿轮轮齿的弯曲和接触强度。

## 1 面齿轮传动扭矩测试方案

某反应器转轮悬挂在支撑架上,支撑架中的支撑杆是8个辊子,见图1。辊子的一端为锥面,固定在上盖的支撑架上,另一端安装了滚轮,滚轮与转轮内圈正常工况下为滚动摩擦,所需传动扭矩较小,但在故障工况下可能会形成滑动摩擦,因为滑动摩擦因数远大于滚动摩擦因数,所以故障工况下的传动扭矩远大于正常工况下的传动扭矩。转轮自质量(包括物料接收装置)为281 kg;处理的物料分批次进入接收装置,由于转轮循环运转,最多有6批次的物料同时处于转轮的右半侧,试验中满载时约为70 kg左右;初步设计的传动扭矩为 $1.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

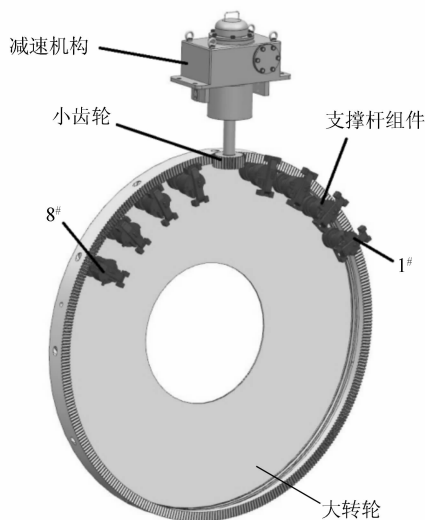


图1 反应器结构示意图(物料接收装置未示出)

Figure 1 Structural diagram of reactor  
(Material receiving device not shown)

试验中的部分传动系统如图1和图2所示。驱动电机为伺服电机,转速为 $6.2 \text{ r/min}$ ,通过减速机构以及小齿轮和面齿轮的啮合实现2级减速,进而驱动转轮旋转。扭矩传感器通过联轴节安装在电机输出端和减速机构之间。扭矩传感器输出2路信号:扭矩信号为经频率/电压转化模块转化之后的电压信号;转速信号为脉冲信号。2路信号均由数据采集卡转化为数字信号后读入计算机,并在计算机中通过相关软件进行处理。

## 2 面齿轮传动扭矩测试结果及分析

### 2.1 空载运行

试验装置首先在空载的情况下运转。面齿轮一圈

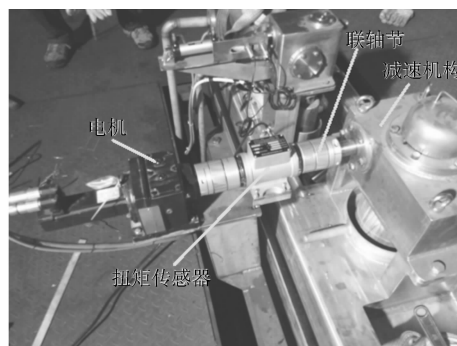


图2 传动系统及扭矩传感器

Figure 2 Transmission system and torque sensor

共有360个齿,试验中基本按照实际工况运行,大转轮转速设定为 $1/60 \text{ r/min}$ ,通过伺服电机控制大转轮每次的转动角度为 $30^\circ$ ,然后停止运转以便加料或卸料,大转轮停止转动后通过定位销准确定位,以免产生累积误差。然后继续每隔 $30^\circ$ 地间隙运转。大转轮每转动 $30^\circ$ ,计算机相应地记录一组数据,其中的前4组数据如图3和图4所示。

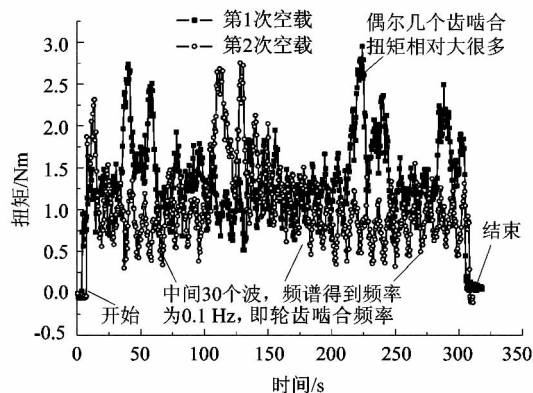


图3 第1、2次空载扭矩测量结果

Figure 3 First and second time testing torque in unload condition

从图3和图4中可以看出:

1) 转轮稳定运转时,测量得到的实际扭矩并非是一常数,而是在较大的范围内波动。仔细观察实际扭矩的波动周期可以发现每个周期都是 $10 \text{ s}$ ,正好是面齿轮转过一个齿的时间,这表明面齿轮和小齿轮啮合过程中,每一时刻的啮合力都是不一样的。此外,每一个啮合周期的扭矩变化情况也是不一样的,这说明每一个面齿轮的齿形误差有较大的不同。因此,在进行面齿轮的弯曲和接触强度校核时,应取扭矩的最大值进行计算,而不是按常规取平均扭矩计算。

2) 空载运行时,如果不考虑几个特别大的峰值,

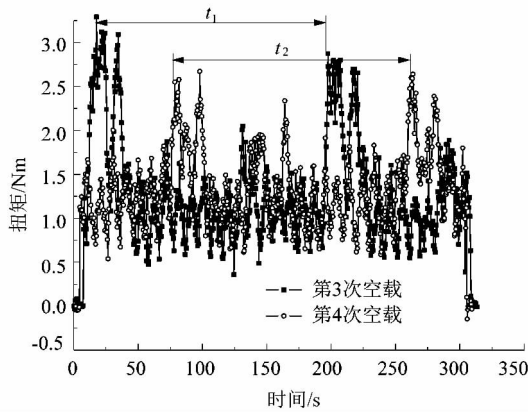


图4 第3、4次空载扭矩测量结果  
Figure 4 Third and fourth time testing torque in unload condition

扭矩的平均值约为  $1.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，已经达到了带载荷时的设计值。可能的原因有：减速机构的传动效率偏低；支撑架上8个滚轮与面齿轮内圈之间并非全部是滚动摩擦，部分存在滑动摩擦，导致摩擦功耗大于设计值。查手册[9]可知，这种条件下，滑动摩擦因数约为0.150，而滚动摩擦因数只有0.005。

3) 相对测量得到的扭矩峰值，转轮的起动扭矩是平稳的，并没有出现特别大的峰值。

### 2.2 超静定支撑对传动扭矩的影响

从图3和图4还可以发现：尽管转轮是稳定运转的，但总存在几个时间点，其瞬态扭矩变得特别大，如图3中的220s、图4中的20s左右，瞬态扭矩达到了  $3.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，远远超出了预期值。进一步观察这些峰值，可以发现它们的出现是有一定规律的，2个峰值出现的间隔  $t_1, t_2$  是基本一致的（见图4），图3中也存在同样的间隔。

为了研究间隔  $t_1$  出现的原因，我们重点分析了支撑面齿轮的超静定支架。滚轮的外径为88mm，大转轮内圈半径为752mm，二者的周长比约为17，滚轮每转1圈，面齿轮转过21.1个齿，即211s，这正好与  $t_1$  基本一致，这就说明超静定支架是扭矩出现大峰值的原因。

#### 2.2.1 2种可能的理想工况

第1种理想情况是指8个滚轮所承受的外载荷相等，即均为大转轮总质量的  $1/8$ ，则各滚轮的正压力如图5(a)所示（右半部工况相同），且大转轮与滚轮之间都是滚动摩擦，设滚动摩擦因数  $\mu_2 = 0.005$ ，大转轮内圈半径  $R = 752 \text{ mm}$ ，则需克服摩擦所需的扭矩为：

$$T_{i1} = 2 \sum_1^4 \frac{mg}{8 \cos \alpha_j} \cdot \mu_2 \cdot R = 14.5 \text{ N} \cdot \text{m}。$$

第2种理想工况是指仅4#、5#滚轮承受外载荷，每个滚轮的载荷为  $mg/2$ ，则需克服摩擦所需的扭矩为：

$$T_{i2} = \frac{mg}{\cos 15^\circ} \cdot \mu_2 \cdot R = 10.72 \text{ N} \cdot \text{m}。$$

以上计算的是大转轮的摩擦力矩，需要通过速比转化成电机的传动扭矩后才能与测量扭矩值比较。

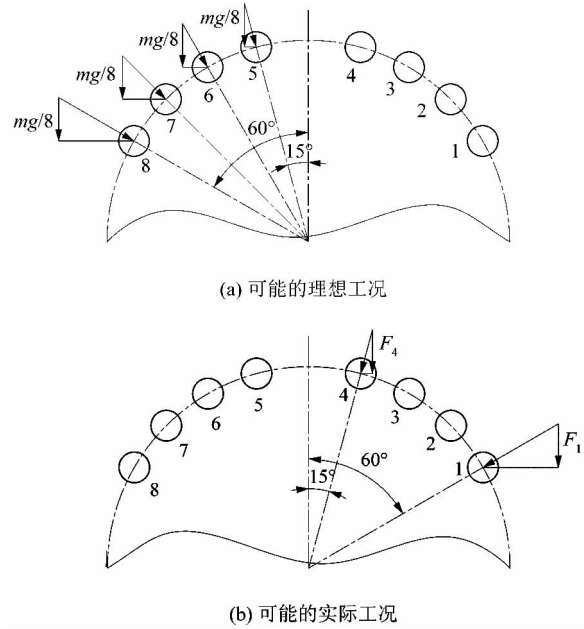


图5 各滚轮所受压力示意图

Figure 5 Pressure diagram of the roller

#### 2.2.2 2种可能的实际工况

因为支撑架是超静定结构，所以各个滚轮的实际承载工况受到加工和安装误差的影响，有多种可能，限于篇幅，仅讨论下面2种情况。

第1种是仅1#、8#滚轮承受外载荷，每个滚轮的载荷为  $mg/2$ ，则需克服摩擦所需的扭矩为：

$$T_{a1} = \frac{mg}{\cos 60^\circ} \cdot \mu_2 \cdot R = 20.71 \text{ N} \cdot \text{m}。$$

第2种实际可能的工况是1#、4#滚轮承受外载荷  $F_1$  和  $F_4$ ，根据力和力矩平衡的原理，2个滚轮的载荷分别为  $-1173.8 \text{ N}$  和  $3927.6 \text{ N}$ ，计算可得克服摩擦所需的扭矩为  $T_{a2} = 24.12 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

从以上的计算结果可知：不同工况下需克服的摩擦扭矩差别很大，如果遇到故障工况，即某个滚轮与转轮之间是滑动摩擦，那么滑动摩擦因数就是0.150，因此克服摩擦所需的扭矩还会大幅增加。扭矩增加，面齿轮在轮齿啮合过程中产生的啮合力势必增加，严重

时,可能直接导致轮齿破坏。

对超静定系统而言,任何一点微小的零件加工误差或安装误差都必然导致各个滚轮承载情况的变化。为此,应该提高辘子组件(包括滚轮)的加工精度,并研究合适的安装工艺,使转轮转动时,各个滚轮的承载情况尽可能接近理想工况。而在对轮齿进行弯曲和接触强度校核时,应该要考虑到最恶劣的工况。

### 2.3 加载运行

加载运行是指在大转轮停止状态时,向处于接料位置的物料接收装置填加物料 12 kg,随后起大转轮逆时针转动 30°后停止运转,再给转到该位置的物料接收装置填加物料 12 kg,如此循环运转。在第 6 次加载结束开始运转时,就有物料自动卸出,所以第 6,7 次加载,都可以认为是满载工况。

第 1,4,6 次加载的扭矩测试结果如图 6 所示,与第 1 次加载的扭矩比较,很明显可以看出:随着载荷的增加,扭矩曲线整体上移,波动中心位置由 1.0 N·m 附近上升到 2.5 N·m 附近,最大扭矩接近 5.0 N·m 左右。

这是因为空载时的扭矩只是用来克服转轮自身质量的转动惯量以及摩擦所需要的扭矩,而在大转轮的物料接收装置中装载物料后,因为物料是偏心的,物料对转动中心形成一个阻力矩,随着物料的增加,这个阻力矩也不断增加,所以传动扭矩也随之增加。当反应器到达满载工况后,物料的进、出互相平衡,所需的传动扭矩也达到一个相对平衡状态。

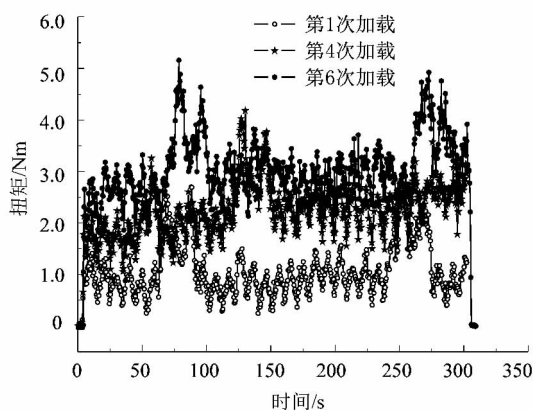


图 6 加载条件下扭矩测量结果

Figure 6 Testing torque in load condition

### 3 结论

针对超静定支撑的面齿轮及其传动减速系统,本文对驱动电机的输出扭矩进行了现场测试,测量数据可信度较高。通过对测试数据的分析,发现轮齿啮合过程中的啮合力是周期性变化的,面齿轮的加工精度会明显影响啮合力的大小。通过测试发现超静定支撑会使传动扭矩出现一些远大于设计扭矩的瞬态峰值。显然,对应的面齿轮啮合力也会远远大于设计值,因此,在对轮齿进行弯曲和接触强度校核时,应该要考虑到最恶劣的工况,当然传动轴和减速机构的强度校核时,也应该考虑最恶劣的工况。

通过测量发现,最大的传动扭矩是因为超静定支撑系统引起的,而且远大于传动扭矩的平均值,因此,在后期的系统设计和优化过程中,应该提高辘子组件(包括滚轮)的加工精度,并研究合适的安装工艺,使转轮转动时,各个滚轮的承载情况尽可能接近理想工况,从而降低传动扭矩的瞬态峰值,保证系统能够安全可靠地运行。

### 参考文献:

- [1] 戈红霞,吕庆军,张志凯. 关于面齿轮接触和弯曲应力有限元计算方法的研究[J]. 新技术新工艺,2014(1):43-47.
- [2] LITVIN F L, FUENTES A, ZANZI C, et al. Face-gear drive with spur involute pinion: geometry, generation by a worm, stress analysis[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2002, 191(25/26):2785-2813.
- [3] BARONE S, BORGIANNI L, FORTE P. Evaluation of the effect of misalignment and profile modification in face gear drive by a finite element meshing simulation[J]. Journal of mechanical design, 2004, 126(5):916-924.
- [4] 周辉俊,李政民卿,黄鹏,等. 基于均布载荷的正交面齿轮齿根弯曲应力计算方法研究[J]. 机械制造与自动化,2014,43(1):20-22.
- [5] 滑广军,李强,杨益民,等. 某大型超静定框架的动态应力测试与有限元分析[J]. 振动与冲击,2008,27(8):169-172.
- [6] 王宣锋,梁迎春,黄朝胜,等. 超静定多轴牵引车制动试验载荷参数的优化[J]. 吉林大学学报(工学版),2011,41(2):316-320.
- [7] 刘雅君,杨世平,崔宝龙,等. 再论工程力学中超静定结构的特征[J]. 延安大学学报(自然科学版),2005,24(3):33-35.
- [8] 王志,刘建伟,刘锐,等. 面齿轮传动国内研究进展[J]. 机械设计与制造,2012(3):219-221.
- [9] 杨黎明,杨志勤. 机械设计简明手册[M]. 北京:国防工业出版社,2008.