DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.009

高变位齿轮的修形研究*

刘 慧,何毅斌*,胡荣博,李 伟,宋 龙,王彦伟
(武汉工程大学 机电工程学院,湖北 武汉 430073)

摘要:针对海洋钻井平台减速器高变位齿轮在低速重载工况中存在啮合冲击大、齿面容易胶合、传动噪音大的问题,选取了减速箱高速级一对齿轮副进行了分析建模,通过改变齿形参数对齿轮在抗胶合安全系数、轮齿啮合质量和传递误差进行了研究,提高了齿轮的传动质量,采用合理的修形参数和修形方法对齿轮各方面参数进行了研究和测试,最后对修形前、后齿轮强度等参数进行了对比分析。研究结果表明,通过合理的修形设计,能够改善齿轮啮合质量,提高齿轮的抗胶合能力,降低齿轮传动误差和噪声,这对低速重载齿轮修形在实际工程上的应用提供了参考依据。

关键词:齿轮修形;低速重载;变位齿轮
中图分类号:TH132.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-4551(2016)04-0426-04

Modification research of high profile shifted gear

LIU Hui, HE Yi-bin, HU Rong-bo, LI Wei, SONG Long, WANG Yan-wei
(School Of Mechanical And Electrical Engineering, Wuhan Institute Of Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: Aiming at the problem of transmission lash, scuffing and noise caused by the high addendum gear of drilling platform decelerator in the low-speed and heavy mechanical transmission operation mode, a pair of high-speed gears of the decelerator was researched. Feasible modification parameters and design of gear were adopted to study and test through the research of transforming the characteristics, antiscuffing safety factor, mesh quality and transmission error of the gear. Comparison of the parameters like strength et al before and after the modification was made. The results indicate that it is necessary to make the reasonable design for improving meshing quality, antiscuffing capacity and reducing transmission error and noise of gear. This research provides reference for profile modification low-speed and heavy gear in engineering application.

Key words: gear modification; low-speed and heavy; profile shifted gear

0 引 言

减速器作为海洋钻井平台传动系统的重要部件,齿轮传动能力对减速器的寿命具有重要作用。实际工作中,由于齿轮传动系统中的壳体、轴、轴承及其自身变形,而出现错位,导致齿轮的接触状况不再理想,从而最终齿轮载荷能力下降和传动不平稳[1-6]。齿轮修形广泛应用于航空航天、汽车变速器、风力工业、重型机械和工业传动等领域,国外一些企业通过理论计算与工程实践相结合,确定齿轮修形参数,制造出高质量的齿轮。

海洋钻井平台减速器在低速重载的工况下运行,均使用高变位齿轮来提高齿轮承载能力,因此,笔者针对这种载荷大寿命短的齿轮,研究轮齿修形的方法,以改善齿轮的啮合质量、抗胶合能力和传动误差。

收稿日期:2015-12-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375186)
作者简介:刘 慧(1989-),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要从事齿轮修形方面研究. E-mail: ldlhgh@163.com
通信联系人:何毅斌,男,教授,硕士生导师. E-mail: gong_da_2007@126.com

1　齿轮传动模型

本研究以某兆瓦级齿轮箱高速级平行轴齿轮传动为研究对象,该齿轮为高变位齿轮,齿轮 1 的变位系数为 0.586 4,齿轮 2 变位系数为 0.502 8,齿轮材料为高强度合金钢。传递转矩 691 Nm,最大转速 1 164 r/min,设计使用寿命 150 h。

齿轮参数如表 1 所示(其中齿轮 1 为主动轮,齿轮 2 为从动轮)。

表 1　齿轮参数表

	模数/mm	齿数	压力角/(°)	齿宽/mm	变位系数	精度等级
齿轮 1	4.5	17	22.25	55	0.586 4	7
齿轮 2	4.5	61	22.25	45	0.502 8	7

本研究用 kisssoft 软件对表 1 所示的齿轮进行参数建模,得出齿轮的三维模型,如图 1 所示。

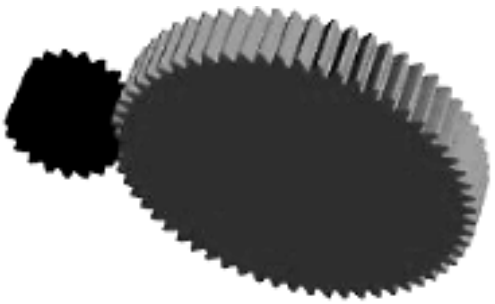

图 1　齿轮三维模型图

2　轮齿原始参数分析

本研究根据图 1 建立的齿轮副模型,按照齿轮箱初始传动要求对该齿轮副进行分析,得出齿轮 2 在未修形情况下的计算结果。

齿根弯曲、齿面接触及抗胶合安全系数图如图 2 所示。

Results

Contact ratio (Transverse/Overlap/Total)　1.3227/0.0000/1.3234

	Gear 1	Gear 2	
Actual tip circle d_{ae}	90.138	287.223	mm
Root safety	2.4450	2.2188	
Flank safety	1.2619	1.4692	

Safety against scuffing (integral temperature)　3.3767

Safety against scuffing (flash temperature)　5.3302

图 2　齿轮强度安全系数图

齿面抗胶合安全系数积分法和闪温法分别为 3.376 7和5.330 2,海洋钻井平台减速器齿轮在低速重载工况下运行,齿面容易发生胶合,使齿面失效,本研究通过修形来提高齿面的抗胶合能力。

齿轮传动误差图如图 3 所示(最大波动值为 11.12 μm)。

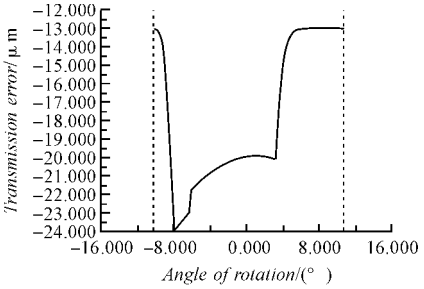

图 3　传动误差图

齿轮应力分布图如图 4 所示。

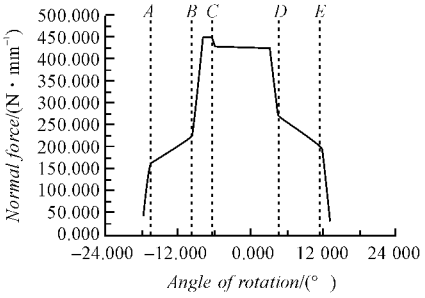

图 4　应力分布图

由图 4 可知,A,B,C,D,E 处齿轮载荷发生突变,齿轮在工作过程中存在啮入啮出冲击,会产生动载荷,增大传动误差,使齿轮在传动过程中增大振动噪声。传动误差的总体波动比较明显,齿轮副刚接触开始(齿轮啮入)转动角 −11°~ −8°范围内,传动误差波动值为 11 μm 左右,误差幅值再缓慢增长;当转动角转到 4°左右,传动误差值突增7 μm,然后趋于平稳。由传动误差图可知在齿轮误差波动剧烈,波动幅值大,可以确定齿轮啮入啮出的时候轮齿接触之间存在啮合冲击。

FFT 传动误差图如图 5 所示。

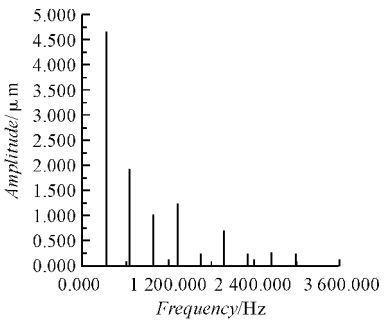

图 5　FFT 传动误差图

3　修形方法

齿面微观修形是有意识地微量去除齿面上材料,以减小由于系统和轮齿变形而引起的齿轮错位[7-8],尽

可能地使齿轮在发生接触受载变形后,齿面压力分布均匀,缓解齿面胶合现象,保证轮齿受载变形后依然能够相对平稳地传递力矩,减小啮合冲击。

齿轮修形分为齿形修形与齿向修形,齿形修形主要是降低啮合冲击减少噪音,它不能改变齿轮的接触区,但它消除了齿轮的尖锐部分,减少了集中应力,使齿轮啮合顺畅。而齿向修形为降低齿面载荷分布系数,减少偏载提高承载能力,一般使用在斜齿轮上,使齿轮啮合平稳过渡。

齿形修形公式为:

$$\Delta_{1u} = \delta_1 \pm \Delta f \Delta_{2u} = \delta_2 \pm \Delta f \tag{1}$$

式中:Δ_{1u}— 齿根修缘量;Δ_{2u}— 齿顶修缘量;δ_1— 从单齿啮合区过渡到双齿啮合区时由于弹性变形和热变形引起的基节偏差;δ_2— 从双齿啮合区过渡到单齿啮合区时由于弹性变形和热变形引起的基节偏差;Δf— 加工基节误差,视其方向选取前面的正、负号。

齿端修缘长度 h 为:

$$h = (1 \sim 1.2) \times (L - P)/2 \tag{2}$$

式中:L— 啮合线长度,P— 基圆节距。

齿向修形的目的在于通过修形人为地补偿齿轮啮合时的齿向误差,使齿轮受载后齿宽方向上的载荷尽可能分布均匀。

齿向修形公式(鼓形修形)为:

$$C_a = 0.5F_{\beta y} + \frac{F_m}{Cb} \tag{3}$$

式中:C_a— 鼓形量,$F_{\beta y}$— 啮合齿向误差,F_m— 圆周力,C— 啮合综合刚度,b— 齿宽。

螺旋角修形公式为:

$$C_h = F_{\beta y} - \frac{F_m}{Cb} \tag{4}$$

齿端修薄采用直线或曲线修形,推荐修形长度:$l = 0.1b$,修形量可按不同情况选取,齿端修形量计算公式为:

$$\Delta = 0.5(f_{sh} + 1.5f_{H\beta}) + (5 \sim 10) \tag{5}$$

式中:f_{sh}— 综合变形产生的啮合齿向误差分量;$f_{H\beta}$— 螺旋线倾斜偏差(不包括螺旋线形状偏差),对于高精度齿轮通常修薄量取 60% ~70%。

笔者研究的目标主要是降低齿轮噪音,减小啮合冲击,提高啮合质量,因此,笔者对该齿轮副采用齿向修形。

4　齿轮修形分析

4.1　修形结果

齿轮修形后,理论上使齿面接触更加充分,齿面接触闪温降低,齿面的抗胶合能力得到增强;齿面接触充分,轮齿间啮合冲击降低,齿轮的噪音和传动误差也会降低。为了验证齿轮修形对齿轮各方面性能参数的影响,本研究建立齿轮副模型图(图 1),在初始力矩、功率和相关齿轮参数不变的情况下,以降低齿轮噪音和啮合冲击为修形目的,修形参数选为经验值及预估值。齿轮 1、齿轮 2 同时采用齿顶和齿根同时修形,采用齿形修形的方法,线性修改横截面的顶部和根部,除去理论渐开线顶部和根部干涉的部分,使齿轮负载平稳过渡。

参数表如表 2 所示。

表 2　修形参数表

齿轮	齿顶修形量/μm	修形直径/mm	长度因子	齿底修形量/μm	修形直径/mm	长度因子
齿轮 1	14	86.9	0.6	14	75	0.7
齿轮 2	14	284.7	0.6	14	274.3	1.4

笔者根据表 2 所示的修形参数,对齿轮进行齿形修形研究,得出齿轮 2 在轮齿修形后的计算结果。

齿根、齿面接触及抗胶合安全系数图如图 6 所示。

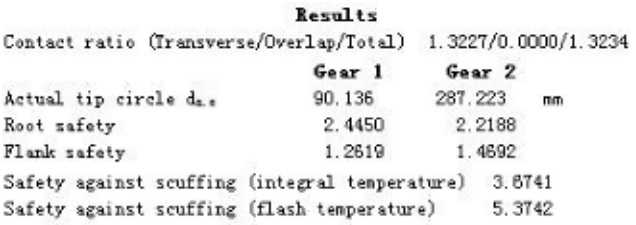

图 6　齿轮强度安全系数图

齿轮传动误差图如图 7 所示。

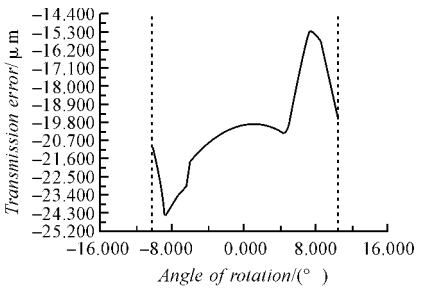

图 7　传动误差图

齿轮应力分布图如图 8 所示。

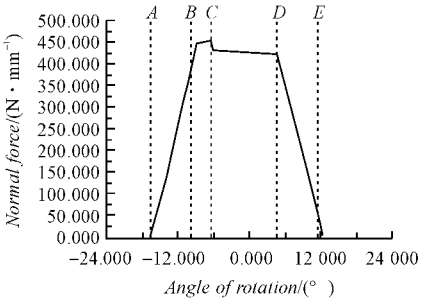

图 8　应力分布图

FFT 传动误差图如图 9 所示。

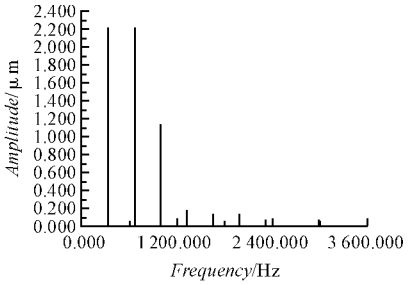

图 9　FFT 传动误差图

4.2　修形分析

修形可以降低齿轮啮合时的温度,对于提高轮齿的抗胶合能力有一定影响,对比修形前、后齿轮 2 的分析结果如图 2、图 6 所示,齿轮的抗胶合安全系数由 3.376 7变为 3.674 1,抗胶合安全系数有一定提高,齿轮的抗胶合能力有一定的增强。

齿轮传动误差曲线反应齿轮系统动态性能的一个重要指标,降低传动误差绝对峰值大小,能够使齿轮系统工作更加平稳,提高齿轮的使用寿命,对比齿轮修形前后的传动误差如图 3、图 7 所示,齿轮传动误差最大波动值由 11.12 μm 下降为 9.24 μm,齿轮的传动误差波动变得较为平稳,小范围的波动变得缓和,改善了齿轮系统的传动性能。

对比修形前后齿轮应力如图 4、图 8 所示,齿轮 2 的最大应力值由 452.599 N/mm 变为 451.055 N/mm,齿轮齿面的最大应力值变化较小,对于高变位齿轮,修形可能不能改变其承载能力,但能改变齿轮传动性能,减小啮合冲击,*BC*、*CD* 受力大的区域范围变大,*A*、*B*、*E* 处应力曲线基本趋于平滑过渡,修形后齿轮在啮入、啮出时都是趋于平滑过渡的,啮合开始时载荷小,然后逐步升高,使齿轮传动系统平稳运行,因此,合理的修形可以减小齿轮的啮合冲击。

FFT 快速算法可以将误差信号从时域变换到频域,很容易看出信号特征,从频域图可以看出误差值的波动图,对比图 5 和图 9,FFT 传动误差值从未修形时的 4.644 6 μm 变为 2.190 0 μm,传动误差值有很明显降低,修形对齿轮降噪有一定的效果。

齿轮修形的结果表明:修形后齿面抗胶合能力增强,啮合质量提高,传动误差降低了,符合理论经验公式的修形效果,因此,通过合理的改变齿面的微观几何参数可以提高齿轮的综合性能。

5　结束语

齿轮在制造和安装中存在误差而引起轮齿啮合误差,导致齿轮啮合质量降低,从而增加了齿轮箱的噪音和传动平稳性,重载情况下齿轮齿面容易胶合。笔者通过对海洋钻井平台减速器一对平行轴轮系高变位齿轮的轮齿进行了修形研究,实验及结果分析表明,对高变位齿轮副修形对于齿轮传动啮合质量和传动平稳性有很大改善,轮齿的抗胶合能力也有很大提高,减小了齿轮的传动误差,降低了齿轮噪声,这对于低速重载齿轮提高其传动性能的研究,具有重要的参考价值。

因此,齿轮修形可广泛用于齿轮传动来提高齿轮的传动质量,对于后期解决齿轮传动系统中因受载不均齿轮存在偏载的情况提供了参考依据。

参考文献(References):

[1]　于东洋,张　超,叶盛鉴,等. 齿轮变位及修形对齿面接触温度的影响研究[J]. 机械传动,2014,38(1):5-12.

[2]　赵登利,于良峰,刘　勇,等. 基于 KISSsoft 的齿轮修形优化设计[J]. 风机技术,2014,56(1):66-70.

[3]　袁野. 齿轮噪声与齿轮修形[J]. 机械研究与应用,2006,19(5):7-8.

[4]　周志峰,刘　伟,王　婧. 渐开线直齿轮修形的有限元分析与研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1490-1493.

[5]　杨建军,刘　威,张　华,等. 基于 ROMAX 的齿轮修形优化设计与试验研究[J]. 机械传动,2015,39(10):158-161.

[6]　唐进元,刘继凯,雷敦财. 基于 Romax 与 Kisssoft 软件的齿形优化设计与分析[J]. 机械传动,2011,35(2):1-5.

[7]　计联岳. 齿面微观修形技术在齿轮降噪中的应用[J]. 中国高新技术企业,2013,20(29):67-69.

[8]　张福龙,葛　兵,张珏成,等. 齿面微观修形技术在齿轮降噪中的应用[J]. 机械强度,2013,35(4):513-517.

[编辑:李　辉]

本文引用格式:

刘　慧,何毅斌,胡荣博,等. 高变位齿轮的修形研究[J]. 机电工程,2016,33(4):426 - 429.

LIU Hui, HE Yi-bin, HU Rong-bo, et al. Modification research of high profile shifted gear[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(4):426 - 429.