

SP-I-01型全液压顶驱齿轮副振动分析

王四一¹, 高科², 赵江鹏¹

(1. 中煤科工集团西安研究院, 陕西 西安 710077; 2. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130021)

摘要: 振动会对齿轮副正常稳定工作产生影响。齿轮副的设计过程中要使其固有频率避开工作频率。通过对 SP-I-01 型全液压顶驱传动齿轮副进行振动分析, 得出了齿轮副前六阶的固有频率及对应的振型图, 并计算出其最高工作频率, 与其固有频率进行对比, 得出了其最高工作频率低于其最低阶的固有频率, 符合设计要求。

关键词: 全液压顶驱; 钻机; 齿轮副; 振动分析; 固有频率; 工作频率

中图分类号: P634.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2013)06-0014-04

Gear Pair Vibration Analysis of the SP-I-01 Hydraulic Top Drive Drilling System/WANG Si-yi¹, GAO Ke², ZHAO Jiang-peng¹ (1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an Shaanxi 710077, China; 2. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130021, China)

Abstract: Vibrations influence normal and stable work of gear pair. In gear pair design process, inherent frequencies of gear pair should avoid working frequencies. Vibration analysis is made on the gear pair of SP-I-01 hydraulic top drive drilling system, the first 6 order inherent frequencies and the corresponding mode shape graphs of the gear pair have been obtained. The maximum operating frequency is calculated and by comparing with the inherent frequencies of the gear pair, the result is that the maximum operating frequency is lower than the inherent frequency of the lowest order, which meets the design requirements.

Key words: hydraulic top drive drilling system; drill; gear pair; vibration analysis; inherent frequency; working frequency

0 引言

目前, 吉林大学建设工程学院承担的“深部大陆科学钻探装备研制”(Sinoprobe-09-05) 万米超深科学钻探主体装备已经成功下线, 并实现了“深井高转速大扭矩全液压顶驱系统”和“悬挂式自动钻杆排放装置”两大技术突破, 其中 SP-I-01 型高速大扭矩全液压顶驱采用了动力机直接驱动液压泵构造闭环液压系统, 具有效率高、调速性能好的特点, 无需电传动钻机通常采用的发电机组、整流、同期和逆变装置, 大幅度降低了整个钻机系统的制造成本^[1,2]。

SP-I-01 型全液压顶驱主要由水龙头-钻井马达总成、导向滑车总成、管子处理装置、平衡系统等部分组成。其中, 水龙头-钻井马达总成采用了 4 个液压马达驱动 4 个小齿轮, 然后由 4 个小齿轮一起驱动大齿轮, 大齿轮通过螺栓与主轴相连, 从而实现扭矩从液压马达到主轴的传递。这 4 个小齿轮和大齿轮组成的传动副的振动特性对顶驱的性能有着重要影响。

1 振动分析理论基础

当静止状态的实体受到干扰时, 通常会以一定的频率振动, 这一频率也称作固有频率或共振频率。对于每个固有频率, 实体都呈一定的形状, 也称作模式形状^[3,4]。理论上, 实体具有无限个模式。对于有限元素分析, 理论上, 有多少个自由度(DOF), 就有多少个模式。在大多数情况下, 只考虑其中的一些模式。如果实体承担的是动态载荷, 且载荷以其中一个固有频率振动, 就会发生过度反应。这种现象就称为共振。例如, 如果一辆汽车的一个轮胎失去平衡, 则在一定速度下, 由于共振现象, 这辆汽车会发生剧烈摇摆。而以其它速度行使时, 这种摇摆现象就会减轻或消失。另一个范例是高音(例如歌剧演唱者的声音)可能会导致玻璃震碎。频率分析可通过计算共振频率而避免共振。

由弹性力学有限元法, 可得齿轮系统的运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ——分别为齿轮质量矩阵、阻

收稿日期: 2013-01-31

基金项目: 本论文受国家深部探测技术与实验研究专项“深部大陆科学钻探装备研制”资助(SinoProbe-09-05)

作者简介: 王四一(1984-), 男(汉族), 湖北红安人, 中煤科工集团西安研究院助理研究员, 地质工程专业, 博士, 从事煤矿钻探机械和工艺研究工作, 陕西省西安市高新区锦业一路 82 号, 260654145@qq.com。

尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{X}\}$ 、 $\{\dot{X}\}$ 、 $\{X\}$ ——分别为齿轮振动加速度向量、速度向量和位移向量, $\{X\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} T$; $\{F(t)\}$ ——齿轮所受外界激振力向量, $\{F(t)\} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\} T$ 。

若无外力作用,即 $\{F(t)\} = 0$,则得到系统的自由振动方程。在求齿轮自由振动的频率和振型即求齿轮的固有频率和固有振型时,阻尼对它们影响不大,因此,可以作为无阻尼自由振动问题来处理。无阻尼项自由振动的运动方程为:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = 0 \quad (2)$$

如果令

$$\{X\} = \{\varphi\} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

则有 $\{\ddot{X}\} = -\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$

代入运动方程,可得

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\varphi_i\} = 0 \quad (5)$$

式中: ω_i ——第 i 阶模态的固有频率; φ_i ——第 i 阶振型, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

2 基于 ANSYS 的振动分析

2.1 工作频率计算

在齿轮副设计中要充分考虑到齿轮固有频率和振型,使齿轮固有频率远离 TDS 工作频率,避免发生

共振^[4]。

SP-I-01 型全液压顶驱主轴转速 w 为 0~400 r/min 无级调速,大齿轮齿数 N_2 为 75,则工作过程中,齿轮副啮合轮齿每秒的最多撞击次数为:

$$n = N_2 w = 75 \times 400 \div 60 = 500$$

则齿轮副每秒轮齿啮合次数范围为 0~500 次,即齿轮副的工作频率为 0~500 Hz。

2.2 基于 ANSYS 的齿轮副振动分析

有许多数值方法可用于求解上面的方程。ANSYS 提供了 7 中模态提取方法^[5,6],其中较为常用的是 Subspace(子空间)法,主要适用于大型对称特征值求解问题,此分析即采用此法。

2.2.1 模型的建立

齿轮副的基本参数为:所需齿轮速比 $G = 4$,实际齿轮齿数比为 3.9474(-1.32%),压力角 $P = 20^\circ$,间隙 $L = 0.25$ (2.5 mm),齿根圆角 $I = 0.38$ (3.8 mm),基准齿条的齿顶为 1.25 (12.5 mm),螺旋角 $X = 20^\circ$,模数 $M = 10$ mm,中心距离 $R = 500$ mm,产品中心距为 500.164 mm;齿轮基本参数见表 1。利用三维制图软件 Solidworks 建立了齿轮副的模型,导入到有限元分析软件 Ansys Workbench 中,如图 1 所示。

表 1 齿轮基本参数

项目	齿数 N /个	螺旋 方向	节径 d /mm	基圆直径 d_b /mm	外径 d_o /mm	齿根圆直径 d_f /mm	齿厚度 s /mm	外齿厚度 /mm	面宽 W /mm	面宽比
齿轮 1	19	右	202.194	188.545	221.933	176.934	15.613	7.0078	160	0.7419
齿轮 2	75	左	798.133	744.255	818.066	773.067	15.684	7.9924	150	0.1879



图 1 齿轮副三维实体模型及约束添加图

2.2.2 指定材料特性

齿轮材料选择 40Cr,密度为 7870 kg/m³,弹性模量为 2.11 × 10¹¹ N/m²,泊松比 0.277,抗拉强度

980 MPa,屈服强度 785 MPa。由于有线性静力分析,所以需要用到杨氏模量和泊松比。其余的参数并不影响到分析,不防都设置一遍。Ansys 材质库中并没有 40Cr,需要向材质库中添加,比较方便的方法是复制材质库中的 Structural steel,然后改名称为 40Cr,逐项输入不同的参数。

2.2.3 定义接触

大、小齿轮啮合过程中,齿轮是浸泡在润滑油中的,所以齿轮齿面的接触定义为“frictionless”。

2.2.4 添加约束

约束的添加如图 1 所示。对齿轮轴的轴向和径向进行了约束,保留了周向(转动)的自由度。

2.2.5 划分网格,定义网格控制

考虑到计算精度与计算量的平衡,忽略倒角等工艺特征,采用六面体单元,由 Ansys Workbench 实现网格的自适应划分。一定程度上减轻了网格划分

的工作量。图2是划分好网格的主轴整体模型。

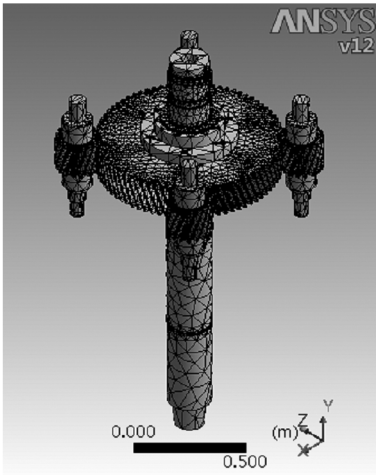


图2 齿轮副网格的划分

由于设置了对模态进行扩展,所以对于求得的每一阶固有频率,程序同时都求解了其对应的模态振型反映在该固有频率时,齿轮各节点的位移情况,可以利用 ANSYS 通用后处理器方便地对其进行观察和分析,并可以对各阶模态振型进行动画演示。用振型叠加法求解振动响应问题,通常不必求出全部的固有频率和振型,一般来说,越是低阶,对齿轮的影响越大,取5~10阶精度已足够^[7,8]。表2给出齿轮副前6阶固有频率。

表2 齿轮副前6阶振型固有频率

阶次	固有频率	阶次	固有频率
1	597	4	1024
2	845	5	1235
3	1019	6	1381

2.2.6 设定需要的结果

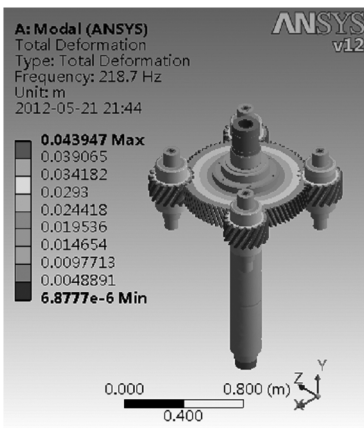
本分析设置了前6阶振形图。

2.2.7 求解模型

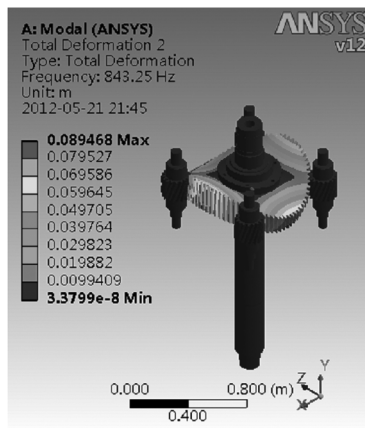
点击“运行”即“Solve”,即可。

2.3 查看结果和后处理

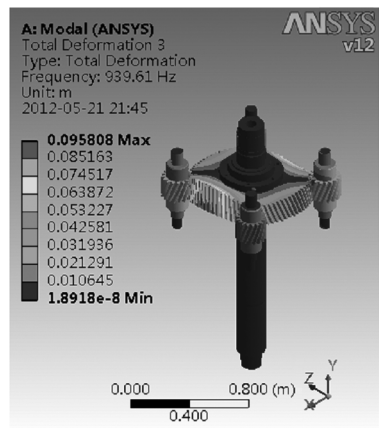
图3给出了斜齿轮的前6阶固有振型。由图3可知,斜齿轮的模态振型主要是轮齿圆周振动和扭振,轴向、径向基本无振动。1阶振型为轮齿圆周弯曲,2~5阶振型为各轮齿弯曲状态不同,第6阶出现了小齿轮的轮齿的扭转。低阶的模态振型对振动



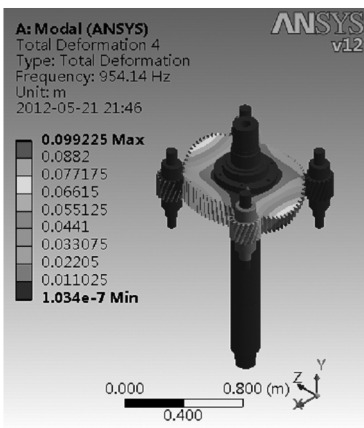
(a) 1阶振型图



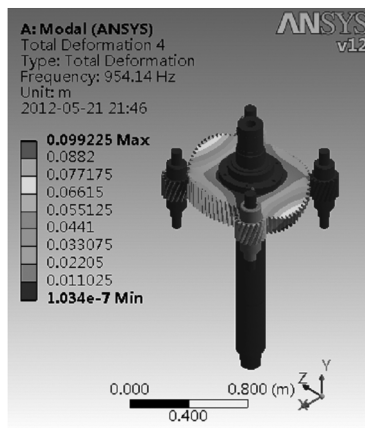
(b) 2阶振型图



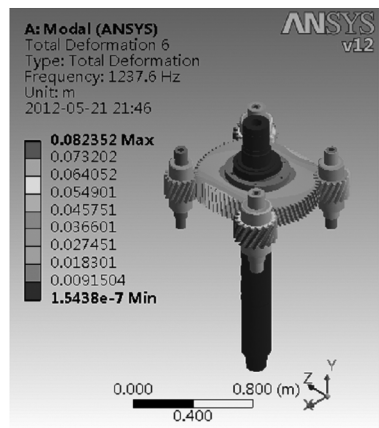
(c) 3阶振型图



(d) 4阶振型图



(e) 5阶振型图



(f) 6阶振型图

图3 斜齿轮的前6阶固有振型

的影响大。因此,圆周振是斜齿轮发生共振可能性最大的振型。

3 结果分析及结论

通过计算和分析,得到了以下结论:

(1) SP-I-01 型全液压顶驱工作频率区间为 0~500 Hz。

(2) 对 SP-I-01 型全液压顶驱的齿轮减速机构进行了振动分析,得出其前 6 阶的固有频率和固有振型。其中最低阶固有频率已达 597 Hz。

(3) 最高转速下的轮齿撞击频率 500 Hz 比最低阶的固有频率 597 Hz 还低,所以不会引起共振,符合设计要求。

此处要指出的是,4 个小齿轮与一个大齿轮啮合,并且 4 个小齿轮是主动齿轮,这就要求通过合理的液压系统设计保证 4 个小齿轮的同步性,如果同步性不好,则轮齿每秒钟的啮合次数很可能超过 500 次,从而有接近甚至达到轮齿最低阶固有频率 597 Hz 的可能。同时也可以通过改变齿轮的结构

和材质,提高其最低阶的固有频率,避免此情况的发生。

参考文献:

- [1] 黄大年,于平,等. 地球深部探测关键技术装备研发现状及趋势[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009,42(5):1485-1496.
- [2] Sun Youhong, Wang Qingyan, Gao ke. Development of 10km continent scientific drilling equipment of model SPKZ-I[A]. The International Symposium on Deep Exploration into the Lithosphere [C]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011:137-141.
- [3] 谢海东,周照耀. 斜齿轮精确建模及有限元模态分析[J]. 现代制造工程, 2004, (11):25-29.
- [4] 管迪华. 模态分析技术[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [5] 彭晓源. 系统仿真技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006. 16-19.
- [6] 熊麟,陈礼仪,吴飞. 钻机变速箱齿轮的 ANSYS 分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(4):43-46.
- [7] 江进国,舒晓勇,韦念龙,等. 基于 ANSYS 软件的钻杆扭转振动分析[J]. 探矿工程,2003,(S1):176-178.
- [8] 李黎明. ANSYS 有限元分析实用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

汪民:联手推动地热能勘查开发集约化

《中国国土资源报》消息(2013-06-17) 2013年6月14日下午,中国地质调查局与中国石化集团新星石油有限责任公司在京就地热能勘查开发与交流合作举行座谈,双方决定建立长期战略合作伙伴关系。国土资源部党组成员、副部长、中国地质调查局局长汪民强调,联手推动地热能勘查开发上规模、上水平、集约化。

汪民在讲话中指出,地热能开发利用在节能、减排、高效、稳定等方面具有很大优势,但我国开发利用程度不高。当前,国家大力推进生态文明建设,地热能在国家层面受到高度重视。“公益先行、商业跟进、基金衔接、整装勘查、快速突破”的地质找矿新机制同样适用于地热能勘查开发,要把地热能资源作为重要的矿产资源,纳入地质找矿突破战略行动,纳入资源节约集约利用和发展新能源的大战略。

推动地热能开发利用,需要中央、地方、企业联动,更需要相关单位推动和示范工程带动。汪民希望,中国地调局与中石化通过务实合作,形成良性互动,构建地热能勘查开发新机制,实现地热能勘查开发新突破。公益性地热能工作要为商业性勘查开发提供支撑、降低风险,商业性勘查开发要跟踪公益性地热能工作进展,找准勘查开发目标,早参与、早投入、缩短周期,快速见效。要早谋划,早动手,想办法,尽快突破地热能勘查开发关键技术,占领地热能勘查开发制

高点,推动我国地热发电规模化、地热产业集约化和干热岩勘查开发试验基地建设。

中国石化集团副总裁曹耀峰表示,国家地热能开发利用研究及应用技术推广中心已落户新星公司,集团将把地热能勘查开发作为一个新兴战略产业进行谋划。希望通过加强与地质调查局的交流与合作,加快推进地质调查资料共享、地热勘探战略选区、地方地热产业规划、地热信息化建设等,更好地发挥国家地热能开发利用研究及应用技术推广中心的作用。

双方同意,加强多方位、深层次交流合作,建立长期稳定的战略合作伙伴关系,探索公益性地热能地质调查与商业性地热能勘查开发“合理分工、合作推进、高效转化”新举措,推进地热能资源勘查开发实现新突破。

据介绍,中国地调局2010年以来累计投入3亿多元,完成了29个省会城市浅层地温能调查评价,正在实施全国地热能资源调查评价与开发利用区划、256个地级城市浅层地温能调查评价和重点地区地热能勘查等工作,今年启动了干热岩资源调查评价和相关技术研究。新星公司则把地热能开发利用作为三大支柱产业之一,累计投资近8亿元,建成地热供暖面积1000万 m^2 ,成为国内最大的地热能勘查开发一体化企业。