

# 悬臂式掘进机截割减速器壳体固有动特性研究

韩斌慧<sup>1,2</sup>,孙大刚<sup>1</sup>,冯家鹏<sup>2</sup>,李占龙<sup>1</sup>,秦国强<sup>2</sup>

(1. 太原科技大学 机械工程学院,山西 太原 030024;2. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,山西 太原 030006)

**摘要:**为提高悬臂式掘进机截割减速器壳体的抗振能力,分别以有限元法和模态试验研究了截割减速器壳体。以某型悬臂式掘进机截割减速器为例,通过 Solidworks 建立壳体的三维模型,并将其导入 Workbench 进行带预应力约束的模态分析,求解了壳体前六阶固有频率和振型;同时对该减速器壳体进行了模态试验。结果显示,齿轮啮合频率显著低于壳体固有频率,避免了发生共振,且有限元法与模态试验结果相吻合。

**关键词:**悬臂式掘进机;截割减速器;固有动特性;固有频率

中图分类号:TD421.5 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2014)01-0076-04

## Study on Inherent Vibration Features of Cutting Gearbox Casing Applied on Boom Type Roadheader

HAN Bin-hui<sup>1,2</sup>, SUN Da-gang<sup>1</sup>, FENG Jia-peng<sup>2</sup>, LI Zhan-long<sup>1</sup>, QIN Guo-qiang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Taiyuan Research Institute Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** In order to improve the anti-vibration capacity of the cutting gearbox casing applied on the boom type roadheader, a finite element method and a model experiment were applied to study the casing model. Taking a cutting gearbox of a roadheader as an example, the Solidworks was applied to establish a 3D model of the gearbox casing. Then the 3D model was applied to the Workbench for the analysis on the pre-stressed restriction model. The casing inherent frequency and vibration mode of the former 6 stage were solved. Meanwhile a model experiment was conducted on the gearbox casing. The results showed that the gearing frequency of the gear was obviously lower than the inherent frequency of the casing, and the resonance occurred was avoided. The results of the finite element method and the model experiment were well fitted.

**Key words:** boom type roadheader; cutting gearbox; inherent vibration features; inherent frequency

## 0 引 言

掘进机是地下施工实现机械化的核心装备,广泛用于煤炭开采、地下空间利用等领域<sup>[1-5]</sup>。掘进机中的截割减速器是截割电动机和工作装置间的联接部分,起匹配转速和传递转矩的作用;其壳体是轴、内部齿轮、轴承等零件的安装基础和关键承载部件,运行时受齿轮系统的外部激励、内部激励以及误

差激励等各种复杂动载荷作用,产生剧烈振动和强烈噪声,影响传动部件使用寿命和环境卫生<sup>[6-8]</sup>。因此,对截割减速器壳体进行模态分析是预测与控制振动危害的重要手段,对截割减速器减振降噪和安全运行具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。近年来采用有限元法(FEM)截割减速器进行动力学分析得到了广泛应用<sup>[11-12]</sup>。笔者采用 Solidworks 和 ANSYS 的 Workbench 模块求解悬臂式掘进机减速器壳体结构的固

收稿日期:2013-10-11;责任编辑:张 扬 DOI:10.13199/j.cnki.est.2014.01.019

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA06A405);山西省回国留学生人员科研资助项目(2012-073);天地科技股份有限公司创新基金资助项目(KJ-3-SXMJ-05)

作者简介:韩斌慧(1971—),男,山西晋城人,高级工程师,博士研究生。Tel:13934545079, E-mail:hbhzayy@126.com

引用格式:韩斌慧,孙大刚,冯家鹏,等.悬臂式掘进机截割减速器壳体固有动特性研究[J].煤炭科学技术,2014,42(1):76-79.

HAN Bin-hui, SUN Da-gang, FENG Jia-peng, et al. Study on Inherent Vibration Features of Cutting Gearbox Casing Applied on Boom Type Roadheader[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 76-79.

有频率和振型,并利用模态试验进行验证,从而获得可靠的壳体固有动特性,为实现截割减速器壳体动态设计与减振降噪提供理论依据。

## 1 悬臂式掘进机截割减速器结构组成

悬臂式掘进机截割部组成及传动原理如图1所示。截割时,截割电动机的动力通过联轴器传递给截割减速器,其输出轴通过花键连接将动力同轴传递给悬臂段主轴,悬臂段主轴和截割头以端面平键的方式进行连接,从而使截割头获得截割动力。

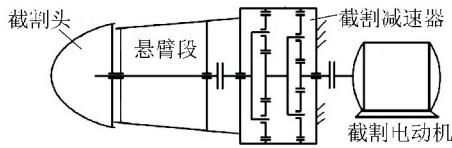


图1 挖进机截割部组成及传动原理

截割减速器在实际工作过程中经常出现输入、输出轴花键磨损、壳体变形和断裂等现象。图2是极端状况下的截割减速器壳体损坏实物,表现为壳体在动力输入端根部折断。

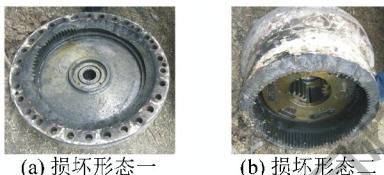


图2 截割减速器输入端壳体断裂

## 2 壳体动力学模型

建立壳体动力学模型,对于n自由度线性系统,运动微分方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

式中: $M$ 、 $C$ 、 $K$ 分别为壳体的离散化质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,  $x$ 为振动位移列阵,即物理坐标;  $\dot{x}$ 为振动速度列阵;  $\ddot{x}$ 为振动加速度列阵;  $F$ 为系统的激励力列阵。

模态分析方法是基于无阻尼系统的主振型坐标代替物理坐标,并将振动微分方程通过解耦得到独立的微分方程组,通过坐标变化求得系统的稳态响应<sup>[13]</sup>。为求解固有频率和主振型,微分方程简化为

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (2)$$

通常,稳态响应设为

$$x = \phi \sin(\omega t + \beta) \quad (3)$$

其中,  $\phi$ 、 $\omega$ 、 $\beta$  分别为响应幅值、固有频率和相位的向量。将式(3)带入式(2),得到方程组

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (4)$$

该方程组存在非零解的充分必要条件是系数行列式为零,即

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (5)$$

式(5)称为系统特征方程,  $\det$  表示求矩阵行列式, 行列式展开后是关于  $\omega^2$  的特征多项式。将求解出的  $n$  个特征值按升序排列  $0 < \omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \dots \leq \omega_i^2 \dots \leq \omega_n^2$ , 其中,  $\omega_i$  为第  $i$  阶固有频率, 将其代入式(4), 求得  $\phi$  对应特征向量  $\varphi_i$ , 即系统的主振型。随着系统复杂程度提高, 系统自由度增加, 上述方程手工求解困难, 故采用数值分析方法进行研究。

## 3 壳体固有动特性有限元分析

### 3.1 三维实体模型

截割减速器模型如图3所示。建模过程中作如下规定。



图3 截割减速器模型

1) 模型以输出轴端盖的端面处为坐标原点,  $X$  轴正向指向输入端;  $Y$ 、 $Z$  轴在输出端盖面, 与  $X$  轴满足右手定则(图3b)。

2) 建模过程中的倒角、圆角、小孔, 螺纹孔等微小结构不会对壳体的质量及刚度产生大的影响, 但却造成网格划分困难, 建模时舍去。这样的简化方式符合有限元建模原则, 可以减少分析时间。

3) 壳体组件采用螺栓将齿圈和两端端盖连接起来, 模型中忽略了连接螺栓, 将端盖与齿圈视为固定约束。

4) 在模型存储格式上, 兼顾了 ANSYS 和 Workbench 的无缝连接, 便于导入。

### 3.2 截割减速器壳体有限元模型

#### 3.2.1 模型分析

导入 Solidworks 模型后, 使用 Repair 命令对模型的点、线、面、体等进行检查修复, 以适应 Workbench 对形体的要求。由于截割减速器壳体形体结构曲面较多, 结构上的孔、沟槽、齿形直接影响结构强度及动特性, 故采用自动划分网格的方式, 局部进行细化。截割减速器壳体有限元分析模型如图4所

示,模型共划分单元 67 354 个,单元节点 119 567 个。材料参数:壳体质量 406.9 kg,弹性模量  $2.1 \times 10^{11}$  Pa,密度  $7850 \text{ kg/m}^3$ ,泊松比 0.3。



图 4 截割减速器壳体有限元分析模型

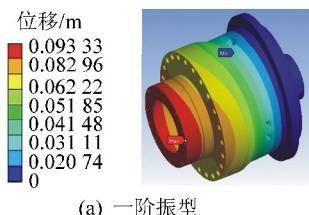
### 3.2.2 模型约束及边界条件

1) 约束设置。为了保持分析结果的正确性和合理性,结合实际工况,壳体输入端固定在叉形架上,因此对其施加固定约束。实际工作中,叉形架在工作过程中会存在来自电动机、液压系统等的激振力而产生振动,从而对壳体振动产生影响,因此计算所得固有频率可能比实际略高。但因截割减速器与叉形架、以及整个机体的质量相比仅占很小一部分,采取这样的约束条件对计算结果影响不大。

2) 预应力设置。输出端连接悬臂段,悬臂段传动截割头,二者都是质量较大的部件。由此,对于截割减速器输出端面来说相当于悬臂梁的固定端,研究过程中根据设计图纸,在输出端面上施加转矩更符合实际工况<sup>[14]</sup>。该转矩为悬臂段及截割头重力产生的弯矩。

### 3.3 有限元分析结果

设定参数后,对壳体的振动模态进行求解。根据经验:壳体在动载荷作用下产生振动时,通常在前几阶低阶振动模态内共振情况比较严重,后面的高阶模态,对壳体的动态性能影响较小,而且在高频段,频率密集度较高,频率间耦合非常严重,模态参数识别的意义不大。因此只需提取前六阶模态进行



(a) 壳体静力作用下变形云图

分析,同时观察预应力作用下的壳体变形情况。壳体静力作用下的变形如图 5 所示。可以看出,静变形为沿 Y 轴的弯曲变形,最大变形量  $3.373 5 \mu\text{m}$ ,小于材料的许用应变,不会出现静力破坏的现象。

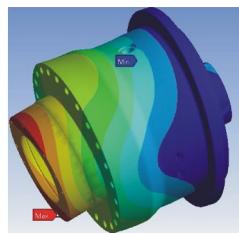
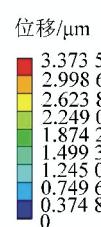


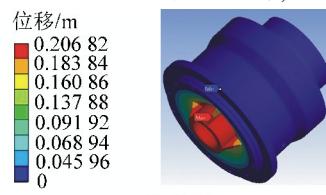
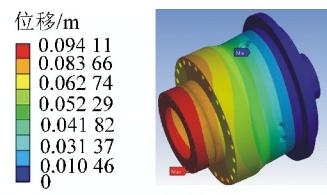
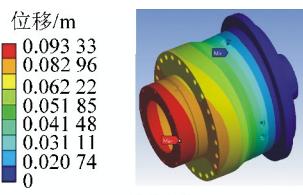
图 5 壳体静力作用下变形云图

壳体前六阶振型云图如图 6 所示。可以看出,一阶振型为输出端沿 Z 轴的弯曲振动,最大变形发生在输出端盖的前后外缘;二阶振型为输出端沿 Y 轴的弯曲振动,最大变形发生在输出端盖的上下外缘;三阶振型为沿 X 轴方向的压缩振动,最大变形发生在输入端盖的加强筋处;四阶振型为绕 X 轴的扭转及沿径向的压缩变形,最大变形发生在输出端盖内缘处;五阶振型为绕 X 轴的扭转及沿 Z 轴的压缩变形,最大变形发生在输出端盖的内缘处;六阶振型为沿 X 轴方向的压缩变形,但是最大变形点由输出端盖后移至齿圈的输出端,轴向变形比较均匀。

### 4 壳体模态试验

为了验证有限元分析结果,对壳体进行模态试验(EXP)。模态分析系统由激振系统、测量系统、分析系统等 3 个部分组成。通过传感器测量壳体各主要部位上的位移振动信号,将采集到的激励信号和响应信号经过数模转换记录到计算机中,用软件系统识别振动系统的模态参数。

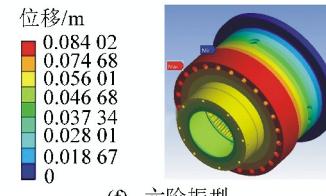
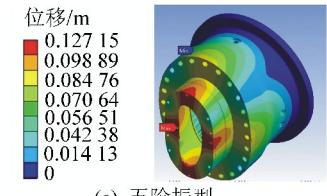
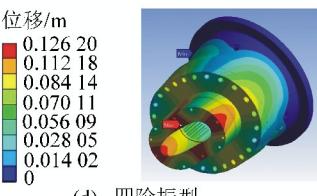
试验模态测试采用力锤单点敲击,获取其他点



(a) 一阶振型

(b) 二阶振型

(c) 三阶振型



(d) 四阶振型

图 6 壳体前六阶振型云图

响应的测试方法,该方法具有操作简便的优点。为避免模态丢失,保证尽可能多的模态被激出,选择壳体的输入端为激励点。测试中,输入力信号及输出响应信号均经数据采集系统进行记录,并用模态分析软件实时观测敲击时测点的频率响应函数。壳体模态试验结果见表1。

表1 壳体模态试验结果

模态 阶次	固有频率/Hz		变化率/%	振型
	FEM	EXP		
一	839.44	801.0	4.57	一阶弯曲
二	843.90	859.1	1.80	一阶弯曲
三	1 095.90	1 075.0	1.90	轴向压缩
四	1 215.00	1 234.0	1.56	压缩扭转组合
五	1 217.20	1 240.0	1.88	压缩扭转组合
六	1 481.70	1 520.0	2.58	轴向压缩

由表1可知,有限元分析(FEM)结果和模态试验(EXP)结果基本一致,说明了截割减速器壳体振动模态有限元分析方法的可行性。计算可得齿轮啮合频率422.06 Hz,远小于壳体一阶振型频率839.44 Hz,因此齿轮啮合产生的激振力不会引起截割减速器壳体共振。

## 5 结 论

1)联合Solidworks和Workbench进行模态分析所得结果,与试验有较好的一致性,是掌握悬臂式掘进机截割减速器壳体固有动特性的有效方法。

2)分析结果表明,悬臂式掘进机截割减速器壳体主要固有频率在839.44~1 481.70 Hz,而啮合振动频率为422.06 Hz,壳体的固有频段完全避开了共振区,截割减速器壳体设计合理。

3)从各阶振型来看,截割减速器壳体局部的最大位移均比较大(最大变形为三阶振型时轴向最大压缩量,为0.183 m),因此可通过增加厚度,改变加强筋尺寸,加大齿圈壁厚等方式提高刚度,从而提高抗振能力。

## 参考文献:

- [1] Aaroglu O, Ergin H. A New Method to Evaluate Roadheader Operational Stability [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006(21):172-179.
- [2] E Mustafa Eyyuboglu, Naci Bolukbasi. Effects of Circumferential

Pick Spacing on Boom Type Roadheader Cutting Head Performance [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005(20):418-425.

- [3] 郝建生.悬臂式重型掘进机关键技术探讨[J].煤炭科学技术,2008,36(4):4-6.
- [4] Gillani S T A, Butt N. Excavation Technology for Hard Rock-Problems and Prospects [J]. Pakistan Journal of Energy and Applied Sciences, 2009,4(1):24-33.
- [5] 张红顺.连续采煤机装运齿轮箱的约束模态试验分析[J].煤炭科学技术,2011,39(12):80-83.
- [6] 宋凯健,代军.采煤机截割部行星机构行星轮模态分析[J].煤矿机械,2013,34(1):109-111.
- [7] 朱新龙,熊禾根.基于Romax的减速箱箱体有限元模态分析[J].机械传动,2013,37(2):94-96.
- [8] 孙建军,王景辉,冯亮,等.掘进机截割部减速器箱体有限元模态分析[J].煤矿机械,2011,32(8):79-80.
- [9] 焦丽丽,李强.固体火箭发动机壳体的模态分析[J].内蒙古工业大学学报,2006,25(2):117-120.
- [10] 张建广.纵轴式掘进机截割人工岩壁的振动试验研究[J].煤炭科学技术,2011,39(8):76-78.
- [11] 钟军,刘志峰,王雁,等.基于有限元方法的直齿轮传动系统的模态仿真分析[J].机械设计与制造,2013(6):218-220.
- [12] 熊勇刚,李顺,夏天军.摩托车发动机壳体的有限元模态分析[J].湖南城市学院学报:自然科学版,2012,21(3):39-43.
- [13] 王平懋,何敬玉,赵丽芳,等.罗茨鼓风机壳体振动模态分析[J].噪声与振动控制,2010(1):15-17,21.
- [14] 孙建军.悬臂式掘进机截割部减速器动态特性研究[D].长春:吉林大学,2011.

(上接第59页)

- [9] 徐精彩,余锋,李树刚,等.石嘴山二矿煤样程序升温自燃性测试研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2003,22(2):148-150.
- [10] 张进军,任宏安,张永涛,等.基于程序升温条件下大佛寺煤样自燃特性实验研究[C]//第三届全国煤矿机械安全装备技术发展高层论坛暨新产品技术交流会论文集.张家界:第三届全国煤矿机械安全装备技术发展高层论坛暨新产品技术交流会,2012:248-251.
- [11] 许波波,张人伟.煤层氧化自燃指标气体分析[J].煤矿安全,2009,40(2):33-34.
- [12] 屈永利,叶东生,董养存.王村煤矿5号煤层自燃程序升温实验研究[J].陕西煤炭,2011,30(5):55-57.
- [13] 石建丽,张人伟,毕言峰.七五煤矿煤层氧化自燃指标气体的选择[J].煤矿安全,2012,43(3):142-146.
- [14] 梁运涛.煤炭自然发火标志气体指标体系研究[C]//2007年全国煤矿安全学术年会会议资料汇编.深圳:2007年全国煤炭安全学术年会,2007.
- [15] 鄢云龙.星村矿煤自燃预报气体指标优选[J].陕西煤炭,2009,28(1):47-49.