

# 基于有限元方法主轴箱振动的网格敏感性分析

杨华文,叶岳松,段福斌

(浙江科技学院 机械与汽车工程学院,杭州 310023)

**摘要:**为研究主轴箱的振动特性,采用基于有限元方法的COSMOS软件对绕线机的主轴箱进行模态分析,模拟了主轴箱前10阶固有频率和对应的振动模态。分析了网格精度对振动模态分析结果的影响,最粗网格的体积约为最细网格的43倍。网格精度对前5阶共振频率的影响较小,对后5阶共振频率的影响较为明显,最大误差达5.7%;在对精度要求不高的情况下,采用系统默认的网格精度可满足模态分析要求,基准误差中的最大误差不超过2.6%。

**关键词:**有限元方法;COSMOSWorks;网格精度;主轴箱;模态分析

中图分类号:TH113;TB53

文献标识码:A

文章编号:1671-8798(2008)04-0249-05

## Mesh sensitivity analysis of vibration in spindle box based on finite element method

YANG Hua-wen, YE Yue-song, DUAN Fu-bin

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In order to investigate the vibration characteristics of the spindle box in a coiling machine, the software named COSMOS which is based on finite element method is adopted to simulate the resonant vibrations of the first 10 orders. The effects of the mesh resolution on numerical results are explored. The largest grid size is about 34 times larger than that of the smallest one. The mesh resolution gives minor contributions in the first 5 orders resonant frequencies, whereas affects obviously the last 5 orders resonant frequencies, showing a maximum error ratio of 5.7%. In the circumstance which precision is not strictly limited, the default mesh resolution is satisfied to the vibration analysis, showing an error ratio of 2.6% in the base error.

**Key words:** finite element method; COSMOSWorks; mesh resolution; spindle box; mode analysis

研究结构或机器部件的振动特性,通常采用模态分析的方法,得出结构的固有频率和振型,以分析设计结构或零件工作时的安全性能。数值模拟方法是现代机械设计制造的重要研究手段,与实验分析

方法相结合能大量节省设计开发周期和开发费用。目前,研究机械结构和机器部件的振动特性大多采用基于有限元的ANSYS分析软件。ANSYS功能强大,但存在着三维建模困难的缺点,尤其是结构复杂

的箱体类结构件,通常采用第三方建模软件建模再导入 ANSYS<sup>[1-2]</sup>。另外,ANSYS 分析软件需要扎实的固体力学背景知识,其使用复杂繁琐,不利于工程人员的广泛应用。目前,一些简易可靠的分析软件正被国内外学者推广,COSMOS 分析软件就是其中的优秀代表,如同济大学刘晓东、吴入军利用 COSMOSWorks 成功分析了车床主轴箱的振动特性<sup>[3]</sup>,国防科学技术大学的聂旭涛等利用 COSMOSWorks 成功对广泛应用于航空、航天、航海和兵器领域的三轴稳定平台进行了优化,使得平台的设计更具可靠性和稳定性<sup>[4]</sup>。

前人的研究为 COSMOS 的应用奠定了坚实的基础,但是值得注意的是,根据笔者的文献检索,采用基于有限元的 COSMOS 分析振动模态时网格类型的选择和划分研究的文献报道尚不多见。对于基于网格法的有限元方法,其网格的质量将决定分析的成败和结果的精确性<sup>[5-6]</sup>。国外的相关研究表明,在研究复杂的几何体时,在结构变化大的复杂区域必须采用更精细的网格<sup>[7]</sup>;在整体上网格质量对模拟结果产生重要的影响,从而需要不断研究新的鲁棒性更好的算法<sup>[8-9]</sup>,因此,有必要进一步研究网格质量对模拟结果的影响。COSMOS 采用了快速有限元(FFE:Fast finite Element)算法技术,具有计算速度快、解题时占用磁盘空间少、使用方便、分析功能全面、与其他 CAD/CAE 软件集成性好等优点,已经成为目前工业界对零件及装配体进行理论分析的主要工具。

本研究主要采用 COSMOSWorks 分析了某绕线机主轴箱的共振模态<sup>[10]</sup>,进而对网格精度进行了网格敏感性分析,最粗网格为最细网格的近 43 倍,通过分析对比得出了 COSMOSWorks 网格精度对模态分析结果精度的影响的若干结论,为工业设计及后续的研究工作提供了重要的参考。

## 1 数学模型

对于某一结构体,其结构的动平衡方程组:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F \quad (1)$$

式(1)中: $M$ 、 $C$ 、 $K$ 分别为结构的整体质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $F$ 为结构的整体载荷向量。当干扰力为零,结构的无阻尼自由振动微分方程组为:

$$M\ddot{\delta} + K\delta = 0 \quad (2)$$

在自由振动时

$$(K - \omega^2 M)\delta_i = 0 \quad (3)$$

由于结构自由振动时,各结点振幅  $\delta_i$  不可能全为零,存在非零解,故

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

结构离散化后,有  $n$  个自由度,则  $K$  和  $M$  均为  $n$  阶方阵,式(2)为一关于  $\omega^2$  的  $n$  次一元代数方程,称为频率方程,由此解出结构的  $n$  个固有频率  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 。

对于固有频率  $\omega_i$ ,由式(3)可确定一组各结点的振幅值  $(\delta_i)_i$ :

$$(\delta_i)_i = \begin{bmatrix} (\delta_i)_i^1 \\ (\delta_i)_i^2 \\ \vdots \\ (\delta_i)_i^n \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

它们相互之间保持固定的比值,但绝对值可任意变化,由此构成一个向量,称为特征向量。在振动分析中  $\omega_i^2$  和  $(\delta_i)_i$  为结构的第  $i$  个固有频率和与其对应的主振型。

## 2 箱体模态分析结果

箱体是机械结构中的常用零件,在结构中起到支撑基体的作用,其结构特点不仅影响到加工的工艺性,而且对支撑刚度和振动性能也将产生严重影响,在很大程度上决定着整个设备的正常平稳运行。本研究以主轴工作极限转速为 12 000 r/min 的某绕线机主轴箱作为分析对象,其结构和主要尺寸如图 1 所示,四面体网格如图 2 所示。

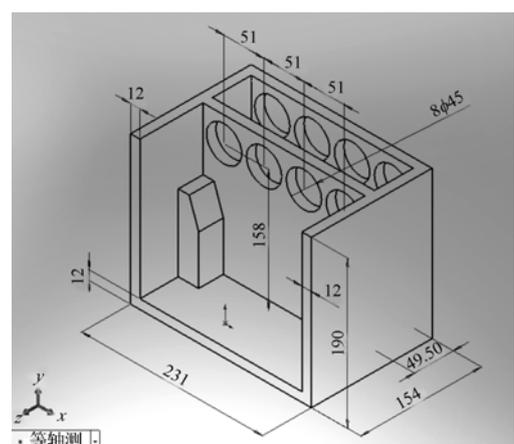


图 1 绕线机主轴箱模型

Fig.1 Model of main spindle box in the coiling machine

图 3 和图 4 给出了前 10 阶振型中典型的 2 种振型。通过对各阶振型的分析可知,当发生共振时,各阶的共振形态各具特点。第 1 阶共振形态主要表现在主轴箱的  $+x$  方向壁面向外弯曲, $-z$  方向后壁面向外弯曲;第 5 阶共振形态表现为  $-z$  方向的 2 个壁

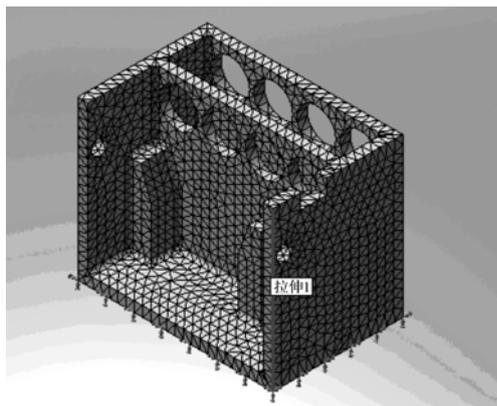


图 2 非规则网格

Fig.2 Non-regular mesh

面产生严重的波浪形变扭曲。第 1 阶共振形态是绕线机主轴箱开发设计最为关心的振动形态,从图 3 可见,发生第 1 阶共振时,变形相当严重,特别是 - z 方向后壁面向外弯曲。变形轻微时将导致 4 个工位所绕线圈品质不稳定,影响所绕线圈的每匝间距,甚至影响到线圈的排列次序。

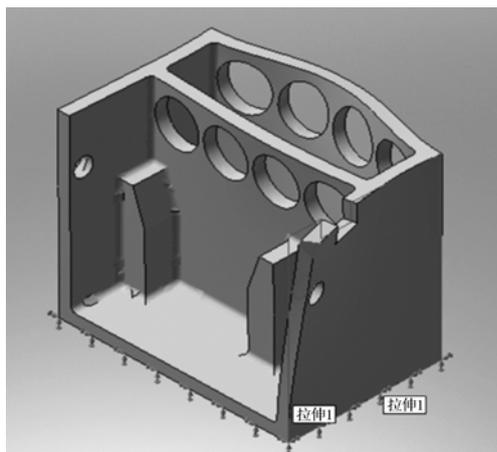


图 3 第 1 阶共振形态

Fig.3 The first order resonant mode

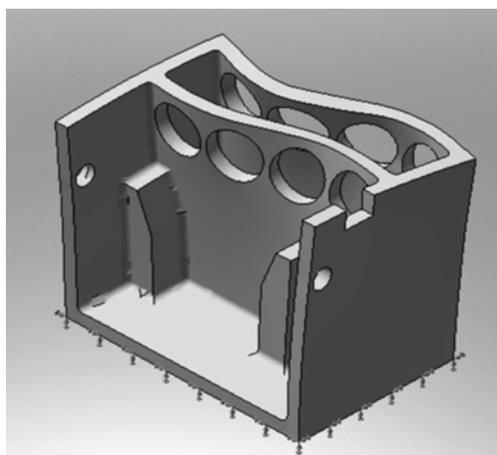


图 4 第 5 阶共振形态

Fig.4 The fifth order resonant mode

图 5 和图 6 给出了主轴箱各阶的共振频率和变形比例,其网格大小采用系统默认的网络精度。由图 5 可见,第 1 阶到第 3 阶共振频率介于 767.11 Hz 和 918.17 Hz 之间,小于 1 000 Hz。考虑到设备能稳定安全地工作,必须降低设备的工作转速,在维持 5 倍的安全系数时,主轴转速需要降低到 9 205 r/min 以内,才能避免第 1 阶共振。如需达到绕线机的极限工作转速,则必须通过重新设计,提高主轴箱基频,使第 1 阶共振频率在 1 000 Hz 以上。由图 6 可见,并非每个共振模态的变形比例都是一致的,某些共振模式产生严重的主轴箱变形,某些共振模式产生较为轻微的变形;严重的共振模态为第 5 阶、第 8 阶、第 9 阶和第 10 阶,其变形比例分别为 2.5%、1.6%、1.3% 和 2.1%;最为轻微的共振模态为第 6 阶,变形比例为 0.9%。

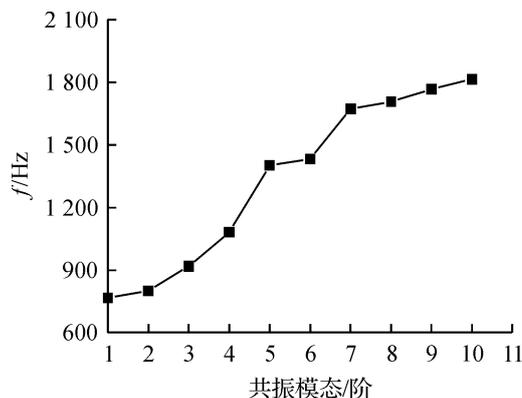


图 5 前 10 阶共振频率

Fig.5 Resonant frequencies of the first 10 order mode

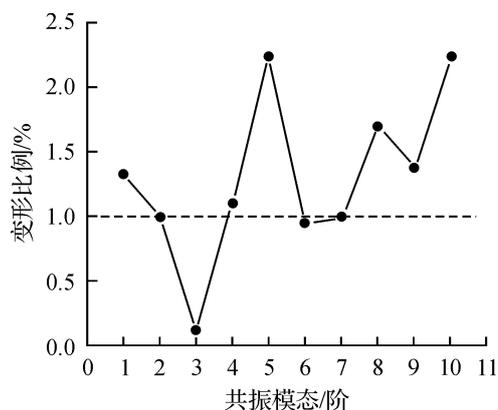


图 6 前 10 阶共振变形率

Fig.6 The ratio of deformation of the first 10 order mode

### 3 网格质量敏感性分析

COSMOSWorks 在频率分析中,其网格的划分可以选择系统默认的中等精度的网格,也可以通过拖动

游标或直接输入网格尺寸进行人工设定,网格划分的精密程度将影响运算的时间和结果的精确性。借鉴前人的研究<sup>[11-12]</sup>,同时为确定 COSMOSWorks 网格

质量的敏感性,为后续设计或进一步研究工作提供参考,有必要进行网格大小从粗到细的模式分析,以对比网格精度对各阶共振模态的影响,其结果如表 1 所示。

表 1 网格质量敏感性分析结果

Table 1 Sensitivity analysis of mesh resolution

模态/阶	共振频率 $f/\text{Hz}$					极大误差/%	基准误差/%
	21×1.05	18×0.9	12.5×0.63*	9×0.45	6×0.3		
1	787.47	783.8	767.11	760.45	757.22	3.8	1.3
2	823.55	820.29	800.98	794.04	790.6	4.0	1.3
3	933.66	929.36	918.17	911.45	907.82	2.7	1.1
4	1 101.6	1 096.5	1 080.4	1 070.3	1 064.8	3.3	1.4
5	1 413.1	1 411.1	1 400.4	1 395.3	1 391.8	1.5	0.6
6	1 478.9	1 474.2	1 432	1 406.5	1 394.5	5.7	2.6
7	1 712.9	1 703.2	1 672.5	1 659.6	1 652.6	3.5	1.2
8	1 748.3	1 739.3	1 706.6	1 693.9	1 686.2	3.5	1.2
9	1 803.5	1 796	1 766.1	1 755.3	1 749.7	3.0	0.9
10	1 853.5	1 847.4	1 813.9	1 801	1 794.4	3.1	1.0

注:\* 系统默认的网格大小。

从分析结果可以看出,网格从粗到细,分析出的箱体前 10 阶共振频率均逐渐变小,但变化幅度在不同的模态有不同的差别。首先定义 2 个概念:极大误差定义为最粗网格精度的计算结果与最细网格精度的计算结果之间的误差;基准误差定义为当前网格精度的计算结果与系统默认网格精度的计算结果之间的误差。在极大误差和基准误差中,不同共振模态有不同的极大误差和基准误差,因此极大误差中存在最大误差和最小误差;同样,基准误差中亦存在最大误差和最小误差。由最粗(21 mm×1.05 mm)与最细(6 mm×0.3 mm)网格的计算结果可见,极大误差中第 6 阶共振模态获得了最大误差,为 5.7%,第 5 阶共振模态获得了最小误差,为 1.5%,前 10 阶共振频率平均误差为 3.4%;换言之,在网格体积缩小约 43 倍的情况下,计算结果精度提高不到 6%。由最细(6 mm×0.3 mm)与系统默认的网格大小(12.5 mm×0.63 mm)的计算结果可见,基准误差中的最大误差为 2.6%、最小误差为 0.6%(第 5 阶),基频误差为 1.3%,平均误差为 1.26%。由上述分析可见,采用默认的网络精度完全能够符合一般性的要求。

图 7 给出了各种粗细网格分析结果。由图 7 可见,网络精度对各阶频率的敏感度并不相同,前 5 阶曲线几乎重合,没有明显的差别,说明网络精度对前 5 阶共振频率的影响非常小。然而,从第 6 阶共振模态开始,计算结果出现了明显的差别,这说明了网络精度对后 5 阶共振频率的影响明显较大,但误差

在 6% 以内。值得注意的是,从计算机 CPU 耗时角度出发,不同精度的网格,其 CPU 耗时存在非常明显的差别,对于普通配置的 PC 机,最粗网格(21 mm×1.05 mm),10 min 内即可完成;最密的网格(6 mm×0.3 mm),分析本研究的箱体模型的共振特性需 2 h 以上的 CPU 耗时,其占用内存更大。综上所述,采用 COSMOSWorks 进行模态分析时,网络精度对前 5 阶共振频率的影响较小,对后 5 阶共振频率的影响较为明显,极大误差中的最大误差达 5.7%;最粗网格的体积约为最细网格的 43 倍,计算耗时为最细网格的 0.1 倍以内,极大误差中的基频误差为 3.8%;在对精度要求不高的情况下,采用系统默认的网络精度可满足模态分析要求,基准误差中的最大误差不超过 2.6%。

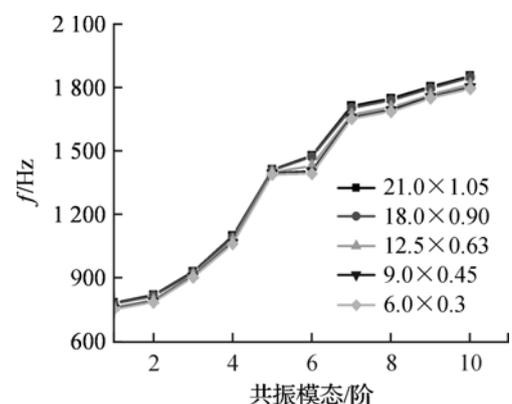


图 7 不同网络精度下的计算共振频率

Fig.7 Simulated resonant frequencies in different mesh resolutions

## 4 结 语

通过基于有限元方法的 **COSMOS** 进行了某一型号主轴箱的振动模态分析及其网格敏感性分析,获得了以下结论:

1) 当发生共振时,主轴箱的各阶共振形态各具特点。前3阶共振频率小于1 000 Hz,在维持5倍的安全系数时,必须降低设备的工作转速。主轴转速需要降低到9 205 r/min以内,才能避免第1阶共振。

2) 主轴箱发生共振时,并非每个共振模态的变形比例都是一致的,某些共振模式产生严重的主轴箱变形,某些共振模态变形较小,最大的变形比例超过2.5%,为第5阶共振。

3) 采用 **COSMOSWorks** 进行模态分析时,网格精度对前5阶共振频率的影响较小,对后5阶共振频率的影响较为明显,极大误差中的最大误差达到5.7%;最粗网格的体积约为最细网格的43倍,计算耗时为最细网格的0.1倍以内,极大误差中的基准误差为3.8%;在对精度要求不高的情况下,采用系统默认的网格精度可满足模态分析要求,基准误差中的最大误差不超过2.6%。

## 参考文献:

- [1] 雷亚勇,张韞韬,刘鑫.CAD/CAE/CAM的协同发展研究[J].机械工程与自动化,2008(4):191-193.
- [2] 舒敏,洪荣晶,黄筱调.高速铣齿机床主轴箱结构的有

限元法分析[J].设计与研究,2005(6):27-29.

- [3] 刘晓东,吴入军.车床主轴箱模态分析[J].机械设计与制造,2007(2):24-25.
- [4] 聂旭涛,范大鹏.基于 **COSMOSWorks** 的三轴稳定平台框架的优化设计[J].机电工程技术,2005(1):74-76.
- [5] 邓晓龙,赵新泽.不同网格密度的柴油机气缸体有限元模态分析[J].拖拉机与农用运输车,2005(3):53-55.
- [6] 张少雄,王利永,孔泉.网格粗细对于有限元模态分析计算的影响[J].武汉理工大学学报,2006(5):92-94.
- [7] FRANZONI L P, PARK C D. An illustration of analytical/numerical matching with finite-element analysis for structural vibration problems[J]. Journal of acoustical society of America, 2000(6):2856-2864.
- [8] KAKULA H, LEINO Y, PITKARANTA J. Scale resolution, locking, and high-order finite element modeling of shells [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1996(133):157-182.
- [9] FARHAT C, HARARI I, FRANCA L P. The discontinuous enrichment method[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2001(190):6455-6479.
- [10] 杨华文,卢炎麟,段福斌.基于有限元的绕线机主轴箱的振动模态分析[J].机械工程师,2008(3):101-103.
- [11] 才漪,闫再友.ANSYS网格划分技巧与网格信息提取技术[J].浙江科技学院学报,2007,19(3):193-196.
- [12] 皇甫玉高,李群宏,郭磊.一类悬臂系统全局混沌同步研究[J].浙江科技学院学报,2007,19(2):81-85.