基于有限元分析的瓦楞机支撑侧板结构优化设计

吴斌方[1]，熊华[1]，张静[2]，袁博[1]
（1. 湖北工业大学，武汉 430068；2. 武汉理工大学，武汉 430070）

摘要：目的 研究瓦楞机支撑侧板在复杂应力作用下的动态特性。**方法** 通过Pro/E建立瓦楞机支撑侧板模型，运用有限元分析方法对侧板原结构和优化后的结构进行模态分析，并将前后模态分析结果进行对比。**结果** 得出了侧板原结构和优化后的结构的前5阶固有频率和模态振型图，分析结果显示侧板原结构产生了扭转振动、摆动和弯曲变形，优化后的侧板结构变形减小，刚度增加，固有频率提高约25%，质量减轻约83 kg。**结论** 侧板结构优化是比较合理可靠的，可以为结构优化设计提供一定的参考依据。

关键词： 支撑侧板；有限元分析；模态分析；结构优化
中图分类号： TP391.9 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2014)05-0062-05

Structural Optimization of Supporting Panel for Corrugators Based on Finite Element Analysis

WU Bing-fang[1], *XIONG Hua*[1], *ZHANG Jing*[2], *YUAN Bo*[1]
(1. Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: Objective To study the dynamic characteristics of the support panel for corrugator under complex stress. **Methods** A model was built for the supporting panel for corrugators using Pro/E, modal analysis was conducted for the original structure and the optimized structure of the support panel using the finite element analysis, and the results of modal analysis before and after optimization were contrasted. **Results** The five-order natural frequencies and mode shapes were obtained for the original structure and the optimized structure of the panel. The analysis results revealed that the original structure of the panel suffered from torsional vibration, swing and bending deformation, while the optimized panel structure showed lower degree of deformation and increased stiffness, with about 25% increase in the natural frequency and about 83 kg loss in the weight. **Conclusion** The structural optimization of the panel was reasonable and reliable, which provides reference for structural optimization design.

KEY WORDS: panels; finite element analysis; modal analysis; structural optimization

瓦楞机箱体是瓦楞机系统的重要组成部分，是安装轴承、瓦楞辊、导纸辊等零部件的基础。它由底板、2个侧板和3根拉梁通过螺栓连接组成，2个侧板是支撑瓦楞机运行的主要承载部分，应具有足够大的刚度、强度和良好的振动特性。当瓦楞机工作时，由于受到外界激励必定会产生振动，侧板要承受各种载荷并产生一定应力和变形。过大的应力可能导致侧板产生裂纹，过大的变形将对瓦楞辊传动产生影响[1-2]，因此在侧板结构设计中有必要对箱体侧板整体进行模态分析。

收稿日期： 2013-07-23
作者简介： 吴斌方(1961—)，男，湖北武汉人，硕士，湖北工业大学副教授，主要研究方向为机电一体化。

1　有限元模态分析原理

模态分析是将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换为模态坐标,使方程组解耦,成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程,以便求出系统的模态参数。坐标变换矩阵为模态矩阵[3],其每列为模态振型。在机械结构设计中,经常要考虑弹性结构的固有特性,即振动模态。每一个模态具有各自独特的模态振型、固有频率和阻尼比。模态分析可以得到结构模态参数,从而确定结构在某一频率范围内的各阶主要模态的特性,就可以推测结构在此频率范围内各种振源作用下产生的实际振动响应。

2　侧板有限元分析过程

2.1　建立侧板三维模型

侧板的实际结构复杂,局部有很多加强筋,几何尺寸变化较大,最大尺寸为 1600 mm,最小尺寸为 30 mm,几何形状不规则。Ansys 虽然也有建模的功能,但对于复杂零件的建模却事倍功半,而选用功能强大的 Pro/E 就可以建立复杂的模型。侧板主要参数见表 1。为了便于有限元计算以及其后的优化工作,在建模过程中需要对许多不影响侧板刚度的结构(如小倒角、小圆弧、小棱角等)进行必要的简化。简化后的侧板结构见图 1。

表 1　侧板参数

Tab.1 The panel parameters

整体尺寸 / mm	加强筋尺寸 / mm	侧板质量/kg	铰链孔直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
1600×1500×200	140×320×30	1663	70	250	300

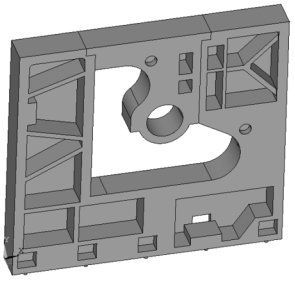


图 1　侧板三维模型

Fig. 1 3D model for the panel

2.2　侧板三维模型导入 Ansys 10.0

Pro/E 5.0 与 Ansys 10.0 之间的数据交换一般有 3 种格式:IGES,ACIS,Parasolid,它们是工程数模软件数据间转换的常用格式[4]。通过比较笔者最终选择通过 Parasolid 格式,来实现 Ansys 10.0 与 Pro/E 5.0 之间数据的交换。Parasolid 格式可以支持实体建模、广义单元建模以及自由曲面建模,可以转换复杂组件模型,可以修改转换后数据,支持布尔运算。通过 Parasolid 格式导入到 Ansys 10.0 后,可以输出实体模型,划分网格单位保持一致,需要的存储空间较小。首先,在 Pro/E 5.0 建立侧板模型→保存副本→选择 Parasolid 格式→选中壳和实体→保存(注意必须保存在英文文件夹),然后在 Ansys 10.0 选文件 Import,选中侧板文件,就可以打开侧板。

2.3　确定侧板材料特性和有限元单元类型

文中研究的瓦楞机侧板材料为 HT300,它具有良好的减振性和耐磨性,并且灰铸铁模型为各向同性材料,即在不同方向测量的物理性质相同。查手册知,弹性模量 $E=1.25\times10^{11}$ Pa,泊松比 $\upsilon=0.25$,密度 $\rho=7200$ kg/m^3。

考虑到侧板结构的复杂性(加强筋、圆孔、凸台),文中选取单元类型 Solid 92(此单元由十节点定义,每个节点有 3 个自由度:节点 x,y 和 z 方向位移),它能够很好地模拟弯曲的边界,特别适用于边界不规则的模型。Solid 92 几何模型见图 2。

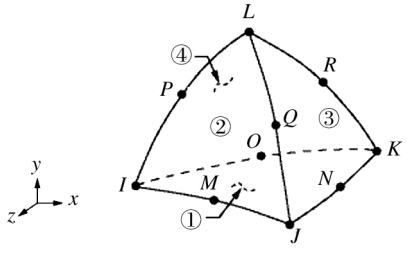


图 2　Solid 92 单元类型

Fig. 2 Solid 92 element

2.4　确定侧板边界条件

施加边界条件就是约束结构的自由度,在进行动态分析之前,如果不能正确地对结构施加约束,将导致结构局部过刚(比如焊接处、螺栓连接处)或者计算不收敛,最终影响计算结果的准确性。文中侧板与底座采用 10 个直径为 ϕ20 mm 的螺栓连接在一起,所

以应该对侧板底部施加面约束。

2.5 侧板模型网格划分

考虑到侧板结构的复杂性(加强筋、圆孔、凸台),采用控制网格尺寸划分网格的方法。通过 Ansys 控制网格尺寸为 0.04 mm,网格划分后包括 57 141 个节点,32 917 个单元。侧板网格划分模型见图 3。

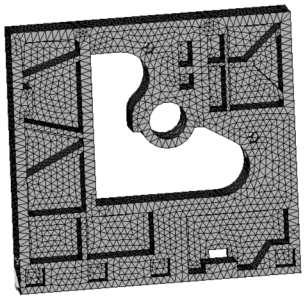


图 3 侧板网格划分

Fig. 3 Meshing

3 侧板模态分析

3.1 模态分析方法选取

结构动力学分析包括模态分析、谱分析和谐响应分析等,而模态分析是其他动力学分析的第 1 步,它主要研究结构的固有频率和振型[5—10]。对侧板进行模态分析可以找出结构的薄弱区和与其连接结构发生共振的频率,是侧板结构优化设计的依据。常用模态分析方法有降解法、子空间迭代法、分块蓝索斯法(Block Lanczos)等。

文中采用 Block Lanczos 法提取侧板的固有频率,它可以在很多场合下使用(具有实体单元或者壳单元的模型),可以提取复杂模型 0 ~ 40 阶以上模态振型,在求解特征值时,Block Lanczos 法一般采用稀疏矩阵方程(零元素比较多的矩阵),速度比子空间法更快,不足之处是要求内存空间比较大。

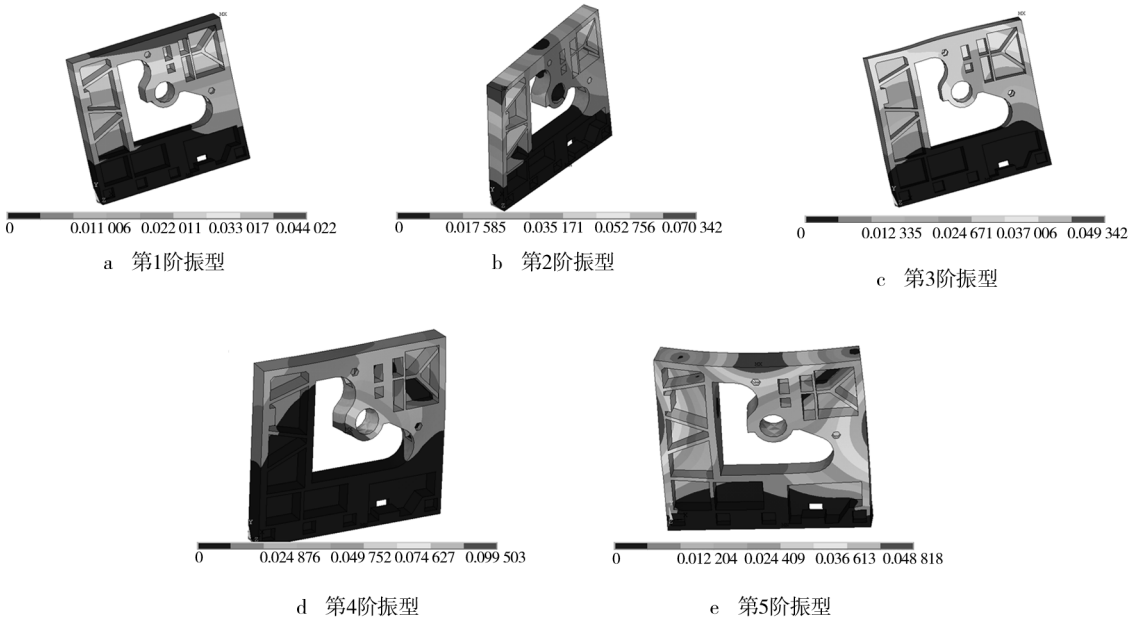
3.2 侧板模态分析结果

在侧板整体模态分析中,由于高阶模态能量占比太低(即阻尼比较高),所以只提取了侧板前 5 阶固有频率和振型结果见表 2。前 5 阶模态振型云图见图 4。

表 2 侧板前 5 阶固有频率

Tab. 2 First five-order natural frequencies

模态阶数	振型	固有频率/Hz
1	侧板上部沿 z 方向前后摆动	34.961
2	侧板绕 y 轴转扭和左侧加强筋弯曲变形	73.186
3	侧板沿 x 方向左右摆动	154.56
4	中间吊耳摆动	173.28
5	侧板整体绕 y 轴扭转和边缘向中心弯曲	212.10



a 第1阶振型 b 第2阶振型 c 第3阶振型

d 第4阶振型 e 第5阶振型

图 4 侧板前 5 阶模态振型

Fig. 4 The five-order modal shape of the panel

4　侧板模态计算结果分析

1）从表 2、图 4 可以看出,一阶侧板的固有频率较低,只有 34.961 Hz,容易引起振动。振型主要是侧板上部分沿 z 方向前后摆动,侧板顶部摆动幅度最大,侧板与底座连接处摆动幅度最小,从下往上摆动幅度依次增大,摆动会造成结构连接处的疲劳破坏。

2）二阶振型主要是侧板的扭转变形和加强筋的弯曲变形,扭转中心在侧板中部,扭转变形最大的位置在左右顶角,二阶振型增大了侧板的扭转,导致上下瓦楞辊接触处错位,影响瓦楞纸的质量。加强筋的弯曲变形主要发生在油缸底座处,可能是加强筋布局不合理引起的,对局部支撑刚度有影响。

3）三阶振型主要是侧板沿 x 方向左右摆动,侧板顶部摆动幅度最大,与一阶振型类似,只是摆动方向不同。侧板左右摆动将使上下瓦楞辊承受周期冲击,加剧磨损。

4）四阶振型主要是侧板中部吊耳摆动,它与侧板用螺栓连接在一起,吊耳摆动幅度过大将产生振动,导致螺栓连接松动或者螺栓连接被破坏。

5）五阶振型主要是侧板顶部和左右两侧变形最大,变形趋势为向侧板中心弯曲,对侧板局部刚度有影响。

综合以上前 5 阶模态振型分析可知,侧板模态振型有扭转振动、摆动变形、弯曲变形,这将对侧板强度和刚度有影响,侧板的主要作用是支撑瓦楞辊的正常运转,扭转振动和摆动将会对瓦楞齿啮合精度产生影响,最终影响瓦楞纸的质量。在侧板变形较大的位置应该增加其刚度,使变形减小,从而减小侧板的振动。

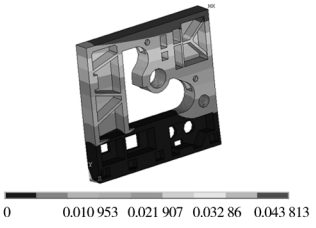
5　侧板结构改进后模态分析

从上面分析可以看出,侧板的固有频率较低、振动变形较大,特别是顶部和左侧变形最大,所以需要改进侧板结构,提高侧板的固有频率和刚度,减小变形。具体改进措施:将左侧壁厚度增加 3 mm,左侧油缸底座处加强筋厚度增加 3 mm,在中间吊耳底部增加支撑,侧板底部比较稳定,可以在局部适当挖空。对改进后的侧板结构进行模态分析[11—15],其固有频率见表 3,前 5 阶振型见图 5。

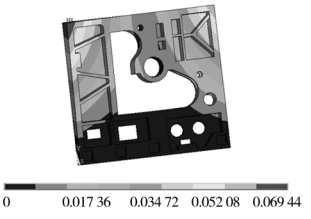
表 3　侧板改进后的固有频率

Tab. 3 The improved natural frequencies

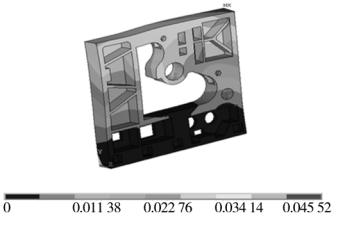
模态阶数	振型	固有频率/Hz
1	侧板上部沿 z 方向前后摆动	43.170
2	侧板绕 y 轴转扭和左侧加强筋弯曲变形	91.880
3	侧板沿 x 方向左右摆动	188.71
4	中间吊耳摆动	220.01
5	侧板整体绕 y 轴扭转和边缘向中心弯曲	272.10



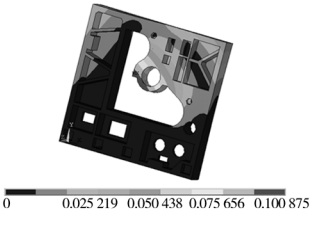
a　第1阶振型



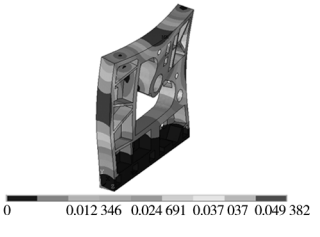
b　第2阶振型



c　第3阶振型



d　第4阶振型



e　第5阶振型

图 5　改进后侧板前 5 阶模态振型

Fig. 5 The five-order modal shape of the improved panel

侧板原结构和改进后结构的模态参数比较见表4。从表4可以看出,改进后侧板的固有频率提高25%左右,变形减小,振动降低,改进后侧板的质量为1580 kg,减轻大约83 kg,节约了成本,侧板的刚度和抗振性也得到了提高。

表4 模态参数对应表

Tab.4 Corresponding modal parameters

阶数	原结构频率/Hz	改进后结构频率/Hz
1	34.961	43.17
2	73.186	91.88
3	154.56	188.71
4	173.28	220.01
5	212.1	272.1

6 结语

1) 通过实际操作对比3种数据交换格式,最终选择Parasolid格式实现Pro/E 5.0与Ansys 10.0之间的数据交换,方便快捷,几乎没有模型缺失,最大优点为占用内存少。

2) 从侧板三维模型可以看出,侧板尺寸变化较大,长度与厚度比达到8∶1,容易造成扭转振动和摆动变形,在不改变尺寸的情况下,必须增加侧板上部分的支撑刚度。

3) 优化后侧板的固有频率提高25%左右,侧板刚度提高,整体振动降低,最大变形减小,从而减小了因侧板变形对瓦楞辊啮合精度带来的影响,提高了瓦楞纸质量,并且质量减轻83 kg,节约了成本。

4) 优化后的侧板前5阶振型与原结构比较,振型基本相同,最主要的振动变形在上部分,底部最稳定,说明侧板总体性能比较稳定。

参考文献:

[1] 朱建萍. 包装机械设计方法研究[J]. 包装工程,2007,28(7):97—99.
ZHU Jian-ping. On the Design Methods of Packaging Machinery[J]. Packaging Engineering,2007,28(7):97—99.

[2] 熊桂超. 细微瓦楞纸板生产线关键机构的运动学和动力学仿真[D]. 广州:华南理工大学,2011.
XIONG Gui-chao. On Kinematic and Dynamic Simulations of Key Mechanisms in Micro-corrugated Board Production Line[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2011.

[3] 陈奎孚. 机械振动基础[M]. 北京:中国农业大学出版社,2011:156-162.
CHENG Kui-fu. Mechanical Vibration Foundations[M]. Beijing:China Agricultural University Press,2011:156—162.

[4] 傅中裕,杨晓京. ANSYS与Pro/ENGINEER之间模型数据转换的研究[J]. 制造业信息化,2005,34(2):51—53.
FU Zhong-yu, YANG Xiao-jing. A Study of ANSYS and Pro/ENGINEER Modal Data Conversion[J]. Manufacturing Information,2005,34(2):51—53.

[5] 王庆五,左畴,胡仁喜. ANSYS10.0机械设计高级应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2006:101—128.
WANG Qing-wu,ZUO Chou,HU Ren-xi. ANSYS10.0 Mechanical Design Advanced Application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2006:101—128.

[6] 王增武,靳晓雄,何剑锋. 基于有限元某轿车左前门的模态刚度分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2011(5):42—45.
WANG Zeng-wu, JIN Xiao-xiong, HE Jian-feng. Modal Stiffness Analysis of Left front Door for Car Based on Finite Element[J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition),2011(5):42—45.

[7] 盛太和,喻海良,范训益. ANSYS有限元原理与工程实用实例大全[M]. 北京:清华大学出版社,2006:3-16,89—122.
SHENG Tai-he, YU Hai-liang, FAN Xun-yi. ANSYS Finite Element Theory and Engineering Examples Collections[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006:3—16,89—122.

[8] 李洁,阮军. 变速箱体网格划分策略的研究[J]. 沈阳理工大学学报,2009(3):87—90.
LI Jie,RUAN Jun. A Study of Meshing Strategy for Gearbox[J]. Shenyang University of Technology Journal,2009(3):87—90.

[9] 崔中,文桂林,陈桂平,等. 高速磨床整机动态特性研究[J]. 中国机械工程,2010(2):782—787.
CUI Zhong,WEN Gui-lin,CHEN Gui-ping, et al. On Dynamic Characteristic Analysis of High Speed Grinder[J]. China Mechanical Engineering,2010(2):782—787.

[10] NOBUO T,et a1. Analysis and Experiment on the Vibration Transmission in a Single Stage Gearbox[J]. JSME Inter Conf on Motion and Power trails,1991(10):104—109.

[11] 陈学东,郭合忠,余显忠. 光刻机主基板的动态特性分析及优化[J]. 中国机械工程,2007(21):45—70.
CHEN Xue-dong, GUO He-zhong, YU Xian-zhong. Dynamic Analysis and Optimization of the Main-plate of Stepping-scanning Lithography[J]. China Mechanical Engineering,2007(21):45—70.

(下转第78页)

术研讨会论文集,2010:194—205.
ZHOU Zu-lian. Review of Quantitative Weighter[C]// Weighing Technology Symposium of the 9th Weighing Technology Proceedings,2010:194—205.

[4] ZHONG Wen-zhen,HE Ke-jing,XIA Wei,et al. Research on the Energy Conversion in the Packaging Process of Spherical Particles[J]. Sci Tech Engng,2009,9(7):1880—1882.

[5] 徐泳,孙其诚,张凌,等. 颗粒离散元研究进展[J]. 力学进展,2003,33(2):251—260.
XU Yong,SUN Qi-cheng,ZHANG Ling,et al. Advances in Discrete Element Methods for Particulate Material[J]. Advances in Mechanics,2003,33(2):251—260.

[6] 李艳洁. 堆积问题的离散元模拟—实验研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
LI Yan-jie. The Experimental-simulative Study on the Granular Piling Using the Discrete Element Method[D]. Beijing:China Agricultural University,2005.

[7] SCHNEIDER L C R,SINKA I C,COCKS A C F. Characterisation of the Flow Behaviour of Pharmaceutical Powders Using a Model Die-shoe Filling System[J]. Powder Technology,2007,173(1):59—71.

[8] NWOSE E N,PEI C,WU C Y. Modelling Die Filling with Charged Particles Using DEM/CFD[J]. Particuology,2012,10(2):229—235.

[9] 李兴尚,许家林,朱卫兵,等. 垮落矸石注浆充填体压实特性的颗粒流模拟[J]. 煤炭学报,2008,33(4):373—377.
LI Xing-shang,XU Jia-lin,ZHU Wei-bing,et al. Simulation of Backfill Compaction Character by Particle Flow Code[J]. Journal of China Coal Society,2008,33(4):373—377.

[10] GUO Y,WU C Y,KAFUI K D,et al. 3D DEM/CFD Analysis of Size-induced Segregation During Die Filling[J]. Powder Technology,2011,206(1/2):177—188.

[11] 孙其诚,厚美瑛,金峰,等. 颗粒物质物理与力学[M]. 北京:科学出版社,2011.
SUN Qi-cheng,HOU Mei-ying,JIN Feng,et al. Particulate Matter Physics and Mechanics[M]. Beijing:Science Press,2011.

[12] 袁华祥,潘坡. 颗粒型全自动包装机计量转盘极限转速的分析计算[J]. 包装工程,2007,28(2):75—76.
YUAN Hua-xiang,PAN Po. Analysis and Calculation of Rev Limit of Measurement Turnplate of Pellet Full-automatic Packaging Machine[J]. Packaging Engineering,2007,28(2):75—76.

[13] 杜文华,赵慧文,段能全,等. 一种颗粒包装机摆动式充填机构的设计[J]. 包装工程,2013,34(3):77—79.
DU Wen-hua,ZHAO Hui-wen,DUAN Neng-quan,et al. Design of a Swing-type Filling Device of Particle Automatic Packaging Machine[J]. Packaging Engineering,2013,34(3):77—79.

[14] 杨洋,唐高寿,王居林. 颗粒离散元法中阻尼系数、刚度系数和时步的选取方法[J]. 计算机辅助工程,2007,16(3):65—68.
YANG Yang,TANG Shou-gao,WANG Ju-lin. Selection Methods on Damping Coefficient,Stiffness Coefficient and Time Step in Granular Distinct Element Method[J]. Computer Aided Engineering,2007,16(3):65—68.

[15] 周国庆,周杰,陆勇,等. 颗粒流程序(PFC^{2D})中阻尼参数的适用性研究[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(5):667—671.
ZHOU Guo-qing,ZHOU Jie,LU Yong,et al. Selection of Damping Parameters Used in a Particle Flow Code(PFC^{2D})[J]. Journal of China University of Mining Technology,2011,40(5):667—671.

(上接第 66 页)

[12] 谢逸泉. 利用有限元分析软件 ANSYS 计算轴的刚度[J]. 现代机械,2005(1):55—56.
XIE Yi-quan. ANSYS Finite Element Analysis Software to Calculate the Stiffness of the Shaft[J]. Modern Machinery,2005(1):55—56.

[13] 曹风利,薛孟君. 基于有限元的坦克变速箱体模态分析[J]. 装甲兵工程学院学报,2004(4):38—40.
CAO Feng-li,XUE Meng-jun. Modal Analysis of Gearbox for Tank Based on Finite Element[J]. Armored Force Engineering Academy Journal,2004(4):38—40.

[14] YIN W L. Free-edge Efects in Anisotropic Laminates under Extension,Bending and Twisting,Part I:A Stress Function-based Variational Approach[J]. ASME Joumal of Applied Mechanics,1994,61(2):410-415.

[15] YIN W L. Free-edge Efects in Anisotropic Laminates under Extension,Bending and Twisting,Part I:A Stress Function-based Variational Approach[J]. ASME Joumal of Applied Mechanics,1994,61(2):410—415.