

框架式复材成型模具轻量化设计方法*

王 雯, 鲍益东, 樊胜宝, 魏晓东, 安鲁陵

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 基于 Abaqus 软件简化框架式复材成型模具三维模型, 分别采用实体单元与壳单元建立有限元模型, 并分析模具在支撑、铺贴、吊装等典型工况下的应力水平、变形量, 结果显示两种模型分析差值较小, 能够使用壳单元代替实体单元进行模具的轻量化设计。基于壳单元, 利用 Abaqus 的尺寸优化模块, 以隔板厚度为设计变量进行模具轻量化设计, 确定合适的隔板厚度尺寸。

关键词: 框架式; 成型模具; 有限元分析; 壳单元; 尺寸优化

Lightweight Design Method of Frame Molding Die for Composite Materials

WANG Wen, BAO Yidong, FAN Shengbao, WEI Xiaodong, AN Luling

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The 3D model was simplified by Abaqus software, and the finite element model of the frame molding die was established by using solid element and shell element respectively, and the stress level and deformation of the mould under the typical working conditions such as bracing, paving and lifting were analyzed. It is found that the difference between the two model analysis results is small, so the shell element can be used instead of the solid element in the lightweight design. Based on the shell elements, the lightweight design of the mould was carried out by using the sizing optimization module of Abaqus, and the suitable thickness of the clapboard is determined.

Keywords: Frame type; Molding die; Finite element analysis; Shell element; Sizing optimization

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.23/24.082

框架式复合材料模具一般由型面板和支撑结构组成^[1], 其支撑结构设计常依靠经验法, 采用保守设计确定隔板厚度以及隔板间距等参数^[2]。依靠经验法设计的模具重量较大, 耗费大量材料, 大大增加了模具制造成本^[3]。因此, 有必要对模具进行轻量化设计研究。

轻量化设计主要从材料、结构、制造等方面对分析对象进行优化设计, 其中, 结构优化是轻量化设计一种重要实现手段^[4]。结构优化一般包含: 拓扑优化、形状优化和尺寸优化^[5]。在框架式复合材料模具设计方面, 已有学者进行了拓扑优化研究。张铨等^[6]采用拓扑优化对航空复合材料构件制造用框架式模具进行了轻量化设计。拓扑优化后的模具形状通常为不规则形状, 需要重新设计桁架结构, 而且会给加工造成一定的困难。尺寸优化可在不改变模具现有形状的前提下, 通过减小隔板厚度、增大隔板间距等方式, 对模具进行减重^[7]。

从优化设计以及加工难易程度上来说, 尺寸优化较拓扑优化更为简单。

有限元方法为模具轻量化设计提供了非常大的便利, 通过有限元分析, 可以计算模具在不同工况下的应力、位移情况。然而在进行有限元分析时, 应用实体单元建模较为困难但分析精度较高^[8], 应用壳单元建模难度较小但分析精度较低, 如果二者精度相差不大, 一般选择壳单元进行计算, 同时应用壳单元进行尺寸优化计算时, 无需重新建立三维模型。故在精度允许的条件下, 使用壳单元更为简便。

本文基于 Abaqus 软件, 以模具轻量化为目标, 分别采用实体单元以及壳单元建立框架式复合材料成型模具在典型工况下的有限元模型并进行其刚度与强度分析, 在确保壳单元可以代替实体单元进行分析的情况下, 基于壳单元模型对框架式复合材料模具的隔板厚度进行尺寸优化, 在保证模具性能要求的前提下, 确定隔板厚度尺寸。

* 基金项目: 航空科学基金(20161852018)。

1 框架式模具结构分析

框架式复合材料成型模具由型面板、吊耳、隔板构成,其结构如图1所示。图1中的复合材料成型模具总长约2040mm,总宽约1140mm,总高约488mm,隔板厚10mm,间距约335mm,该模具两侧共有4个用于吊装模具的吊耳。

隔板采用纵横焊接的形式支撑型面板,为了保证型面板的刚度,通常采用较大的隔板厚度以及较小的隔板间距的设计方法,但该方法不仅会造成材料浪费,还会增加模具整体重量,不符合模具的轻量化设计理念,故需在保证模具型面板刚度的条件下,通过减小隔板厚度来降低模具整体重量。然而,在进行轻量化设计时,采用实体单元分析需要建立多个实体三维模型,计算量大。因此,在保证壳单元计算精度的情况下,壳单元模型是进行有限元分析以及尺寸优化的首选。

2 典型工况分析

2.1 有限元模型建立

为了对比壳单元与实体单元的计算精度,本文分别采用实体单元与壳单元建立框架式复合材料成型模具的有限元模型,分析模具在不同工况下的应力与位移情况。

本文所分析的模具材料为A3钢,弹性模量为210000MPa,泊松比为0.3,密度为7800kg/m³[9],屈服强度一般为235MPa左右。通过有限元软件查询可知,实体单元模型与壳单元模型的质量分别为0.583t和0.590t,相差1.2%,在可接受范围内。以匀速起吊工况为例,对复材成型模具分别采用实体单元与壳单元进行网格划分,模具各部分网格数量如表1所示。

从表1可以看出,在网格尺寸相同的情况下,实体模型的单元数量约为壳模型单元数量的两倍。因此,采用壳单元分析能够在一定程度上减少计算时间。

本文主要分析框架式复材成型模具的4种较为典型的工况下的力学性能(1)常温、支撑工况,模具底部4个角边固定约束,整体施加重力场;(2)常温、铺贴工

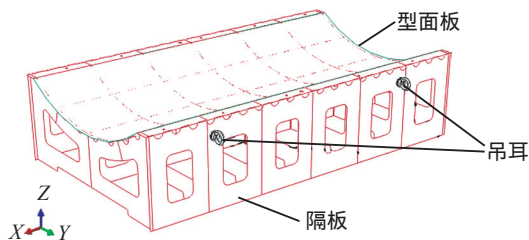


图1 成型模具结构
Fig.1 Structure of molding die

况,模具底部4个角边固定,整体施加重力场且型面板施加均布力,均布力合力为20000N;(3)常温、匀速起吊工况,模具吊耳处固定,整体施加重力场;(4)常温、加速起吊工况,模具吊耳处固定,整体模具施加3倍重力场。

2.2 结果分析

支撑工况下,模具应力与位移分析结果如图2所示,以支撑工况为例讨论应力分布与位移分布趋势,壳单元的分析结果与实体单元的分析结果十分接近。

不同典型工况的仿真分析结果中最大等效应力与最大位移如表2所示。

从表2可以看出:

(1)上述工况中的最大等效应力均未超出屈服强度,满足设计的强度需求。

(2)匀速吊起工况的最大等效应力以及加速起吊工况的最大等效应力的误差在20%左右,其余工况的最大等效应力误差基本在5%左右,但都小于材料的屈服极限,因此应力分析结果对壳单元代替实体单元进行有限元分析的影响较小,在可接受范围内。

(3)每种工况的最大位移误差均在3%以内。

综上所述,实体单元模型与壳单元模型分析结果相差不大,可使用壳单元代替实体单元进行模具变形量分析。

3 基于壳单元模具优化设计

根据对模具的典型工况的分析来看,可以使用壳单元代替实体单元进行模具变形量分析,因此本节优化设计主要基于壳单元建立有限元模型。

3.1 趋势分析

隔板厚度设计为10mm时,框架重量约占复材成型模具总重量的50%以上,有必要着重考虑对隔板厚度进行优化,在保证模具刚度的前提下,降低框架重量占模具总重量的比重,可降低模具的总重量。初步采用逐步减小复材成型模具隔板厚度的方式,分析吊装、铺贴

表1 网格数量对比

Table 1 Grid number comparison

部件	实体单元		壳单元	
	数量	类型	数量	类型
隔板单元	116666	C3D8R	56463	S4R
			2015	S3
型面板单元	45510	C3D8R	21935	S4R
吊耳单元	21323	C3D10	22826	C3D10
总数量	183499	—	103186	—

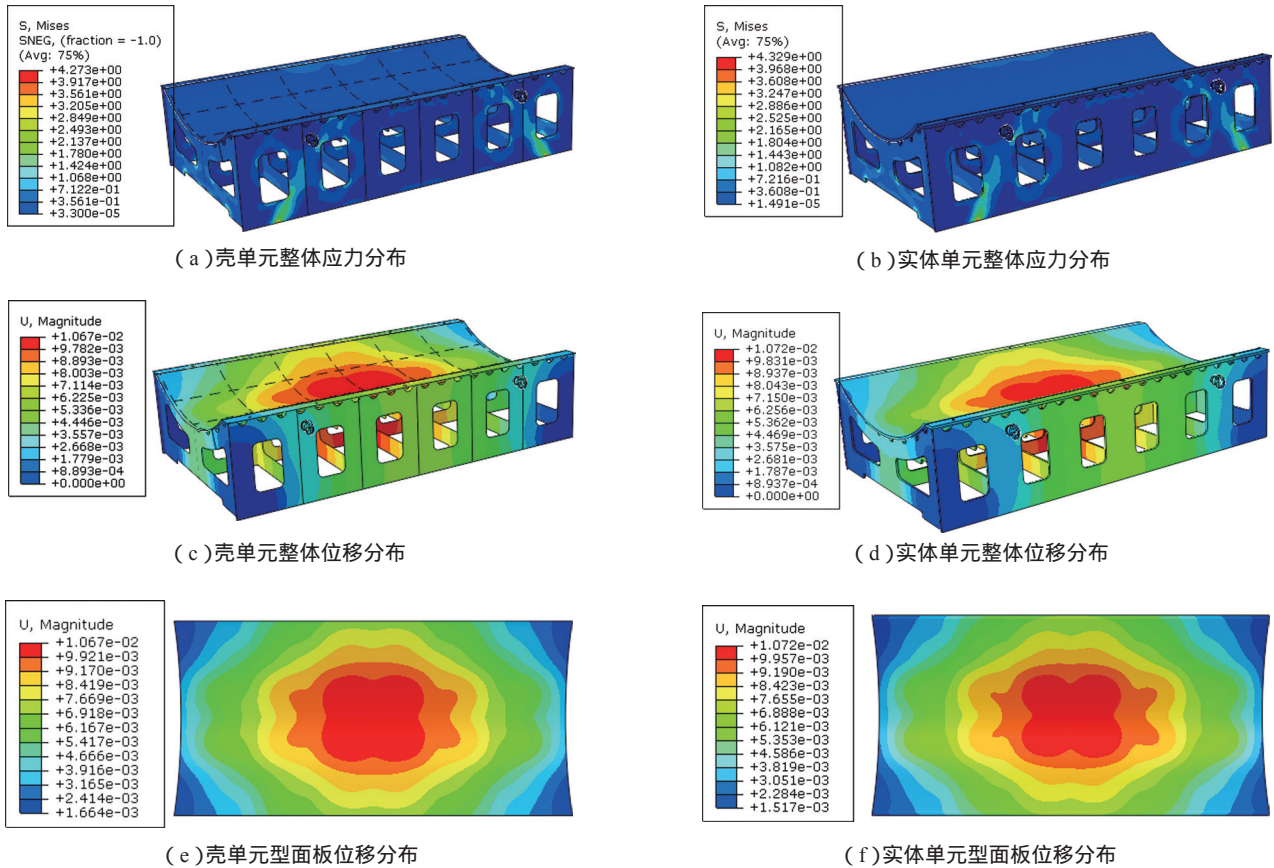


图2 支撑工况计算结果

Fig.2 Calculation result under support condition

表2 不同工况对比

Table 2 Comparison of different working conditions

工况		壳单元模型	实体单元模型	误差/%
支撑工况	最大等效应力/MPa	4.273	4.329	1.3
	最大位移/mm	0.0106	0.0107	0.9
铺贴工况	最大等效应力/MPa	18.31	19.04	3.8
	最大位移/mm	0.0533	0.0548	2.7
匀速吊装工况	最大等效应力/MPa	24.45	20.19	19.8
	最大位移/mm	0.0084	0.0086	2.3
加速起吊工况	最大等效应力/MPa	73.35	60.58	21.1
	最大位移/mm	0.0252	0.0259	2.7

工况下,不同隔板厚度下复材成型模具应力、位移情况,结合复材成型模具变形量要求,得出模具重量、应力、位移随隔板厚度变化的趋势。

从图3可以看出,在隔板厚度由4mm增加至10mm过程中:

(1)模具总重量与隔板厚度基本呈线性正相关的

关系。

(2)加速吊起工况的最大等效应力随隔板厚度的增大而增大,而铺贴工况的最大等效应力的变化趋势则相反,但两种工况最大等效应力值均未超过材料的屈服强度。

(3)两种工况的最大位移均随隔板厚度的增加而减小,减小隔板厚度,最大变形量有一定的增加,因此需在保证模具最大变形量要求的前提下,进行模具的轻量化设计。

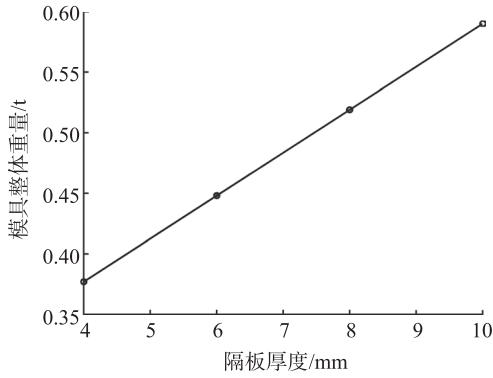
3.2 尺寸优化

有限元软件可通过内置的优化算法根据用户输入的目标函数与约束条件对优化对象进行优化分析。本文基于Abaqus软件尺寸优化模块,以模具框架部分为优化区域,以隔板厚度为设计变量,对模具进行尺寸优化设计。

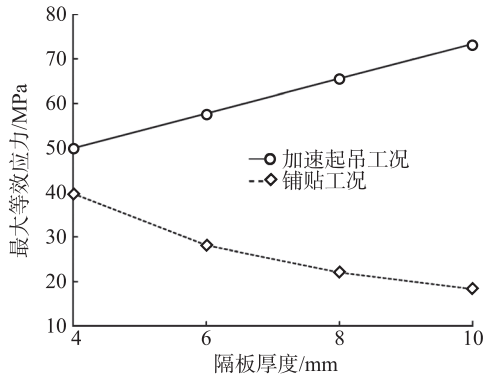
较多优化分析选用应变能作为其目标函数^[10-11]。应变能在有限元中一般指每个单元应变能的总和,是结构整体柔性的一种度量,可以表达为^[12]:

$$U = \sum u^T k u$$

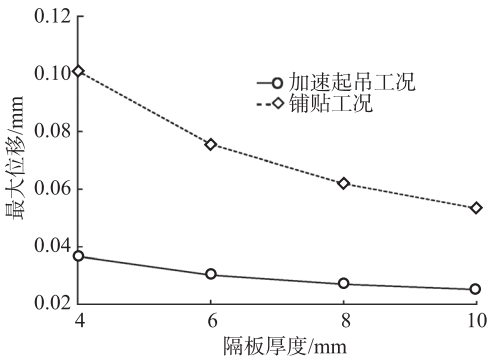
式中, U 为应变能, u 为位移矢量, k 为整体刚度矩阵。



(a)不同隔板厚度的模具重量变化曲线



(b)不同隔板厚度的最大应力值变化曲线



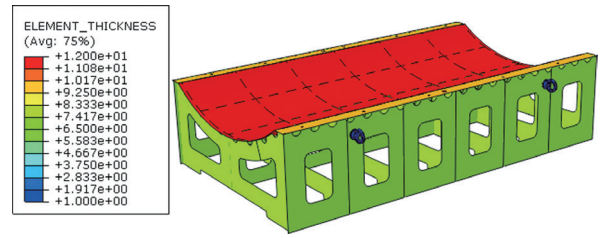
(c)不同隔板厚度的最大位移值变化曲线

图3 隔板厚度对不同工况应力/位移影响

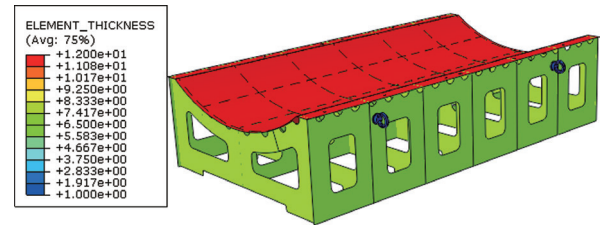
Fig.3 Influence of diaphragm thickness on stress / displacement under different working conditions

柔度是刚度的倒数,应变能可以在一定程度上反映刚度的大小。本文选用应变能作为优化目标函数,分别对模具在铺贴工况与加速吊起工况下进行尺寸优化,保证模具在减小重量的同时,刚度符合需求。模具尺寸优化分析的结果如图4所示。

在铺贴工况下尺寸优化分析后的框架隔板厚度为8mm,最大等效应力为22.22MPa,最大位移为0.063mm;在加速吊起工况下进行尺寸优化分析后的框架隔板



(a)铺贴工况下尺寸优化



(b)加速吊起工况下尺寸优化

图4 尺寸优化计算结果

Fig.4 Calculation results of sizing optimization

厚度为8mm,最大等效应力为65.57MPa,最大位移为0.027mm。从分析结果来看,模具的最大变形量在尺寸优化后有所增大,但仍符合设计需求。

综上所述,在保证刚度与强度需求的前提下,选用8mm的隔板较为合适,模具总重量降为0.519t,减少了约12%的自重。本文所述的优化分析方法表明,通过减小隔板厚度尺寸达到减轻模具自重的方法是可行的。

4 结论

本文分别采用实体单元与壳单元建立框架式复合材料成型模具在支撑、匀速吊起、加速吊起、铺贴等4种典型工况下的有限元模型,应用Abaqus软件分析模具在不同工况下的应力、位移水平,并将实体单元与壳单元的计算结果进行了对比,可发现二者在计算位移时差别不大,在一定条件下,可使用壳单元代替实体单元进行有限元分析,并且以模具轻量化设计为目标,基于壳单元对模具框架隔板的厚度进行了尺寸优化,在保证模具变形量要求的前提下,优化模具隔板厚度为8mm,重量减轻12%左右,为模具的尺寸优化设计提供一定的参考,进一步将结合刚度校核与热均匀性分析,研究孔外形、隔框间距对轻量化设计的影响。

参考文献

[1] 章令晖,李甲申,韩宇,等. 复合材料成型模具研究进展[J]. 航天制造技术, 2013(1): 13-17.
ZHANG Linghui, LI Jiashen, HAN Yu, et al. The progress of

research on composite forming mould[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013(1): 13-17.

[2] 王霖,程杰,苏佳智,等.浅析复合材料框架式成型模具设计技术[J].航空制造技术,2016,59(12):100-104.

WANG Lin, CHENG Jie, SU Jiazhi, et al. Analysis of composites frame molding mould design technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 100-104.

[3] 晏冬秀,刘卫平,黄钢华,等.复合材料热压罐成型模具设计研究[J].航空制造技术,2012,55(7):49-52.

YAN Dongxiu, LIU Weiping, HUANG Ganghua, et al. Design study for composites autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 49-52.

[4] 李育锋,何彦,黄桃,等.考虑产品制造过程环境影响的轻量化设计方法[J].计算机集成制造系统,2018,24(9):2306-2313.

LI Yufeng, HE Yan, HUANG Tao, et al. Lightweight design method considering environmental impacts in products manufacturing stage[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(9): 2306-2313.

[5] 刘立美,焦爱胜,严慧萍,等.基于ABAQUS的提升机箱体有限元分析和结构拓扑优化设计[J].矿山机械,2013,41(9):52-55.

LIU Limei, JIAO Aisheng, YAN Huiping, et al. FEA and structural topology optimization design of hoist housing based on ABAQUS[J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(9): 52-55.

[6] 张铨,梁宪珠,胡江波,等.拓扑优化在框架式模具结构选型中的应用[J].航空制造技术,2012,55(9):62-63.

ZHANG Cheng, LIANG Xianzhu, HU Jiangbo, et al. Application of topology optimization in structure selection of frame mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(9): 62-63.

[7] 陈远帆,李舜骥,苏玉青.拓扑优化与尺寸优化相结合的割草车车架轻量化设计[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2017,31(1):28-35.

CHEN Yuanfan, LI Shunming, SU Yuqing. The light-weight design of the cutting grass car frame combined the topology optimization with the size optimization[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 31(1): 28-35.

[8] 谢元丕,冯刚. ANSYS 三维实体单元与板壳单元的组合建模研究[J].机械设计,2009,26(4):5-7.

XIE Yuanpi, FENG Gang. Study of ANSYS modelling on the combination of 3D entity unit and plate-shell unit[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(4): 5-7.

[9] 闻邦椿,张义民,鄂中凯,等.机械设计手册[M].第5版.北京:机械工业出版社,2010.

WEN Bangchun, ZHANG Yimin, E Zhongkai, et al. Mechanine design handbook[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2010.

[10] 何彬,李响.冷镦机床身的多约束拓扑优化与再设计[J].机械设计,2016,33(02):90-94.

HE Bin, LI Xiang. Multi-constraint topology optimization and redesign of heading machine bed[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(2): 90-94.

[11] 王有宝.自由曲面单层网壳结构形态创构方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.

WANG Youbao. Study on morphogenesis technique for the free-curved single-layer reticulated shells[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[12] 江丙云,孔祥宏,罗元元.ABAQUS工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2014.

JIANG Bingyun, KONG Xianghong, LUO Yuanyuan. Detailed annotation of engineering project of ABAQUS[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2014.

通讯作者:鲍益东,副教授,研究方向为板料成形工艺及仿真、复合材料成型工艺仿真、飞机数字化装配等,E-mail:baoyd@nuaa.edu.cn.

(责编 古京)

(上接第81页)

[18] 黄敏,李国爱,张坤,等.2A97铝锂合金激光焊接特性[J].焊接学报,2014,35(5):100-104.

HUANG Min, LI Guoai, ZHANG Kun, et al. Laser welding characteristics of 2A97 Al-Li alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 100-104.

[19] ZHANG X, HUANG T, YANG W, et al. Microstructure and mechanical properties of laser beam-welded AA2060 Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 237: 301-308.

[20] 占小红,陈纪城,陈洁,等.铝锂合金双激光束双侧同步焊接各向拉伸性能分析[J].焊接学报,2015,36(5):33-36.

ZHAN Xiaohong, CHEN Jicheng, CHEN Jie, et al. Analysis on multidirectional joint tensile properties for dual laser-beam bilaterally synchronous welding joint of aluminum-lithium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(5): 33-36.

[21] 王永,李德富,胡捷,等.含钪焊料对2195铝锂合金焊缝组织性能的影响[J].稀有金属,2003,27(6):842-844.

WANG Yong, LI Defu, HU Jie, et al. Effect of scandium on microstructure of 2195 joint aluminium-Li enhance[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 842-844.

[22] 庄蕾,罗宇,王亚军,等.1420铝锂合金激光焊接工艺研究[J].焊接,2006(1):39-42.

ZHUANG Lei, LUO Yu, WANG Yajun, et al. Study on laser welding process of 1420 Al-Li alloy[J]. Welding, 2006(1): 39-42.

[23] 林凯莉.2198铝锂合金激光焊接工艺及接头组织性能研究[D].北京:北京工业大学,2015.

LIN Kaili. Microstructures and mechanical properties of laser beam welded 2198 aluminum lithium alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.

通讯作者:占小红,博士,教授,研究方向为激光增材制造工艺与装备、激光焊接与先进连接技术、航空航天先进制造工艺、材料加工工艺建模与仿真等,E-mail:xiaohongzhan_nuaa@126.com.

(责编 古京)