

等截面波形钢腹板连续箱梁 竖向基频的参数研究

冀伟, 刘世忠, 蔺鹏臻

(兰州交通大学甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:制作了波形钢腹板预应力混凝土连续箱梁的室内试验梁模型, 对其竖向基频进行了实测, 并利用 ANSYS 有限元分析软件求得其有限元值, 试验梁的有限元值与实测值吻合良好, 验证了有限元分析方法的精度和可行性. 在此基础上, 利用 ANSYS 有限元分析软件研究了等截面波形钢腹板连续箱梁的横隔板、预应力、波纹形状及跨径对其竖向基频的影响程度, 分析结果表明, 横隔板、预应力和波纹形状对其竖向基频的影响很小, 而跨径对其竖向频率的影响较大. 同时发现, 《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004) 中连续梁基频的估算公式不适用于波形钢腹板连续箱梁的竖向基频估算, 因此本文对估算公式进行了修正, 本文的研究成果能为类似波形钢腹板连续箱梁的竖向基频计算提供参考依据.

关键词:组合箱梁; 竖向基频; 模型试验; 波形钢腹板

中图分类号: U441.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)04-0468-06

波形钢腹板箱梁桥是一种新型的桥梁形式(见图1所示), 它是以波形钢腹板代替混凝土腹板, 并采用体外预应力技术的新型组合结构. 到目前为止, 国内外学者已对波形钢腹板箱梁的力学特性进行了研究^[1-8], 其中对动力学的研究主要集中在波形钢腹板简支箱梁的基础上, 对此类型连续箱梁的动力学研究很少. 因此, 本文制作了等截面波形钢腹板混凝土预应力连续箱梁的试验梁模型, 在室内对其竖向基频进行了实测, 并利用 ANSYS 有限元软件求得其有限元值. 试验梁的有限元值与实测值吻合良好, 验证了有限元分析方法的精度和可行性. 在此基础上利用有限元软件分析了试验梁考虑预应力、波纹形状、横隔板及跨径等参数变化对其竖向基频的影响, 同时发现, 《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004) 中连续梁基频的估算公式不适用于波形钢腹板连续箱梁的竖向基频的估算, 因此本文对估算公式进行了修正, 本文的研究成果能为类似波形钢腹板连续箱梁的竖向基频计算提供参考依据.

1 等截面波形钢腹板试验梁的制作

波形钢腹板模型试验梁的截面尺寸参考已修建的郾城黄河大桥的跨中截面尺寸, 按照 1:10 的比例缩尺, 波形钢腹板箱梁的模型设计尺寸见图2—图3所示. 波形钢腹板构造按 1600 型的波形设计, 其示意图见图4所示. 试验梁的跨径布置为: 300+300 cm 箱形连续梁, 梁高 35 cm, 箱梁顶板全宽 135 cm, 箱底宽度 65 cm, 两侧悬臂长度为 35 cm. 制作完成后的试验梁见图5所示. 顶、底板的混凝土立方体试件在标准条件下养护 28 d 后所测得的抗压强度值为 51.2 MPa, 按规范为 C50 混凝土, 弹性模量取 34.5 GPa, 泊松比为 0.2, 波形钢腹板采用 Q235 钢, 弹性模量 206 GPa, 泊松比为 0.3, 实测厚度为 1.2 mm, 波形钢腹板总高度为 285 mm, 嵌入箱梁顶板 30 mm, 嵌入箱梁底板 30 mm. 共设 3 道支座横隔板和 4 道中横隔板.

收稿日期: 2011-12-29 **修改稿日期:** 2012-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50968008) 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室开放基金资助(Kfj-10-01)

作者简介: 冀伟(1982-), 男, 山西阳泉人, 讲师, 博士生, 研究方向为桥梁设计理论及应用.

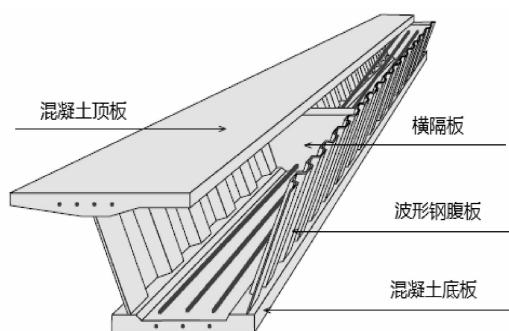


图1 典型构造示意图

Fig. 1 Typical structure diagram

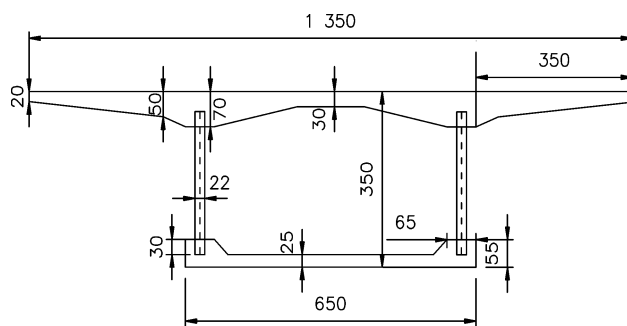


图2 试验梁基本尺寸/mm

Fig. 2 Main dimensions of the test girder/mm

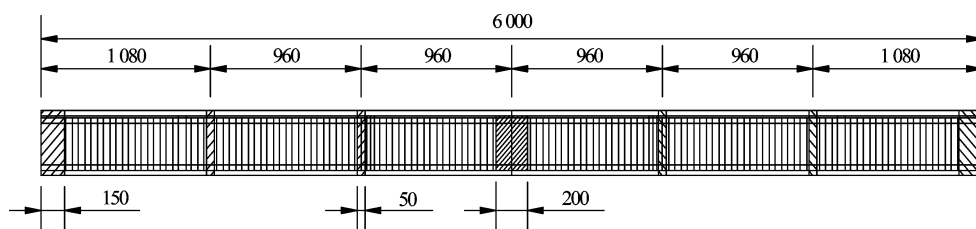


图3 试验梁立面图/mm

Fig. 3 Elevation drawing of the test girder /mm

2 体外预应力对试验梁的影响研究

体外预应力筋共2根,采用2根7 ϕ 5、1 860级钢绞线,其公称截面面积为139 mm²,分为2批左右对称张拉,预应力筋布置图见图6所示,预应力张拉见图7所示.为了获得预应力筋张拉完后的有效预应力,在试验梁的预应力筋的锚固位置分别布置了压力传感器,见图9所示.

预应力的张拉分为四个工况,工况一为张拉0 kN,即不张拉预应力,工况二为120 kN,工况三为140 kN,工况四为160 kN.表1中预应力损失之后的有效预应力是指在做试验之前1小时通过布置的压力传感器所测的数值.

在梁端、1/4跨,跨中及3/4跨放置竖向传感器,采样频率为100Hz.波形钢腹板组合箱梁试验测试见图8所示,对其采用DHDAS动态信号测试分析系统进行振动测试,根据实测数据识别出竖向基频.

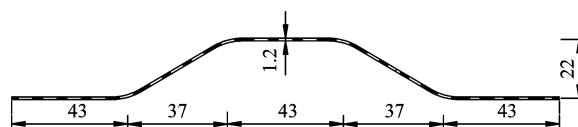


图4 波形钢腹板构造示意图/mm

Fig. 4 The structure diagram of corrugated steel web/mm



图5 制作完成的试验梁

Fig. 5 The test girder

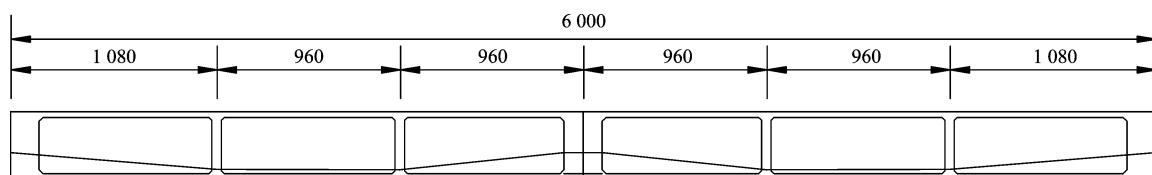


图6 模型试验梁预应力筋布置图/mm

Fig. 6 Distribution of prestressed steel bar of the test girder /mm



图 7 模型试验梁预应力筋张拉
Fig. 7 Prestress tensioning for test girder

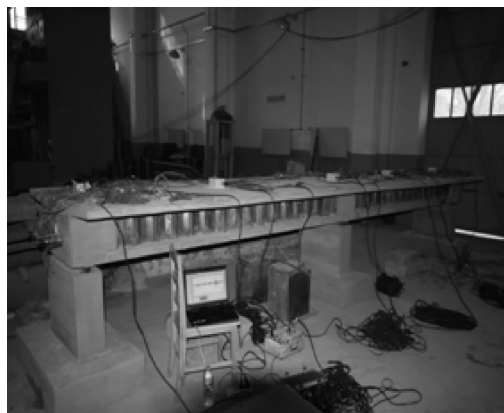


图 8 试验梁动态数据采集
Fig. 8 Dynamic data acquisition model of test girder

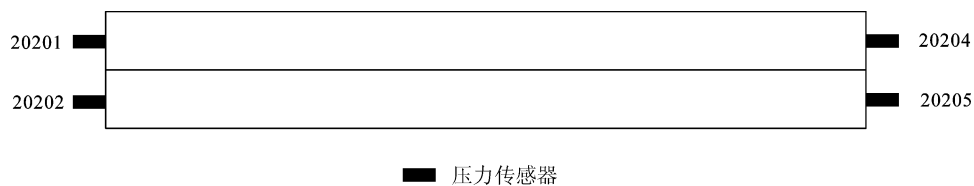


图 9 试验梁压力传感器的布置
Fig. 9 Layout of pressure sensors

表 1 模型试验梁的预应力筋的有效预应力
Tab. 1 Effective prestress values of test girder

仪器编号	张拉力为 120 kN 预应力损失之后的有效预应力/kN	张拉力为 140 kN 预应力损失之后的有效预应力/kN	张拉力为 160 kN 预应力损失之后的有效预应力/kN
20201	86.88	118.03	137.03
20202	81.01	112.39	133.39
20204	80.62	112.86	132.86
20205	80.45	110.10	130.10

三维有限元模型的建立采用 ANSYS 分析软件,波形钢腹板箱梁的顶、底板采用实体单元 SOLID45 来建模,波形钢腹板采用 SHELL63 单元来模拟,横隔板采用实体单元 SOLID45 模拟.波形钢腹板箱梁的顶、底板与腹板的交界处需要考虑二者的嵌入式连接效应,即波形钢腹板腹板单元嵌入箱梁的顶、底板实体单元 30 mm.模型中预应力的施加采用约束方程法,并将实测的预应力施加于分析模型上.模型试验梁的空间有限元计算模型如图 10—图 11 所示.

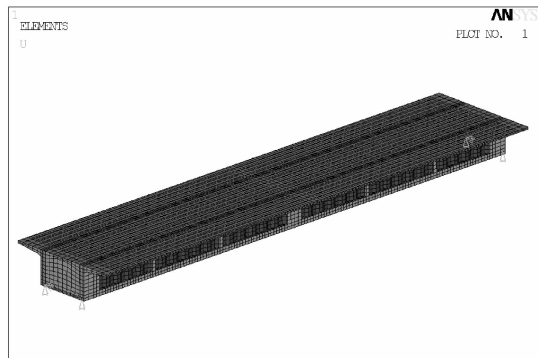


图 10 模型试验梁的有限元计算模型
Fig. 10 Finite model of the test girder

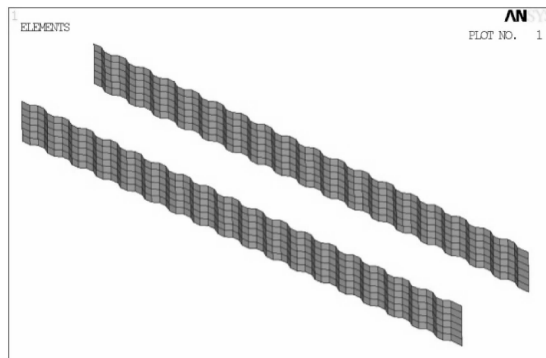


图 11 波形钢腹板有限元网格划分
Fig. 11 Finite element mesh of the corrugated steel webs

由表 2 可以看出,工况一为无预应力状态,工况二、三和四为有预应力状态,有预应力状态的竖向基频略大于无预应力状态,但是相差不大.工况二、三和四作用下的竖向基频几乎相等,说明有预应力状态下,预应力的 大小几乎不影响试验梁的竖向基频.实测值与有限元值吻合良好,验证计算模型和试验手段的正确性.

3 横隔板对试验梁的影响研究

为了进一步揭示波形钢腹板混凝土箱梁动力特性的特点,本文提出三种减少横隔板的方案:1)去掉所有的中横隔板,只考虑支座横隔板的影响;2)去掉所有的支座横隔板,只考虑中横隔板的影响;3)去掉所有的横隔板,即试验梁不考虑横隔板.因为只研究横隔板的作用,三种方案的 ANSYS 有限元模型均不考虑预应力的影响,计算结果见表 3 所示.

表 3 的数据表明,对本试验梁来说,横隔板的有无对试验梁的竖向基频的影响很小,在工程允许的范围之内.

4 波纹形状对试验梁的影响研究

目前国内外常用的波形钢腹板的形状主要有三种,即 1 600、1 200 和 1 000 型(如图 12).

由于预应力对试验梁的影响程度很小及根据横隔板对竖向基频的影响也非常小,因此有限元模型的建立不考虑二者的影响,同时波纹大小缩小 10 倍.

表 2 试验梁的竖向基频的
实测值与有限元值的对比

Tab. 2 The comparison between test value and FEM values of the test girder

工况	有限元值/Hz	实测值/Hz	误差/%
1	61.340	63.94	4.23
2	61.909	64.47	4.14
3	61.910	64.47	4.14
4	61.910	64.47	4.14

表 3 三种方案的有限元值与
试验梁的有限元值的误差

Tab. 3 The comparison between FEM values of the three programs and FEM values of test girder

方案	设计方案基频/Hz	试验梁基频/Hz	误差/%
方案一	62.398	61.340	1.72
方案二	59.540	61.340	2.93
方案三	60.011	61.340	2.17

误差 = $\frac{|\text{设计方案基频} - \text{试验梁基频}|}{\text{试验梁基频}} \times 100\%$

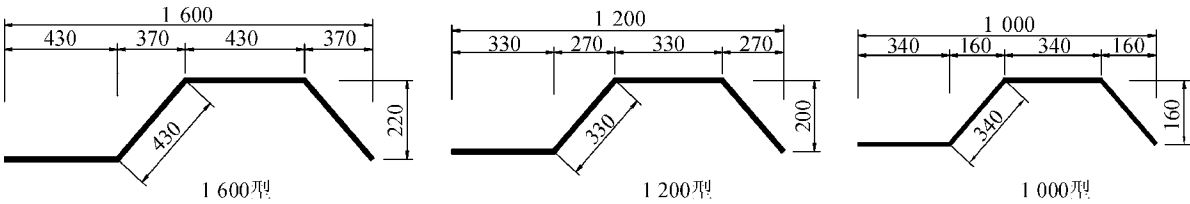


图 12 波形钢腹板波形示意图/mm

Fig. 12 Wave pattern of corrugated steel web/mm

由表 4 可知,波纹形状对波形钢腹板连续箱梁的竖向基频有一定的影响,但影响程度较小.其中 1 000 型的竖向基频的理论计算值最小,1 200 型次之,1 600 型最大.

5 跨径对试验梁的影响研究

由波形钢腹板的结构组成来看,横隔板、体外预应力和波纹形状对其竖向基频的影响程度都不大.按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004)(下文简称《桥规》)^[9]里关于连续梁桥竖向基频的估算公式见式(1),符号的意义详见《桥规》.

$$f_1 = \frac{13.616}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \quad (1)$$

式(1)是计算连续梁的冲击力引起的正弯矩效应和剪力效应,式(1)中如果给定具体的材料与截面尺寸,那么影响参数就是跨径的平方.针对本文所建成的试验梁,尺寸与比例关系如图2所示.将式(1)的计算值,理论值和实测值进行了对比,对比结果

表 4 考虑不同的波纹形状与
试验梁有限元竖向基频对比

Tab. 4 The comparison between FEM values of the different wave patterns and FEM values of test girder

波纹形状	波纹形状基频 /Hz	不考虑横隔板的试验梁基频 /Hz	误差 /%
1 000 型	57.816	60.011	3.66
1 200 型	58.492	60.011	2.53
1 600 型	60.011	60.011	0.00

误差 = $\frac{|\text{波纹形状基频} - \text{不考虑横隔板试验梁基频}|}{\text{不考虑横隔板试验梁基频}} \times 100\%$

见表5所示。

式(1)的计算值是有限元值及实测值的两倍,因此式(1)不适合于计算等截面波形钢腹板连续箱梁的竖向基频的计算。本文将式(1)写成如下形式,见式(2),通过跨径的参数研究,确定合理的系数 k ,为工程中波形钢腹板连续箱梁的竖向基频计算提供估算依据。

$$f_1 = \frac{k}{\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \quad (2)$$

本文试验梁的理论值与实测值吻合较好,在此基础上利用有限元软件计算了跨径分别为200+200 cm, 250+250 cm, 300+300 cm, 350+350 cm, 400+400 cm的波形为1600型波形钢腹板连续箱梁未考虑横隔板、预应力所对应的系数 k ,分别对应实际工程中的20+20 m, 25+25 m, 30+30 m, 35+35 m, 40+40 m的连续梁,其余连续梁的系数 k 可以在相应的两跨径间内插。相应的系数 k 见表6所示。

表6中的系数 k ,可以为相似桥梁基频的计算提供方便的估算,虽有误差,但也在工程的允许范围之内。

6 结 论

根据本文的研究成果,可得出如下若干结论:

(1) 波形钢腹板连续箱梁的有预应力状态的自振频率略大于无预应力状态,但是相差不大。在预应力状态下,预应力的尺寸几乎不影响试验梁的自振频率。实测值与有限元的结果非常接近,说明有限元计算模型和试验手段的正确性。

(2) 波纹形状对波形钢腹板连续箱梁的竖向基频有一定的影响,但影响程度也不大,其中1000型的基频理论计算值最小,1200型次之,1600型最大。

(3) 修正了桥规中连续箱梁竖向基频的估算公式,所修正的估算公式可以为相似桥梁竖向基频的计算提供参考。

参考文献 References

- [1] 陈宜言. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
CHEN Yi-yan. Composite design and construction of composite box girder with corrugated steel webs[M]. Beijing: China communications press,2009.
- [2] LBRAHIM S A, EI-DAKHAKHNI W W, ELGAALY M. Fatigue of corrugated-web plate analytical study[J]. Journal of structural engineering, ASCE, 2006, 132(9):1381-1392.
- [3] DRIVER R G, ABBAS H H, SAUSE R. Shear behavior of corrugated web bridge girders[J]. Journal of structural engineering, ASCE, 2006, 132(2):195-203.
- [4] 狄 谨, 周绪红, 孔祥福, 等. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(5):29-33.
DI Jin, ZHOU Xu-hong, KONG Xiang-fu et al. Experimental research on pre-stressed concrete composite box girders with corrugated steel webs[J]. Journal of chang'an university: natural science edition, 2009, 29(5):29-33.
- [5] 任红伟, 刘保东, 陈海波. 波纹钢腹板混凝土箱梁的扭转振动分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6):64-68.
REN Hong-wei, LIU Bao-dong, CHEN Hai-bo. Analysis of torsional vibration of concrete box-girder with corrugated steel webs[J]. China journal of highway and transport, 2008, 21(6):64-68.
- [6] 刘保东, 陈海波, 任红伟. 波纹钢腹板混凝土箱梁动力特性改善研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3):29-33.
LIU Bao-dong, CHEN Hai-bo, REN Hong-wei. Improvement study of the dynamic characteristics for concrete box-girder with corrugated steel webs. China railway science, 2008, 29(3):29-33.
- [7] 王东伟, 张奇伟, 王用中. 基于模态分析的鄂城黄河公路大桥优化设计[J]. 郑州大学学报:工学版, 2010, 31(6):1-4.
WANG Dong-wei, ZHANG Qi-wei, WANG Yong-zhong. Optimization design of the yellow river main bridge in juan cheng based on the researches on the dynamic characteristics[J]. Journal of zheng zhou university: engineering science, 2010, 31(6):1-4.
- [8] 冀伟, 刘世忠, 蔺鹏臻. 波形钢腹板连续箱梁的动力特性[J]. 公路交通科技, 2011, 28(11):55-60.

表5 试验梁竖向基频三种计算方法的对比结果

Tab. 5 Three vertical frequency values of the test girder

工况	式(1)计算值 /Hz	有限元计算频率 /Hz	实测频率 /Hz
1	126.879	61.910	64.470

表6 不同跨径下对应的系数 k

Tab. 6 Coefficient k under different spans

跨径	系数 k
200+200cm	2.134
250+250cm	2.666
300+300cm	3.220
350+350cm	3.347
400+400cm	3.648

- Ji Wei, LIU Shi-zhong, LIN Peng-zhen. Dynamic Characteristics of composite box girder with corrugated steel webs[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2011, 28(11):55-60.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JTG D60-2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D60-2004 General Code for Design of Highway Bridges and Culverts[S]. Beijing: China communications press,2004.

Study on dynamic characteristics parameters of equal section composite box girder with corrugated steel webs

Ji Wei, LIU Shi-zhong, LIN Peng-zhen

(Key Laboratory of Road Bridge and Underground Engineering of Gansu Province,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this paper, a continuous box girder bridge model of corrugated steel webs is analyzed, using the ANSYS finite-element method, to evaluate its vertical fundamental frequency. Experimental test is conducted on the continuous box girder bridge model of corrugated steel webs to verify the finite-element model. There is good correlation between the results from the tested model and the finite-element analysis. The parameters considered herein are the number of the diaphragm, prestressing force, wave pattern of corrugated steel web and the span length. The results show that the span length influences significantly the fundamental frequency of such bridge. The number of the diaphragm, prestressing force, wave pattern of corrugated steel web have little effects on the fundamental frequency of such bridge. The vertical fundamental frequency estimation formula of the continuous bridge in code (JTG D60-2004) is not suitable for the continuous box girder of corrugated steel webs, thus empirical expressions for the fundamental frequency of such bridges were deduced.

Key words: composite box girder; vertical fundamental frequency; model test; corrugated steel web

Biography: Ji Wei, Candidate for Ph. D., Lanzhou 730070, P. R. China, Tel: 0086-13919891668, E-mail: jiwei1668@163.com

(上接第 467 页)

Analysis on the seismic dynamic characteristics of soil-structure interaction system by Catastrophic Theory

WANG Zhi-qiang, SHEN Jian-hong

(School of Management, Qingdao Technology University, Shandong Qingdao 266520, China)

Abstract: Under earthquake loading, the dynamic characteristics of structure can be reflected better when soil and structure are analyzed by a system. On a simple model of soil-structure interaction system, the kinetic energy and deformation energy are calculated. The dynamic equations of soil-structure interaction system derived by Lagrange Equation can be attributed to the cusp catastrophe model which takes structure amplitude as state variable. The analysis by cusp Catastrophe Theory shows that because of nonlinear spring, the system has the frequency characteristics and the soil-structure interaction system does not produce a "resonance" phenomenon in linear systems. When the control points (u,v) get across the bifurcation set of cusp catastrophe model, structure amplitude and vibration phase will change and the structure amplitude changes with the earthquake frequency, i. e. the earthquake frequency change has path effect on earthquake dynamic characteristics of soil-structure interaction system.

Key words: soil-structure interaction, catastrophe theory, nonlinear, dynamic characteristics

Biography: WANG Zhi-qiang, Associate professor. Qingdao 266520, P. R. China, E-mail: wzq3993@163.com, Tel: 15898803993