

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.04.011

悬臂板滞后施工下脊骨箱梁空间受力行为研究

董爱平¹, 李龙景², 郭增伟^{2*}

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 重庆交通大学 土木工程学院)

摘要: 为探究悬臂板滞后施工下脊骨宽箱梁受力行为,以某全预应力混凝土部分斜拉桥为背景,建立考虑施工过程的实体有限元模型。通过杆系模型与实体模型的内力对比,验证实体模型的合理性,并分析了恒荷载作用下悬臂板滞后施工以及后浇带长度对脊骨宽箱梁内力的影响。研究发现:相比杆系模型,自重作用下实体模型计算的箱梁竖向弯矩基本相同,计算的箱梁顶底板最大纵向应力存在10%左右偏差;恒载作用下,悬臂板后浇施工可改善箱梁截面纵向应力,且横向应力不均匀性分布较小;随着后浇带宽度的增加,截面纵向应力分布不均匀性增加,但横向应力分布不均匀性有减小趋势。

关键词: 混凝土桥梁; 预应力; 脊骨宽箱梁; 滞后施工; 空间效应

随着社会经济的发展、交通流量的增大,城市主干道、快速路、环线上的高架桥、跨线桥的桥面宽度不断增加。单箱多室箱梁由于多个腹板的支撑可实现更宽的桥面宽度,在大交通流量的公路桥梁中应用较为普遍。在国内外大跨径预应力混凝土箱梁桥的施工中,悬臂浇筑施工法应用较为广泛,对于悬臂挂篮浇筑施工的桥梁结构,桥面宽度的增加,势必使得悬浇节段以及挂篮重量增加。因此,在超宽箱梁悬臂浇筑施工时,对挂篮的浇筑宽度、悬浇节段长度、承载能力等都提出了极高要求。为在保证桥面宽度的同时减小梁体浇筑重量,具有长悬臂翼板形式的脊骨箱梁在工程中得到广泛应用。针对脊骨箱梁长悬臂的结构特点,为减小挂篮宽度,保证施工安全,悬臂板滞后施工工艺应运而生。

箱梁宽度的增加导致腹板对翼板的约束能力降低,进而致使剪力滞效应更为突出,而箱梁剪力滞效应导致的弯曲应力分布特征与截面形式、边界条件、荷载形式以及施工方法等有关。为此,蔺鹏臻等以单箱双室简支箱梁为基础,研究在跨中集中力和满跨均布荷载下不同剪力滞效应模式的分布规律以及高跨比变化对各剪力滞模式的影响规律;赵志峰等以索支撑单箱三室截面箱梁为对象,通过理论分析、有限元模拟及试

验模型加载,研究了考虑轴力滞作用下单箱三室箱梁的空间效应;李兴民等采用动态的有限元仿真程序对桥梁的施工状态进行仿真分析,结果表明施工方法对箱梁空间效应的影响比较明显;孙向东等以四塔单索面宽幅脊梁矮塔斜拉桥为研究对象,认为通过在箱梁翼板处设置后浇带,并使后浇带滞后先浇主梁施工可弱化轴力滞效应,使截面受力更加合理。

为了综合考虑脊骨箱梁空间效应的影响机制,该文以某全预应力混凝土部分斜拉桥为研究背景,采用实体单元的有限元方法对宽箱梁受力行为进行分析,研究其主梁悬臂板滞后施工下,索支撑宽箱梁空间受力特征。

1 工程背景及有限元模型

1.1 工程背景

某全预应力混凝土部分斜拉桥主孔布置为(120+210+120)m,全长450m,桥塔高32.9m。主梁采用变高度单箱三室斜腹板箱形截面,主梁顶板宽38m,悬臂长7.9m,两侧设5m宽后浇带。墩顶梁高6.8m,跨中梁高3.3m,梁底曲线采用1.8次抛物线。主塔墩处塔梁固结,边墩设纵向活动的竖向支座。每个

收稿日期:2018-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51408087,51478071);重庆市前沿与应用基础研究项目(编号:cstc2014jcyjA30009, cstc2015jcyjBX0022);交通运输部建设科技项目(编号:2015318814190)

作者简介:董爱平,男,硕士,高级工程师.E-mail:12476375@qq.com

*通信作者:郭增伟,男,博士,副教授.E-mail:zengweigu@cqjtu.edu.cn

主塔各设 16 对拉索,梁上索间距 4.0 m,塔上索距 0.8 m,全桥共 64 根斜拉索。双向 6 个机动车道+两侧非机动车道和人行道,设计荷载为城市-A 级。图 1 为中跨跨中横向半截面结构示意图。

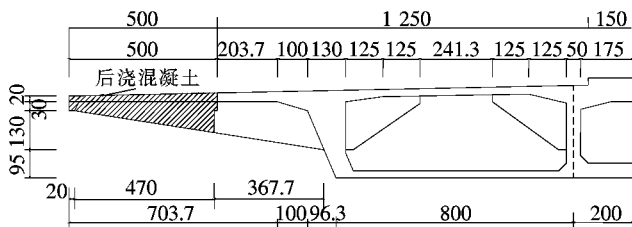


图 1 主梁标准横断面图(单位:cm)

1.2 有限元模型

当梁体宽度较大时,桥梁结构表现出明显的空间变形和受力特性。为此,采用 Midas/Civil 和 Midas/FEA 分别对该算例进行数值分析,研究箱梁空间受力行为。

由于桥梁结构恒载内力依赖结构形成过程,因此桥梁结构恒载内力的正确计算离不开施工过程的正确模拟。该算例主梁采用挂篮悬臂浇筑施工,墩顶 0 号块梁长 20.0 m,悬浇梁段数及梁段长度从根部至跨中分别为:4×3.5 m(1~4 号块)、20×4.0 m(5~24 号块),中跨和边跨合龙段长 2.0 m,边跨现浇段梁长 13.9 m。38 m 宽的梁体自重较大,对挂篮浇筑的宽度、悬臂长度,承载能力要求极高。为减小挂篮宽度并改善宽箱梁整体受力情况,悬臂板两侧设 5 m 宽后浇带(如图 1 中的阴影部分),箱梁顶板后浇带滞后两个梁段浇筑。为探究滞后施工对主梁内力的影响,需分别模拟悬臂板滞后与非滞后施工两种施工工序。

由于 Midas/Civil 不能进行滞后施工的模拟,仅利用 Midas/Civil 模拟非滞后施工下的单梁结构,模型如图 2 所示。有限元模型以跨中为坐标原点,顺桥向设为 X 轴(向右为正),梁高方向设为 Z 轴(向上为正),横桥向设为 Y 轴(右手法则确定 Y 轴正向),全桥模型总共划分为 437 个单元,共有 384 个节点。模型中拉索用仅受拉的桁架单元模拟,初拉力取成桥设计索力。模型中模拟了纵向预应力钢束以及桥面板横向预应力钢束,其中中间梁体(不包括后浇带)的纵向预应力钢束和横向预应力钢束(沿顺桥向均为 1 m 间隔布置)采用 1860 钢绞线束。后浇段处纵向布置精轧螺纹钢,横向使用预应力钢束(位于中间梁体横向钢束中间位置)贯通桥宽。除纵向精轧螺纹钢锚下控制应力为 785 MPa 外,其余预应力钢束锚下控制应力均为 1 395 MPa。

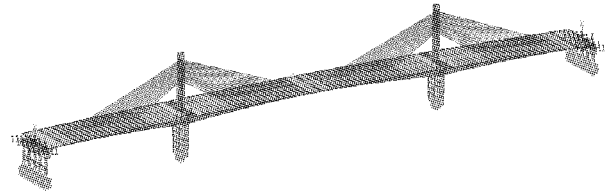


图 2 Midas/civil 全桥梁单元模型

挂篮及模板重 1 800 kN,简化为集中荷载施加在结构上。墩底采用一般支承模拟,约束 6 个方向自由度。悬臂浇筑施工时主墩与主梁之间刚性连接,依次施工各梁段至最大悬臂状态。边跨合龙时,将主墩处刚性连接转换为可以竖向转动的弹性连接。边跨现浇段施工时设置竖向临时支撑,边跨合龙完,在边墩与主梁间设置弹性连接,释放纵向和竖向转动自由度,拆除临时支撑,然后进行中跨合龙,最后添加二期荷载。根据上述施工过程依次进行正装分析得到全桥单梁模型。

Midas/FEA 模型中使用六面体的实体单元模拟混凝土梁体,使用杆单元模拟纵向预应力钢束、横向预应力钢束。为确保实体模型与单梁模型参数的一致性,其中混凝土梁体和预应力钢束通过 Midas/Civil 提供的“杆系模型转换到实体模型”接口从 Midas/Civil 中直接转换过来。由于结构对称,在利用实体单元进行分析时,为节约计算时间,可建立无桥墩的半桥实体模型,整个桥梁模型共划分 475 583 个节点,388 190 个单元。可利用 Midas/FEA 按照 Midas/Civil 模拟方式建立非滞后施工模型。在进行滞后施工模拟时需要注意的是,当对称施工完 2 号梁段主梁梁体时开始浇筑 0 号块悬臂后浇带,随之张拉在 0 号块后浇带上的横向预应力,依次施工至最大悬臂状态,然后进行边跨及中跨合龙,最后进行二期荷载铺装。

1.3 不同模型计算结果对比

为检验 Midas/FEA 精细化空间分析模型的正确性以及考虑空间效应的影响,分别从整体弯矩和截面应力两个层面对 Midas/FEA 和 Midas/Civil 计算结果进行对比分析。在自重荷载作用下,分别利用 Midas/Civil 和 Midas/FEA 计算得到结构关键控制截面(中跨跨中、中跨 3/8 点、中跨 1/4 点、中跨 1/8 点、支点右侧点、支点左侧点、边跨 1/8 点、边跨 1/4 点、边跨 3/8 点)的弯矩以及顶底板纵向应力。图 3 为各控制截面的位置坐标以及由 Midas/FEA 以及 Midas/Civil 计算得到的各控制截面的弯矩相对误差和同一高度处顶底板最大纵向应力的相对误差,其中 Midas/FEA 模型的截面弯矩是通过积分截面应力后获得

的, Midas/Civil 模型的截面应力则是按照初等欧拉梁单元理论根据截面弯矩计算得到的。

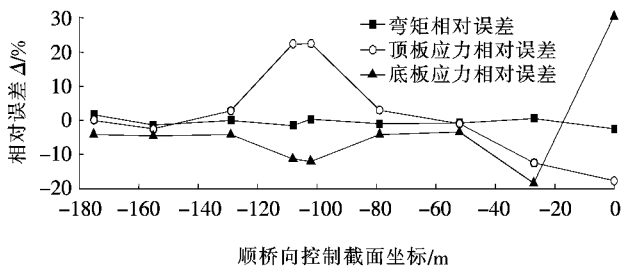


图 3 Midas/Civil 与 Midas/FEA 计算得到的控制截面
竖向弯矩及纵向应力对比

从图 3 可知: 自重荷载作用下, Midas/Civil 和 Midas/FEA 积分计算得到的结构各关键控制截面的竖向弯矩基本一致, 误差在 3% 以内。一方面证明了 Midas/FEA 模型的正确性和有效性, 同时也说明采用梁单元模型可以准确地获知梁体截面内力; 相比于截面弯矩而言, Midas/Civil 和 Midas/FEA 计算得到的相同截面高度处的最大弯曲应力存在 10% 左右的偏差, 最大达到 30%。这表明对于宽箱梁而言, 在受力过程中平截面假定不再成立, 采用梁单元计算得到的截面应力并不能反映真实截面应力的分布, 可能导致工程上低估截面应力, 造成预应力混凝土桥梁开裂等问题的出现。

2 滞后施工对梁体恒载应力的影响

针对全预应力混凝土部分斜拉桥结构体系, 利用拉索与体内预应力共同改善结构受力。由于主梁截面较宽, 为保证施工安全, 在两侧悬臂板设后浇带, 进行悬臂后浇带滞后施工。在施工过程中由于同一截面处的不同步施工, 必定导致箱梁截面内力的重分布, 即悬臂板后浇带使横向分阶段形成断面, 以首次浇筑截面承载为主, 后浇截面承载为辅, 对截面纵向应力分布产生影响。在拉索的作用下使得结构产生较大的轴力, 轴力在传递过程中, 也会产生轴力滞后现象, 造成截面纵向应力分布不均。考虑了索力、预应力、二期恒载的影响后, 纵向应力主要由拉索在截面产生的轴应力以及弯曲正应力引起。因此, 上下顶缘纵向应力的不均匀性由轴应力的不均匀性、剪力滞造成的不均匀性以及后浇带形成过程产生的不均匀性共同引起。为此, 探讨组合效应影响下纵向应力分布情况极其重要。为定量评价弯曲正应力沿宽箱梁翼缘的不均匀分布情

况, 特定义纵向应力剪力滞系数 λ , 按式(1)计算:

$$\lambda = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为同一高度处弯曲正应力的最大值; $\bar{\sigma}$ 为同一高度处弯曲正应力的平均值。

2.1 纵向应力

恒载作用下, 悬臂段滞后施工对纵向应力的影响由弯曲正应力以及轴向正应力共同决定。图 4 为滞后以及非滞后施工下中跨 1/4 截面位置处恒载产生的上下翼缘纵向应力的分布情况。

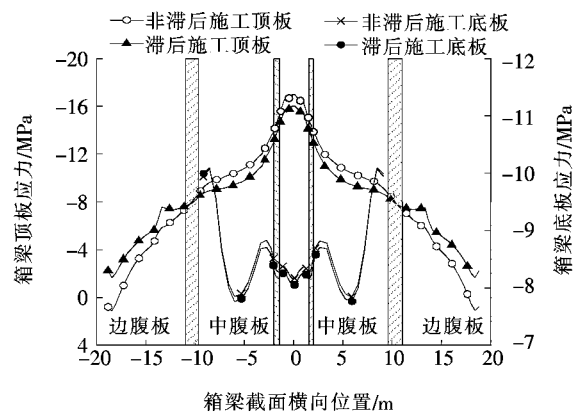


图 4 恒载下跨中 1/4 截面纵向正应力

由图 4 可知: 由于索力引起较大的轴力, 中间梁体顶板轴力较大, 在向两侧传递时, 轴力传递效果减弱。从而致使轴力产生的正应力与弯曲正应力的叠加呈现出中间部位最大, 向两侧递减, 致使剪力滞效应不明显; 相对正常施工而言, 在恒载作用下滞后施工时, 同一截面存在承受轴力和弯矩的不同步, 造成在中间梁体纵向压应力减小, 两端翼板压应力增大。

图 5 为各控制截面的剪力滞系数, 相对正常施工, 顶板悬臂段滞后施工下得到不均匀性指标相对较小, 对于内力横向分布的均匀性有所改善, 而对于底板而言基本无影响。

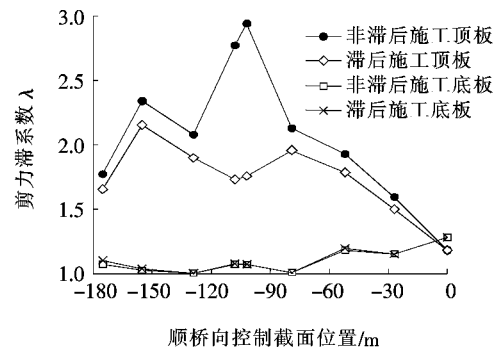


图 5 恒载下各截面纵向应力剪力滞系数

2.2 横向应力

滞后施工引起的横向钢束张拉的不同步势必造成横向应力的改变。为探讨施工工序对恒载横向内力的影响,选择支点(-95~-115 m段)、中跨1/4点(-45~-57 m段)、中跨跨中(-1~-13 m段)、边跨1/3点(-169~-181 m段)、悬臂板(距离桥面边缘宽5 m)处纵向截面,考察其横向内力分布情况。图6为非滞后与滞后施工下支点处横向应力分布图。从图6可知:滞后施工工艺,使悬臂板纵向截面顶缘的横向应力分布较均匀,滞后悬臂施工可改善悬臂板纵向截面横向应力分布。

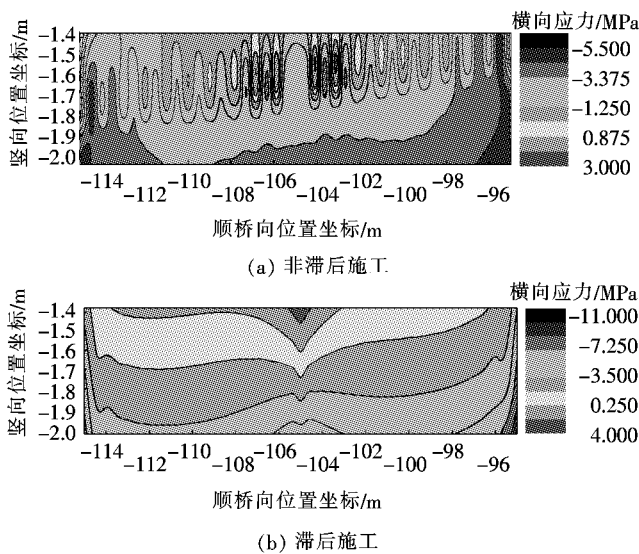


图6 非滞后施工与滞后施工下支点处横向应力分布对比

为定量描述滞后施工工序对悬臂板纵向截面顶缘横向应力分布的影响,特定义横向应力不均匀性系数 δ ,其计算公式如式(2)所示。

$$\delta = (\sigma - \bar{\sigma})^2 / n \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为悬臂板纵向截面顶缘横向正应力的平均值; σ 为悬臂板纵向截面顶缘各节点横向正应力; n 为提取悬臂板纵向截面顶缘节点的个数。

表1为各截面横向应力不均匀性系数。从表1可知:相对于非滞后施工,在滞后施工下提取的各截面横向应力的剪力滞系数除跨中1/4截面相等外,其余截面均减小。

表1 横向应力不均匀性系数 δ

施工工序	δ 值			
	支点	跨中1/4点	边跨1/3点	跨中
非滞后施工	1.78	2.09	1.88	1.97
滞后施工	1.34	2.09	1.31	0.78

3 悬臂板后浇带宽度的优化

悬臂板设置后浇带可改善主梁受力情况,为探究后浇带宽度对改善受力情况的影响,选取后浇带宽度5 m作为参照长度,后浇带宽度4、6 m作为对比长度,考察恒载作用下后浇带宽度对宽箱梁内力分布特征的影响。图7为恒载作用下后浇带宽度对纵向应力不均匀性的影响。

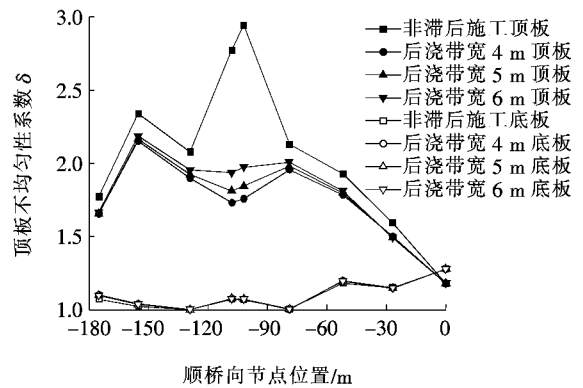


图7 恒载作用下控制截面不均匀性对比

从图7可知:恒载作用下后浇带宽度对支点附近截面影响较大,极大地改善了支点附近截面受力的不均匀性,随着后浇带宽度的增加其不均匀性系数增大,而对于其他截面以及底板影响不大。

为探索后浇带长度对宽箱梁横向受力的影响,取纵向位置为支点(-95~-115 m段)、跨中1/4点(-45~-57 m段)、中跨跨中(-1~-13 m)段、边跨1/3点(-169~-181 m段),横向位置为距离顶板边缘5 m处纵向截面,考察恒载下其横向内力分布情况。图8为4种施工方案下,距离顶板边缘5 m处各纵向截面的横向内力分布情况。从图8可知,除中跨1/4点截面外,其余截面不均匀性系数均随着后浇带宽度增加而减小。

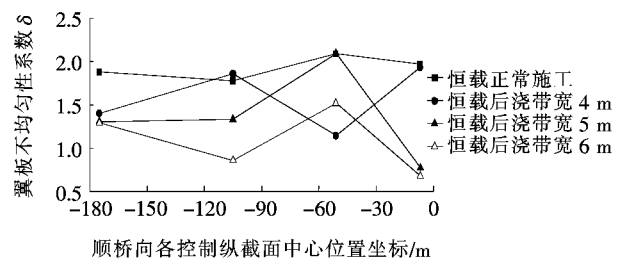


图8 翼板横向应力不均匀性对比

综合后浇带宽度对纵向应力以及横向应力的影响可知:后浇带宽度取5 m时对纵向应力以及横向应力

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.04.012

定海大桥非线性黏滞阻尼器参数研究

范定强, 柳佳晖, 阮汉林, 王雄江*

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 以一座 V 形墩连续刚构桥为工程背景, 研究非线性黏滞阻尼器的设置对该桥梁抗震性能的影响。建立有限元计算模型, 采用非线性动力时程法分析阻尼参数, 讨论黏滞阻尼器在桥梁的设置位置, 并与未设置阻尼器的桥梁地震响应情况进行对比。结果表明: 通过在桥梁上设置非线性黏滞阻尼器后, 合理选择黏滞阻尼器的位置和参数, 可有效降低桥梁关键结构在地震作用下的位移变形和内力响应, 提高桥梁的抗震性能。

关键词: 连续刚构桥; 非线性黏滞阻尼器; 非线性动力时程分析; 抗震分析

自步入 21 世纪以来, 世界各国大小型地震频发不断, 特别是中国 2008 年的汶川大地震, 造成汶川县几乎所有桥梁倒塌。这些案例, 引起了世界各国政府和研究人员的重视。目前, 世界各国普遍采用消能减振技术, 并在地震中发挥了重要的作用。消能减振技术可通过降低地震时桥梁结构的地震响应或使其在接近弹性变形范围内减少或避免塑性变形。非线性黏滞阻

尼器就是消能减震技术常用的减震元件中的一种, 通过将地震、风等输入的动能消散到结构中, 达到结构减震的目的。在桥梁中设置黏滞阻尼器, 可以充分体现消能减震技术的优势。在国外, 该技术常在新桥抗震设计以及旧桥加固中应用, 如美国金门大桥、希腊 Rion—Antirion 大桥等。中国的科研人员也开始研究黏滞阻尼器的使用, 将其应用于桥梁, 并总结出一些成

的不均匀性分布改善较好。

4 结论

(1) 相比于实体模型, 单梁模型计算的箱梁竖向弯矩基本相同, 由于单梁模型未能考虑箱梁的空间效应致使在自重作用下计算的箱梁顶底板最大纵向应力存在 10% 左右偏差。

(2) 恒载作用下, 由于拉索轴力滞的影响, 悬臂板后浇施工使得悬臂段后浇带的纵向压应力增大, 中间梁体纵向压应力减小, 致使截面顶板纵向应力不均匀分布减小。对于纵截面而言, 横向正应力不均匀分布较小。随着后浇带宽度的增加, 截面纵向应力不均匀分布增加; 除中跨 1/4 点截面外, 横向应力不均匀分布减小。

(3) 由于悬臂板后浇施工使得主梁的同一截面出现两种不同龄期的混凝土, 由此产生的差异收缩可能

导致梁体收缩裂缝, 因此, 对于后浇带浇筑滞后时长应作进一步研究。

参考文献:

- [1] 雷俊卿. 桥梁悬臂施工与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [2] 陈开桥, 王吉连, 毛伟琦. 千吨级变宽悬浇挂篮设计[J]. 世界桥梁, 2013(4).
- [3] 刘威. 脊骨梁力学性能研究[D]. 河北工业大学硕士学位论文, 2011.
- [4] 蔺鹏臻, 孙理想, 杨子江, 等. 单箱双室简支箱梁的剪力滞效应研究[J]. 铁道工程学报, 2014(1).
- [5] 赵志峰. 索支撑单箱三室箱梁剪力滞效应的分析理论与试验研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 2016.
- [6] 李兴民. 施工过程对箱梁剪力滞效应影响分析[J]. 桥梁建设, 2013(1).
- [7] 孙向东. 四塔单索面宽幅脊梁矮塔斜拉桥设计关键技术研究[D]. 武汉理工大学博士学位论文, 2010.

收稿日期: 2018-06-11

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(编号: 2017CFB603); 武汉理工大学自主创新研究基金项目(编号: 2017TJC119)

作者简介: 范定强, 男, 大学本科在读. E-mail: 1285613885@qq.com

* 通信作者: 王雄江, 男, 博士, 副教授. E-mail: wangxiongjiang@163.com