

贝雷梁钢便桥动力响应影响因素分析

许贵满, 韩海娅

(黔南民族职业技术学院 建筑工程与设计系, 贵州 都匀 558000)

摘要:以跨度 24 m 的下承式贝雷梁钢便桥作为研究对象,采用 ANSYS 建立三维空间有限元模型,运用瞬态动力分析方法,移动荷载模拟车辆过桥的整个过程,分析不同车速、不同加强方案对钢桥的动力响应影响。结果表明:加强弦杆能提高钢桥固有频率,不能改变其振型;随着车速的提高,钢桥的最大竖向动位移、振动加速度均呈现非线性增加;使用加强弦杆能够提高钢桥刚度,降低振动幅值,减弱车速对钢桥振动加速度的影响;从钢桥动力响应的角度考虑弦杆加强方案,由优到劣依次为上下弦杆加强、上弦杆加强、下弦杆加强、无加强弦杆;无论是否使用加强弦杆都会使得内外侧贝雷梁变形不一致,因变形差异微小可忽略不计。综合考虑,建议贝雷梁作为钢便桥使用时,宜加强上下弦杆以减小动位移,限速 50 km/h 以降低钢桥振动影响。

关键词:钢桥;贝雷梁;移动荷载;加强弦杆;动力分析

中图分类号: U448.29 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)01-0020-06

0 引言

贝雷梁钢便桥以自重轻、方便快捷架设等优势在工程中得以广泛应用,尤其在抗震抢险救灾的时候,作为架设运送物质的便桥起到了关键作用。近年来,对于贝雷梁的结构安全计算,大多数实际工程采用静力分析的方法来保证^[1-5]。贝雷梁钢便桥作为临时桥梁结构使用时,一般需要满足大型重载车辆的通过,当车辆以某一速度通过时,桥面不平顺等因素会引起车辆与贝雷梁结构之间发生耦合振动,产生的变形和应力都比荷载静止不动时大,忽略动力效应可能造成结构承载力降低,导致结构破坏。黄文等^[6]结合工程实例对贝雷梁桥梁静动载试验,提出限载限行,加强结构的建议;袁红茵等^[7]通过静动力荷载试验实测得到动力特性规律性较差,振动异常明显,尤其是水平振动;陈鲁等^[8]通过 5 种工况满载试验,分析了钢便桥的承载力特征;李皓桢等^[9]利用 ANSYS 对贝雷桁架架桥机进行模态和谐响应的分析,得到设计架桥机时应避免的两阶频率。以上学者的研究揭示了贝雷梁钢便桥的一些动力响应特性,让工程师在面对实际工程时得到很好的应用,但贝雷梁的加强弦杆及车辆的移动速度对钢便桥的动力影响没有进行分析,给实际工程应用带来困惑。

在进行贝雷梁钢便桥的结构计算时,多数将计算模型简化为二维平面模型,即假设贝雷梁均匀承担来自横梁的竖向荷载,并没有考虑贝雷梁因三维空间原因产生的不均匀承载效应。其计算结果在一定程度上反应了贝雷梁钢便桥的动力特性,但没有反应贝雷梁钢便桥的三维整体振动状态。本文利用 ANSYS 有限元分析软件,建立三维空间有限元模型,从模态分析中得到主要的振动形态,进而考虑不同车速、不同弦杆的加强方案,对贝雷梁钢便桥动力响应的影响进行分析研究。

1 贝雷梁钢便桥

根据文献^[10]知,贝雷梁钢便桥主要由主梁(桁架)、桥面系、支撑系统、引桥和人行道组成。贝雷片用销子连接成一排贝雷梁,利用支撑架连接贝雷梁组成主梁,布置在桥梁两侧,两侧主梁用横梁连接,在

收稿日期:2018-11-01 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20181101001

作者简介:许贵满(1986—),男,讲师,研究方向为土木工程中的力学应用、固体力学、轮轨关系。E-mail:xgmfx@163.com

许贵满,韩海娅.贝雷梁钢便桥动力响应影响因素分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(1):20-24,73.

该横梁上铺设无扣纵梁和钢板形成桥面系。选取跨度为 24 m(8 片贝雷片)的下承式简支梁钢便桥作为研究对象,采用 4 种不同弦杆加强方案,分别为无加强弦杆、上弦杆加强、下弦杆加强和上下弦杆加强,具体尺寸及加强方式如图 1 所示。贝雷片的弦杆、竖杆及斜杆均采用 16Mn 钢;横梁为 27 号压延工字钢制成;纵梁由热轧轻型 10 号工字钢和 8 号工字钢制成;桥面板采用 5 mm 厚钢板制成;加强弦杆为 2 根 10 号槽钢组成,与贝雷片弦杆相同。

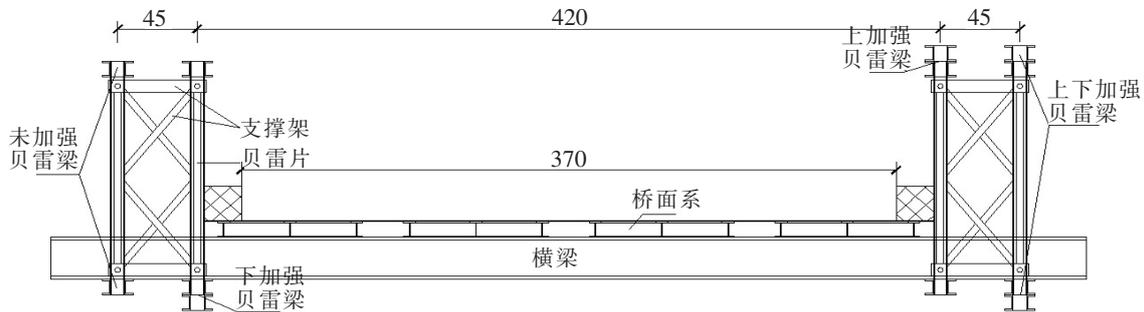


图 1 贝雷梁钢便桥横断面图(单位:cm)

2 三维空间有限元模型

按照上述钢便桥的实际尺寸,运用大型有限元软件 ANSYS 建立相应的三维空间有限元模型。利用梁单元 beam188 模拟主梁结构和壳单元 shell63 模拟桥面系结构,桥面系和横梁、横梁和主梁的连接采用 3 个方向移动自由度的耦合关系,贝雷片之间采用锥销将阴阳接头连接起来,在平面内方向的连接为铰接,故采用 3 个方向移动自由度和 2 个旋转自由度的耦合关系,即假设各构件之间的连接无滑移、无空隙,并忽略因连接的缝隙而产生的挠度,桥梁两端支座边界条件设置为铰接,三维空间有限元模型如图 2 所示,包含 27 587 个节点和 20 024 个单元。材料的弹性模量为 206 GPa,泊松比 0.3,密度 7 850 kg/m³,结构阻尼比为 0.03。在车辆通过钢桥时,因路面不平顺等原因,会激起车辆的振动,继而激起桥梁振动,实际整个过程是车桥耦合振动,为了简化计算,假设车辆为无质量的匀速移动荷载,其中前轴轴重 30 kN,中轴轴重 2×120 kN,后轴轴重 2×140 kN,移动荷载模型^[12]如图 3 所示,车辆轴线与桥梁轴线重合,即不考虑车辆偏心。

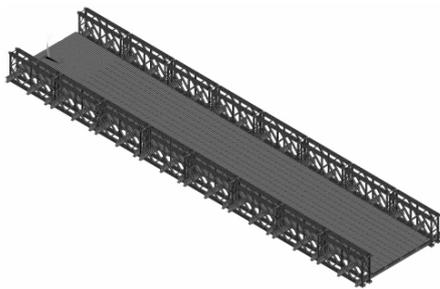


图 2 贝雷梁钢便桥三维空间有限元模型

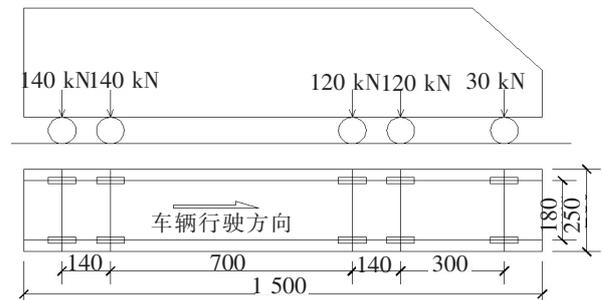


图 3 移动荷载模型图(单位:cm)

3 数值试验分析

首先对贝雷梁钢便桥结构的固有特性进行分析,即模态分析^[11],分析采用 Block Lanczos 法,选取前 10 阶模态,经过软件计算,得到无加强弦杆的前 4 阶主振型变形如图 4 所示。为了研究加强弦杆的影响,建立 4 种不同加强方案的有限元模型,分别为无加强弦杆(上下弦杆为 2[10]、上弦杆加强(上弦杆 2[10],下弦杆 4[10]、下弦杆加强(上弦杆 4[10],下弦杆 2[10])和上下弦杆加强(上下弦杆为 4[10]),数值分析得到前 10 阶振动模态,取不同加强方案的前 3 阶^[9]固有频率和主振型进行分析,如表 1 所示。

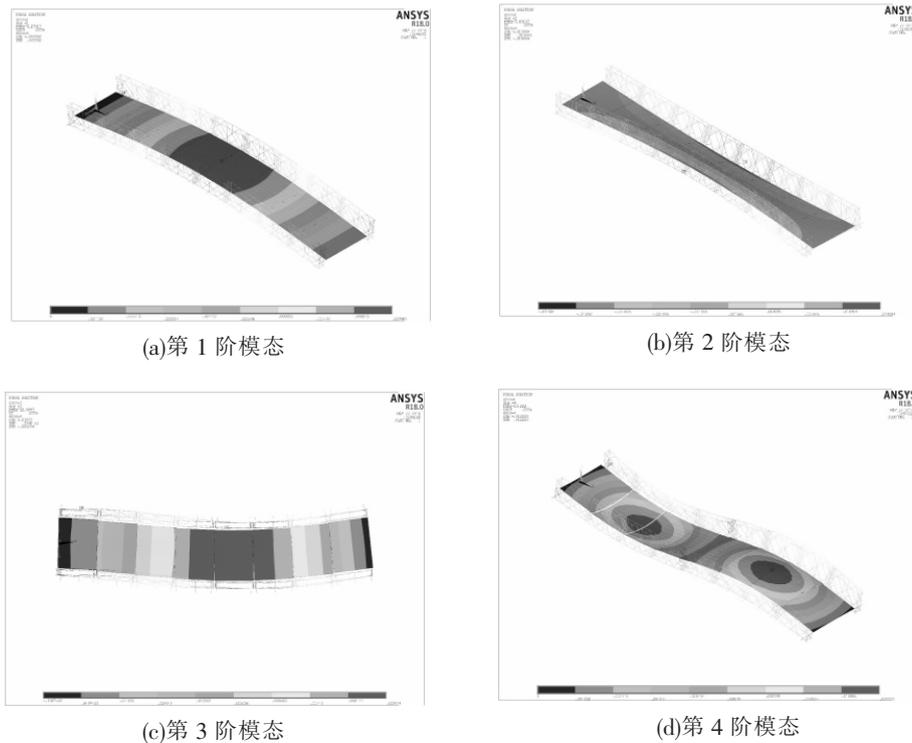


图 4 第 1~4 阶模态图

表 1 不同弦杆加强方案的贝雷梁钢便桥前 3 阶模态频率及主振型

模态阶数	无加强弦杆 频率/Hz	上弦杆加强 频率/Hz	下弦杆加强 频率/Hz	上下弦杆加强 频率/Hz	主振型
1	4.279 1	4.701 1	4.530 8	5.197 1	左右主梁竖向上下同步摆动
2	5.69	5.938 6	5.773 2	6.370 3	左右主梁竖向上下异步扭摆
3	12.988	13.482	13.684	13.807	左右主梁水平左右同步摆动

从表 1 的数据来看,第 1 阶固有频率在 4.2~5.2 Hz 之间,加强弦杆对钢桥结构的固有频率有所提高,但主振型并没有改变,前 2 阶的振动形式均为竖向弯曲振动为主。说明加强弦杆能够提高钢桥结构的刚度,提高其固有频率,并未改变钢桥的基本结构。车辆通过钢桥最容易发生的均是竖向的弯曲振动,在车辆通过钢桥时,其激励源主要来自车辆工作频率及路面不平顺,可以通过假设移动荷载为随时间变化的正弦函数来模拟,即 $F\sin(\omega t)$,其中, ω 为激励频率,故要求车辆激励荷载的频率应尽量远离钢桥的第 1 阶固有频率,以避免与钢桥发生共振现象而导致破坏。

为了进一步研究车速、加强弦杆等因素对钢桥振动加速度及动位移的影响,采用 ANSYS 的瞬态动力分析方法^[11],对 4 种不同弦杆加强方案的有限元模型进行数值模拟。采用移动荷载模拟整个车辆从右侧上桥直至下桥的过程,每个荷载步荷载移动 0.5 m,包含 5 个荷载子步,时间间隔等于 0.5 除以车辆移动速度,共计 76 个荷载步文件求解。通过钢桥的最大竖向位移及振动加速度等动力响应分析其因素的影响。

取车辆模型的移动速度在 0~72 km/h 之间进行瞬态分析。由于结构和荷载均对称,得到左右两边主梁的响应相同,提取任意一边主梁的内外两侧贝雷梁的最大竖向位移,此时车辆前轴钢桥上桥端 20 m 处附近,随速度变化如图 5 所示。从图中可见,随着车速的增加,最大竖向位移均逐渐增大,从增大的趋势来看,由快到慢依次是无加强弦杆、下弦杆加强、上弦杆加强和上下弦杆加强,受速度影响最小的是上下弦杆加强的模型,相对而言,上弦杆加强优于下弦杆。任何一种弦杆加强模型的两排贝雷梁变形并不是完全一致的,而且内侧贝雷梁的变形较大,说明两排贝雷梁受力并不均衡,内侧贝雷梁因变形大而承担

相对较多的荷载。取 4 种弦杆加强模型内外侧贝雷梁变形量差值分别占平均值的 1.34%、1.78%、1.37%、0.98%，从所占比值来看，内外侧贝雷梁的不均匀变形差异较小，且上下弦杆加强的模型能够减小差异，仅仅加强上弦杆或下弦杆不能起到减小内外侧贝雷梁变形的差异，相反会增大差异，造成内外侧贝雷梁的变形不一致，相对而言，仅仅上弦杆加强会更不利于贝雷梁的均匀受力。从数值差异大小上来看，内外侧贝雷梁的变形差异的数值非常小，故可忽略不计。按照规范^[12]的最大允许竖向位移为 $L/500$ ，即 48 mm，仅有上下弦杆加强的模型刚度满足其要求。

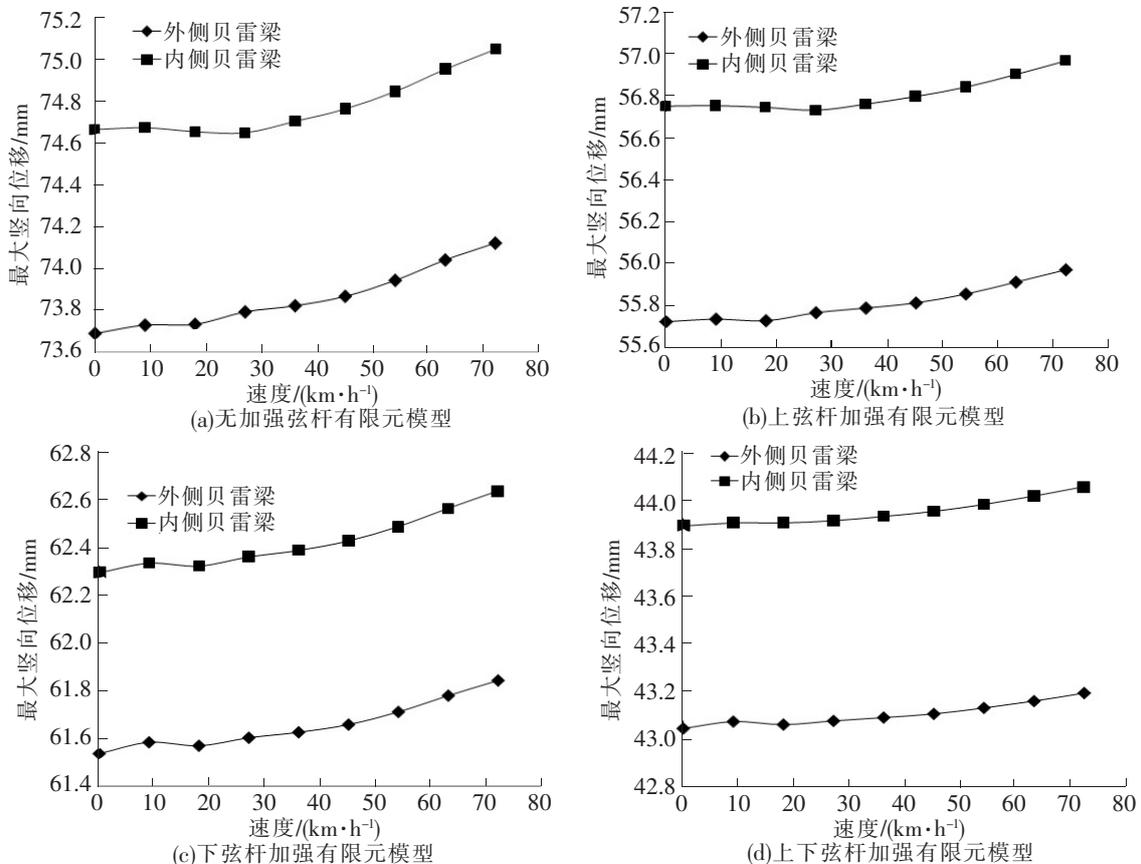


图 5 跨中最大竖向位移变化图

跨中截面的动位移是反应结构振动幅值的重要参数。图 6 给出了最大动位移的变化曲线，可以看到，贝雷梁钢便桥最大动位移与速度呈非线性的增大关系，尤其是无加强弦杆的动位移最大，相对而言，上下弦杆加强大约能够降低动位移三分之二，上弦杆或下弦杆加强的动位移处于两者之间，且上弦杆加强的动位移明显低于下弦杆加强。说明贝雷梁钢便桥的振动幅值随着车速的提高逐渐增大，加强弦杆能够降低钢桥的动位移，提高钢桥的刚度，在贝雷梁的上弦杆使用加强弦杆优于下弦杆。钢桥本身刚度较差，使用上下弦杆均加强能够明显降低速度对钢桥动位移的影响。

跨中竖向最大振动加速度出现在车辆前轴达到 13.2 m 处位置，其变化规律如图 7 所示。随着车辆移动速度的增大，贝雷梁钢便桥的跨中竖向最大振动加速度也会随之增大，钢桥竖向最大振动加速度在车速低于 50 km/h 时变化不大，超过 50 km/h 时，钢桥的竖向最大振动加速度也开始增大，相对而言，加强弦杆能够降低钢桥竖向最大振动加速度，尤其是车速较高时，加强弦杆的作用更加明显地起到减小车速对最大振动加速度的影响。上弦杆或下弦杆加强在速度为 10~50 km/h 时稍微有些区别，而车速不在这个区间时上侧或下侧加强均一样，如车速达到 72 km/h，仅仅在上弦杆或下弦杆使用加强弦杆能降低最大振动加速度 30%，上下采用加强弦杆能够降低 50%。从以上分析来看，加强弦杆能够降低钢桥的跨中竖向最大振动加速度，减小钢桥动力响应，为使得贝雷梁钢便桥动力响应不至于迅速增大，故建议车速低

于 50 km/h, 以避免桥梁产生过大的振动加速度而发生破坏。

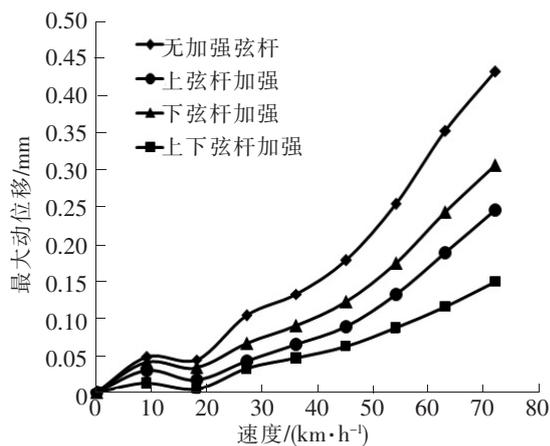


图 6 最大动位移随速度的变化图

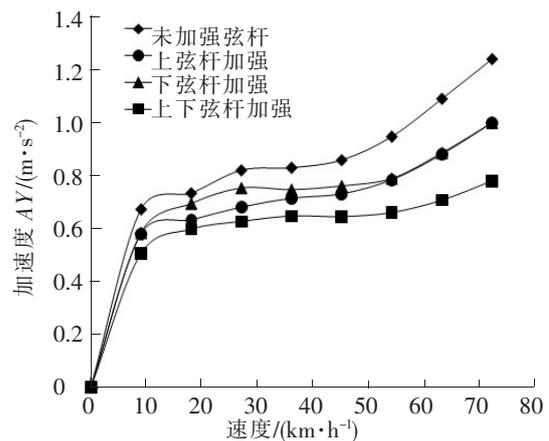


图 7 跨中竖向最大加速度变化图

4 结论

在贝雷梁钢便桥模态分析的基础上,对钢桥的三维空间有限元模型进行瞬态分析,通过分析最大竖向位移、跨中动位移及最大振动加速度等动力响应得到如下结论:

(1)前 2 阶振型为竖向弯曲上下振动,第 3 阶振型为侧向弯曲,荷载激励频率应尽量避免与钢桥固有频率 4.2~5.2 Hz 靠近,以防止出现钢桥共振,使用加强弦杆能够提高钢桥固有频率,但不能改变其振型。

(2)贝雷梁竖向最大位移随着车速的增大而增大,内外两侧贝雷梁的变形不一致,且变形差异微小,加强弦杆对其变形不一致的改善几乎不起作用,可忽略不计。

(3)动位移随速度的变化呈现非线性的增大关系,使用加强弦杆能够降低动位移,且在上弦杆使用加强弦杆优于下弦杆,鉴于贝雷梁刚度本身较低,建议作为钢便桥使用时,上下弦杆均需要使用加强弦杆提高其刚度,减小动位移。

(4)钢便桥振动加速度随着车速的增加呈非线性的增大,采用加强弦杆能够降低车速对钢桥的振动加速度,尤其是随着车速超过某值后,不采用加强弦杆的钢桥振动加速度会明显随车速增大而迅速提高。

综上所述,建议贝雷梁作为钢便桥使用时,采用上下加强弦杆,限速 50 km/h,以降低钢桥的振动影响,确保车辆安全通过钢桥。

参 考 文 献

- [1]孙洪岩,杨平,张彦红,等. 地铁车站交通疏散钢便桥数值分析研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 472-476.
- [2]梁远森,王守君,张静芳. “321”贝雷梁钢便桥静力性能分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(5): 39-42.
- [3]唐浩斌,刘智君,沈育民. 上承式贝雷梁钢便桥的设计[J]. 湖南交通科技, 2006, 32(3): 111-114.
- [4]刘旭伟. 贝雷梁便桥的检算及安全使用方法[J]. 贵州大学学报:自然科学版, 2009, 26(1): 120-123.
- [5]史正洪,孙九春. 基于静载试验的贝雷梁临时便桥力学状态研究[J]. 上海公路, 2013(3): 40-43.
- [6]黄文,袁向荣. 钢便桥静载试验研究[J]. 长春工程学院学报:自然科学版, 2010, 11(4): 27-29.
- [7]袁红茵,戴永相,张文杰. 贝雷架钢桥的静动力荷载试验研究[J]. 西部交通科技, 2007(5): 84-87.
- [8]陈鲁,柳民,李燕等. 新型超宽下承式施工钢便桥静载试验研究[J]. 施工技术, 2018, 47(4): 81-84.
- [9]李皓桢,吴康雄,朱奇. 架桥机贝雷架主梁动态特性分析[J]. 建筑机械化, 2008(9): 34-36.
- [10]黄绍金,刘陌生. 装配式公路钢桥多用途使用手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.
- [11]李国,叶裕明,刘春山等. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [12]中交公路规划设计院有限公司. JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(下转第 73 页)

[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 49(3): 259-307.

Exponential Estimation of Solutions for a Delay Differential Equations with Fractional-order Calculus

Bao Zhichao, Niu Jiangchuan, Shen Yongjun, Yang Shaopu

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: It is of great theoretical significance to study the existence and uniqueness of solutions of fractional differential delay differential equations. For permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on current loop fractional-order PID control, a theoretical model of control system with time delay was established, and a class of differential equation with time delay fractional order terms was obtained. The existence, uniqueness, and exponential estimation of solutions of such differential equations were mainly studied. The existence and uniqueness of the solution of this kind of differential equations were proved by using the step-by-step method, and the exponential estimations of the solution of this kind of differential equations were presented by using the generalized Gronwall inequality. It provides a theoretical basis for studying the analytical solutions of such equation.

Key words: time-delay; fractional-order PID control; exponential estimation; permanent magnet synchronous motor

~~~~~  
(上接第 24 页)

## Dynamic Influence Analysis of Temporary Steel Bridge with Bailey Beam

Xu Guiman, Han Haiya

(Department of Construction Engineering and Design, Qiannan Polytechnic For Nationalities, Duyun 558000, China)

**Abstract:** A bailey beam temporary steel bridge with 24 m span is selected as the research object, and a 3D finite element model is established by ANSYS. The method of transient dynamic analysis is adopted. The whole process of vehicle passing the bridge is simulated with the moving load. The influence of different speed and different strengthened measures on the dynamic response of bridge is analyzed. The results show that the strengthening chord can improve the natural frequency of steel bridge, but can't change the vibration mode. The maximum vertical dynamic displacement and vibration acceleration of steel bridge ascend nonlinearly with the increase of speed. Strengthened-chords can enhance bridge stiffness and reduce the amplitude of steel bridge, and also can weaken the influence of vehicle speed on the vibration acceleration of steel bridge. From the point of view of dynamic response of steel bridge, the upper and lower strengthened-cords, upper strengthened-cords, lower strengthened-cord and without strengthened-cords are suggested to use in order. The force and deformation of the inner and outer bailey beams become uneven whether or not to use the strengthen-chords. However, the difference of uneven deformation is small and can be ignored. The strengthened-chords should be installed at the upper and lower side of temporary steel bridge to descend the dynamic deformation. The speed should be less than 50 km/h to descend the dynamic response of steel bridge.

**Key words:** steel bridge; bailey beam; moving load; strengthened-chord; dynamic analysis