

文章编号:1006—2106(2002)02—0025—05

从系统的频响特性看桥梁振动测试中的幅值分析法

刘汉夫*

(铁道部科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081)

提 要: 本文针对铁路桥梁动态测试中的幅值分析问题,从测试原理上就如何识别波形畸变、如何结合具体时域波形选择正确的分析方法,进行了理论分析与实例讨论,提出了各种幅值分析方法的适用条件,对具体方法的应用提出了建议。

关键词: 信号处理; 传感器; 频率响应; 畸变; 幅值

中图分类号: U442 **文献标识码:** A

1 振动信号处理的重要性

对铁路桥梁进行行车激励条件下的响应测试,是了解桥梁振动特性的一种常见方法。测试中拾取的信号主要有速度、加速度与位移,通常以位移拾取最为常见。尤其是列车通过桥梁时,桥梁水平横向振幅的大小,是评估桥梁横向刚度的一项主要指标。中国《铁路桥梁检定规范》(1978 出版)与即将颁布的新桥梁检定规范都将桥梁横向振幅作为评估桥梁横向刚度的主要标准,日本国铁技术研究所也针对客、货车分别提出了最大横向振幅的限值标准^[1]。因此,如何从桥梁行车振动试验中正确合理地确定横向振动幅值是至关重要的。

由于试验方法上及信号处理技术上的不规范与不健全,也由于人们对随机过程、随机振动及信号处理基本理论的理解和掌握程度不同,必然要在数据采集与分析处理上出现各种偏差。一个成功的动态测试必须同时具备两个条件:其一是数据样本的正确获取,包括正确的测试系统设置、正确的截断频率设置、恰当的电平调理与正确的采样频率的设置;其二要在正确完整的信号分析处理理论指导下,对获取的数字信号进行分析处理。因为综合看来,样本记录是各种信息的载体,其中包含有试验者感兴趣的信号,还有其它各类噪声和畸变信号。广义地说,实际获得的只能是被污染的综合信号。因此如何从样本记录中正确确定、提取

的信号,这是数据处理的关键。

结构动态响应信号的分析处理,这是一门综合学科,要求实际工作者有敏锐的结构观点、扎实的力学与数学能力,还要有相当的实际经验。现代的各种分析仪、数据处理机以及现成的数据分析程序给数据处理带来了极大快捷性,但同时使用者的理论素质也提出了更高的要求:必须根据自己的相关知识,能够正确理解、正确使用这些方法。因为各种方法都有自己的优势和劣势,也都有其特定使用场合。因此,必须针对具体的结构、具体的试验记录,深入开展数据分析方法的研究,努力提高从事桥梁试验评估者的理论鉴别水平,这对确保试验质量、从试验数据中尽可能多地获取有价值的响应信息、提高试验效能都具有重要意义。

2 桥梁振动测试系统的频响特性

通过列车过桥时桥梁某一点的振动采样,得到的是这一点在这一随机过程中的一个原始样本数据。现今桥梁振动测试系统多属惯性传感测试系统,振动传感器是由惯性质量、弹簧和阻尼装置所组成的惯性系统。系统把这种原始的惯性质量的相对于传感器外壳的运动信号根据不同的机械学、电学原理转换成电信号,根据转换方式、原理的不同把振动传感器分为磁电式、压电式两类。根据惯性式传感测试系统的幅频、相频特性,磁电系统欲不失真地反映绝对运动,必须使得系统的固有频率远小于传感器外壳的激励频率;而压电系统欲不失真地反映绝对运动,必须使得系统的固

万方数据

* 收稿日期 2002—02—08 刘汉夫 副研究员 男 1963 年出生

有频率远大于传感器外壳的激励频率。桥梁的振动响应主要位于低频段,由于压电系统弹簧刚度很大,质量块的质量又比较小,因而其系统固有频率很高,可达数千赫兹,远大于桥梁结构的整体或局部振动频率。但压电式测试系统反映桥梁低频振动的一个不利之处是在低频振动条件下其灵敏度不够高,因此现今桥梁振动测试系统还是以磁电系统为主。受传感器结构上以及抗横向干扰能力诸方面的制约,实际上磁电式惯性系统的固有频率无法做得足够低,尽管还可以通过各种后续补偿电路使系统的可用频率下限进一步拓展,但是这种拓展范围也是受元器件噪声以及惯性系统固有频率制约的,无法做到无限制的低频拓展。试图采用磁电式惯性传感测试系统得到超低频的绝对位移,这一直是比较热门而又悬而未决的研究课题。对于系统可用频率段以外的低频分量,还需要借助于相当复杂的信号恢复技术才能部分解决。

因此,现今的磁电式惯性传感测试系统均不同程度地普遍存在系统有限低频响应问题,即对于超低频的被测位移,测试系统无法满足其信号不失真条件。对于这样频率段的被测位移,系统的响应只能是畸变的。因此,广义地说:不能要求这种的测试系统能够完整地、不失真地反映 $0\sim$ 折叠频率范围内所有的振动成份,而只能根据以往的经验、结构的特点以及事先推算的结果,判定出目的信号的频率位置,根据其频率位置选定测试系统,这样后期数据处理的主要目的就是从事试验记录中正确地提取目的信号,因此事先必须正确估计目的信号的频率响应特点,这是保证数据正确采样的前提之一。

根据系统频响特性及结构激励频带的不同,一个随机样本记录通常含有以下频率成份的响应信息:

(1)在系统通频带范围内的响应成份。

在该频带范围内,幅频特性曲线满足 $\beta(f)=1.0$,相频特性满足线性条件,这时系统的输出与输入完全一致,波形不存在畸变现象。

(2)在系统通频带范围以外的响应成份。

由于系统的激励(即桥梁在测点处的实际位移)频率主要是在低频范围内,因此,这里所说的“通频带范围以外”主要是指 $0\sim$ 系统可用最低频率之间的频带。

在该频带内惯性系统的响应波形将要出现输出畸变,值得注意的是:作为测振系统的一种低频输入——结构在测点处的低频激励的存在是一种很普遍的现象,比如桥梁竖向、桥梁结构某点处的竖向位移是两类变形的叠加:其一是由于车辆轴重引起的低频位移,它实际上反映了各时刻该点的静挠度,其二是较高频率的结构振动响应;桥梁横向也类似,由于桥梁结构的重

心与加载车辆的重心在桥梁横向上的不一致,必须导致桥梁横向出现扭转变形,表现为横向不同程度地出现偏振现象,在振动在波形与频谱上体现为高频与低频振动成份的叠加。

可见,无论是桥梁的横向还是竖向,对于测振系统而言,系统通频带范围以外的激励成份,其存在完全是一种客观现实,这样,响应波形的畸变总是存在的,只是由于响应能量的频谱分布不同,这种畸变程度不同而已。这就要求对复杂振动波形的幅值分析必须持审慎的态度,必须重视波形畸变所可能引起的幅值误判现象。

(3)从激励源上看,除列车激励引起的桥梁振动响应外,系统响应还可能含有一些与系统特性相关的频率成份,比如信号放大系统中的电磁振荡引起的附加振动信号、由于磁电式惯性系统的初动特性而产生的波形变异等等,这些都需要测试分析者都需要根据系统特性加以区分和剔除。条件许可下应尽可能使用不同测试系统的对比试验的方法,这样易于在波形判读中发现畸变,易于修正错误。

3 对几种横向振幅分析法的剖析

3.1 “0~峰”极值法与“峰~峰”值法

“0~峰”极值法是分别读取原始波形基线两边的单向电压最大值 $A_{\max+}$ 与 $A_{\max-}$,取其较大者除以幅值电压放大倍数作为该样本记录的最大横向振幅实测值。这种方法的优点是取值简便、对测试分析者的理论鉴别水平要求不高,取值过程可由程序批处理自动完成。由于方法上的简单易行,在相当范围内已经被广泛应用。

但是细致分析起来,“0~峰”极值法的提出并在幅值分析中加以使用是有其认识根源的,“0~峰”极值法源于这样一种认识:把“横向振幅”这种概念理解成桥梁水平横向最大偏移,即等同于一种绝对位移,而实际上,桥梁横向振动波形一般来讲含有多种频率成份,是一种复合波形,从物理概念上讲,这时的“0~峰”极值并不代表某一种频率成份的振幅,而只能是一个数值,应该说,荷载作用下桥梁横向绝对位移的大小是可以反映桥梁的横向动特性的,但必须弄清的问题是:①横向刚度评定标准中使用的是那种指标?是横向绝对位移还是某频率成份下的横向振幅?②针对所用的试验设备、具体试验数据的频谱分布,判定使用“0~峰”极值能否真实地反映桥梁横向绝对位移?以上两个问题应该从两方面进行理解:

其一,使用何种指标必须与使用的检验标准相一致。

在《铁路桥梁检定规范》中,横向振幅参考限值属试验回归值,制定检规时参考的试验数据,源自 80 年代前的主要振动测试设备——701 型拾振器或 77 型桥振仪,这两种设备的频率响应特性——尤其是低频响应性能使得它们不可能正确反映横向低频偏振位移,而只能是横向绝对位移曲线中的高频载波部分。

其二,现在桥梁动测中使用的测试系统与以前相比,低频段有了较大拓展,可以更多地反映低频段的位移。但是,各种桥梁的横向变形由于激励源上的复杂性,测试系统的低频可用段并不能够完全覆盖测点的低频激励频率段,广义的说,横向响应低频段上的畸变现象是必定要存在的。在这种畸变波形上使用“0~峰”极值得出的数值既代表不了桥梁横向位移绝对偏移,也不能反映某种频率成份的振幅。

所以“0~峰”极值法的使用是有其特定条件的:

其一是这种“0~峰”极值确实能够反映绝对变位。这包含两种场合:一种场合是使用了是可测绝对变形的仪器,如光电法、摄像法等,这类方法由于测试原理上的不同,可以如实地反映测点的绝对变位,但成本高,只适用于单点大变形测量;另一种场合是虽然使用的是相对惯性测试系统,但能够证明其横向响应主成份均在系统的低频可用频段范围内,即波形是真实没有畸变的。这时的响应波形可以根据“0~峰”极值给出桥梁横向最大绝对位移,并可对其载波信息作相应的分析。

其二是使用的检验标准是以绝对位移为指标的,这样标准中的物理指标与实测中所分析的物理量才能相一致,才有可比性。

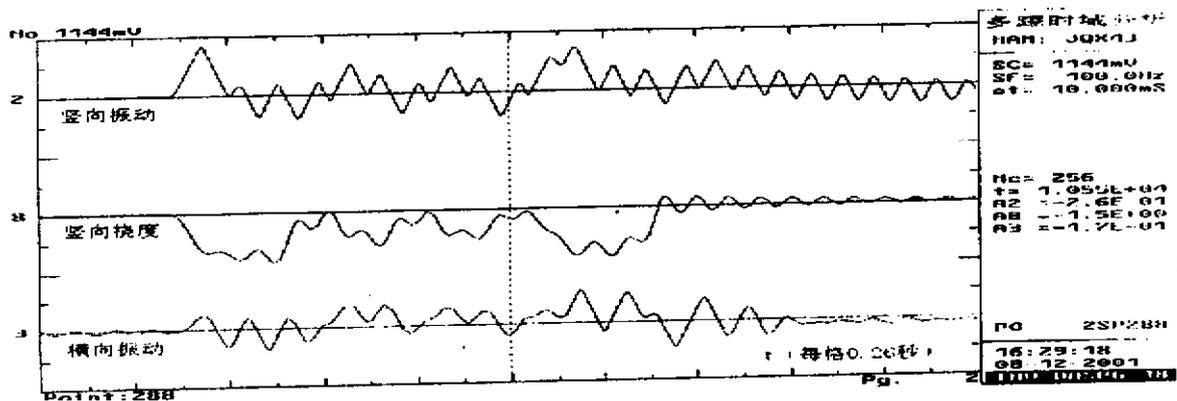
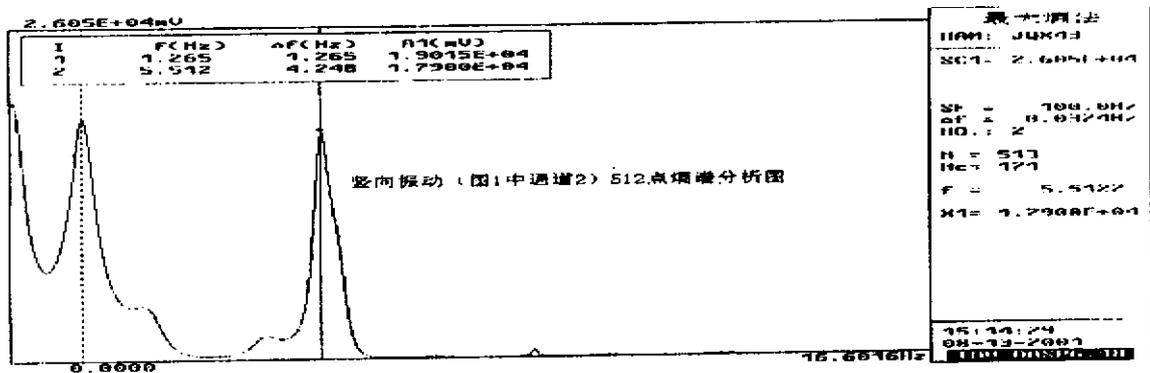
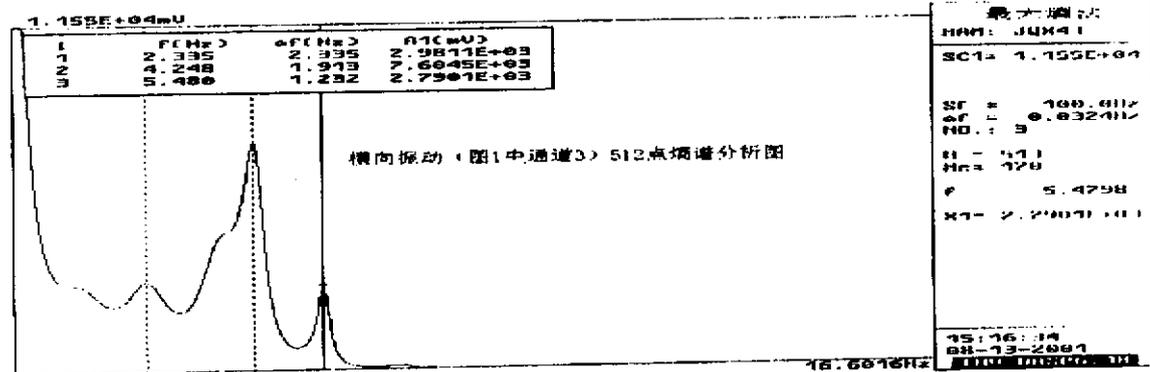


图 1 某桥(20 m 单线混凝土梁)三种响应曲线比较图



竖向振动(图1中通道2) 512点频谱分析图



横向振动(图1中通道3) 512点频谱分析图

万方数据

图 2 竖向、横向振动响应频谱分析对比图

作为一个例子,见图1所示3条响应曲线,这是京秦线提速试验中实测的一座桥梁,结构型式为20 m单线简支梁桥,图1是车速181 km/h时“神州号”动车组(2动3拖)通过桥梁时的实测记录。其中通道2、3为国产891-N速度型传感器的实测结果,通道8为梁底板下全桥式位移计测得的竖向绝对位移,比较通道2、通道8可知,针对传感器在桥梁竖向位移的激励下,桥梁竖向振动波形与绝对位移曲线相比,已经在低频分量部分出现了很大畸变,由车辆轴重引起的低频挠度部分存在频率响应不足及响应失真问题,在这种条件下不可能用2通道的“0~峰”极值来反映竖向挠度最大值,事实上,2通道的“0~峰”极值为1.20 mm,而8通道的“0~峰”极值(绝对位移)为7.50 mm。

同样,对于3通道的响应波形,“0~峰”极值也不可能真实地反映桥梁横向最大绝对位移,那么,如何根据3通道的响应波形给出桥梁的水平横向振幅值呢?首先应该明确的是,对于3通道这样一个响应频率不单一的复合振动波形,只能在其可用频率段内按“峰~峰”值法给出某频率分量的振幅值,从物理概念上讲,振动是低频挠曲时程曲线上的高频载波,要想得到正确真实的振动幅值,首先必须对目的信号的响应频率作出正确的估计,这是响应波形中提取正确信号的关键,方法概述如下:

首先,通过其它方法得到了桥梁横向最低频率实测值为5.82~6.09 Hz,根据桥梁总体质量及列车最不利轴位下桥上列车质量,可以推算出桥梁横向最低有载自振频率值约3.13 Hz,对3通道桥梁响应部分作512点熵谱分析(见图2)可知,3.13 Hz以上的频率分量主要有2个:4.2 Hz与5.5 Hz,且以4.2 Hz为主。但从2通道的熵谱分析图上可知,约5.5 Hz的成份是桥梁竖向振动的主频率,因此3通道中的5.5 Hz频率成份完全是竖向振动对横向振动响应的耦连的结果,故而桥梁横向最大振幅响应的频率位置应是在4.2 Hz左右。至此,可以在3通道的响应波形中按“峰~峰”值法得出结构横向真实的振动响应为0.385 mm,4.17 Hz。

有一种不完整的认识:认为只要线路中心和桥梁中心几何上对中比较好,桥梁横向、竖向就不会有明显由于扭振所导致的耦合。这种做法是:通过在桥上线路丈量线路和桥梁的几何中心,如果二者相差在规范允许范围内,即认为横向不会存在扭振或扭振很小,事实上,这两个中心的偏差量在数值较大时是能够反映桥梁扭振程度的,但数值较小时也很难下结论:首先应该看到,所谓“对中”不能完全理解为几何尺寸上的对中,而应该是列车轴力与桥梁重心的对中程度。其次,这种

对中是车辆、桥梁振动条件下的“对中”,许多桥上轮轨力的测试表明,行进中的车辆左右轮压是很不平衡的,这种不平衡程度是受车辆振动、车辆装载的偏载等很多随机性很强的因素制约的。这正是桥梁横向响应问题具有强烈随机性的主要原因所在,使得桥梁横向响应的激励源具有丰富的低频特征。也使得尽管线路和桥梁的几何中心对中比较好,横向扭振还是明显存在,这时对桥梁真实横向振幅的确认与提取就要用到多方综合技术。

当然,在特殊条件下,横向高频振动的频率由于与车桥时变系统在某时段内振动的有载频率相接近,这时桥梁横向绝对位移以横向高频振动位移为主,在整体波形上体现为高频振幅压制了低频位移分量,这时“0~峰”极值是桥梁整体横向最大绝对位移相接近的。

应该说,“峰~峰”值法是一种比较普遍的幅值分析方法,它主要用于分析某个频率分量的振幅,比较适合分析单一频率或复合振动波形中某一频率成份的幅值。其优点是可以根据测试系统的幅频特性曲线并结合目的信号的频率精确给出该频率分量的振幅。但由于实际记录信号的复杂性,必须首先确定其中的哪一种频率分量是目的信号,这对从事信号数据处理人员的理论水平与实际经验的要求都是较高的,否则,很容易在信号的确定与提取两方面上出现错误。

3.2 幅值谱分析法

通过对取定的数据长度作幅值谱分析,可以得出分析数据长度内各频率成份的幅值与频率的关系。由于随机数据的谱是连续谱,如果频率分辨率足够小,就可以根据幅值谱或谱密度的峰值得出最大振幅与所处的频率值。值得注意的是:这种意义上的最大振幅完全是时域信号的离散富立叶变换结果,代表了组成随机信号各谐波振幅中的最大者,它并不一定代表结构振动的真实最大振幅,而且在作幅值谱分析过程中由于截取有限段时长必定会出现能量泄漏,导致谱峰值减小,必须注意加以修正。

幅值谱分析法理论意义比较明显,但应用起来要牵涉到很多深层次的技术问题,广泛推广使用还有一定难度。

4 结论与建议

通过以上分析,可以总结出以下几点结论。

4.1 “0~峰”极值法的使用简单、方便,但其实际应用中是有其特定条件的:

第一,能够证明这种“0~峰”极值确实反映了测点

的绝对位移。

这包括两种情况:其一,使用了可测绝对位移的测试系统,如光电式、摄像式绝对位移测试系统;其二,虽然使用了惯性传感测试系统,但可以证明组成数据记录的各频率分量均处于测振系统的可用频段内,至少在取得“0~峰”值的那一时间点附近,没有低于系统最低可用频率的频率成份存在。

第二,使用的刚度评估标准是以绝对位移为指标的,因为,桥梁在某方向的绝对位移与某振动频率成份的振幅值是两个完全不同的概念,它们之间没有可比性。

4.2 “峰~峰”值法比较适合分析单一频率或复合振动波形中某一频率成份的幅值。其优点是根据系统频响特性可以准确地得出在得出该频率成份下的幅值,但需要事先认定目的信号的频率位置,这样在信号的确认与提取上才不致出现错误,这种方法对人的信号辨识能力要求较高,对人的综合能力与理论素质及实际经验要求都较高。

4.3 幅值谱分析法比较适合理论上的能量谱分析,通过该方法得到的最大振幅,其振动能量也最大。对结构振动的能量分布、结构振动控制等研究领域具有指导意义。

基于以上分析,对铁路桥梁振动幅值分析方法建议如下:

(1)首先对振动波形进行时域判读和频域分析,判明最大振幅出现的时间点附近是单一频率成份还是复合振动波形。

(2)如果属单一频率波形,建议按“峰~峰”值法给出桥梁振动的最大振幅与强迫振动频率。

(3)如果属复合振动波形,则需要根据复合波形中

低频成份的不同采取如下措施:

①如果该低频成份尚处于系统通频带范围内,建议按“0~峰”极值法给出的最大振幅,该最大振幅属复合振幅,没有特定的强迫振动频率。该振幅意味着测点在该振动方向的最大动位移。

②如果该低频成份不在系统通频带范围内,则说明该复合波形属畸变型,在缺乏可靠反演技术的条件下,只能采取数字滤波的方法滤去低频段,对于恢复后的时域波形建议按“峰~峰”值法给出桥梁振动的最大振幅与强迫振动频率。因为这时如果采用“0~峰”极值法给出的最大振幅,由于频带的舍弃,已经不能表征测点在该振动方向的最大动位移了。

(4)如果桥梁振动测试的目的是对桥梁作动力特性修改或减振及振动控制等,就要利用幅值谱分析法,在一次谱分析中使用全部数据点,得出具有足够频率分辨率的幅值谱,据此得出振动能量最大的频率成份及其振幅值,供设计参考。

参考文献

- [1] 日本土木学会. 国铁建造物设计标准解说[Z]. 1982.
- [2] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1995.
- [3] 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理[M]. 北京:中国铁道出版社, 1983.
- [4] 戴诗亮. 随机振动实验技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1984.
- [5] 李德葆. 振动模态分析及其应用[M]. 北京:宇航出版社, 1989.
- [6] 胡大林. 桥涵工程试验检测技术[M]. 北京:人民交通出版社, 1995.

EXPLORATION ON VALUE OF AMPLITUDE IN VIBRATION TEST FOR RAILWAY BRIDGE FROM CONCEPT OF FREQUENCY RESPONSE OF TEST SYSTEM

LIU Han-fu

Railway Architectural Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences

Abstract: In this paper, aimed at the issue of the value of amplitude in vibration test for railway bridge, a theoretic analysis and an example discussion about how to identify the aberrance of wave form and how to choose a proper amplitude analytic method are carried through. The fitting conditions of diversified analytical methods of the value of amplitude are discussed. An advice to the application of these frontier methods is set forth.

Key words: signal processing; transducer; frequency response; aberrance; amplitude value

从系统的频响特性看桥梁振动测试中的幅值分析法

作者: [刘汉夫](#)
作者单位: [铁道部科学研究院, 铁道建筑研究所, 北京, 100081](#)
刊名: [铁道工程学报](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2002(2)
被引用次数: 1次

参考文献(6条)

1. [日本土木学会](#) [国铁建造物设计标准解说](#) 1982
2. [张贤达](#) [现代信号处理](#) 1995
3. [应怀樵](#) [波形和频谱分析与随机数据处理](#) 1983
4. [戴诗亮](#) [随机振动实验技术](#) 1984
5. [李德葆](#) [振动模态分析及其应用](#) 1989
6. [胡大林](#) [桥涵工程试验检测技术](#) 1995

本文读者也读过(10条)

1. [秦惠增](#), [任勇生](#) [含形状记忆合金\(SMA\)层柔性梁的振动频响特性](#)[期刊论文]-[机械强度](#)2002, 24(1)
2. [杨丽君](#), [冯丽](#), [孙斌祥](#) [高墩刚构连续梁桥的振动特性](#)[会议论文]-2007
3. [苑静中](#), [YUAN Jing-zhong](#) [桥梁振动激励模态测试的研究](#)[期刊论文]-[天津理工大学学报](#)2006, 22(3)
4. [满洪高](#), [赵方刚](#), [袁向荣](#) [铁路桥梁横向振动及其对策的研究](#)[期刊论文]-[铁道建筑](#)2001(7)
5. [李纪东](#), [LI Ji-dong](#) [先简支后连续桥梁振动影响因素分析](#)[期刊论文]-[交通科技与经济](#)2010, 12(3)
6. [任勇生](#), [王晓辉](#), [REN Yong-sheng](#), [WANG Xiao-hui](#) [SMA纤维混杂复合材料箱型薄壁悬臂梁的固有频率](#)[期刊论文]-[振动与冲击](#)2010, 29(12)
7. [逯斌](#), [朱永顺](#), [张雷](#), [LU Bin](#), [ZHU Yong-shun](#), [ZHANG Lei](#) [12 MW凝汽式汽轮机组振动分析与处理](#)[期刊论文]-[冶金动力](#)2009(3)
8. [谢红霞](#), [宿健](#), [易宏](#), [龚洪明](#), [刘文峰](#), [XIE Hong-xia](#), [SU Jian](#), [YI Hong](#), [GONG Hong-ming](#), [LIU Wen-feng](#) [冲击荷载进行桥梁模态试验的研究](#)[期刊论文]-[公路交通科技](#)2005, 22(8)
9. [向俊](#), [马长水](#), [曾庆元](#) [列车编组对桥梁振动响应影响的试验研究](#)[期刊论文]-[实验力学](#)2002, 17(4)
10. [逯静洲](#), [孙从亚](#), [李庆斌](#), [刘凤丽](#), [王凤达](#), [LU Jingzhou](#), [SUN Congya](#), [LI Qingbin](#), [LIU Fengli](#), [WANG Fengda](#) [基于集中柔度模型电流变体-砂浆悬臂梁固有频率的理论分析](#)[期刊论文]-[应用基础与工程科学学报](#)2009, 17(4)

引证文献(1条)

1. [蔡元奇](#) [时域内动态载荷识别理论及实施技术研究](#)[学位论文]博士 2004

引用本文格式: [刘汉夫](#) [从系统的频响特性看桥梁振动测试中的幅值分析法](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2002(2)