

# 32 m 跨简支铁路桥梁横向振动的研究分析<sup>\*</sup>

刘文峰<sup>1,2</sup> 宿 健<sup>2</sup> 何玉珊<sup>2</sup> 柳春图<sup>1</sup> 应怀樵<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院力学研究所 北京, 100080) (<sup>2</sup> 交通部公路科学研究所 北京, 100088)

(<sup>3</sup> 东方振动和噪声技术研究所 北京, 100085)

**摘要** 基于频谱的概念, 考虑列车行车的水平载荷的性质以及桥梁自振特性, 通过理论分析以及实际的测试数据, 得到 32 m 跨度的简支混凝土桥梁在行车时的振动情况, 对结果进行了详细分析。提出 32 m 跨度桥梁的横向振动主要由桥墩的自振特性控制。最后, 就避免铁路桥梁行车时的共振现象进行了初步分析, 提出了可行的解决方案。

**关键词** 铁路桥梁 柔性桥墩 模态识别 横向振动

**中图分类号** U 446.1 O 329

## 引 言

桥梁的振动一般由环境激励以及人为激励引起。大跨度桥梁(如斜拉桥、悬索桥等)主要考虑环境激励引起的振动。中小跨度的桥梁一般考虑人为激励影响为主。铁路桥梁由于人为激励源是列车, 不仅垂直方向振动大, 而且蛇行波等引起的激励使水平方向的振动也非常大。横向振动会导致脱轨的严重后果。因此, 如何避免发生共振现象是非常重要的。

桥梁设计中一般采用静力设计方法, 仅将动载荷转换为相应的静载荷, 大跨桥梁(尤其是超大跨桥梁)要进行时程计算, 甚至需要进行风洞实验, 但是这样的工作需要较多的经费和较长的时间。对于中小跨桥梁往往缺乏有效的手段来进行动力分析, 不进行动力分析对于铁路桥梁来说是比较危险的。特别是现在列车不断提速, 桥梁和桥墩的形式在不断变化, 如果没有有效的方法来进行分析, 很可能导致严重的后果。

我国的铁路桥梁检测按《铁路桥梁检定规范》(后面简称为“检规”)的标准来实施, 此规范是 1978 年按照当时的运行情况和设计标准制定的。随着技术的发展, 几十年来, 列车不断提速, 目前达到 160 ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 甚至 200 ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 以上, 而高速铁路的最高行车速度可达到甚至超过 300 ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 它将成为 21 世纪最富有吸引力的一种旅客运输方式<sup>[1]</sup>。车速的提高导致振动的激励力更大, 因此对桥梁的安全性能也需要更高的要求, 检规中的一些参数需进行修订后才能满足现有情况下的使用。

另外在桥梁设计中, 桥梁的跨度越来越大, 桥墩高度也很高, 出现了高墩和高承台墩, 这些情况在检规中涉及较少, 没有明确的规定。基于安全考虑, 必须对这些情况进行大量的实用和有效分析。

在目前列车运行过程中, 完好的铁路桥梁行车所产生的振动一般应满足检规中的规定。一般列车的竖向振动都能满足, 但是当提速或者桥墩较柔时, 水平方向的振动会比较大, 容易引起脱轨。而学者对于铁路桥梁横向振动的研究不是很多, 且大多采取时程分析的方法, 可以得到很多桥墩响应的数据, 但是花费的时间和精力很多, 对于中小桥来说这样的投入偏大。

文献 2 对各种桥梁的振动进行了全面的叙述, 文献 3 对列车桥梁的时变系统振动进行分析, 文献 4~6 对桥梁的竖向振动进行了分析。文献 7 对摆式列车横向振动的测试进行了研究。

本文基于频谱的概念, 着重于桥梁水平振动的分析, 从试验和理论分析两方面出发, 得出 32 m 跨度钢筋混凝土简支 T 梁桥在列车不同速度行驶状态下水平振动的情况, 并着重分析由桥墩刚度引起桥梁整体特性的改变, 最后给出了避免车桥体系共振的可行对策。

## 1 列车行车的激励

列车通过桥梁时, 当列车产生的作用力频率和桥梁的有载频率吻合时, 容易导致共振。如果车身不长, 作用时间短, 为瞬时的激励, 此时即使频率相吻合, 也较难达到共振; 而如果是货车或者客车, 作用时间一般长达十几秒甚至几十秒, 容易出现共振现

\* 收稿日期: 2002-10-17; 修改稿收到日期: 2003-02-17。

象,造成车辆和桥梁的危险,在本文中主要讨论车身较长列车的激励作用。

桥梁通过列车时,采用净轴重常量移动载荷模型,当列车以某一速度通过桥梁,列车产生周期性的竖向激励,则此激励的频率为

$$f_{ny} = \frac{nv}{l_v} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

其中:  $v$  为列车速度;  $l_v$  为列车车厢长;  $n$  为振动阶数。

列车在水平向产生的蛇行波频率,如为单轴转向架,则水平向频率为<sup>[1]</sup>

$$f_{1x} = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda}{br_0}} \quad (2)$$

其中:  $\lambda$  为车轮缘的锥度;  $b$  为轨道间距的一半;  $r_0$  为车轮半径。

在我国  $\lambda = 1/20$ , 轨道间距  $2b = 1.435 \text{ m}$ , 客车轮径一般为  $2r_0 = 0.915 \text{ m}$ , 列车车厢长为  $l = 26.576 \text{ m}$ 。如表 1 所示,将不同的车速代入式(1)和式(2),得到不同车速下竖向和水平向的激励频率。将此频率与桥梁的频率进行对比,如果很接近,则意味着此速度下车桥体系处于共振范围,比较危险,应尽量避免在此速度下行车。

表 1 不同列车时速引起的激励频率

| 行车速度<br>/(km · h <sup>-1</sup> ) | 横向频率<br>$f_{1x}/\text{Hz}$ | 竖向频率<br>$f_{1y}/\text{Hz}$ | 行车速度<br>/(km · h <sup>-1</sup> ) | 横向频率<br>$f_{1x}/\text{Hz}$ | 竖向频率<br>$f_{1y}/\text{Hz}$ |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 40                               | 0.690                      | 0.418                      | 90                               | 1.553                      | 0.941                      |
| 45                               | 0.776                      | 0.470                      | 100                              | 1.725                      | 1.045                      |
| 50                               | 0.863                      | 0.523                      | 110                              | 1.898                      | 1.150                      |
| 55                               | 0.949                      | 0.575                      | 120                              | 2.071                      | 1.254                      |
| 60                               | 1.035                      | 0.627                      | 130                              | 2.243                      | 1.359                      |
| 65                               | 1.122                      | 0.679                      | 140                              | 2.416                      | 1.463                      |
| 70                               | 1.208                      | 0.732                      | 150                              | 2.588                      | 1.568                      |
| 80                               | 1.380                      | 0.836                      | 160                              | 2.761                      | 1.672                      |

32 m 跨度钢筋混凝土 T 梁桥的竖向频率一般在 3 Hz 左右,考虑附加车辆质量使频率降低的因素,如果要达到竖向的首阶共振,列车速度需高达约 250 (km · h<sup>-1</sup>),远高于目前一般的列车速度,故不考虑。而列车产生的高阶竖向激励由于频率较高,激励能量有限,引起桥梁的位移不会很大,因此 32 m 钢筋混凝土桥梁着重分析横向的振动。

由图 1 可见,蛇行波产生的横向激励频率比竖向激励的频率高,更容易在较低的速度下行驶时与桥梁发生共振现象,且横向振动与列车的脱轨系数、减载率以及旅客的舒适度等诸多参数紧密相关,因此对其进行研究有重要意义。

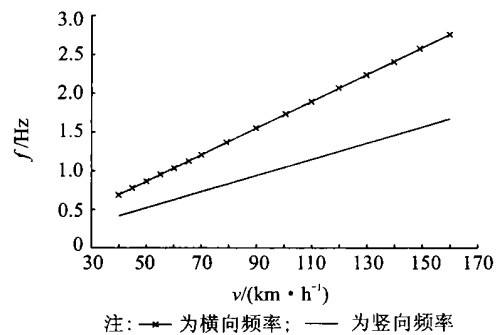


图 1 不同车速下竖向和横向的激励频率

## 2 桥梁有载频率

桥梁的频率可由计算或者试验得到。不过一般得到的是自振频率,此时桥梁上没有附加载荷;当上面通过列车时,由于附加了较大的质量,得到的有载频率会比无载时的自振频率低,此时达到共振时的列车激励的速度也降低了,因此更容易达到共振。实际上真正引起桥梁共振,导致危险的是有载频率。因此,得到通过列车时的有载频率才能准确地分析车辆和桥梁的振动,乃至评估其安全性。

列车的重量由轮对传递桥梁,可认为作用在桥上的是移动质量,此时桥梁的有载频率是随着列车行进不停变化的值,文献[8]中对移动载荷的影响进行了研究。一般都假定附加质量为静载,得到某一瞬间的无载频率和有载频率的比值

$$k = \frac{f_U}{f_L} = \sqrt{\frac{m_L}{m_0}} \quad (3)$$

其中:  $f_U$  为无载频率;  $f_L$  为有载频率;  $m_0$  为桥上不附加列车质量时折合的总质量;  $m_L$  为通过列车时含附加质量折合的总质量;根据不同的桥梁形式和通过列车的形式,一般情况下  $k = 1.15 \sim 1.50$ 。  $k$  值不仅适用于桥梁的有载频率计算,也适用于桥墩的振动特性,由于桥墩的附加质量都在墩顶,因此它的  $k$  值相对于桥梁更大些。

## 3 桥梁测试数据及其分析

笔者参加了对秦沈线上烟囱沟大桥段的 32 m 跨高架钢筋混凝土简支 T 梁桥进行的振动特性测试<sup>[9]</sup>,得到丰富的试验数据。烟囱沟大桥桥墩高约为 24 m,试验中沿桥墩竖向平均间距布置 9 个测试点,传感器的方向为桥梁的水平横向,试验中力锤的敲击点在桥墩顶部 1/4 处。在梁的测试中,测点布置为沿梁水平纵向分上下 2 层共 18 个点,即每层 9 个测点。传感器测试的方向为桥梁的横向。试验中力锤的敲击点约在桥端 1/4 处,这样避开了敲击点在

节点处,保证了结构前几阶模态不丢失。

测试结果表明,由于高桥墩的刚度较弱,自振频率低,因此高墩桥梁的振动主要由桥墩的特性控制。在通过列车时,这种性质表现的更为突出。这种低频的振动往往位移大,能量较集中,危害较大。

芜湖长江大桥于 2000 年 9 月建成,为了评估大桥引桥 32 m 跨度钢筋混凝土 T 梁桥振动特性和桥上行车安全性,确定桥梁运行条件,在 2002 年 1 月进行了试验编组列车荷载作用下的动载试验。铁道部科学研究院铁道建筑研究所对该桥的引桥部分进行了详尽的测试,得到了大量有效的数据。通过测试,对 32 m 跨简支 T 梁桥的水平振动情况有一个较为清楚的认识,测试结果对同类铁路桥梁振动分析有很好的借鉴作用。本文所采用的芜湖桥的数据中,桥墩的数据均为墩顶位置测试得到,桥梁的数据为桥梁跨中位置测试得到的。烟囱沟大桥和芜湖桥的数据测试与分析过程如图 2 所示。

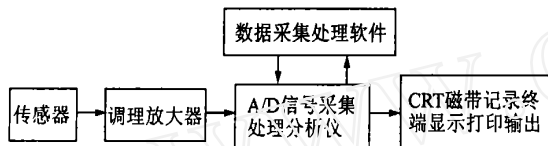


图 2 数据测试分析流程示意图

实测结果表明,32 m 跨度钢筋混凝土 T 梁的横向频率为 3.20 Hz 左右,考虑附加质量的影响因素  $k$ ,如需达到共振,则列车时速需要约 160 (km · h<sup>-1</sup>),因此 32 m 跨度的桥梁应该避免在 160 (km · h<sup>-1</sup>)左右的高速状态下行驶。而桥墩的频率比桥梁频率低,在较低的速度下就可能导致共振现象。

不同高度的桥墩具有不同的频率,因此引起其共振的列车速度也不同。表 2、表 3 中可见,桥墩 1

表 2 32 m 跨 T 梁及桥墩横向自振频率

| 类型     | 烟囱沟大桥                    |      | 芜湖大桥                       |                            |      |
|--------|--------------------------|------|----------------------------|----------------------------|------|
|        | 桥墩<br>$h=23.96\text{ m}$ | 桥梁   | 桥墩 1<br>$h=20.53\text{ m}$ | 桥墩 2<br>$h=14.96\text{ m}$ | 桥梁   |
| 第一阶    |                          |      |                            |                            |      |
| 频率 /Hz | 1.16                     | 3.28 | 1.17                       | 1.64                       | 3.13 |
| 第二阶    |                          |      |                            |                            |      |
| 频率 /Hz | 2.03                     | 4.26 | /                          | /                          | /    |

的在列车时速为 45 (km · h<sup>-1</sup>)时其横向位移最大,认为是共振的结果。45 (km · h<sup>-1</sup>)时蛇行波的激励频率约为 0.776 Hz,而桥墩 1 首阶固有频率为 1.17 Hz,考虑  $k=1.50$  的影响,激励频率和有载频率很

接近。在时速为 80 (km · h<sup>-1</sup>)时,桥墩 1 的振动也很大。此时激励频率为 1.380 Hz,参照秦沈线桥墩的数据,桥墩的第二阶自振频率为 2.03 Hz 左右,考虑  $k$  值,也处于共振区域。桥墩 2 在列车时速为 65 (km · h<sup>-1</sup>)时横向位移最大,此时激励频率约为 1.122 Hz,固有频率为 1.64 Hz,考虑  $k$  值的影响,在此速度下也处于共振区域。

表 3 芜湖长江大桥引桥桥墩横向振幅

| 车速<br>/(km · h <sup>-1</sup> ) | 桥墩 1 |      | 车速<br>/(km · h <sup>-1</sup> ) | 桥墩 2 |      |
|--------------------------------|------|------|--------------------------------|------|------|
|                                | /mm  | /mm  |                                | /mm  | /mm  |
| 45                             | 1.83 | 0.67 | 70                             | 1.20 | 1.05 |
| 45                             | 1.72 | 0.71 | 70                             | 1.46 | 1.22 |
| 45                             | 1.94 | 0.79 | 70                             | 1.45 | 1.11 |
| 55                             | 1.28 | 0.70 | 75                             | 1.18 | 1.31 |
| 55                             | 1.07 | 0.88 | 75                             | 1.20 | 1.17 |
| 55                             | 1.03 | 0.90 | 75                             | 1.19 | 1.20 |
| 65                             | 1.27 | 1.40 | 80                             | 1.74 | 1.14 |
| 65                             | 1.27 | 1.20 | 80                             | 1.70 | 1.35 |
| 65                             | 1.12 | 1.45 | 80                             | 1.22 | 1.40 |

认为振幅最大时处于共振处,此时可以把激励力的频率当作桥梁的有载频率,则可得  $k_{45} = \frac{1.17}{0.776} = 1.51$ ,  $k_{65} = \frac{1.64}{1.122} = 1.46$ ,  $k_{80} = \frac{2.03}{1.38} = 1.47$ 。因为试验列车的质量和桥梁的质量基本不变,因此共振时无载频率和有载频率的比值也应该稳定,测试得到的  $k_{45}$ ,  $k_{65}$  和  $k_{80}$  均在 1.50 左右,非常吻合,这也说明了桥梁横向振动在很大程度上是由于蛇行波横向振动造成的。

表中列出的是桥墩的振动情况,但由于桥墩的振动会直接影响到桥梁的整体振动,也客观地反映了桥梁和列车的振动情况。从实验结果可见目前 32 m 跨度 T 梁桥上的横向共振产生的主要原因并非桥梁振动,而是桥墩引起的,所以在高架桥的振动控制中应重点针对桥墩进行治理,避免共振现象。

### 4 车桥共振状态的分析

稳定的单质点结构在受到外界的简谐激励时,已知自振频率、激励频率和阻尼比,结构的振幅  $A$  可按式(4)计算得到,不同的激励频率和阻尼比可以得出图 3 所示的位移响应曲线。

$$A = \frac{1}{\sqrt{(1-u^2)^2 + 4u^2D^2}} x_{st} = \beta x_{st} \quad (4)$$

其中:频率比  $u = \frac{\omega}{\omega_0}$ ,为无量纲量, $D = \frac{\epsilon}{\omega_0}$ ;  $\omega$  为激励频率, $\omega_0$  为结构固有频率; $\epsilon$  为阻尼比; $x_{st}$  为结构受干扰力峰值作用引起的静位移; $\beta$  称为动力放大系数,是强迫振动时的动力系数即动幅值与静幅值之比。

由图3可见,在偏离共振频率时动位移的幅值急剧降低,而表3所示的测试结果却没有图中的这种性质,共振峰值并不是图中显示的那么大,而且非共振处的峰值也比图中显示的大很多,这是由以下原因造成的。

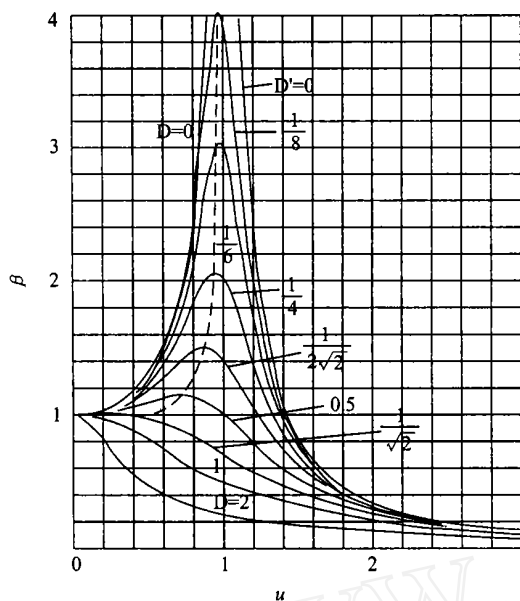


图3 简谐激励作用的位移频率响应曲线

(1) 桥梁中列车行进的移动载荷使得桥梁的有载频率在一个范围内变化,随着附加质量 $m$ 在不同位置的情况,有载频率的变化规律如式(5)所示,

$$\omega^2 = \frac{E \int \Phi^2 dx}{m \int \Phi dx} \quad (5)$$

桥梁的有载频率不会固定在某一频率上,则在短时间内很难出现图2中所示的共振峰值。但如果激励频率与桥梁的有载频率很接近,还是会表现出共振的特点,其振幅是比较大的。

(2) 图3中的曲线为单质点结构的响应结果,而车桥体系是连续结构,具有多个自振频率,因此不会出现急剧下降至近于0的情况,而如果相邻的自振频率间隔较小时,处于两频率间的某点响应会较大,甚至会与共振峰处于同等的水平,不会比共振峰显著减小。

## 5 小结

(1) 32 m 跨度的桥梁在行车过程中发生横向共振的可能性大于竖向,特别是在柔性高墩的情况下,往往在车速较低时就会出现,因此需加以注意横向振动的观察和分析。

(2) 在列车通过桥梁时应适当限制速度,因为

随着速度的增长,列车产生的水平向激励力也越大,容易产生危险,而且速度高容易与桥梁的高阶频率吻合,但关键是在此车速下是否会有共振现象发生。

(3) 当桥梁的桥墩较高(柔)时,其首阶自振频率较低,使桥梁的整体振动在有载时显著,此时列车的速度不需太高就可能导致共振,较危险。因此,铁路桥梁的桥墩刚度宜高些,一般可以通过给桥墩加斜支撑,或者通过桁架等将双肢柔性墩联系起来以便增加刚度。

(4) 当桥梁和车辆无法改变时,由于振动不可避免,为了避免桥梁的振动过大,可以通过在桥墩支座处布设适当的阻尼器来增大桥梁阻尼比 $\epsilon$ ,这样可以控制桥梁振动的幅值。

本文基于频谱的共振分析法可以很好地对于车桥体系振动进行定性的分析,此方法较时程分析简单,可以方便得出列车行车时危险速度的大概范围,对于桥梁设计和安全检测人员有较好的借鉴作用。

## 参考文献

- 1 沈志云 关于高速铁路及高速列车的研究 振动、测试与诊断, 1998, 18(1): 1~7
- 2 李国豪 桥梁结构稳定与振动 北京: 中国铁道出版社, 1992
- 3 曾庆元, 郭向容 列车桥梁时变系统振动分析理论与应用 北京: 中国铁道出版社, 1999
- 4 苏木标, 李建中, 邹振祝, 等 高速铁路简支梁桥有载动力特性分析 工程力学, 2002, 19(3): 137~142
- 5 周海林, 刘宝琛 高承台桥墩在列车载荷下的振动试验及有限元分析 铁道工程学报, 2000, (3): 36~40
- 6 苏木标, 李建中, 梁志广 高速铁路简支梁桥的竖向共振现象 工程力学, 2001, 18(5): 84~93
- 7 陈春俊, 戴松涛, 高晶贤 摆式列车横向加速度传感器的故障诊断与优选方法 振动、测试与诊断, 2001, 21(2): 108~111
- 8 应怀樵, 郭亚 移动荷载在简支梁上不同位置有载频率的研究 现代振动噪声技术(第三卷). 北京: 航空工业出版社, 2002
- 9 刘文峰, 柳春图, 应怀樵 锤击法进行钢筋混凝土梁式桥的模态试验研究 现代振动噪声技术(第三卷). 北京: 航空工业出版社, 2002



第一作者简介: 刘文峰 男, 1976年8月生, 博士。主要研究方向为结构动力识别、桥梁健康监测与损伤识别。

E-mail: liuwenfeng@263.net

system by the L transformation. In the L transformation space, the modes of the system have been studied. Also, the dynamic characteristics of the linear periodically time-varying vibration system have been discussed.

**Keywords** complex mode periodical-varying L transformation space co-channel but out of phase

## Research on Horizontal Vibration of 32 m Span Simply Supported Railroad Bridges

*Liu Wenfeng*<sup>1,2</sup> *Su Jian*<sup>2</sup> *He Yushan*<sup>2</sup> *Lin Chuntu*<sup>1</sup> *Ying Huaqiao*<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences Beijing, 100080, China)

(<sup>2</sup> Research Institute of Highway Beijing, 100088, China)

(<sup>3</sup> China Orient Institute of Noise & Vibration Beijing, 100085, China)

**Abstract** The horizontal vibration of a simply supported railroad bridge induced by a passing train is highly important for the safety of the bridge. Most of the analysis of the vibration are based on time-period method. This paper analyzed the vibration in the frequency domain. After considering the characteristics of the horizontal loadings exerted on the bridge by a passing train and the dynamic properties of the bridge, a detailed analysis of the horizontal vibrations obtained by both theoretical analysis and measurement is made. It is pointed out that the vibrations are dominated by the dynamic properties of the piers of the bridge. At the end of the paper, some suggestions are made to reduce the vibrations.

**Keywords** railroad bridge flexible pier modal identification horizontal vibration

## Expert Diagnosing System for Rotating Machinery Based on Alopex Neural Network

*Liu Guili* *Wang Lipeng* *Zhang Guoying*

(Constructional Engineering Department, Shenyang Polytechnic University Shenyang, 110023, China)

**Abstract** By combining the artificial neural network with the rule reasoning expert system, an expert diagnosing system for rotating machinery was established. The system made full use of its advantages of both neural network and rule reasoning to diagnose the fault by allocating of all kinds of knowledge in a knowledge base according to the positive and negative mixing reasoning mode. A binary system was adopted to denote all kinds of fault, and the neural networks were trained with random parallel algorithm (Alopex). The expert system overcame the self learning difficulty of the rule reasoning expert system and the shortcoming of the poor system control ability of the neural network. The expert system developed in this paper has powerful diagnosing ability.

**Keywords** fault diagnosis expert system knowledge base rotating machinery neural network