

大跨度钢桁架梁桥的地震响应分析
(南京长江大桥)

目录

| | |
|-------------------------------|----|
| 1.绪论..... | 3 |
| 1.1 课题研究背景..... | 3 |
| 1.2 桥梁震害原因..... | 3 |
| 1.3 桥梁抗震响应主要影响因素..... | 4 |
| 2.大跨度桥梁抗震分析与地震波的输入..... | 4 |
| 2.1 动态时程分析法（直接动力分析理论）..... | 4 |
| 2.1.1 时程分析法计算原理..... | 5 |
| 2.1.2 时程分析法优缺点..... | 5 |
| 2.2 地震波的特性、输入与选取..... | 5 |
| 2.2.1 地震波的幅值..... | 6 |
| 2.2.2 地震波的选取..... | 6 |
| 2.2.3 地震波的输入..... | 6 |
| 3.大跨度钢桁架桥梁的数值分析..... | 6 |
| 3.1 工程概况..... | 6 |
| 3.2 该桥的基本设计参数..... | 7 |
| 3.3 约束与连接的简化处理..... | 7 |
| 3.4 南京长江大桥南京联主桁 ANSYS 建模..... | 7 |
| 3.4.1 模型模态分析求解..... | 8 |
| 3.4.2 模型模态计算结果..... | 10 |
| 3.4.3 模型模态结果分析..... | 10 |
| 4.大跨度钢桁架桥梁地震响应分析..... | 11 |
| 4.1 地震波的选择..... | 11 |
| 4.2 时程分析..... | 13 |
| 4.3 横向地震波单向输入下节点位移响应分析..... | 14 |

1. 绪论

桥梁是铁路工程，抗震防灾，危机管理系统的重要组成部分，在抗震救灾中有很重要的位置。为了减少地震灾害形成的破坏，不仅要桥梁做好抗震加固措施，也要在桥梁设计上采取相应措施以满足抗震要求，提高桥梁的抗震能力，因此对响应的桥梁地震响应分析是必要的。

本文通过查阅相关文献，对桥梁抗震的现状，问题等作了分析总结，并采用大型通用软件 ANSYS 对南京长江大桥中的一联钢桁架桥进行了地震响应分析，得出大跨度钢桁架桥的动力特性和该桥体系的一些抗震性能，为以后进一步研究打下基础。具体包括以下几个方面：

(1) 通过查阅资料，阐述了对桥梁进行抗震性能分析的现状，存在的问题，以及对桥梁的减轻震害的一些设计思想，并总结了有关抗震性能分析的相关理论，为后期进行桥梁结构的抗震分析作基础。

(2) 采用有限元软件 ANSYS 对南京长江大桥其中一联钢桁架桥进行模态分析，得到了桥梁结构的自振频率和振型图，分析研究得到了其有关振动特性。

(3) 采用有限元软件 ANSYS 对南京长江大桥其中一联钢桁架桥进行地震波的瞬态分析，研究其分别在三种不同作用下该桥的抗震性能。通过分析研究，得到了桥梁跨中控制截面上下节点的位移响应曲线，以及位移峰值，对其进行对比分析，得出该桥体系的一些抗震性能为后期抗震设计提供一些参考。

1.1 课题研究背景

地震是一种不可控制的自然灾害，常常会造成严重的人员伤亡及建筑物破坏，给人类社会带来严重灾难，造成巨大的经济损失。近年来已经进入多地震活跃期，地震活动非常频繁。每年全世界有 500 百次地震的可能性，地震造成了严重的危害。

为我们大家所熟悉的 1976 年，唐山大地震的震级为 7.6 级，转眼瞬间，人数过百万的重工业城市毁掉，给人们的安危以及国家带来重大创伤，伤亡 40 余万人，直接经济损失高达 54 亿元。2008 年，汶川大地震震级 7.8 级，对基础设施造成严重损失，桥梁损伤达 2900 多座，人员伤亡和经济损失巨大。因此必须做好防震减灾工作。

本文通过对一个大跨度钢桁架梁桥的有限元模拟分析，运用 ANSYS 分析软件对其合理建模，并对其模态进行分析，得到自振频率和振型，从而对其进行三个不同激励方向的地震波的瞬态分析，通过对比分析，求的该桥在不同地震响应下，桥梁结构杆件的位移变形，得到其抗震性能。

1.2 桥梁震害原因

地震是不可控制和准确预测的，所以从桥梁的设计开始时就设置减轻震害的一些措施很重要。通过对桥梁震害的研究和分析，得知其发生原因，由此建立并选择合理的抗震设计方法，进而采用相应的加固方式。通过查阅相关地震灾害记录，我们看到的桥梁损伤的原因主要有以下四类：

- (1) 在对桥梁选址时，所选的场地对抗震不利，地震时候引起了地基失效或者地基变形。
- (2) 桥梁抗震设防低于地震的强度。
- (3) 存在着一些人为因素，对工程进行设计或者施工时候出现问题，应该加大力度以避免此类事件的发生。
- (4) 桥梁结构本身抗震能力不足。

通过对桥梁地震灾害的分析，我们发现，科学合理的抗震结构体系，支撑结构的合理优化以及减隔震的一些方法能降低地震对工程造成的危害。因此我们要择优选取结构体系，对关键部位进行优化处理，加强减隔震的加固方法，这对桥梁抗震有很大的意义。

1.3 桥梁抗震响应主要影响因素

对桥梁结构进行地震反应分析，属抗震动力学问题范畴。一般动力学问题都需要通过三个要素来说明，即输入激励，系统以及输出反应。两个已知的元素是和未知的第三元素，是求解该类问题的过程。因此，对桥梁结构的地震反应分析，是把桥梁结构作为一个系统的。一般会采用有限元方法，将结构分为许多离散的单元问题，在各个节点处连接起来成为一个集合整体；而把地震地面运动看成是对系统的输入；地震反应作为一个系统的输出。这样，地震反应分析就是已知地震输入和结构系统求地震反应的问题。在进行地震反应分析时，准确无误地预测出地震对桥梁结构的影响是进行抗震设计的基础。对大跨度桥梁的地震响应能产生影响的因素有很多，主要包括多点激励，行波效应，多种非线性因素以及阻尼的问题和桩基-土-结构的相互作用等等。

2. 大跨度桥梁抗震分析与地震波的输入

2.1 动态时程分析法（直接动力分析理论）

20 世纪 60 年代抗震分析方法又出来一种新的方法，动态时程分析法。它被用于对工程以及超高层建筑的抗震性能研究。发展至 20 世纪 80 年代时，国家已经开始普遍采用此法，并将它作为抗震设计规范的分析法之一。

时程分析方法又被叫做直接动力分析方法，采用逐步积分的方法对工程结构进行求解

的运动微分方程。采用该方法，工程结构杆件的内力，位移的时程关系可以通过各个粒子随着时间变化的速度和加速度及位移的动态响应。而且通过时程分析方法，结构地震响应能够被准确真实地表达，补充了反应谱法的缺陷，从而可以对反应谱法进行弥补和对比。

时程分析方法在理论上与实际应用当中分别被称作步步积分法与动态设计。在工程结构抗震分析，可以用来解决运动输入地面加速度记录结构方程的积分表达式。地震作用输入时程分析方法以及结构所在场地的地震波，自始至终，步步积分，直至地震作用终止。

2.1.1 时程分析法计算原理

当桥梁结构的各个支撑处受到地面震动作用时，运动方程为：

$$\begin{bmatrix} M_s & M_{sb} \\ M_{sb}^T & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & C_{sb} \\ C_{sb}^T & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & K_{sb} \\ K_{sb}^T & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_s \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix}$$

其中 $\{X_b\}$ ——各支座的地面强迫位移

$\{X_s\}$ ——结构中所有非支座节点的位移

$\{P_b\}$ ——地面作用于各支座的力，即支座的支反力

$[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ——节点的质量矩阵，阻尼矩阵和刚度矩阵

当采用集中质量的离散化模型时， $[M_{sb}]=0$ 。绝对位移 $\{X_x\}$ 可分解为拟静位移 $\{Y_s\}$ 和动态相对位移 $\{Y_r\}$ ，忽略 $\{X_b\}$ 所产生的阻尼力，则运动方程可简化为：

$$[M_s]\{\ddot{Y}_r\} + [C_s]\{\dot{Y}_r\} + [K_s]\{Y_r\} = [M_s][K_s]^{-1}[K_{sb}]\{\ddot{X}_b\}$$

节点的动力位移和拟精力位移的和为节点的总位移。每一步单元内力运用上式运动方程，采用逐步积分法，节点的动力位移与加速度增量即可被计算出。

2.1.2 时程分析法优缺点

进行时程分析可以得到数值上较为精确的分析结果，但是存在着一些参数难以确定的问题，因而本质仍然比较模糊。其他问题如：输入地震动；简化结构分析模型是否与实际相符；结构-基础-土相互作用问题；结构构件的非线性动力特性和屈服后的行为；数值积分的精度及稳定性等都有待于解决。

时程分析方法的缺点是很显然的，计算量过于庞大，而且由于是用确定性的时间历程来模拟尚未发生的地震，理论上应取许多条地面运动加速度曲线作为样本分别进行计算后进行统计分析比较合理。但受到计算效率低的制约，目前在工程上只能用很少几条样本曲线进行结构分析统计。往往难于保证得到可靠的统计量。

2.2 地震波的特性、输入与选取

为了得到桥梁在地震中每时每刻的地震反应，需要对桥梁进行动力时程分析，而动力时程分析是以输入合理的地震波为基础的，因此，选择合理的地震波是对桥梁进行动力时程分析和桥梁抗震设计的基础。但地震波的选取受多种因素的影响，包括该桥的动力特性，地震带和场址类型等。而且不同的桥在同一地点或在不同地点的同一座桥，地震波的选择也是不一样的。

2.2.1 地震波的幅值

地震动峰值加速度（PGA）的大小可以反映地震波幅值。地震动幅值有水平方向和垂直方向的，地震动水平方向的幅值比较大，因此水平地震的剪切运动对工程结构的危害比较大。总加速度峰值发生在高频率，高频率的振动，并不损坏桥，可以对桥梁造成危害的主要是从基础的运动速度，尤其是基础位移。基于此，提出了有效峰值的概念。由此派生的名词有有效峰值加速度、有效峰值速度、持续加速度、持续速度、均方根加速度、有效反应谱加速度等。

2.2.2 地震波的选取

地震波幅值的选取原则是选择的典型强震地震波记录与拟建场地的抗震设防烈度，对应的加速度峰值大小相同，如果选择的强震地震波的加速度峰值与抗震设防对应的加速度峰值不同，则调整强震记录到加速度峰值相当。

在选择强震记录时，最大峰值加速度应符合桥梁所在地区的烈度要求外，场地条件也应尽量接近，也就是地震加速度时程的主要周期应尽量接近桥址区场地的卓越周期。

2.2.3 地震波的输入

地震输入可采用一致激励和多点激励模式，使用于各类桥梁线形和非线性的地震反应分析。当大跨度桥梁结构的跨度与地震波的波长处于相同数量级时，应考虑地震输入时间和空间的变异性，为了能够比较合理地预测未来地震作用下桥梁结构的地震反应。

目前通常采用两种方法去选择输入地震波，第一种方法称为类比地震波方法，第二种方法称为人工地震波方法。如果桥梁结构是在指定桥址的情况下进行地震分析的，则对地震波进行输入应选择第一种方法，即类比地震波方法，但必须先对桥梁地震站点讨论和基本的安全评价工作。此时便可以选择相似的地震记录作为地震波进行输入，这就要求所选地震波与所建桥梁的地址环境相类似，并且具有类似的地震级别的地震动记载。一般情况下，对桥梁进行地震分析时需采用若干条相似地震波，依据分别进行的时程分析的计算结

果，从而更科学合理对该桥结构进行综合抗震性能评价。

3. 大跨度钢桁架桥梁的数值分析

3.1 工程概况

南京长江大桥是我国自行设计建造的首座特大铁路，公路两用桥梁，由正桥和引桥两部分组成。其中正桥分上下两层，上层为公路，四车道，公路行车道宽 15m，两侧各设净宽 2.5m 的人行道，总宽为 19.5m。下层为双线铁路，两线路中心距为 4m。正桥上部结构由 10 孔钢梁组成，浦口岸第一孔为跨径 128m 的简支钢桁梁，其余 9 孔为三联三等跨 160m 的连续钢桁梁。主桁为平弦菱形桁，节间距 8m，桁高 16m，下加劲桁弦高 14m；两主桁中心距为 14m。

3.2 该桥的基本设计参数

该桥主桁杆件有 31 种不同类型的截面，众多类型的纵横向连接系以及铁路，公路两种不同桥面系等，结构体系十分复杂。为了能够较准确地分析，根据大桥的结构特点，选取了南京联主桁（160m 三跨连续钢桁梁）为研究对象进行有限元模型建模，同时根据相关资料确定了大桥各主要构件的截面性质和材料性质，如下表所示：

南京长江大桥钢桁梁杆件截面特性

| 截面性质 | 截面积 (m^2) | 竖弯惯性矩 (m^4) | 横弯惯性矩 (m^4) | 扭转惯性矩 (m^4) |
|------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 数值 | $0.3433 \times 10^{-2} \sim 0.19984$ | $0.1286 \times 10^{-5} \sim 0.12587$ | $0.1286 \times 10^{-5} \sim 0.017839$ | $0.2666 \times 10^{-3} \sim 0.13685$ |

南京长江大桥材料特性

| 构件名称 | 所有材料 | 弹性模量 (Pa) | 泊松比 | 密度 (kg/m^3) |
|-------|-------|----------------------|------|--------------------|
| 连续钢桁梁 | I 级钢 | 2.1×10^{11} | 0.28 | 7.85×10^3 |
| 公路桥面 | 轻质混凝土 | - | - | 2.0×10^3 |

3.3 约束与连接的简化处理

在建模时，三跨连续钢桁梁桥的约束条件通过限制模型中的相应节点自由度来实现。具体做法是，按照设计图纸，对四个支撑处都施加竖向，绕竖向和横向的转动约束，对中间跨的两个支撑施加纵向约束，四个支撑处在同一侧分别选取一个支撑点进行横向约束。

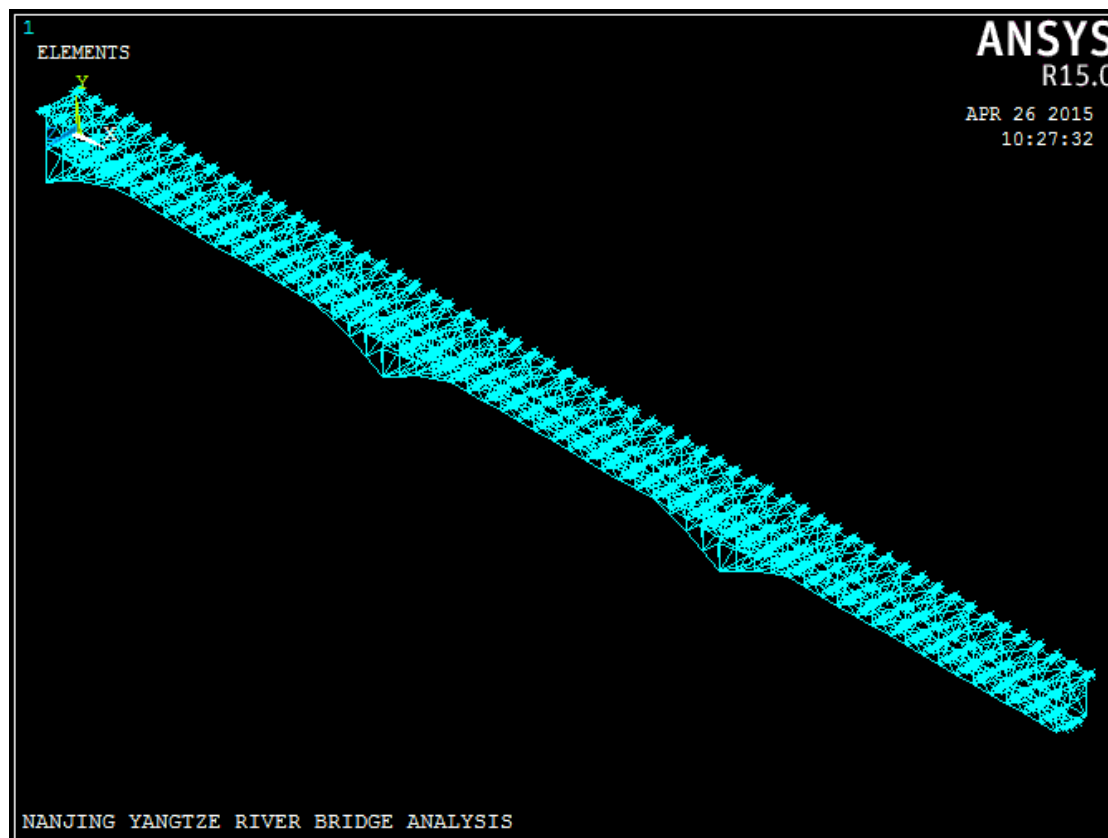
3.4 南京长江大桥南京联主桁 ANSYS 建模

建模假设

基于以下假设的基础上形成了有限元模型：

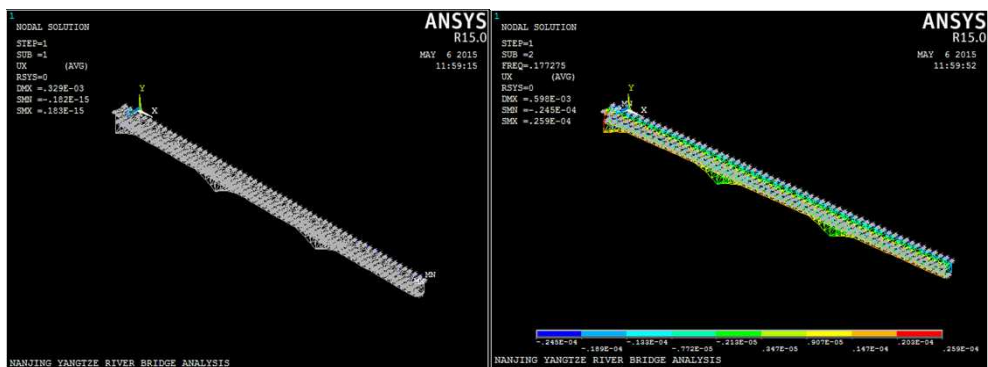
- (1) 假设桥面板和纵梁的形心在同一水平面上；
- (2) 假设各节点满足理想连接条件；
- (3) 忽略桥面板的垂度变化；
- (4) 建模坐标定义为，顺桥向为 X 方向，横桥向为 Y 方向，竖向为 Z 向。

采用 ANSYS 软件建立该连续钢桁梁桥有限元模型时，单元选取如下：主桁杆件，铁路纵梁，横梁，上下平横向连接系等采用三维梁单元 BEAM4 模拟，公路纵梁，公路桥面混凝土以及铁路混凝土轨枕，无缝钢轨等对结构刚度贡献较小的部分简化为质量单元 MASS21，质量单元加在上，下平联的相关节点上。所建立的有限元模型共有 7960 个单元，5227 个节点，如图所示。



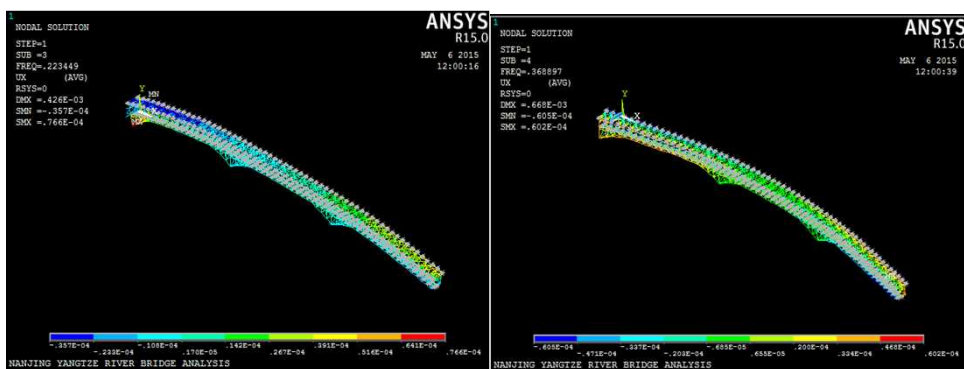
3.4.1 模型模态分析求解

该大跨度钢桁梁桥的前十阶振型图如下：



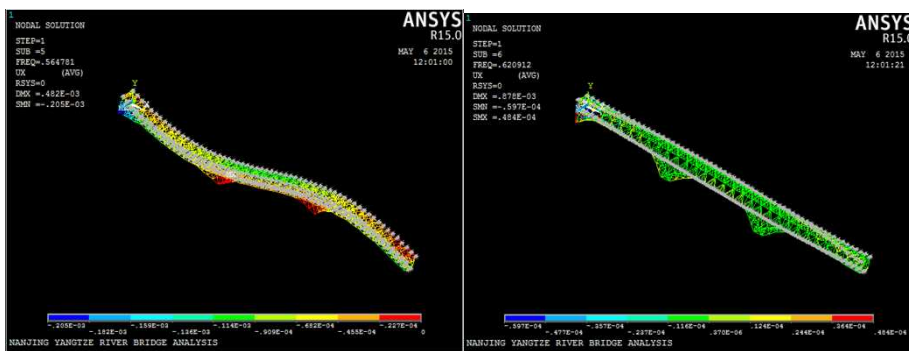
一阶振型图

二阶振型图



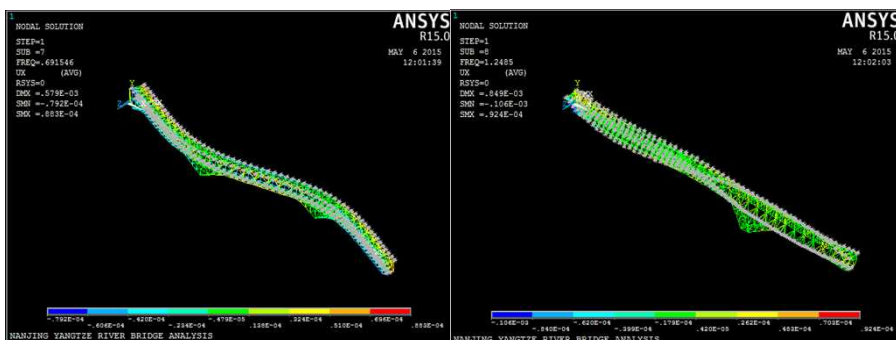
三阶振型图

四阶振型图



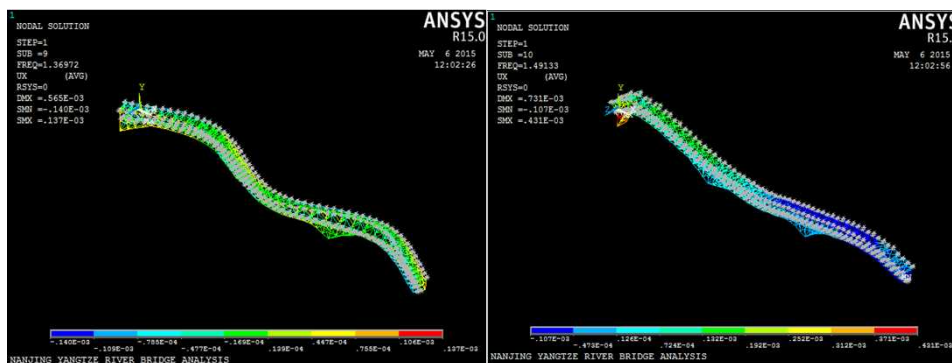
五阶振型图

六阶振型图



七阶振型图

八阶振型图



九阶振型图

十阶振型图

3.4.2 模型模态计算结果

通过 ANSYS 软件对该大跨度钢桁梁桥进行模态分析,由于低阶振型对结构起控制作用,所以只提取前十阶振型进行分析。其自振频率和周期如下表所示:

| 阶次 | 自振频率 f/Hz | 自振周期 |
|----|--------------------|--------|
| 1 | 0.15289 | 6.5404 |
| 2 | 0.17727 | 5.6411 |
| 3 | 0.22345 | 4.4753 |
| 4 | 0.36890 | 2.7108 |
| 5 | 0.56478 | 1.7706 |
| 6 | 0.62091 | 1.6105 |
| 7 | 0.69155 | 1.4460 |
| 8 | 1.2485 | 0.8009 |
| 9 | 1.3697 | 0.7301 |
| 10 | 1.4913 | 0.6706 |

模态分析是动力学分析中很重要的基础分析,是其他动力学分析的前提,通常用于研究结构的振动性质,从而计算结构的固有频率及主振型。这些参数是重要的结构参数,并成为其他类型动力学分析的基础。

3.4.3 模型模态结果分析

通过以上分析发现该大跨度钢桁梁桥以横桥向振动为主,故对横桥向的地震响应最为敏感。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/688010032044006117>