

摘 要

机电测试技术是机电测量技术及试验技术的总称，在科研、生产、日常生活和国防事业中的作用越来越重要。本文以钢管混凝土桁式组合拱桥的模型试验为工程背景，进行了拉力测试系统和振动测试系统的设计，并进行了模型试验研究，取得了以下成果：

(1). 利用相似理论进行了钢管混凝土桁式组合拱桥模型的设计与制作。

(2). 利用应变电测原理自己制作了拉力传感器，并设计了拉力测试系统。该系统能够准确、迅速、方便地测得模型中预应力筋和斜拉索的拉力。

(3). 设计了振动测试系统。该系统可以检测振动信号，并能够对试验数据进行分析处理，从而得到桥梁结构的水平和竖直两个方向各阶模态的固有频率、阻尼比和振型。

(4). 进行了钢管混凝土桁式组合拱桥的模型试验：通过对施工过程的模拟，得到了施工阶段内力和外载对重要节点挠度变化的影响规律；进行了全桥静载试验，对该桥的静力特性作出了科学的评价，简要分析了挠度、应变的变化规律；分别采取两片、三片桁片，装配一跨径为二倍于天子山大桥的半跨模型，进行了最大悬臂状态的刚度比较试验；利用模态分析的方法，进行了全桥振动试验，得到了结构水平和竖直两个方向各阶模态的固有频率、阻尼比和振型，对该桥的动力特性作出了科学的评价，并探讨了内力对结构动力性能的影响。

本文以试验为基础，理论分析为手段，所设计的拉力测试系统和振动测试系统满足了模型试验的要求。模型试验的成功为该类型桥梁的设计与计算提供依据，其结论也为同类型桥梁结构的设计研究提供借鉴。

关键词：机电测试技术；钢管混凝土桁式组合拱桥；模型试验；拉力测试系统；振动测试系统；相似理论；模态分析

[注]：本论文受到湖南省交通厅“V型山谷地域钢管混凝土桁式组合拱桥施工工艺与整桥性能研究”科技攻关项目资助

ABSTRACT

Mechanical and electric measuring technology is more and more important in scientific research, national defence and other fields. Presented in this thesis is a model test of concrete-filled steel-tube arch truss bridge. We design a force measuring system and vibration measuring system to have the test. This thesis includes some contents:

(1). The model is designed and manufactured by using similarity theory.

(2). We manufacture the force sensor and design the force measuring system which can measure force quickly and exactly.

(3). We design the vibration measuring system which can measure the vibration and analyze the data. So we can get the horizontal and vertical frequency, damp and swing of different modal.

(4). Having the model test for concrete-filled steel-tube arch truss bridge. By simulating the construction procedure, the rule of internal force and load affecting the important node is gained. The static performance is evaluated pertinently through doing the static experiment of the whole bridge. We manufacture another model which span is the twice long as the Tianzishan bridge and analysis the stability in the maximal cantilever state. Using the way of modal analysis, We do the vibrating test and get the horizontal and vertical frequency, damp and swing of different modal. The dynamic performance is evaluated pertinently and the rule of internal force affecting the dynamic performance is gained.

Based on the model test, analyzed in finite element program, the force measuring system and vibration measuring system is fit for the model test. The success of model test gives credible data to the design of this bridge and the model test of the same type bridge.

Key Words: mechanical and electric measuring technology; concrete-filled steel-tube arch truss bridge; model test; force measuring system; vibration measuring system; similarity theory; modal analysis

第一章 绪论

1.1 机电测试技术

1.1.1 机电测试技术简介

测量^[1]是人们认识和改造世界的一种必不可少的重要手段，它是以确定被测物属性量值为目的的一组操作。通过测量和试验能使人们对事物获得定性或定量的概念，并发现客观事物的规律性。广义地讲，测量是对被测量进行检出，变换分析处理、判断、控制等的综合认识过程。

测试技术^[1-9]是测量技术及试验技术的总称。定量地描述事物的状态变化和特征总离不开测试。简言之，测试是依靠一定的科学技术手段定量地获取某种研究对象原始信息的过程。它的基本任务是获取有用的信息。首先是检测出被测对象的有关信息，然后加以处理，最后将其结果提供给观察者或输入其他信息处理装置、控制系统。它是信息技术三大支柱（测试控制技术、计算技术和通信技术）之一。

测试是人类认识客观世界的手段，是科学研究的基本方法。在工程技术领域中，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能试验等，都离不开测试技术。特别近代工程技术广泛应用着的自动控制技术已越来越多地运用测试技术，测试装置已成为控制系统的重要组成部分，甚至在日常生活用具，如汽车、家用电器等发面也离不开测试技术。

机械工业^[3]担负着装备国民经济各个部门的任务。在改革开放的过程中，机械工业面临着更新产品、革新生产技术、改善经营管理、提高产品质量、提高经济效益和参与国际市场竞争的挑战。测试技术将是机械工业对付上述挑战的基础技术之一。

1.1.2 测试工作的任务

测试工作的基本任务^[5]是，通过测试手段，对研究对象中的有关信息做出比较客观、准确的描述，使人们对其有一个恰当的全面的认识，并达到进一步改造和控制研究对象的目的。研究对象所包含的信息是相当丰富的，在实践中，人们总是根据要求测出所感兴趣的有限的信息，而不是全部信息。

信号是信息的载体，某些信息是可直接检测的，而有些信息是不容易直接

检测的，需通过对其相关的信息进行加工处理才能获得。一般来说，测试工作总是采用最简捷的方法来获得与研究任务相联系的、最有用的、能表征研究对象特征的有关信息，而不能也不可企图获取事物的全部信息。

测试是为了获取有用的信息，而信息是以信号的形式表现出来的。根据一个研究对象如何估计它的模型结构，如何设计实验方法，以最大限度地突出所需要的信息，并以比较明显的信号形式表现出来，这无疑也是测试工作的一部分。由此可见，测试工作是一件非常复杂的工作，涉及试验设计、模型试验、传感器、信号加工与处理、误差理论、控制工程、系统辨识和参数估计等内容，需要多种学科知识的综合运用。

1.1.3 测试技术的发展

现代科学技术的发展，为测试技术水平的提高创造了物质条件。同样，拥有高水平的测试系统又会促进新科技成果的不断发现和创新。两者之间是相辅相成的。大致来说，测试技术的发展方向^[1-9]有下列几个方面：

1、传感器水平的提高。采用新材料、新工艺是传感器的性能进一步提高，可实现传感器的微型化和集成化。此外，采用计算机技术，使传感器的数据处理能力提高，提升传感器的智能水平。

2、电路设计的改进。广泛采用运算放大器和各种集成电路，大大简化了测试系统，提高了系统特性。例如有效地减小了负载效应、线性误差等。

3、广泛应用信息技术。信息技术，特别是计算机技术和信息处理技术，使测试技术产生了巨大变化，大幅度地提高测试系统的精确度、测量能力和工作效率；引进许多新的分析手段和方法，使测试系统具有实时分析、记忆、逻辑决断、自校、自适应控制和某些补偿能力，向着智能化发展。

4、多参量测量系统的开发。由于出现各种廉价传感器和实时处理装置，为开发多传感器和多种参量测试系统提供了可能性。这种测量系统可以实现多自变量函数的测量，是自动控制系统必不可少的装置。它也广泛应用于设备的监测和组成线型或面型传感器阵列进行图像或场量的测试。

1.2 模型试验研究

1.2.1 模型试验及其优点

模型试验^[10]中所指的模型，是仿照原型（真实结构）并按照一定比例关系复制而成的代表物，它具有原型的全部或主要特征。通过对模型的试验，可

以得到与原型相似的工作情况，从而可以对原型的工作性能进行了解和研究。只要设计的模型满足相似条件，则通过模型试验所获得的数据和结果，可以直接推算到相应的原型结构上去。

模型试验与实际结构的足尺试验相比，具有下述优点：

(1). 经济性好。由于模型的几何尺寸一般比原型小很多，因此模型的制作容易，装拆方便，节省材料、劳力和时间，并借同一个模型可进行多个不同目的的试验。

(2). 针对性强。模型试验可以根据试验目的，突出主要因素，简略次要因素。这对于结构性能的研究，新型结构的设计，结构理论的验证和推动新理论的发展都有一定的意义。

(3). 数据精确。由于试验模型小，一般可在实验条件较好的室内进行，因此可以严格控制其主要参数，避免许多外界因素的干扰（如风吹、日晒、雨淋、温湿度变化和磁场变化等），保证了实验结果的准确度。

1.2.2 桥梁模型试验

桥梁结构模型试验^[11-22]研究是确定和探索复杂桥跨结构受力状态的重要手段之一。早在 1755 年德国工程师格莱伯曼为了在莱茵河上修造木桥，就首先使用模型试验验证了设计的可靠性。此后，在 1829 年法国科学家柯西用模型试验研究了梁和板的振动问题。1846 年英国的罗伯特·斯坦福森为修建不列颠桥进行了桥梁结构模型试验。我国从 50、60 年代起，随着桥梁建设的蓬勃发展，逐渐开始了桥梁结构的模型试验研究。

桥梁结构多数是高次超静定结构或三维弹性体，除非进行理论研究，设计计算多数采用简化方法。不同结构有不同的简化方法，通常情况是首先把空间问题简化为平面问题，然后再对平面问题进行简化计算。尽管计算机技术已十分先进，有些仿真软件已可做到内力（应力）、变形可视化的程度，但对某些复杂的结构构造细节仍无法通过计算机很好地模拟出受力状态。比如，材料性能不均匀、复杂而庞大的构造细节等均难以建立有效、合理的数学模型而通过计算机求解。模型试验一般适用于整体结构以及复杂结构的实验研究。虽然用计算机对复杂的结构甚至整体结构进行计算分析已是可行而方便的手段，但模型试验更能准确地反应结构的实际工作情况，因为它不受简化假定的影响。反之，简化了的数学模型计算机分析的结果通常需要模型试验来加以验证。

从上述分析来看，模型试验虽然是一门古老的技术，但仍可在桥梁结构工

程技术发展和进步方面起到不可替代的作用。它和计算机的数学模型分析、计算是互为补充的，两者紧密结合才可为桥梁技术的发展带来更大辉煌。

一般而言，桥梁模型试验研究的目的是两点：一是验证设计理论；另一是确定复杂结构细节的受力状态。根据不同的试验目的，可以将模型分成两类。一类是以解决生产实践中的问题为主要目的的模型试验，这类模型试验的模型的设计制作与试验要严格按照相似理论，使模型与原型之间满足几何相似、力学相似和材料相似的关系。这样，模型就能反映原型的特性，模型试验的结果可以直接返回到原型上去。这种模型试验常常用于解决一些目前难以用分析的办法解决的工程实际问题。还有一类模型试验，主要是用来验证计算理论或计算方法的。这类试验的模型与原型之间不必满足严格的相似条件，一般只要求满足几何相似，同时满足边界条件。将这种模型的试验结果与理论计算的结果对比校核，可用以研究结构的性能，验证设计假定与计算方法的正确性，并确认这些结果所证实的一般规律与计算理论可以推广到实际结构中去。

1.2.3 钢管混凝土桁式组合拱桥及天子山大桥概况

钢管混凝土桁式组合拱桥^[23~29]是我国桥梁工作者自主研发、设计、施工的一种崭新的桥梁结构型式。它是在桁式组合拱桥的基础上改进得到的，兼有桁式组合拱桥和钢管混凝土拱桥的优点，其跨越能力强、受力合理、轻盈美观、省工省料、施工简便，为拱桥这一古老桥型增添了新的一页。

位于湖南省永连公路上的天子山大桥^[29]是目前国内第一座钢管混凝土桁式组合拱桥。该拱桥主孔为钢管混凝土桁式组合拱，计算跨径 $L=125m$ ，计算

矢高 $f=25m$ ，矢跨比 $f/L=1/5$ ，下弦拱轴线为悬链线，拱轴系数为 $m=1.167$ 。

两岸边孔分别为 $7+2\times 9m$ 和 $9+8m$ 连续刚构，全桥孔径布置为 $7+2\times 9+125+9+8m$ ，全长 $172m$ ，结构示意图如图 1.2 所示。

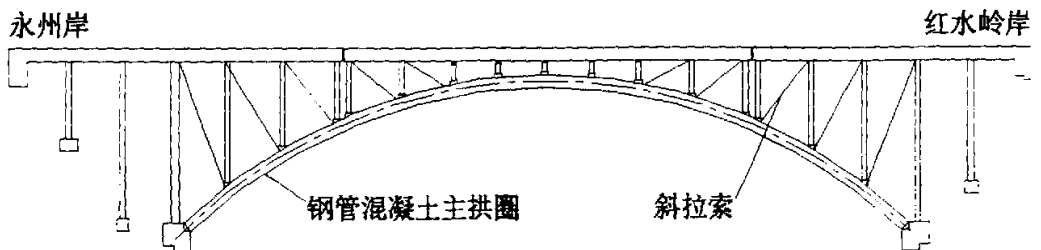


图 1.2 桥型结构示意图

天子山大桥为大跨度钢管混凝土拱桥，采用自架设施工的施工工艺，用人字桅杆吊机作为吊装工具两岸同时施工的方案。主拱圈的每边由 12 节钢管拱组成，每 2 节钢管拱组成一段作为下弦。而下弦钢管拱又由斜拉索张拉，斜拉索的另一端张拉在上弦边肋上，和竖杆一起构成稳定三角形结构。在主拱圈合拢前，吊机和拱圈的自重及施工中产生的动载荷都由两岸的锚固墙张拉，桥梁为悬臂桁架体系。主拱圈合拢后，即进行体系转换，将锚固墙至上弦边肋的预应力筋在主孔三、四段之间逐束放松、切断，并分三段（永州岸锚固墙——永州岸断缝；永州岸断缝——红水岭岸断缝；红水岭岸断缝——红水岭岸锚固墙）重新张拉，使桥梁结构由悬臂桁架体系逐步过渡到桁式组合体系。

斜杆是桁式组合拱桥构成三角形稳定体系的构件之一。在已建成的桁式组合拱桥中，都是采用的钢筋混凝土预制构件，但在天子山大桥，采用的是斜拉索，这也是天子山大桥的设计创新点之一，它直接影响主拱圈拱轴线线型和成桥的应力状况。

1.3 本文研究的意义及主要内容

1.3.1 本文研究的意义

本文的研究依托于湖南省交通厅“V型山谷地域钢管砼桁式组合拱桥施工工艺与整桥性能模型研究”课题而展开。

该模型试验研究的原型是位于湖南省永连公路上的天子山大桥，它是目前国内第一座钢管混凝土桁式组合拱桥。在该桥建设过程中，虽然采用了现场计算机测试数据采集方法来进行施工监测，但由于该类桥型是首次施工建设，受施工现场条件限制和测试科研经费不足等的影响，尚有一些重要实际参数未能测量到，施工过程中也发现还有许多技术问题需要进一步探索。为此，湖南省交通厅二 00 二年针对永连路天子山钢管砼桁式组合拱桥的建设而立项了重大科研课题“V型山谷地域钢管砼桁式组合拱桥施工工艺与整桥性能研究”。本模型试验项目，拟通过结合现场施工，完整地了解整桥建设过程中重要部位力与变形的关系、最优施工工艺、更为有效的施工控制方法、该类型桥梁的整体受力性能等，并探讨拱桥跨径跨越 600M 大关的可行性，为解决 V 型山谷地域大跨度桥梁建设，提供一种投资省，建设工期短，施工设备简单的新型桥型结构和施工控制方法。它对于提高我国桥梁建设的技术水平，促进山区公路的建设具有十分重要的意义。

本文所设计的拉力测试系统能够准确、迅速、方便地测得模型中横拉索和斜拉索的拉力；所设计的振动测试系统可以检测振动信号，并能够对试验数据进行分析处理，从而得到桥梁结构的水平和竖直两个方向各阶模态的固有频率、阻尼比和振型。从而保证了模型试验的顺利进行。

1.3.2 本文主要内容

本文各章内容安排如下：

第一章 绪论。简单介绍了机电测试技术及其发展状况、模型试验的研究现状，并介绍本论文的研究背景、目的和意义。

第二章 试验模型的设计、制作及安装。介绍了利用相似分析的方法进行模型的设计以及重要零部件的设计、制作。

第三章 测试系统的设计。介绍了测试系统的构成、基本要求及拉力测试系统、振动测试系统的设计。

第四章 模型试验结果及分析。进行了模型试验：模拟施工试验、全桥静载试验、最大悬臂状态稳定性试验及振动试验，并对试验结果进行了分析处理。

第五章 全文总结。总结全文了的主要内容和所取得的成果。

第二章 模型的设计与制作

2.1 模型试验理论基础

模型试验理论^[10-11]是以相似原理和量纲分析为基础，确定模型设计中必须遵守的相似准则。它是整个模型试验的理论基础。

2.1.1 相似理论

如果原型和模型相对应的各点及在时间上对应的各瞬间的一切物理量成比例，则两个系统相似。相似常数（也成为相似比）是模型物理量同原型物理量之比，主要有几何相似比、应力、应变、位移、弹性模量、泊松比、材料密度等。在这些相似常数中，长度、时间、力所对应的相似常数成为基本相似常数。模型和原型中的相似常数之间的关系称为相似指标。如两者相似，则相似指标为 1，由相似指标导出的无量纲群称为相似判据。

相似定理有 3 个：

(1). 相似第一定理：彼此相似的两系统，单值条件相同，其相似判据的数值也相同。

(2). 相似第二定理：当一现象由 n 个物理量的函数关系来表示，且这些物理量中含有 m 种基本量纲时，则能得到 $(n-m)$ 个相似判据。

(3). 相似第三定理：凡具有同一特性的现象，当单值条件（系统的几何性质、介质的物理性质、起始条件和边界条件等）彼此相似，且由单值条件的物理量所组成的相似判据在数值上相等时，则这些现象必定相似。

2.1.2 量纲分析

当还不知道系统的物理量间的函数关系，但已知影响该系统的物理量时，可用量纲分析法模拟该系统。量纲分析法最重要的作用是确定相似判据，其规律有以下几条：

(1). 2 个物理量相等，不仅要求其数值相同，也要求它们的量纲相同；

(2). 2 个同量纲参数的比值是无量纲参数；

(3). 在 1 个物理过程中，若有 n 个物理参数、 m 个基本量纲，则可组成 $(n-m)$ 个独立的无量纲组合；

(4). 在 1 个物理方程式中，等式两边的量纲必须相同，这个物理方程的量

纲均衡性是量纲分析的基础。

2.1.3 模型和原型的相似要求

模型和原型的相似要求主要有以下 5 个方面：

(1). 几何相似。

(2). 边界条件相似。模型和原型的支承条件、支承位置等均应相同或相似。

(3). 物理参数相似。模型与原型的荷载性质、大小等均应满足相应的相似要求，作用方向应完全相同。

(4). 时间相似。在动力模型试验中，随时间变化的过程，每一刻都对应着某些物理量，因此必须保持时间比例不变的关系。

(5). 初始条件相似。在常温的静态应力试验时，只要求几何相似、边界条件和荷载相似；而在动应力和温度应力下的模型试验，则主要要求初始条件和时间的相似。

2.2 试验模型的设计

模型设计是模型试验是否成功的关键，在模型设计中应综合考虑各种因素，如模型的类型、模型材料、试验条件以及模型制作条件，确定出适当的物理量的相似常数。

2.2.1 模型材料及几何尺寸的确定

模型试验对模型材料总的要求是：

(1). 保证相似要求。

(2). 保证量测要求，能产生足够大的变形。

(3). 保证材料性能稳定，不因温、湿的变化而变化。

(4). 保证材料徐变小。

(5). 便于加工制造。

我们选取了铝合金作为模型材料。这是因为铝合金允许有较大的应变量，并具有良好的导热性和较低的弹性模量，其泊松比约为 0.3，比较接近于混凝土材料。

根据现有试验条件，模型的缩尺比例取为 20: 1。

2.2.2 相似分析

2.2.2.1 静力相似

该模型的结构静力学问题中包含有如下物理量^{[10],[15],[18]}：

- ①结构的几何尺寸 l (包括长、宽、高)。
- ②荷载作用的坐标位置 x 、 y 、 z 。
- ③结构上的静载荷，如集中力 P 、弯矩 M 、以及均布载荷 q 。
- ④结构的反应，如挠度 δ 、转角 ψ 、应力 σ 、应变 ϵ 。
- ⑤材料的性能，如弹性模量 E 、泊松比 μ 、密度 ρ 。

用量纲分析法，则 π 函数的一般形式为：

$$\pi = l^{a_1} x^{a_2} y^{a_3} z^{a_4} P^{a_5} M^{a_6} q^{a_7} \delta^{a_8} \psi^{a_9} \sigma^{a_{10}} \epsilon^{a_{11}} E^{a_{12}} \mu^{a_{13}} \rho^{a_{14}} \quad (2-1)$$

所有物理量中，基本量纲数为 2 (即长度 L 和力 F)，其它物理量都可以用它们的量纲来表示。根据各个物理量的量纲，可得到量纲矩阵：

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
	l	x	y	z	P	M	q	δ	ψ	σ	ϵ	E	μ	ρ
L	1	1	1	1	0	1	-1	1	0	-2	0	-2	0	-3
F	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1

物理量个数 $n=14$ ，基本量纲个数 $k=2$ ，由相似第二定理可得相似判据个数

$$n - m = 14 - 2 = 12 \quad (2-2)$$

可直接列出 π 矩阵

	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_{10}	a_9	a_{11}	a_{13}	a_{14}	a_1	a_{12}
	x	y	z	P	M	q	δ	σ	ψ	ϵ	μ	ρ	L	E
a_2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
a_3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
a_4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
a_5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-1
a_6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-3	-1
a_7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1
a_8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0
a_9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1
a_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
a_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
a_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
a_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1

由此可得到相似判据

$$\pi_1 = \frac{x}{l}; \quad \pi_2 = \frac{y}{l}; \quad \pi_3 = \frac{z}{l}; \quad \pi_4 = \frac{P}{El^2};$$

$$\begin{aligned} \pi_5 &= \frac{M}{El^3}; & \pi_6 &= \frac{q}{El}; & \pi_7 &= \frac{\delta}{l}; & \pi_8 &= \frac{\sigma}{E}; \\ \pi_9 &= \psi; & \pi_{10} &= \varepsilon; & \pi_{11} &= \mu; & \pi_{12} &= \frac{\rho L}{E}; \end{aligned} \quad (2-3)$$

根据相似第三定理，原型及模型对应的 π 值应相等，得如下相似条件：

$$\begin{aligned} \lambda_x &= \lambda_y = \lambda_z = \lambda_l; & \lambda_q &= \lambda_E \lambda_l; & \lambda_p &= \lambda_E \lambda_l^2 \\ \lambda_M &= \lambda_E \lambda_l^3; & \lambda_\delta &= \lambda_l; & \lambda_\sigma &= \lambda_E; \\ \lambda_\psi &= 1; & \lambda_\varepsilon &= 1; & \lambda_\mu &= 1; \\ \lambda_\rho &= \lambda_E / \lambda_l \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中： λ_l ——模型与实型的几何相似比；

λ_E ——模型与实型的弹性模量相似比；

λ_x 、 λ_y 、 λ_z —— x 、 y 、 z 等物理量的相似比；

λ_q 、 λ_p 、 λ_M —— q 、 P 、 M 等物理量的相似比；

λ_δ 、 λ_σ 、 λ_ψ 、 λ_ε —— δ 、 σ 、 ψ 、 ε 等物理量的相似比；

λ_μ 、 λ_ρ —— μ 、 ρ 等物理量的相似比；

式(2-4)说明，各物理量模型和原型之间的相似常数均可用 λ_l 和 λ_E 表示，模型上测得的物理量经过一定的转化可折算到原型上去。而转角 ψ 、应变 ε 等物理量因本身无量纲，它们在模型上的实测值也就是原型上的相应值。

由式(2-4)可见，材料密度 ρ 的相似常数很大，而铝合金没有这样大的密度。对于静力模型， ρ 的大小主要影响结构自重，可以在模型结构上附加质量配重来增大模型材料的比重。

模型上每一段配重：

$$W = (\lambda_\rho \rho_p - \rho_m) A_m d_m \quad (2-5)$$

式中： ρ_p ——实桥材料的密度；

ρ_m ——模型材料的密度；

A_m ——模型梁段的横截面积；

d_m ——模型梁段的长度。

在本模型中，有：

$$\lambda_l = \frac{1}{20}; \quad \lambda_E = 2 \quad (2-6)$$

代入式(2-4)，可得：

$$\lambda_q = \lambda_E \lambda_l = \frac{1}{10}; \quad \lambda_p = \lambda_E \lambda_l^2 = \frac{1}{200}; \quad \lambda_M = \lambda_E \lambda_l^3 = \frac{1}{4000};$$

$$\lambda_s = \lambda_l = \frac{1}{20}; \quad \lambda_v = \lambda_E = 2; \quad \lambda_\psi = 1;$$

$$\lambda_c = 1; \quad \lambda_\rho = 40 \quad (2-7)$$

2.2.2.2 动力相似

动力相似问题中，可以假设动力特性与如下物理量有关^{[10],[19]}：

H 、 δ 、 ω 、 ρ 、 μ 、 a 、 l 、 F 、 v 、 E

其中： H 为位移传递函数； δ 为挠度； ω 为频率； ρ 为密度； μ 为泊松比； a 为加速度； l 为线性尺寸； F 为外力； v 为速度； E 为弹性模量。

上述关系可写成如下形式：

$$f(H, \delta, \omega, \rho, \mu, a, l, F, v, E) = 0 \quad (2-8)$$

根据 π 定理，可以得到如下 7 个 π 因子，即 7 个相似准则：

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \mu; & \pi_2 &= \frac{\delta}{l}; & \pi_3 &= \frac{F}{El^2}; \\ \pi_4 &= \frac{1}{\omega l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}; & \pi_5 &= \frac{HF}{d}; & \pi_6 &= \frac{a}{\omega^2 d}; \\ \pi_7 &= \frac{v}{\omega d} \end{aligned} \quad (2-9)$$

如果考虑静力作用及重力加速度的影响，则还可以得到如下相似准则：

$$\pi_8 = \frac{gl\rho}{E} \quad (2-10)$$

由于实型和模型处于同一重力场中，有：

$$\frac{g_m}{g_p} = 1 \quad (2-11)$$

由式(2-10)和式(2-11)，可得

$$\lambda_\rho = \lambda_E / \lambda_l \quad (2-12)$$

这和静力相似中得到的结果是一样的，因此，动力模型亦需配重。

由相似准则 π_4 可得频率相似比为

$$\lambda_\omega = \frac{1}{\lambda_l} \sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_\rho}} \quad (2-13)$$

2.3 试验模型的制作

2.3.1 模型的总体构造

如图 2.1 所示为试验模型的总体构造示意图。模型缩尺为 20:1。计算跨径 $L = 6250\text{mm}$ ，计算矢高 $f = 1250\text{mm}$ ，矢跨比 $f/L = 1/5$ ，下弦拱轴线为悬链线，拱轴系数为 $m = 1.167$ 。

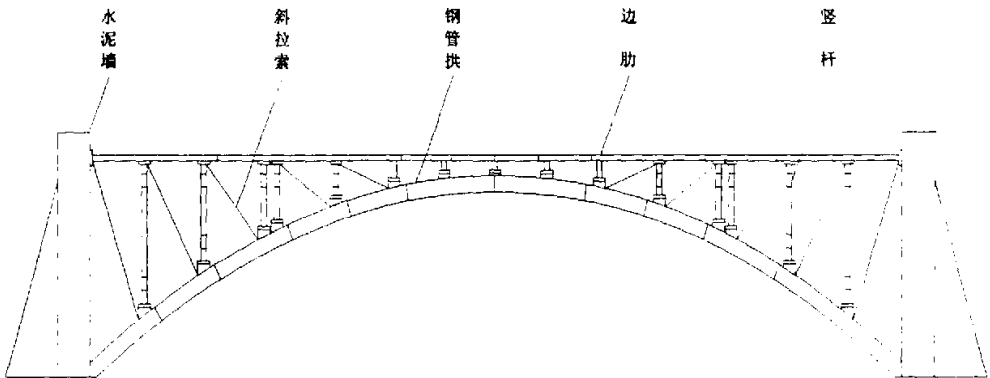


图 2.1 模型总体构造示意图

模型左右两侧的水泥墙预埋钢筋并通过角钢、地角螺栓与地基紧密相连。下弦两个平行的钢管拱之间用数根细钢管将其焊接在一起，以增加侧向的稳定性。钢管拱是由 12 个节段通过法兰首尾相连而成的，其端部是三角形的拱座，拱座将水平和垂直方向的载荷传与其接触的水泥墙和大地。上弦的主梁由左右两侧各 14 节边肋首尾相连而成，边肋内部有四根预应力筋贯穿，边肋端部用细长螺栓与水泥墙紧紧联成一体。拱和边肋之间用竖杆支撑，相对应的竖杆之间又用横系梁连接。这样就形成图示的拱—梁组合体系。

2.3.2 模型的制作

2.3.2.1 钢管拱的设计、制造

下弦拱轴线是悬链线如图 2.2 所示，其通用方程为：

$$y = \frac{f}{m-1}(chke - 1) \quad (2-14)$$

式中： f ——矢高；

m ——拱轴系数；

k —— $k = \ln\left(m + \sqrt{m^2 - 1}\right) = 0.57$ ；

$$\varepsilon = \frac{x}{L};$$

L ——跨径。

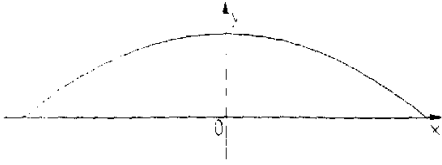


图 2.2 悬链线坐标图

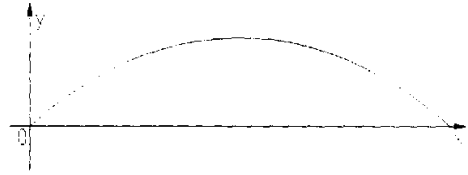


图 2.3 模型坐标图

在模型中的原点如下图 2.3 所示，为了制造及安装过程的方便，将各重要的点用 Matlab 算出如表 2.1 所示（由于其为对称结构，只列出了半跨）。

表 2.1 拱轴线各点坐标值

横坐标 x	0	35	100	200	300	400	450
纵坐标 y	0	27.8	77.1	150.8	221.7	290	323.1
横坐标 x	550	650	750	850	900	1000	1100
纵坐标 y	387.4	449.1	508.2	564.7	591.9	644.6	694.7
横坐标 x	1200	1300	1350	1450	1550	1650	1750
纵坐标 y	742.3	787.4	809	850.3	889.2	925.7	959.6
横坐标 x	1850	1900	2000	2100	2200	2300	2350
纵坐标 y	991.2	1006.1	1034	1059.5	1082.6	1103.3	1112.8
横坐标 x	2450	2550	2650	2737.5	2800	2900	3000
纵坐标 y	1130	1144.7	1157.1	1166	1171.3	1177.8	1181.9
横坐标 x	3100	3125					
纵坐标 y	1183.7	1183.75					

单个钢管拱采用如图 2.4 所示的哑铃型截面，其由两根钢管焊接在一块而成，中部用竖向联结板作腹板。

制作时，首先根据表 2.1 的坐标制作一模板，再用弯管机把两根钢管分别弯成设计的拱形。然后，用钢板将两者焊接成一整体，焊接时要不断敲打以消除内应力，避免引起拱形较大的变化和横向的扭曲。然后再将其割为 12 节段，以便进行施工过程的模拟。每节端部再焊接法兰已实现节与节之间的连接，与地面、水泥墙接触处还要配做三角形的拱座。



图 2.4 钢管拱横截面图



图 2.5 边肋横截面图

2.3.2.2 边肋的设计、制造

上弦的主梁是由左右两侧各 14 节边肋首尾相连而成，横截面如图 2.5 所示。在相邻两边肋连接处的底面有一块联结板，其通过螺栓分别和两边肋连接起来，使三者成为一个整体。另外，为了保证主梁能够顺利对接，对其中心线的直线度亦有较高要求，因此，要对左端面、下端面进行加工使其垂直，作为基准面。边肋的设计、制造中还有一个难点：四个孔是穿预应力筋用的，只有每节边肋两端的四个孔相吻合，预应力筋才能穿过。因此，要保证四孔之间的相对位置绝对精确，并且还要保证它们和两个基准面的位置达到要求。

铸造时，预埋铜管生成四个孔，在砂型两端安放定位板进行四孔的相对定位。但由于有铸造误差，所以在铣床上加工时，首先让上端面和工作台接触，在下面塞铜片以保证下面两孔与下端面的距离达到要求。再翻边让下端面和工作台接触，加工侧面，使左边两孔与左端面的距离达到要求。最后，再分别将前后两端面铣出。

2.3.2.3 竖杆的设计、制造

竖杆的横截面是矩形。其上下两端面通过法兰分别与边肋和焊接在拱上的竖杆支座连接，一小部分侧面通过法兰与横系梁连接。因此，加工时要保证上下两端面的平行以及它们和横系梁连接面的垂直。

竖杆毛坯通过铸造得到。铸造时在侧面与横系梁连接的部分预留了 5mm 的墩台，这样就不用加工整个侧面，减少了加工量。然后将其放在铣床上，以未加工的侧面为基准面，一刀将三个加工面铣出。

2.3.2.4 横系梁的设计、制造

横系梁的横截面是矩形，其两端面通过法兰与左右两侧的竖杆相连，因此要保证这两个面的平行，也可在铣床上一刀铣出。其长度是在模型安装完，竖杆的位置确定之后，现场配做的。

2.3.2.5 斜拉索的设计

斜拉索的设计应保证三点：

- ①. 索与拱和边肋的连接以不改变索力作用线为原则；
- ②. 测力传感器串联在索中；
- ③. 索力调整装置串联在索中。

斜拉索是在模型其它部件按安装完之后才确定其位置的。我们选用了两端都是钩子的双螺杆索力调整装置，制作了两端带环的拉力传感器，二者相扣串联在索中。调力装置的另一个钩子挂在焊接在拱上的环上，传感器的另外一个环与钢丝绳相连，通过钢丝卡固定。钢丝绳另一头穿过最后安装好后在竖杆、边肋的相应位置上钻的孔，用螺栓将其压紧。

2.3.2.6 预应力筋的设计

预应力筋贯穿于边肋的始终，其两端与测力传感器串联。浇注水泥墙前，在相应的位置就留好穿预应力筋的孔。测力传感器的一端带环，通过钢丝卡与预应力筋相连，另一端通过长丝杆固定在水泥墙后面的钢架上。旋转丝杆后面的螺母，即可实现横拉力大小的调节。

2.4 试验模型的安装

模型的安装经历了以下几个过程：

- ①. 铺设水泥混凝土地基，浇筑水泥墙，要注意保证相邻两墙面的距离。
- ②. 从两端水泥墙开始逐节联结边肋，穿预应力筋。为了保证能够顺利对接，要不断调整使每节边肋的基准面尽量在同一平面。为了防止下垂，安装过程中用木棍将其托住。
- ③. 在地上按 1: 1 的比例将拱画出，从两端开始将各节拱依次连接起来。由于焊接时造成了拱形较大的变化，要在连接的法兰处塞铁片以保证拱形达到设计要求。并配做与水泥墙、地基相接触的三角形拱座。
- ④. 通过掉线，将两拱安装在两墙之间适当位置。安装竖杆，并配做焊接在拱上的竖杆支座，然后用 15 节钢管将两个拱焊接为一整体。

⑤. 安装斜拉索。

⑥. 铺设桥面板。

在整个模型的研制过程中我们始终把安全放在首位，一方面在设计图纸上给出具体的技术要求，另一方面在制造过程中严把质量关，力求得到真实有效的测试效果。

我们所制作的试验模型实物照片如下图所示

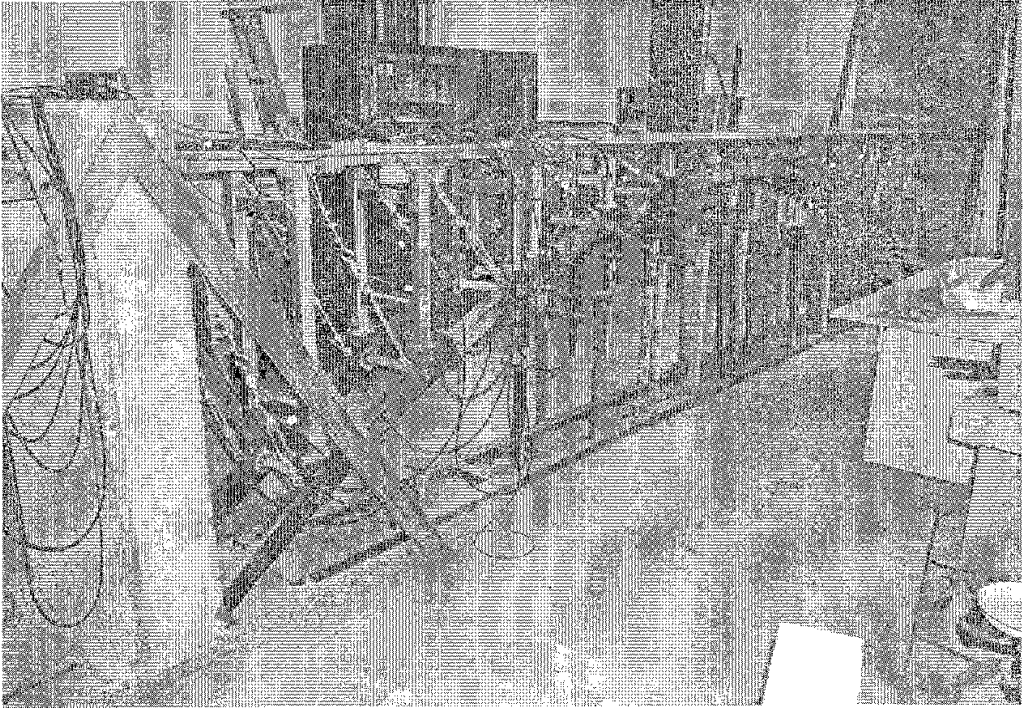


图 2.6 试验模型的实物照片

第三章 测试系统的设计

在科学实验和工程实践中经常会遇到如何正确选择测试系统的问题^[1-9]。由于实际的测试系统在组成的繁简程度和中间环节上差别很大，因而这个测试系统有时可能是一个完整的小仪表，有时则可能是一个由多路传感器和庞大的数据采集系统组成的测试系统。在选用测试系统时，要综合考虑各种因素，如：被测物理量变化的特点、精度要求、测量范围、性能价格比等。其中，最重要的一个因素是测试系统的基本特性是否能使其输入的被测物理量在精度要求范围内真实地反映出来。

钢管混凝土桁式组合拱桥模型试验中，所测试的物理量主要有：预应力筋的拉力、斜拉索的拉力和结构的自振特性参数，本章主要介绍拉力测试系统和振动测试系统的设计。

3.1 测试系统的构成

测试系统是由若干相互联系、相互作用的传感器和仪器设备等元件，为实现一定测试目的而组成的有机整体。由于被测对象复杂多样，因此，检测技术和测试系统的结构也不尽相同，图 3.1 为一基本测试系统组成框图^[3]。

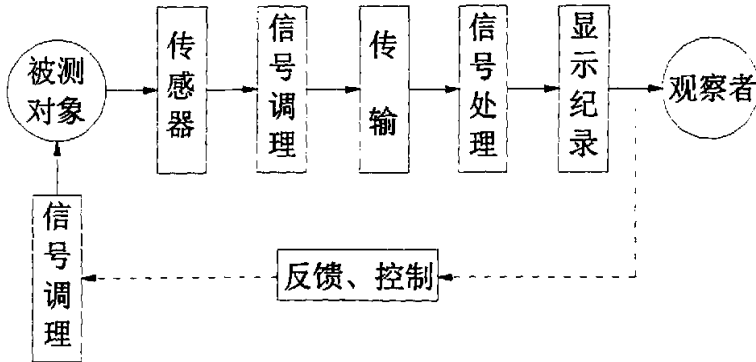


图 3.1 测试系统框图

传感器直接作用于被测量。并能按一定规律将被测量转换成同种或别种量值输出。这种输出通常是电信号。

信号调理环节把来自传感器的信号转换成更适合于进一步传输和处理的形式。这时的信号转换，在多数情况下是电信号之间的转换。例如：将幅值放大、将阻抗的变化转换成电压的变化、或将阻抗的变化转换成频率的变化等。

信号处理环节接受来自调理环节的信号，并进行各种运算、滤波、分析，将结果输至显示、记录或控制系统。

信号显示、记录环节以观察者易于认识的形式来显示测量的结果，或者将测量结果存储，供必要时使用。

在所有这些环节中，必须遵循的基本原则是个环节的输出量与输入量之间应保持一一对应和尽量不失真的关系，并必须尽可能地减小或消除各种干扰。应当指出，并非所有的测试系统都具备图 3-1 中所有环节，尤其是虚线连接的环节和传输环节。实际上，环节与环节之间都存在着传输。

3.2 测试系统的基本要求

一般的工程测试问题总是处理输入量 $x(t)$ 、系统的传输特性 $h(t)$ 和输出量 $y(t)$ 三者之间的关系，即：

(1). $x(t)$ ， $y(t)$ 是可以观察的量。则通过 $x(t)$ ， $y(t)$ 可推断测量系统的传输特性；

(2). $h(t)$ 已知， $y(t)$ 可测，则可通过 $h(t)$ ， $y(t)$ 推断导致输出的相应输入量 $x(t)$ ，这是测试中最常见的问题

(3). 若 $x(t)$ ， $h(t)$ 已知，则可推断或估计系统的输出量。

理想的测试系统应该具有单值的、确定的输入—输出关系，其中以输出和输入成线性关系为最佳，而且最好是一个单向系统和线性系统。所谓单向系统，即测试系统对被测量的反作用力可以忽略；所谓线性系统，即输出与输入成线性关系。在静态测试中，系统的线性关系虽然是所希望的。但不是必需的，因为静态测试中用校正曲线或输出补偿技术作非线性校正尚不困难；在动态测试中，测试系统本身应该力求是线性系统，这不仅因为目前只有对线性系统才能作比较完善的数学处理与分析，而且也因为在动态测试中作非线性校正目前还相当困难。一些实际测试系统不可能在较大的工作范围内保持线性，因此，只能在一定的工作范围内和在一定误差允许范围内作线性处理。

测试系统的基本特性一般分为两类：静态特性和动态特性。静态特性表示测试系统在被测物理量处于稳定状态或缓慢变化时的输入—输出关系。衡量测试系统静态特性的主要指标是非线性、迟滞性、重复性、灵敏度、分辨力、量程等。当被测参数随时间变化时，测试系统处于动态测试状态。这种情况下，输入量与输出量间的函数关系成为测试系统的动态特性。由于输入量是时间的函数，因此输出量也随时间而变化，表示测试系统动态特性的指标通常有频域

指标和时域指标。有频率响应可得频域指标，主要有固有角频率、工作频带、相位角等。由系统的阶跃响应特性可得时域指标，主要有时间常数、上升时间、响应时间和超调量等。

3.3 拉力测试系统

3.3.1 力及其测量

在国际单位制中，力是一个导出量，由质量和加速度的乘积来定义，其单位为牛顿(N)。力的基准量取决于质量、时间和长度的基准量。

力的测量方法^[5]从大的方面讲可分为直接比较法和通过采用传感器的间接比较法两类。在直接比较法中采用梁式天平，通过归零技术将被测力与标准质量的重力进行平衡。其优点是简单易行，在一定条件下可获得很高的精度。但这种方法常常是逐级加载，测量的精度因此决定于砝码分级的密度和砝码等级。另外，这种方法基于静态重力力矩平衡，因此仅适用于做静态测量。与之相反，间接比较法采用测力传感器，将被测力转换为其他物理量，再与标准值作比较，从而求得被测力的大小。标定值是预先对传感器进行标定时确定的。间接法能用来做动态测量，其测量精度主要受传感器及其标定的精度所影响。

本模型试验中预应力筋和斜拉索的拉力利用应变电测原理、通过设计的拉力测试系统来测量。它的基本原理是：将应变片粘贴在构件表面上，随着构件受力变形，应变片产生与构件表面应变成比例的电阻变化，应用适当测量电路和仪器就能测得构件的应变或应力，然后可根据弹性元件的材料特性求出载荷的大小。

3.3.2 拉力测试系统的组成

本试验拉力测试系统的组成框图如下：

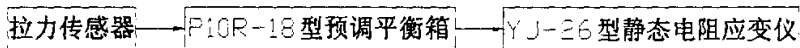


图 3.2 拉力测试系统组成框图

1、拉力传感器

拉力传感器串联在每根索中，由应变片、柱筒形弹性元件和一些附件组成。应变片电桥连接如图所示：

其弹性元件应变值为：

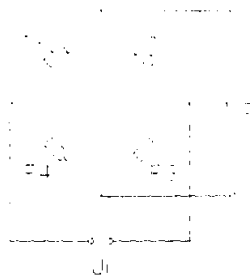


图 3.3 测力传感器电桥连接

$$\varepsilon = \frac{F}{AE} \quad (3-1)$$

式中： F ——被测力， N

E ——弹性模量， N/m_2

A ——柱形截面积， m^2

图中 R_1 、 R_2 为工作应变片， R_3 、 R_4 为补偿片。输出电压为

$$U_o = \frac{k(1+\mu)U_0 F}{2AE} \quad (3-2)$$

2、P10R-18 型预调平衡箱

预调平衡箱有两个作用：一是它有数个信号通道，可以同时接入多个传感器，通过多点转换开关可实现测试信号的转换，和静态电阻应变仪匹配可以进行多点的测量。P10R-18 型预调平衡箱有 10 个通道，可以同时接 10 个传感器；二是各传感器和箱内电阻一起组桥进行预调平衡。预调或实测时另配一手动的多点转换开关依次接通测量。

3、YJ-26 型静态电阻应变仪

电阻应变片的电阻变化很小，测量电桥的输出信号也很小，不足以推动显示和记录装置，因此需将电桥的输出信号用一个高增益的放大器进行放大，以便推动显示或记录装置，用于完成这一任务的仪器称应变仪。此外应变仪还起阻抗变换的作用，和记录器达到阻抗匹配。

YJ-26 型静态电阻应变仪主要用于测量静载作用下物理量的变化，其应变信号变化十分缓慢或变化一次后能相对稳定，其使用零位法进行测量，匹配预调平衡箱后可以进行多点的测量。

3.4 振动测试系统

振动^[30-31]是自然界的一种普遍现象，除了少数振动可用来为人类服务外，

绝大多数振动现象为人们所厌恶。多年来，在长期生产实践和科学实验中已形成了一整套关于振动的基本理论，并指导和解决了许多实际问题。但是，在实践中所遇到的振动问题却远比理论上所设想的和阐述的要复杂得多。所以在观察、分析、研究动力系统产生振动的原因及其规律时，除了理论分析之外，直接进行测试始终是一个重要的必不可少的手段。目前，解决复杂结构振动问题，常采用测试与理论计算相结合的办法，以了解结构的动力特性或抗振能力。因此，振动测试在机械工程试验中占有相当重要的地位。

桥梁结构是承受恒载、车辆载荷、人群载荷等主要荷载的结构物。当车辆以一定速度在桥上通过时，由于发动机的抖动、桥面的不平顺等原因会导致桥梁结构产生振动。此外，人群荷载、风动力、地震力的作用也会引起桥梁振动。因此，车辆荷载或其他动力载荷对桥梁结构的冲击和振动影响，已成为桥梁结构设计、施工、运营、维修养护过程中的重要问题之一。桥梁振动试验^[21-22]即是利用某种激振方法激起桥梁结构的振动，测定桥梁结构的固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数、动力响应（加速度、动挠度）等参量的试验项目，从而宏观判断桥梁结构的整体刚度、运营性能。

对于振动信号的准确测量，需要合理地选用测试系统。选择传感器及配套仪器不能片面地追求高、精、尖、洋，不能片面地追求宽频带、高灵敏度、多功能等项指标，而应根据测试对象的振动幅值、振动信号的频率范围、安装条件、振动环境、设备情况及解决问题所需要的信号频带和幅值来选择选择合适的仪器及配套设备。否则，就会导致次要的频率成分淹没了最需要的、最关键的频率成分，从而得出错误的结果。

选择测振系统的基本依据^[6]是待测振动信号的特征。信号特征最重要的有三条：一是振动幅值及其分布；二是频率范围；三是振动信号的分布规律。从理论上讲，振动测试系统要能覆盖整个待测信号的幅值范围和频率范围。但实际上，工程中的振动信号幅值范围是非常大的，频带范围是非常宽的，这就要求整个测试系统在高幅值时不过载，而在低幅值时又有足够的灵敏度，使这种低幅信号不被淹没，能够进行处理分析。在测试系统中，不管是传感器、放大器还是记录仪器，动态范围和频响范围都是有限的。因此选择测振范围首先要满足所测信号特性的要求，即整套测试系统的动态范围、频率响应、测试灵敏度要满足要求。

3.4.1 结构的自振特性参数

测定桥梁的自振特性参数^[21-22]是桥梁振动试验的基本内容，要研究桥梁结构的抗震、抗风或抗其它动荷载的性能必须了解桥梁结构的自振特性。自振特性参数，也成为动力特性参数和振动模态参数，其内容主要包括结构的自振频率（自振周期）、阻尼比和振型等，它们都是由结构形式、建筑材料性能等结构所固有的特性决定的，与外载荷无关。

图 3.4 示意一根自由端作用一集中质量 m 的悬臂梁，假定只考虑 y 方向的自由度并不计梁重，以 $m\ddot{y}$ 表示惯性力，以 $C\dot{y}$ 表示阻尼力， Ky 表示弹簧力， $p(t)$ 表示外作用力。这是一个典型的单自由度振动体系，它的振动方程为

$$m\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = p(t) \quad (3-3)$$

如果 $p(t) = 0$ ，体系的自由振动方程的解为

$$y = A \exp(-\zeta \omega t) \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega t + \varphi) \quad (3-4)$$

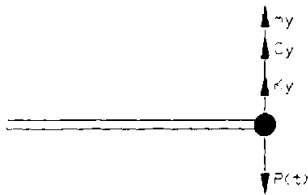


图 3.4 悬臂梁例

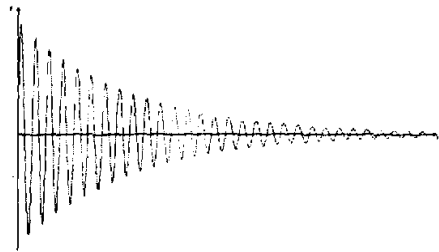


图 3.5 自由振动衰减曲线

把上式画成曲线如图 3.5。

通过图 3.4 和图 3.5，对一些自振特性参数进行讨论：

1、自振频率和自振周期

自振频率指单位时间内完成振动的次数，通常用 f 表示，单位为赫兹(Hz)；也可以用圆频率 ω ($\omega = 2\pi f$) 表示，单位为 1/秒 (1/s)。自振周期(T)物理上指物体振动波形重复出现的最小时间，单位为秒(s)，它和自振频率互为倒数关系。

对图悬臂梁：

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3-5)$$

这里 k 是悬臂梁结构的刚度， m 是梁端部的集中质量。

可见结构的自振频率只与结构的刚度和质量有关，并于刚度成正比，与质量成反比。对多自由度情况，以上关系同样存在。一般每个自由度都对应有一个自振频率，通常把多个频率按数值从小到大排列成一阶（也称作基本频率）、

二阶、r 阶频率。

2、阻尼

阻尼是存在于结构中的消耗结构振动能量的一种物理作用，它对结构抵抗振动是有利的。结构工程上假定阻尼属粘滞阻尼，与结构振动速度成正比并习惯以一个无量纲的系数 ζ （阻尼比）来表示阻尼的量值大小。

阻尼比 ζ 定义为阻尼系数 C 与临界阻尼 $C_c = 2m\omega$ ($\omega = 2\pi f$) 的比值，即

$$\zeta = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2m\omega} = \frac{C}{2\sqrt{mk}} \quad (3-6)$$

由图可知，阻尼比的大小决定了自由振动衰减的快慢程度，从结构抵抗振动的工程意义上说，总希望这种衰减作用能够对结构有利。在多自由度振动系统中，对应每一个频率都有一个阻尼比。阻尼比是一个试验值。

3、振型

桥梁结构的振型是结构相应于各阶固有频率的振动形式，一个振动系统的振型数目与其自由度数相等。桥梁结构是一个具有连续分布质量的体系，也是一个无限多自由度体系，因此其固有频率及相应的振型也有无限多个。但是，对于一般桥梁结构，第一阶固有频率（即基频），对结构动力分析才是重要的；对于复杂的动力分析问题，也仅需要前几阶固有频率，因而在实际测试中，一些低阶振型才有实际意义。

3.4.2 试验模态分析

模态分析^[32-47]是研究复杂结构振动的重要方法。它通过对激振力和响应的时域或频率分析，求得系统的频响函数（或传递函数），然后根据频响函数的特征，采用参数识别法求得结构的振动模态和结构参数。

试验模态分析法是建立在计算机、信号处理、测试技术和振动理论基础上的现代工程分析方法。在许多工程领域，尤其是航天、机械、造船和车辆等得到了广泛的应用。近年来，该方法在土木、桥梁等方面也开始得到了应用。

将桥梁结构划分为有限的离散质点，其运动微分方程可示为：

$$[m]\ddot{x} + [c]\dot{x} + [k]x = \{f(t)\} \quad (3-7)$$

式中： $[m]$ 、 $[c]$ 、 $[k]$ ——系统的质量、阻尼和刚度矩阵；

$\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$ ——系统的加速度、速度和位移列向量；

$\{f(t)\}$ ——系统的激励列向量。

对式 (3-7) 作拉氏变换，得系统传递函数

$$[H(s)] = \frac{\{X(s)\}}{\{F(s)\}} = \frac{1}{s^2[m] + s[c] + [k]} \quad (3-8)$$

式中：s——拉氏转换因子；

$X(s)$ ——x 的拉氏变换；

$F(s)$ —— $f(t)$ 的拉氏变换。

利用正则振型的正交性，在比例阻尼的情况下

$$\begin{aligned} [\varphi]^T [m] [\varphi] &= \text{diag}(M_r) \\ [\varphi]^T [k] [\varphi] &= \text{diag}(K_r) \\ [\varphi]^T [c] [\varphi] &= \text{diag}(C_r) \end{aligned} \quad (3-9)$$

式中： $[\varphi]$ ——系统振型向量；

$[\varphi]^T$ —— $[\varphi]$ 的转置矩阵；

(M_r) 、 (K_r) 、 (C_r) ——系统第 r 阶模态质量、模态刚度、模态阻尼。

解得

$$\begin{aligned} [m] &= [\varphi]^{-T} \text{diag}(M_r) [\varphi]^{-1} \\ [k] &= [\varphi]^{-T} \text{diag}(K_r) [\varphi]^{-1} \\ [c] &= [\varphi]^{-T} \text{diag}(C_r) [\varphi]^{-1} \end{aligned} \quad (3-10)$$

代入式(3-8)得

$$\begin{aligned} [H(s)] &= \frac{1}{[\varphi]^T \text{diag}(M_r s^2 + C_r s + K_r) [\varphi]^{-1}} = \frac{[\varphi][\varphi]^T}{\text{diag}(M_r s^2 + C_r s + K_r)} \\ &= \sum_{r=1}^n \frac{\{\varphi_r\} \{\varphi_r\}^T}{M_r s^2 + C_r s + K_r} \end{aligned} \quad (3-11)$$

将 $s = j\omega$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{K_r}{M_r}}$$

$$\zeta_r = \frac{C_r}{2M_r \omega_r}$$

代入上式得

$$[H(\omega)] = \sum_{r=1}^n \frac{\{\varphi_r\}^T \{\varphi_r\}}{M_r (-\omega^2 + \omega_r^2 + j2\zeta_r \omega \omega_r)} \quad (3-12)$$

式中： ω ——系统激振力频率；

ω_r ——系统第 r 阶模态频率；

ζ_r ——系统第 r 阶模态阻尼比；

$\{\varphi_r\}$ ——系统第 r 阶模态振型向量。

式(4-10)还可展开为

$$[H(\omega)] = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1j} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2j} & \cdots & H_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ H_{i1} & H_{i2} & \cdots & H_{ij} & \cdots & H_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nj} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

其中, $[H(\omega)]$ 的元素为

$$H_{ij} = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_{ir}\varphi_{jr}/M_r}{-\omega^2 + \omega_r^2 + j2\zeta_r\omega\omega_r} \quad (3-14)$$

$$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n。$$

因此, 若测出 $[H(\omega)]$, 即可求得模态参数。例如, 求系统的固有频率 ω_r 和阻尼比 ζ_r , 只要测的一个传递函数分量 H_{ij} 即可; 求振型 $\{\varphi_r\}$, 只要测的传递函数矩阵中的一行或一列即可。

试验模态分析主要是通过模态试验, 测量系统的振动响应信号。从测量到的信号中, 识别系统动力特征的有关参数。

3.4.3 振动测试系统的组成

本试验振动测试系统的组成框图如下:

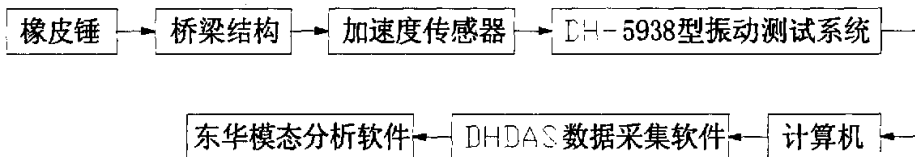


图 3.6 振动测试系统组成框图

1、压电式加速度传感器

压电式加速度传感器是利用某些晶体的压电效应, 将机械能转换成电能的传感器。它可以测量加速度, 这种信号经采用电子方法一次积分后可以提供速度信号, 两次积分后可以提供位移信号。

压电式加速度传感器其原理如图所示。压电元件和惯性块构成了一振动系统, 其固有频率很高, 大都在 $10 \sim 15\text{Hz}$ 以上。由机械惯性式加速度传感器的原理得知, 当被测频率远小于传感器的固有频率时, 惯性块的相对运动与被测

物体的振动加速度成正比，惯性质量产生的惯性力作用于压电元件上，产生压电效应，在元件的两极面产生电荷。

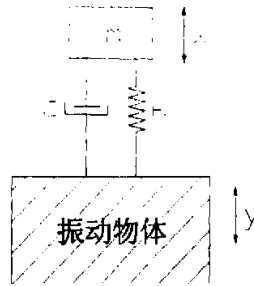


图 3.7 压电式加速度传感器原理图

按照图，压电式加速度传感器可以简化为一个单自由度的二阶系统，运动方程为

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + C\dot{x} + kx = 0 \quad (3-15)$$

式中： \ddot{x} 和 \ddot{y} ——分别为惯性块和振动物体的运动加速度；

m ——惯性块质量；

C ——阻尼系数。

假定被测物体作位移为 $Y = Y_0 \sin \omega t$ 的简谐振动，则相应的加速度 $\ddot{y} = -\omega^2 Y_0 \sin \omega t$ ，代入

$$m\ddot{y} + C\dot{y} + ky = -m\ddot{y} = m\omega^2 Y_0 \sin \omega t \quad (3-16)$$

传感器的固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3-17)$$

对于常见工程结构的振动，其固有频率多在几十赫兹以下，远小于压电式加速度传感器的固有频率，故有 $\omega_n \gg \omega$ （即频比 $\omega/\omega_n \ll 1$ ）时，由惯性式加速度传感器原理知

$$x = \ddot{y} / \omega_n^2 \quad (3-18)$$

则作用在压电元件上的弹性力 F 为

$$F = kx = \frac{\ddot{y}}{\omega_n^2} m \omega_n^2 = m\ddot{y} \quad (3-19)$$

也就是说，压电元件是在惯性块 m 的惯性力 F 作用下产生压电效应的，压电式晶体加速度传感器的压电效应与被测对象的加速度成正比，因此可用来测量结构振动的加速度反应。

2、DH-5938 振动测试系统

DH-5938 振动测试系统完成了压电式加速度传感器输出信号的调理、预处理和采样，并实时传送至计算机对信号储存和处理。它的系统框图如下所示：

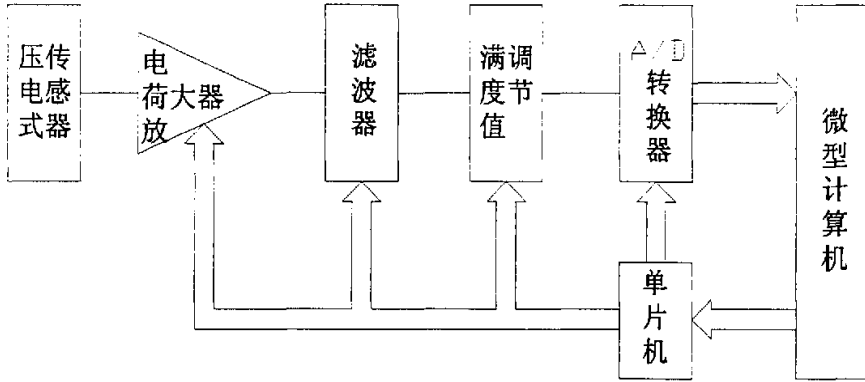


图 3.8 DH-5938 型振动测试系统

压电式加速度传感器的输出阻抗相当高，一般配电荷放大器。电荷放大器的输出电压和输入电荷成正比。它的核心——电荷转换级是一种特殊形式的运算放大器，如果把传感器的内阻抗计入，则可组成一个典型的运算放大器如图 4.7 所示：电容 C_i 是传感器的等效电容， C_f 是电荷转换级的反馈电容器。根据运算放大器的理论，开环增益和输入阻抗很高的放大器的输出电压 e_o 与输入电动势 e_i 的关系为：

$$e_o = -\frac{1/j\omega C_f}{1/j\omega C_i} e_i = -\frac{C_i}{C_f} e_i \quad (3-20)$$

图 3.9 中 Σ 点的电位几乎为零，是所谓虚地点，因此电容器 C_i 极板上的电荷 Q_i

$$Q_i = C_i e_i \quad (3-21)$$

将式 (3-20) 带入得

$$e_o = -\frac{1}{C_f} Q_i \quad (3-22)$$

即电荷转换级的输出电压正比于输入电荷，比例系数就是反馈电容的倒数。

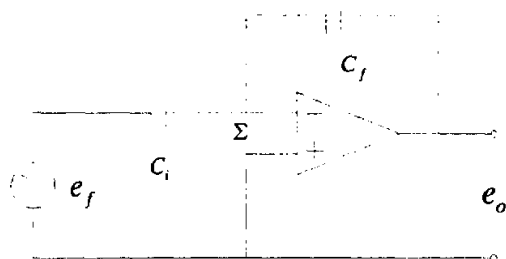


图 3.9 电荷放大器

通过调节电荷放大器的反馈电容改变输出灵敏度，从而可以实现满度值的设置。

滤波器可以使信号中有用的成分通过，滤去不需要的成分。由于桥梁结构的自振频率较低，本系统采用了阻带衰减为 -18dB/oct 的巴特沃斯型低通滤波器（如图 3.10 所示），可以有效滤除各种高频干扰和传感器谐振峰对测量信号的影响。

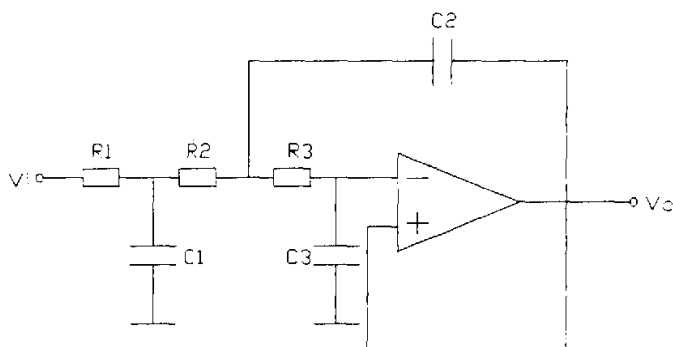


图 3.10 巴特沃斯型低通滤波器

A/D（模—数）转换是模拟信号经采样、量化并转化为二进制数的过程。由采样定理知，为了使采样过程不丢掉信息，采样频率 f_s 与原信号最大频率 f_m 之间必须满足如下关系

$$f_s \geq 2f_m \quad (3-23)$$

桥梁结构的自振频率多为几十赫兹，将采样频率设为 1000Hz ，即可保证能无失真地恢复原信号。

3、DHDAS 数据采集软件

DHDAS 数据采集软件是 DH-5938 振动测试系统的配套使用软件。它通过对振动测试系统的各个参数进行设置，可以得到各个测点的时间波形，并将采集

到的信号在电脑中显示和储存。

4、东华模态分析软件

东华模态分析软件可以针对各测点的时间历程的记录数据进行数字处理，通过模态分析，可以得到每个测点各阶模态的频率、阻尼，并演示振型效果图。

第四章 模型试验结果及分析

钢管混凝土桁式组合拱桥的模型试验共进行了四项：模拟施工试验；全桥静载试验；最大悬臂状态稳定性试验及振动试验，分别用到了拉力测试系统和振动测试系统。

4.1 模拟施工试验

4.1.1 试验目的及任务

模拟施工试验是模拟天子山大桥的施工过程装配桥梁模型，通过有关拉力、载荷、挠度的测量，探讨施工过程中，载荷、拉力对主拱圈上重要节点变形的影响。

4.1.2 试验方案

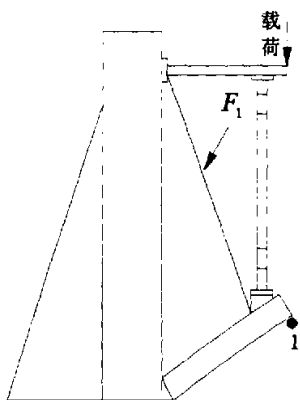


图 4.1.a 工况 1(第一节段装配完毕)

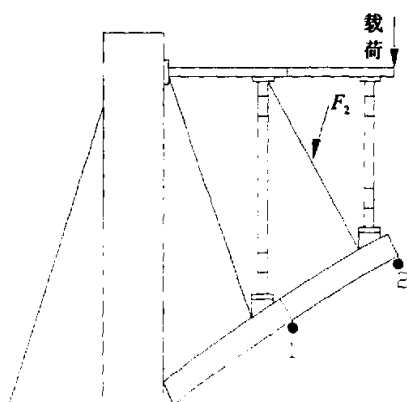


图 4.1.b 工况 2(第二节段装配完毕)

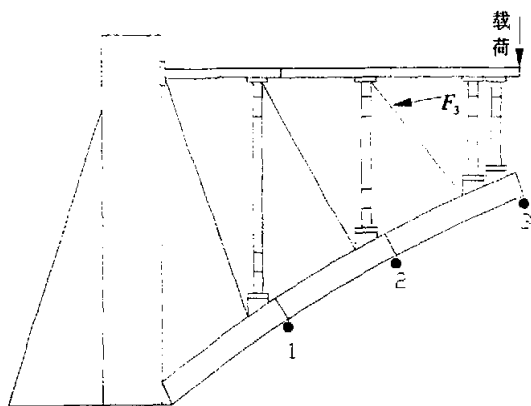


图 4.1.c 工况 3(第三节段装配完毕)

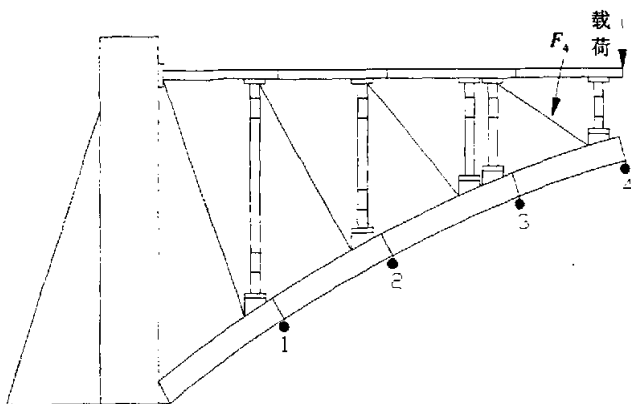


图 4.1.d 工况 4(第四节段装配完毕)

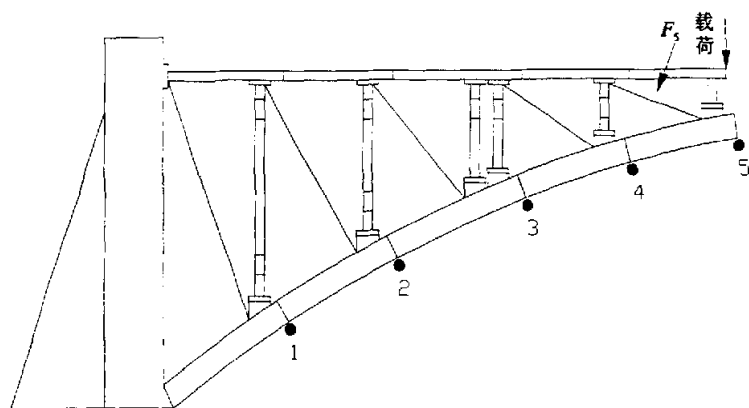


图 4.1.e 工况 5(第五节段装配完毕)

图中：“.”——挠度测点；

“↓”——加载位置；

F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 ——各个工况最后一根斜拉索的斜拉力，设计值分别为 100kg、200kg、175kg、200kg、150kg。

模拟施工试验采取了重物加载的方式，即将砝码通过自制的加载秤直接施加在桥面上。为了全面地掌握试验桥梁实测变形与荷载的相互关系，了解桥梁结构各个工况的工作性能，采用了三级加载的办法。根据现有试验条件及施工要求，三次所加的砝码分别为 57kg、79kg、109kg。

模拟施工试验的测试数据主要有：主拱圈的变形、锚固墙预应力筋的拉力、斜拉索的拉力。每个拱的相邻的两个节段的结合部位的下缘作为主拱圈变形的测点；锚固墙预应力筋的拉力和斜拉索的拉力通过和它们串联的拉力传感器进行测量和调节。

各种工况的挠度测点(图 4.1.a~4.1.e 中“•”)如下表所示：

表 4.1 各种工况的挠度测点

工况	1	2	3	4	5
测点	1	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5

主拱圈几何变形的测量仪器选择了百分表，直接在上面读数即可。预应力、斜拉力采用拉力测试系统来量测。

4.1.3 试验结果分析

表 4.2.a 工况 1 试验结果

斜拉力 F_1 (kg)	载荷 P (kg)	挠度 δ_{11} (mm)
50	0	-0.285
50	57	-0.365
50	79	-0.37
50	109	-0.43
100	0	0
100	57	-0.085
100	79	-0.125
100	109	-0.17
150	0	0.27
150	57	0.185
150	79	0.155
150	109	0.105

表 4.2.b 工况 2 试验结果

斜拉力 F_2 (kg)	载荷 P (kg)	挠度 δ_{12} (mm)	挠度 δ_{22} (mm)
100	0	-0.155	-0.415
100	57	-0.23	-0.545
100	79	-0.26	-0.605
100	109	-0.315	-0.7
200	0	0	0
200	57	-0.07	-0.125
200	79	-0.1	-0.19
200	109	-0.145	-0.27
300	0	0.165	0.41
300	57	0.085	0.265
300	79	0.05	0.21
300	109	0.005	0.125

表 4.2.c 工况 3 试验结果

斜拉力 F_3 (kg)	载荷 P (kg)	挠度 δ_{13} (mm)	挠度 δ_{23} (mm)	挠度 δ_{33} (mm)
100	0	-0.025	-0.1	-0.2
100	57	-0.055	-0.19	-0.34
100	79	-0.08	-0.24	-0.41
100	109	-0.115	-0.31	-0.51
175	0	0	0	0
175	57	-0.04	-0.09	-0.14
175	79	-0.075	-0.14	-0.21
175	109	-0.095	-0.21	-0.3
300	0	0.025	0.12	0.235
300	57	-0.015	0.015	0.085
300	79	-0.045	-0.045	0
300	109	-0.065	-0.1	-0.08

表 4.2.d 工况 4 试验结果

斜拉力 F_4 (kg)	载荷 P (kg)	挠度 δ_{14} (mm)	挠度 δ_{24} (mm)	挠度 δ_{34} (mm)	挠度 δ_{44} (mm)
100	0	0	-0.01	-0.055	-0.16
100	57	-0.02	-0.08	-0.185	-0.33
100	79	-0.03	-0.11	-0.25	-0.42
100	109	-0.05	-0.16	-0.32	-0.53
200	0	0	0	0	0
200	57	-0.015	-0.07	-0.13	-0.19
200	79	-0.02	-0.085	-0.175	-0.25
200	109	-0.04	-0.125	-0.25	-0.36
300	0	0	0.015	0.065	0.215
300	57	-0.015	0.09	-0.025	0.04
300	79	-0.02	0.07	-0.11	-0.03
300	109	-0.045	0.01	-0.195	-0.165

表 4.2.e 工况 5 试验结果

斜拉力 F_5 (kg)	载荷 P (kg)	挠度 δ_{15} (mm)	挠度 δ_{25} (mm)	挠度 δ_{35} (mm)	挠度 δ_{45} (mm)	挠度 δ_{55} (mm)
100	0	0	0	-0.005	-0.04	-0.18
100	57	0	-0.04	-0.12	-0.24	-0.51
100	79	-0.01	-0.05	-0.145	-0.3	-0.61
100	109	-0.02	-0.075	-0.205	-0.42	-0.8
150	0	0	0	0	0	0
150	57	-0.01	-0.03	-0.1	-0.175	-0.33
150	79	-0.01	-0.04	-0.13	-0.24	-0.395
150	109	-0.01	-0.05	-0.185	-0.295	-0.54
200	0	0	0	0.01	0.045	0.235
200	57	-0.01	-0.035	-0.09	-0.14	-0.065
200	79	-0.01	-0.04	-0.12	-0.19	-0.165
200	109	-0.01	-0.045	-0.15	-0.265	-0.3

模拟施工试验的试验结果列于表 4.2

表中： F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 ——各个工况最后一根斜拉索的斜拉力；

δ_{ij} ——测点 i 在第 j 个工况下的挠度(“+”表升高；“-”表下降)，各种工况的“0”点为预应力(设计值为 100kg)、斜拉力都调至设计状态后，载荷为 0 的状态。

4.1.3.1 载荷——挠度关系

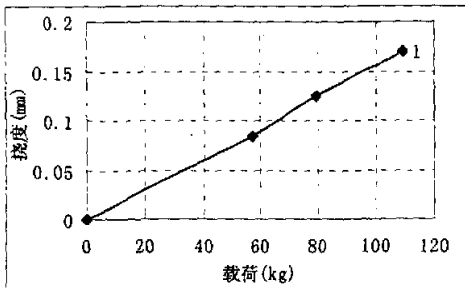


图 4.2.a 工况 1

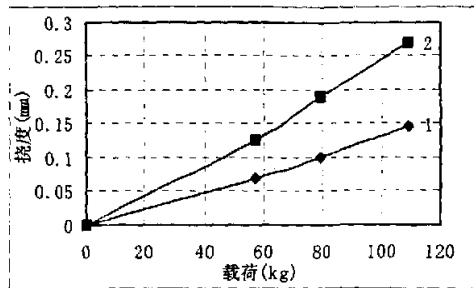


图 4.2.b 工况 2

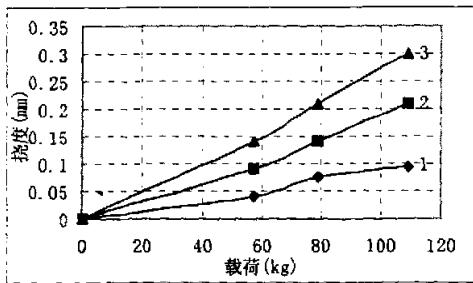


图 4.2.c 工况 3

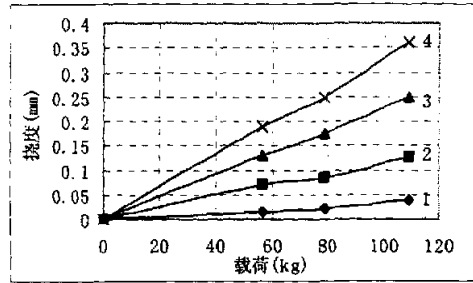


图 4.2.d 工况 4

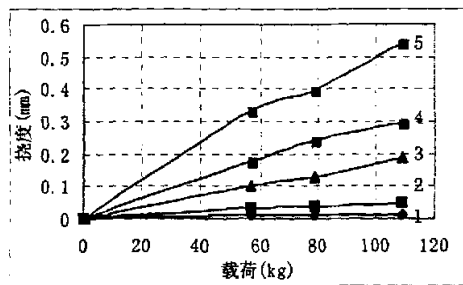


图 4.2.e 工况 5

图 4.2 载荷——挠度曲线

各个工况下，将预应力、斜拉力调至施工时的设计值，得到的载荷——挠度曲线如图 4.2 所示，从中可以看出：①. 载荷与挠度之间基本上为线性关系，这说明结构处于弹性工作状态，其工作性质是稳定的；②. 随着施工阶段悬臂

的伸长，结构端点的挠度逐渐增大。

4.1.3.2 斜拉力——挠度关系

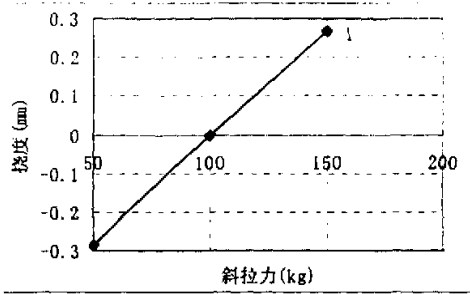


图 4.3.a 工况 1

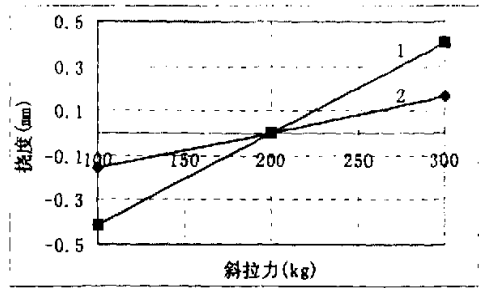


图 4.3.b 工况 2

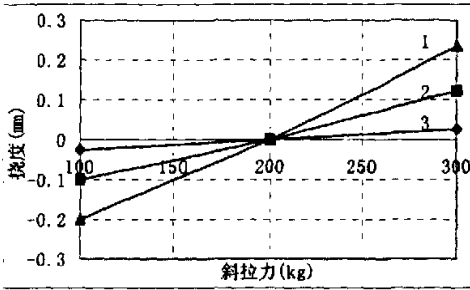


图 4.3.c 工况 3

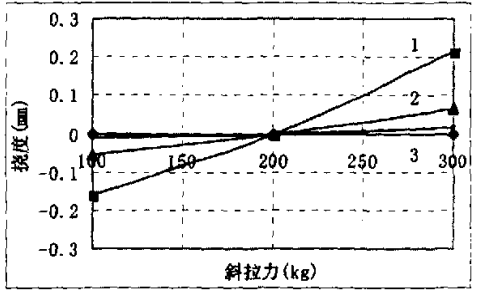


图 4.3.d 工况 4

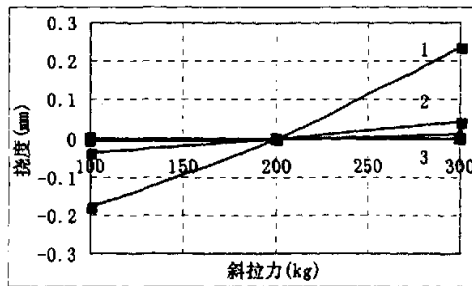


图 4.3.e 工况 5

图 4.3 斜拉力——挠度曲线

各种工况下，将预应力调至设计状态，不加载荷，改变斜拉力的大小，得到斜拉力——挠度曲线如图 4.3 所示所示，从中可以看出：①.斜拉力与挠度之间基本上为线性关系，结构处于弹性工作状态，工作性质稳定。②.以各个工况斜拉力的设计值为 0 点，当调定值大于设计值时，挠度为正，当调定值小于设计值时，挠度为负。这表明：调节斜拉力的大小，可以改变节点的位置，

因此可为施工过程中主拱圈拱形的控制提供有效的途径。

4.1.3.3 影响主孔圈几何变形的因素的分析

当预应力大小确定后,影响主拱圈几何变形的因素有两个:外载荷及斜拉索的斜拉力。从前面的分析可知,载荷与挠度之间、斜拉力与挠度之间基本上为线性关系,下面用线性回归^[48]的方法来分析两者对挠度的影响大小。

测点 1 在工况 1 下的挠度 δ_{11} 与两个因素有关:斜拉力 F_1 、载荷 P ,由此列出线性方程为:

$$\delta_{11} = aF_1 + bP + c \quad (4-1)$$

$$\text{令 } \bar{F} = \frac{1}{n} \sum F_i; \quad \bar{P} = \frac{1}{n} \sum P_i; \quad \bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum \delta_i;$$

$$S_{11} = \sum (F_i - \bar{F})^2; \quad S_{22} = \sum (P_i - \bar{P})^2; \quad S_{\delta\delta} = \sum (\delta_i - \bar{\delta})^2;$$

$$S_{12} = S_{21} = \sum (F_i - \bar{F})(P_i - \bar{P});$$

$$S_{1\delta} = \sum (F_i - \bar{F})(\delta_i - \bar{\delta}); \quad S_{2\delta} = \sum (P_i - \bar{P})(\delta_i - \bar{\delta}) \quad (4-2)$$

$$\text{则 } a = \frac{S_{1\delta}S_{22} - S_{2\delta}S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} = 0.005413;$$

$$b = \frac{S_{2\delta}S_{11} - S_{1\delta}S_{21}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} = -0.00145;$$

$$c = \bar{\delta} - a\bar{F} - b\bar{P} = -0.54555. \quad (4-3)$$

则回归方程为

$$\delta_{11} = 0.005413F_1 - 0.00145P - 0.54555 \quad (4-4)$$

其相关系数

$$R = \sqrt{\frac{U}{S_{\delta\delta}}} = 0.999442 \quad (4-5)$$

式中: U ——回归平方和: $U = aS_{1\delta} + bS_{2\delta}$;

R 值很接近于 1,说明所得回归方程很合理。

回归方程的精度用剩余标准差 s 来表示:

$$s = \sqrt{\frac{Q}{n-m-1}} = 0.008814 \quad (4-6)$$

式中: $Q = S_{ms} - U$;

s 的值很小, 说明回归方程预报 δ_{ij} 的值很精确。

在式中, 系数 a 、 b 反映了 F_1 、 P 对 δ_{ij} 的影响系数, $|a| > |b|$ 说明斜拉力的影响明显些。下表列出了各个工况 δ_{ij} 的影响因素:

表 4.3 回归分析表

工况	挠度	斜拉力系数	载荷系数	常数项	R	s
1	δ_{11}	$0.005413 F_1$	$-0.00145 P$	-0.54555	0.999442	0.008814
2	δ_{12}	$0.001581 F_2$	$-0.00141 P$	-0.31071	0.999498	0.005156
	δ_{22}	$0.004094 F_2$	$-0.00255 P$	-0.81585	0.9997	0.009879
3	δ_{13}	$0.000219 F_3$	$-0.00085 P$	-0.3869	0.988166	0.00688
	δ_{23}	$0.001019 F_3$	$-0.00195 P$	-0.1834	0.993551	0.015098
	δ_{33}	$0.00209 F_3$	$-0.00283 P$	-0.38326	0.9944	0.025278
4	δ_{14}	$0.000025 F_4$	$-0.00039 P$	-0.00227	0.9562606	0.005567
	δ_{24}	$0.000681 F_4$	$-0.00081 P$	-0.12476	0.853487	0.045304
	δ_{34}	$0.000681 F_4$	$-0.00237 P$	-0.12712	0.994318	0.013546
	δ_{44}	$0.001875 F_4$	$-0.00336 P$	-0.35095	0.996715	0.019089
5	δ_{15}	$-1.1E-19 F_5$	$-0.00012 P$	$6.23E-05$	0.827572	0.003858
	δ_{25}	$0.000112 F_5$	$-0.00052 P$	-0.01862	0.962191	0.006978
	δ_{35}	$0.000312 F_5$	$-0.00166 P$	-0.04825	0.993654	0.008838
	δ_{45}	$0.001125 F_5$	$-0.00302 P$	-0.17199	0.991366	0.019701
	δ_{55}	$0.004512 F_5$	$-0.00516 P$	-0.66559	0.997234	0.023782

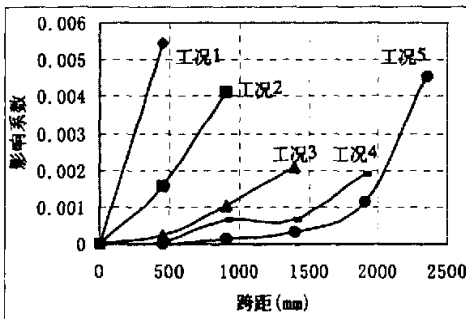


图 4.4 斜拉力对挠度影响曲线

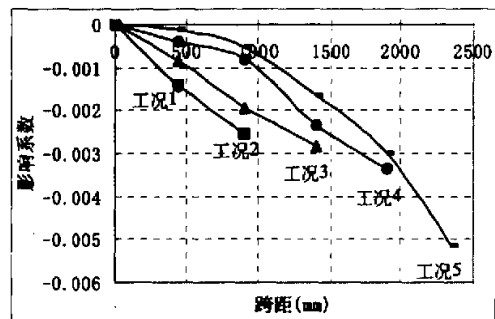


图 4.5 载荷对挠度影响曲线

从图、表中可以看出:

- (1). 工况 1、2 中, $|a| > |b|$; 工况 3、4、5 中, $|a| < |b|$ 。即悬臂较小时, 斜

拉力对挠度的影响大些，悬臂增加后，外载对挠度的影响较为显著。

(2). 斜拉力的影响系数为正，说明斜拉力增大，节点位置上升；载荷的影响系数为负，说明载荷增加，节点下沉。

(3). 在各种工况下，斜拉力和载荷对节点挠度的影响随跨距的增加而增大，逐步由线性关系转变为非线性关系。

(4). 利用式(4-1)和表 4.3，可以方便的求得在各个施工阶段，不同的斜拉力和载荷下节点的挠度，因此可以作为桥梁施工控制的有益参考。

(5). 通过调整斜拉索的张力，可以在施工过程中，小量地调节桥拱的标高，这是该种新桥型的一个最突出的优点。

4.2 全桥静载试验

4.2.1 试验任务及目的

(1). 桥梁结构控制截面最大应力及其随荷载的变化规律。因此，要将主拱圈上重要位置的应力作为观测内容。

(2). 桥梁结构在各级试验荷载作用下的最大竖向挠度以及挠度沿跨径分布曲线。因此，要将主拱圈上重要位置的挠度作为观测内容。

4.2.2 试验方案

为了达到最大的荷载效率，理论上应该是对于每一种测量项目都要在最不利位置加标准载荷，这样就使得加在工况太多而试验时间太长。为缩短试验时间要对加载工况进行适当合并，结果优化成以下几种加载工况(如下图 4.6 所示)：

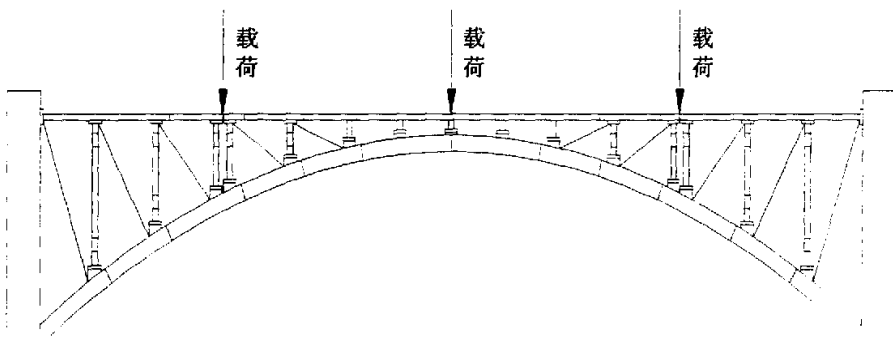


图 4.6 全桥静载试验加载位置

①. 工况 6: 中间位置加载;

②. 工况 7: 左侧断缝处加载;

③. 工况 8: 右侧断缝处加载。

全桥静载试验采取了重物加载的方式, 将砝码直接施加在桥面上。每个位置也采取了三级加载的方式, 三次所加的砝码分别为 150kg、200kg、300kg。

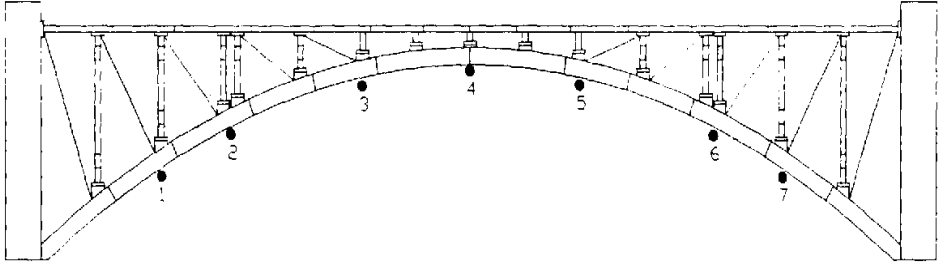


图 4.7 全桥静载试验挠度测点布置示意图

单个拱挠度测点共布置 7 个 (两个拱是 14 个), 如图 4.7 所示, 全部采用百分表进行测试。单个拱应变测量设置 3 个截面: 中间截面、左右两侧断缝正下方的拱截面, 布置 4 个测点, 如图 4.8 所示。

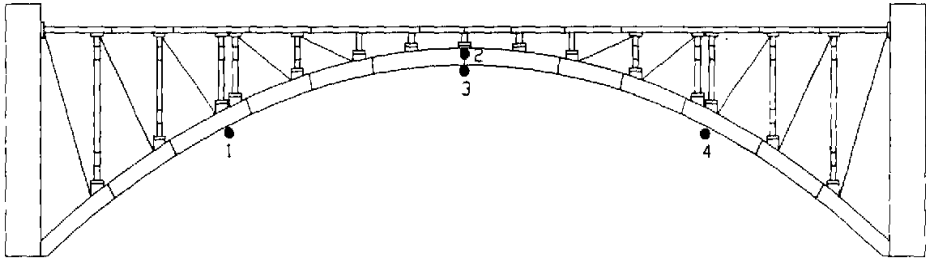


图 4.8 全桥静载试验应变测点布置示意图

全桥静载试验照片如图 4.9 所示

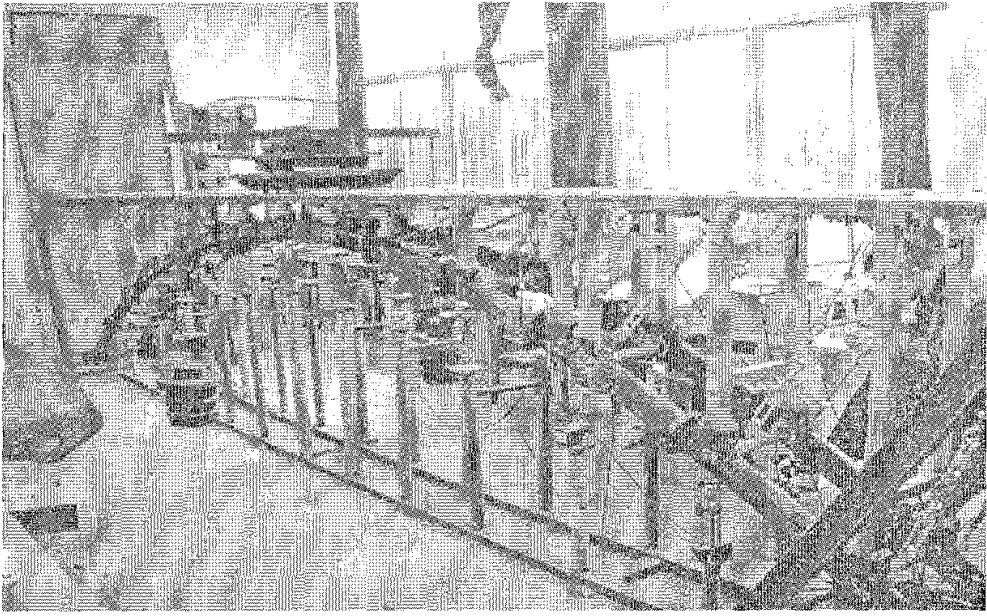


图 4.9 全桥静载试验照片

4.2.3 试验结果分析

4.2.3.1 载荷——挠度关系

各个工况的静载试验数据列于下表：

表 4.4 静载试验挠度数据表

工况	载荷 (kg)	测点挠度 (mm)						
		1	2	3	4	5	6	7
6	150	-0.005	-0.175	-0.44	-0.54	-0.275	0	0.025
	200	0.02	-0.19	-0.525	-0.68	-0.34	0.01	0.04
	300	0.015	-0.195	-0.665	-0.91	-0.445	0.035	0.06
7	150	-0.245	-0.375	-0.36	-0.28	-0.18	-0.1	-0.04
	200	-0.305	-0.465	-0.415	-0.315	-0.175	-0.085	-0.015
	300	-0.455	-0.67	-0.56	-0.36	-0.18	-0.07	-0.01
8	150	0.005	-0.02	-0.04	-0.11	-0.22	-0.295	-0.195
	200	-0.01	-0.015	-0.03	-0.11	-0.25	-0.355	-0.245
	300	-0.005	-0.005	-0.015	-0.12	-0.33	-0.52	-0.375

由此得各个工况挠度沿跨径分布曲线如图 4.10 所示。

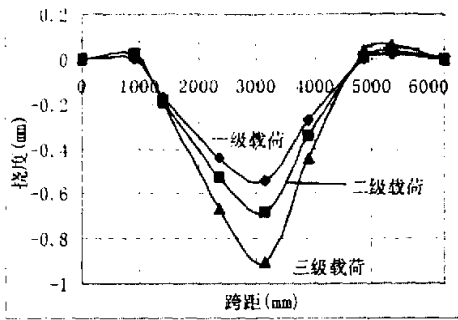


图 4.10.a 工况 6

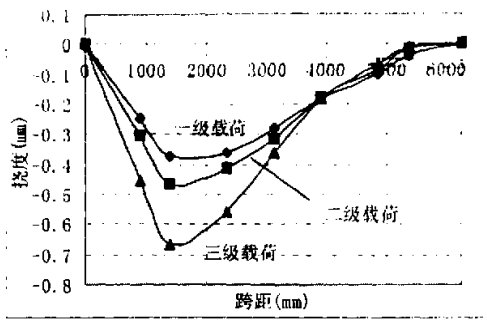


图 4.10.b 工况 7

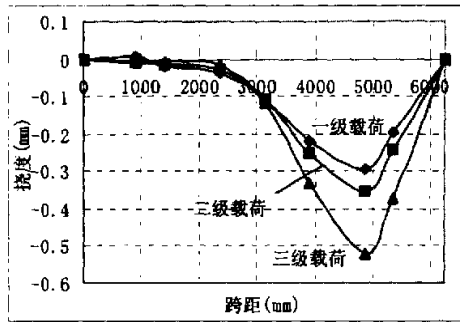


图 4.10.c 工况 8

图 4.10 挠度沿跨径分布曲线

从中可以看出：

(1). 中间位置加载时，拱的中间位置下沉，两端稍微有点翘起，因此两侧各有一点挠度为 0，大致位于断缝处。

(2). 由于所作模型不可能完全对称，因此左右两侧的挠度也不可能完全相等，但相差很小。

(3). 在各级荷载作用下，各测点的变形均在允许的安全范围之内，整个结构的静载特性满足要求。

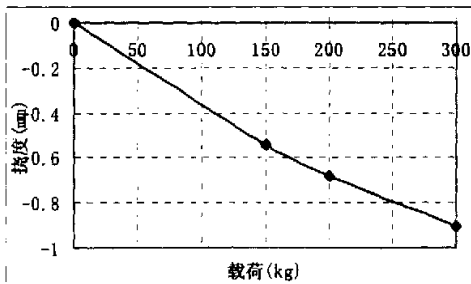


图 4.11.a 工况 6(测点 4)

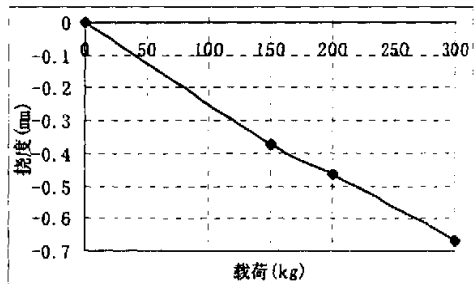


图 4.11.b 工况 7(测点 2)

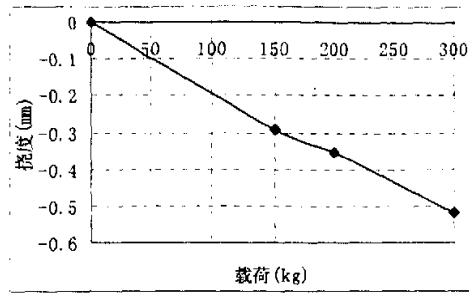


图 4.11.c 工况 8(测点 6)

图 4.11 挠度——载荷曲线

工况 6、7、8 中，测点 4、2、6 分别为变形最大的点，它们在最不利加载位置的挠度——载荷曲线如下图 4.11 所示。

由图 4.11 可知：在各个工况下，变形最大的点的挠度和载荷之间基本上为线性关系，结构处于弹性工作状态，变形满足设计要求，工作性质稳定。

4.2.3.2 应变分析

各个工况下各测点的应变列于下表：

表 4.5 静载试验应变数据表

工况	载荷 (kg)	测点应变			
		1	2	3	4
VI	150	-4	-49.5	28.5	-14.5
	200	-7	-58	41	-17.5
	300	-14	-76.5	57	-25
VII	150	21	-23.5	-2	-4
	200	28.5	-20.5	-3.5	0.5
	300	42	-19	-5	0
VIII	150	4	-18	-6	14
	200	6.5	-17.5	-8	18
	300	5.5	-14.5	-12	27.5

由此可以得到各个工况各测点应变随载荷的变化如下图所示：

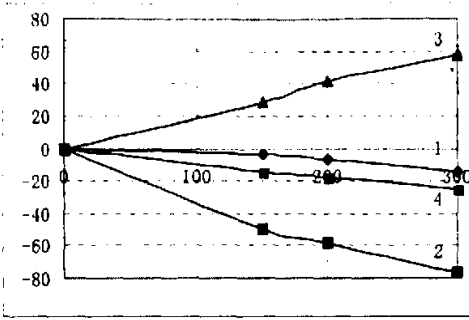


图 4.12. a 工况 6

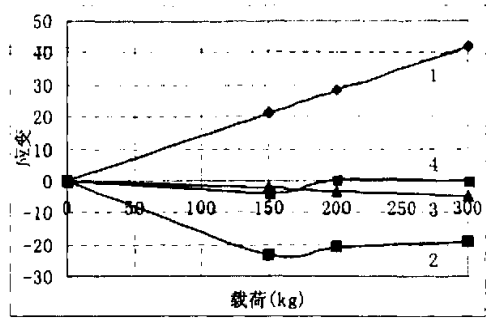


图 4.12. b 工况 7

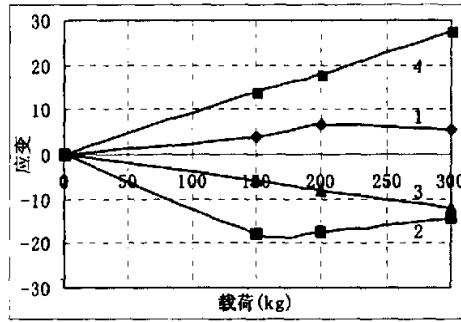


图 4.12. c 工况 8

从图中可以看出：①. 在各个工况下，应变最大的点的应变和载荷之间基本上为线性关系，结构处于弹性工作状态，工作性质稳定。②. 测点 2、3 分别位于拱顶截面的上缘、下缘，中间位置加载时，其应变大小相等、方向相反。③. 由于所作模型不可能完全对称，在左右两侧断缝处加载时，测点 1、4 的应变有些差异，但相差不大。

各个工况主拱圈下缘的应变沿拱轴线分布曲线(以测点 1、3、4 的应变为节点连线)如下图 4.13 所示。在图中，分别标出了各种工况下，下缘应变为 0 的点的位置。

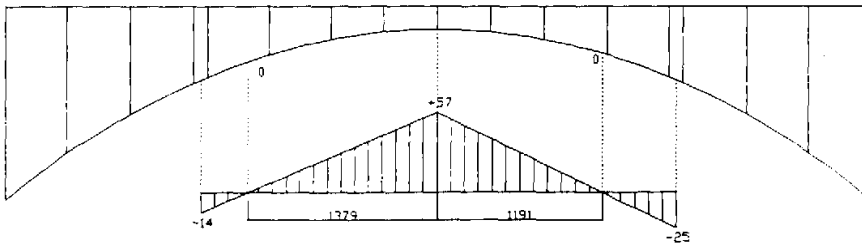


图 4.13. a 中间位置加载

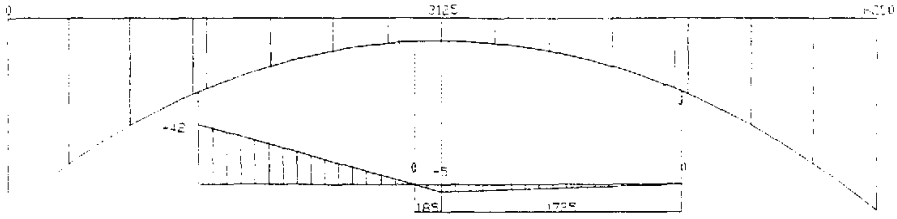


图 4.13.b 左侧断缝加载

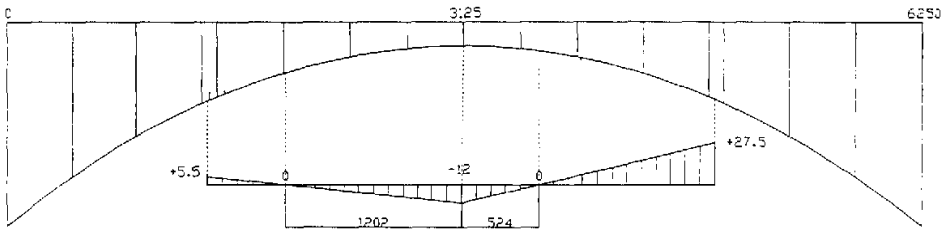


图 4.13.c 右侧断缝加载

图 4.13 各个工况应变分布曲线

4.3 最大悬臂状态稳定性试验

4.3.1 试验目的及任务

(1). 在最大悬臂状态(图 4.14), 分别在竖直方向和侧向加载, 判断结构的刚度是否满足设计要求;

(2). 分别采取两片、三片桁片, 装配一跨径为二倍于天子山大桥的半跨模型, 进行稳定性的比较试验。

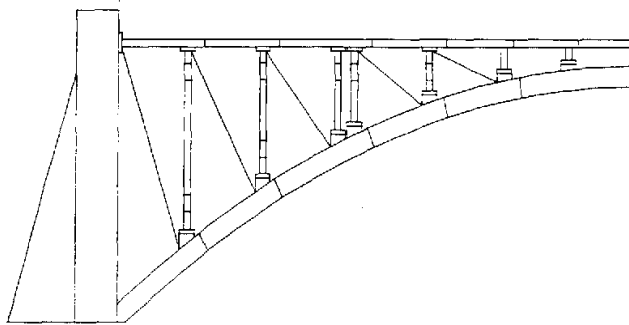


图 4.14 最大悬臂状态

最大悬臂状态稳定性试验的照片如下图所示

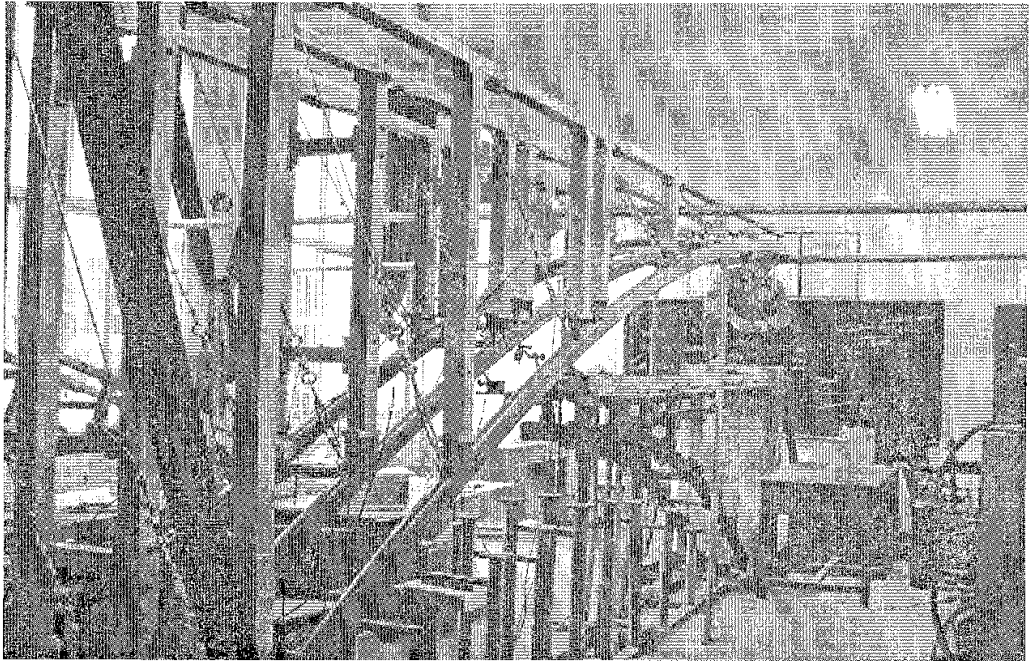
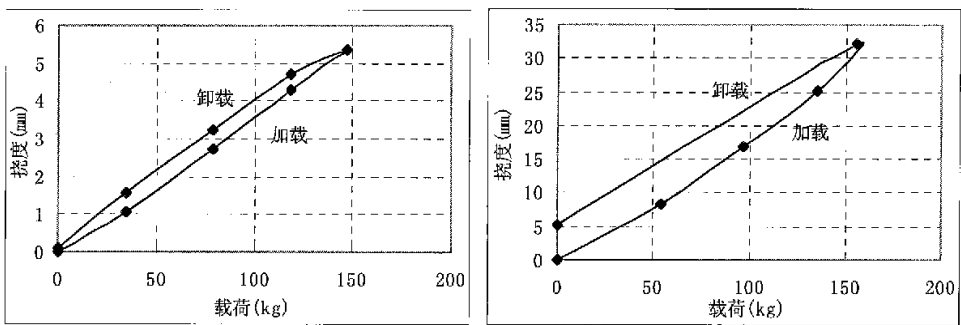


图 4.15 最大悬臂状态稳定性试验照片

4.3.2 试验结果分析

4.3.2.1 最大悬臂状态稳定性分析

在最大悬臂状态，竖直方向和侧向加载得到的挠度——载荷曲线如下图所示：



a 竖向

b 侧向

图 4.16 最大悬臂状态稳定性

从图中可以看出：

- (1). 结构的竖向刚度远优于其侧向刚度。
- (2). 卸载过程与加载过程相比，都多了残余变形，这是由于模型制作安装

过程中的间隙造成的，

(3). 在设计载荷状态，结构仍处于稳定状态，变形满足设计要求。

4.3.2.2 稳定性比较分析

采取两片、三片桁片，装配一跨径为二倍于天子山大桥的半跨模型，分别在竖直方向和侧向加载，得到的变化曲线如下图所示：

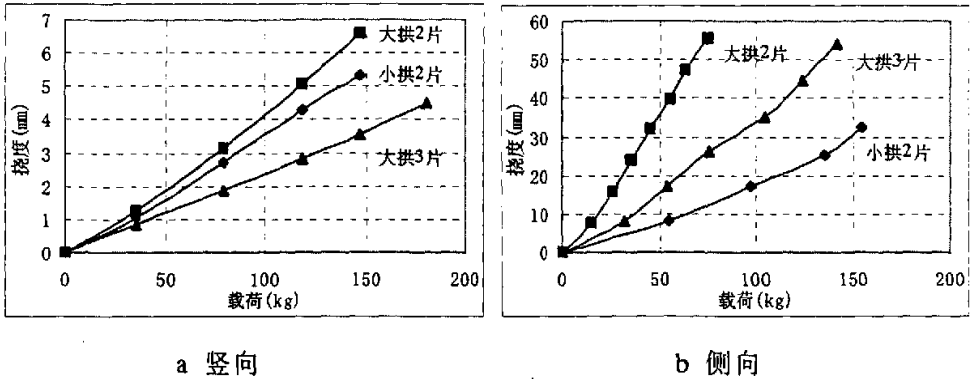


图 4.17 最大悬臂状态稳定性的比较

三种工况的柔度比较如下表所示：

拱型	竖向柔度(mm/kg)	侧向柔度(mm/kg)
小拱二片	0.0369	0.204
大拱二片	0.0448	0.768
大拱三片	0.0247	0.381

从图、表中可以看出：

(1). 跨距增大一倍后，结构竖向刚度稍微有所减小，侧向刚度变化较大，仅有原来的一半。

(2). 当大拱桁片由两片增加为三片后，其竖向和侧向刚度均增加至原来的两倍。因此，增加桁片数目是提高结构刚度的有效途径。

4.4 振动试验

4.4.1 试验目的及任务

模型振动试验通过试验模态分析的方法，测得竖直、水平两个方向桥梁的自振特性参数：自振频率、阻尼、振型。从而完善计算力学模型，并对钢管混凝土桁式组合拱桥的整体刚度、抗震、抗风性能和能力作出准确而科学的评价。

4.4.2 模态参数的相似关系

由式(4-12)可知,对于模型桥与实桥相同的测点,某阶振型元素 φ_{jr} 与传递函数 H'_{ij} 有如下关系:(下标 m 为模型;下标 p 为原型)

$$(\varphi_{jr})_m \propto (H'_{ij})_m \quad (\varphi_{jr})_p \propto (H'_{ij})_p \quad (4-7)$$

所以

$$\frac{(\varphi_{jr})_m}{(\varphi_{jr})_p} = \frac{(H'_{ij})_m}{(H'_{ij})_p} \quad (4-8)$$

由本文第二章中的动力相似准则 π_2 、 π_3 、 π_5 可得到如下相似关系:

$$\frac{(H'_{ij})_m}{(H'_{ij})_p} = \frac{1}{\lambda_l \lambda_g} = 10 \quad (4-9)$$

因此, $\{\varphi_r\}_m$ 与 $\{\varphi_r\}_p$ 仅差一常数比值。由于模态振型为各点的振幅之比,所以,如果模型桥和实桥振型各自都对同一位置的元素作归一化处理,则有:

$$\{\varphi_r\}_m = \{\varphi_r\}_p \quad (4-10)$$

上式表明,模型桥与实桥的同阶振型相同。

从本文第二章动力相似分析中,可以得到模型与原型频率相似比 λ_f

$$\lambda_f = \lambda_\omega = \frac{1}{\lambda_l} \sqrt{\frac{\lambda_g}{\lambda_p}} = 4.47 \quad (4-11)$$

4.4.3 振动试验方案

由于在做模态试验时,只需要测得传递函数的一行或一列就可以获得全部模态信息,因此,就有两种试验方法:①. 固定在一处测量振动响应信号,而不断改变激励信号的作用点,这样就测量出了传递函数的一行。②. 固定在一处进行激励,而在不同点进行振动响应信号测量,即不断改变振动响应信号的测试点,这样就测量出了传递函数的一列。本试验采取的是第二种方法。

图 4.18 即为桥梁结构的简化结构与测点布置示意图,共布置了 68 个测点。做竖直方向的振动试验时,输入测点(锤击点)位于测点 63、66 的中间,每个测点都是输出测点(响应点);做水平方向的振动试验时,输入测点(锤击点)位于测点 63、12 的中间,每个测点都是输出测点(响应点)。

因受传感器和数据采集仪器通道数的限制，要分几次搬动传感器位置，选择测点 12 为参考测点，以后分析时各点的幅值和相位都将与参考点发生关系。

本试验采用了脉冲锤击激振法：用橡皮锤对桥梁模型进行敲击，产生一宽频带的激励，它能在很宽频率范围内激励出各种模态。

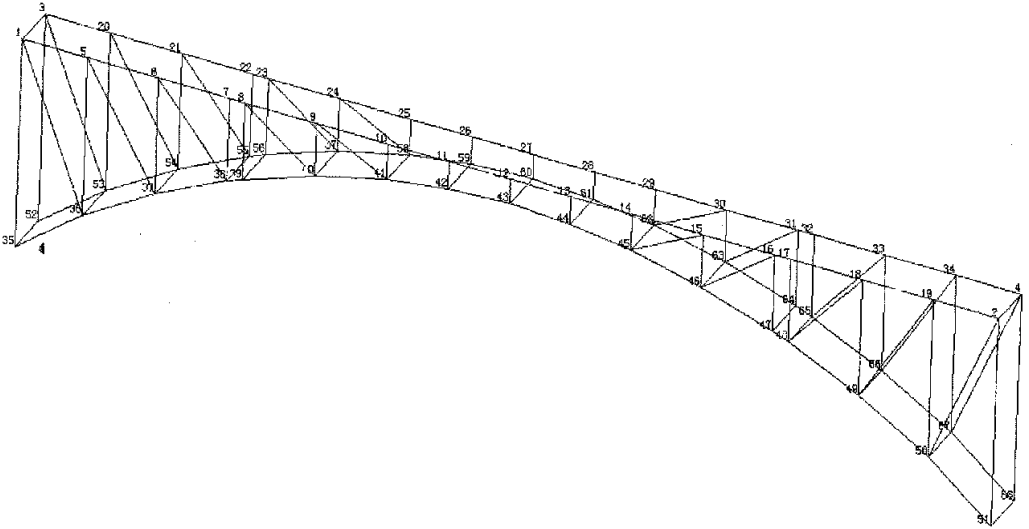


图 4.18 简化的模态结构及测点布置

振动试验的照片如下图所示



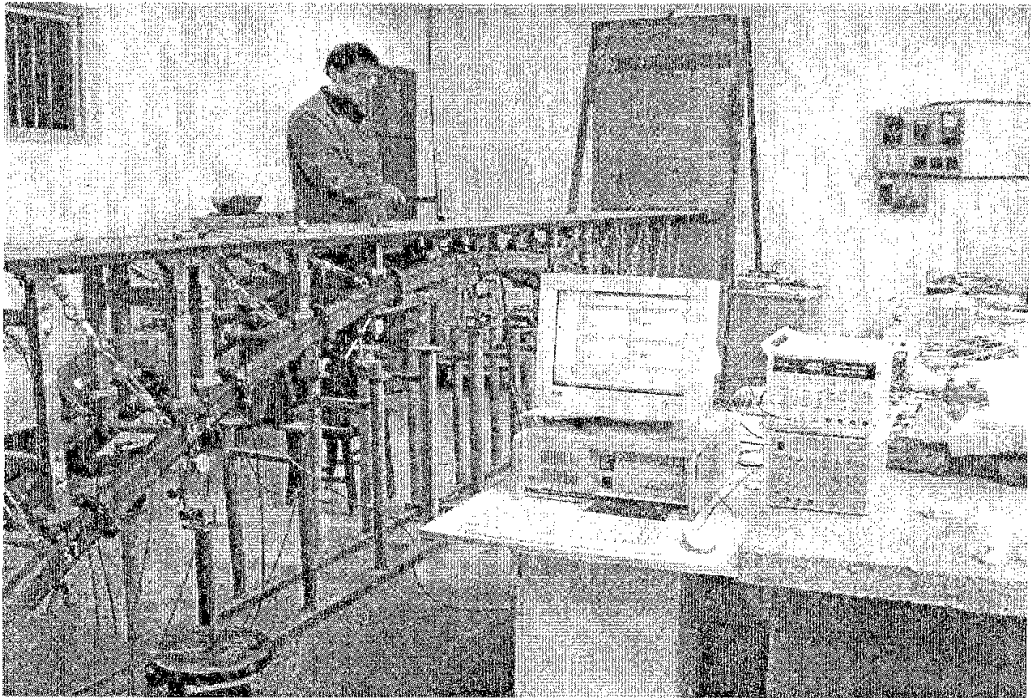


图 4.19 振动试验照片

4.4.4 振动试验数据分析

4.4.4.1 横向模态分析

通过试验模态分析方法,得到成桥状态下桥梁模型水平方向的前三阶模态参数如表 4.6 所示,振型效果(实际结果都是以动画显示的,这里只是某时刻的状态图)如图 4.20.a~4.20.c 所示。

表 4.6 模型水平方向模态参数

模态	频率(Hz)	阻尼比(%)	振型
1	16.36	5.31	图4.8.a
2	26.12	1.01	图4.8.b
3	48.58	3.07	图4.8.c

由动力相似关系,可得实桥水平方向的前三阶模态参数如表 4.7 所示

表 4.7 实桥水平方向模态参数

模态	频率(Hz)	阻尼比(%)	振型
1	3.66	5.31	图4.8.a
2	5.84	1.01	图4.8.b
3	10.87	3.07	图4.8.c

其中,工程上最关注的第一阶固有频率为 $f_1 = 3.66$, 阻尼比 $\zeta_1 = 0.0531$, 两者均在正常范围之内。

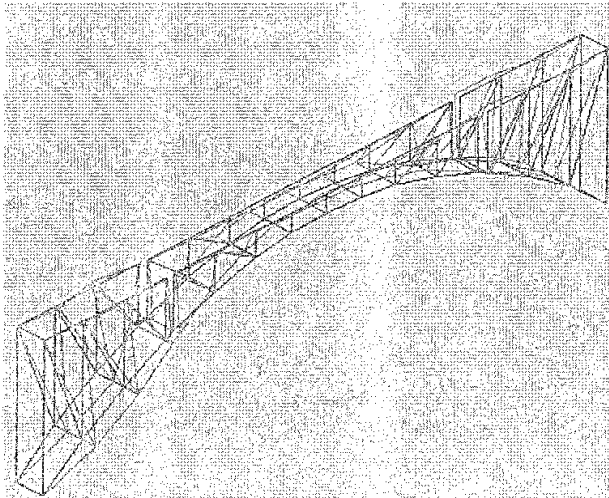
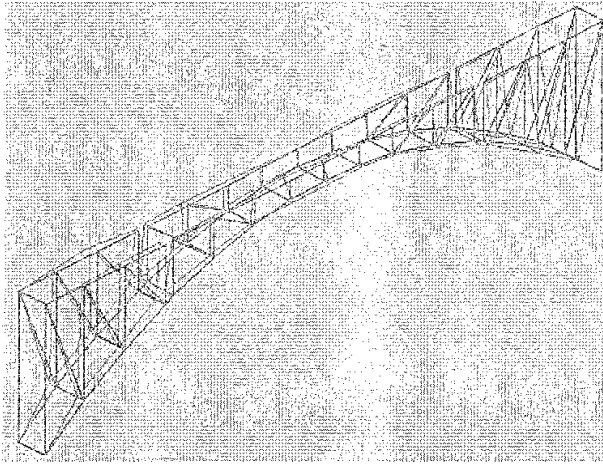
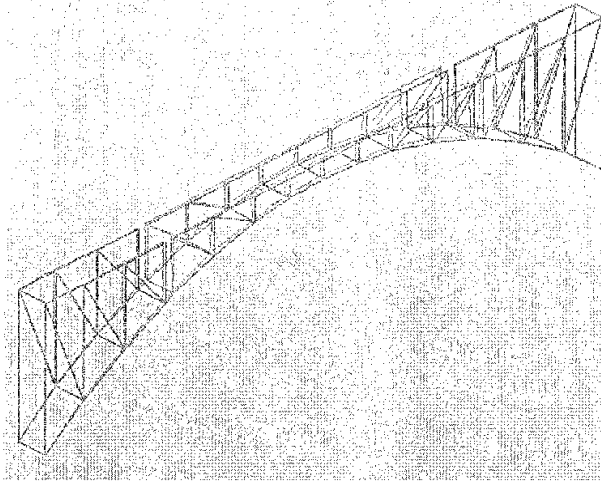


图 4.20. a~4.20. c 水平方向前 3 个模态振型

从图 4.20. a~4.20. c 中可以看出：

- (1). 模态 1 没有节点，结构的振型为左右基本对称的一阶横向弯曲振动；
- (2). 模态 2 有 1 个节点，大致位于结构的中心。结构的振型为反对称二阶横向弯曲振动；
- (3). 模态 3 有 2 个节点，大致位于左右两端的断缝处，结构振型为三阶横向弯曲振动。

4.4.4.2 竖向模态分析

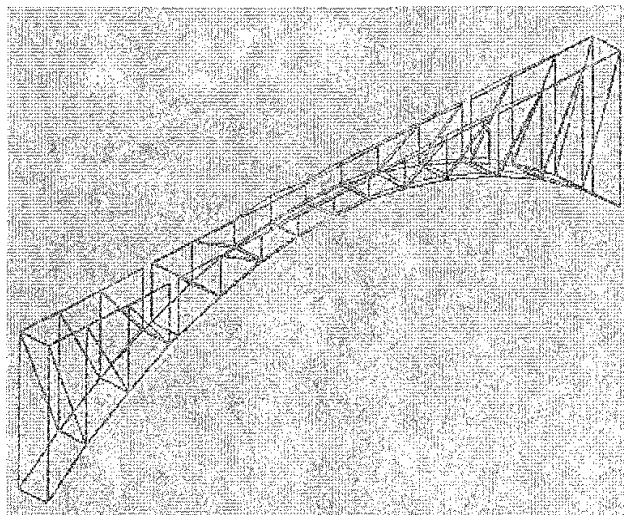
成桥状态下桥梁模型竖直方向的前四个模态的参数如表 4.8 所示，振型如图 4.21. a~4.2118. d 所示。

表 4.8 模型竖直方向模态参数

模态	频率(Hz)	阻尼比(%)	振型
1	17.82	6.46	图4.9.a
2	31.01	7.91	图4.9.b
3	36.38	0.77	图4.9.c
4	73.24	3.62	图4.9.d

从图 4.21. a~4.21. d 中可以看出：

- (1). 模态 1、2 各有 1 个节点，分别位于结构中心偏左、偏右的位置；结构的振型为反对称二阶竖向弯曲振动；
- (2). 模态 3 有 2 个节点，节点对称位于中心两侧，结构振型为对称三阶竖向弯曲振动；
- (3). 模态 4 有 4 个节点，对称分布于两侧，结构振型为对称五阶竖向弯曲五阶振动。



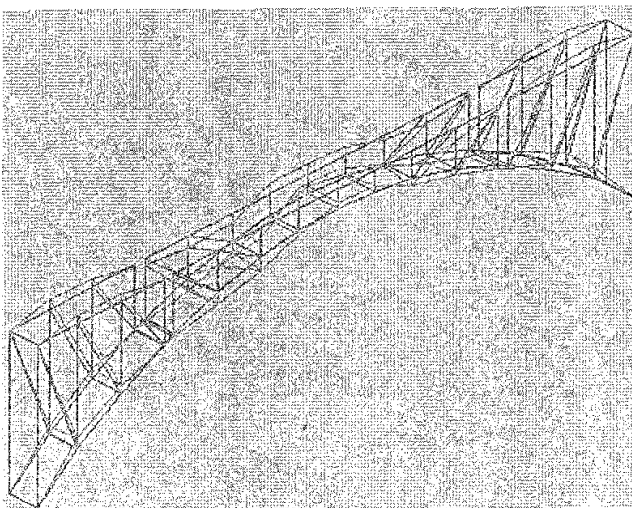
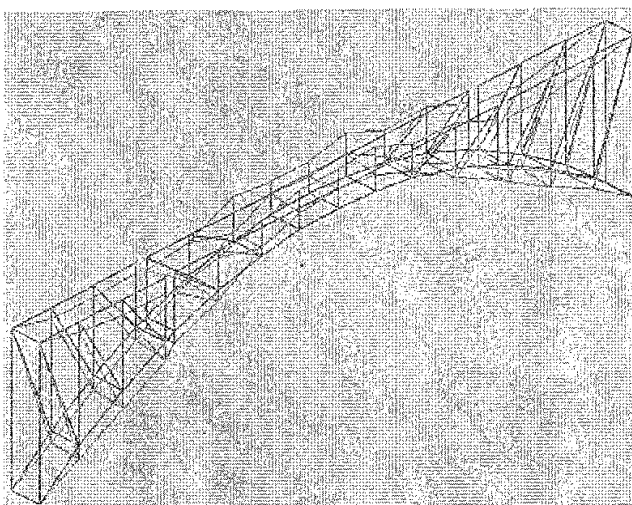
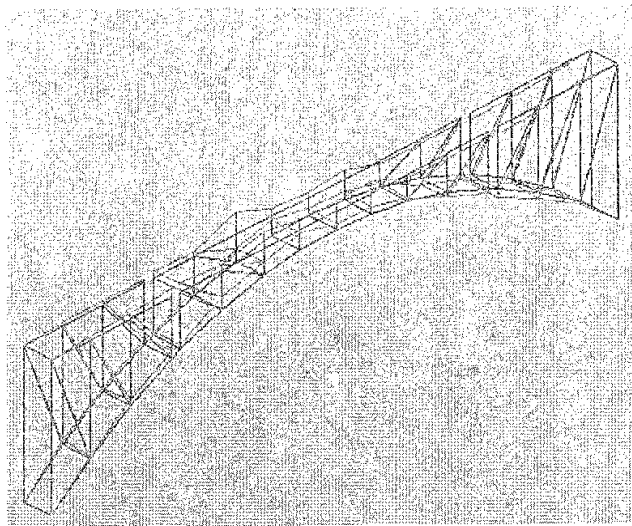


图 4.21. a~4.21. c 竖直方向前 4 个模态振型

同理，根据动力相似关系，可得竖直方向模态参数入下表 4.9 所示。

表 4.9 实桥竖直方向模态参数

模态	频率(Hz)	阻尼比(%)	振型
1	3.99	6.46	图4.9.a
2	6.94	7.91	图4.9.b
3	8.14	0.77	图4.9.c
4	16.38	3.62	图4.9.d

由于试验条件的限制，结构的一阶模态频率 f_1 并没有测到，但由表 5.11 可知： $f_1 < 3.99\text{Hz}$ ，其在桥梁结构的安全范围之内。

4.4.4.3 斜拉力对模态参数的影响

为了探讨斜拉力对结构自振特性参数的影响，寻求提高桥梁动力性能的有效途径，水平方向和竖直方向都作了两种工况的模态试验，模态参数比较如下表 4.10、4.11 所示：

表 4.10 水平方向模态参数比较表

工况	模态	频率(Hz)	阻尼比(%)
横拉力为100kg,斜拉力为0	1	16.6	6.25
	2	26.86	2.65
	3	48.1	3.24
横拉力为100kg,斜拉力调至成桥状态	1	16.36	5.31
	2	26.12	1.01
	3	48.58	3.07

表 4.11 竖直方向模态参数比较表

工况	模态	频率(Hz)	阻尼比(%)
横拉力为100kg,斜拉力为0	1	22.22	3.6
	2	24.66	2.42
	3	35.4	5.47
	4	70.31	2.31
横拉力为100kg,斜拉力调至成桥状态	1	17.82	6.46
	2	31.01	7.91
	3	36.38	0.77
	4	73.24	3.62

从中可以看出：

(1). 随着斜拉力的增大，结构的自振频率也增加，水平方向增加的小些，竖直方向增加的大些；

(2). 斜拉力增大后，水平方向的阻尼比减小，竖直方向的阻尼比增大；

(3). 实际的桥梁结构，我们总希望自振频率越小越好，阻尼比越大越好，

因此可以通过调节斜拉力的大小来改善结构的动力特性。

4.4.5 结论

(1). 通过钢管混凝土桁式组合拱桥的模型振动试验, 得到了结构水平和竖直两个方向各阶模态的固有频率、阻尼比和振型, 所得各阶振动模态分阶清楚, 振型曲线比较和顺, 说明整个振动测试方案是成功的。

(2). 工程上最关注的第一阶固有频率分别为 3.66 赫兹和小于 3.99 赫兹, 均在正常范围之内。

(3). 斜拉力对结构的自振特性参数有一定的影响, 我们可以通过调节斜拉索的拉力小量地改变改变结构的动力特性。

(4). 振动试验的成功表明我们所设计的拉力测试系统和振动测试系统满足了试验要求, 是成功的。

第五章 全文总结

机电测试技术是机电测量技术及试验技术的总称。机械工业担负着装备国民经济各个部门的任务。在改革开放的过程中，机械工业面临着更新产品、革新生产技术、改善经营管理、提高产品质量、提高经济效益和参与国际市场竞争的挑战。机电测试技术将是机械工业对付上述挑战的基础技术之一

本文以钢管混凝土桁式组合拱桥的模型试验为工程背景，进行了拉力测试系统和振动测试系统的设计，并进行了模型试验研究，取得了以下成果：

(1). 利用相似理论进行了钢管混凝土桁式组合拱桥模型的设计与制作。

(2). 利用应变电测原理自己制作了拉力传感器，并设计了拉力测试系统。该系统能够准确、迅速、方便地测得模型中预应力筋和斜拉索的拉力。

(3). 设计了振动测试系统。该系统可以检测振动信号，并能够对试验数据进行分析处理，从而得到桥梁结构的水平和竖直两个方向各阶模态的固有频率、阻尼比和振型。

(4). 进行了钢管混凝土桁式组合拱桥的模型试验：通过对施工过程的模拟，得到了施工阶段内力和外载对重要节点挠度变化的影响规律。研究表明：桥梁结构处于正常的弹性工作范围；斜拉力、外载和挠度之间基本上为线性关系；可以求得在各个施工阶段，不同的斜拉力和载荷下节点的挠度，为桥梁施工控制提供了有益参考。进行了全桥静载试验，得到了桥梁结构控制截面最大应力及其随荷载的变化规律；测得桥梁结构在各级试验荷载作用下的最大竖向挠度以及挠度沿跨径分布曲线，对该桥的静力特性作出了科学的评价。分别采取两片、三片桁片，装配一跨径为二倍于天子山大桥的半跨模型，进行了最大悬臂状态的刚度比较试验。结果表明：跨距增大一倍后，结构竖向刚度稍微有所减小，侧向刚度仅有原来的一半；当大拱桁片由两片增加为三片后，其竖向和侧向刚度均增加至原来的两倍。利用模态分析的方法，进行了全桥振动试验，得到了结构水平和竖直两个方向各阶模态的固有频率、阻尼比和振型，对该桥的动力特性作出了科学的评价，并探讨了内力对结构动力性能的影响。

本文以试验为基础，理论分析为手段，所设计的拉力测试系统和振动测试系统满足了模型试验的要求。模型试验的成功为该类型桥梁的设计与计算提供依据，其结论也为同类型桥梁结构的设计研究提供借鉴。

致谢

本文是在导师吴康雄副教授的悉心指导下完成的。掩卷回首，从论文的选题、实施直至最后成文，每一个环节无不凝聚着导师的倾心指导和亲切关怀。多年来，导师严谨的治学态度、高尚的敬业精神，为我树立了学习的榜样，使我受益终身，导师学业上的讲授和生活上的关怀令我莫齿难忘。在此，谨向导师表达我最崇高的敬意和最诚挚的感谢。

在课题的实施和论文的写作过程中，得到了测试教研室付俊庆副教授和机械基础教学实验中心张克武技师等老师的关心和帮助。在此向他们表示衷心的感谢和诚挚的谢意。

在课题实施过程中，还得到了湖南省路桥七公司肖国强经理、周建良副经理的支持和帮助，在此致以诚挚的谢意。

在论文的完成过程中还得到了徐海贵、林志勇、张仕全、缪雄辉、王吉华等同学和朋友们的建议和帮助，在此也表示真诚的感谢。

最后，感谢我的女友张群三年来对我的关心和支持，并向二十多年来默默支持我的父母和亲人们表示衷心的感谢。

唐宏宾

2004年4月于长沙

参考文献

- [1] 张靖, 刘少强. 检测技术与系统设计. 北京: 中国电力出版社, 2002
- [2] 宋文绪, 杨帆. 传感器与检测技术. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [3] 黄长艺, 严普强. 机械工程测试技术基础. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [4] 李杰敏. 汽车拖拉机试验学. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [5] 孔德仁, 朱蕴璞, 狄长安. 工程测试技术. 北京: 科学出版社, 2004
- [6] 王伯雄. 测试技术基础. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [7] Doebelin E O. Measurement System: Application and Design. 4th Edition. McGraw-Hill Book Co., 1990
- [8] Jones B E. Instrumentation, Measurement and Feedback. McGraw-Hill Book Co., 1977
- [9] Beckwith T C, Marangoni R D, Lienhard J H V. Mechanical Measurements. 5th Edition. Addison Wesley Publishing Company, 1993
- [10] 湖南大学, 太原工业大学, 福州大学. 建筑结构试验. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 12
- [11] 刘自明. 桥梁结构模型试验研究. 桥梁建设, 1999(4): 1-7
- [12] Gajaran M, Sabins et al. Structural Modeling and Experimental Techniques. 1983
- [13] 成尚峰. 钢管混凝土拱肋受力性能及节段模型试验研究: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2003
- [14] 李勇. 桥梁施工控制计算机辅助监控系统的开发与研究: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙交通学院汽车与机电工程系, 2003
- [15] 张宝胜. 三塔斜拉桥静力性能研究: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学桥梁与隧道工程系, 2001
- [16] 刘志文. 曲线梁桥结构分析、模型试验: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学桥梁与隧道工程系, 2001
- [17] 安群慧, 刘自明. 荆州长江公路桥整体模型试验研究. 桥梁建设, 2002(2): 15-19
- [18] 颜东煌, 田仲初, 陈常松等. 岳阳洞庭湖大桥三塔斜拉桥全桥静动力模型试

- 计. 长沙交通学院学报, 1999(3): 50~54
- [19] 陈常松, 颜东煌, 田仲初. 岳阳洞庭湖大桥模型动力相似理论分析. 桥梁建设, 2002(1): 48-51
- [20] 李亚非, 颜东煌, 田仲初. 大型三塔斜拉桥铝合金试验模型的研制. 长沙交通学院学报, 2001(9): 37-41
- [21] 章关永. 桥梁结构试验. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [22] 张俊平. 桥梁检测. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [23] 陈天本. 桁式组合拱桥. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [24] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [25] 蔡绍怀. 钢管混凝土结构. 北京: 中国建筑科学研究院, 2002
- [26] M. Shams, M. A. Saadeghvaziri. State of the Art of Concrete Filled Steel Tubular Columns. ACI Structure Journal, 1997, 94(5): 558-571
- [27] F. Seki, S. Tanaka. Construction Control System for Cable-stayed Bridge. IABSE Symp. Leningrad. Sept. 1991
- [28] 中华人民共和国交通部标准. 公路桥涵设计标准. 北京: 人民交通出版社, 1989
- [29] 王长久. 天子山大桥施工图设计. 贵州桥梁设计院, 2001. 12
- [30] 刘习军, 贾启芬, 张文德. 工程振动与测试技术. 天津: 天津大学出版社, 1999
- [31] 倪振华. 振动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 1989
- [32] 俞启灏. 试验模态分析法在建筑机械中的应用. 北京建筑工程学院学报, 2001(10): 90-93
- [33] 余诗泉, 陈守谦, 于天来等. 齐齐哈尔嫩江公路大桥模型振动试验模态分析. 东北林业大学学报, 1994(7): 86-91
- [34] 徐良, 江见鲸, 过静. 广州虎门悬索桥的模态分析. 土木工程学报, 2002(2): 25-34
- [35] Ewins D J. Model Testing: Theory and Practice. Research Studies Press, England, 1984
- [36] L Fryba, M Pirner. Load test and modal analysis of bridge. Engineering Structures, 2001, 23(1): 102-109
- [37] 沈柏臣. 模态分析在桥梁检定试验中的应用. 铁道建筑, 2002(9): 2-5
- [38] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动. 北京: 中国铁道出版社, 1996

- [39] 大久保信行[日]. 机械模态试验技术(中译本). 上海: 上海交通大学出版社, 1987
- [40] Harris C M, Crede C E. Shock and Vibration Handbook(4 Edition). Mc Graw-Hill, 1996
- [41] Juang J N. Applied System Identification. Englewood Cliffs : Prentice-Hall Inc, 1994
- [42] Van Overschee P, De Moor B. Subspace identification for linear system theory, implementation and applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1996
- [43] Wei xin Ren, Zhao T, Harik I E. Experimental and Analytical Modal Analysis of a Steel Arch Bridge. To be published in Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 8(1)
- [44] 高品贤. 振动、冲击及噪声测试技术. 成都: 西南交通大学出版社, 1992
- [45] 张令弥. 振动测试和动态分析. 北京: 航空工业出版社, 1992
- [46] 陈思甜, 王世槐. 窄轨铁路双曲拱弯桥动态测试结果及模态分析. 重庆交通学院学报, 1995(9): 9-13
- [47] 宗周红, Bijaya Jaishi, 林友勤等. 西宁北川河钢管混凝土拱桥的理论核试验模态分析. 铁道学报, 2003(8): 89-96
- [48] 上海师范大学数学系. 回归分析及其试验设计. 上海: 上海人民教育出版社, 1979

附录 攻读硕士学位期间发表的论文

唐宏宾, 吴康雄, 张克武. 钢管混凝土桁式组合拱桥铝合金模型的设计与制作. 钢管混凝土桁式组合拱桥论文集, 2004. 7