

重庆大学

硕士学位论文

桥梁振动远程监测的研究

姓名：石荣

申请学位级别：硕士

专业：精密仪器及机械

指导教师：黄尚廉

20000501

摘 要

随着经济的发展和科技的进步,土木工程领域的广大科研人员和工程技术人员对各种桥梁结构的健康监测越来越重视,这不仅关系到人民群众的生命、财产安全,而且关系到整个社会的稳定,经济的持续发展和国家在国际上的地位和形象。作为桥梁健康监测的一个重要组成部分的桥梁振动远程监测的研究课题得到了重庆市院士基金的资助,并且在位于渝长高速公路上的红槽房大桥上获得了实际的工程应用,取得了良好的监测效果。

本论文首先阐明了桥梁监测的重要意义和实用价值,针对其侧重点桥梁振动进行了深入的研究。通过查阅大量资料文献,对当今国内外在桥梁监测领域的研究现状和最新进展进行了综述,在借鉴国外先进经验的同时,吸收了唐凤、古渊等研究者的优秀思想,大胆创新,提出了压电片动态应变传感研究方案,取得了创造性的研究成果。

在论文中作者针对工程实践中最常见的三种支撑形式的梁,建立了其在自由振动下的模型,分析了前几阶振动模态下的振形和动态应变分布,为实际测试工作中压电片的贴片部位的选取提供了依据,也为后续的振动信号分析打下了基础。接着从压电方程入手,分析了压电片对动态应变的传感原理和计算表达式,并且对比了电压放大器和电荷放大器的差异,为实际工程应用做好了准备。然后作者在总结现代计算机通讯的各种方法的基础上,利用广阔的电话网,通过调制解调器实现了远程两台计算机之间的通讯功能,搭建了整个通讯系统,编制了全部通讯软件,成功地实现了远程数据传输和远程监测。在此基础上,把整个桥梁振动远程监测系统成功地应用于红槽房大桥上,通过长期的安装和调试,系统运行正常。论文中还讨论了一些实际工程应用中所应该注意的问题,并对实践中的技术难点作了较为详细的分析。最后在大量实验工作的基础之上,对实际测试的红槽房大桥在普通车流激励下的动态应变曲线作了初步的分析,从中不仅可以对桥上的交通状况进行推断,还可以得到一些有关该桥的特性参数,通过对这些参数的研究,便能对桥梁的健康状况进行监测和初步评价。

该论文在采用压电片对桥梁动态应变传感和远程监测这两个方面取得了创造性的成果,这也是本课题最有价值的地方。这两点不仅仅局限于桥梁振动远程监测这一个课题上,它可以推广到众多的动态应变测量领域和广阔的远程网络化仪器的研制上。所以该项目的继续深入研究将具有重要的社会意义和巨大的经济价值。

关键词:

桥梁振动, 压电片, 动态应变传感, 远程监测, 双机通讯

Abstract

With the economic development and scientific improvement many scientists and engineers in the field of civil infrastructure pay more attention to the health monitoring for all kinds of bridges, because it has great influence on the people's lives and properties, the social stabilization, economic progress and the national status in the world. The study on remote monitoring for bridge vibration, which is one of the important parts in the health monitoring for bridges, is financially supported by the academican foundation of Chong Qing city. Now a good result has been gotten in the remote monitoring for the Hong Caofang bridge which is located on the Yuchang Highway.

In this dissertation the application importance of bridge monitoring is first presented and the bridge vibration is fully discussed. After reading plenty of literatures the author summarizes the up-to-date progress and research development in this field at home and abroad, accepts the advanced experience and good ideas of other researchers, puts forward his own research scheme about dynamic strain sensing using piezoelectric patches and has gotten important outcome in a creative way.

The author builds vibration model of three kinds of bridges, which are very popular in the engineering, and discusses the vibration shape and distribution of dynamic strain in order to choose the sensing position of piezoelectric patches and analyze the vibration signal correctly. The formula and principle of piezoelectric patches sensing the dynamic strain are derived from the piezoelectric equation. The difference between the voltage amplifier and charge amplifier is presented. After analyzing all sorts of communication methods the author has implemented the communication between two remote computers using MODEM through the telephone network and has written programs for the system. The remote data transfer and remote monitoring have been achieved successfully. The system is being used on the Hong Caofang bridge after installation and examination. In this dissertation the technical difficulties and problems are also discussed. After a lots of experiments the author analyzes the dynamic strain signals of the bridge under the vehicle excitement so as to get the information about vehicles and the characteristic parameters of bridge which are so important that the health of the bridge can be estimated.

In this dissertation the author has gotten creative results in the dynamic

strain sensing using piezoelectric patches and remote communication system, which are the most valuable in this research project. These two creative results can be used in many fields such as dynamic strain sensing and network instruments. All in all the continual research in this project will bring the whole society great benefit.

Key words:

bridge vibration piezoelectric patches dynamic strain sensing
remote monitoring communication between two computers

第一章 绪论

提要 本章对桥梁监测的重要性和紧迫性作了充分的论述,对国内外研究者在该领域的研究现状和最新进展作了详尽的总结,并对重庆大学光电技术室在该相关领域开展的工作作了介绍,接着说明了桥梁监测的组成和分类,论证了采用动态应变来反映桥梁振动的重大意义,最后结合实际研究课题讲述了智能材料和现代通讯技术在桥梁监测领域的具体应用,同时给出了本论文的主要研究内容。

1.1 桥梁监测的重要性和紧迫性

二十世纪是人类历史上最辉煌的世纪,在这一百年中,人类在征服自然、利用自然和改造自然的道路上取得了无数的成就。特别是随着经济的发展和科技的进步,大型土木工程结构如:大堤、水坝、桥梁、隧道等的数量与日俱增,同人们的联系也日益紧密。当你上街游玩时,人行天桥为你提供了在车水马龙的城市中穿行的方便与快捷;当你外出购物时,地下商场为你增添了在商家云集的社会中选择的休闲与自由;当你抬头仰望时,拔地而起的摩天大楼会使你感受到置身于现代社会的优越;当你驱车行进在山城之中时,一望无尽的隧道会使你惊奇,层层叠叠的立交桥会使你感叹;当你乘船顺江而下时,你会体验到三峡大坝的宏伟与壮观、葛州坝的广阔与忙碌,荆江大堤的延绵与挺立。就以日渐倍增的桥梁结构为例,吊桥、拱桥、悬索桥、斜拉桥,式样众多应有尽有;木桥、石桥、钢梁桥、混凝土桥,各种材料各显其能;人行桥、陆路桥、跨江桥,跨海桥各个方位四通八达。这就是现代社会中的各式各样的土木工程结构,它与我们天天相伴、息息相关。它不仅是二十世纪辉煌成就的重要组成部分,而且是整个人类社会发展的基石和进步的保证。

在这众多的土木工程结构中,一些是已经使用多年沿用传统工艺建造而成,另一些则是近年来采用新的技术工艺大胆创新的结果。对上述土木结构进行各种监测一直是国内外工程技术领域研究的一个重要课题,同时也是国民经济中一个新兴产业。因为这不仅关系到人民群众的生命财产安全和整个社会的繁荣、稳定,而且关系到国民经济持续、健康、稳定地发展和一个国家在国际社会中的地位和形象。由于土木工程结构种类全、数量多,传统的各项监测技术现在已经远远不能保障各类土木工程结构安全可靠地运作,这严重影响了土木工程行业的发展和国民经济的发展。近年来,随着智能结构和智能材料这一

新兴交叉学科的发展, 土木工程结构健康监测领域又重新焕发出新的生机与活力, 成为国内外研究开发的重点和热点, 当然也是一个难点。特别是美国, 每年的自然科学基金项目有很大一部分与土木工程结构的健康监测有关, 研究经费上亿美元; 并且一些科技实力雄厚的大公司也纷纷投入大笔经费, 从事这方面的研究和产品开发, 如美国的 F&S 公司就开发了运用于土木工程结构的光纤应变传感器, 并且已经在一些实际工程中获得了应用。

在各类土木工程结构中, 桥梁结构一直是工程界讨论的一个重点而倍受关注。因为桥梁在一个国家的国民经济建设, 国防保障体系, 交通运输网络中发挥着不可替代的作用。从我国古代著名的赵州桥到现在的南京长江大桥, 从早期的石拱桥到目前的钢筋混凝土桥, 从简单的绳索吊桥到纵横交错的立交桥, 从远古几步之遥的木板桥到现代延绵几公里的跨海大桥, 这一座座形态各异, 造型精美的建筑典范, 不仅体现了中国人民的勤劳与智慧, 而且为各个历史时期的政治、经济、军事、文化的发展做出了难以磨灭的贡献。正是于此, 人们对桥有着特殊的情感和热切的关注。所以我们在众多的土木工程结构中选择桥梁作为研究对象, 把桥梁监测当作了自己的研究方向, 继而开展了一系列的研究工作, 并希望在該领域做出创造性的研究成果。

对于修建多年的桥梁结构而言, 其是否能够继续承受设计载荷, 继续使用是否安全等问题急待回答。据有关方面的统计, 现在桥梁结构的破坏性事故出现得越来越平凡。例如: 重庆綦江彩虹桥突然垮塌, 造成四十多人伤亡, 直接经济损失数百万元, 该重大工程事故震惊了全国, 该桥在事故发生前夕就有许多异常征兆, 但有关负责人仍然让该桥继续使用, 从而引发了令人痛心的悲剧。河北省境内的一座有问题的铁路桥在维修过程中, 其中一段桥面发生断裂, 施工人员当场有十几人伤亡, 铁路中断运输近两天。就在我们附近, 位于重庆观音桥附近的人行天桥使用不到十年就被拆出, 位于石门大桥南岸的龙泉路立交桥在快要完工时也出现了垮塌, 这一系列的事向工程界提出了严峻的挑战。如果从保守的观点出发, 凡是使用到一定年限的桥梁结构以及有一点点问题的桥梁结构通通拆除, 这样的确能够保障安全, 但是确实能够继续使用的桥梁结构也被拆除, 就会给国家带来巨大的经济损失, 因为大型桥梁结构的造价是十分惊人的, 国家往往要投入上亿元的资金; 反过来, 让有一定年限的桥梁结构和有一点点小毛病的桥梁结构继续使用, 一旦出现问题, 同样也会给国家及人民群众的生命和财产造成重大损失。所以对现有的桥梁结构进行健康监测是解决这个矛盾的有效方法之一。

在对桥梁结构进行维护和检修方面, 目前工程界多半是按部就班

地进行，很多情况下是凭维护人员的经验来完成的。虽然花费了大量的人力、物力、财力，但获得的效果并不理想。所以从目前看来，对桥梁结构进行健康监测也是对其实施有效维护的重要方法之一。

现在桥梁结构的意外事故发生率也不断上升，例如武汉长江大桥是我国在长江上建造的第一座大桥，同时也是世界上知名的大型桥梁之一，但是从桥梁建成至今，发生长江航运船舶撞桥事故上百起，主要是由于船舶驾驶人员的操作失误，导致船体直接撞击桥墩，2000年1月初，新闻联播报道了武汉长江大桥再次遭到撞击的消息，其中一个桥墩被撞出一米见方的一个缺口，桥梁中断交通三个多小时。所以桥梁结构的意外事故监测是一个迫在眉睫的任务。如果采用人工观察的方法，不仅速度慢、效率低、费时费力而且容易出现许多监测漏洞和错误判断。只有对其进行全面的长期的不断自动监测才能保证桥梁结构的可靠性、安全性及其正常的运行。

另一方面，对于一些重要的桥梁结构，除了在其设计阶段进行必要的试验外，通常在桥梁建成竣工后，通过载荷试验鉴定桥梁结构的质量和可靠性，判断桥梁的实际承载能力，之后还要根据具体要求和实际需要，进行长期的系统的监测。对于采用新工艺建造的桥梁结构也需要进行监测，以便了解和掌握结构在载荷作用下的实际受力状态，对其可靠性、有效性等参数提供技术鉴定和合理的评价，同时也为新工艺的实施理论提供有效的实验手段和实验方法，为不断丰富桥梁工程的设计理论、设计方法、计算理论和工艺规范服务。对于需要改建和扩建的桥梁进行监测，可为其以后的工作提供一定的技术依据，这对于缺乏技术资料的旧有桥梁更为必要。对因受水害、冰冻、地震等原因影响的桥梁结构的监测，可以发现其是否有严重缺陷的产生，例如：过大的变形或裂缝等，通过对监测结果进行综合分析研究，为提供合理的整治意见和保养措施作出依据和参考。

综上所述，桥梁监测不仅对于每一个人而且对于整个国家和社会都是极其重要的，在该领域开展研究工作，不仅可以解决上述一系列的工程技术难题，而且可以创造出巨大的社会价值和难以想象的经济效益。

1.2 国内外在该领域的研究现状

目前国内外的科研人员和工程技术人员共同协作，在桥梁监测领域掀起了研究的热潮，开展了大量的研究工作并进行了实际的工程监测。一部分研究者从总体入手，开发出了桥梁监测系统，并对传感器的组成和数据的采集作了详细的分析[1]。而另一部分研究者从应用入

手, 针对实际的桥梁结构开展现场测试工作, 如对 I-40 大桥的实际监测的研究[2,3]等。并且在监测数据的传输方面也开始应用目前十分流行的 Internet 国际互连网[4,5], 这些先进技术的应用为后续的研究者提供了广阔的研究思路和丰富的研究手段。

到目前为止, 国际上的研究者已经在如下各个方面开展了一些工作, 取得了一些研究进展。如采用光纤传感器对道路及桥梁的腐蚀情况进行监测[6], 采用光纤 FP 传感器以及光纤光栅进行应变监测[7-9], 采用普通光纤传感器和普通应变计对桥墩、钢梁、桥面的损伤及应变进行监测[10], 采用微粒成像法对大型桥梁结构的变形进行监测[11], 采用应变测量来确定桥的挠度[12], 采用压电陶瓷对大型钢桥的螺钉松动情况进行检测[13]等等。

除此之外, 对确定损伤部位和评价损伤严重程度的方法的研究也是桥梁监测领域的一个热点。其中最主要的评价方法有: 非破坏性的损伤评价方法[14,15], 采用人工神经网络对结构损伤进行定位和分类[16], 整体损伤评价方法, 频率域损伤评价方法, 鲁棒性损伤评价方法[17], 以及采用最大概率原则确定梁上裂纹的位置, 根据刚度变化确定矩形梁的损伤大小和部位[18], 采用模态分析法确定损伤的部位并进行定位精度分析[2,19,20], 基于应变分布信息的损伤评价方法[21], 基于振动的桥梁健康监测及评价[22-24]等等。

在以上研究的基础之上, 用于桥梁监测的仪器设备也不断地被开发出来, 如用于桥梁的电子剪应力仪, 激光位移测试系统等。由此可以看出桥梁结构的健康监测已经是科学界和工程界所特别关注的一个问题, 我们在该领域开展研究工作具有重要的意义和广阔的市场前景。下面便是我们在一篇综述性文献中查到的一些桥梁监测和结构动态监测方面的典型实例[25], 从中我们可以得到一些启发和借鉴, 并对该领域的研究方法、思路和研究状况、进展有所了解。

1)、Overman 等人于 1987 年就在被研究的桥上安装了测试仪器以验证桥梁设计假设并监测施工质量与桥梁的运行状态。他们还在 Florida 的一座桥上安装了 500 多个传感器, 在施工期间和建成之后都进行了数据采集和分析, 并对此进行了深入的研究。

2)、Salawu 和 Williams 于 90 年代初测试了英国的一座经过维修的钢筋混凝土高速公路桥。他们采用一个液压执行器激励桥梁, 采用四个加速度计来记录桥梁的动态响应。他们发现: (1) 虽然经过维修, 但桥梁的自振频率并没有发生重大变化; (2) 模态保证判据和协约模态判据值是是否对桥梁进行维修和确定维修部位的良好标志。

3)、Bakht 和 Jaege 于 1990 年, 以加拿大 Ontario 交通部对 225 座桥梁的静态与动态测试为基础, 从这些试验中总结出了若干有价值

的结论。他们发现：(1) 平板桁架桥的刚度比计算值要大；(2) 钢束桥的桥面系统会占结构组合刚度的百分之八。

4)、Mazurek 和 Dewolf 于 1990 年在实验室进行了双跨桁架桥(每跨 90 英寸)的环境振动试验。他们应用了小质量的车辆激振，发现应用环境振动法得到的结果与用模态分析法获得的结果有近似相同的共振频率与模态形状。此外他们还发现，支柱的失效和裂纹的扩展能引起某些频率与模态形状的较大改变。虽然显著劣化需要动态响应有显著的改变，但他们得出的结论是，这一方法有可能在即将发生结构垮塌之前很好地探测出失效。因此他们相信，自动化振动监测系统的研究是完全可行的。

5)、Hern 和 Testa 于 1991 年应用扰动法通过振动来监测结构的动态响应。他们发现，模态频率及阻尼的变化是损伤出现的良好标志，并且在实验室演示了这一试验方法的有效性。试件是一焊接而成的四构件钢框，上面有逐步扩展的疲劳裂纹，在该框架试件上作用有公称循环应力为 28—210MP 的载荷，每隔 10,000 周后检查框架裂纹扩展情况。他们发现，模态参数（除模态形状外）能够有效地用于探测这些试验结构的损伤。

6)、Muria-Vila 等人于 1991 年提出了一个监测计划，用于研究墨西哥一座 1543 米长的 Tampico 斜拉索桥的动态特性。该桥的中央跨长为 360 米，由 293.5 米的钢箱梁和 67.5 米的预应力混凝土箱梁所组成。他们在 21 个位置上安装了加速度计，进行了环境振动试验，从中得到了该桥梁的频率特性值。他们还认为应当进行更多的研究如估计阻尼值和确定风载引起的响应等。

7)、Alampalli 和 Fu 于 1994 年进行了两座钢桥的连续监测。该监测系统包括 5 个倾斜计，22 个加速度计，5 个应变计，它们都安装在这两座桥梁上。从这些传感器来的信号，传送至一台远程主计算机，然后计算出桥梁的自振频率，模态形状，阻尼比等特性参数，然后应用模态保证判据和协约模态保证判据，来进行状态监测和估计。

8)、Farrar 等人于 1994 年和 1996 年在新墨西哥 Alamoso Canyon 大桥上完成了损伤探测方法的强化试验。该桥已退役，这给予研究者一个利用控制结构损伤的方法来进行详细监测试验的极佳机会。他们应用密集的加速度计阵列测量强迫振动与环境振动下桥梁的动态响应，应用线性信号处理技术提取模态参数，与有限元模型计算得到的结果相比较，并进行了各种模态参数变化的研究。

9)、Aktan 等人于 1995 年开发了一种便携式监测系统，能够进行高速公路桥梁状态监测和现场测量，测量能够重复进行，该系统已用于研究当时正拆除的、容许进行实际损伤监测的几座桥梁。

10)、Abdel—Ghaffar 等人于 1995 年应用了一高分辨率的数据采集系统, 监测 Vincent Thomas 桥对风和交通载荷的动力响应。在一个月中, 每天以不同次数进行监测, 通过数字蜂窝通信完成了数据采集系统的控制, 这表明实时远程监测是可行的。所获取的数据经过分析, 以考查模态参数在不同的静态与动态载荷状态下的可变性。

11)、Westermo 和 Thompson 于 1995 年设计并评价了安装在几座桥梁和大型建筑物上的固态传感器结构监测系统。并讨论了在 Georgia 的一个工程项目中, 在 10 座桥梁上安装全自动遥测应变传感器系统的研究情况。

12)、Nakamura 等人于 1996 年提出了探测结构特性变化的神经网络方法。该法应用了一“健康”系统的振动测量结果, 去训练一个用于识别目的的神经网络。随后, 将同样结构、不同情况下振动测量的响应送至神经网络, 以便判断结构是否健康。应用这一方法他们分析了一幢钢结构建筑在环境振动试验下所获得的实际测量数据。该建筑在 1995 年 1 月 17 日 Hyogo—Ken Nanbo 地震期间曾受到强烈地震运动的影响。对于受到损伤的结构, 维修前后均进行了测量, 用维修后的测量数据来代表健康状态, 去训练这一神经网络。然后将维修前的数据送至该神经网络, 成功地识别了损伤楼层与未损伤楼层之间的差异。由此表明, 神经网络方法是进行损伤探测的一个有力工具。

13)、Diehl 和 Nigbor 于 1996 年研制了一个商用结构健康监测系统, 该系统称为结构完整性与安全在线警戒系统, 并且已经永久地安装在泰国和韩国的一些主要桥梁上。此系统应用了多种传感器, 包括加速度计, 应变计等。除了数据记录与存档外, 连续的数字数据流通过导线或光纤线路送入一远程监测计算机。此监测计算机可提供实时、远程分析的时间历程数据。当分析出不安全状态时, 系统会立即报警。该系统还可以定期记录环境振动数据, 用于观察结构的劣化状况和探测可能的疲劳损伤。

14)、Haritos 与 Charko 于 1997 年讨论了应用实验模态分析方法确定高速公路桥梁使用状况的研究情况。他们将强迫振动法与环境振动法应用于许多桥梁, 以探测桥梁结构中的异常的结构特征。并发现辨识出的异常状态与桥墩失效、被覆层分层、栅栏崩溃以及支撑垫不规则的扭转特性有关。

15)、Flesh 和 Kembichner 于 1998 年应用测量预应力混凝土桥的模态参数来修改桥梁的有限元模型。他们根据澳大利亚几座桥梁的安全检查结果来对结构的完整性进行评价。这项研究目前仍在进行之中。

上面的成功监测实例为我们开展桥梁振动远程监测的研究提供了许多值得借鉴和学习的宝贵经验, 开阔了我们的研究思路, 从中还可

以看出只有大胆地在工程实践中应用新技术和新方法才能取得开创性的研究成果。

1.3 我们过去所开展的研究工作

重庆大学光电工程学院教育部光电技术重点实验室利用自身的优势，集中人力、物力、财力，在黄尚廉院士的直接领导下，在智能材料和智能结构领域和民用建筑健康监测领域开展了大量的研究工作，取得了一些研究成果。黄尚廉院士作为会议主席主持召开了 1999 年民用建筑健康监测领域的国际会议，在此次会议中，国内外的研究者对重庆大学光电技术重点实验室在该领域所取得的研究成果给予了高度的评价，并希望建立广泛的技术合作，开展长期的技术交流，共同从事该领域的研究和开发。

本研究室以光电圆刻机的成功研制而闻名全国，其中的创造性成果之一为光纤环全莫尔条纹接收技术，并由此拉开了本研究室在光纤传感及应用领域研究的序幕，之后在光纤熔接机的研制中引入了压电驱动技术，并由此建立了本研究室在压电传感和控制领域的研究基础。光纤与压电材料是十分典型的智能材料，所以本研究室的研究方向扩展为智能材料和智能结构研究领域，又随着智能材料在民用健康监测领域的广泛应用，本研究室的研究方向又再次扩展到民用建筑健康监测之中。这就是我们室从诞生到现在，所经历的主要发展过程，从中也可以体会到十分清晰、自然的发展思路。

在光纤传感方面，涂亚庆博士首先把光纤埋入各种结构中，提出了光纤机敏结构的思想，接着赵庭超博士把光纤埋入混凝土中，便开始了光纤在建筑结构中进行传感的研究，饶云江博士在英国对光纤光栅和光纤 FP 传感进行了深入的研究，并且成功地在结构健康监测方面进行了实际应用[26]。在压电传感方面，文玉梅博士首先提出压电阵列传感的研究思路[27]，唐凤博士把压电技术用于支架振动控制之中[28]，接着古渊博士把压电片应用于卫星太阳能翻板的振动主动控制[29]，王代华博士在斜拉桥的斜拉索振动传感中采用了压电薄膜[30]。我们在前面研究者的基础之上，提出了采用压电片进行动态应变传感的研究思路，首次将压电片粘贴到实际的大桥上，对其振动产生的动态应变进行传感，开创了动态应变传感的新的研究方法。可以这样说，没有前面众多研究者的前期研究工作，就没有这种研究方法的产生；没有众多研究者的相互合作和支持，也就没有现在成功的实际工程应用。所以该方法的成功应用是重庆大学光电技术室共同的劳动成果。

1.4 桥梁监测的组成和分类

一般情况下，桥梁结构的监测工作由三个部分组成：监测设备的硬件及软件设计与开发；实际加载与信号提取记录；信号分析和总结。

监测设备的硬件与软件的设计与开发是顺利地进行桥梁监测的必要条件。随着桥梁结构的复杂性，新颖性，大型化的发展趋势，现代桥梁监测技术对于监测用的硬件和软件的设计与开发提出了更高的要求，自动化程度高、智能化水平高，要具有较强的适应性、稳定性和可靠性，因此这一部分的工作是大量而细致的。实践证明，桥梁监测的好坏在很大程度上取决于前期监测设备硬件与软件设计和开发部分的工作。

实际加载与信号提取是整个监测部分的中心环节。这一部分的工作是在充分准备的基础上，在被测桥梁上安装监测设备，观测结构在加载过程中的工作状态，并进行信号观测和数据记录工作。

信号分析与总结部分是对原始信号资料进行集中与综合的过程，这些原始资料包括大量的观测数据，这些数据由于受外界各种因素的影响，一般显得缺乏条理性和规律性。因此，应对它们进行科学的分析，去伪存真、去粗取精，从中尽可能多地提取有用信息。对于一些数据或信号，有时还需按数理统计的方法进行分析，或依靠专门的分析仪器和计算机进行分析处理。这一部分的工作，直接反映了整个监测过程的质量。对已经取得的大量数据资料经分析处理后，按监测的目的与要求，对被监测的桥梁结构作出科学的判断与评价。

在实际工作中，桥梁监测的种类较多，按照监测目的和要求分类，有科学研究性桥梁结构监测和生产鉴定性桥梁结构监测[31]。科学研究性桥梁结构监测的直接目的是为建立和检验结构设计理论和经验公式，或者验证某一结构体系中的科学判断及假说的可靠性。研究性结构监测通常按照事先周密考虑的计划进行，一般只把对结构有主要影响的因素作为监测参数。根据具体情况，监测实验可在实际的原型结构上进行，也可以在模拟的模型结构上进行。后者常在专门的实验室里进行，这样就可以消除和减少一些不利因素的影响，同时也可以突出所要研究的主要因素，减小某些次要因素对结构的作用。通过系统的试验，对数据等资料加以分析和论证，从而揭示具有普遍意义的规律。鉴定性的桥梁结构监测具有直接的生产目的，一般以实际的桥梁结构作为监测对象，通过实际结构试验来检验结构的实际承载能力和结构的质量。通过对监测结果的综合分析，掌握桥梁的技术状态，确定桥梁的使用条件，提出桥梁的养护措施，有效地保证桥梁结构的安全使用。

根据载荷的作用性质,桥梁监测可分为静载荷监测和动载荷监测。静载荷监测和动载荷监测在监测目的和监测内容等方面虽然很不相同,但对于承受以车辆载荷为主的桥梁结构来说,这两种性质的载荷监测,对于全面分析和了解桥梁结构的工作状态是同等重要的。静载荷监测一般是对桥梁的静态形变的监测,例如:针对不同结构的桥有不同的表现形式,如桥面的水平位移,垂直位移,桥墩的倾斜度,桥塔的水平位移等。而动载荷监测主要是对桥梁振动特性的监测。静载荷监测可以布置较多的测点,便于较全面地分析结构的受力状态,而动载荷监测则是研究桥梁结构在车辆载荷或其他动力载荷作用下的振动特性所必须的。目前,在桥梁结构的设计实践中,对车辆载荷所产生的影响是在静力计算的基础上引入荷载的冲击系数来考虑的。以跨长或加载长度作为参数的冲击系数,没有包括动力载荷作用性质的多样性,因此,不仅要进行静载荷监测,而且也有必要进行动载荷监测,以便为制定更完善的公路桥梁荷载动力计算公式提供依据。

按桥梁结构监测持续的时间,可分为长期监测和短期监测。对于鉴定性监测与一般性的研究性监测多采用短期监测的方法,只有那些需要长期监测的现象才采用长期监测的方法,例如:混凝土结构的长期徐变性能等。另外,对于特殊的大型桥梁结构或新型桥梁结构常常也采用长期监测和定期监测的方法。

从事桥梁监测技术的研究与实施,不仅要具有桥梁工程中的一些基本的、相关的专业知识,还须具备有关电子学、光学、机械学、计算机科学、仪器和仪表科学等专门知识。同时还要求具有开拓创新,胆大心细,勤奋求实的科研态度和工作作风。只有这样才能在桥梁监测这一具有交叉性质的领域内作出创造性的研究成果。

1.5 桥梁结构动态应变监测

正如上一节所说的那样,桥梁结构的动态监测是桥梁监测体系的重要组成部分,它与桥梁结构的静态监测相互补充,相互促进,从而构成一个完整的桥梁监测体系。特别是在营运中的桥梁,对其动态特性的监测将具有更大的实际意义和应用前景,本课题正是针对这一特点,以此为基础开展研究工作,使研究对象直接来自生产生活实际,这不仅使课题具有实际应用价值,而且为今后研究成果转化为直接的生产力奠定了良好的基础。

桥梁结构是承受以自重和各种车辆为主要载荷的结构物。桥梁的振动主要是由于车辆载荷以一定的速度在桥上通过而产生的,同时车辆驶过桥梁时,由于桥面的起伏不平或发动机的抖动等原因会使桥梁

的振动加剧[32]。此外，人群载荷、风动力及地震力的作用也会使桥梁发生振动。

为满足交通运输日益增长的要求，不但各种交通车辆的数量有了迅速的增长，而且车辆行驶的速度和载重量也有了很大的提高。并且近年来由于计算理论的不完善，以及新结构形式和轻质高强度材料的应用，都促使桥梁结构逐渐轻型化，因此，车辆载荷和其它动力载荷对桥梁结构的冲击和振动的影响，已经成为桥梁结构分析计算中不容忽视的重要因素之一。

桥梁的振动问题，影响因素复杂，只靠理论分析不易达到实践使用的结果。一般采用与实验相结合的研究方法，而振动监测正是解决工程振动问题所必不可少的手段。

桥梁的动态监测与其静态监测相比有其特殊性。引起桥梁结构产生振动的振源（例如：车辆、人群、阵风或地震力等）和结构的振动响应都是随时间变化的，而且结构在动载荷作用下的响应与结构本身的动力特性有密切的关系。动载荷产生的动力效应一般大于相应的静力效应，有时甚至一个不大的动力作用下，也可能使结构受到严重的损坏。

桥梁结构的动载荷监测按其目的不同，也可以分为生产鉴定性和科学研究性。在一般情况下，动载监测多在现场实际结构上进行。按需要也可在室内进行结构模型的动载试验，此时，动荷载可以采用激振器和大型模拟地震台，也可以在风洞内进行模拟。

本课题即是研究在动载荷的作用下桥梁的振动特性。我们知道，对于通常的振动而言可以用振动的位移、速度、加速度来加以描述，比如2000年4月在香港召开的大跨度桥梁监测会议上，同济大学讲述了采用压电加速度计来对桥梁的振动进行测量。这种常规的振动监测是采用加速度这一参数来描述桥梁的振动，并且在工程中应用是十分普遍的，而我们从另一个角度即应变入手，对桥梁在动载荷作用下产生的动态应变进行监测，以动态应变这个参数来描述桥梁结构的振动特性，评价桥梁结构的运行状况。这不仅是一种新颖的监测构想，而且具有重大的现实意义和实用价值。一方面为桥梁的实时运行提供了一个重要的技术参数，另一方面也为工程实际应用，即把科研成果转化为实际生产力打下了一个良好的基础。再者，桥梁在动载荷下，由于振动而产生的动态应变这一技术指标也是桥梁设计者所十分关心的，工程检测部门所高度重视的，在许多重要桥梁监测中就明确提出要对桥梁的动态应变进行测量。本课题以此为研究方向，目标明确，切实可行，具有广阔的市场前景和成果转化的巨大利润。

1.6 智能材料在桥梁监测领域中的应用

从前面的国内外桥梁监测研究现状的综述可以看出,新技术和新方法的应用是一个共同的发展趋势。特别是智能材料的应用,开辟了桥梁监测领域的新的研究方向,产生了大量的研究成果。在智能材料中,具有代表性的就是光导纤维和压电材料这两大类。在前面的叙述中可以看到,桥梁监测领域光纤传感器的应用是十分普遍的,同时压电材料的应用也有所报道,如采用压电传感器和执行器对钢架桥梁的螺钉松动情况进行监测等。由于在本论文中,采用压电片作为监测桥梁振动的动态应变传感器,所以在此仅对压电材料进行介绍。

1880年居理兄弟发现了压电效应,从此宣告了压电材料应用的诞生。本世纪40年代末到50年代发明了极化方向、形状可以控制的压电陶瓷的制备生产方法和技术,从此便开始了压电材料的广泛应用与研究[33]。

我们对某些电解质材料施加机械力时,就会引起它内部的正负电荷中心发生相对位移而产生电极化,从而导致介质两个表面上出现符号相反的束缚电荷,这便是压电效应,也称为正压电效应[34,35]。在智能材料结构系统中,压电材料被认为是自然的智能材料。在具有压电特性的材料中,材料的力学行为和电学行为不再是相互独立的,而是相互联系的,电激励可以产生力学响应,而机械激励又可以产生电响应。它们之间的量化关系由压电方程来描述。

我们采用PZT压电陶瓷片作为传感器,将其粘贴于桥梁的被测部位,使其同桥梁一起产生形变,这样PZT压电陶瓷片所感受的应变和它输出的电荷信号成正比。然后经过电荷放大器,前置放大器,低通滤波器后,由A/D转换器将动态模拟信号转化成数字信号。该数字信号由放置在桥梁附近的工控机采集和存储,然后由相应的软件进行分析。传统上对于普通的振动引起的动态应变测量一般采用应变片传感的方法,但是应变片稳定性较差,零点漂移厉害,特别是测量引线过长时,会引起过大的干扰信号,造成信号的信噪比严重下降。我们采用PZT压电陶瓷来进行应变传感,由于是电荷信号,所以测量引线对信号影响很小,这对于桥梁测量来说特别重要,因为在测量过程中,信号引线通常很长,短则十来米,长则几百米。如果是普通的电流信号或电压信号,经过这样长距离的传输后,信号衰减特别厉害;而电荷信号则不存在这个问题,所以PZT压电陶瓷片这种智能材料作为动态应变传感器具有实际的工程应用意义。另外,压电材料品种众多,除了压电片PZT外,常用的还有压电薄膜PVDF,它们在本质上都是一样的,所以可以互换使用。

1.7 现代通讯技术在桥梁监测领域中的应用

现代社会是信息化的社会，信息的获取、加工、传输、查询和显示反映了整个信息世界的特征和运作。作为桥梁监测的新的发展方向和发展趋势，监测信息的获取、传输和处理完全要实现自动化和智能化，这样才能与我们这个信息高度发达的社会化运作相适应、相协调。

桥梁一般位于交通干线上，如果在每一座桥梁附近建一个现代化的测试中心，这样会造成投资重复，同时也是我们国家的人力、物力、财力所难以承受的；另一方面，为了使桥梁旁边的测试中心正常地运作，要为其长期配备大量的工程技术人员、测试专家、桥梁专家等等，而这些专家不可能长期位于测试现场，而往往在各个大专院校、科研院所之中。为了把有限的人力、物力、财力运用于桥梁监测系统，一个较好的方法是远程监测。即测试现场实现无人化操作，现场的传感器系统在现场控制系统的指挥协调下，进行数据的采集，然后借助于调制解调器经过目前最发达的电话网络系统自动把数据传送到研究中心。只要建立一个桥梁监测研究中心，就可以实现众多桥梁的自动化监测。这样不仅方便、快捷，而且可以高效率地利用有限的资源。

我们知道，随着科技的发展，已经有了网络化仪器的概念，目前在检测领域正在兴起远程测量的热潮。本课题的桥梁振动远程监测系统的研究正是顺应了仪器仪表领域的新的发展趋势，同时也进一步推动了这一方向的研究更快、更好地向前迈进。

桥梁监测是一个大型研究项目，它所涉及的监测参数众多，需要各个领域的科研人员和工程技术人员的相互配合和团结协作。本课题着眼于桥梁结构监测中的一个方面来开展研究与开发工作。这样重点突出，研究深入，不仅可以做到技术上的创新，而且可以保证研究工作的质量和效率。正如本论文题目所写的那样，课题的研究对象是桥梁，着手的方向是桥梁的振动特性，采用的监测手段是动态应变的压电传感技术，实施的途径是远程监测。本论文将针对作者已经开展的研究工作和已经取得的初步结果做出论述。第二章将对桥梁振动理论进行分析，为压电传感部位的选取和振动信号的分析提供理论基础，第三章将对采用压电片进行动态应变传感的原理及计算进行论述，第四章将对远程数据通讯系统进行分析，第五章将综合前面三章的内容，介绍我们的总体远程监测系统的建立和运作，并从系统的高度讲述实际工程中的技术特点，第六章我们将对红槽房大桥的实际测试结果进行初步的分析，从中还可以对桥上的交通状况进行评价。整篇论文重点突出，条理清晰，开创了新的研究方法，并取得了良好的研究结果。

第二章 桥梁振动分析

提要 本章根据弹性体振动理论建立了桥梁振动的力学模型，并对工程实践中最常见的三种形式的梁：两端简支梁、两端固定梁、一端固定一端简支梁的振形方程进行了推导，论述了其各阶振动模态之间的独立性，分析了这三种形式的梁的低阶模态的动态应变分布，最后对桥梁的动态应变传感部位的选取进行了初步的研究。

2.1 概述

振动可以解释为结构物在静平衡位置附近的一种反复运动，是自然界和工程中十分普遍的现象，几乎每一种机械和建筑物都离不开振动问题。最简单的描述振动的力学模型即是一个不发生形变的物体放在一个忽略质量的弹簧上所组成的“弹簧——质量”系统[36]。从运动学的观点看，结构振动是指结构系统的某些物理量（位移、速度、加速度等）在某一数值附近随时间 t 的变化关系[37]。振动可以根据不同的特征作出不同的分类。按照产生振动的原因分有三种：自由振动、受迫振动、自激振动；按照振动的规律分有三种：简谐振动、非简谐振动、随机振动；按振动系统的结构参数的特性分有两种：线性振动和非线性振动；按振动系统的自由度分有两种：单自由度振动和多自由度振动；按照振动位移的特征分有三种：扭转振动、纵向振动和横向振动[38]。

现在对于我们所研究的桥梁结构，从振动系统的自由度来说其振动是多自由度振动，如果采用有限元分析方法，其振动的自由度是有限的，如果采用弹性体振动分析方法，桥梁是一个无限自由度的振动系统[39]。从振动的位移特性来说，桥梁振动最主要的是横向振动，有时也伴有轻微的扭转振动。本课题的研究对象是位于渝长高速公路上的红槽房大桥，引起振动的原因主要可以归结为如下几个方面：1) 汽车自身的动力振动引起的桥梁振动，如汽车发动机的振动和悬架的振动等；2) 汽车轮胎和桥面的相互作用引起的桥梁振动，如桥面不平等；3) 汽车运动形成的移动载荷对桥跨结构所产生的振动；4) 地震力等自然因素诱发的振动。

关于振动问题早在 200 多年前就已经引起了人们的重视。18 世纪下半叶，著名数学家欧拉 (L.Euler) 曾对梁的横向振动进行过研究。他分析了悬臂梁、简支梁和固定梁的横向振动，提出了梁的横向振动自振频率的计算公式，由于当时理论和技術水平的限制，欧拉只能做

出一些半定量的推断[32]。现在随着数学工具的巨大进步以及计算机的普遍应用，桥梁振动分析理论得到了深入的发展，如有限元分析，弹性体振动理论等都在桥梁振动分析中发挥了极其重要的作用。在本论文中，我们将采用现在桥梁振动分析中所普遍采用的弹性体振动理论来进行分析，主要针对三种形式的桥梁结构，即两端简支梁、一端固定一端简支梁和两端固定梁，这三种形式的桥梁在实际工程中是比较常见的。又由于在实际桥梁的振动中，最主要的振动形式是横向振动，所以我们仅对桥梁的横向振动进行论述。通过分析桥梁横向振动的各阶振形和动态应变分布，为后面确定压电片的传感部位和进行实际的红槽房大桥振动监测及振动信号的分析奠定基础。

2.2 桥梁的横向振动

大型桥梁一般是由单跨梁一跨一跨连接起来而组成的，当然斜拉桥、悬索桥等特殊桥梁例外，各个单跨梁之间一般留有伸缩缝，以防止梁由于温度变化而产生的热胀冷缩。这样我们可以从单跨梁入手来对桥梁的横向振动进行分析。

2.2.1 梁的横向振动模型

单跨梁的横向自由振动即是梁在铅垂平面内的自由振动。为了对其振动特性进行分析，首先我们要建立它的数学模型。为了简化对象的复杂性，故作如下假设：

- 1、梁的各截面的中心主轴在同一平面内，并且只在该平面内作横向振动；
- 2、梁的截面尺寸与其长度之比较小，可忽略转动惯量和剪切变形的影响；
- 3、梁的横向振动符合小挠度平面弯曲假设，即横向振动的振幅很小，在线性范围内。

前面三点假设是在分析弹性梁振动时所作的普遍假设，并且被工程实践所证实了的在一般情况下普遍成立的假设。于是只考虑由弯曲引起的变形，而不计由剪切引起的变形及转动惯量的影响，由此建立梁的弯曲振动的力学模型，即欧拉——伯努利梁(Eular-Bernoulli beam)模型。这样的建模方法在桥梁动力分析中是普遍采用的[32]。

下面我们来分析一根棱柱形梁在 $X-Y$ 平面内所作的横向自由振动，以距梁左端 x 截面处的微元段 dx 为研究对象，并分析其受力情况如图 2.1 所示。图中 x 表示距梁左端的距离， y 表示梁在横截面的对称平面内的横向位移， l 表示梁的长度， A 表示梁的横截面积， m 表示梁

的单位长度的质量， ρ 表示梁的单位体积质量（质量密度）， J 表示梁的横截面对中心主轴的惯性矩， EJ 表示梁的截面抗弯刚度。 V 表示作用于 x 截面上的剪力， M 表示作用于 x 截面上的弯矩， $V + \frac{\partial V}{\partial x} dx$ 表示作用于 $x+dx$ 截面上的剪力， $M + \frac{\partial M}{\partial x} dx$ 表示作用于 $x+dx$ 截面上的弯矩， $mdx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \rho A dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ 表示微元段产生的惯性力。

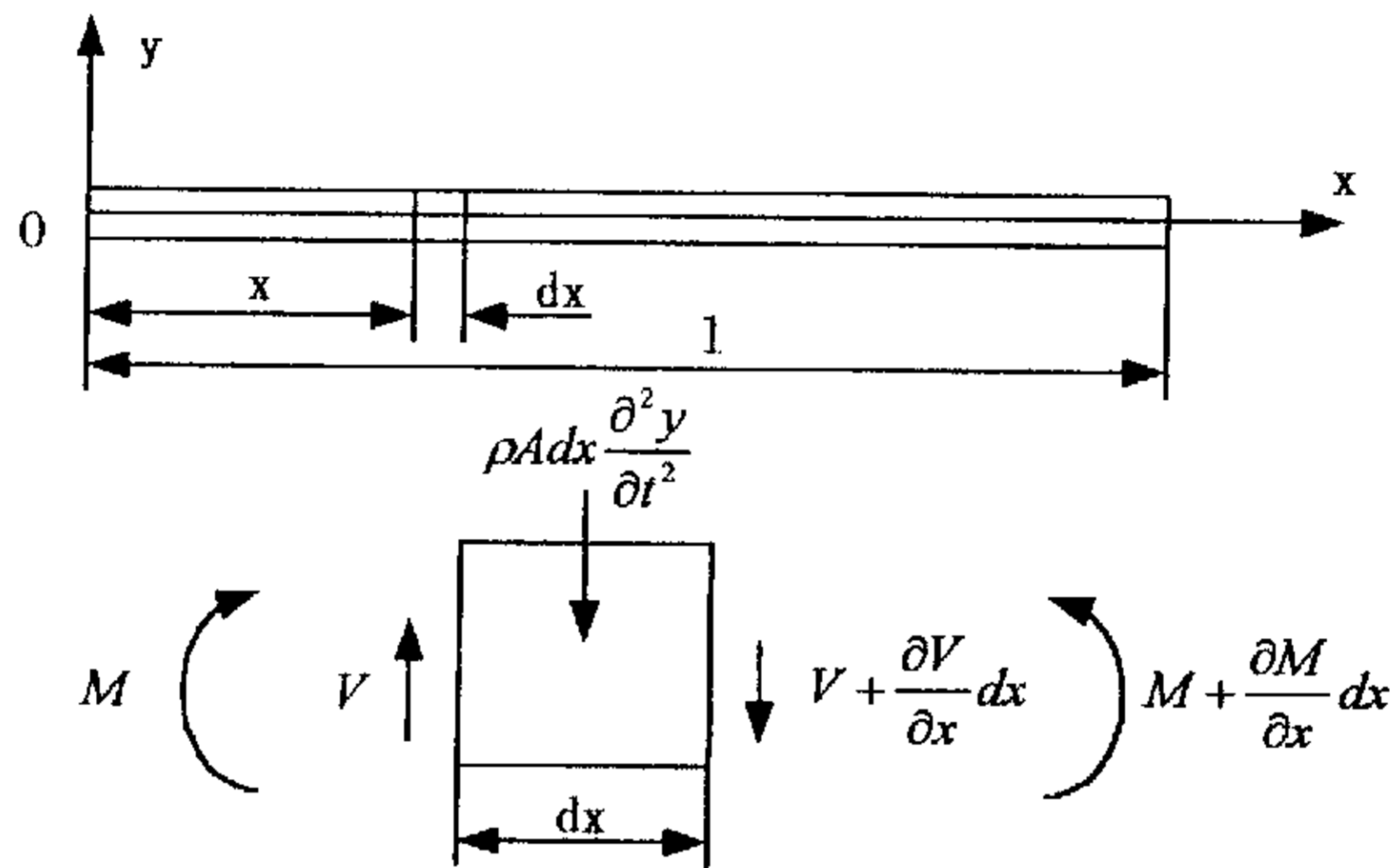


图2.1: 梁的横向自由振动受力分析图

我们根据牛顿第二定律可以得出如下方程式：

$$V - (V + \frac{\partial V}{\partial x} dx) - \rho A dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

以图 2.1 中的微元段右面（即 $x+dx$ 截面）上的任一点为转动中心作力矩平衡方程如下：

$$(M + \frac{\partial M}{\partial x} dx) - M - V dx + \rho A dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \cdot \frac{dx}{2} = 0 \quad (2.2)$$

忽略 (2.2) 式中的 $(dx)^2$ 二阶小项，于是我们可以得到：

$$\frac{\partial M}{\partial x} = V \quad (2.3)$$

由材料力学基本理论可知[40]: $M = EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ (2.4)

利用 (2.3) 式和 (2.4) 式可以得:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} M = \frac{\partial^2}{\partial x^2} (EJ \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) = EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (2.5)$$

将 (2.5) 式代入 (2.1) 式可得:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2.6a)$$

简记为: $\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ (2.6b)

其中: $a = \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}}$, (2.6b) 式即为等截面梁横向自由振动的运动方程,

它是一个关于 x 和 t 的四阶齐次偏微分方程。为了求解该微分方程, 我们可以采用分离变量法, 设解的形式为:

$$y(x, t) = Y(x) \cdot \Phi(t) \quad (2.7)$$

根据 (2.7) 式我们可以得到:

$$\Phi(t) \cdot \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} = -\frac{1}{a^2} \cdot Y(x) \cdot \frac{d^2 \Phi(t)}{dt^2} \quad (2.8)$$

由分离变量法可得:

$$\frac{a^2}{Y(x)} \cdot \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} = -\frac{1}{\Phi(t)} \cdot \frac{d^2 \Phi(t)}{dt^2} = \omega_n^2 \quad (2.9)$$

其中 ω_n 为常数, 表示梁的固有振动频率。

于是我们就可以得到如下两个可以求解的常微分方程:

$$\frac{d^2 \Phi(t)}{dt^2} + \omega_n^2 \Phi(t) = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - \frac{\omega_n^2}{a^2} Y(x) = 0 \quad (2.11)$$

于是 (2.10) 式的解为:

$$\Phi(t) = A_1 \cos \omega_n t + B_1 \sin \omega_n t \quad (2.12)$$

(2.11) 式可以改写为:

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - \lambda^4 Y(x) = 0 \quad (2.13)$$

其中:
$$\lambda^4 = \frac{\omega_n^2}{a^2} = \frac{\rho A}{EJ} \omega_n^2$$

于是采用特征值法可以得到 (2.13) 式的解如下:

$$Y(x) = A' e^{-i\lambda x} + B' e^{i\lambda x} + C' e^{-\lambda x} + D' e^{\lambda x} \quad (2.14)$$

有如下符号规定:

$$\begin{aligned} ch\lambda x &= \frac{e^{\lambda x} + e^{-\lambda x}}{2} & sh\lambda x &= \frac{e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}}{2} \\ e^{\pm i\lambda x} &= ch\lambda x \pm sh\lambda x & e^{\pm i\lambda x} &= \cos \lambda x \pm i \sin \lambda x \end{aligned}$$

于是 (2.14) 可以改写为:

$$\begin{aligned} Y(x) &= i(B' - A') \sin \lambda x + (B' + A') \cos \lambda x + (D' - C') sh\lambda x + (D' + C') ch\lambda x \\ &= A \sin \lambda x + B \cos \lambda x + C sh\lambda x + D ch\lambda x \end{aligned} \quad (2.15)$$

(2.15) 式就是梁横向自由振动的振型函数。

将 (2.15) 与 (2.12) 式代入 (2.7) 式, 即可求得梁的横向自由振动的解为:

$$y(x, t) = (A \sin \lambda x + B \cos \lambda x + C sh\lambda x + D ch\lambda x) \cdot (A_1 \cos \omega_n t + B_1 \sin \omega_n t) \quad (2.16)$$

上式中有六个待定常数, 其中 A_1, B_1 取决于振动的初始条件, A, B, C, D 取决于梁的边界条件。

为了以后运算的简便, 我们可以引入克雷诺夫函数:

$$\begin{aligned}
 S(\lambda x) &= \frac{1}{2} \cdot (ch\lambda x + \cos \lambda x) & U(\lambda x) &= \frac{1}{2} \cdot (ch\lambda x - \cos \lambda x) \\
 T(\lambda x) &= \frac{1}{2} \cdot (sh\lambda x + \sin \lambda x) & V(\lambda x) &= \frac{1}{2} \cdot (sh\lambda x - \sin \lambda x)
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

这四个函数具备如下性质:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dx} &= \lambda V, & \frac{dT}{dx} &= \lambda S, & \frac{dU}{dx} &= \lambda T, & \frac{dV}{dx} &= \lambda U, \\
 \frac{d^2S}{dx^2} &= \lambda^2 U, & \frac{d^2T}{dx^2} &= \lambda^2 V, & \frac{d^2U}{dx^2} &= \lambda^2 S, & \frac{d^2V}{dx^2} &= \lambda^2 T, \\
 \frac{d^3S}{dx^3} &= \lambda^3 T, & \frac{d^3T}{dx^3} &= \lambda^3 U, & \frac{d^3U}{dx^3} &= \lambda^3 V, & \frac{d^3V}{dx^3} &= \lambda^3 S,
 \end{aligned}$$

将上面式子代入 (2.15), 则梁振动的振型函数表达式可改写为:

$$Y(x) = C_1 S(\lambda x) + C_2 T(\lambda x) + C_3 U(\lambda x) + C_4 V(\lambda x) \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
 \text{其中: } \frac{1}{2}(C_2 - C_4) &= A, & \frac{1}{2}(C_1 - C_3) &= B, \\
 \frac{1}{2}(C_2 + C_4) &= C, & \frac{1}{2}(C_1 + C_3) &= D,
 \end{aligned}$$

对 (2.18) 式分别求一阶、二阶导数可得:

$$\frac{dY}{dx} = \lambda [C_1 V(\lambda x) + C_2 S(\lambda x) + C_3 T(\lambda x) + C_4 U(\lambda x)] \tag{2.19}$$

$$\frac{d^2Y}{dx^2} = \lambda^2 [C_1 U(\lambda x) + C_2 V(\lambda x) + C_3 S(\lambda x) + C_4 T(\lambda x)] \tag{2.20}$$

(2.19) 式和 (2.20) 式将用于后面的边界条件分析。对于我们的研究对象桥梁而言, 主要有如下几种形式的边界条件: 两端简支, 两端固定, 一端固定一端简支。这三种形式的桥梁在建筑施工中最为常见, 下面我们分别研究这三种不同支承的梁的横向振动的固有频率和主振型。因为在工程实际中振动的高阶模态是很少发生的, 即使出现也会很快衰减, 所以我们主要针对振动的前几阶模态进行分析。

2.2.2 两端简支梁的横向振动

这种梁的边界条件为两端的位移为零, 两端的弯矩也为零。将 $Y|_{x=0} = 0$

带入 (2.18) 式可得: $C_1 = 0$ (2.21)

将 $\frac{d^2 Y}{dx^2} \Big|_{x=0} = 0$ 带入 (2.20) 式可得: $C_3 = 0$ (2.22)

将 $Y \Big|_{x=l} = 0$ 和 (2.21) 及 (2.22) 带入 (2.18) 式可得:

$$C_2 T(\lambda l) + C_4 V(\lambda l) = 0 \quad (2.23)$$

将 $\frac{d^2 Y}{dx^2} \Big|_{x=l} = 0$ 和 (2.21) 及 (2.22) 带入 (2.20) 式可得:

$$C_2 V(\lambda l) + C_4 T(\lambda l) = 0 \quad (2.24)$$

由 (2.23) 和 (2.24) 可知, 要使 C_2, C_4 有非零解, 其系数行列式必须为零, 即:

$$\begin{vmatrix} T(\lambda l) & V(\lambda l) \\ V(\lambda l) & T(\lambda l) \end{vmatrix} = 0 \quad (2.25)$$

化简后可得: $sh \lambda l \cdot \sin \lambda l = 0$, 由于 $sh \lambda l \neq 0$, 所以有:

$$\sin \lambda l = 0 \quad (2.26)$$

(2.26) 式就是两端简支梁的横向振动频率方程, 此方程的解即是系统的各阶固有频率。解方程 (2.26) 可得:

$$\lambda_i l = i\pi \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (2.27)$$

于是可以得到两端简支梁横向振动固有频率的表达式为:

$$\omega_{ni} = \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}} \lambda_i^2 = \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}} \cdot \left(\frac{i\pi}{l}\right)^2 \quad (2.28)$$

将 (2.21) 式和 (2.22) 式代入 (2.18) 式, 即可得两端简支的梁的横向振动的振型函数为:

$$\begin{aligned} Y(x) &= C_2 T(\lambda x) + C_4 V(\lambda x) \\ &= D \left[\frac{1}{2} (sh \lambda x + \sin \lambda x) - \frac{1}{2} (sh \lambda x - \sin \lambda x) \right] = D \sin \lambda x \quad (2.29) \end{aligned}$$

其中 $D = C_2 = -C_4$ 由此可见, 两端简支梁的振型函数是一个正弦函数,

若将与各阶固有频率 ω_n 对应的 $\lambda_n = \frac{i\pi}{l}$ 的值代入 (2.29) 式, 即可求得两端简支梁的各阶主振型。其前三阶主振型如图 2.2 所示, 图中 y_1, y_2, y_3 分别表示第一阶、第二阶和第三阶模态的主振形。

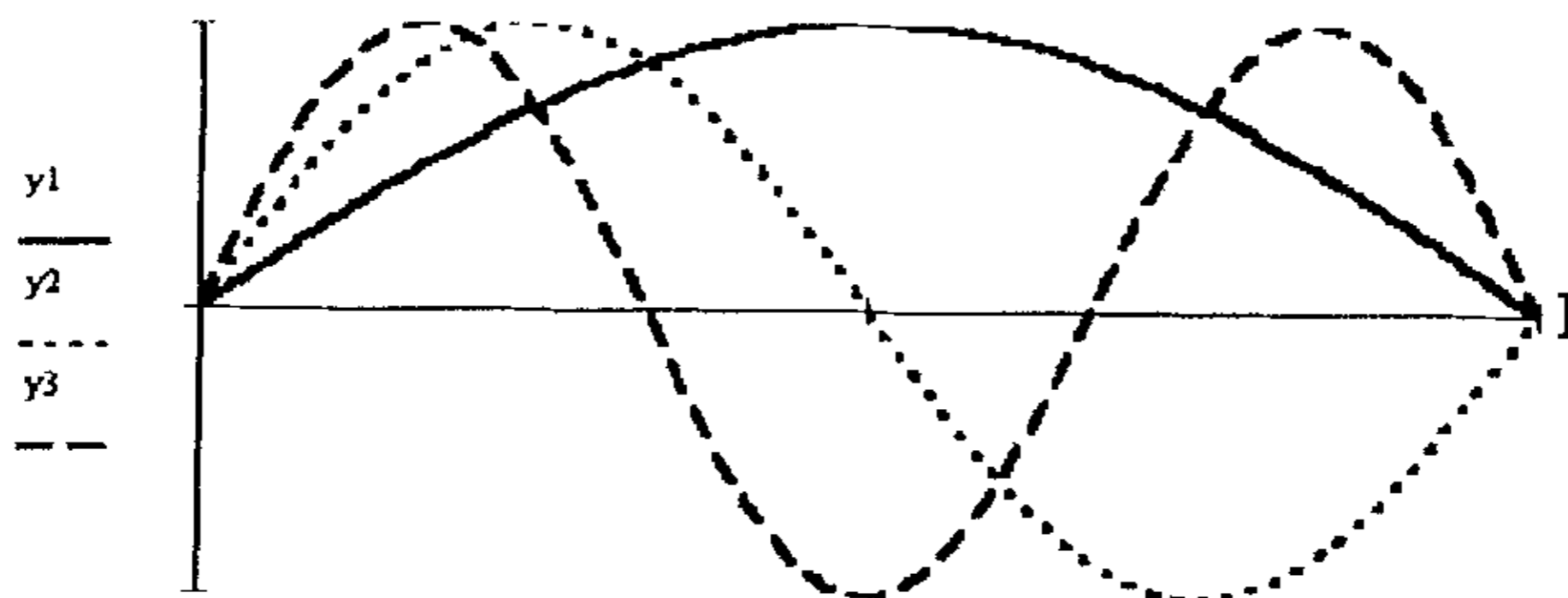


图2.2 两端简支梁的前三阶主振形

2.2.3 两端固定梁的横向振动

这种梁的边界条件为两端的位移为零, 两端的转角也为零。将 $Y|_{x=0} = 0$

带入 (2.18) 式可得: $C_1 = 0$ (2.30)

将 $\frac{dY}{dx}|_{x=0} = 0$ 带入 (2.19) 式可得: $C_2 = 0$ (2.31)

将 $Y|_{x=l} = 0$ 和 (2.30) 及 (2.31) 带入 (2.18) 式可得:

$$C_3 U(\lambda) + C_4 V(\lambda) = 0 \quad (2.32)$$

将 $\frac{dY}{dx}|_{x=l} = 0$ 和 (2.30) 及 (2.31) 带入 (2.19) 式可得:

$$C_3 T(\lambda) + C_4 U(\lambda) = 0 \quad (2.33)$$

由 (2.32) 和 (2.33) 可知, 要使 C_3, C_4 有非零解, 其系数行列式必须为零, 即:

$$\begin{vmatrix} U(\lambda) & V(\lambda) \\ T(\lambda) & U(\lambda) \end{vmatrix} = 0 \quad (2.34)$$

化简后可得： $\cos \lambda l \cdot ch \lambda l = 1$ (2.35)

(2.35) 式就是两端固定的梁的横向振动频率方程，利用此方程的解可求出系统的各阶固有频率。但是该方程是一个超越方程无法采用普通方法求解，只能用数值分析的方法求解，我们通过计算机叠代的方法求得低阶相邻的根如表 2.1 所示：

表 2.1 两端固定梁的横向振动频率方程的数值解

$i(\lambda_i l)$	0	1	2	3	4
数值解	0	4.730	7.853	10.996	14.173
$i(\lambda_i l)$	5	6	7	8	9
数值解	17.279	20.420	23.562	26.704	29.845

根据上述表格我们可以得到两端固定梁的横向振动频率计算式为：

$$\omega_{mi} = a\lambda_i^2 = \left(\frac{\lambda_i l}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}} \quad (2.36)$$

将前面已经求得的 $C_1 = 0$ ， $C_2 = 0$ ，和 $\frac{C_4}{C_3} = \frac{-T(\lambda)}{U(\lambda)}$ 代入 (2.18) 式，即

可得两端固定梁的振型函数为：

$$Y(x) = D \left[ch \lambda x - \cos \lambda x - \frac{sh \lambda l + \sin \lambda l}{ch \lambda l - \cos \lambda l} (sh \lambda x - \sin \lambda x) \right] \quad (2.37)$$

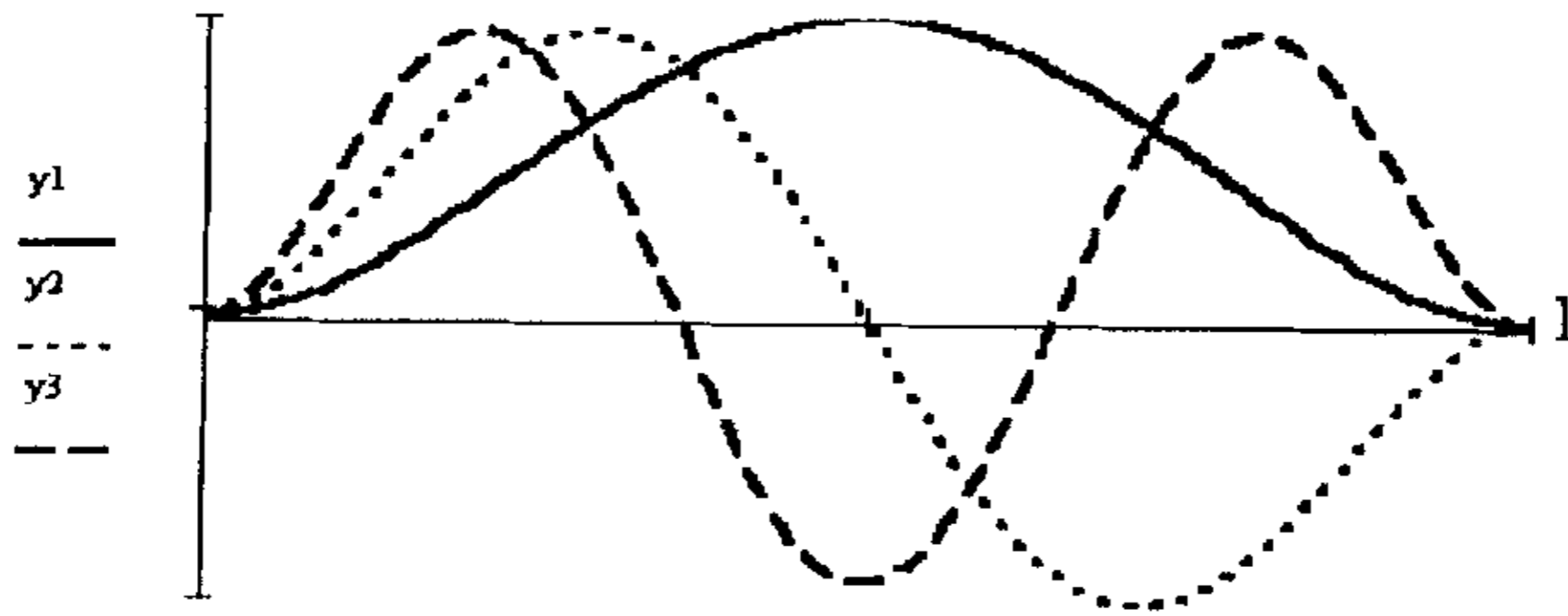


图2.3 两端固定梁的前三阶主振形

其中 $D = \frac{1}{2}C_3$, 为任意常数. 若将与各阶固有频率 ω_{ni} 对应的 λ_i 的值代

入 (2.37) 式, 即可求得两端固定梁的各阶主振型. 其前三阶主振型如图 2.3 所示, 图中 y_1, y_2, y_3 分别表示第一阶、第二阶和第三阶模态的主振形.

2.2.4 一端固定一端简支梁的横向振动

这种梁的边界条件为固定端的位移和转角为零, 简支端的位移和弯矩为零. 设 $x=0$ 处为梁的固定端, 将 $Y|_{x=0}=0$ 带入 (2.18) 式可得:

$$C_1 = 0 \quad (2.38)$$

$$\text{将 } \frac{dY}{dx}|_{x=0}=0 \text{ 带入 (2.19) 式可得: } C_2 = 0 \quad (2.39)$$

将 $Y|_{x=l}=0$ 和 (2.38) 及 (2.39) 带入 (2.18) 式可得:

$$C_3U(\lambda) + C_4V(\lambda) = 0 \quad (2.40)$$

将 $\frac{d^2Y}{dx^2}|_{x=l}=0$ 和 (2.38) 及 (2.39) 带入 (2.20) 式可得:

$$C_3S(\lambda) + C_4T(\lambda) = 0 \quad (2.41)$$

由 (2.40) 式和 (2.41) 式可知, 要使 C_3, C_4 有非零解, 其系数行列式必须为零, 即:

$$\begin{vmatrix} U(\lambda) & V(\lambda) \\ S(\lambda) & T(\lambda) \end{vmatrix} = 0 \quad (2.42)$$

$$\text{化简后可得: } \frac{\sin(\lambda)}{\cos(\lambda)} = \frac{sh(\lambda)}{ch(\lambda)} \quad (2.43)$$

(2.43) 式就是一端固定一端简支梁的横向振动频率方程, 利用此方程的解可求出系统的各阶固有频率. 但是该方程是一个超越方程无法采用普通方法求解, 只能用数值分析的方法求解, 我们通过计算机叠代

的方法求得低阶相邻的根如表 2.2 所示:

表 2.2 一端固定一端简支梁的横向振动频率方程的数值解

$i (\lambda_i l)$	0	1	2	3	4
数值解	0	3.927	7.069	10.210	13.352
$i (\lambda_i l)$	5	6	7	8	9
数值解	16.493	19.635	22.776	25.918	29.060

根据上述表格我们可以得到一端固定一端简支梁的横向振动频率计算式为:

$$\omega_m = a\lambda_i^2 = \left(\frac{\lambda_i l}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}} \quad (2.44)$$

将前面已经求得的 $C_1 = 0$, $C_2 = 0$, 和 $\frac{C_4}{C_3} = \frac{-S(\lambda l)}{T(\lambda l)}$ 代入 (2.18) 式, 即

可得一端固定一端简支的梁的振型函数为:

$$Y(x) = D \left[ch\lambda x - \cos \lambda x - \frac{ch\lambda l + \cos \lambda l}{sh\lambda l + \sin \lambda l} (sh\lambda x - \sin \lambda x) \right] \quad (2.45)$$

其中 $D = \frac{1}{2}C_3$, 为任意常数. 若将与各阶固有频率 ω_m 对应的 λ_i 的值代

入 (2.45) 式, 即可求得一端固定一端简支梁的各阶主振型. 其前三阶主振型如图 2.4 所示, 图中 y_1, y_2, y_3 分别表示第一阶、第二阶和第三阶模态的主振形。

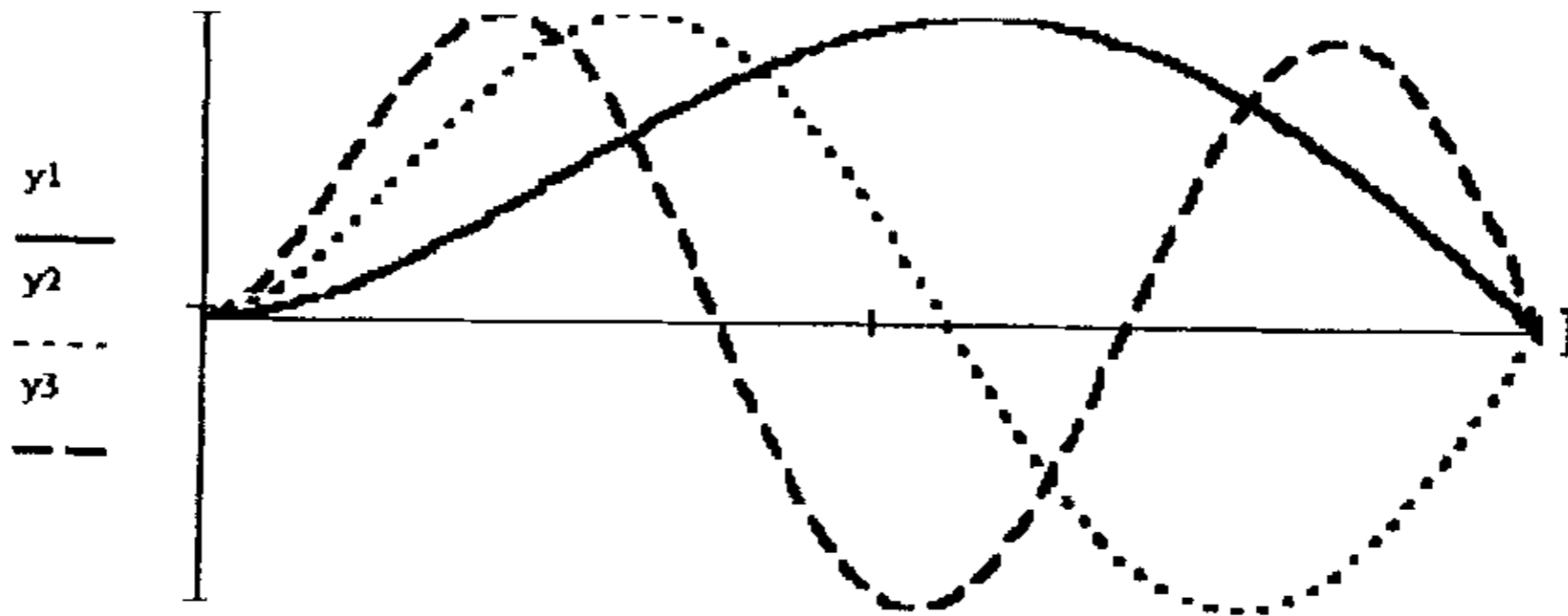


图2.4 一端固定一端简支梁的前三阶主振形

2.3 梁的各阶横向主振动之间的独立性

正如前面我们所分析的那样，梁是一个无穷多个自由度的振动系统，不同阶的振动的固有频率和主振形是各不相同的。设 $Y_r(x)$ 为第 r 阶主振动，其固有频率为 ω_r ， $Y_s(x)$ 为第 s 阶主振动，其固有频率为 ω_s ， $Y_r(x)$ 和 $Y_s(x)$ 必须满足 (2.13) 即：

$$\frac{d^4 Y_r(x)}{dx^4} = \lambda_r^4 Y_r(x) \quad (2.46)$$

$$\frac{d^4 Y_s(x)}{dx^4} = \lambda_s^4 Y_s(x) \quad (2.47)$$

我们进行如下计算：

$$\begin{aligned} \int_0^l Y_s(x) \frac{d^4 Y_r(x)}{dx^4} dx &= Y_s(x) \frac{d^3 Y_r(x)}{dx^3} \Big|_0^l - \int_0^l \frac{dY_s(x)}{dx} \frac{d^3 Y_r(x)}{dx^3} dx \\ &= Y_s(x) \frac{d^3 Y_r(x)}{dx^3} \Big|_0^l - \left[\frac{dY_s(x)}{dx} \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2} \Big|_0^l - \int_0^l \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2} dx \right] \\ &= \left[Y_s(x) \frac{d^3 Y_r(x)}{dx^3} - \frac{dY_s(x)}{dx} \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2} \right] \Big|_0^l + \int_0^l \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2} dx \\ &= \lambda_r^4 \int_0^l Y_s(x) Y_r(x) dx \\ \int_0^l Y_r(x) \frac{d^4 Y_s(x)}{dx^4} dx &= Y_r(x) \frac{d^3 Y_s(x)}{dx^3} \Big|_0^l - \int_0^l \frac{dY_r(x)}{dx} \frac{d^3 Y_s(x)}{dx^3} dx \\ &= Y_r(x) \frac{d^3 Y_s(x)}{dx^3} \Big|_0^l - \left[\frac{dY_r(x)}{dx} \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} \Big|_0^l - \int_0^l \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2} \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} dx \right] \\ &= \left[Y_r(x) \frac{d^3 Y_s(x)}{dx^3} - \frac{dY_r(x)}{dx} \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} \right] \Big|_0^l + \int_0^l \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2} \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} dx \\ &= \lambda_s^4 \int_0^l Y_r(x) Y_s(x) dx \end{aligned}$$

把以上两式相减可得：

$$(\lambda_r^4 - \lambda_s^4) \int_0^l Y_r(x) Y_s(x) dx = \left[Y_s(x) \frac{d^3 Y_r(x)}{dx^3} - Y_r(x) \frac{d^3 Y_s(x)}{dx^3} \right] \Big|_0^l - \left[\frac{dY_s(x)}{dx} \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2} - \frac{dY_r(x)}{dx} \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} \right] \Big|_0^l$$

上式右端实际上是梁的边界条件，无论梁的端点是自由的、固定的或简支的，将边界条件代入后它都等于零。因此有：

$$(\lambda_r^4 - \lambda_s^4) \int_0^l Y_r(x) Y_s(x) dx = 0 \quad (2.48)$$

只要 $r \neq s$ ，则 $\lambda_r \neq \lambda_s$ ，故有：

$$\int_0^l Y_r(x) Y_s(x) dx = 0 \quad (r \neq s) \quad (2.49)$$

(2.49) 式是梁的主振型对于质量的正交条件，主要用于梁的振动动能的计算分析。另外下面一项也是梁的边界条件，无论梁的端点是什么形式，它均为零，即：

$$\left[Y_r(x) \frac{d^3 Y_s(x)}{dx^3} - \frac{dY_r(x)}{dx} \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} \right] \Big|_0^l = 0 \quad (2.50)$$

利用上述条件，可得：

$$\int_0^l \frac{d^2 Y_r(x)}{dx^2} \frac{d^2 Y_s(x)}{dx^2} dx = 0 \quad (r \neq s) \quad (2.51)$$

(2.51) 式是梁的主振型对于刚度的正交条件，主要用于梁的振动势能的计算分析。

由上面分析所得出的多自由度系统不同主振动的正交性以及由振动分析理论可知：多自由度系统同时存在两种不同阶的主振动时，系统的动能和势能分别是这两种主振动单独存在时，每一种主振动所产生的动能和势能之和。在没有外部能量交换的情况下，对于每一个主振动来说，它的动能和势能之和为一个常数，即多自由度系统振动过程中，每一个主振动内部的动能和势能可以相互转化，而在各阶主振动之间不会发生能量的传递，彼此是相互独立的。这样我们在采用压电片来对梁的振动的动态应变进行传感时，就可以分别对各阶振动产生的动态应变进行分离。

2.4 梁的各阶横向主振动的动态应变分析

根据材料力学中梁弯曲变形的基本公式可以求得梁弯曲时中性层的曲率为：

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.52)$$

其中 $M(x)$ 表示弯矩， $\rho(x)$ 表示曲率半径， E 表示弹性模量， I 表示截面惯性矩。由 (2.52) 式可以推导出梁的挠曲线方程，从而可以求得梁的挠度和转角。由高等数学可知，平面曲线 $y=f(x)$ 上任一点的曲率为：

$$\frac{1}{\rho(x)} = \pm \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.53)$$

将 (2.53) 代入 (2.52) 式我们可以得到：

$$\frac{M(x)}{EI} = \pm \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.54)$$

上式即是梁的挠曲线微分方程，这个方程是一个二阶非线性常微分方程，一般难于求解。但在工程实际中，梁的变形一般较小，这一点在我们后续的实验测试中也得到了验证，这就意味着挠曲线一般为平坦的曲线，即 $\frac{dy}{dx}$ 的值很小，其平方之后与 1 相比可以忽略不记，因此

将 (2.54) 式可以简化为：

$$\frac{M(x)}{EI} = \pm \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.55)$$

上式右边的正负号取决于弯矩正负号的规定和坐标系的选取，所以在一般讨论中不考虑其符号。由材料力学中梁横截面上任一点处应变的计算式：

$$S_f = \frac{M(x)b}{EI} \quad (2.56)$$

其中 S_f 表示应变， b 表示横截面上任一点的到中性轴的距离（该点在中性轴上方时取负，在中性轴下方时取正）。考虑到我们在桥梁测量中是将压电片粘贴于桥的大梁的底部，故将公式中的 b 取为 b_b ， b_b 为桥的大梁底部到中性层的距离。将 (2.56) 式代入 (2.55) 式我们可以得到梁在各阶主振动下的底部应变计算式为：

$$S_f = b_b \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (2.57)$$

我们主要考虑如下三种形式的梁：两端简支梁、两端固定梁和一端简支一端固定梁。下面将对这三种形式的梁在不同主振形下的底部应变作出分析。

2.4.1 两端简支梁的动态应变分析

前面我们已经对两端简支的梁的振形表达式作了分析,将其代入 (2.57) 即可得：

$$S_f(x) = C \sin(\lambda x) \quad (2.58)$$

其中 C 为一个常数。

于是其前三阶主振形所对应的应变分布如图 2.5 所示。

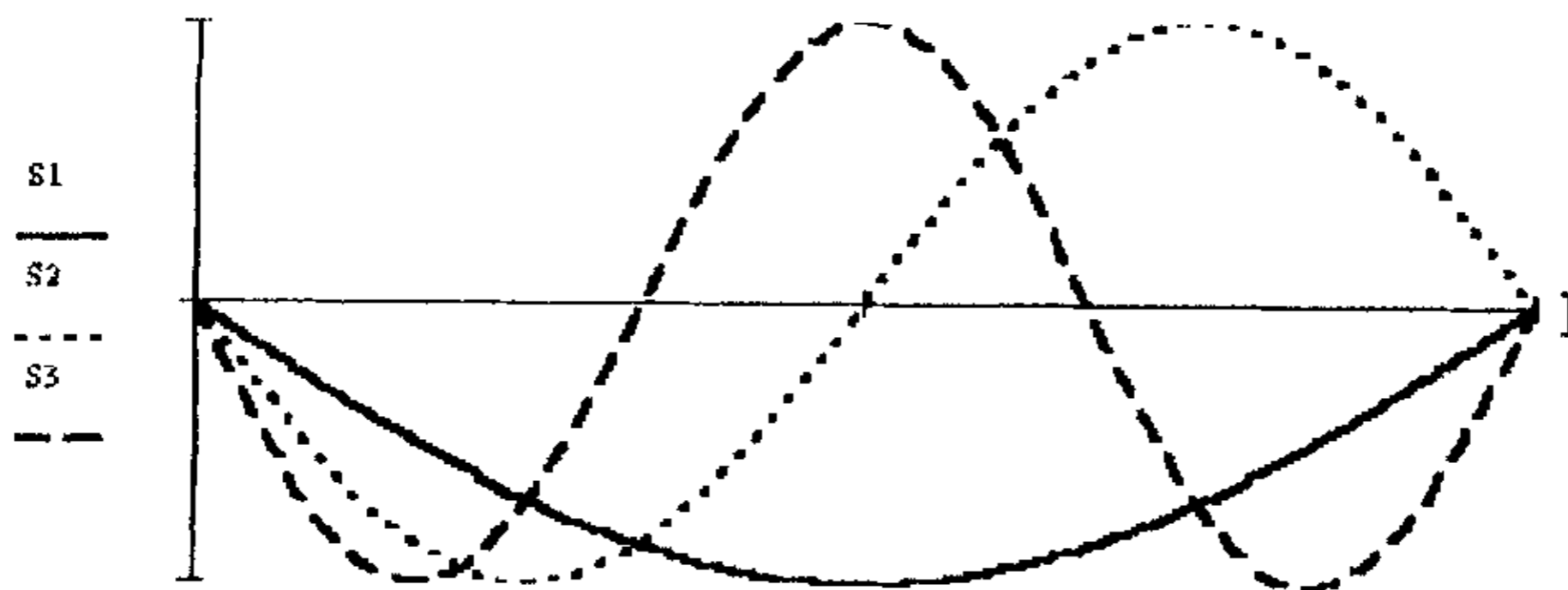


图2.5 两端简支梁的前三阶主振动所对应的应变分布

2.4.2 两端固定梁的动态应变分析

前面我们已经对两端固定梁的振形表达式作了分析,将其代入(2.57)即可得:

$$S_f(x) = C \left[ch\lambda x + \cos \lambda x - \frac{sh\lambda l + \sin \lambda l}{ch\lambda l - \cos \lambda l} (sh\lambda x + \sin \lambda x) \right] \quad (2.59)$$

其中 C 为一个常数。

于是其前三阶主振形所对应的应变分布如 2.6 图所示。

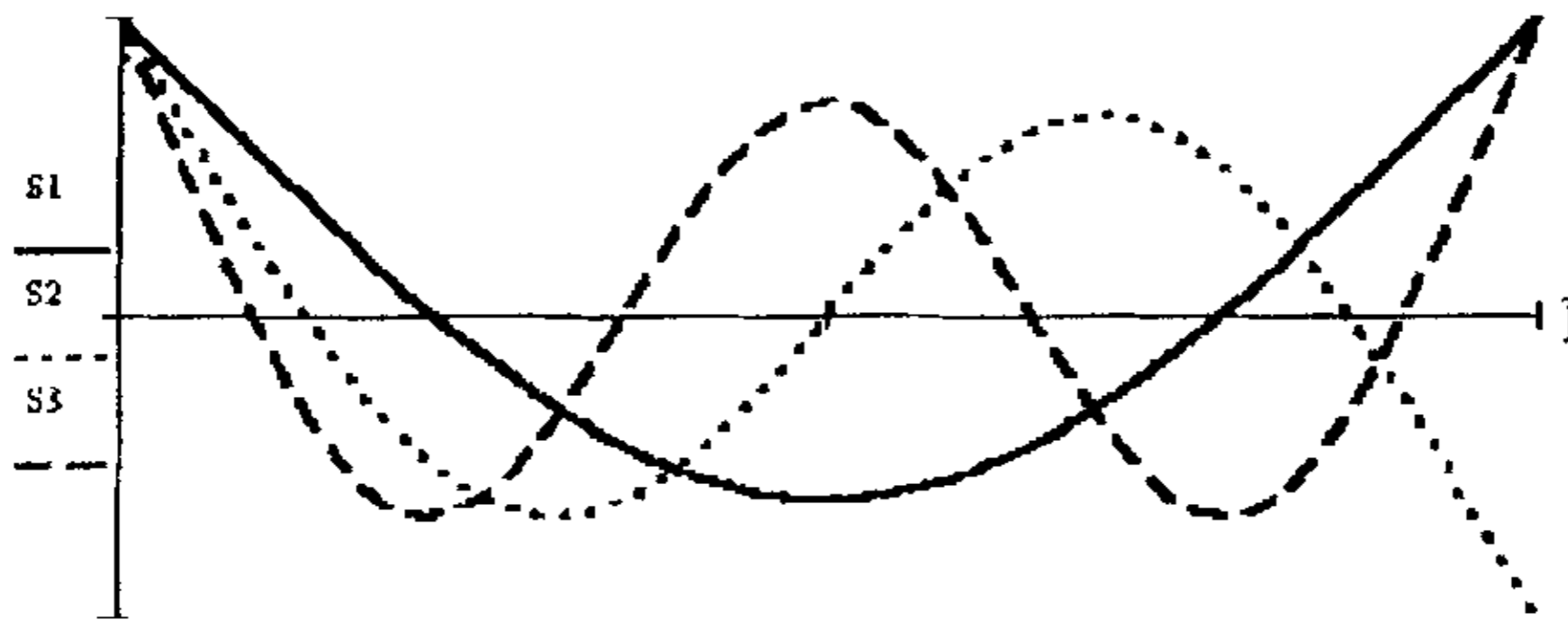


图2.6 两端固定梁的前三阶主振形所对应的应变分布

2.4.3 一端固定一端简支梁的动态应变分析

前面我们已经对一端固定一端简支的梁的振形表达式作了分析,将其代入(2.57)即可得:

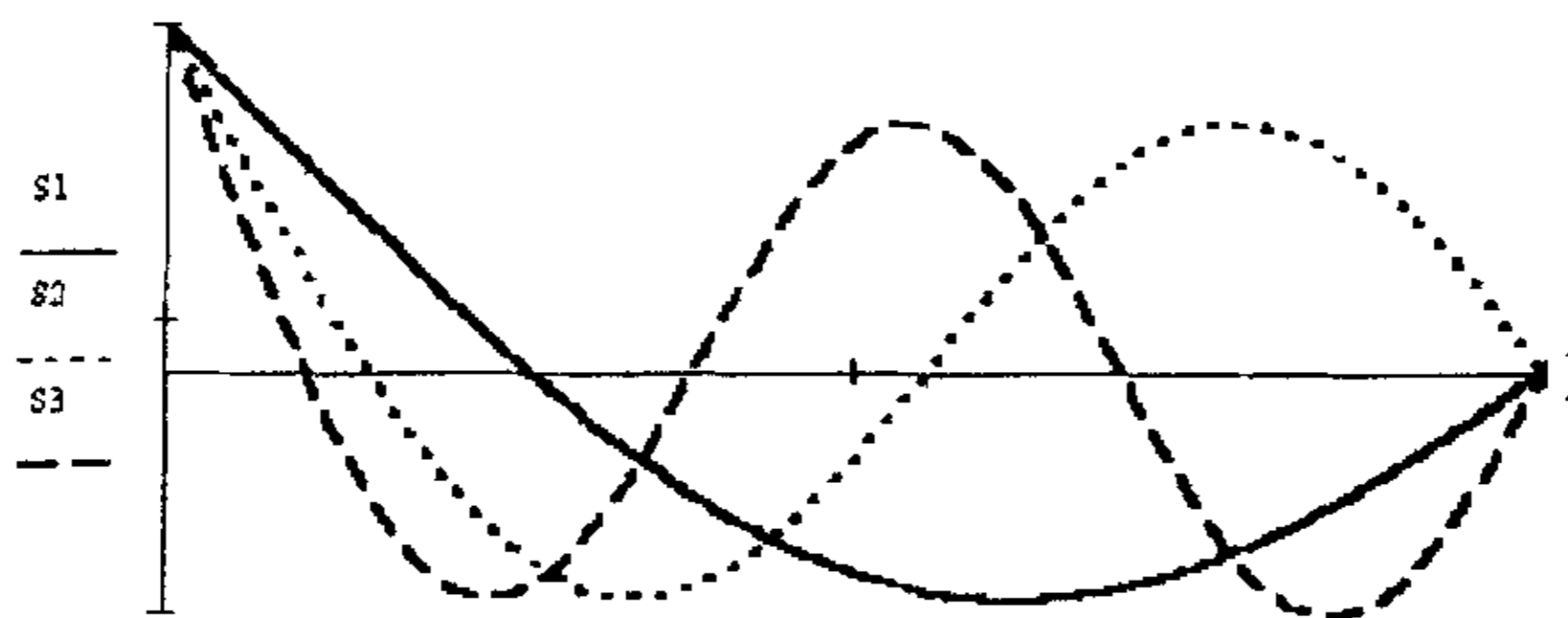


图2.7 一端固定一端简支梁前三阶主振动所对应的应变分布

$$S_f(x) = C \left[ch\lambda x + \cos \lambda x - \frac{ch\lambda l + \cos \lambda l}{sh\lambda l + \sin \lambda l} (sh\lambda x + \sin \lambda x) \right] \quad (2.60)$$

其中 C 为一个常数。

于是其前三阶主振形所对应的应变分布如图 2.7 所示。

2.5 桥梁的动态应变传感部位的选择

从上面的梁振动的动态应变分析可以发现，在梁的某些位置某一阶的动态应变为零，如果在这些部位粘贴压电片进行传感，就无法得到对应阶的振动的动态应变信号。所以我们要根据上面的分析，适当地选择压电片的粘贴位置。

对于两端简支梁，从图 2.2 和图 2.5 可以看到，各阶主振动在梁的两个根部振幅为零，动态应变也为零，如果在靠近根部的地方进行传感则得到的动态应变信号较弱。第一阶和第三阶主振动在梁的中部振幅最大，并且动态应变也最大，但第二阶主振动在此处振幅为零，动态应变也为零。推而广之，对于两端简支的梁，在梁的中点处，奇数阶主振动的振幅最大，动态应变也最大，而偶数阶主振动的振幅为零，动态应变也为零。所以在梁的中点处传感，只能得到奇数阶的振动信号，而不能提取偶数阶的振动信号。

对于两端固定的梁，从图 2.3 和图 2.6 可以看到，各阶振动在梁的两个根部振幅为零，第一阶和第三阶主振动在梁的中部振幅最大，但第二阶主振动在此处振幅为零，这与两端简支梁的振形曲线相似。但动态应变分布在两个根部最大，在靠近根部的地方进行传感，将会得到较好的振动信号。第一阶和第三阶主振动在靠近根部三分之一处应变很小，第二阶主振动在梁的中点处应变为零。

对于一端固定一端简支的梁，从图 2.4 和图 2.7 可以看到，它综合了前两种梁的一些特点。在固定端各阶主振动的振幅为零，但动态应变最大，在简支端各阶主振动的振幅为零，动态应变也为零。并且不象前两种梁，振动的振幅和动态应变没有对称性。所以我们可以根据图 2.7 来选择动态应变的传感部位。

以上我们所有的分析都是以梁的自由振动为基础的。梁在外界力的作用下做受迫振动时，其振动特性不仅与自身有关，而且与激振力的特性有关，如车辆经过桥梁时，其振动特性相当复杂，到目前为止，除了周期性激振可以进行数学分析外，非周期性激振时桥梁的振动分析仍然是一个难题。当车辆正在桥上行驶时，桥梁受到一个十分复杂作用力的激励，当车辆已经开过桥梁时，这时桥梁的振动就是自由振

动了，于是我们就可以采用上面的理论来进行分析和计算。

2.6 本章小结

本章首先介绍了振动的分类，明确了桥梁振动产生的几个主要原因，回顾了桥梁振动分析的发展历史。按照弹性体振动理论建立了梁的弯曲振动的力学模型，即欧拉伯努利梁模型，推导出了梁的横向自由振动的数学表达式。然后针对工程实践中最常见的三种形式的梁：两端简支梁、两端固定梁、一端固定一端简支梁的各自不同的边界条件分析了其振形函数和固有频率表达式，论述了梁的各阶主振动的正交性，即多自由度系统振动过程中，每一种主振动内部的动能和势能可以相互转化，而在各阶主振动之间不会发生能量的传递，彼此是相互独立的。由此我们便可以对其中的某一个主振动进行单独的研究。按照材料力学中的应变计算原理，我们对上述三种形式的梁的动态应变分布进行了分析，求出了其前三阶主振动的动态应变分布图，根据此分布图，我们就可以确定压电片的传感位置。在本章中我们对桥梁振动进行了初步的理论分析，从而为第六章的实际红槽房大桥的测试工作和振动信号的分析做好了准备。

第三章 桥梁动态应变的压电传感新技术

提要 本章提出了采用压电片作为动态应变传感器对桥梁振动进行监测的新方法。并从压电方程入手，论述了压电片对动态应变的传感原理，从电学的角度分析了压电片的两种等效电路，对比了电压放大电路和电荷放大电路的优缺点及其适用场合，最后推导出了采用压电片进行动态应变传感的计算表达式。

3.1 概述

压电式传感器是以某些物质的压电效应为基础的一种自生电传感器。压电效应是可逆的，可分为正压电效应和逆压电效应。正压电效应是指当沿着一定方向对某些电介质施加力而使其产生变形时，会在电介质的某些表面上产生电荷，当外力拆除后，表面上的电荷又会消失，从而回到不带电的状态，这是由于压电材料在受到外力作用时产生应变，就会引起压电材料内部的电偶极子的正负电荷中心发生相对移动而产生电极化，在材料的各个表面上出现束缚电荷，从而产生极化电场的缘故。逆压电效应是指当在电介质的极化方向施加电场，这些电介质就会在某些方向上产生机械变形或机械应力，当外加电场拆除后，这些机械变形和机械应变又会随之消失，这是由于压电材料的内部电偶极子的正负电荷中心在外电场作用下产生偏移的缘故。故压电传感器是一种典型的双向传感器[33]。

具有压电效应的电介质称为压电材料。在大自然中，已经发现 20 多种单晶体具有压电效应，石英(SiO_2)就是一种性能良好的天然压电晶体。此外，压电陶瓷如钛酸钡、锆钛酸铅等多晶体也具有有良好的压电效应。由于压电转换元件具有自生电荷和电生力这两种重要性能，加上它体积小、重量轻、结构简单、工作可靠、固有频率高，灵敏度和信噪比高等优点。因此，近十来年，压电式传感器发展十分迅速。利用正压电效应研制开发了压电电源，煤气炉和汽车发动机的自动点火装置等多种电压发生装置。利用逆压电效应可以制造超声波发生器和压电扬声器等。利用正逆压电效应可以制成压电陀螺、压电线性加速度计、压电变压器、声纳和压电声表面波器件等。更有意义的是：根据生物医学的研究成果，生物都具有压电效应，人的各种感觉器官实际上是生物压电传感器。如根据正压电效应治愈骨折，可以加速痊愈；利用逆压电效应，对骨头通电具有矫正畸形骨的功能[41]。

压电转换元件虽然具有许多优点,但也有自生的缺点即:它无法对静态信号进行传感,没有静态输出;它有很高的电输出阻抗,所以对信号进行处理时,需要高输入阻抗的放大器和低电容的低噪声电缆;另外很多压电元件的特性随温度变化而变化,大多工作温度最高只有250℃左右。

在目前的应用中,压电陶瓷的使用量越来越大。在我们的桥梁振动动态应变的传感中,我们采用的也是压电陶瓷传感器。压电陶瓷都是将钙钛型矿的原料粉碎、成型、通过1000℃以上的高温烧结而成。由于其制作工艺方便、耐湿、耐高温等优点,因此在检测技术、电子技术和超声检测等领域获得了普遍应用。原始的压电陶瓷材料没有压电性,但在材料内部有电畴,即是自发的电偶极矩形成的微小极化区,由于它们排列是无序的,所以它们各自的极化能力相互抵消,在总体上无法表现出压电效应。如果我们对其施加20-30KV/cm的强大电场,并且要持续一段时间,这样大多数小电畴的极性就会转到接近电场方向。而拆除电场后,这些电畴基本保持不变。我们使用的压电陶瓷的银电极是通过煅烧而形成的,其对压电陶瓷的有效电容量和极化特性都会产生重要的影响。

对于我们所采用的压电传感器是锆钛酸铅系压电陶瓷PZT,PZT是由 $PbTiO_3$ 和 $PbZrO_3$ 按47:53的摩尔分子比来组成的,居里点在300度以上,性能稳定,具有很高的介电常数和压电常数。如果加入少量的杂质或者适当地改变组份,可以比较明显地改变介电常数和机电耦合系数等参数,所以现在市场上有许多不同型号的PZT。另外压电陶瓷具有明显的热释电效应,即PZT除了由于机械应力的作用而引起的电极化之外,还可以由于温度变化而产生电极化。这一点在温度变化十分迅速的条件下,如每分钟温度变化几十度时,使用压电片时就要十分注意压电片的热释电效应。而对桥梁振动动态应变传感来说,可不必考虑压电陶瓷的热释电效应。

3.2 压电片对动态应变的传感原理

在具有压电特性的材料之中,电学参量和力学参量不再是相互独立的,而是相互联系的。电场的激励可以产生力学响应,即应力应变;而机械激励又可以产生电学响应,即表面的电荷分布。我们要描述这一对电学参量和力学参量的相互关系,最好的方法即是压电方程[35]。根据材料力学的有关理论,材料中的应力 T_j 和应变 S_j 不是标量而是矢

量，其相互关系要采用张量方程来加以描述：

$$T_f = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_5 \quad T_6]^T$$

$$S_f = [S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_4 \quad S_5 \quad S_6]^T$$

我们知道在材料的弹性极限范围内，应力和应变成线性关系，其数学描述式如下：

$$T_f = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$S_f = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

在 (3.1) 式中 c_{ij} ($i,j=1,2,3,4,5,6$) 表示材料的弹性常数，所形成的矩阵称为材料的弹性常数矩阵，在 (3.2) 式中 s_{ij} ($i,j=1,2,3,4,5,6$) 表示材料的柔顺常数，所形成的矩阵称为材料的柔顺常数矩阵。对于材料的电学参数一般采用电场强度 E_e 和电位移 D_e 来描述，通常 E_e 和 D_e 为矢量，它们之间的关系一般采用张量方程来加以描述：

$$E_e = [E_1 \quad E_2 \quad E_3]^T \quad D_e = [D_1 \quad D_2 \quad D_3]^T$$

我们知道在材料的线性极化范围内，电场强度和电位移成线性关系，其数学描述式如下：

$$D_e = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

对于普通材料而言, (3.1) 式、(3.2) 式和 (3.3) 式就可以完全描述材料的力学和电学特性。而对于压电材料而言, 这三个式子不是孤立的, 而是相互联系的。我们可以有四种方式来建立压电方程:

- 1)、以电场强度 E_e 和应变 S_f 为自变量, 电位移 D_e 和应力 T_f 为因变量;
- 2)、以电场强度 E_e 和应力 T_f 为自变量, 电位移 D_e 和应变 S_f 为因变量;
- 3)、以电位移 D_e 和应变 S_f 为自变量, 电场强度 E_e 和应力 T_f 为因变量;
- 4)、以电位移 D_e 和应力 T_f 为自变量, 电场强度 E_e 和应变 S_f 为因变量;

这四类压电方程适宜不同的应用场合, 并且相互之间可以转换。在本质上这四类压电方程是相同的, 仅仅是表示方式不同而已, 在我们所进行的动态应变传感的研究中, 最终目的是利用已知参数来表示电位移 D_e 和应变 S_f 之间的关系, 故采用如下压电方程:

$$S_f = \begin{pmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & s_{14}^E & s_{15}^E & s_{16}^E \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & s_{24}^E & s_{25}^E & s_{26}^E \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & s_{34}^E & s_{35}^E & s_{36}^E \\ s_{41}^E & s_{42}^E & s_{43}^E & s_{44}^E & s_{45}^E & s_{46}^E \\ s_{51}^E & s_{52}^E & s_{53}^E & s_{54}^E & s_{55}^E & s_{56}^E \\ s_{61}^E & s_{62}^E & s_{63}^E & s_{64}^E & s_{65}^E & s_{66}^E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$D_e = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{11}^T & \epsilon_{12}^T & \epsilon_{13}^T \\ \epsilon_{21}^T & \epsilon_{22}^T & \epsilon_{23}^T \\ \epsilon_{31}^T & \epsilon_{32}^T & \epsilon_{33}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

其中 d_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,3,4,5,6$) 表示材料的压电常数, s_{ij}^E ($i,j=1,2,3,4,5,6$) 表示电场为零或者电场恒定不变时的柔顺常数, ϵ_{ij}^T ($i,j=1,2,3$) 表示

应力为零时或者恒定不变时的材料的介电常数。虽然 (3.4) 和 (3.5) 式看上去十分复杂, 但是对于我们所采用的人工合成的压电陶瓷来说不为零的压电常数只有 $d_{31}, d_{32}, d_{33}, d_{24}, d_{15}$ 五个, 而其他的压电常数均为零, 并且有 $d_{31} = d_{32}, d_{24} = d_{15}$ 。又因为把压电片用作传感器而不是执行器, 对压电片来说我们没有对其施加外加电场, 所以上面压电方程右端中的电场强度 E 为零。根据如上分析我们就可以对压电方程进行化简。

$$D_s = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

我们所使用的压电片的电极位于 D_3 方向上的, 而在其它两个方向上没有电极, 所以得到的信号只受 D_3 的影响, 而其他两个方向上的电位移可以不予考虑。于是 (3.6) 可以简化为:

$$D_3 = (d_{31} \quad d_{31} \quad d_{33} \quad 0 \quad 0 \quad 0) \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix}$$

$$= (d_{31} \quad d_{31} \quad d_{33}) \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

上式中我们可以看出六个应变参数的改变都会引起压电片的电位移 D_3 的变化，为了简化研究的复杂性，我们可以使 $S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = S_6 = 0$ ，这样只在一个方向上进行传感，于是 (3.7) 可以进一步简化为：

$$D_3 = (d_{31}c_{11} + d_{31}c_{21} + d_{33}c_{31})S_1 \quad (3.8)$$

上式便是采用压电片对动态应变进行传感的简化计算公式。由此可见应变和电位移成线性关系。

3.3 压电片的等效电路分析

压电片在几何结构上相当于一个电容器，根据电学的基本公式可以计算其电容量为：

$$C_p = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S_p}{d_p} \quad (3.9)$$

其中 S_p 表示压电片的极板面积； ϵ_r 表示压电片的相对介电常数， ϵ_0 表示真空中的介电常数， d_p 表示压电片的厚度。当压电片受到机械作用时，在它的两个极板表面产生等量的正、负电荷，根据电路的有关原理，压电片的开路电压 U 为：

$$U = \frac{Q}{C_p} \quad (3.10)$$

其中 Q 表示压电片极板上所积累的电荷量。由电场高斯定律可以得出 Q 与 D_3 的相互关系如下：

$$Q = D_3 S_p \quad (3.11)$$

由此可见压电片可以看成是由一个电荷源 Q 和一个电容器 C_p 相并联的等效电路，考虑到压电片要与后续的计算电路相连，就必须计算电缆的影响和放大器输入端的影响，于是其电荷等效电路如图 3.1 所示。图中 C_c 表示电缆的电容， C_i 表示放大器的输入电容， R_i 表示放大器的输入电阻， R_p 表示压电片的电阻。

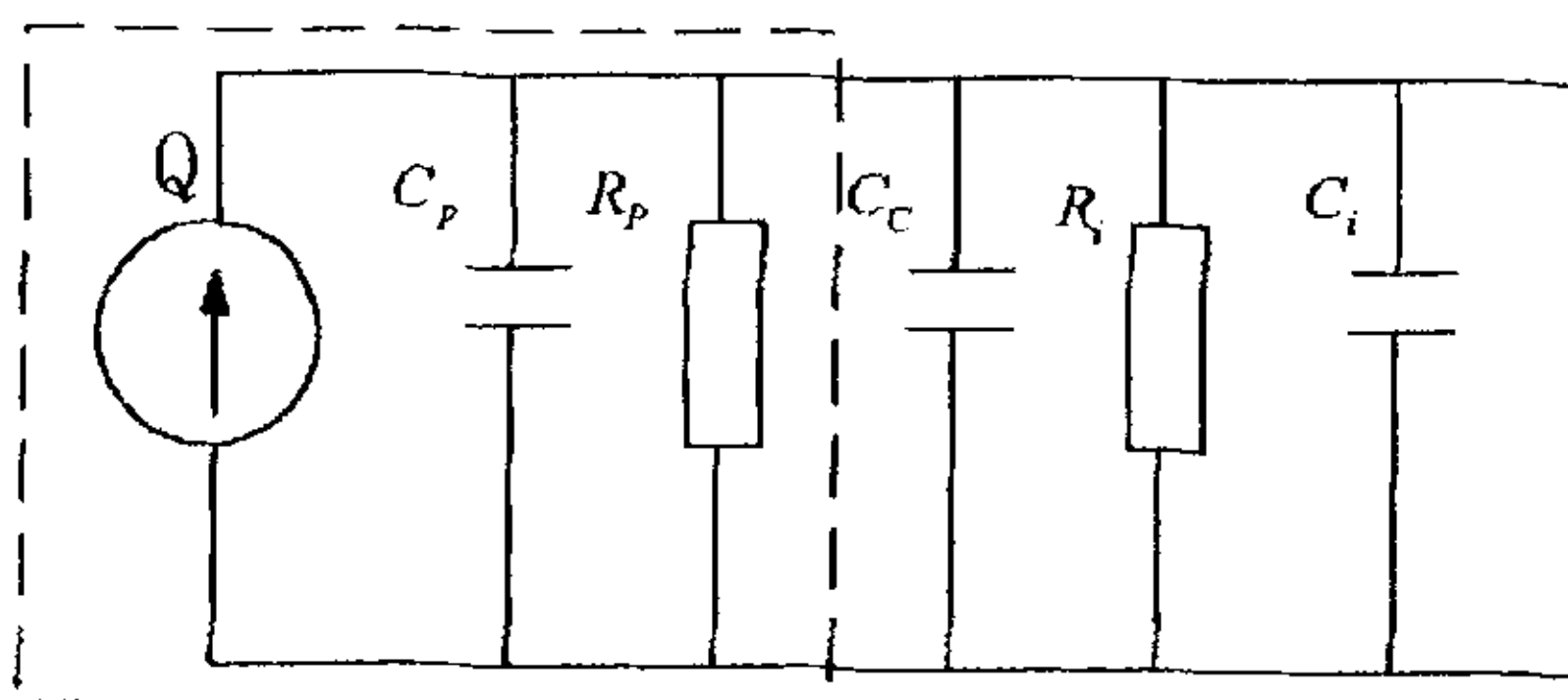


图3.1 压电片的电荷等效电路

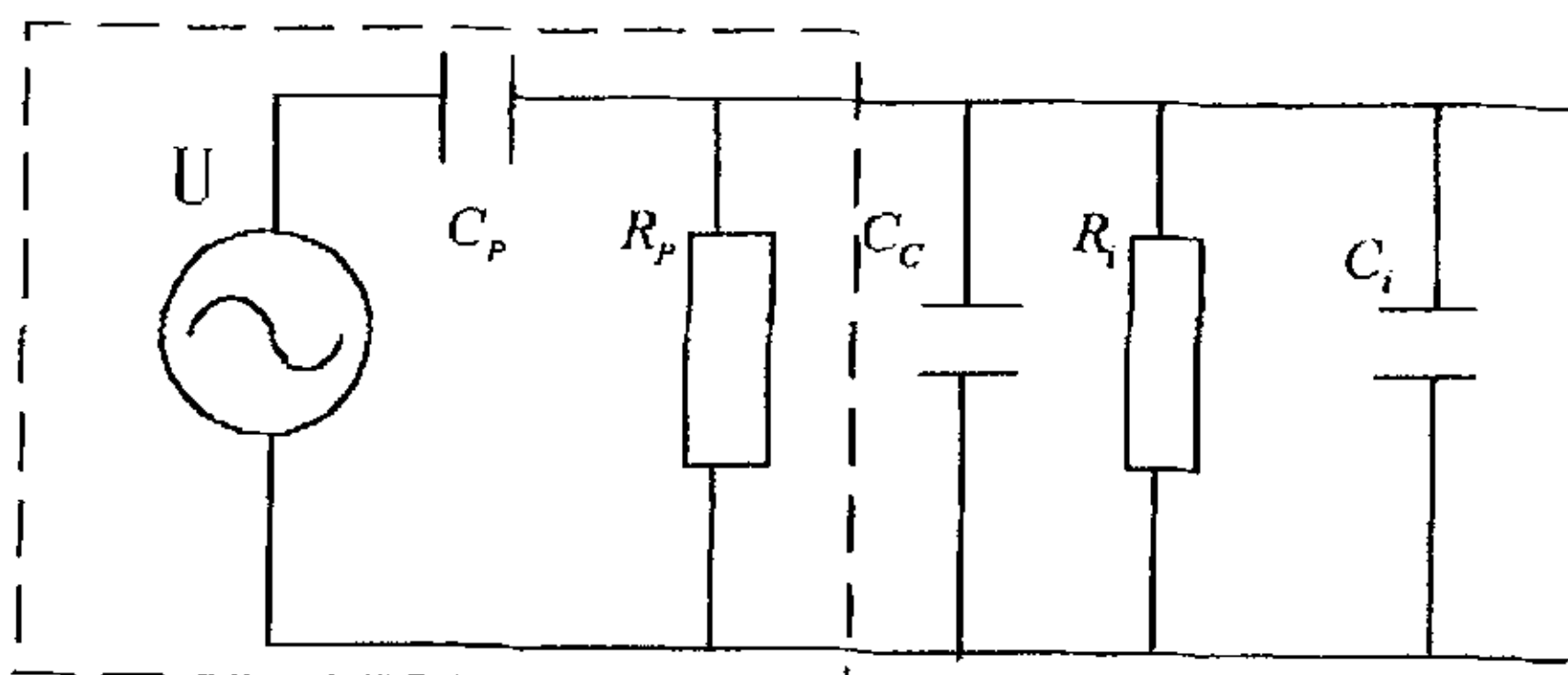


图3.2 压电片的电压等效电路

根据电路等效原理，也可以将上面的电路等效为一个电压源 U 和一个电容器 C_p 的串联等效电路如图 3.2 所示。

以上两种等效电路分别为压电片的电荷等效电路和电压等效电路，虽然它们的表示方式不同，但它们的工作原理是相同的。在我们后续的分析中，电荷等效电路主要用于电荷放大电路的分析，电压等效电路主要应用于电压放大电路的分析。

3.4 压电片的测量电路分析

压电片自身的电阻相当大， R_p 至少在兆欧数量级以上，所以对放大器的输入阻抗要求很高，只有这样放大器才能完成从高输入阻抗到低输入阻抗的变换，从而将压电片产生的微弱信号放大。一般来说，存在两种形式的前置放大器，一种是电压放大器，其输出电压与输入电压成正比；另一种是电荷放大器，其输出电压与输入电荷成正比。下面我们将对这两种前置放大电路分别进行分析。

3.4.1 电压放大电路

压电片的电压放大电路一般采用典型的同相比例放大电路，因为该电路相对于反相比例放大电路来说，其输入阻抗较高，从而有利于信号的有效提取。其电路原理如图 3.3 所示：

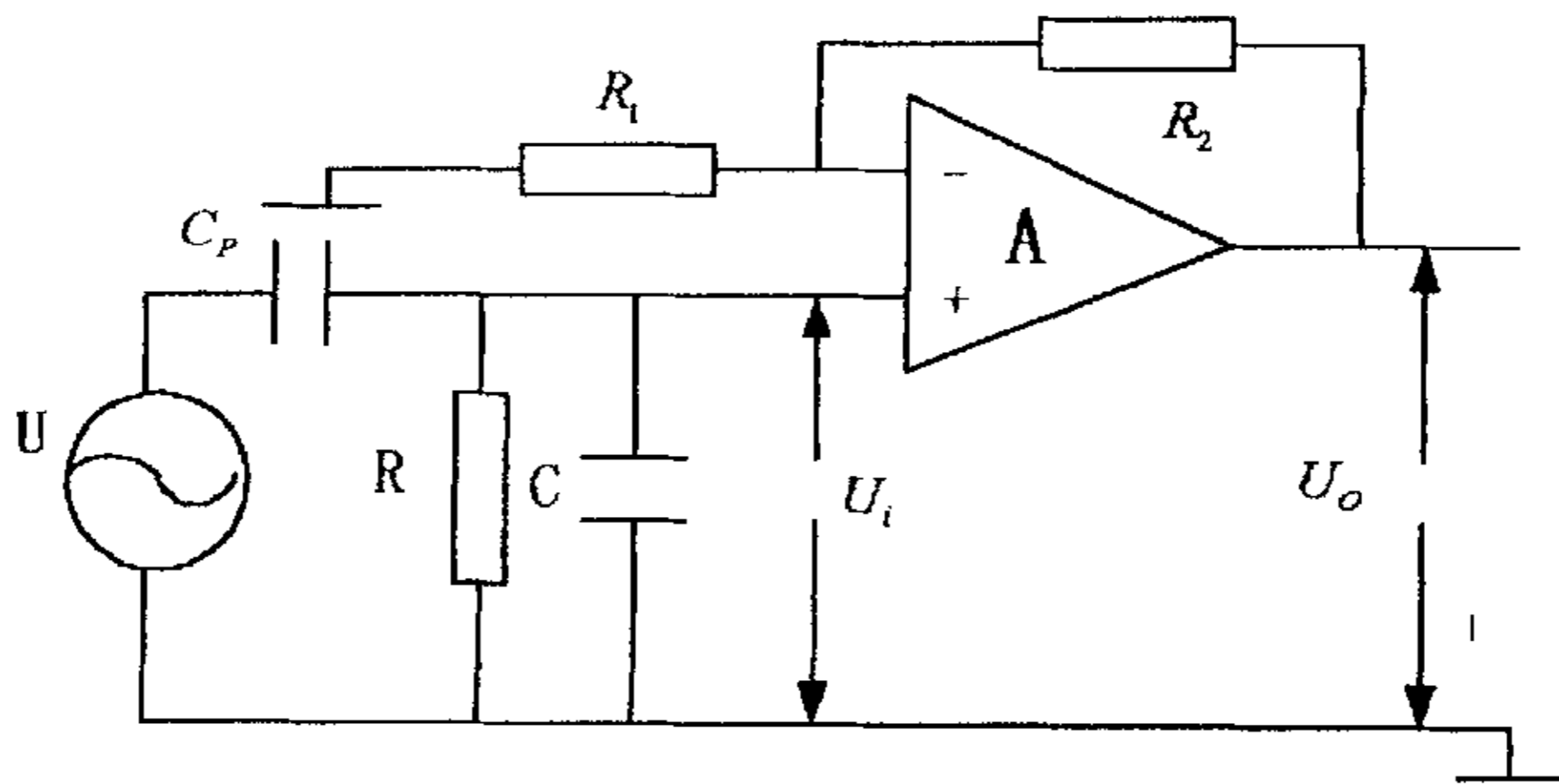


图3.3 压电片的电压放大电路原理图

在图中 R 表示等效电阻， C 表示等效电容， U_i 表示输入电压， U_o 表示

输出电压, A 表示理想放大器。即 $C = C_c + C_i$, $R = \frac{R_p R_i}{R_p + R_i}$ 。根据电

学的计算公式可求得:

$$U_i = U \frac{j\omega C_p R}{1 + j\omega R(C + C_p)} \quad (3.12)$$

$$\text{则 } U_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_i = U \frac{j\omega C_p R}{1 + j\omega R(C + C_p)} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3.13)$$

从上面的分析可以看出, 电缆电容的变化会引起电压放大倍数的变化, 所以电缆长度的不同, 其灵敏度不同, 并且电缆越长灵敏度越低。另一方面, 电压放大电路的高频特性很好, 但低频响应不好, 由 (3.13) 可得电压放大器的幅频特性为:

$$|U_o| = |U| \frac{\omega C_p R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C + C_p)^2}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3.14)$$

由此可以求得下限频率 ω_L 为:

$$\omega_L = \frac{1}{R(C + C_p)} = \frac{1}{R(C_p + C_c + C_i)} \quad (3.15)$$

由上式可知, 为了扩展下限频率有两条途径。一是使用高阻抗的前置放大器, 但是要把放大器的输入阻抗提高到 1000M 欧以上是十分困难的。压电片的电阻取决于材料, 也不是轻易能提高的。另一方面, 输入阻抗太高, 非常容易通过杂散电容耦合外界的 50Hz 的工频干扰和其它干扰。第二个途径是增大测量回路的电容, 但这会造成电压放大倍数的降低, 所以此方法不可取。通过上述分析, 针对我们所研究的实际对象来说, 信号频率是很低的, 通常在几赫兹频段, 而且测量电缆的长度各不同, 有时会长达上百米, 所以采用电压放大器会造成测量的复杂化和不准确性。下面我们将分析另一类放大器, 它将克服上面我们所谈到的缺点, 而十分适用于工程实际。

3.4.2 电荷放大电路

电荷放大器是一种输出电压正比于输入电荷的放大器, 它利用电容作为反馈元件, 具有很高的增益, 其电路原理如图 3.4 所示:

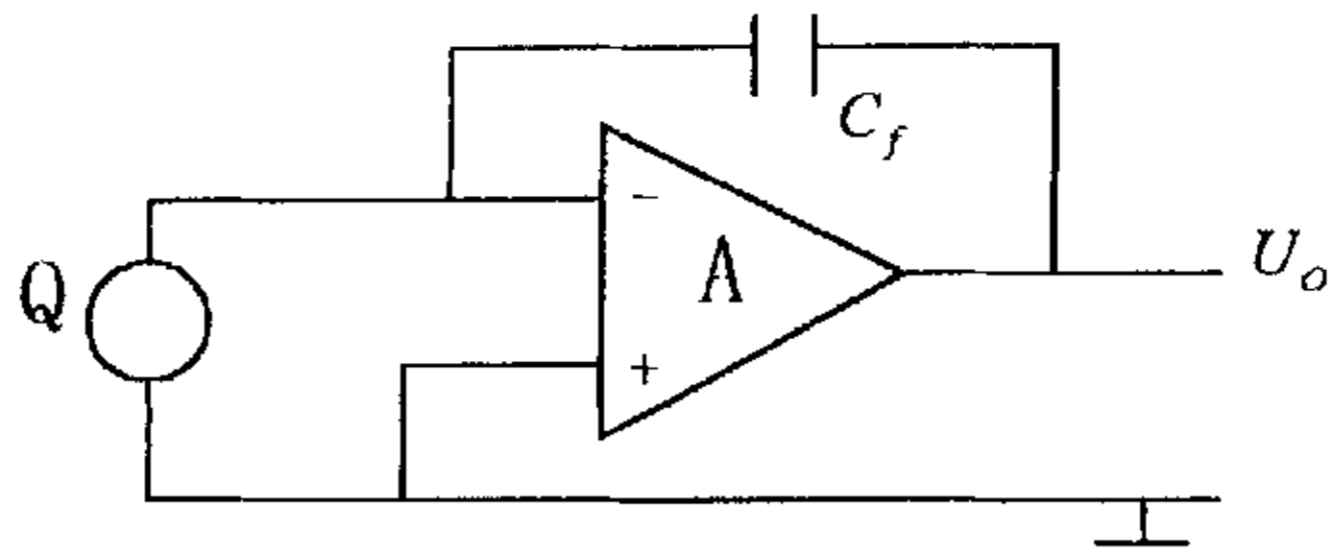


图3.4 电荷放大器原理图

从图中可以看出，放大器的反向输入端和传感器相连，其输出经电容 C_f 反馈至输入端，若放大器的开环放大倍数很大，则反相输入端虚地点对地电位趋近于零，由于放大器的直流输入电阻很高，压电片的输出电荷 Q 只对电容 C_f 充电，于是电荷放大器的输出电压 U_o 为：

$$U_o = -\frac{Q}{C_f} \quad (3.16)$$

由此可见，电荷放大器的输出电压仅和输入电荷成正比，和反馈电容成反比。上式仅在理想条件下成立，实际的电荷放大电路原理如图3.5所示：

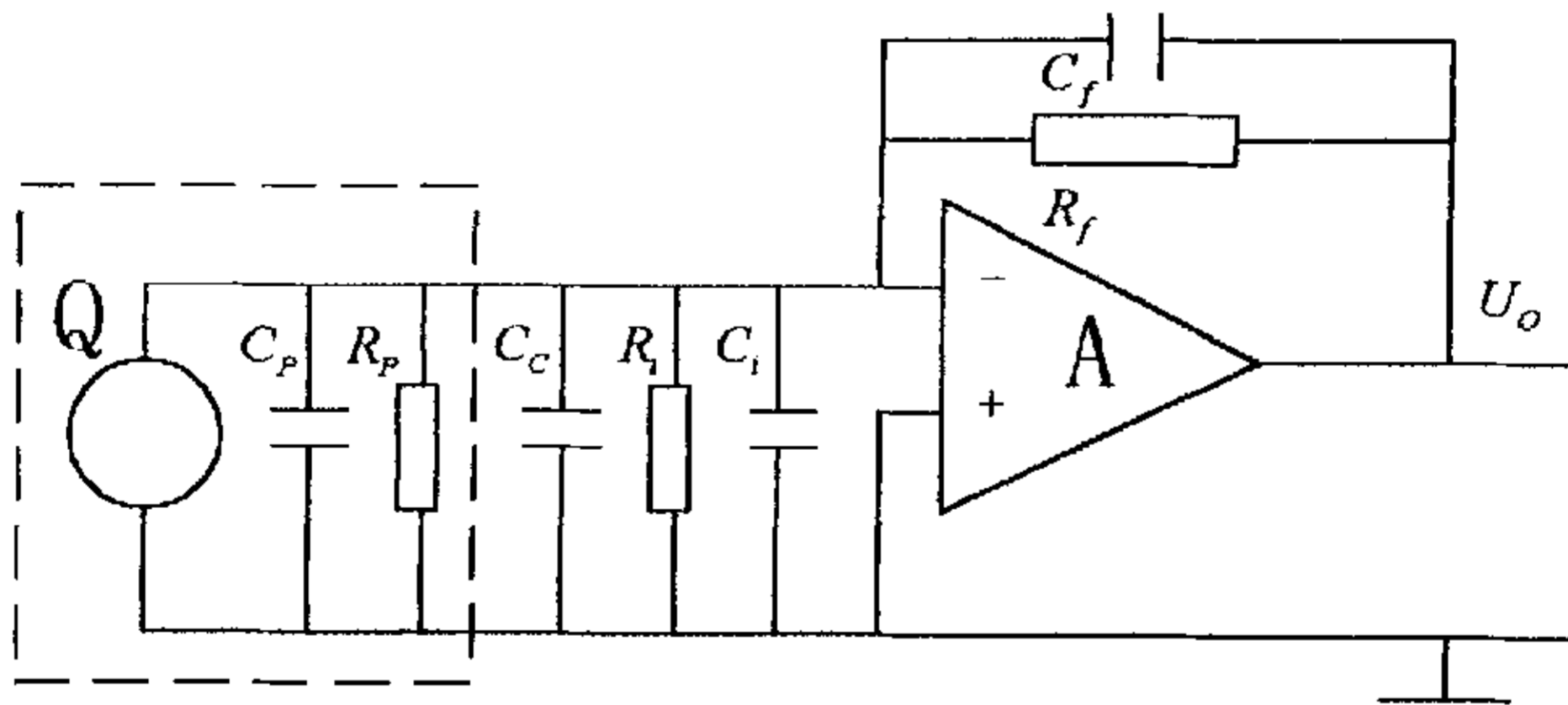


图3.5 压电片的电荷放大电路原理图

图中 R_f 为反馈电阻，其它符号与前面的定义一样。根据密勒原理进行

阻抗变换，可以把反馈电容和反馈电阻等效到输入端。于是我们可以算得电荷放大器的输出电压为：

$$U_o = \frac{-j\omega A_k Q}{\left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_i} + \frac{1+A_k}{R_f}\right) + j\omega(C_p + C_c + C_i + (1+A_k)C_f)} \quad (3.17)$$

其中 A_k 为放大器的开环放大倍数。由此可见，实际电荷放大器的输出电压不仅与输入电荷有关，而且和电路参数、信号频率和放大器的开环放大倍数有关。

只要 A_k 足够大，(3.17) 式分母中的 $C_p + C_c + C_i$ 就远远小于

$(1+A_k)C_f$ ， $\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_i}$ 远远小于 $\frac{1+A_k}{R_f}$ 。所以压电片自身电容的大小和

电缆长短将不影响或者极少影响电荷放大器的输出，这就是电荷放大器的突出优点。在通常情况下， R_i 、 R_p 、 R_f 均很大， C_p 为几十皮法，

C_f 为一百皮法至一个微法， C_c 约为 100pF/m，经过如此简化 (3.17)

式就可近似为 (3.16) 式。

当电荷放大器的工作频率很低时，反馈电阻的影响就不能忽略，它直接关系到电荷放大器的频率特性。由于放大器的开环放大倍数很

大，通常满足： $(1+A_k)C_f \gg C_p + C_i + C_c$ ， $(1+A_k)\frac{1}{R_f} \gg \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_i}$ 。

所以 (3.17) 式可以简化为：

$$U_o \approx \frac{-j\omega A_k Q}{\left(\frac{1+A_k}{R_f}\right) + j\omega((1+A_k)C_f)} \approx \frac{-j\omega Q R_f}{1 + j\omega R_f C_f} \quad (3.18)$$

由此可以求的它的输出电压幅值为：

$$|U_o| = \frac{\omega Q R_f}{\sqrt{1 + \omega^2 R_f^2 C_f^2}} \quad (3.19)$$

由此可以求得下限频率 ω_L 为：

$$\omega_L = \frac{1}{R_f C_f} \quad (3.20)$$

在低频时, 电荷放大器的输出电压 U_o 和压电片产生的电荷 Q 之间的相位差 φ 为:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{1}{\omega R_f C_f}\right) \quad (3.21)$$

由此可见, 电荷放大器在低频时的频率特性仅仅和反馈电路参数 R_f 和 C_f 有关。一般情况下, 在设计电路时根据电压放大倍数确定反馈电容的数值, 然后根据下限截止频率确定反馈电阻的数值。从理论上说, 可以去掉反馈电阻, 就相当于反馈电阻等于无穷大, 但实际上是行不通的, 因为电荷放大器采用电容负反馈, 对于放大器的直流工作点来说相当于开路, 会造成零漂较大而产生误差, 为了减小零漂, 使放大器工作稳定, 应该采用反馈电阻来提供直流反馈功能。由于我们在桥梁监测中, 桥梁的振动频率很低, 所以我们关心的是低频特性, 而有关电荷放大器的高频特性我们就不在此加以讨论了。

3.5 压电片动态应变传感的计算

前面各小节分别对压电片的传感原理、等效电路和相应的测量放大电路做了分析, 在此将综合前面的分析, 给出采用压电片进行动态应变传感的理论计算公式。将 (3.8) 式代入 (3.11) 式, 可以求得由于外加机械作用, 压电片产生应变后, 在压电片两个极板上产生的电荷量 Q 为:

$$Q = D_3 S_p = (d_{31} c_{11} + d_{31} c_{21} + d_{33} c_{31}) S_1 S_p \quad (3.22)$$

在我们的实际应用中, 将压电片粘贴于被测对象上, 使之同被测对象一起变形, 以此来传感被测对象的应变。由于被测对象的应变一般比粘贴的压电片的应变大, 即应变不可能百分之百传递, 所以我们采用一个应变传递系数来描述这一现象。至于应变传递系数的计算和分析, 以及力学模型的建立是由工程力学系来完成的, 在此我们不作过多的讨论, 而只是加以应用。在考虑应变传递系数和后续放大电路的情况

下，将 (3.22) 式代入 (3.18) 式可以得到：

$$U_o = \frac{-j\omega R_f}{1+j\omega R_f C_f} (d_{31}c_{11} + d_{31}c_{21} + d_{33}c_{31}) S_1 S_p a A_b \quad (3.23)$$

其中 a 表示应变传递系数， A_b 表示后续放大电路的放大倍数。我们可以选择电路参数使得： $j\omega R_f C_f \gg 1$ ，于是上式可以化简为：

$$U_o = \frac{-1}{C_f} (d_{31}c_{11} + d_{31}c_{21} + d_{33}c_{31}) S_1 S_p a A_b \quad (3.24)$$

上式便是压电片动态应变传感的理论计算式。一般情况下 c_{21} 、 c_{31} 相对于 c_{11} 来说较小，可以将其忽略而得到近似的动态应变计算式如下：

$$U_o = \frac{-1}{C_f} d_{31}c_{11} S_1 S_p a A_b \quad (3.25)$$

由上式可知，当压电片的有关参数和电路的有关参数已知时，可以由电路的输出电压计算出被测对象的应变值。在我们实际应用中所使用的压电片为电子工业部第二十六研究所生产，属锆钛酸铅系压电陶瓷 (PZT)，其有关参数如表 3.1 所示：

表 3.1 压电片的特性参数表

参 数 名	数 值
压电应变常数 d_{31}	$255.25 \times 10^{-12} C/N$
弹性常数 c_{11}	$6.39 \times 10^{10} N/m^2$
相对介电常数 ϵ_r	2400
柔顺常数 s_{11}	$15.66 \times 10^{-12} m^2/N$
机电耦合系数 K_p	0.725
外形尺寸 ($l \times w \times d$)	$60 \times 30 \times 0.3mm$

由上面的分析可知，我们可以采用压电片来对结构的动态应变进行传感，通过电荷放大器的输出来计算结构的动态应变。但是这样推算有一定的误差，即误差一个乘积因子。为了达到精确测量的目的，较好的方法就是对压电片所传感的动态应变进行定标实验，这样就能

确定造成误差的乘积因子的具体数值，从而采取修正的方法来达到准确的动态应变传感。

3.6 本章小结

本章首先对压电材料的正、逆压电效应的机理及其应用作了简单的介绍，指出了利用压电材料作为传感元件的优越性。然后从压电方程入手，推导了压电片所感受的应变同压电片的电位移之间的数学表达式。之后我们从电学的角度描述了压电片的电压等效电路和电荷等效电路，为后续的电学分析奠定了基础。接着对压电传感器的两种常用的后续处理电路：电压放大电路和电荷放大电路的各自的特点和应用场合进行了对比，指出了在实际工程应用中采用电荷放大电路的优越性。并通过电场高斯定理，推导出了压电片所感受的应变同电荷放大器的输出电压之间的关系式。由此关系式我们便可以对压电片所感受的动态应变进行计算。

第四章 远程数据通讯系统

提要 本章首先回顾了计算机通讯的发展历程和该领域中所取得的巨大成就，总结了两台计算机之间的主要通讯方式，介绍了双机远程直接通讯的具体设置和操作，以及调制解调器的应用和结构组成，最后针对实际所研究的课题，对整个远程数据传输系统的编程思想和通讯软件的工作流程进行了深入的分析。

4.1 概述

1946 年世界上第一台电子计算机诞生，标志着人类进入了一个新的时代，从 50 年代体积庞大、速度较低的大型机到 70 年代可带多个终端供多个用户同时使用的小型机，到如今的奔腾系列微型计算机。计算机领域发生了翻天覆地的变化。随着计算机数量的不断增长，地域分布的不断广阔，人们不再局限于一台计算机的单独使用，而希望建立一个计算机网络实现资源的共享。计算机网络的初级阶段是局域网 LAN，即在办公室内部和企业内部实现计算机的互连，接着出现了都市网 MAN，即同一个城市中的计算机互连，到如今已经发展成为覆盖全球的跨城市、跨地区、跨国界的广域网 WAM。

最有名的网络系统即国际互连网 Internet，到目前为止用户已经超过了 7000 万，覆盖了 170 多个国家和地区。Internet 以相互通讯为目的，基于一些共同的协议，并通过许多路由器和公共线路互连而成，它是信息资源和服务共享的集合。Internet 网上的内容涉及商业、金融、社会、体育、娱乐、政治、天文、地理等方面，可谓包罗万象、无所不有。网上所提供的服务更是丰富多彩，既有传统的 E-MAIL 服务、FTP 服务、Telnet 服务等，又有新兴的网上购物、网上点播、网上银行等。可以说当今的 Internet 网已经完全超过了原先应用于科研和通讯的初衷，对人类社会的经济和文化生活产生了深远的影响[42-44]。

目前的网络系统一般采用国际标准化组织提出的开放系统互连模型。其通讯功能由分等级的多层来实现，每一个计算机都包含了七层[45]。最低层为物理层，关心的是在物理链路上的非结构化的比特流的传输，处理信号的电平幅度、位持续时间等参数。数据链路层提供基于物理链路的可靠数据传送，发送带有必要的同步、错误控制和流量控制的数据块。网络层使高层独立于用来连接系统的数据传输和交换技术，负责建立、保持和结束网络连接。运输层提供端节点间的可靠的、透明的数据传输，提供端对端的差错恢复和流量控制。会话层提

供应用间的通讯控制结构，建立、保持和中断合作应用间的连接。表示层通常执行有用的数据交换，提供一个标准的应用接口和通讯服务，如加密、文本压缩和格式转换等。应用层向开放互连系统模型环境提供用户服务，如文件传输协议、网络管理等。对于具体的一个网络系统来说，并不是一定要完全包含上面的七个层次，可以只包含其中的一部分。

目前作为家庭及办公室用户来说，最方便、最经济的上网方式为拨号上网方式。当今电话已经较为普及，家庭中拥有一根电话线也就意味着已将你和外界联系到了一起。利用电话线的这种拨号方式是一种最经济、最实用的接入 Internet 的方式。除了一台计算机、一个调制解调器、一条电话线及相应的软件外，不需要另外的投资。首先由用户拨叫 ISP (Internet Service Provider)，如线路空闲，则 ISP 的服务器进行应答，在用户输入自己的帐户信息并经过验证后，即可与 ISP 建立拨号连接。由于 ISP 通过租用国际信道（或高速专线）已事先与 Internet 建立了连接，所以我们在与 ISP 建立拨号连接的同时也就与 Internet 建立了连接。整个系统结构如图 4.1 所示：

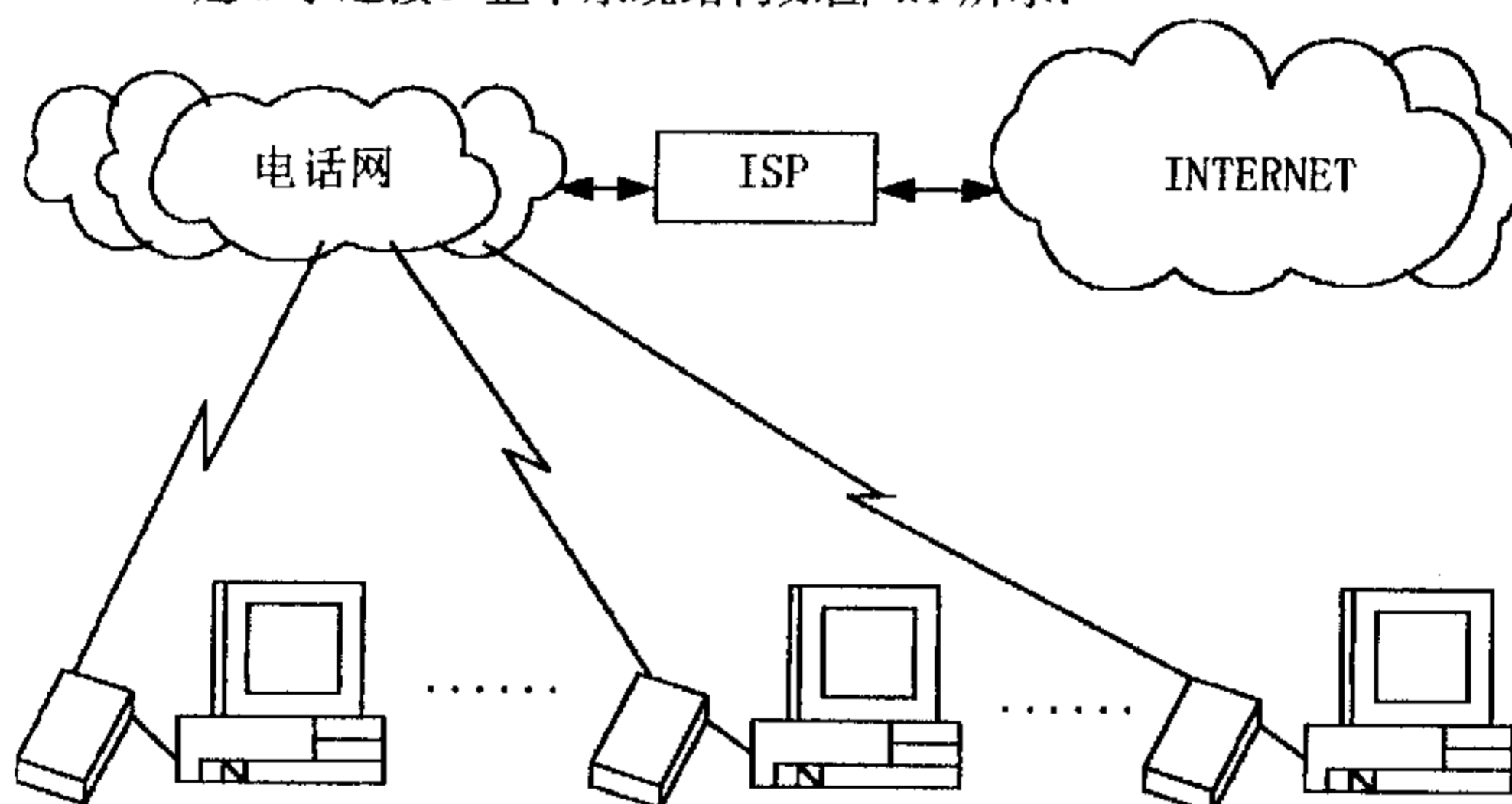


图4.1 拨号上网的示意图

在我们的红槽房大桥的远程监测系统的通讯部分，就是采用了上图所示的方案，只不过我们没有 ISP，而是采用拨号上网的前半部分，实现两台计算机之间的点到点连接来进行数据传输。

4.2 两台计算机之间的主要通讯方式

实现计算机直接点到点的连接是非常普遍的，在现实生活和学

工作中，在科学研究和生产经营中，常常也会有将两台计算机实现资源共享和数据传输交换的要求和愿望。在我们的桥梁监测系统中，采用的也是计算机的直接点到点的连接，进行通讯。在两台微机之间直接实现通讯的方法有很多种，根据它们之间距离的远近，可以分为近程通讯和远程通讯。如果两台通讯微机在同一屋内或相距几十米到一两百米内，称为近程通讯；如果两台微机距离在几百米到几千米甚至更远，则把它们之间的通讯称为远程通讯。

4.2.1 近程直接通讯

双机近程直接通讯方法有如下三种：

1)、通过微机所自带的串口（即 RS232 口）或并口（即打印口）进行双机通讯。

当两台微机之间的距离较小的情况下（如不超过 20 米），可以考虑采用这种通讯方式。用串并端口连接进行两台微机之间的数据传输，不需要网卡，不需要调制解调器，是一种在现有微机硬件资源的基础上实现通讯和数据传输的简单易行的好方法。

为了保证传输信号的正确性和完整性，导线长度不要过长，并且要选用计算机专用电缆。由于并口线不能太长，串口线的速率又太慢，因此本方法只适合于那些靠得很近并有空闲串口或并口的微机，对于随身携带笔记本电脑的用户要和其他计算机进行数据交换，这种方法是比较适合的。

2)、利用网卡加同轴电缆或双绞线实现双机通讯

用串口或者并口实现双机通讯虽然方便，价格便宜，但通讯距离较短，一般只有几米远。利用网卡进行双机通讯既可做到资源共享，灵活设置，而且连接距离较远，可达 150 米，十分方便。根据使用通讯电缆的不同，有两种硬件连接方式：一种是同轴电缆加网卡进行双机通讯。另一种是利用双绞线加网卡进行双机通讯。两种方式比较起来，用双绞线连接两台电脑更廉价、可靠。采用前一种方式时，把网卡插到空闲的 ISA 插槽上后，一端接上终端电阻，另一端与同轴电缆连接，再接到另一台电脑的 T 型头上，另一台电脑也照此连接即可。而后一种方式是当前组建局域网普遍采用的通讯方式，一般采用 8 芯 5 类双绞线。在硬件连接完毕之后，接着就要在 Windows95/98 中进行网络设置。在上述工作完成之后，就可以编制相应的通讯软件实现两台计算机之间的数据传递和资源共享了。

3)、利用 USB 实现双机通讯

在两台电脑相互连接进行通讯中，除了利用并口和串口的直接电缆连接和用网卡连接之外，还有一种新型的接口连接方式称为 USB。

但目前支持双机甚至多机互连的 USB to USB 网络产品还很少见，故在此不做过多的叙述。

4.2.2 远程直接通讯

如果两台微机距离较远，但只要是能够接上公共电话网，那么利用一个调制解调器 MODEM，就可以进行相互之间数据通讯了。但是通讯软件的使用却有两种方式：一种是开发者自己编制通讯软件；另一种是利用 Windows 操作系统和商业通讯公司的通讯软件。下面将对后一种情况作一些说明，以便后面进行两种方式的对比，使大家知道我们自己开发通讯软件的可行性。

Windows98 计算机通过 MODEM 和电话线，不仅可以上 INTERNET 国际互联网，而且可以与任何电话线路所能达到之处的同样配置的计算机建立对等网络连接，就如同在一个局域网中的计算机一样，实现文件等资源的共享。在这种对等网络中，任一计算机既是拨号客户机，又是拨号网络服务器，谁都可以发起拨号，访问对方的资源，同时使得自己的资源被别人访问[46]。

对于 Windows95 需加装 Microsoft 的 PLUS! 软件才具有拨号服务器的功能，而 Windows98 已经带有了拨号服务器组件，无须安装额外的软件。不过一定要安装操作系统 Windows98 的拨号客户机和拨号服务器功能才行。先进入“控制面板”中的“通讯”设置项，选择安装“拨号网络”和“拨号网络服务器”组件；接着安装“Microsoft 网络用户”、“拨号适配器”、Microsoft 的“NETBEUI 协议”及“Microsoft 网络上的文件和打印机共享”等四个配置文件，各个配置构件均使用自身的缺省配置。在“计算机名”中输入计算机的名字，在“工作组”中输入计算机所在的工作组名，在计算机说明中输入详细的计算机说明。不同计算机需要有不同的计算机名，但它们的工作组名则最好一致。并选中“共享级访问控制”选项，“允许其它用户访问我的文件”选项及“允许其他计算机使用我的打印机”选项。在上面配置过程中，拨号网络使用的是 NETBEUI 协议传输数据。如选择 TCP/IP 协议或 IPX/SPX 协议也是可以的，但同时要求对方的计算机也选择同种协议。

接下来进行拨号网络客户机的设置：在“设置面版”的“建立新连接”中，输入远程计算机的名称（如红槽房计算机），在“选择设备”框中选中所使用的调制解调器。输入长途区号及电话号码，这样就产生了“名为红槽房计算机”的拨号网络图标。然后进入“拨号网络”，“文件”，“属性”设置面版，在其中设置最快速度值，此值是计算机串口与 MODEM 之间的传输速率，可以设定于 4 倍于 MODEM 的最高

线路速率。端口选择框选择 MODEM 所接的计算机串口,一般为 COM1 口或 COM2 口。在“拨号网络服务器类型”框中选择“PPP: INTERNET……”选项,“登陆网络”及“启用软件压缩”复选框,在“允许的网络协议”中选中“NETBEUI”复选框。如果你的计算机需要拨号连入 INTERNET,则必须选中“TCP/IP”复选框,并进入“TCP/IP 设置”面版进行必要的设置。

有了拨号网络客户机,还需要拨号网络服务器才能建立连接。拨号网络服务器的作用是允许远程用户拨入本机,访问本机的共享资源,也即充当网络中服务器的角色。首先在拨号网络设置面版中,进入“拨号网络服务器”菜单,单击“允许拨入”选项,该选项十分重要,如果不选中,则本机拒绝任何拨入请求。在设置面版中,设置“拨号网络密码”,此密码用于远程计算机拨叫本机时须输入的密码。在拨号服务器设置面版的“服务器类型”设置中,选择“默认值”或“PPP: INTERNET……”,在高级选项设置框中选中“启用软件压缩”。

通过以上设置,本机可以作为拨号网络客户机访问其他计算机的资源,也可以作为拨号网络服务器,被其他计算机拨入,但本机的文件和目录等资源可能还未设置成共享方式,不能被其他计算机访问,因此必须提供共享设置。在“Windows 资源管理器”中,选中需要提供共享的目录,例如:“D: \红槽房 hcf”目录,在弹出式菜单中,选择“共享”,产生“SHARE 属性”设置面版,在“共享名”输入框中输入共享名,此共享名是远程计算机访问本机时所看到的共享文件夹的名字。在“访问类型”中选择“只读”或“完全”,注意“完全”访问类型将允许别人在共享文件夹中写入,修改甚至删除目录中的文件。使用上述方法可以设置多个目录为共享目录。现在利用前面设置的拨号网络图标,例如“红槽房计算机”,就可以开始进行拨号连接了。

首先双击“红槽房计算机”图标,产生“连接到”设置面版,在用户名及密码处分别输入相应内容。这里的密码值必须是对方计算机设置的密码。在成功地拨入到对方计算机并通过了口令检验和登陆过程后,在查找面版中输入对方计算机名,单击“开始查找”,双击查到的计算机,即可访问对方的共享文件夹中的任何内容。

通过各个部分的设置和操作,所配备的计算机就成了既能拨出又能拨入、具有远程连网功能的计算机了。它能与同样方法配置的计算机建立对等网络,实现资源共享。如果只使用拨出,不希望别人拨入自己的计算机,只需要在拨号服务器中选中“不允许拨入”选项即可。

以上叙述的是利用操作系统的通讯功能实现两台计算机之间的资源共享。但如果要实现点对点传输文件,还需要通讯软件的支持。通常情况下,两台计算机之间远程传输文件是通过因特网发 E-mail 实现

的,但如果两台机器没有上因特网,只要双方都有条电话线和MODEM,那么就完全可以利用相关软件进行文件传输。在DOS下可以利用TELEX,如果你购买的是名牌MODEM的话,一般会附带有通讯软件,如USR的QUICKLINK和贺氏的SMARTCOM。利用现有的商业通讯软件进行文件传输,首先要对各自的计算机作好相应的通讯参数设置,双方事先通个电话,告诉对方需要什么文件,让他作好必要的准备,接收方将终端模式设置为TTY方式,如果使用自动应答,将应答程序驻留内存,接着拨号方拨号。如用手动拨号,须将把终端模式设置为TTY方式,再输入ATDT+电话号码,若使用事先编辑好的拨号列表也可以,但要保证拨出时终端模式为TTY方式。接收方应答,若使用自动模式就不必更多的操作;若使用手动应答,在听到铃响后,输入ATA命令,随后双方连通。需要文件的一方进行下载文件(DOWNLOAD FILE)操作,传输文件的一方进行上载文件操作(UPLOAD FILE)。在文件传输完毕之后,双方要断开电话线。

除了以上的商用通讯软件可以进行点对点传输文件外,在Windows95/98下,还可以利用超级终端的方式进行点对点传输文件,其文件传输步骤与上述步骤在本质上是一致的,所以在此我们就不做过多的叙述了。

4.3 调制解调器的应用及结构组成

我们要对调制解调器进行通讯软件编程,首先要对其硬件结构有初步的了解,只有这样才能有针对性地编制出执行效率高,可靠合理,适应能力强,使用方便、快捷的通讯软件。为以后科研成果转化为实际生产力,以及大规模产业化打下良好的基础。

调制解调器MODEM(英文全称为Modulation and Demodulation)是计算机经由公共电信网络实现远程通信和数据传输的重要设备。在数据终端或电话线的用户端,用来将二进制数字信号转换成可以通过普通公共电话信息系统传递的模拟信号,或将接收到的模拟信号转变成数字信号。在双线电路的情况下,每次只能在一个方向上传递信息(即半双工方式);在四线路情况下,则可以在两个方向上传输信息(即全双工方式)。个人计算机上使用的调制解调器有外置式和内置式两种:内置式实际上只是一块插卡,需要插在计算机的扩充槽上;外置式有独立的机壳和电源,可以与计算机通讯接口相连接[47]。调制解调器的工作示意图如图4.2所示。

调制解调器的应用场合主要有以下几种:

- 1)、进行互连网连接和网络信息传递

2)、点对点方式连接和信息交换

点对点方式连接，就是由一台本地调制解调器与一台远端的调制解调器单点连接，相互之间进行数据发送和接收的业务。在这种连接方式中，由一端（称为呼叫方）拨号，另一端（称应答方）应答。这种方式与互连网方式的区别在于：点对点连接是两台依靠调制解调器的电脑相互作为对方的服务器，从而共享资源。

点对点连接的另一种方式可以不通过拨号，但需要一根专用电话线连接本地调制解调器与远端调制解调器，这就是模拟专线方式，一方在呼叫的同时，另一方自动应答，便可以建立点到点连接。

在我们的红槽房大桥远程监测中就是使用的点到点连接方式。

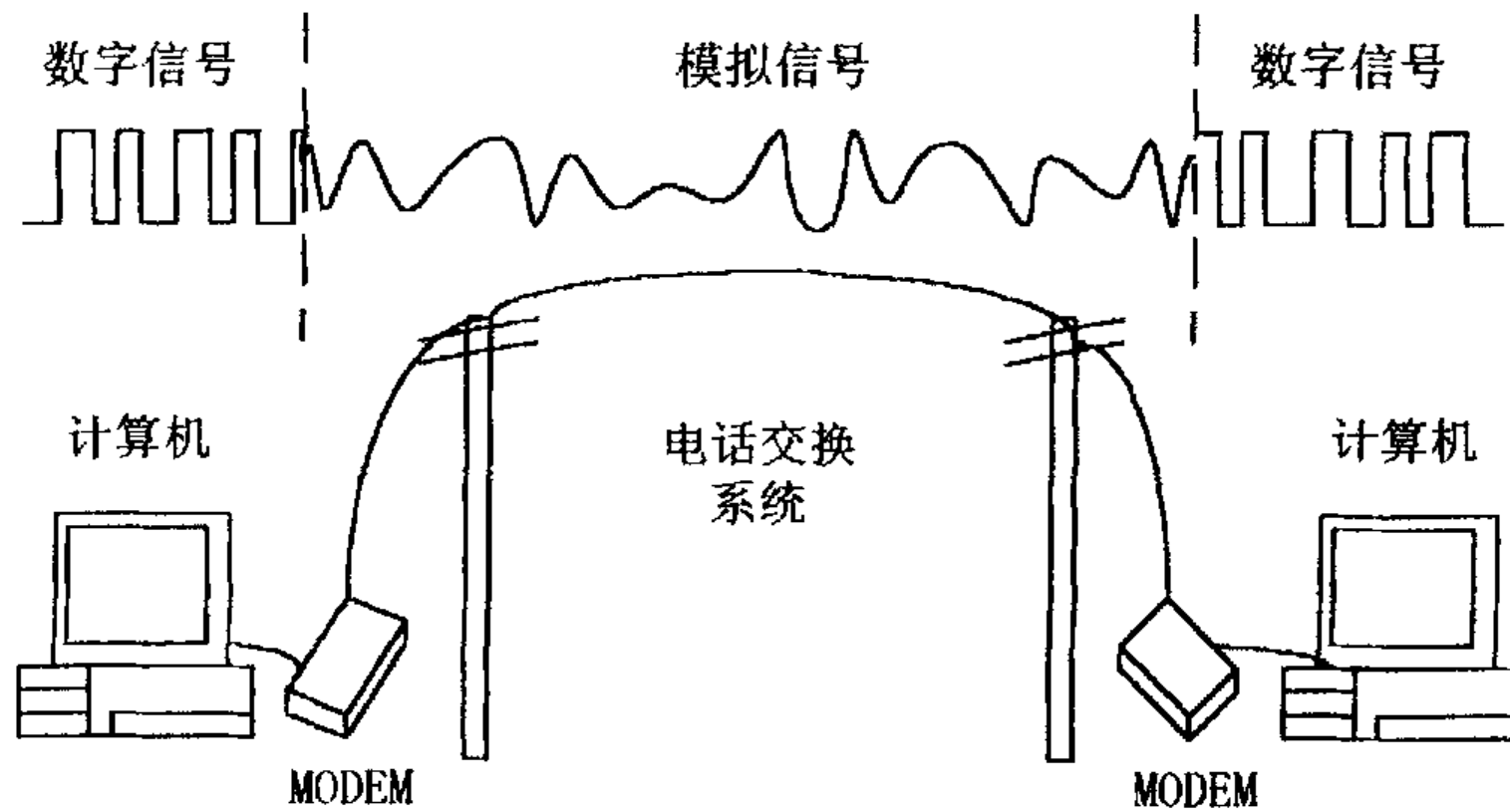


图4.2 调制解调器的工作示意图

3)、在工业控制领域的的数据信息传递

4)、通用终端应用方式连接

这种方式一般应用在一些特殊行业，如大型银行、保险公司、码头港口等单位，使用时主机连接一台调制解调器，通用终端连接另一台调制解调器。在两台调制解调器连接好后，终端就能取得主机的资料，如果在使用多路复用器的条件下，也可以多个终端共同使用一台调制解调器，这种方式一般使用专线。如现在各个大中城市的福利彩票售票对奖系统，就是采用的这种连接方式。

从功能结构上说，调制解调器由电源、发送器和接收器三部分组成。电源部分把交流电流（AC）转换成直流电流（DC）为调制解调器

各部分提供能量。发送器内有数据编码器、调制器、放大器、过滤器和波形形成即信号控制电路把数字信号脉冲转化成模拟的波形信号，使之可在电话线上发送，这就是通常所说的调制。接收器包括解调器及其附属电路，可将模拟电话信号反向转换成一系列计算机和终端设备可以使用的数字脉冲信号，这就是通常所说的解调。

我们在红槽房大桥的远程监测中，采用了两种类型的调制解调器，一种是霍氏的 33.6Kb/S 的 MODEM，另一种是 GVC 的 33.6Kb/S 的 MODEM。其中 GVC 的 MODEM 具有传输资料、发送传真、语音功能。其完全适合我们远程传输数据的要求。

4.4 远程数据传输系统的编程

前面我们就计算机之间的各种通讯方式做了分析，从中可以看出各种方法的特点和适用条件。本课题的研究对象是位于渝长高速公路上的红槽房大桥，该大桥距离我们的监测中心大约有五公里，在桥梁的一个桥墩上安置有一台工控机，负责桥梁现场的数据采集和控制，而我们的中心计算机位于重庆大学光电工程学院光电技术室内，要把测试现场的数据传回测试中心，测试中心也需要把控制命令传输到测试现场，两者之间的双向通讯是必不可少的。根据前面的分析，两者之间的通讯属于两台计算机之间的点对点的直接远程通讯。对于这种系统，我们有两种通讯方式。

其一是从红槽房大桥处铺设一根专线，一直延伸到重庆大学光电工程学院光电技术室。这种方式，数据传输可靠性较高、可以直接使用比较成熟的通讯硬件产品，但是需要向电信部门提出申请，专门进行架线工作。这样做，不仅工程量极大，施工周期长，而且架线费用和运行、维护费用极其昂贵。

其二是采用普通电话网通讯方式，由于红槽房大桥附近的居民区已经铺设了电话系统。距离我们最近的电话系统的分线盒只有大约 20 米，这对我们来说是十分方便的。仅仅需到电讯局办理一个电话户头，就可以利用整个市话系统，搭建我们自己的远程数据通讯系统。于是我们采用前面图 4.2 所示的方法，购买了两个传输速率为 33.6Kb/S 的调制解调器，重庆大学光电技术室的计算机通过 GVC 的调制解调器和电话线相连接，其分机号码为：65103126；位于红槽房大桥桥墩上的工控机通过贺氏的调制解调器和电话线相连，其分机号码为：65413381。这样整个通讯系统的硬件部分就完全搭建好了。接下来的工作就是进行通讯软件的编制。

我们的软件所采用的操作系统，在工控机端为 Windows95 系统，

在测控中心采用的是 Windows98 操作系统。整个软件的开发平台为 Microsoft 的 Visual C++5.0。我们知道 Dos 系统采用的是简单的输入输出接口和顺序的程序执行方式，而 Windows 系统采用的是图形用户接口和消息驱动方式[48-53]。因而 Windows 编程具有更大的灵活性、实用性和可靠性，但也具有高度的复杂性，它要求程序编制者具有广阔的知识面和高超的思维创造性。我们的整个通讯软件可以分为两个部分，一个为无人端即桥梁测试端的被控程序部分，另一个为检测中心的主控程序部分。两部分的程序流程分别如图 4.3 和图 4.4 所示。首先要对各自的调制解调器与主机的通讯端口、通讯速率、校验位进行设置。一般情况下，串口一用于鼠标器，而串口二用于通讯端口的扩展，所以我们选择串口二连接调制解调器。由于通用计算机的存储字节位为八个 Bit，故选择通讯数据位也为八位，选择校验位为奇校验。由于我们采用的市话系统的传输质量较好，所以设置调制解调器与主机之间的数据传输速率为选项中的最高值。

在主机端，即在重庆大学光电工程学院光电技术室的主机系统中，首先启动通讯程序，对调制解调器进行初始化，通过检测调制解调器的返回参数判断调制解调器工作是否正常，如果不正常则向系统报告，并显示警告信息，要求用户对调制解调器进行检修。如果正常则进入具体的通讯传输部分。作为主机端应该随时检测对方是否有呼叫请求，如果有则应该马上建立链路连接，接收对方发送的报警信息，然后断开通讯链路，立即向控制中心的检测者报告对方的报警请求，这时就说明位于桥梁上的传感系统检测到了异常数据。出现这些异常数据可能有几种原因，一是桥梁的确出现了异常应变、振动、变形等，二是传感器受到了外界的干扰，出现了短暂的工作不正常，三是传感器失效。这时就需要测试人员进行进一步的分析判断，如在多次数据采集后，对数据进行误差分析，统计异常数据出现的频率和偏离正常数值的大小，综合各种因素对异常原因进行诊断。如果测试人员想控制位于桥梁上的工控机的工作方式或者要求工控机把指定的测试数据传回测试中心，则需要主动发起呼叫，然后等待对方回答状态信息。如果对方回答忙，则表明工控机正在进行数据采集的工作，所以需要等待下次再进行数据传输的工作。如果对方在规定的时间内没有发送其状态信息，则表明工控机的通讯功能出现异常，这时需要重新启动通讯系统。如果对方回答处于空闲状态，则可以向其发送命令字，要求对方传送数据文件和执行相应的命令操作等。在上面中的任何一步，都可以随时拆除链路连接而返回初始状态。经过上面的步骤，命令文件可以顺利地传给桥梁旁的工控机，数据文件也可以顺利地由工控机传给主机，从而实现双向通讯功能。

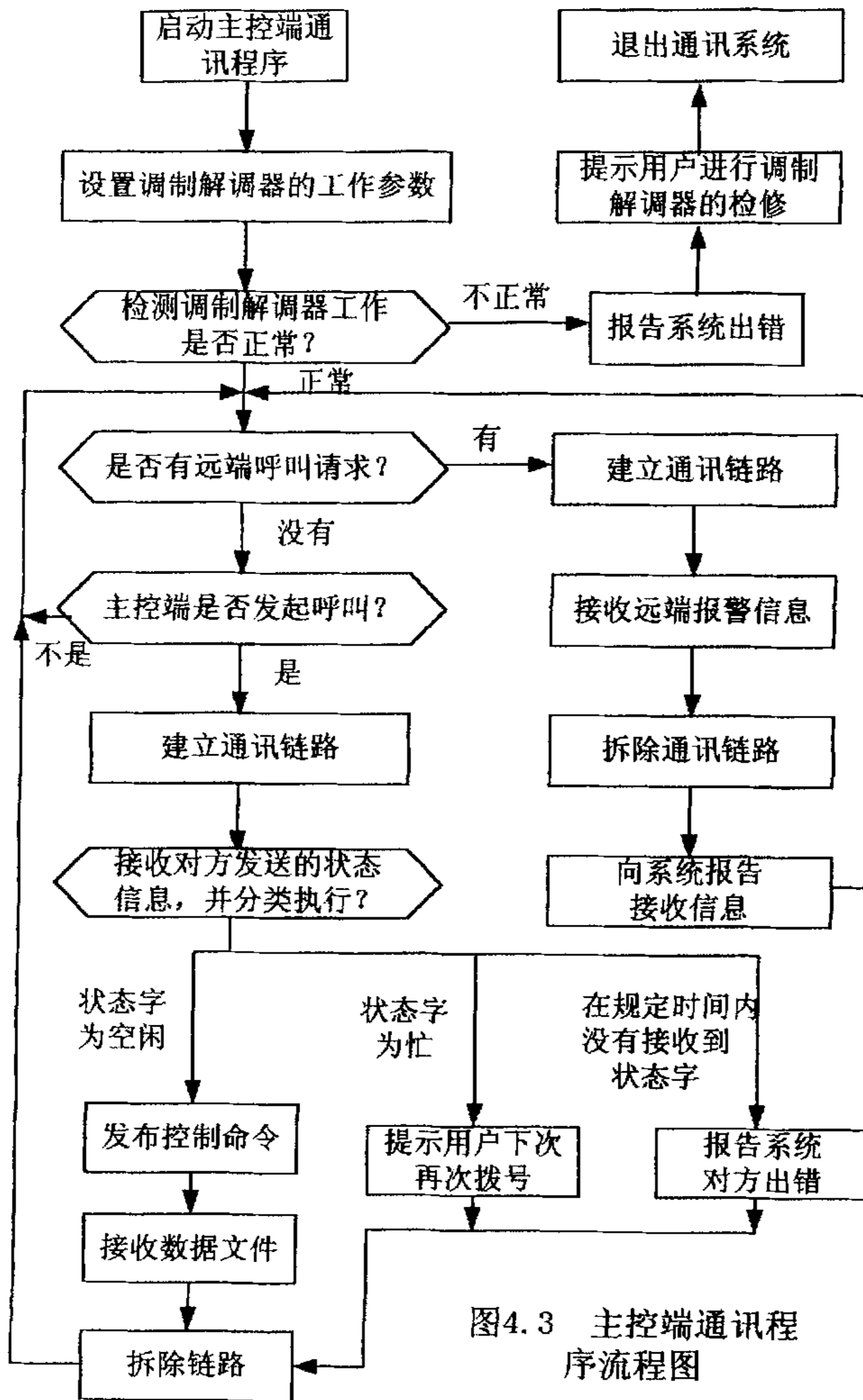


图4.3 主控端通讯程序流程图

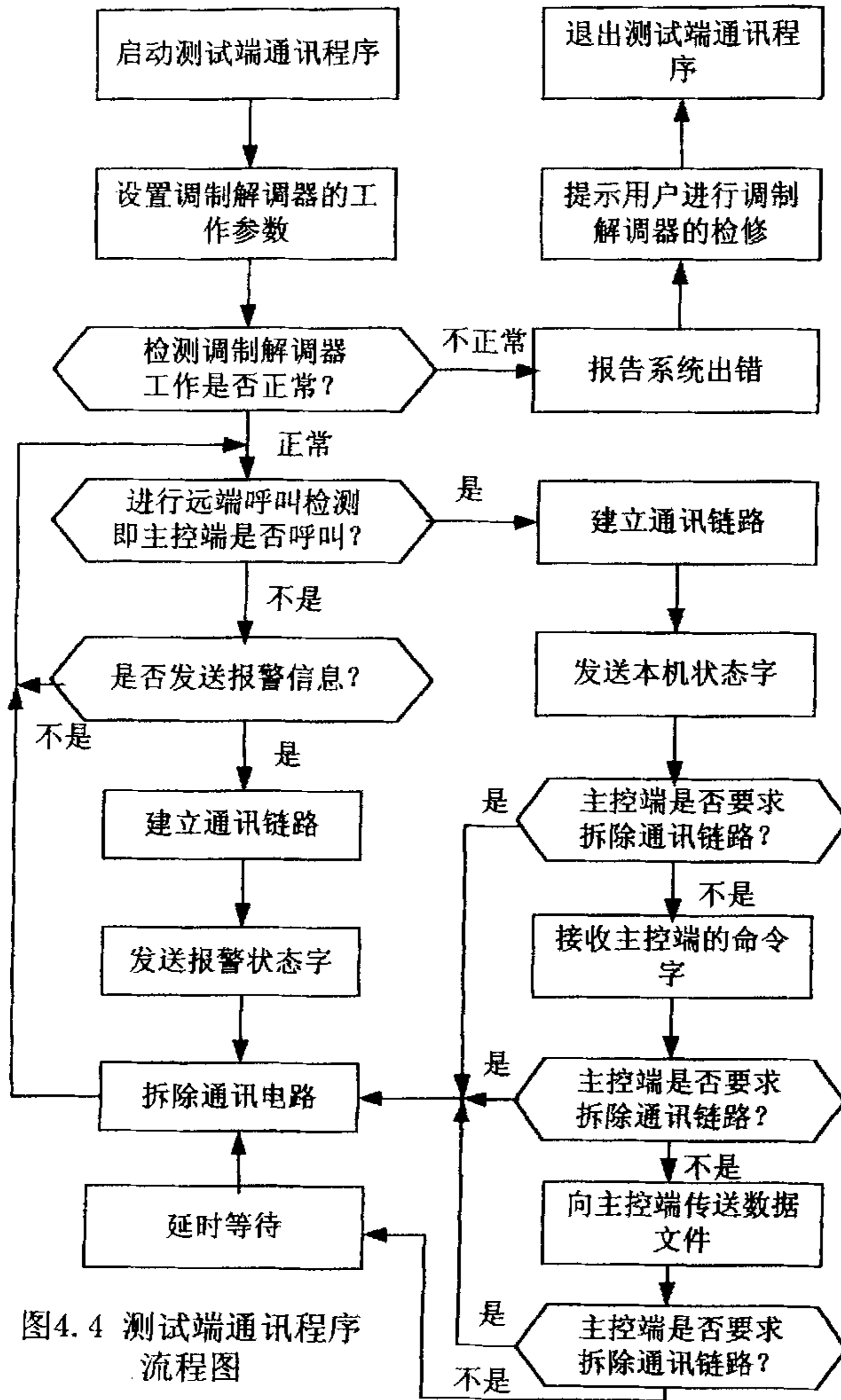


图4.4 测试端通讯程序流程图

在测试端，即位于红槽房大桥桥墩上的工控机系统中，启动通讯程序后，同样对调制解调器进行参数的初始化，检测调制解调器是否正常工作，如果出现异常，则向系统报告出错，并提示操作者对调制解调器进行检修。如果正常则进入通讯程序，则随时检测是否有远端呼叫，如果没有，接着检测是否需要报警连接，如果需要则主动向中心计算机发出呼叫，建立链路连接，发送报警状态字，然后断开链路。如果检测到主机呼叫，则按照主机发送的命令字和控制字进行相应的操作。从而配合主机完成整个数据传输工作。

4.5 本章小结

从世界上第一台计算机诞生到 Internet 国际互连网的普及，在短短几十年里，通讯技术发生了巨大的变革，计算机之间的信息交换和资源共享已经成为通讯领域的重要任务之一。特别是两台计算机之间的远程直接通讯，更是我们这个信息社会相互联系的重要手段。利用调制解调器通过广阔的公共电话网进行两台计算机之间的互连则是目前最简洁、最方便、最有效的双机通讯方法之一，在本课题的桥梁振动远程监测系统中就是采用的这种通讯方式来实现红槽房大桥测试点与重庆大学光电工程学院测试监测中心之间的信息交换。我们编制了整个通讯软件，并对整个通讯系统做了深入而细致的分析，阐述了控制中心和被控点的通讯程序的流程和工作步骤。该通讯系统及其通讯软件是整个研究项目中远程监测部分的最终实现形式，是整个数据传输和交换的核心，本章的研究为下一章总体系统的分析和研究奠定了良好的基础。我们将在下一章，把前面各部分的研究加以综合，从全局总体的角度对整个桥梁振动远程监测系统作出论述。

第五章 桥梁振动远程监测总体系统

提要 本章首先对本课题的实际工程应用对象红槽房大桥的总体概况作了初略的介绍,并针对我们所具体监测的桥跨结构、现场安装和调试过程进行了叙述。从系统的高度综合了前面三章的研究结果,分析了桥梁振动远程监测系统的总体结构框图和工作原理,最后论述了远程监测系统在其它领域中的扩展应用。

5.1 红槽房大桥简介

本课题的研究对象为位于渝长高速公路上的红槽房大桥,该桥距离重庆大学大约五公里,所以对于我们实际现场测试和装调工作比较方便。红槽房大桥的主梁是由重庆交通学院桥梁工程系负责设计,桥墩是由重庆市公路研究所设计,整座桥梁由重庆市桥梁公司负责修建,该桥的主梁采用了目前最新的桥梁施工工艺,即预张混凝土梁的施工工艺,所以桥梁设计单位之一的重庆市交通学院桥梁工程系希望对该桥进行一系列的监测工作,以检验新工艺的实用效果。

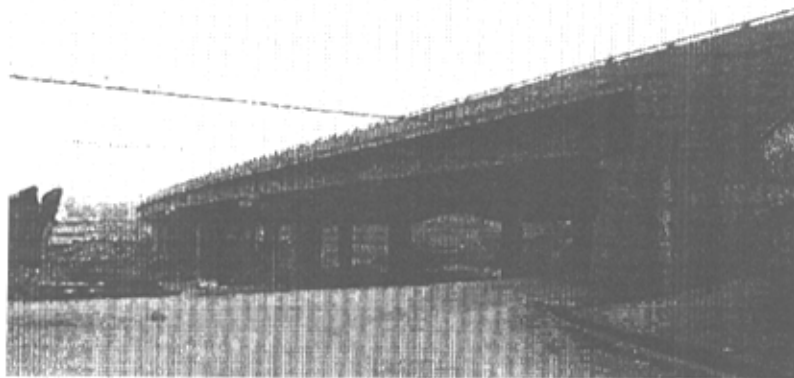


图 5.1 红槽房大桥全景

红槽房大桥于 1998 年建成通车,投入使用。在 1998 年底正式通车之前,在重庆市公路研究所的王涤修高级工程师的领导和指挥下,曾对桥梁进行了一次检测,当时我们正在进行课题的前期研究,所以参与了红槽房大桥的整个检测过程。在整个监测过程中,使用了四辆满载石料的大型工程运输车作为对桥梁加载的工具,每辆重量均在 20

吨以上，在桥的大梁中部和端部贴有电阻应变片，并安装了挠度计，以测试梁的静态应变和静态挠度。整个测试过程持续了一整天。

红槽房大桥全长 210 米，属于新型的高速公路桥梁，由两个分离的桥体组成，两个桥体互不影响，每个桥体负责不同的车道，即在每一个单独的桥面上，车辆行驶的方向是单向的。整个红槽房大桥由七跨组成，每跨长约 30 米，每跨由七跟梁并排构成。跨与跨之间留有伸缩缝，以防止桥梁由于热胀冷缩产生温度应力。整个红槽房大桥的照片如图 5.1 所示。而我们只对其中的两跨梁进行监测，其照片如图 5.2 所示。

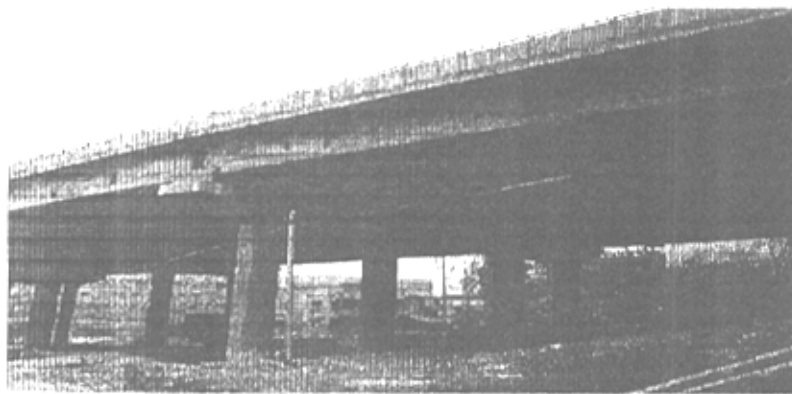


图 5.2 进行监测的两个桥跨

从照片中可以看出，红槽房大桥桥面高大约 15 米，每一个桥面宽大约 18 米，是一座陆路公路桥。每个桥墩使用的是两根直径约两米的混凝土柱子支撑一根横向基座构成，而桥的大梁并排放置在相邻的两个基座上构成桥面。桥下有公路通过，并且桥下是一个比较密集的居民生活区。

5.2 现场安装和测试

我们所监测的两跨大梁靠近桥头，我们的工控机即安放在图 5.2 所示的桥墩上，并且该处是我们的现场测试点，所有的传感器信号都要汇集到此处，我们从附近居民区拉的电话线和电源线也要汇聚到此。从桥头到该桥墩，施工单位专门为此次监测在桥面下侧搭建了一条临时通道如图 5.3 所示，我们可以从桥头下的公路旁的钢架爬到桥的大梁

处，然后沿此临时通道进入桥墩位置，在此完成我们的现场调试和测试工作。图 5.3 右下部所示的公路便是桥头下的一条公路，在图 5.1 中可以十分清晰的看到该公路。这就是我们进入测试点的入口。只有在系统的安装调试阶段和系统维护阶段才有人员在桥墩处的测试点工作，而在系统正常运行阶段，此处没有工作人员，也就是说桥梁测试端的整个系统是在无人状态下进行工作的。

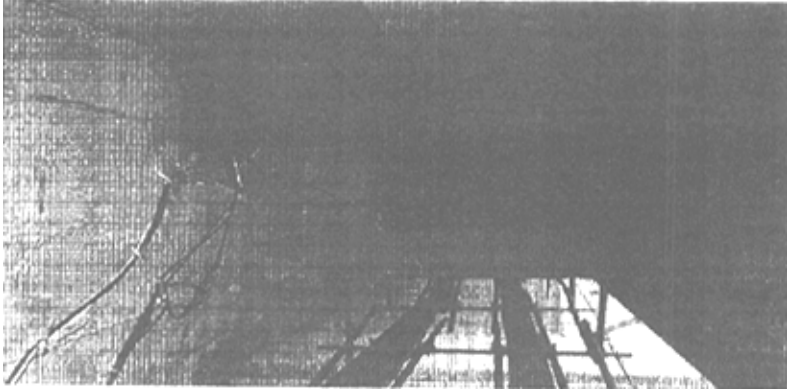


图 5.3 监测通道及大梁外观

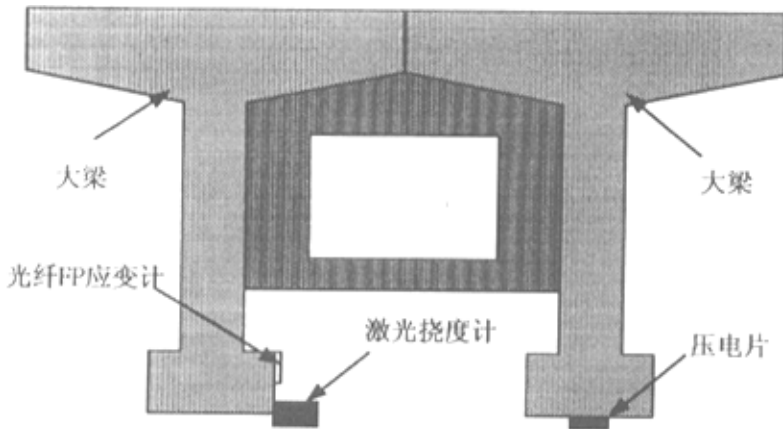


图5.4 大梁的横截面示意图

我们的传感器安装在要求进行测试的大梁上,如上文所述的临时通

道正好和要测试的大梁靠近,在图 5.3 中我们可以十分清楚的观察到这一情况,所以我们可以测试通道旁对传感器进行仔细的安装和调试,而不需要象 1998 年的那次检测那样另外搭建测试支架。这给我们的现场测试工作带来了很大的方便。

传感器安装在监测通道旁的大梁上,图 5.3 左侧部分便是大梁,中间部分便是临时通道,挂在大梁上的电缆便是从传感器到桥墩处的测试点的信号传输线和电源引线。我们利用在桥梁施工过程中,大梁外部留下来钢筋作为挂线柱,沿着大梁进行电缆的铺设。这样做不仅铺设电缆的长度较短,而且施工方便、快洁。如果把电缆铺设在临时通道上,一方面影响测试人员的通行,增加不安全因素,另一方面也不利于系统的调试和维护。

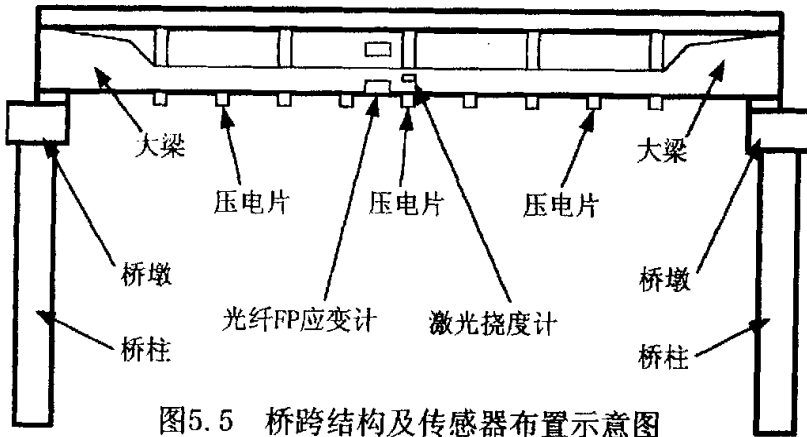


图5.5 桥跨结构及传感器布置示意图

我们要对大梁进行监测,首先要对其有一定的了解。大梁的横截面结构、桥跨的结构及传感器的分布位置如图 5.4 和图 5.5 所示。从图中可以看出,大梁为工字形,上部较宽,主要是为了构成桥面,供车辆通行。大梁中部窄而高,主要是为了提高其承载能力。相邻两根大梁之间由干梁连接,由此构成一个整体。每一根大梁是直接安放在桥墩上,不同桥跨之间的大梁无直接联系,所以整座红槽房大桥可以看成是由一个个单独的桥跨连接而成的。

我们只对图 5.2 中所示的两个桥跨进行监测,观察其挠度、静态应变和动态应变共三个测试指标。在大梁的中部安装有激光挠度计,对跨中挠度进行监测,在大梁的中部还安装了光纤 FP 应变计,对跨中静态应变进行监测。以上两个参量的监测是由另外的研究人员完成,在

此不做过多的叙述。本文的研究重点是桥梁的振动特性的监测，即桥梁振动时的动态应变测试，为了完成监测工作，我们在大梁的底部粘贴了压电片，从图 5.5 可以看出，传感器的安装位置为距离梁的根部 5 米处，然后每间隔 2.5 米为一个贴片位置，一根梁上总共粘贴有 9 片压电片。这根粘贴有 9 片压电片的梁便是我们的主要研究对象。由于该梁所属的桥跨位于单向车道的最末段，也就是说，车辆由桥的另一头上桥，行驶过前面的 6 个桥跨后，最后开过我们所监测的桥跨，然后离桥。由于动态信号的监测必须要有激励源，我们采用的激励源为桥梁上的行驶车辆，车辆的驶过是随机的，是我们无法预知的，为了保证整个监测系统在无人的情况下工作，我们在前面一跨也粘贴了一块单独的压电片，监测系统随时检测这一块压电片的输出信号，由于单向行驶的车辆一定是先经过前一跨，然后才经过我们所主要研究的后一跨，所以那块单独的压电片一旦出现信号输出，就立即唤醒整个动态应变监测系统，进行大规模的信号采集；如果这一片压电片没有信号输出，就说明桥上没有车辆经过，于是整个动态应变监测系统就处于睡眠状态，不进行数据采集工作。由此可以看出，整个桥梁振动监测系统具有一定的智能性。

5.3 桥梁振动远程监测系统的总体结构

在第二章中我们对桥梁的振动进行了初步的研究，分析了两端简支，两端固定，一端简支一端固定的共三种支撑形式的梁的振动特性，并分析了其在自由振动下的低阶振动模态的应变分布。对于红槽房大桥来说，大梁的支撑形式可以近似为两端简支的梁，在第二章的理论指导之下，我们根据其应变分布进行了压电片的粘贴工作。在第三章中，我们针对压电片对动态应变的传感原理进行了分析，并且对信号的提取和处理电路进行了讨论，在此基础之上我们完成了整个电路的设计和装配，并成功地在监测中加以了应用。在第四章中，我们对数据通讯的各种形式进行了讨论，并分析了整个数据的传输方式，介绍了通讯系统的工作流程。在此，我们要把前面各章的独立的研究和讨论综合起来，构成一个完整的、严密的、功能强大的、具有智能化的桥梁振动远程监测系统。整个系统的主要结构框图，如图 5.6 所示。

桥梁观测点的工控机是远程监测系统的远端核心，它不仅要肩负通讯功能，而且要负责整个系统的数据采集、工作控制、命令接收、命令执行、紧急报警和定时工作等众多功能。而位于重庆大学光电工程学院光电技术室的中心计算机则是远程监测系统的近端核心，它不仅要肩负通讯功能，而且要负责命令发布、数据接收、数据分析整理

等一系列功能。所以整个系统中的两台计算机构成了系统的主要骨架。

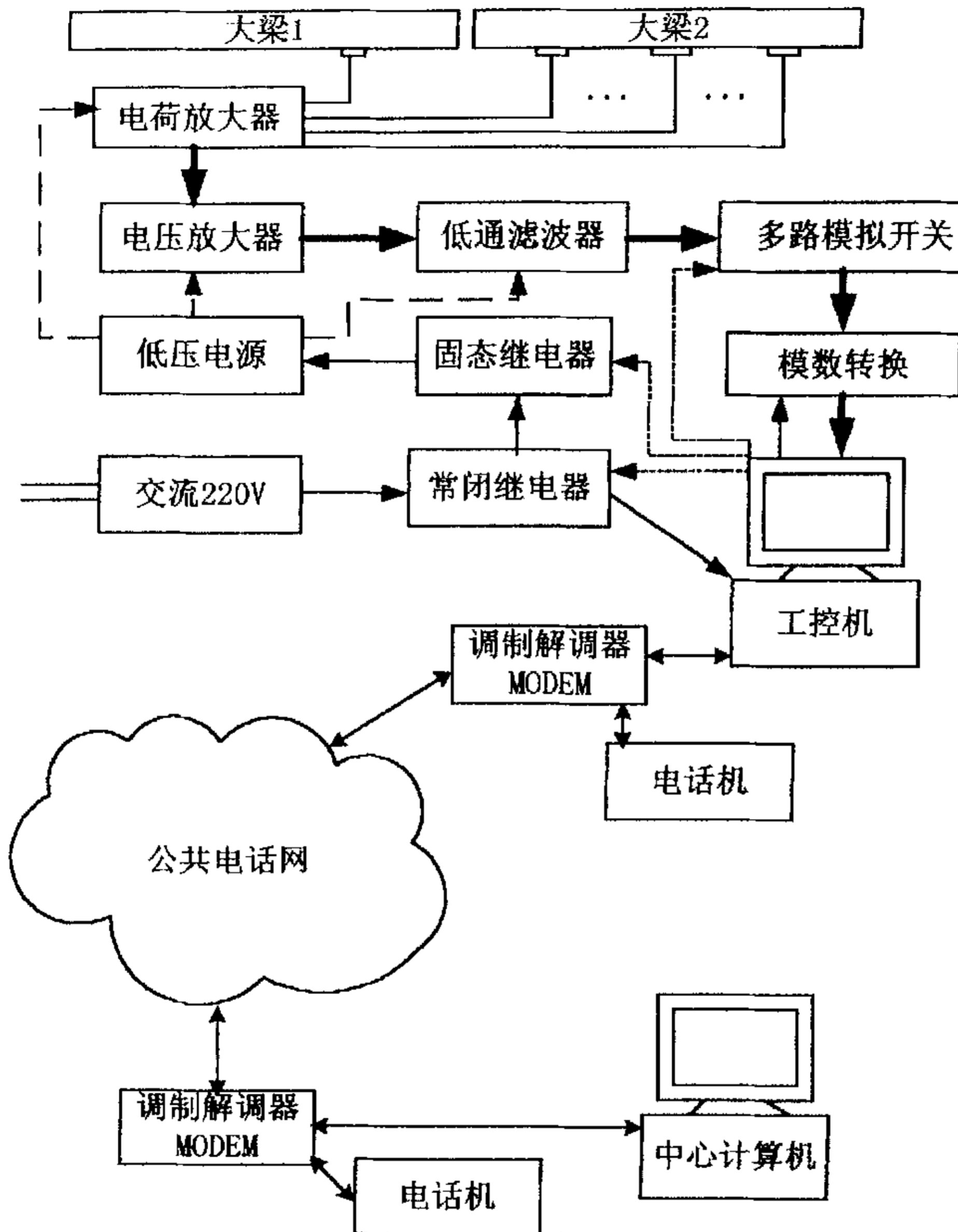


图5.6 桥梁振动远程监测系统总体结构

前端的工控机在平时处于半工作状态，除了进行定时的数据采集之外就一直处于待机状态。这时如果有近端的中心计算机通过通讯系统向远端的工控机发布命令，工控机才根据命令的具体要求进行相应的工作，或者工控机在采集的数据中发现异常，也可以主动向测试中

心的计算机发出呼叫，建立链路，传送报警信息。所以整个系统中的计算机要保证长时间工作的可靠性和运行的稳定性，这是整个桥梁振动远程监测系统正常运做的关键之一。这也是我们采用工控机作为远端计算机的原因之一。

整个系统中的电源由民用普通 220V 交流电提供，电源线首先经过一个长闭的继电器之后，才为整个远端测试系统提供能源。一部分供给工控机，另一部分再次经过一个固态继电器为低压电源部分提供能源，然后低压电源给电荷放大器、电压放大器、低通滤波器提供能源。这样进行系统设计的目的在于，系统可以按照中心计算机发布的命令要求，随时控制前端数据采集部分的工作进程，在不需要进行信号采集时，可以通过固态继电器切断低压部分的能源供给，使之处于休眠状态；在需要进行数据采集时，再通过固态继电器接通低压部分，开始正常的数据采集工作。这样做，一方面可以节约能源，另一方面可以延长数据采集部分的使用寿命，有利于整个系统长期地、可靠地、稳定地正常运行。我们在交流 220V 之后，紧接着设计了一个常闭继电器，主要是为了工控机的定时从新启动。我们可以在工控机中设置需要进行从新启动的时间，时间一到，工控机控制继电器使之断开，于是整个系统的电源在此时全部切断，工控机由于突然掉电而从新启动，继电器也会由于突然掉电而由断开状态恢复至原来的闭合状态，重新对整个系统供电，于是整个系统就会重新初始化。这样做的目的在于，如果由于异常情况出现程序中断，系统可以重新恢复到正常工作。这有点像工业控制领域人们常谈起的“看门狗”技术。

整个系统的工作过程我们在前面已经做了较详细的说明，在此就不再重复叙述了。从图 5.6 中也可以十分清晰地看出整个系统的结构和工作流程。

5.4 远程监测系统的扩展应用

到目前为止我们已经对整个桥梁振动远程监测系统做出了完整的分析和描述，其运行情况和测得的桥梁的动态应变数值和曲线将在下一章的实验和数据分析中进行研究。在本章的最后我们对自己所开发的远程监测系统的扩展应用给予说明。

这个远程监测系统具有相对的对立性，也就是说，该系统具有无限的扩展能力。在该系统的前端除了我们的压电片动态应变传感系统之外，还可以加接另外的传感系统，从而构成其它性质的远程监测系统，如接上光纤 FP 应变传感器就可以构成远程光纤应变监测系统，接上激光挠度计就可以构成远程挠度监测系统。随着前端传感器的不同，

就可以构成千变万化的各种远程监测系统。

除此之外,经过改装,该系统还可以成为一个安全监视系统。因为随着经济的不断发展和科学技术的不断进步,对远程图象传输和电视监控系统的需求量越来越大。在电力、铁路、公路、银行、保险公司、博物馆、仓库、宾馆和军事设施等场所对安全监视和现场报警系统的要求也十分迫切。在如上的这些领域,我们的远程监测系统完全可以经过改装之后而加以应用。

该系统如要进一步深入,较好的方法是利用 Microsoft 的视窗 2000 系统,因为在这一新型操作系统中,微软公司开发了强大的通讯服务组键,直接利用其提供的通讯服务功能可以建立可靠的链路连接和数据传输,同时还可以在其提供的各种通讯协议中进行有效的筛选,选择其最适合于系统的传输协议。如果使用正版的 Windows2000 操作系统,还可以随时通过网络连接向微软公司进行技术咨询、并享受长期的技术服务和技术支持,只有这样才能使我们的通讯系统得到不断的升级和功能的不断完善。从而使我们的产品走向广阔的市场。

5.5 本章小结

本章综合了前面三章的研究结果,从系统的高度对整个桥梁振动远程监测系统的总体结构进行了论述,为下一章所进行的实验和实验数据分析奠定了基础。本章首先对我们的监测对象即位于渝长高速公路上的红槽房大桥的总体概况作了介绍,然后对重点监测的桥跨的结构和传感器的位置分布进行了说明,对现场安装和调试过程中的技术难点和实施过程进行了仔细的分析。在此基础之上,给出了桥梁振动远程监测系统的总体结构框图,并对总体系统中各个部分的作用和功能进行了归纳,对整个系统的工作流程进行了总结。经过上面大量的理论分析、实验室研制和现成安装调试工作,我们的红槽房大桥远程监测系统在工程实践中获得了成功的应用,现在整个系统运行正常,我们只需在重庆大学光电工程学院光电技术室内就可以随时了解到五公里之外的红槽房大桥的实际运行状况。最后我们指出只要对该远程监测系统进行一些改进,就可以形成具有各式各样功能的远程系统,从而使得我们的整个远程监测系统具有广阔的发展空间和巨大得扩展能力。

第六章 实验及数据分析

提要 本章介绍了整个实验的具体实施过程和应该注意的相关技术问题，并针对实际的红槽房大桥在普通车流激励下所测出的动态应变曲线，分别在时间域和频率域进行了初步的分析，从中求出了桥梁的固有振动频率，并对红槽房大桥上行驶车辆的速度和吨位进行了半定量的推断。

6.1 实验具体实施过程

在上一章，我们对整个桥梁振动远程监测系统的总体结构和工作流程作了详尽的分析，并且介绍了在实际的红槽房大桥上的应用情况。在本章中，我们将对实际的红槽房大桥在普通车辆载荷激励下所记录的动态应变曲线进行初步的分析和讨论。

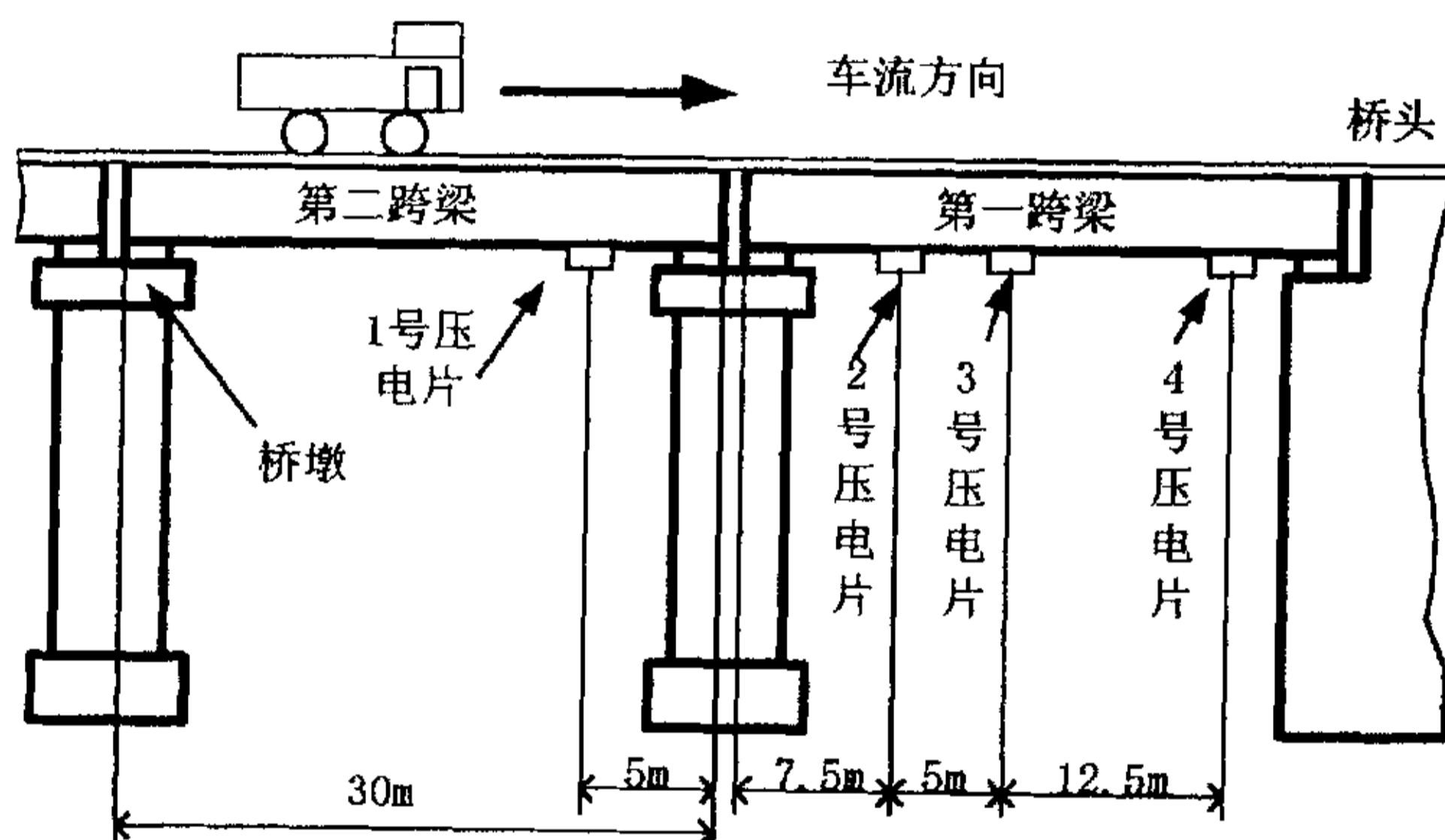


图6.1 实验监测点示意图

我们在绪论中曾对桥梁监测的实验数据分析的重大意义做了论述，它不仅是桥梁监测的重要组成部分，而且是整个监测过程成功与否的最终体现。我们可以从所测得的红槽房大桥振动的动态应变曲线反过去推知桥梁上所经过车辆的速度和吨位，当然这种推算只是一种近似，但它能初步反映出桥上交通的实际情况。进一步说，如果我们进行连续不断的监测和数据的及时处理，那么就可以运用统计分析的

方法对在特定时间内,桥梁上的交通状况进行定性的推测和判断。通过动态应变曲线我们还可以计算出桥梁的固有振动频率。如果进行长期的监测,便可以通过分析动态应变中所提取的参数的变化,对桥梁的健康状况进行评价。另外我们还可以在不同的时间、不同的天气条件、不同的季节变化下观察桥梁的动态应变的变化趋势,从而为桥梁的设计部门和施工单位提供可靠的参考数据。下面便是具体的实验实施情况。

在第五章中曾经讲到我们在红槽房大桥的第一跨梁上总共粘贴了九块压电片,在第二跨梁上我们粘贴了一块压电片,我们实际所进行的实验是在这总共十个监测点中选取了具有代表性的四个监测点,即第二跨中的一个监测点和第一跨中的三个监测点,它们的具体位置如图 6.1 所示。

从上面的实验监测点示意图我们可以十分清晰地看到各个监测点的实际的位置。由于红槽房大桥是由两个分离的桥体组成的,即实际上是两座并排的大桥,每一座桥负责一个单独的行车方向。我们所监测的这部分的车流方向如图 6.1 所示,即车辆从第七跨梁上桥,先经过第六、五、四、三、二跨梁,然后才经过第一跨梁,最后离开整个红槽房大桥,进入路面。红槽房大桥的每一跨长 30 米,也就是每一根大梁长 30 米。在第二跨梁的距离右根部 5 米处,我们粘贴了压电片,为了以后叙述方便,我们称之为一号压电片。在第一跨梁的距离左根部 7.5 米处粘贴有一块压电片,我们称之为二号压电片;在靠近第一跨梁的中部,距离二号压电片 5 米处粘贴有三号压电片;在第一跨梁的右根部,距离三号压电片 12.5 米处粘贴有四号压电片。下面我们就针对这四个监测点所测得的桥梁的动态应变信号进行分析和研究。

我们对动态信号进行采集就会涉及一个采样频率的选取问题。根据采样定理,采样频率至少要大于信号最高频率的两倍。只有这样才能保证所得到的数字信号不会产生混叠失真。但在具体的工程实践中,一般采取一种比较保守的方法,采用信号最高频率的 3—5 倍作为实际的采样频率。对于我们的监测对象来说,桥梁的振动一般频率很低,根据我们所查阅的大量资料来说,桥梁的第一阶振动频率为几赫兹,对于一些大型的桥梁来说第一阶振动频率更低,有的只有零点几赫兹。而且对于桥梁来说,振动总是集中在低阶模态,桥梁的高阶模态振动在理论上是存在的,但在工程实践中,这几乎是小概率事件,换句话说这几乎是不可能发生的。所以我们把信号的采样频率定在 250Hz 即采样间隔为 4ms,这个采样频率对于我们的研究对象红槽房大桥的振动来说是完全合适的。因为采样频率过低会造成信号的混叠失真,采样频率过高,并不能更多地获得有用的信号信息,反而给工程实际增加

额外的负担，所以对采样频率的选取是根据实际情况，经过多次的实验和对比之后确定的，从后面所记录的桥梁动态应变曲线来看这个采样率也是合理的。

在第五章中系统总体结构图 5.6 中，可以看到我们在电荷放大器之后，我们增加了电压放大电路，主要是考虑到当桥梁的振动过于微小时，电荷放大器的输出信号有可能过于微弱，不利于后续电路的信号处理和由模拟信号向数字信号的转换。另外系统中还增加了低通滤波电路，因为压电片作为动态应变信号传感时存在两个主要的外界干扰。一个是电磁干扰，电磁干扰是电类传感器所普遍存在的干扰，要采取电磁屏蔽才能减小干扰噪声，而光纤传感器不存在这类干扰源。另一个是外界的声音干扰，因为声音从本质上说是一种波动，它所造成的应变波同样会对压电片产生信号影响。一般来说声波的频率带为高频率段。桥梁的振动处在低频率段。所以我们所增加的低通滤波电路可以去掉一部分干扰，提高信号噪声比。从另一个方面来说，在进行模拟信号向数字信号的转换过程之前，也需要进行低通滤波，这样做可以有效地防止高于二分之一采样频率的信号的干扰。

在下一步的设计中我们准备把总体系统中的电压放大器改为程控增益放大器。在我们现在的电路中，电压放大器的放大倍数是固定不变的，而程控增益放大器的放大倍数可以由计算机自动根据信号的变化而进行放大倍数的自动调整，这样既有利于微弱振动信号的有效放大，又可以保证在较大的振动条件下，信号的输出不会出现饱和。从而实现整个信号处理的自动化。对于程控增益放大器的实现有两种方式。一种为利用现成的程控增益放大集成电路，一块芯片就可以实现全部的功能，但是该芯片在市场上难于买到；另一种可以利用普通运算放大器和模拟开关的组合，通过控制放大器的反馈电阻的阻值来达到调节电路放大倍数的目的。

在第三章中我们曾经对压电片的动态应变传感原理进行了深入而细致的分析，并且给出了通过电荷放大器的输出计算动态应变的表达式，即 (3.25) 式。根据表 3.1 所提供的压电片的特性参数，我们可以得到由电路的输出电压计算动态应变的表达式 (6.1) 式。

$$S_1 = -\frac{U_o C_f}{d_{31} c_{11} S_p a A_b} \quad (6.1)$$

其中 S_1 为最终要求的动态应变值， U_o 为整个电路的输出电压值，单位为伏特， C_f 为电荷放大器的反馈电容，单位为法拉， d_{31} 为压电片的压

电应变常数，单位为库仑/牛顿， c_{11} 为压电片的弹性常数，单位为牛顿/平方米， S_p 为压电片的电极面积，单位为平方米， a 为应变传递系数， A_b 为后续放大电路的放大倍数。根据(6.1)式通过对A/D转换后的电压数值就可以确定所测得的动态应变值。

6.2 所测得的红槽房大桥动态应变曲线及其分析

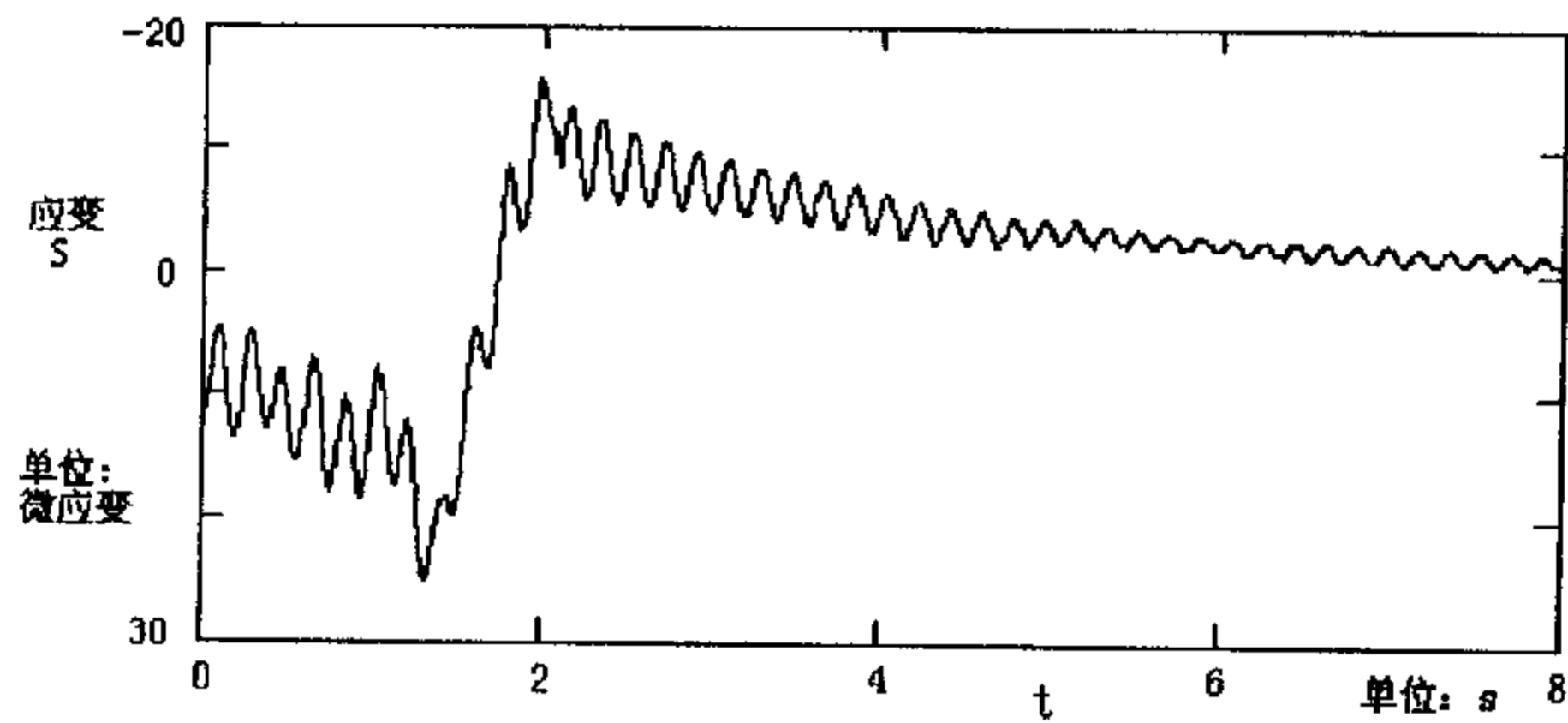


图6.2 一号压电片所测得的动态应变曲线

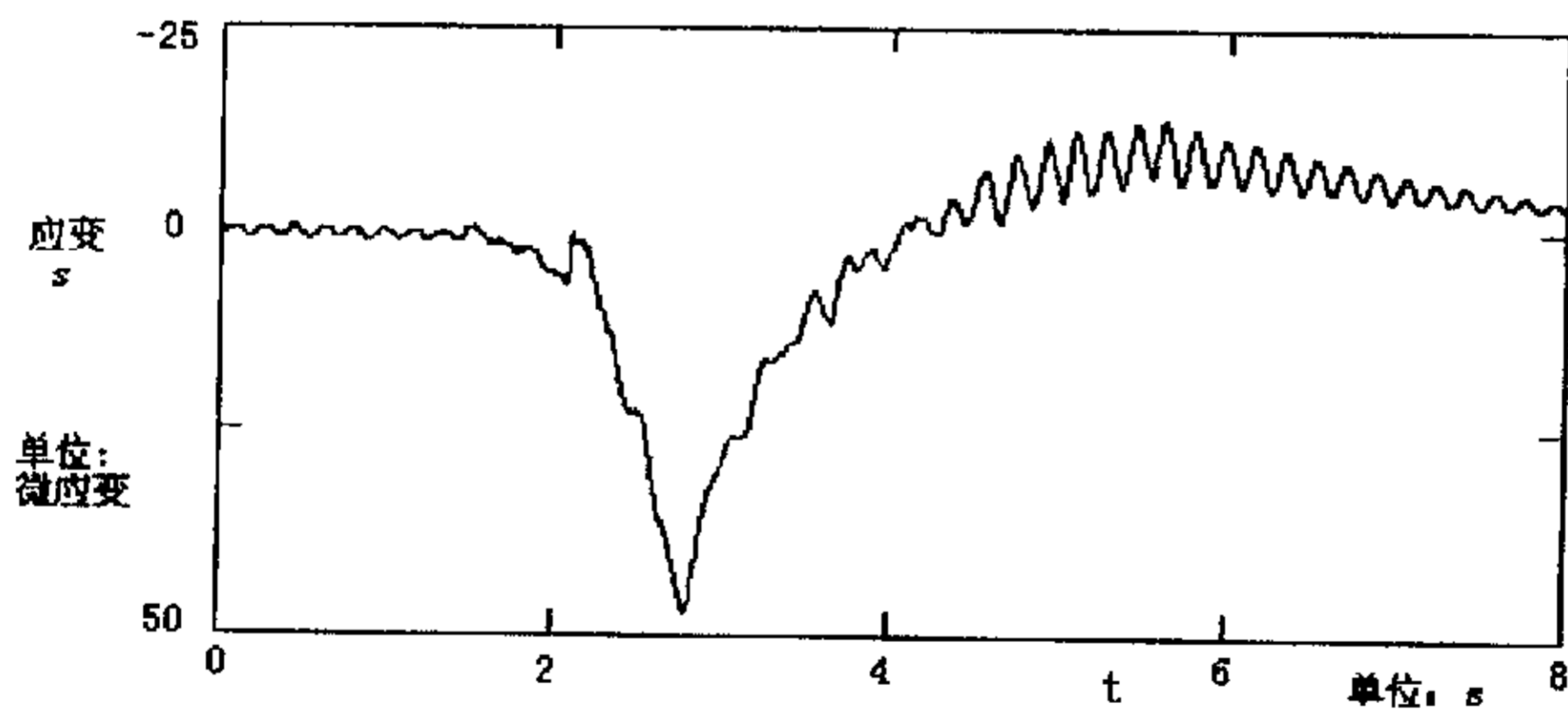


图6.3 二号压电片所测得的动态应变曲线

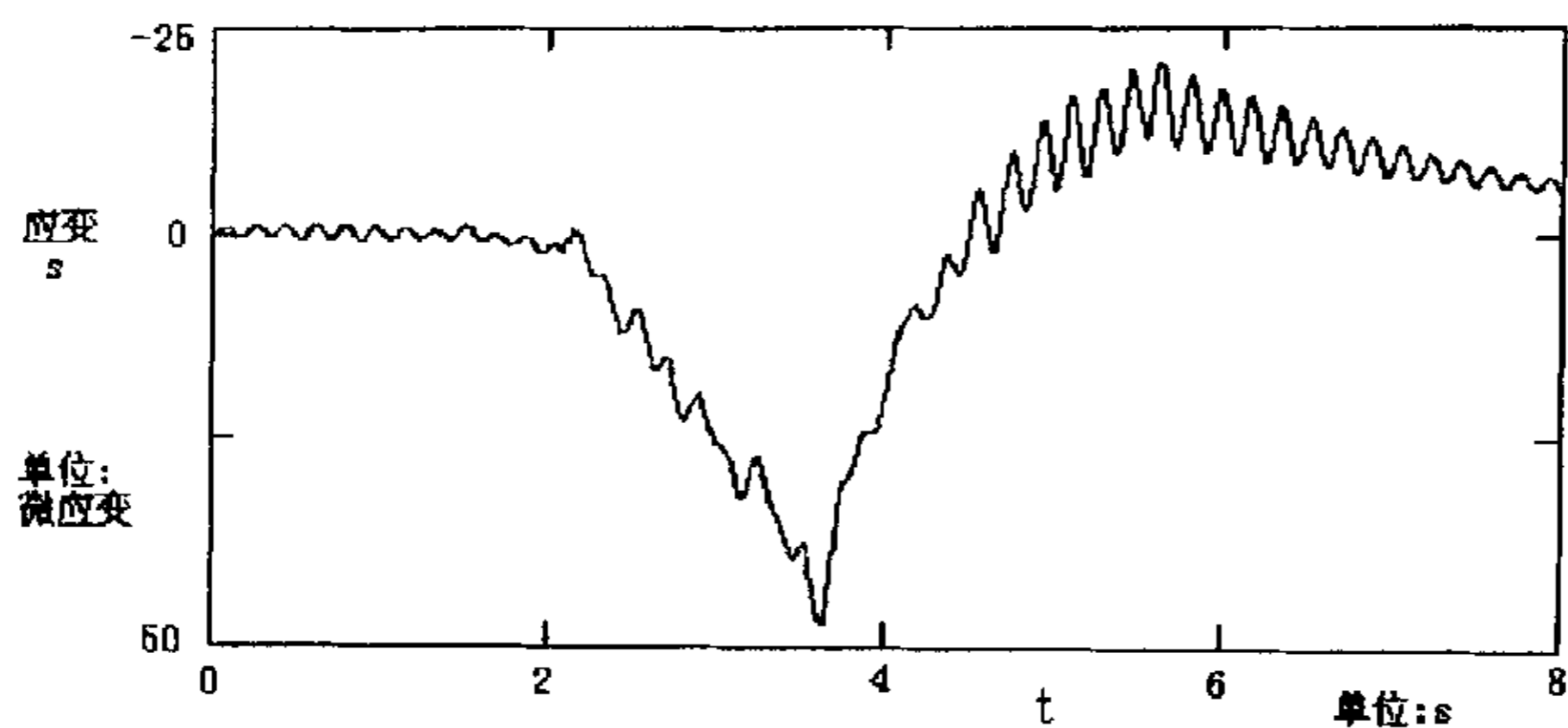


图6.4 三号压电片所测得的动态应变曲线

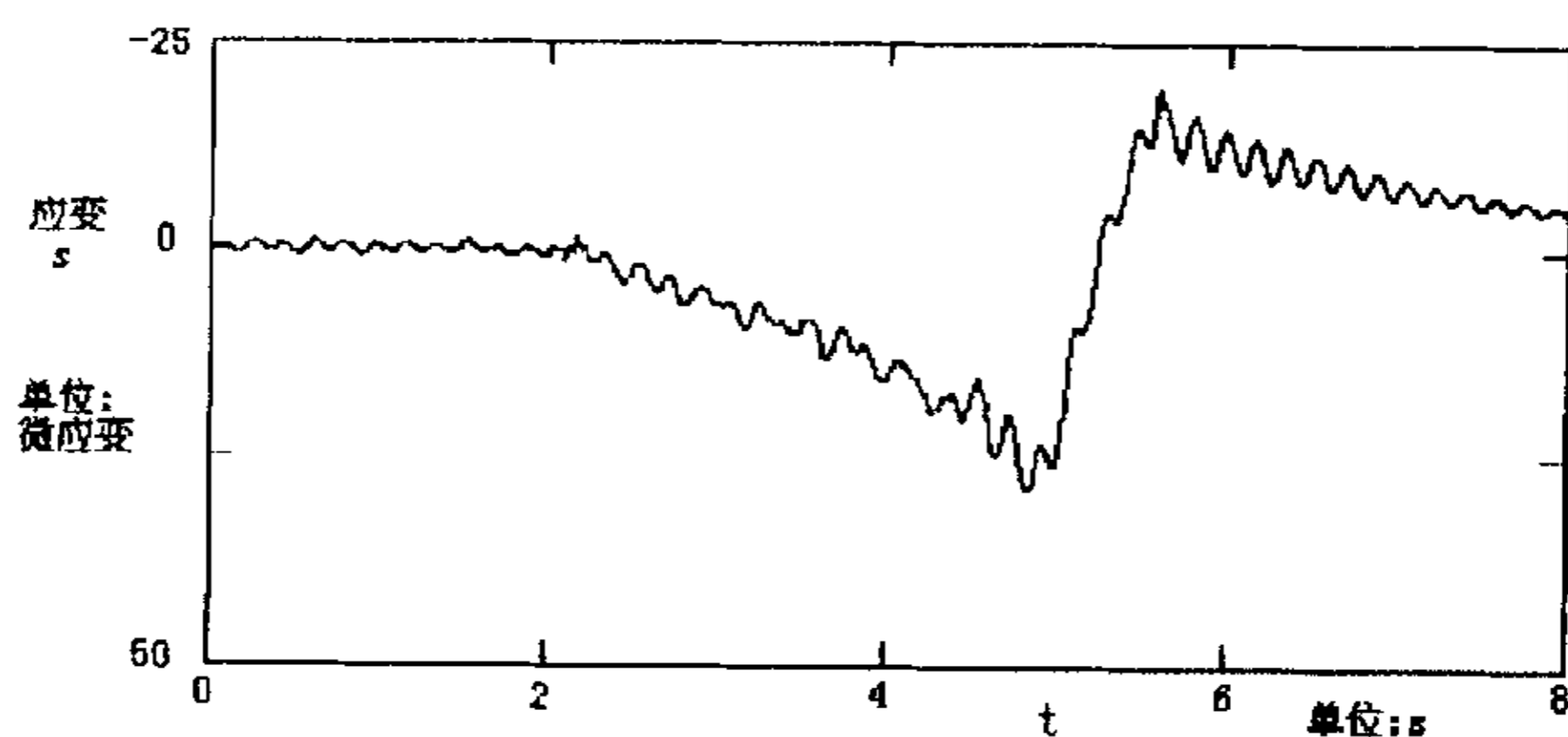


图6.5 四号压电片所测得的动态应变曲线

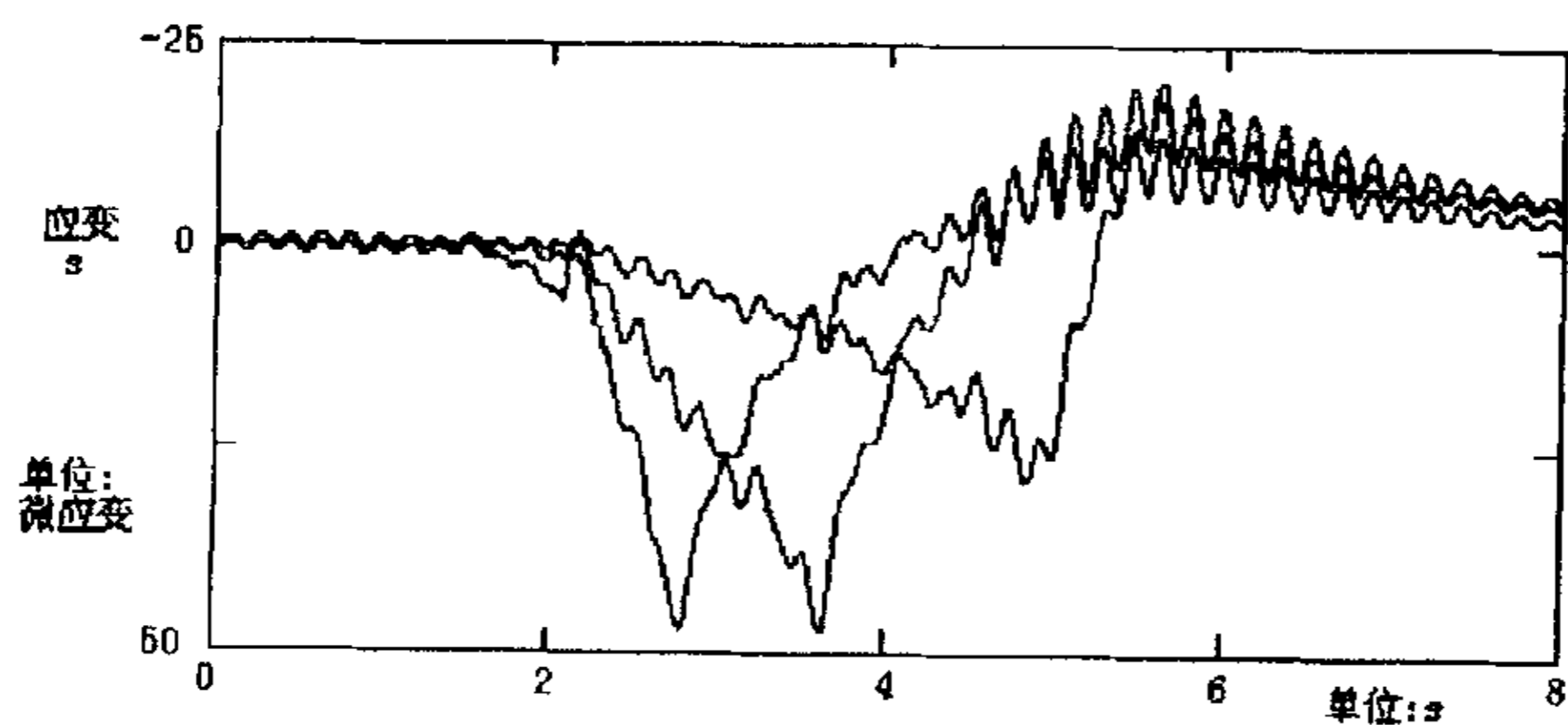


图6.6 二、三、四号压电片所测得的动态应变曲线综合图

上面的图 6.2,6.3,6.4,6.5 分别是一号、二号、三号 and 四号压电片在吨位较大的车辆以较慢的速度经过红槽房大桥时, 所测得的桥梁的动态应变曲线图。因为二、三、四号压电片都粘贴在第一跨梁上, 所以为了对整个过程进行分析和对比, 我们把图 6.3,6.4,6.5 综合成一幅图, 即图 6.6。

从上面各个压电片所测得的动态应变曲线可以看出车辆从红槽房大桥上经过的大致过程。特别是在图 6.6 中, 我们可以十分清楚的看到车辆经过时, 桥梁振动所造成的动态应变峰值随时间的移动过程, 二号压电片和三号压电片之间的距离为 5 米, 两者所测得的动态应变曲线的峰值之间的时间差为 1.26 秒, 由此可以近似计算出桥上行驶的车辆的车速为:

$$V = \frac{d}{t} = \frac{5}{1.26} = 3.97 \text{ m/s} = 14.3 \text{ km/hour} \quad (6.2)$$

从上面的计算可以知道, 这辆车的行驶速度大约为 14.3 公里/小时。由这个初步的计算可知, 利用我们的桥梁振动远程监测系统, 可以对桥梁上的车辆行驶状况进行监测, 虽然上面对车辆速度的计算有一定的近似性, 但是它为桥梁交通自动监测系统的建立指明了方向。从上面的各个压电片所测得的动态应变曲线, 我们还可以通过曲线的峰值的大小, 对车辆的吨位进行判断, 这样, 我们的桥梁远程监测系统就可以完成对桥梁的交通状况进行监测的功能。

上面的动态应变曲线是从时间域的角度来对桥梁的振动进行描述的, 为了获得更多的信息, 我们对上面的位于第一跨梁的二、三、四号压电片所测得的动态应变曲线进行傅利叶变换, 求得的各个曲线的幅度谱分别如图 6.7,6.8,6.9 所示。

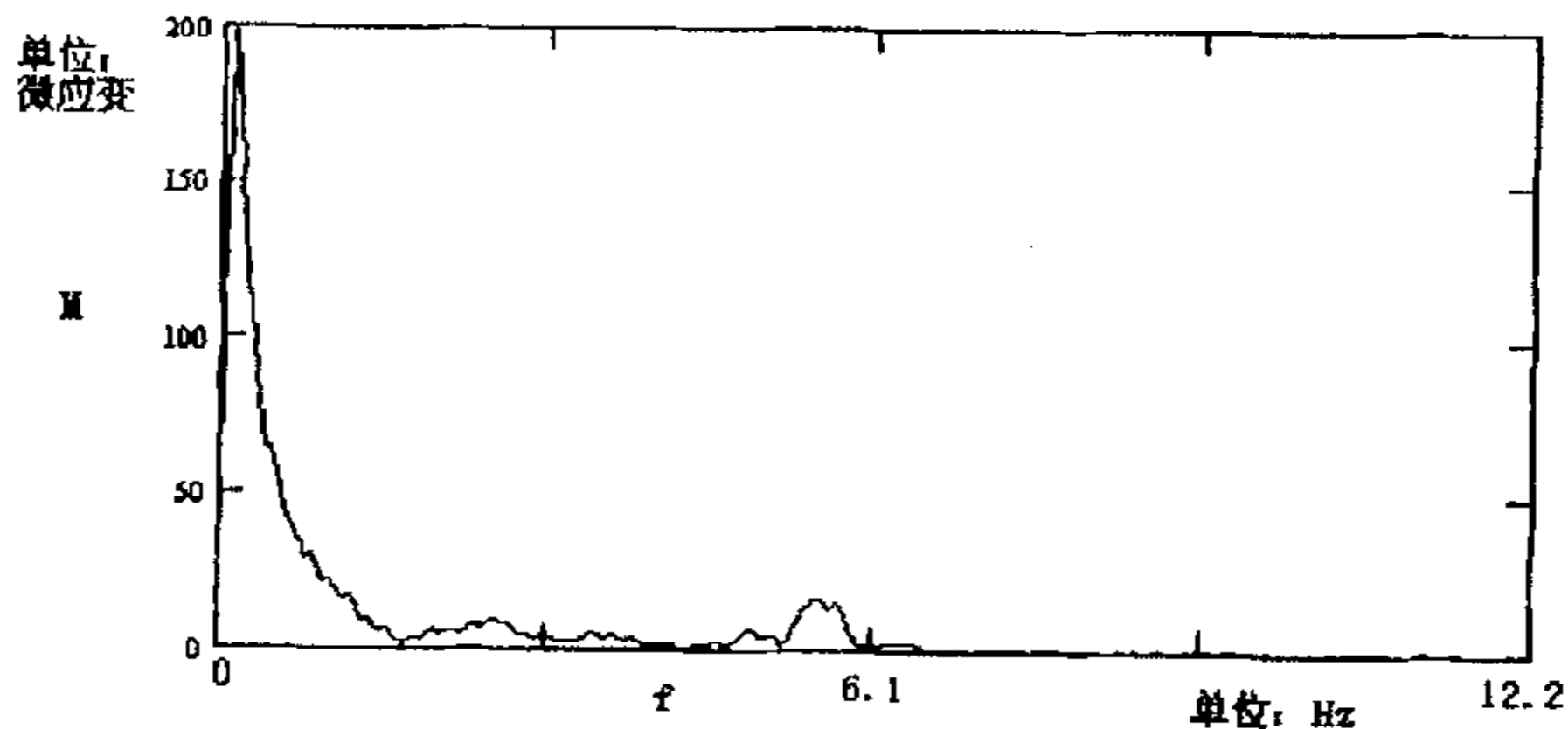


图6.7 二号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

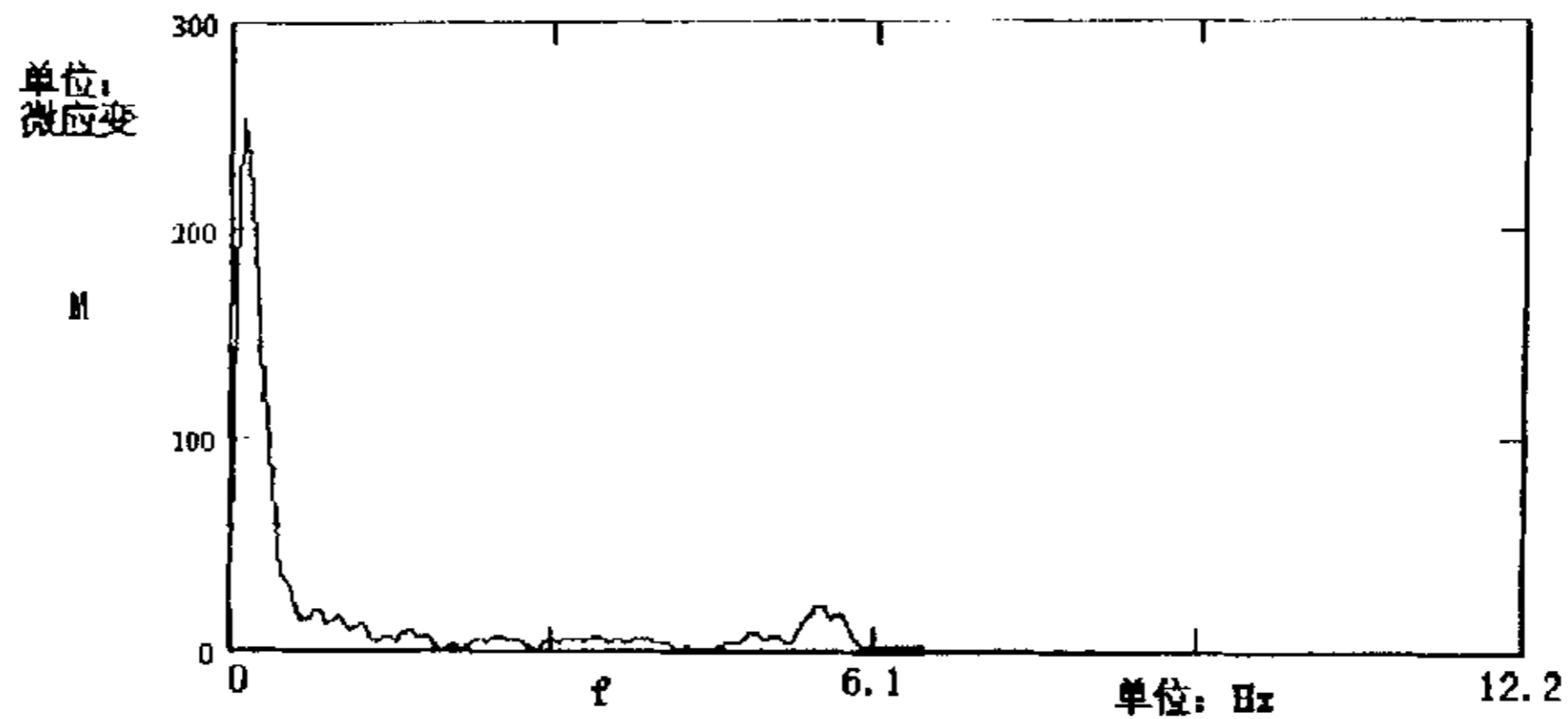


图6.8 三号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

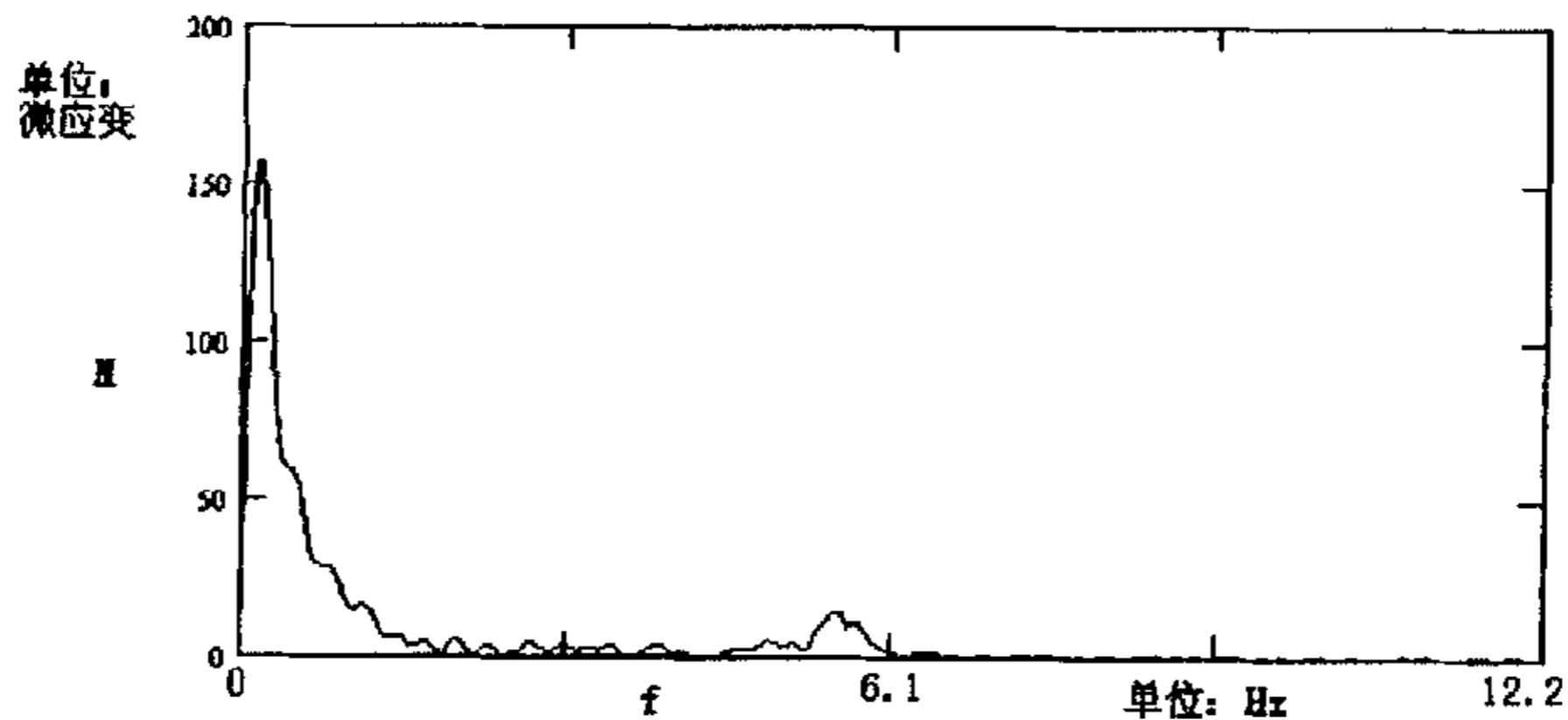


图6.9 四号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

从图中可以发现，三个压电片所测得红槽房大桥的动态应变曲线的幅度谱十分相似，除了幅度的具体数值有差异之外，幅度谱的形状和峰值位置都是一致的。从上面三幅图可知，第一个幅度谱峰值对应的频率为 0.12Hz ，第二个幅度谱峰值相对于第一个幅度谱峰值来说并不尖锐，只能近似确定其频率为 5.6Hz 。由此可见，当车辆从红槽房大桥上开过时， 0.12Hz 的振动对应图 6.3, 6.4, 6.5 中的最大的一个冲击变形，而 5.6Hz 振动对应车辆已经从桥梁上开过后，桥梁的自由振动，即图 6.3, 6.4, 6.5 中的连续的较小的振动。

当一辆较小吨位车以较快的速度从红槽房大桥上经过时，我们所测得的桥梁动态应变曲线如图 6.10, 6.11, 6.12, 6.13, 6.14 所示，经过傅利叶分析之后，其幅度谱如图 6.15, 6.16, 6.17 所示。

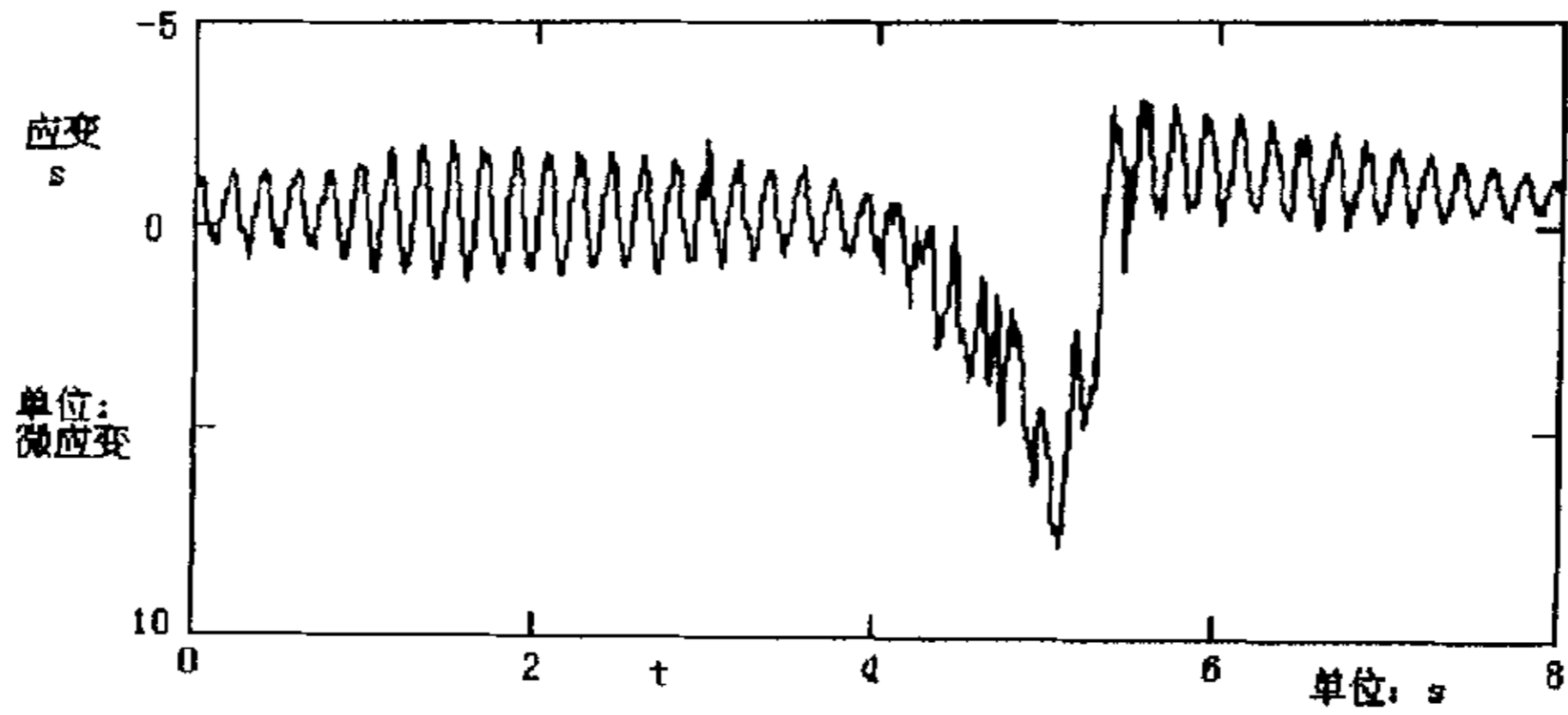


图6.10 一号压电片所测得的动态应变曲线

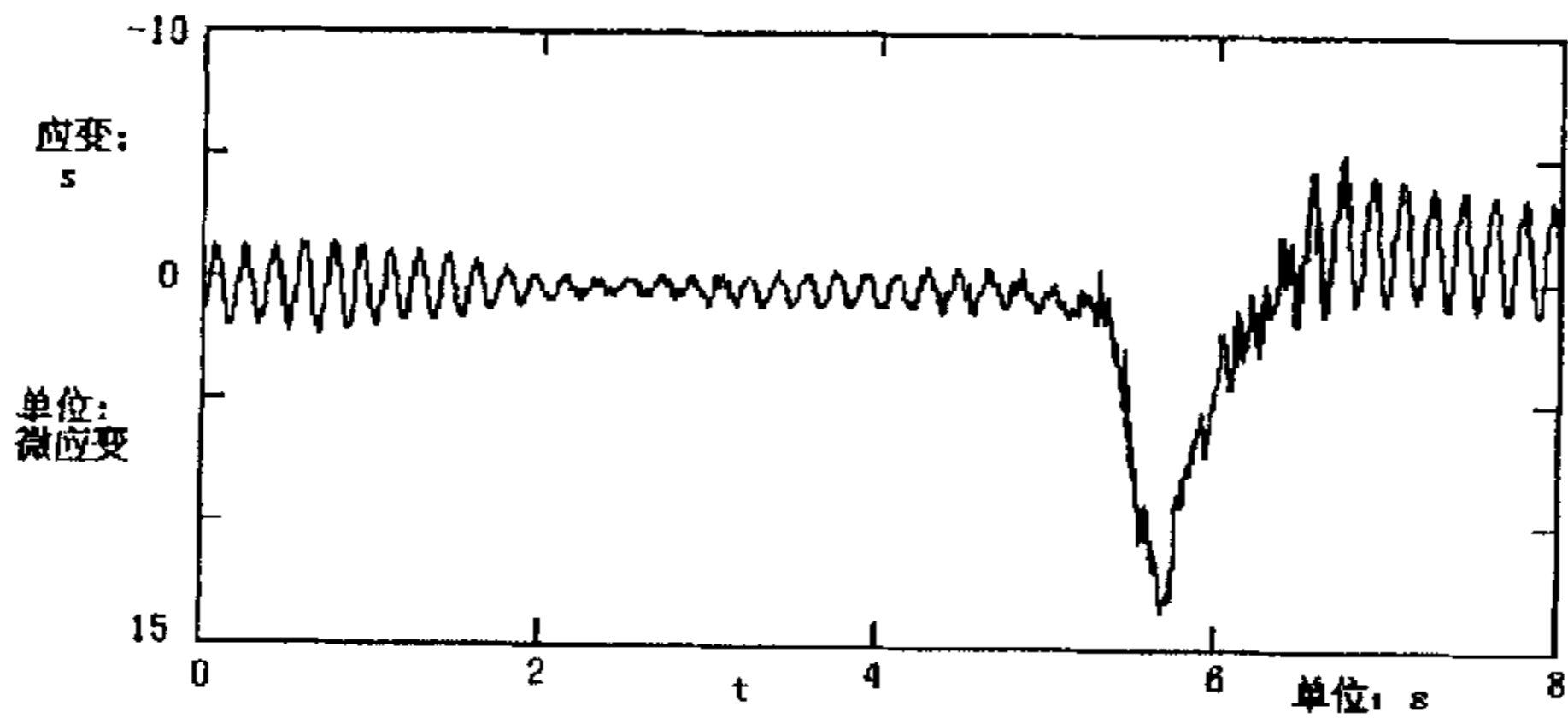


图6.11 二号压电片所测得的动态应变曲线

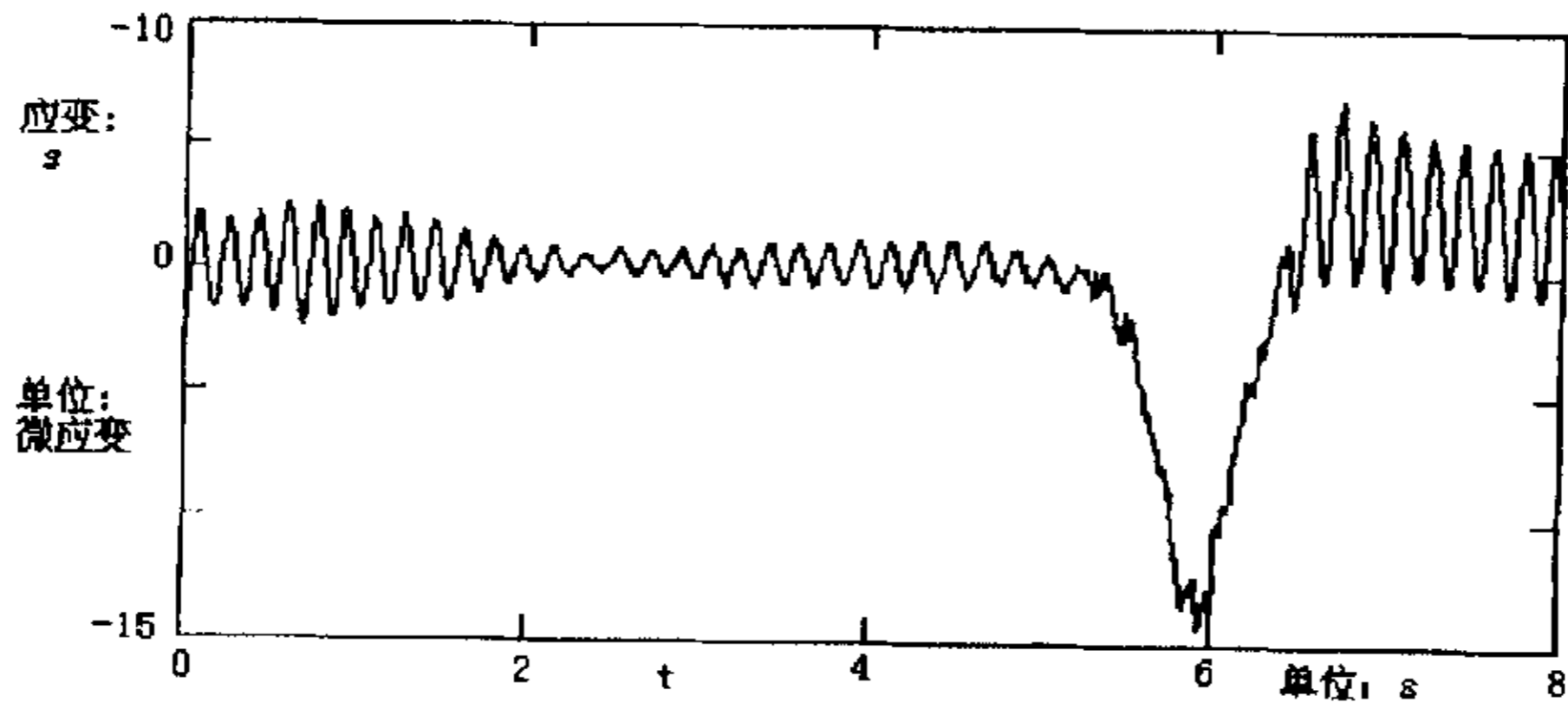


图6.12 三号压电片所测得的动态应变曲线

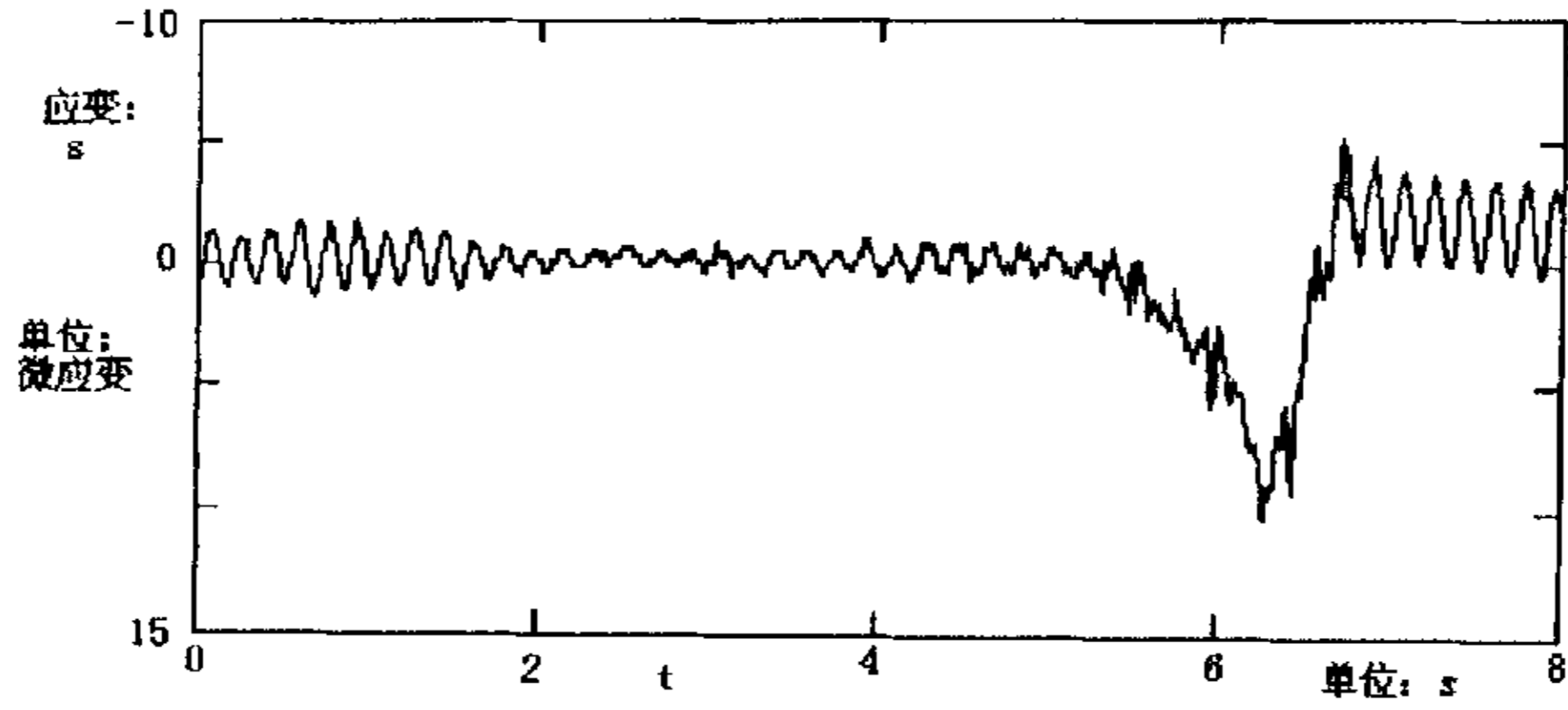


图6.13 四号压电片所测得的动态应变曲线

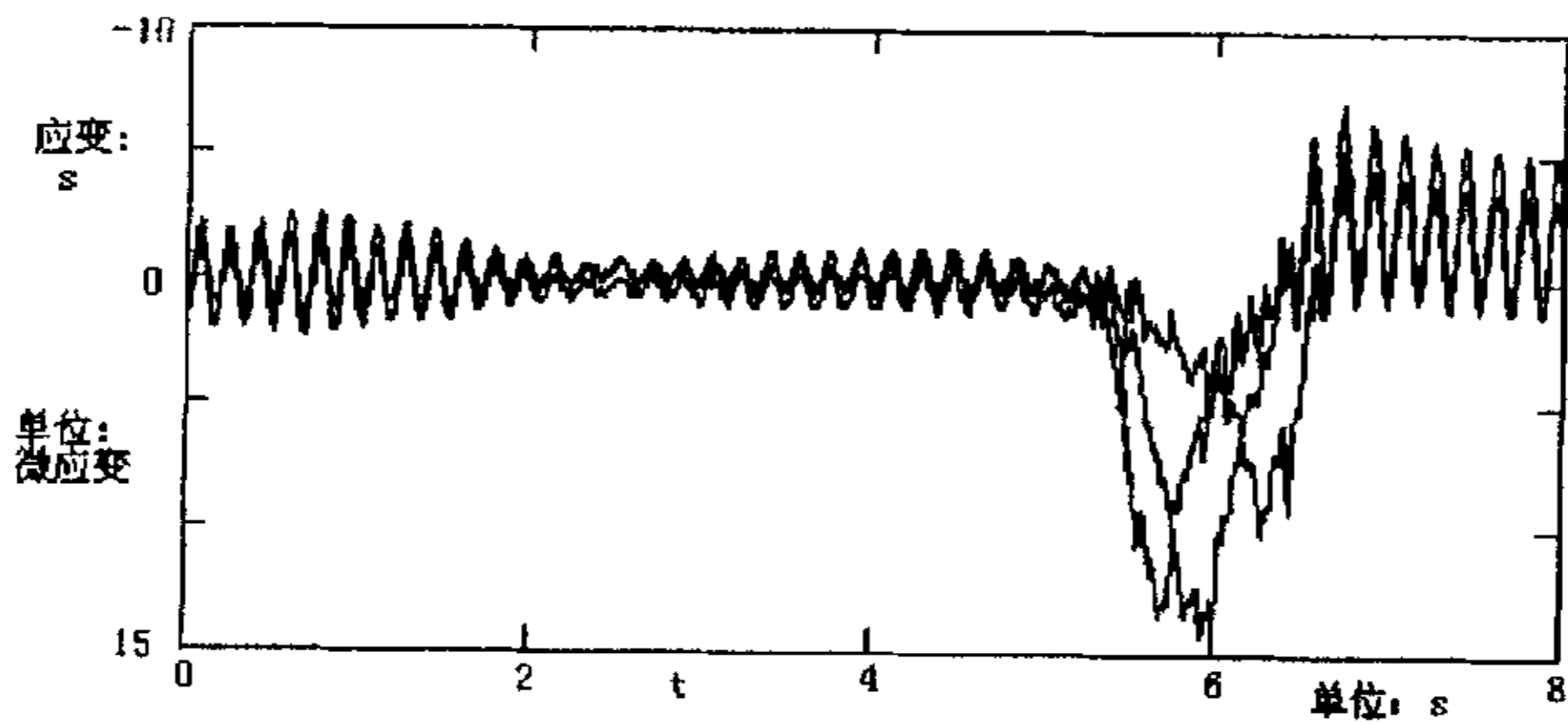


图6.14 二、三、四号压电片所测得的动态应变曲线综合图

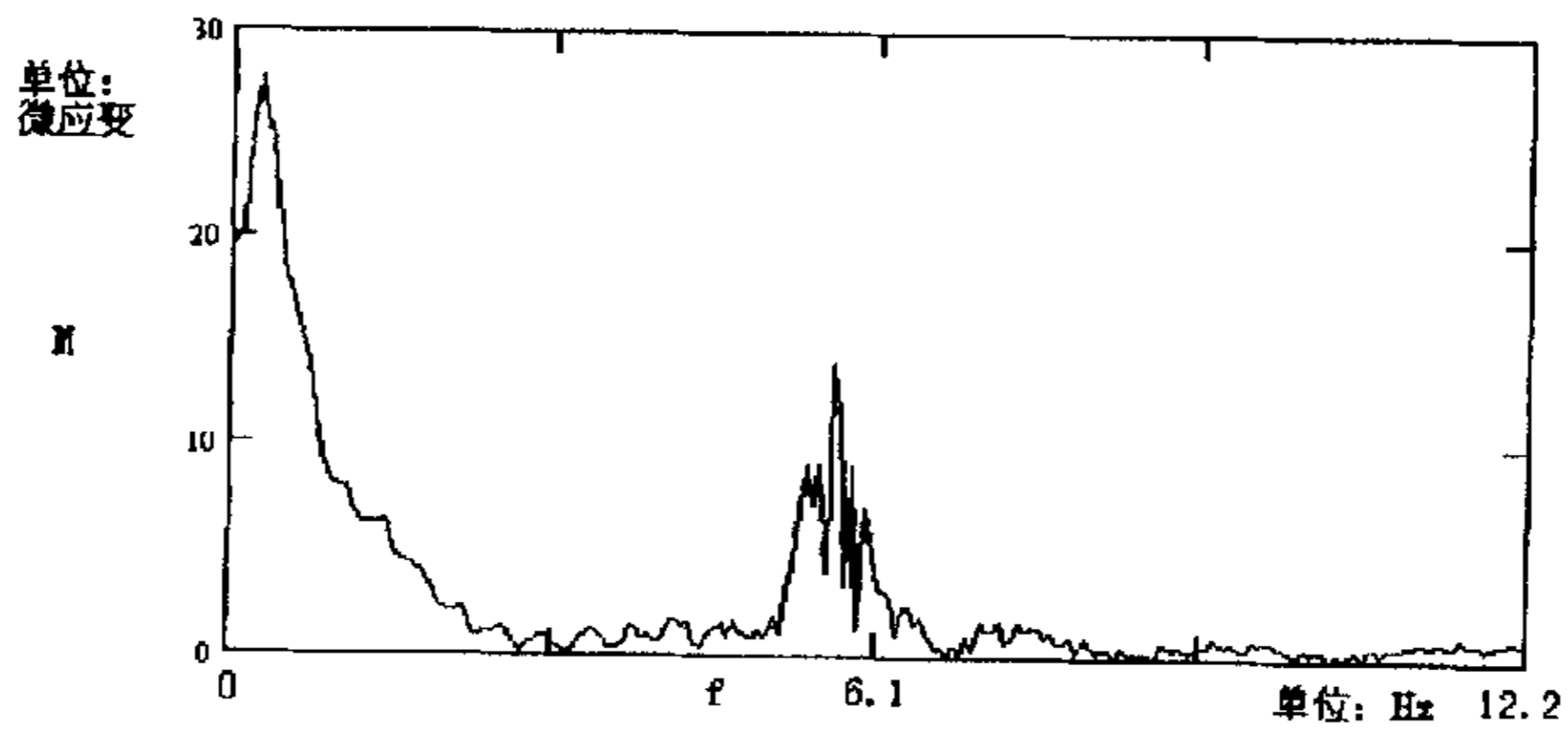


图6.15 二号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

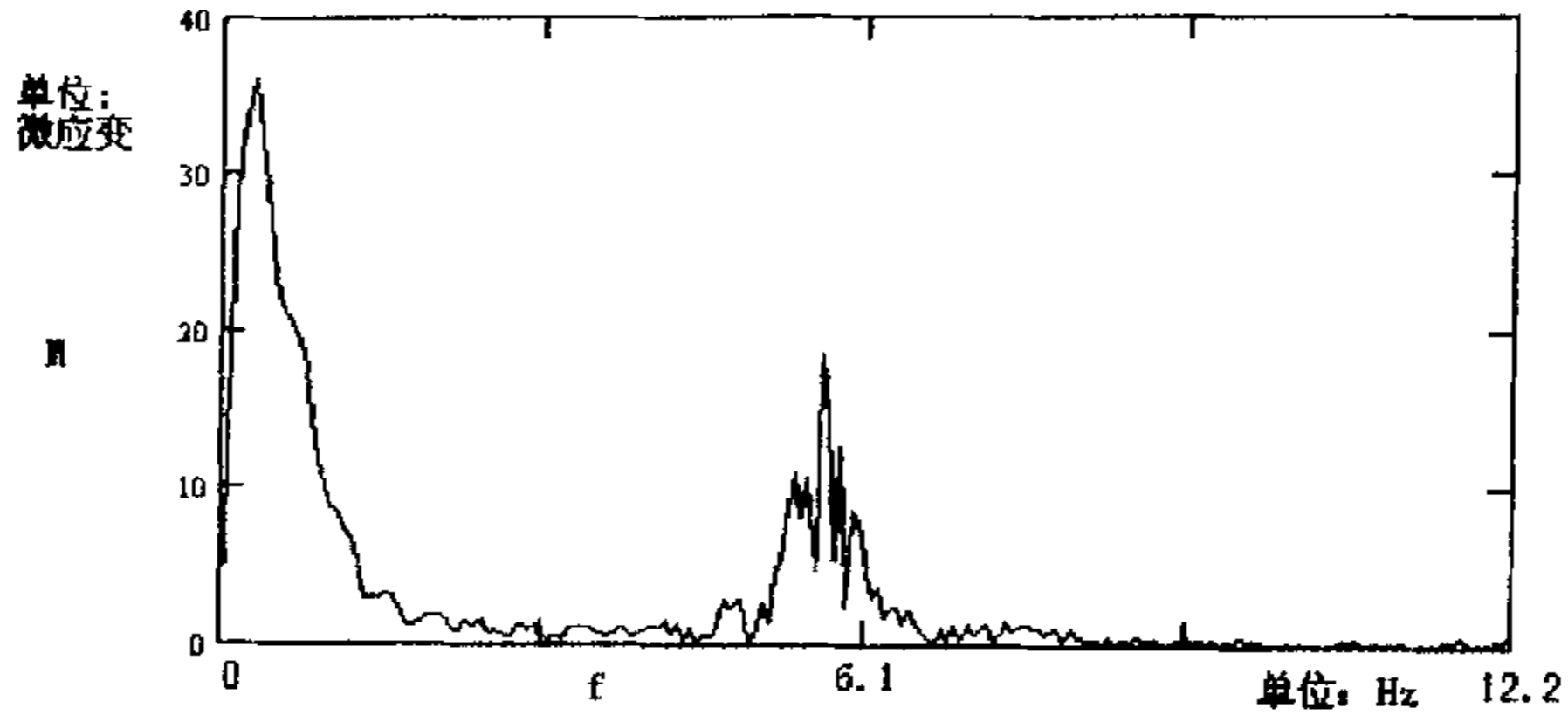


图6.16 三号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

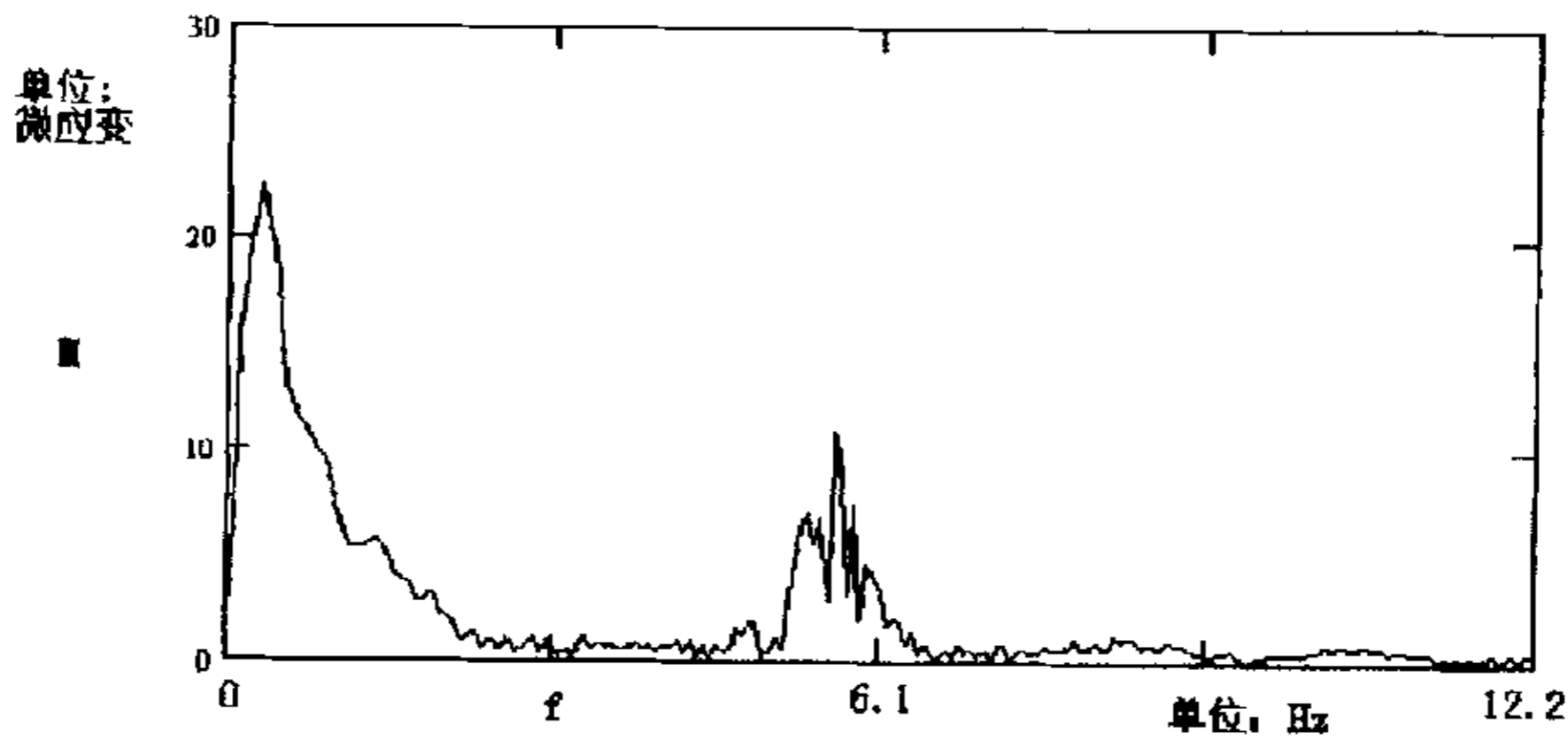


图6.17 四号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

按照前面的分析，从在图 6.14 中各个压电片所测得的动态应变曲线可以十分清楚的看到车辆经过时，二号压电片和三号压电片所测得的动态应变曲线的峰值之间的时间差为 0.256 秒，由此可以近似计算出桥上行驶的车辆的车速为：

$$V = \frac{d}{t} = \frac{5}{0.256} = 19.53m/s = 70.3km/hour \quad (6.3)$$

从上面的计算可以知道，这辆车的行驶速度大约为 70.3 公里/小时，相对前面一次监测的结果而言。车辆的速度提高了。从动态应变峰值大小来看，这辆车相对于前面的车吨位较小。

从图 6.15, 6.16, 6.17 可以发现，三个压电片所测得红槽房大桥的动态应变曲线的幅度谱十分相似，除了幅度的具体数值有差异之外，幅度谱的形状和峰值位置都是一致的。从上面三幅图可知，第一个幅度谱峰值对应的频率为 0.3Hz，第二个幅度谱峰值对应的频率为

5.676Hz。由此可见，当车辆从红槽房大桥上开过时，0.3Hz 的振动对应图 6.12, 6.13, 6.14 中的最大的一个冲击变形，而 5.676Hz 振动对应车辆已经从桥梁上开过后，桥梁的自由振动，即图 6.12, 6.13, 6.14 中的连续的较小的振动。这和前面的分析是一致的，前面的曲线反映的车辆吨位较大，速度较慢，所以动态应变曲线的第一个幅度谱峰值对应的频率较小，只有 0.12Hz，而后面的曲线反映的车辆吨位较小，速度较快，所以动态应变的第一个幅度谱峰值对应的频率较大，有 0.3Hz。但是在车辆离开红槽房大桥之后，桥梁处于自由振动状态，所以前后两次所测得的动态应变的第二个幅度谱峰值对应的频率都是一致的，根据第二章我们对桥梁振动的初步分析，可以断定，这个值对应桥梁的一阶振动自由振动频率，即为 5.6Hz。

当连续两辆车通过红槽房大桥时，所测得的动态应变曲线如图 6.18,6.19,6.20,6.21,6.22 所示，其幅度谱如图 6.23,6.24,6.25 所示。

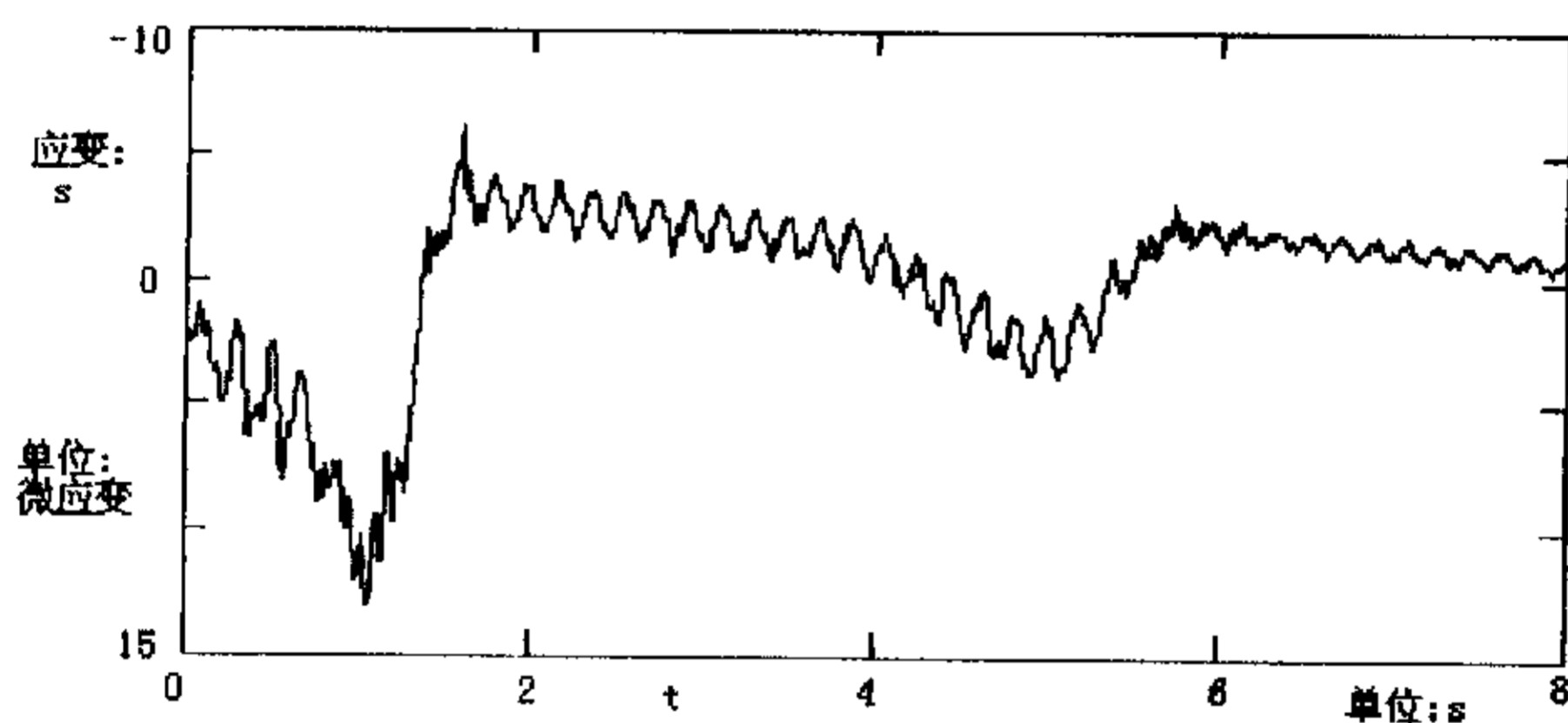


图6.18 一号压电片所测得的动态应变曲线

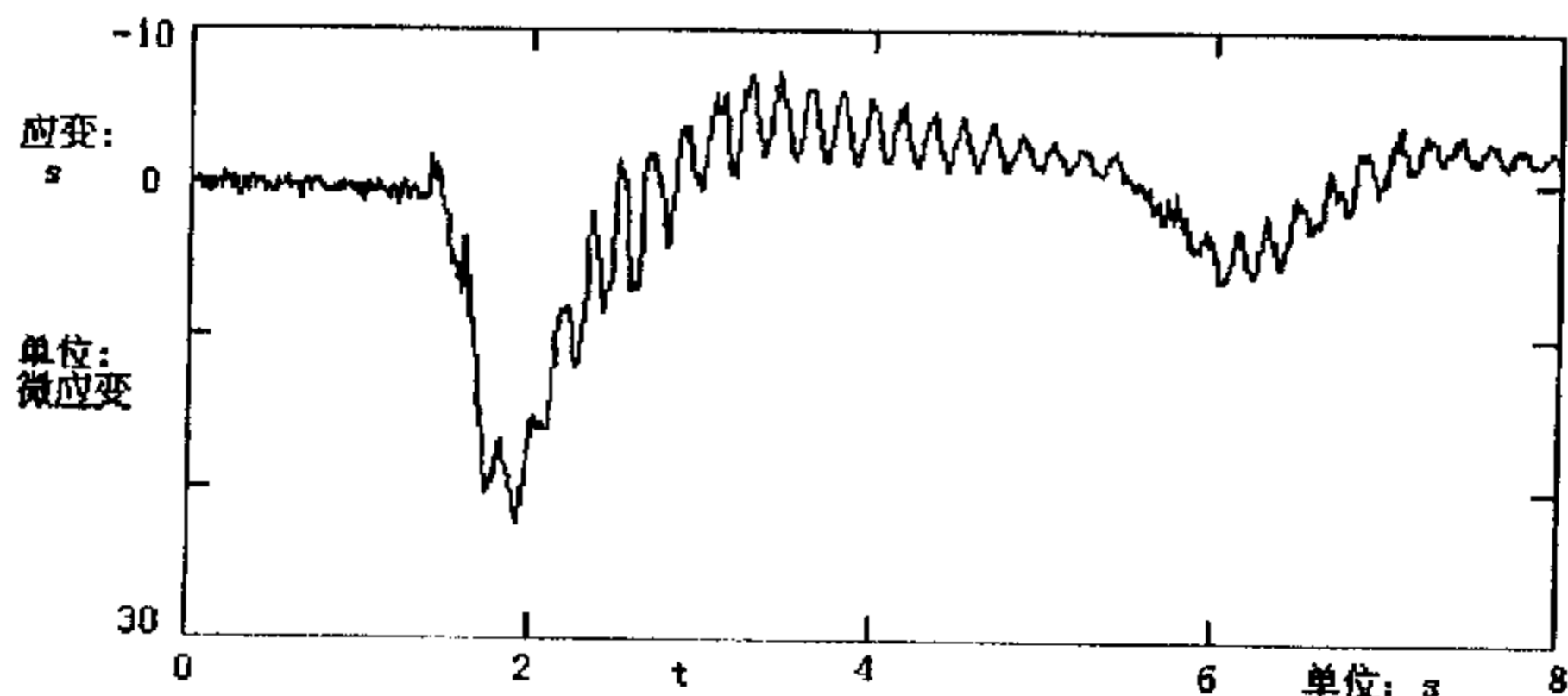


图6.19 二号压电片所测得的动态应变曲线

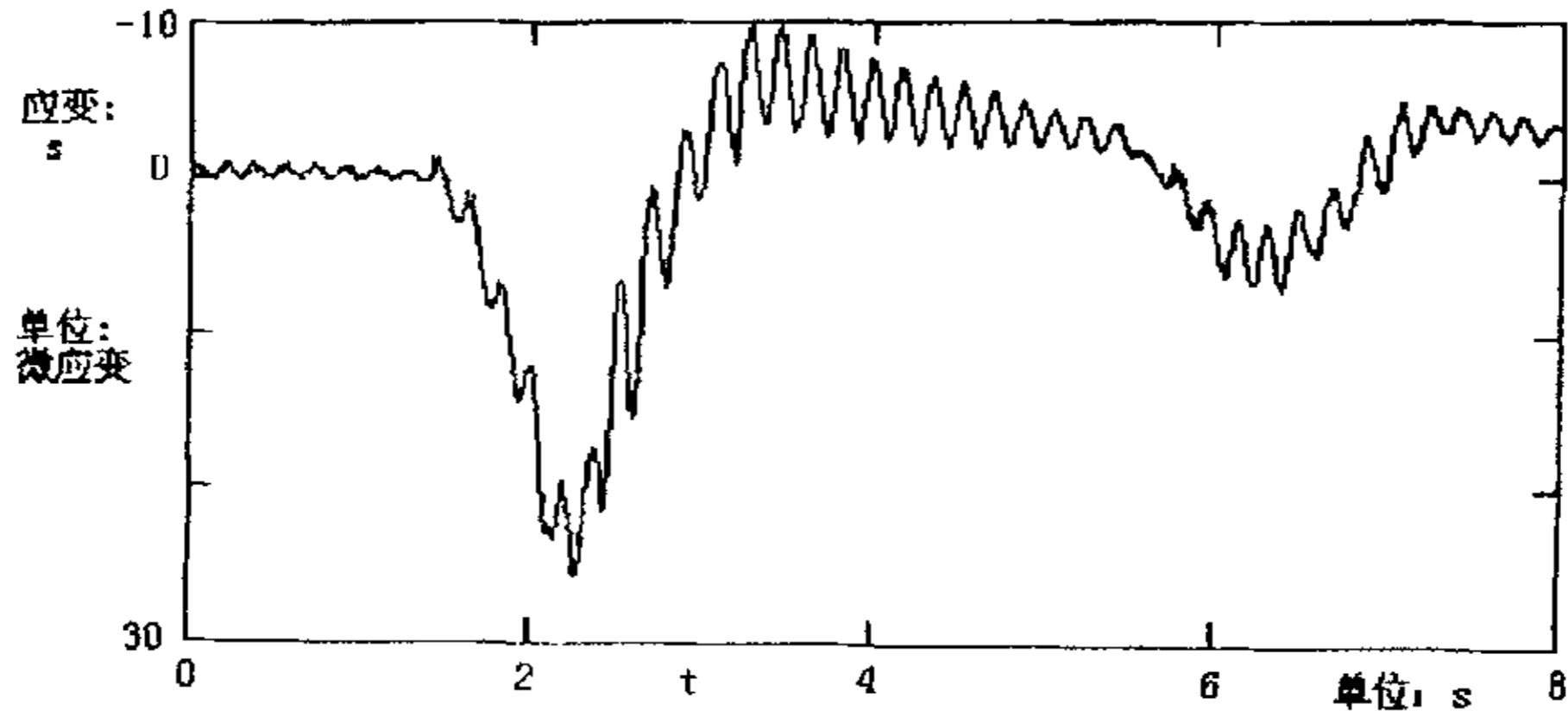


图6.20 三号压电片所测得的动态应变曲线

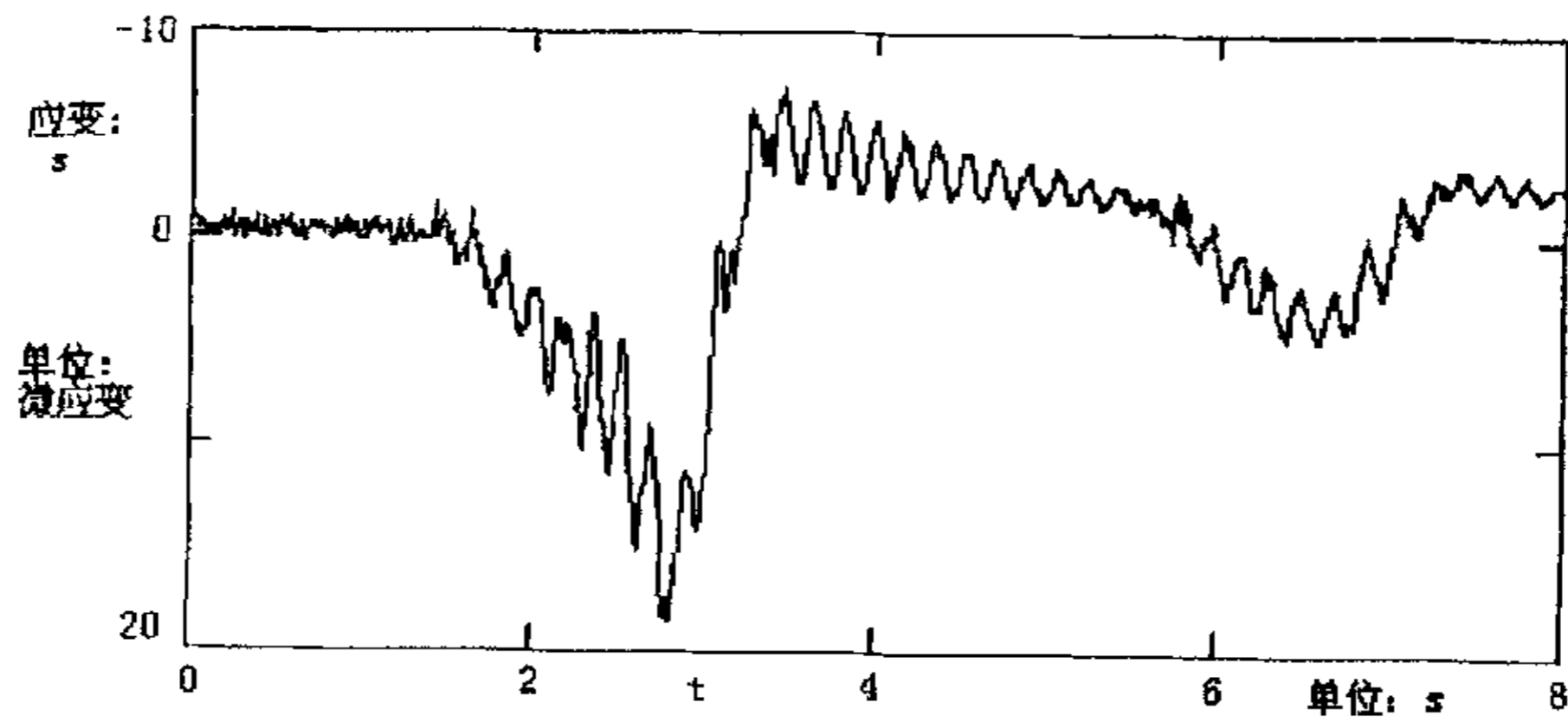


图6.21 四号压电片所测得的动态应变曲线

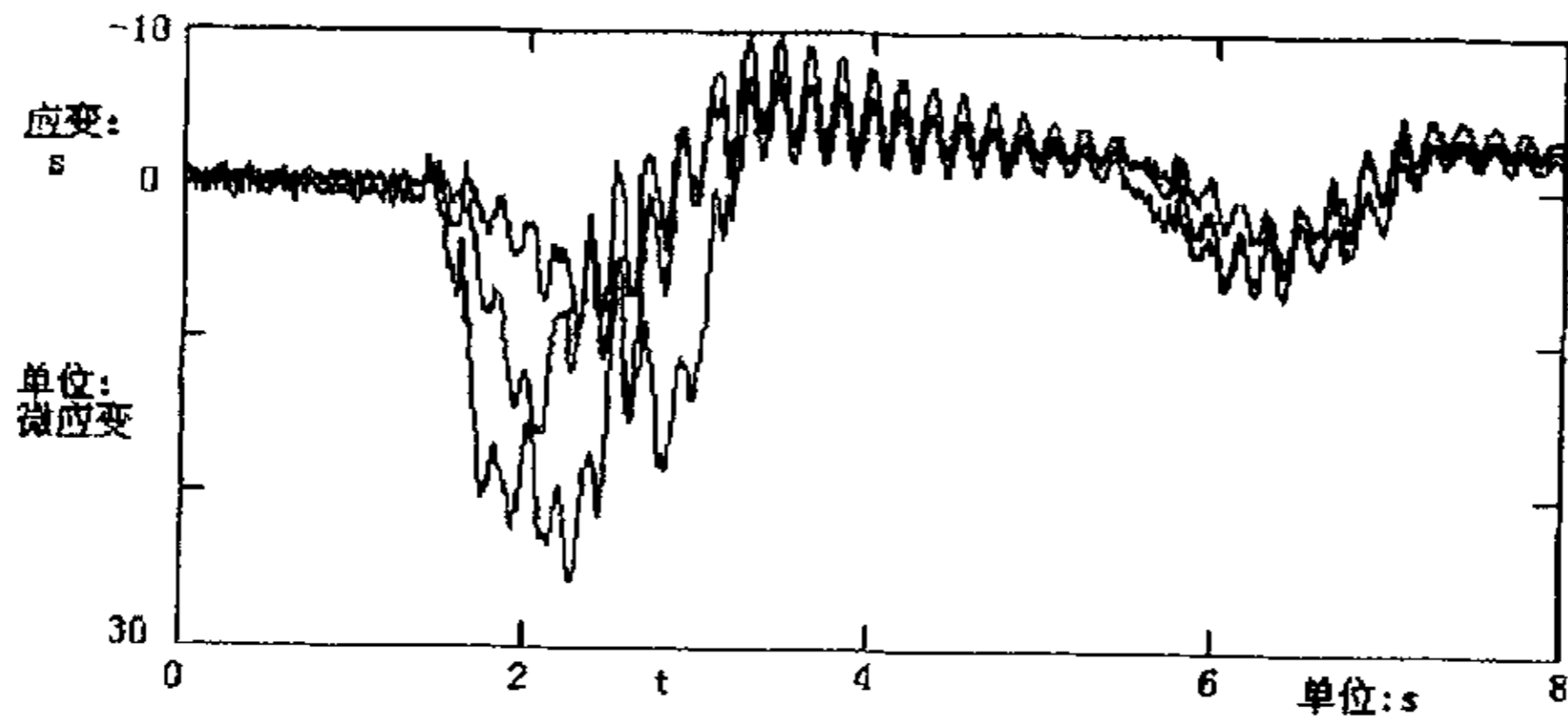


图6.22 二、三、四号压电片所测得的动态应变曲线综合图

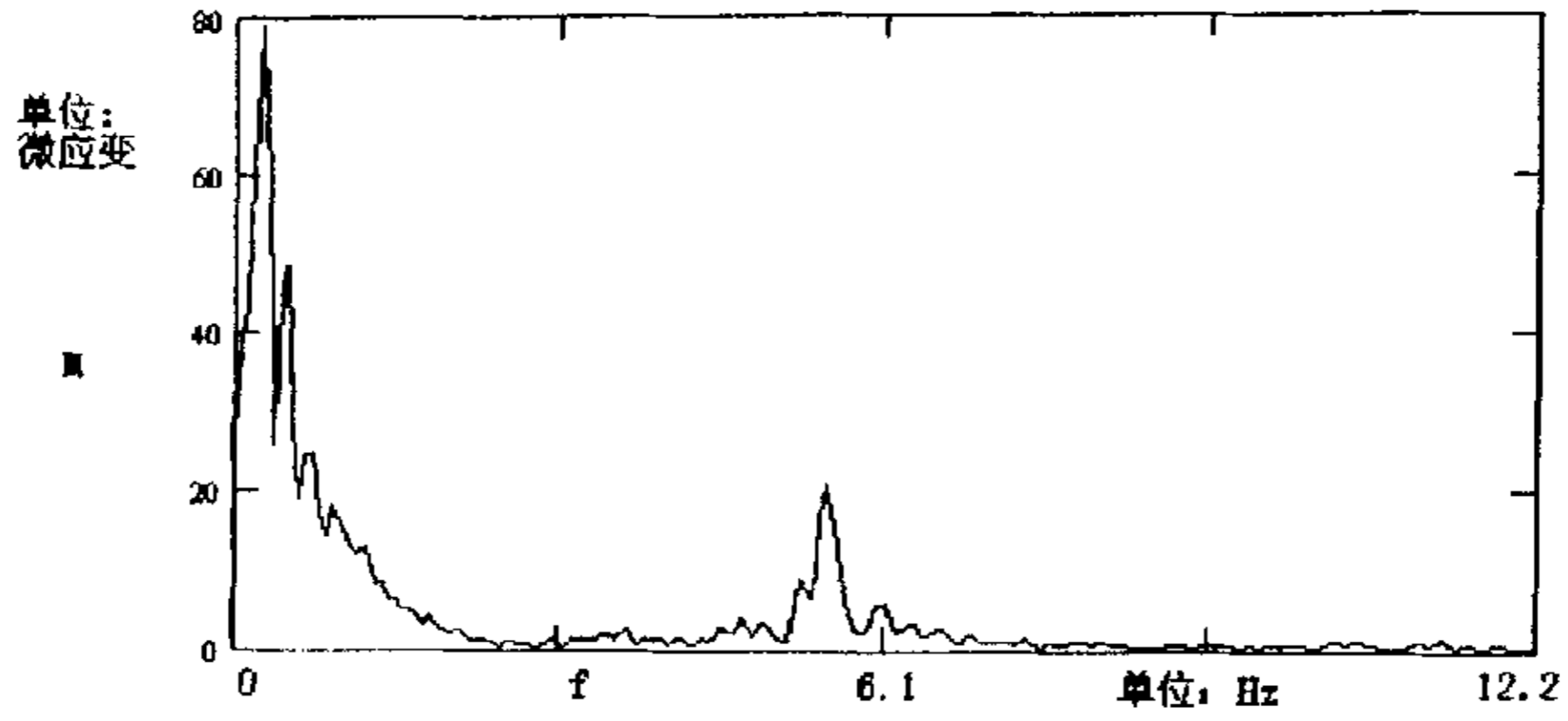


图6.23 二号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

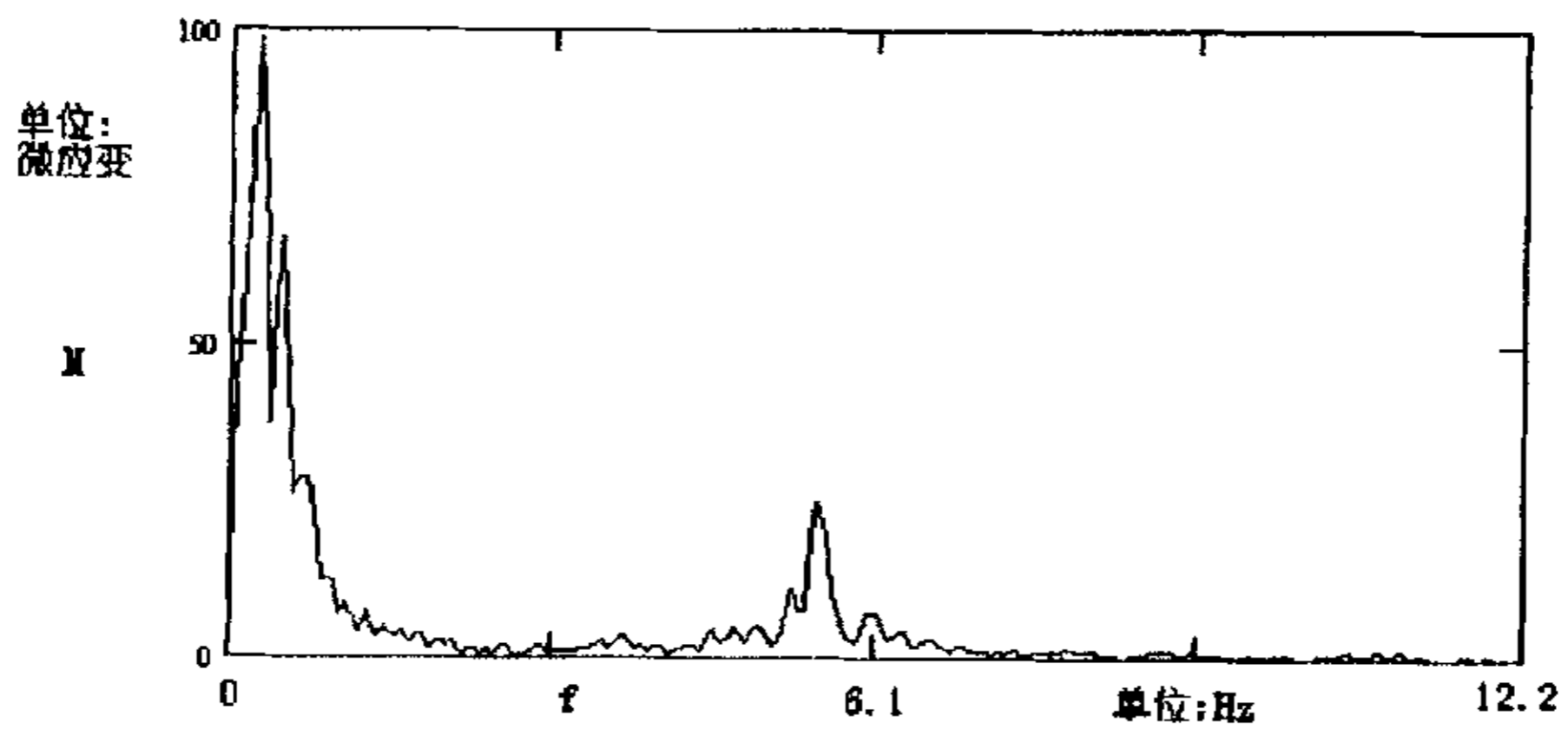


图6.24 三号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

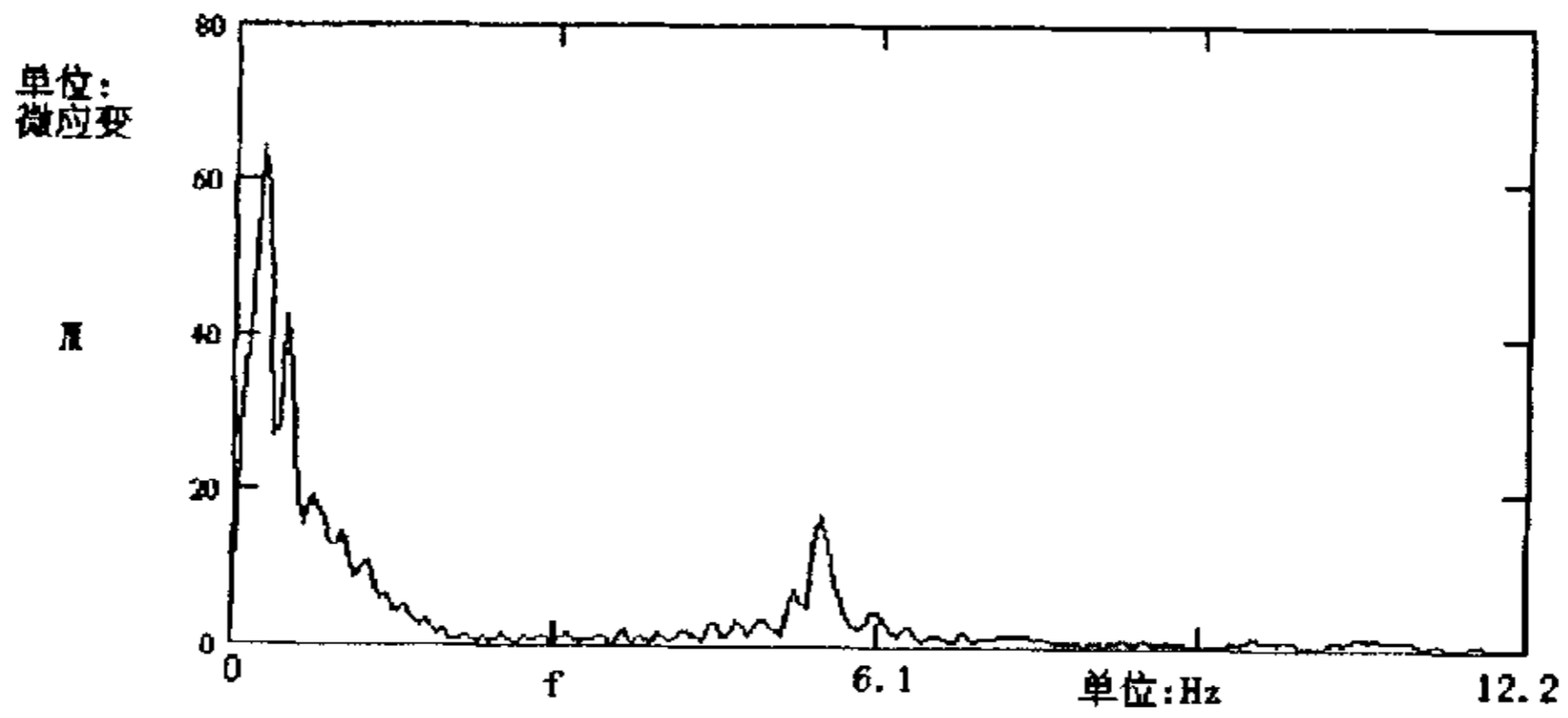


图6.25 四号压电片测得的动态应变对应的幅度谱

从上面的时域波形和频域波形可以十分清楚地看出两辆车相继从红槽房大桥上经过时的情况。时域中十分明显地有两个波谷，第一个波谷对应着一辆吨位较大的车，第二个波谷对应着一辆较小的车，车辆的吨位大小可以通过动态应变曲线的峰值加以判断。小车的速度明显比大车快，这一点可以从动态应变曲线的峰值移动情况加以判断。频率域中，在小于 1Hz 的部分，可以明显地观察到两个波峰，第一个波峰频率较低，峰值较大，对应着时域中的第一辆行驶过桥梁的速度较慢大车，第二个波峰频率较高，峰值较低，对应着时域中的第二辆行驶过桥梁的速度较快的小车。频率域中第三个波峰对应着桥的第一阶自由振动频率。由此可见，我们通过对压电片所测得的红槽房大桥的动态应变信号的分析，不仅可以得到有关红槽房大桥的自身的振动信息，如红槽房大桥的一阶自由振动频率为 5.6Hz，而且可以得到有关桥梁上的交通状况的初步信息。如果我们采用固定激振源的方法，即在已知车辆的吨位大小和车辆的行驶速度的前提条件下，通过桥梁振动的动态应变曲线的分析，反过去又可以对桥梁的承载能力进行研究和评价。这一点在实际工程测量中是完全可以做到的，我们可以找一辆车，在确定好其吨位大小之后，让其定期以不同的速度从桥梁上开过，从而便可以开展一系列的测量和研究。

6.3 本章小结

在本章中我们对整个实验的实施具体过程进行了详细的说明，对其中的技术难点进行了深入的分析。针对三种不同的激励情况即吨位较大的车辆以较慢的速度通过桥梁、吨位较小的车辆以较快的速度通过桥梁、连续两辆车通过桥梁时，对红槽房大桥的实际振动进行了一系列的监测，并对各个压电片所测得的动态应变曲线在时域和频域内进行了信号的分析 and 对比，确定了桥梁的一阶自由振动频率，并且对桥梁上所经过的车辆的吨位和速度进行了半定量的推断，如果进行连续监测和信号的实时处理统计，我们便能对红槽房大桥上的交通状况进行初步的估计和评价。由此可见，我们的桥梁振动远程监测系统的研究已经取得了令人满意的初步结果，为今后我们进一步的深入研究奠定了坚实的基础。

第七章 全文总结

本论文把桥梁振动远程监测作为其研究的方向，针对其中的技术难点和研究方案进行了细致而深入的分析 and 讨论，在大量的前期工作的基础之上，经过长期的努力，达到了预期的研究目标，并且成功地在红槽房大桥的工程实践监测中加以了应用。本论文所完成的主要研究工作归纳如下：

1、在查阅了大量的文献资料的基础之上，对国内外在桥梁监测方面的最新进展、理论方法、实际工程应用进行了概述。从各个不同的方面论述了桥梁振动远程监测的重大意义和实用价值。并且讨论了智能材料，特别是压电材料以及通讯技术在该领域的应用。

2、应用桥梁振动理论，对桥梁的自由振动进行了初步的分析，建立了在工程实践中最常见的三种不同支撑形式的梁的振动模型，即两端简支梁、两端固定梁、一端简支一端固定的梁，在分析了各种梁的前几阶振动模态之后，对其模态形状和动态应变的分布做了讨论，由此来指导进行实际监测工作中的压电片的贴片位置的选择和最终的振动信号的分析。

3、从压电方程入手，分析了采用压电片进行动态应变传感的基本原理，并从信号处理的角度，对比了电压放大器和电荷放大器在压电片传感信号提取方面的差异，推导了由实际电路的输出电压计算动态应变的表达式，为实际信号的处理和分析做了理论上的准备。

4、结合现代通讯领域的最新发展技术，在总结了两台计算机之间的各种通讯方式之后，针对实际的工程应用对象，搭建了整个远程通讯系统，并编制了全部的远程通讯软件。

5、把上面所有的研究工作全部应用于实际的红槽房大桥的监测中，经过无数次的实验室准备和工程实际的现场调试，现在整个桥梁振动远程监测系统处于正常的运行之中，并且动态应变的监测结果令人满意。

6、对工程实际中的系统安装、调试所遇到的技术难点进行了分析和讨论，通过各种途径提高系统的可靠性和稳定性，增加了整个远程监测系统的自适应能力。

7、对红槽房大桥的动态应变信号进行了初步的分析，并对其振动的特性参数，如振动的频率、频谱等进行了研究。从中可以半定量地推知桥梁上所经过车辆的速度和吨位，从而初步反映出桥上交通的实际情况。

本论文中具有创造性的研究工作如下：

1、我们在此次监测中首次采用压电片做为动态应变传感器，对实际的红槽房大桥在日常车流的激励下的动态应变进行监测，并且实际的工程应用获得了成功。这一研究工作和实际的工程应用具有十分重要的科研意义和较大的社会及经济价值。下一步我们准备对此进行深入的研究，为这一方法的推广应用打下良好的基础。

2、本论文中采用的远程监测系统把现代通讯技术和计算机技术相互结合，并成功地在桥梁振动监测领域加以了应用，这不仅为实际的远地工程测量提供了重要手段，也为仪器仪表领域中的网络化仪器的发展起到了重要的推动作用，为创造信息社会中的智能化仪器打下了良好的基础。

本课题所需要继续深入的研究工作如下：

1、要对压电片的动态应变传感性能进行进一步评价和研究，在相同实验条件下与动态电阻应变仪的传感数据进行对比，从而可以准确地反映压电片对动态应变的传感特性。

2、要对压电片的长期传感稳定性和在恶劣环境中的适应性进行深入的研究，如在不同温度条件下，在不同的湿度条件下，压电片的传感特性和灵敏度是否会发生变化等。

3、要进一步提高压电传感器的抗外界干扰的能力，如电磁干扰和声波干扰等。

4、要对所测得的红槽房大桥的动态应变数据进行进一步的分析，研究出对桥梁进行健康评价的软件分析系统。

5、要把现有的研究工作进一步深入，对整个系统进行不断的完善，并按照用户提出的要求，不断增加系统的功能，使整个系统成为一个商业产品而市场化。

综上所述，我们所进行的桥梁振动远程监测的研究已经获得了前期的初步成果，在今后的研究中，我们还要针对系统中的一些有待深入研究的问题进行进一步的探讨，我们相信只要有勇于探索的创新精神和持之以恒的实干精神，我们一定能取得更好的科研成果。

硕士期间所发表的论文

- 1、石荣、陈伟民、朱永、封君、唐军、古渊、黄尚廉， 柔性梁振动主动控制的压电控制技术研究， 压电与声光 2000 年 4 月 第 22 卷 第 2 期 P83-85
- 2、石荣、陈伟民、朱永、封君、龙辉敏、文玉梅、黄尚廉， 采用压电片阵列传感进行损伤监测的研究， 压电与声光 (已录用)
- 3、石荣、陈伟民、朱永、封君、文玉梅、黄尚廉， 运用损伤指数法对压电机敏结构进行损伤监测的研究， 于 1999 年 9 月投稿重庆大学学报
- 4、古渊、陈伟民、唐军、石荣、黄尚廉， 柔性结构振动主动控制的气浮机动台实验系统， 重庆大学学报 自然科学版 1998 年 6 月 第 21 卷 第 6 期 P41-46
- 5、封君、朱永、陈伟民、石荣、黄尚廉， 十字形激光用于测量建筑物五维变形技术的研究， 光子学报 1999 年 11 月 第 28 卷 第 11 期 P1006-1010
- 6、Y. Zhu、 J. Feng、 R. Shi、 W.M.Chen、 S.L.Huang, Experiment Study on Shrink Strain Monitoring in cure period of Concrete Using EFPI Fiber Optic Strain Sensor, Proceedings of ICHMCIS'99 International Conference on Health Monitoring of Civil Infrastructure System, October 22-26, 1999 P137-143
- 7、Y. Zhu、 Y.M.Fu、 N.D.Liu、 R. Shi、 W.M.Chen、 S.L.Huang, High Dynamic Multi-Channel Laser Deflectometer for Bridge, Proceedings of Workshop on Research and Monitoring of Long Span Bridges, 26-28 April 2000, Hong Kong, PRC P86-91
- 8、W.M.Chen、 Y. Zhu、 Y.M.Fu、 R. Shi、 N.D.Liu、 J. Feng、 S.L.Huang、 Z.X.Zhou, Inline Sensing System for Multi-parameter Remote Measurement of Bridges, Proceedings of Workshop on Research and Monitoring of Long Span Bridges, 26-28 April 2000, Hong Kong, PRC P173-179

致 谢

在本学位论文的完成过程中，自始至终得到了导师黄尚廉教授的精心指导。导师深邃而活跃的学术思想，一丝不苟的工作作风，严谨的治学态度和诲人不倦的学者风范，使我在研究工作中获益非浅，导师一生对事业挚着忘我，不计较个人得失，永无止境求索的工作精神和态度，是我终生的楷模。在此，谨向导师多年的辛勤指导和对学生的深切关心和爱护致以最诚挚的谢意。

在本课题的研究中，得到了本系陈伟民教授、饶云江教授、文玉梅教授、潘英俊教授、喻洪麟教授、邹健副教授、李平副教授、王代华副教授、唐军讲师的指导和帮助，以及管昌余老师、杨建春老师、朱永博士后、符玉梅博士、古渊博士、伍陵川博士、封君博士和刘念东硕士的帮助。在此谨向他们表示深深的感谢。

在平时的研究工作和学术讨论中，也得到了钟先信教授、袁祥辉教授、李见为教授、马松轩教授、肖沙里副教授、罗军副教授、郭云彩副教授、高潮副教授、唐小初副教授、谢利利副教授、秦岚副教授、李志敏高级工程师、胡学东副教授、刘京诚讲师、徐道年讲师、李立新博士、廖昌荣博士、何智博士、张玉麟博士、余森博士、胡松博士、张鹏硕士的帮助和启发，在此深表谢意。

在平时的学习和学术交流中，龙辉敏硕士、杨春林硕士、杨曦硕士、黄敏硕士、陈小文硕士、王名福硕士、李毅硕士、刘宇硕士、王义平硕士、富红桥硕士、李兵博士、陈愚博士、黎凯博士向作者提供了许多研究资料和研究建议，在此向他们表示深深谢意。

最后，作者要感谢家人及朋友们的支持和理解。

参考文献:

- [1] Sung-Pil Chang, Sungkon Kim. Online structural monitoring of a cable-stayed bridge. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P150-158
- [2] Jeong-Tae Kim, Norris Stubbs. Damage localization accuracy as a function of model uncertainty in the I-40 bridge over the Rio Grande. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P193-203
- [3] Randall L.Mayes. An Experimental Algorithm for Damage Applied to the I-40 Bridge Over the Rio Grande. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P204-214
- [4] Peter L.Fuhr, Dryver R.huston, Timothy P.Ambrose, Euan F.Mowat. Internet Monitoring of an Instrumented Civil Structure. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P301-307
- [5] Christopher M.Ballard, Stuart S.Chen. Automated Remote Monitoring of Structural Behavior via the Internet. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P102-111
- [6] K.D.Bennet, L.R.Mclaughlin. Monitoring of corrosion in steel structures using optical fiber sensors. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P48-59
- [7] M.J.de Vries, V.Bhatia, R.O.Claus, K.A.Murphy, T.A.Tran. Applications of Absolute EFPI Fiber Optic Sensing System for Measurement of Strain. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P9-15
- [8] M.A.Davis, D.G.Bellemore, T.A.Berkoff, A.D.Kersey. Design and Performance of a Fiber Bragg Grating Distributed Strain Sensor System. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P227-235
- [9] Craig E.Miller, M.G.Sharma, James A.Sherwood. Measuring soil strains using fiber optic sensors. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P2-13
- [10] Samuel Vurpillot, Daniele Inaudi, Jeean-Marc Ducret. Bridge monitoring by fiber optic deformation sensors: design, emplacement and results. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P141-149
- [11] Edgar Conley, Chris Morgan. Speckle photography applied to

- measure deformation of very large structurec Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P161-168
- [12] Samuel Vurpillot, Daniele Inaudi, Antonio Scano. Mathematical model for the determination of the vertical displacement from internal horizontal measurements of a bridge. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P46-53
- [13] John W.Ayres, Craig A.Rogers. Qualitative heath monitoring of a steel bridge joint via piezoelectric actuator/sensor patches. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P123-131
- [14] Moises A.Abraham, Sooyong Park, Norris Stubbs. Loss of prestress prediction based on nondestructive damage location algorithms. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P60-67
- [15] Gabe Carcia, Norris Stubbs, Karen Butler. Relative performance evaluation of pattern recognition models for non-destructive damage detection. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P25-35
- [16] Carlos Ferregut, Roberto A.Osegueda, Jaime Ortis. Artificial neural networks for structural damage detection and classification. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P68-80
- [17] Jeong-Tae Kim. Robust damage location algorithm for highway plate-girder bridges. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P116-126
- [18] Gabe Garcia, Norris Stubbs. The effect of damage size and location on the stiffness of a rectangular beam. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P151-160
- [19] Sooyong Park, Norris Stubbs. Reconstruction of mode shapes using Shannon's sampling theorem and its application to the nondestructive damage location algorithm. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P280-292
- [20] Oscar R.Serna, Norris Stubbs. Nondestructive damage evaluation in complex structures using modal strain parameter. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P192-200
- [21] Yanchu Xu, R.N.Miles. Non-destructive evaluation of the structural damage based on the strain distribution information. Smart Structure and Materials. SPIE 1995 March Volume2446. P216-226
- [22] Sooyong Park, Norris Stubbs. Bridge diagnostics via vibration

- monitoring. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P36-45
- [23] Klaus G.Topole、Gallia Tzvetkova. Damage Detection of Highly Nonlinear Structures from Response Measurements. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P170-179
- [24] S.Pietrzko、R.Cantieni、Y.Deger. Identification of a reference mathematical model of an arch bridge using full-scale forced modal testing and finite-element-modelling. Smart Structure and Materials. SPIE 1996 February Volume2719. P180-191
- [25] G.w.Housner、L.A.Bergman、T.K.Caughey、A.G.Chassiakos、R.O.Claus、S.F.Masri、R.E.Skelton、T.T.Soong、B.F.Spencer、J.T.P.Yao. Structure Control: Past, Present, and Future. Journal of Engineering Mechanics. Volumn 123. Number 9. September 1997. P897-971
- [26] Y. J. Rao. Resent progress in application of in-fiber Bragg grating sensor. Optics and Laser in Engineering. Vol 31. 1999. P297-324
- [27] 文玉梅、李平. 压电换能传感器电学响应特性. 压电与声光. Vol 21. No1. 1999. P17-21
- [28] 唐凤、黄尚廉、陈儒等. 机敏支撑结构的振动主动控制. 航空学报. 第 18 卷第 3 期 总第 144 期. 1997 年 5 月. P351-354
- [29] 古渊、陈伟民、黄尚廉等. 具有刚性运动基的柔性结构振动主动控制. 振动工程学报. Vol 12. No4. 1999. P546-552
- [30] D.H.Wang、S.L.Huang. Research on In-Situ Monitoring for the Stayed-Cable' Tension of Cable-Stayed Bradges. Proceedings of ICHMCIS'99 International Conference on Health Monitoring of Civil Infrastructure System, October 22-26, 1999 P88-95
- [31] 徐日旭, 王博仪, 赵家奎. 桥梁检测. 人民交通出版社. 1992 年
- [32] 曹雪琴, 刘必胜, 吴鹏贤. 桥梁结构动力分析. 中国铁道出版社. 1987 年
- [33] 张福学, 孙慷. 压电学. 国防工业出版社. 1984 年
- [34] 张沛霖, 张仲渊. 压电测量. 国防工业出版社. 1983 年
- [35] 李远、秦自楷、周志刚. 压电与铁电材料的测量. 科学出版社. 1984 年
- [36] 周传荣、赵淳生. 机械振动参数识别及其应用. 科学出版社. 1989 年
- [37] 胡时岳、朱继梅. 机械振动与冲击测试技术. 科学出版

- 社. 1983 年
- [38] 贺兴书. 机械振动学. 上海交通大学出版社. 1989 年
- [39] 项贻强、余建华. 桥梁结构分析的数值方法及其程序——在正交桥、斜弯桥设计中的应用. 人民交通出版社. 1993 年
- [40] 马安禧, 于缓章, 周康年, 屈革. 材料力学. 第二版. 高等教育出版社. 1987 年
- [41] 强锡富. 传感器. 第二版. 机械工业出版社. 1994 年
- [42] 郝威、王荣贵. 拨号连接 Internet 及其应用. 人民邮电出版社. 1998 年
- [43] 王洪、贾卓生、唐梅. 计算机网络实用技术. 人民邮电出版社. 1998 年
- [44] 瞿坦. 数据通讯及网络基础 (第一版). 华中理工大学出版社. 1996 年
- [45] William Stalling. 高传善, 高永勤, 王宗宁, 毛迪林译. Local and Metropolitan Area Networks (Fifth Edition). 局域网与城域网 (第五版). PRENTICE HALL 出版公司. 电子工业出版社. 1998 年
- [46] Craig Goren. 张云明、郝宗伟、梁源松译. Visual Basic 客户/服务器开发指南. 清华大学出版社. 1997 年
- [47] Wathan Gurewicz、Ori Gurewicz. 徐峰、于小刚译. Visual Basic 3.0 for Windows 从入门到精通. 学苑出版社. 1994 年
- [48] Brian Livingston、Davis Straub. 王志言、柳彩霞、吴晓冰、蒋华、李杨等译. Windows95 奥秘. 电子工业出版社. 1996 年
- [49] 陈坚、陈涛. 利用 Visual C++ 2.0/4.0 编制 Windows95 应用程序. 西安电子科技大学出版社. 1997 年
- [50] 许冬岗、周涤非、聂文强. Borland C++ Builder 编程技巧与实例. 西安电子科技大学出版社. 1998 年
- [51] 张剑. C++与 Windows 高级编程. 清华大学出版社. 1994 年
- [52] 邹贻明、郭新明. Borland C++4.0—面向对象的程序设计. 成都科技大学出版社. 1994 年
- [53] 施小龙、葛玉宝、邓明辉. Borland C++3.1-4.0 深入编程. 学苑出版社. 1994 年