

内 容 简 介

本书以林区桥梁测试中广泛应用的电测技术为主要内容,共分为总论、静力试验、动力试验、墩台试验、模型试验原理、误差分析与数据处理等六章。可作为林业高等院校道桥专业或其它有关专业本科学生教学用书,其中有关章节可供研究生学习应用。

本书也可供有关专业人员工作和学习的参考。

林 区 桥 梁 测 试 技 术

徐日昶 赵家奎 编著

东北林业大学出版社出版

(哈尔滨市和兴路8号)

黑龙江省新华书店发行 东北林业大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 10.625 字数 231 千字

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

印数 1—2,000 册

ISBN 7—81008—013—X/TB·1

统一书号 15447·003 定价 1.80元

目 录

前 言

第一章 总 论	(1)
§ 1—1 概 述	(1)
一、桥梁试验的主要任务	(1)
二、桥梁试验的步骤	(2)
§ 1—2 桥梁试验的分类	(2)
一、按试验的目的分	(2)
二、按试验荷载的作用性质分	(3)
三、按试验对象分	(3)
§ 1—3 桥梁试验的测试系统	(4)
§ 1—4 桥梁测试技术的发展	(6)
第二章 桥梁静力试验	(8)
§ 2—1 静力试验的一般步骤	(8)
一、概 述	(8)
二、静力试验的一般步骤	(8)
§ 2—2 试验对象的考察	(9)
一、技术文件和资料的收集	(9)
二、试验结构现状调查	(9)
§ 2—3 试验方案的确定	(11)
一、确定试验目的	(11)
二、试验结构或构件的设计与生产制作	(12)
三、加载方案设计	(13)
四、观测设计	(13)
五、试验的准备工作	(13)
六、静力试验的程序	(14)
七、试验的组织和进度	(15)
八、试验的安全措施	(15)
§ 2—4 静力试验的荷载设计	(16)
一、林区公路设计荷载简介	(16)
二、静力试验的加载系统和选择	(16)
三、静力试验的加载方法	(18)
四、加载程序	(20)
§ 2—5 静力试验的观测设计	(21)
一、静力试验观测内容及观测项目的选择	(21)
二、机械式仪表测试系统	(23)
三、电测式量测系统	(25)

四、测试仪器仪表的选择和应用	(34)
§ 2—6 静力试验的评价指标	(36)
一、数据处理	(36)
二、静力试验评价指标	(39)
三、几个可供参考的评价指标	(41)
§ 2—7 试验评价与试验报告	(44)
一、静力试验的评价	(44)
二、静力试验报告	(44)
第三章 桥梁动力试验	(45)
§ 3—1 概 述	(45)
§ 3—2 振动信号分析基础	(48)
一、信号的分类	(49)
二、确定性信号	(50)
三、非确定性信号	(57)
§ 3—3 动力测试系统	(66)
一、测振传感器	(67)
二、测振放大器	(70)
三、测振记录装置	(75)
四、动力测试系统选配	(78)
五、测振仪器的标定	(81)
§ 3—4 桥梁激振方法	(83)
一、自振法	(83)
二、共振法	(84)
三、随机激振	(85)
§ 3—5 桥梁动力试验	(86)
一、有关试验的准备	(86)
二、林区桥梁车辆荷载的特性	(87)
三、桥梁结构动力特性的测定	(89)
四、运材车辆的动力系数	(96)
第四章 桥梁墩台和基础的荷载试验	(101)
§ 4—1 概 述	(101)
§ 4—2 墩台荷载试验的测试方法	(102)
一、墩台整体变形的测试	(102)
二、墩台结构强度的测试	(103)
§ 4—3 桥梁基础荷载试验方法简介	(108)
一、浅平基的试验方法	(109)
二、桩基础的荷载试验方法	(112)
第五章 模型试验原理	(116)
§ 5—1 概 述	(116)
§ 5—2 量纲分析	(117)
一、量纲的概念	(117)
二、量纲的关系	(118)

§ 5—3 相似原理	(119)
一、相似的概念	(119)
二、相似第一定理	(120)
三、相似第二定理	(121)
四、相似第三定理	(123)
§ 5—4 相似准则的确定	(123)
一、方程分析法	(123)
二、量纲分析法	(125)
§ 5—5 模型设计原理	(128)
一、静力相似	(128)
二、动力相似	(134)
三、关于模型材料和试验中的问题	(138)
第六章 误差分析与数据处理	(141)
§ 6—1 测定值的误差	(141)
一、误差的产生和分类	(141)
二、测定值的精确度和准确度	(142)
§ 6—2 误差理论基础	(143)
一、误差的分布规律	(143)
二、高斯误差分布定律	(145)
三、偶然误差的表示方法	(146)
四、平均值的误差	(147)
§ 6—3 间接测量时的误差分析	(149)
§ 6—4 可疑数据的取舍	(152)
一、 3σ 准则	(152)
二、肖维纳 (Chauvenet) 准则	(152)
三、格拉贝斯 (Grubbs) 准则	(152)
§ 6—5 试验曲线与经验公式	(155)
一、试验数据函数关系的表示方法	(155)
二、试验曲线与经验公式的确立	(156)
三、经验公式中常数的确定方法	(157)
四、各种方法的比较	(160)
参考书目	(162)

第一章 总 论

在桥梁工程技术发展中,试验研究工作同理论分析一样起到了非常重要的作用。在结构理论的演变过程中,一种理论的萌生与发展,无不与大量的试验研究工作相联系。例如,在结构强度分析中,为人熟知的受弯梁平面假定和中性层假定等理论,都是经历了多年不断地探索和反复试验研究才日臻完善的。理论的正确性只有通过实践的检验才能加以证实,而科学试验正是一种严格的特殊实践方法,同时,在一定理论指导下的试验研究除了可进一步揭示客观现象的一般规律外,还有可能通过试验研究发现新问题、提出新的设想,为不断充实和发展理论提供可靠的科学依据。因此,理论分析和试验研究是促进桥梁工程技术发展所不可缺少的两个重要方面。

理论的指导作用是进行试验研究工作所必须的条件,试验研究成果除可直接验证理论外,本身也有待于提高为理论,或成为现有理论的补充及发展,二者在科学技术的发展中是互相依存和相辅相成的。

§ 1—1 概 述

桥梁测试技术是对桥梁结构物进行包括桥梁检查、必要的理论检算和荷载试验等工作,并根据测试结果对桥梁结构物进行综合分析,作出符合实际情况的结论。

桥梁试验是对桥梁结构物进行直接测试的一项科学试验工作,通过荷载试验了解桥梁在荷载作用下的实际工作状态,判断桥梁结构的实际承载能力和使用条件。对于某些在理论上尚难以计算之处,通过桥梁试验可达到直接了解其受力状态的目的。通过桥梁试验还常常有助于发现在一般性检查中难以发现的隐蔽病害,此外,通过试验也可检验桥梁结构设计和施工质量。

一、桥梁试验的主要任务

桥梁试验的任务要根据试验目的和要求来确定,一般地说,可有下列几种情况。

确定桥梁的承载能力及运用条件。

对于重要的桥梁结构,除在设计阶段进行必要项目的试验研究外,通常在桥梁建成竣工后,通过荷载试验来鉴定结构的质量和运用条件,分析判断桥梁的实际承载能力。对于需改建或加固的桥梁,通过试验可进一步提供技术依据,这对于缺少技术资料的旧桥尤为必要。

对于新型或复杂的桥梁结构,通过系统的荷载试验,可以了解和掌握结构在荷载作用下的实际受力状态,并探索具有普遍意义的规律,为发展桥梁结构的计算理论积累科学资料。

分析桥梁病害原因,掌握其变化规律。

对于遭受水害、冰冻、地震等而损伤的桥梁结构,或在桥梁建造和使用期间发现有

严重缺陷的，例如过大的变形或裂缝等，常通过桥梁试验进行综合分析研究，提出合理的整治方案和养护措施。

对新型桥梁或改建桥梁进行竣工检定，以检验预期的设计效果。

二、桥梁试验的步骤

一般情况下，桥梁试验按三个阶段进行，即计划与准备阶段、加载与观测阶段、分析总结阶段。

计划与准备阶段工作是顺利地进行桥梁试验的必要条件。桥梁试验与结构设计和工程施工的关系十分密切，现代桥梁工程技术对试验技术和试验计划与组织工作提出了更高的要求。因此，这一阶段的工作是大量而细致的。实践证明，整个试验工作的成败在很大程度上取决于试验前的准备工作。

计划与准备阶段的工作内容主要有：收集、研究试验结构的有关技术文件，考察试验结构的现状和试验的环境条件，拟定试验方案及试验程序，确定试验组织及人员组成，测试系统的构成、仪器的组配及标定、必要的器材准备等工作。

加载与观测阶段是全部试验工作的中心环节。这一阶段的工作是在充分准备的基础上，按照预定的试验方案进行各项具体的试验内容，运用合理组配的各种仪器和设备，观测试验结构在受载后的工作状态并记录观测数据和有关资料。有时，为了更完善的实现某一加载、观测方案，可先进行试探性的试验，以便更完满地达到原定的试验目的。

分析与总结阶段是对原始试验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、记录信号、文字记载和照片等。测试结果由于受到各种干扰因素的影响，一般都比较缺乏条理和规律，因此，应对它们进行科学的分析处理，去伪存真、去粗取精，从中提取尽可能多的有用信息。对于一些数据信号，有时需要按数理统计的方法进行分析，有时则依靠专门的分析仪器和电子计算机进行分析处理。

这一阶段的工作，直接反映整个试验工作的质量。根据对已取得的大量观测资料的分析研究，对试验结构作出科学的判断与评语。全部试验工作成果体现在最后提出的试验研究报告中。

§ 1—2 桥梁试验的分类

实际上，桥梁试验的种类较多，从不同的角度考虑可有下列分类方法。

一、按试验的目的分

根据桥梁试验目的和要求可分为科学研究性试验和生产鉴定性试验。

研究性试验的直接目的是为建立或验证结构设计理论和经验公式，或者为了验证某一理论体系中的科学判断和假说的可靠性。研究性试验常按事先周密考虑的计划进行，一般把对结构或构件具有主要影响的因素作为试验参数，而忽略次要因素的影响。试验结构的设计应按具体试验要求而定。根据具体情况，试验可在实际的原型结构上进行，也可在模拟的模型结构上进行，后者常在专门的试验室内进行，这样就可减少或消除一些不利因素的干扰，同时，在模型结构上也便于突出所要研究的主要因素，减缓某些对结构有实际影响的次要因素的作用。

通过系统的研究性试验,一般可揭示出具有一定普遍意义的客观现象的规律。

鉴定性试验一般都具有直接的生产目的,实践中,多以实际结构作为试验对象,通过荷载试验来检验桥梁结构的实际承载能力和工程质量。通过对测试结果的综合分析,掌握桥梁的技术状态,确定桥梁的运用条件,提出桥梁的养护措施等,以便有效地保证桥梁结构物的安全使用。

为了加强和提高桥梁的技术管理工作,进行鉴定性试验时,应根据一定的标准和规程来组织和进行试验工作,这样才有可能对各种类型的桥梁结构物进行分析和比较。

大量的鉴定性试验所提供的试验资料,为充实与发展结构理论提供了重要的依据。可见,鉴定性试验除有直接的生产目的外,还具有重要的理论意义和科学价值。

二、按试验荷载的作用性质分

根据试验荷载的作用性质,桥梁试验可分为静力试验和动力试验。

桥梁结构的静力试验和动力试验,虽然在试验目的和内容上都很不相同,但对承受以车辆荷载为主的桥梁结构来说,这两种性质的荷载试验对于全面分析和了解桥梁结构的工作状态是同样重要的。静力试验可在结构上布置较多的测点,便于更全面的分析结构的受力情况。动力试验则是研究分析桥梁结构在车辆荷载或其它动力荷载作用下的振动特性所必须的。

在桥梁动力试验中,按作用方式可将动力荷载分成为冲击荷载、振动荷载和制动荷载。在试验中可根据试验的具体要求来选择荷载方式。

目前,在桥梁设计实践中,对于车辆荷载所产生的动力作用的影响。采取了在结构静力计算的基础上引入活载冲击系数的方法来考虑。以跨长或加载长度作为参数的冲击系数,是一个概括了多种因素影响的综合性技术指标。冲击系数的数值范围,一般是通过桥梁动力试验,并经综合分析研究确定的。

三、按试验对象分

按所选用的试验对象,桥梁试验可分为原型试验和模型试验。

在结构试验中,如能使设计方案中分析的结构应力状态在试验结构上得以真实再现是很有必要的,所以,为验证结构设计理论而进行的试验,往往希望在原型结构上进行。但是,原型结构试验存在费用大、期限长和测试条件不利等因素影响,尤其对于受力比较复杂的大型结构或构件的工作性能的试验,有时是难以实现的。在此情况下,常采用模型结构作为试验对象,模型结构可选用价格低并易于加工的材料制作,制作时宜将复杂的结构型式适当加以简化。应用相似理论选取适当的几何比例尺和易于实现的试验条件来进行试验,通过模型试验对于了解桥梁结构的内力计算问题和桥梁各杆件之间的联合作用及其相互影响的结构作用等问题,都比在桥梁原型上能更方便、更精确地得到解决。

模型试验由于具有精度高、易于控制等特点,因此这种试验方法日益广泛地应用于各类工程结构中,并成为工程技术人员进行结构应力分析的一种有效的手段。

此外,根据试验对结构所产生的后果,桥梁试验可分为破坏性试验和非破坏性试验。按试验持续的时间,可分为长期观测和短期观测。

在一般情况下,除有特别要求外,鉴定性试验一般为非破坏性试验。仅在某些特殊

情况下为了达到预定的试验目的，才需要进行破坏性试验，以便了解在逐渐增加的荷载作用之下，试验结构的工作由弹性阶段到塑性阶段甚至是破坏阶段的力学性能等比较可靠的试验资料。

实际上，原型结构的破坏性试验，不论是在费用上还是在方法上都存在一些具体的问题，特别是实现结构在趋于破坏状态时的试验是很困难的，因此，一般很少进行这种性质的试验。尽管由破坏性试验得到的资料具有重大的实际意义，可是桥梁结构破坏性试验的实例仍然很少。然而，科学研究性试验，常根据试验目的的需要一直进行到破坏为止。

在观测的时间上，鉴定性试验与一般的研究性试验均多采用短期观测的方法，只有那些必须进行长期观测和考察的现象才采用长期观测的方法，例如混凝土结构的徐变性能等。另外，对于特殊的大型结构或新型结构也常采用长期观测或组织定期的检验。

总之，结合不同的试验目的和要求，可选择一种或几种试验方法。在选择时，应讲求经济效益，一般能用模型来替代的，就不搞大规模的原型试验；能以非破坏性试验解决的，就不作破坏性试验。

§ 1—3 桥梁试验的测试系统

桥梁试验是通过由一批组配成套的仪器设备所构成的测试系统，测定和记录结构各部位在荷载的作用下所产生的变形与应变、应力与内力的数值、并分析其变化规律，从而了解桥梁结构在荷载作用下的受力工作情况。

测定值的准确程度是否能反映桥梁的实际工作状态，这完全取决于桥梁试验所采用的试验方法、仪器的配置及测试系统的精度、试验各环节产生的误差及其传递、以及环境条件和人员操作等因素的影响程度。

测试仪器按其构造原理可分为机测仪器、电测仪器、光测仪器和声测仪器等。由于电测方法具有很多优越性，所以在结构试验中得到了极其广泛的应用。

桥梁试验所用电测仪器和设备种类繁多，性能各异，一般情况下，桥梁试验的测试系统如下图所示。

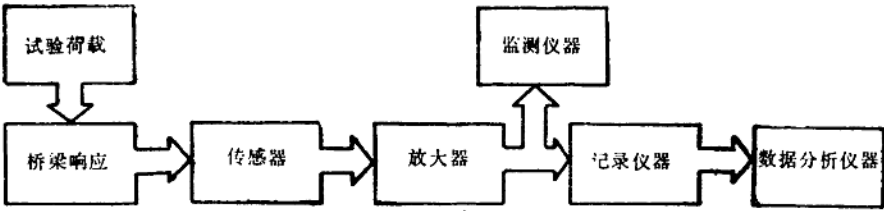


图 1—1 桥梁荷载试验方框图

在桥梁结构承受荷载的作用后，结构各部位将产生力的作用和位移变化，这些机械物理量的数值与变化，需通过信号变换仪器即各种变换原理的传感器转换成电量的数值与变化，在一般情况下，传感器输出的电信号非常微弱无法直接测读，需经信号测量仪器放大后，直接测读或经信号记录仪器录取。

传感器可根据试验需要,制成位移、应变、速度和加速度等专用传感器。由于位移、速度和加速度三个物理量在数学关系上存在微积分的关系,因此测定量也可通过微分电路进行相应的转换。

电阻应变式传感器常与电阻应变仪组成的调幅测试系统相配合,电容式或电感式传感器常与调频测试系统配合,压电式传感器则与直接测试系统的电荷放大器配合。

由光线示波器记录的信号图形,一般可用手工方法整理分析,也可将手工分析结果通过通用电子计算机进一步分析。由磁带记录器记录的信号,一般在室内重放还原为电信号,再经信号分析仪器分析处理。

测试系统的各个环节均为单独的仪器设备,根据试验的要求和仪器的性能可组成不同形式的测试系统。在试验的准备阶段,应对各仪器进行严格的标定,以保证试验所要求的精度。

在桥梁试验中,根据所测物理量的不同,所用仪器设备大致有如下几种。

1. 测力仪器

作用力测试仪器主要是用来测定试验时的试验荷载、支座反力和构件内力等数值。常用的测力仪器有:电子秤、压力或拉力传感器。此外,压力或拉力测力计也经常应用,如弹簧式测力计和液压式测力计等。电子秤是一种体积小、重量轻,构造简单、使用方便的自动称量仪器,在结构试验中得到比较广泛的应用。

2. 位移测试仪器

这种仪器主要用于测定结构在荷载作用下所产生的线位移和角位移,如百分表,各种类型的挠度计,倾角仪以及各种变换原理的位移传感器等。

3. 应变应力测试仪器

在荷载的作用下,桥梁结构各部位除产生变形外,还产生一定的内力和应力,通常情况下,应力的数值是根据测定的应变推算的,由应力的数值及分布规律则可分析计算出内力数值。在桥梁试验中常用的应变测试仪器有千分表应变仪、手持式应变仪、杠杆式应变仪、电阻应变计和其它电学变换原理的应变计等。此外,还有光学、声学变换原理的应变计。

4. 测振仪器

在桥梁动力测试中,需要测定和记录桥梁在自由振动和强迫振动状态时各振动量随时间而变化的历程曲线,以便分析结构的动力特性。如频率、阻尼特性和振型等,以及桥梁在动力荷载作用下的响应。桥梁测振仪器种类较多,常用的如拾振器、位移传感器、加速度传感器,以及与其配套使用的一系列信号测量、记录和分析仪器等。

在桥梁试验中,有时还要用到温度测量仪器和裂缝检查仪器。

桥梁试验对于测试仪器的要求较多,主要有以下几点:

- ① 测试仪器的尺寸小,重量轻。仪器附着于结构上时,不应影响结构的正常工作,这在进行模型试验时尤其重要。
- ② 仪器的度量性能应满足试验的要求,例如仪器的量程、灵敏度和精确度等。
- ③ 要求仪器构造简单,使用方便,工作可靠。
- ④ 要求仪器工作稳定,具有一定的适应能力,不易损坏,容易维修等。

上述各项要求，有时难以同时达到，例如灵敏度高时，往往构造复杂使用不便；精确度高则适应性能就要差些。

§ 1—4 桥梁测试技术的发展

我国的桥梁检验工作是在建国后的国民经济恢复时期和发展国民经济第一个五年计划时期开始发展的。当时，在修复和改建大量的旧有桥梁过程中，通过检测提供了必要的技术数据，对一些承载能力较低的桥梁进行了技术改造。这不仅达到直接为生产服务的目的，还培养了一支桥梁测试技术队伍。

1955年在全国公路工程中推广应用预应力混凝土结构，使混凝土结构的应用范围日益扩大，从而节省了大量钢材，加快了工程建设的速度。这些成就是同大量的试验研究工作分不开的。

1957年10月，著名的武汉长江大桥全部建成后，经受了极为严格的科学检验。

1968年，世界闻名的南京长江大桥建成，经受了大规模的全面检验。

通过两座特大桥梁的科学试验，充分证明了我国桥梁工程技术已达世界水平，同时也反映了我国桥梁检验技术已达到相当的水平。

1964年，我国在传统的建桥技术基础上，创建了双曲拱桥。这一新型桥梁很快就在全国范围内得到推广，在此期间，各有关部门和单位对双曲拱桥进行了大量的试验研究工作。这对于双曲拱桥的推广与应用，改进和充实双曲拱桥的设计与施工方法等都起到很大的促进作用。

我国林区桥梁检验工作始于60年代初期，广大林区道桥工程技术人员克服了种种困难，在试验研究的基础上为地处永冻地带的林区桥梁建设提供了大量的技术数据和资料。

近十多年来，先后出现的各种类型的桥梁，例如大跨径预应力混凝土悬臂梁桥、连续梁桥、箱形拱桥和斜拉桥等，都是在理论分析与试验研究相互促进和推动的基础上，才使其设计理论和施工技术日益得到完善的。

目前，我国的科学试验技术，由于仪器工业应用近代物理学和电子技术的成就，提供了一系列通用的或专用的新型精密仪器设备。实现了量测系统和数据处理的自动化，形成了一套比较完善的试验方法。

近年来，世界各国对于改进试验方法、实现试验技术的现代化十分重视。为了消除现场试验的不利因素影响，适应整体结构的试验研究，一些国家先后建立了大型现代化结构试验室，配备了规模大、功能全、技术先进的试验仪器设备。实现了从数据收集、记录到数据信号分析处理的全部试验过程自动化，节省了人力，也避免了测试时间长所带来的误差。

试验时的加载方法，一是利用大型结构试验机，另一种是采用试验台座和液压加载系统。电液伺服自动加载系统主要用于动力试验。

大型结构的原型试验，虽然可提供重要的技术资料，但由于大型结构试验的规模大、耗资多、周期长，使某些材料（如混凝土）的测量精度受到限制，往往难以满足理论

研究的要求。因此，通常比较重视模型试验，近年来，在模型理论、模型材料和模型试验技术等方面进行了不少的研究工作。一般在小比例模型试验中主要使用热塑性塑料，在大比例模型试验中则大力发展细石混凝土和砂浆模型。

原型结构的破坏试验，由于困难较大不易实现，所以很少进行，但对于一些新型或大型结构，往往在模型试验的基础上进行现场试验和观测，因而应该重视发展长期观测技术和动力试验技术。

对于结构的无损检验技术，尤其是混凝土结构的无损检验技术，70年代以来，由于研究工作日益深入，使测试技术和测试仪器都有很大发展，在工程实践中应用十分广泛。特别是对于遭受火灾、冰冻以及化学侵蚀介质作用的混凝土结构的损害程度，无损检验技术具有突出的优越性。

目前，测试技术的发展特点是测试手段多样化，高精度、小型化的仪器不断出现和应用。电子计算机在各个领域中的广泛应用，使测试技术发生了巨大的变化。

我国结构测试技术已发展到相当的水平，而且具有雄厚的物质基础和巨大的潜力。今后应着重研究试验加载系统，提高测试过程的自动化程度，开展结构模型试验方法及混凝土结构的无损检验技术等问题的研究。

第二章 桥梁静力试验

§ 2—1 静力试验的一般步骤

一、概 述

桥梁结构的试验是对桥梁结构物工作状态进行直接测试的一种检定手段。而桥梁结构的静力试验是将静止的荷载作用在桥梁指定位置时,测试结构的静应变、静位移以及其他试验项目,从而推断桥梁结构在荷载作用下的工作状态和承载能力。对于桥梁结构来说,静载往往是指以缓慢速度行驶到桥上的指定荷载级别的车辆荷载。当试验现场受条件的限制时,有时也以施加荷重(如堆置铸铁块、水泥、预制构件、水箱等)或者以液压千斤顶装置施力等方式来模拟某一等级的车辆荷载,藉以达到试验的目的。

一般桥梁结构静力试验的基本目的主要有三个:

- ① 提供观测资料,验证桥梁结构的承载能力和工作状况,说明达到设计标准或满足使用要求的程度,以保证桥梁运营的可靠性;
- ② 鉴定桥梁结构真实的工作状况,为改进桥梁结构及其设计方法积累科学资料;
- ③ 分析桥梁病害原因,掌握其变化规律。

在实际工作中根据不同的目的和条件,静力试验可以是生产鉴定性试验或者是科学研究性试验,可以是破坏性试验或者是非破坏性试验;可以是组成桥梁的主要构件试验或者是实桥整体试验;可以是实地现场试验或者是桥梁结构模型的实验室内试验。桥梁结构静载试验按照最大试验荷载量可分为:

- ① 基本荷载试验:其最大试验荷载量为设计规范规定的标准荷载(包括规程规定的动力系数或者荷载增大系数),适用于一般鉴定性试验;
- ② 重荷载试验:最大试验荷载大于基本荷载,多用于结构破坏性试验;
- ③ 轻荷载试验:最大试验荷载小于基本荷载,但不小于基本荷载的一半,以保证能充分反映结构的整体工作状况,多用于研究性试验。

随着我国桥梁建筑事业的不断发展,桥梁结构的型式日益增多,每一种新型桥梁的出现,必然带来许多实际的理论、设计方法、施工工艺方面的问题等,这就成为桥梁结构试验的新课题。而桥梁结构的静力试验又具有测试项目多,布设测点多的特点,可以提供足够数量的数据,供全面地分析实际结构受力状况之用,因此,静力试验得到了广泛地应用。

二、静力试验的一般步骤

桥梁结构的静力试验大致可分为三个阶段,即桥梁结构的考察、试验方案设计及试验准备阶段;加载试验与观测阶段;试验结果的分析与总结阶段等。

1. 试验结构的考察、试验方案的设计和准备阶段

根据试验目的和要求、具体考察试验的桥梁结构,研究有关桥梁结构的图纸、文

件、资料，进行必要的理论分析和核算，以及试验过程中的设计计算，补充必要的材料力学性能试验，在这些工作的基础上有针对性地拟定出周密合理的试验方案，同时要按计划全面地开始试验前的各项准备工作。

2. 加载试验与观测阶段

在充分准备的基础上，按照预定的试验方案，对结构施加试验荷载，通过各种测试仪表机具进行观测，取得试验数据。试验加载和观测阶段是桥梁结构静力试验的核心。

3. 测试结果的分析与总结阶段

通过加载测试将得到的大量观测数据和资料，加以科学的整理与计算，并按照最新的科学方法进行分析，最后做出科学的结论。

最后，综合上述三阶段的内容，组成一个综合性报告即桥梁静力试验报告。

§ 2—2 试验对象的考察

在桥梁试验方案确定之前，必须对试验结构进行实地考察和了解，做到情况清楚、心中有数。其主要内容是：

一、技术文件和资料的收集

1. 桥梁结构的设计资料，如设计标准、设计主要荷载类型、结构特点及计算方法，结构计算书以及作为设计的原始资料（如地质、水文、土壤、气象等资料）；

2. 桥梁结构施工资料，如材料性能试验报告、隐蔽工程验收资料、施工观测记录、阶段施工质量检查验收记录、事故记录、以及竣工图纸等；

3. 桥梁结构的使用资料，如桥梁使用阶段维修、改建、加固的资料；运营情况；结构损伤及破损阶段报告等。

二、试验结构现状调查

1. 对圯工拱桥、钢筋混凝土梁桥，通常要了解和观察的项目有：

(1) 用直观或量测的方法确定结构各部分的几何形状及相互位置偏差；

(2) 用直接量测的方法或照相的方法确定墩台的空间位置和距离，记录有无沉降、隆起、倾斜和转动等等；

(3) 考察装配式结构的安装质量；

(4) 考察混凝土、石砌或镶面的外表质量、砌体错缝是否正确、墩台顶面排水是否有保证；

(5) 考察现有的损伤、裂缝、蜂窝、麻面、钢筋外露、混凝土保护层厚度不够的地方、漏水的地方，混凝土反碱、锈痕，装配式结构中各部件接头错位，石砌和镶面的错位等等；

(6) 用非破损检验的方法确定结构或构件混凝土实际强度是否与设计文件相符。

在进行上述考察工作过程中，应当把考察工作的重点放在以下几方面：

1) 圯工体是否完整，墩台基础的混凝土的强度和密实度；

2) 墩台和上部结构的裂缝，如墩帽悬臂部分的竖向和斜向裂缝；梁的受拉区横向裂缝、受压区的纵向和斜向裂缝；顺预应力钢筋方向的裂缝；锚固区内裂缝；在拱桥、悬

臂梁桥、T形刚构桥上部支承节点内的裂缝；横隔梁（尤其是端横隔梁）内的裂缝；组合结构接头处混凝土的裂缝和断裂；支承节点处混凝土的裂缝和断裂；特别是缝宽0.2mm或接近0.2mm宽裂缝；

3) 混凝土保护层厚度不够的地方；

4) 钢筋外露和锈蚀的区段；

5) 注意力集中在容易发生应力集中的部位，如截面突变、接头、结点部位；

6) 对圯工桥应注意测量拱圈尺寸及实际拱轴线位置，仔细检查拱圈上有无横向裂缝。

2. 对支座的考察

(1) 对于钢支座（包括摆柱式支座）：检查各部分相对位置变化，有无损坏和受力不均匀现象，活动支座是否灵活，其实际位移是否正常，同时注意考察固定螺栓等部件的变异。

(2) 对于橡胶支座：要查明橡胶型号及使用期限；支座的高度和支承面积是否符合设计要求；有无损伤（如橡胶内裂缝、橡胶与钢板间错位）；考察支座位置是否正确；支座与梁和墩台帽接触面之间有无空隙等。

3. 对桥面的考察

主要是查明行车道和人行道路面的纵坡及横坡值与各自设计值的符合程度；查明桥面有无损伤、裂缝、坑槽、局部不平，人行道、缘石、栏杆的损坏情况；检查排水孔、排水管、排水槽是否够用，能否保证将桥面上积水及时排除，必要时要将面层、保护层挖开查勘防水层的防水效果；检查伸缩缝时要搞清伸缩缝能否保证上部构造两端因温度和荷载而产生的自由位移和伸缩装置与桥面的联接状况；对封闭式伸缩缝要检查其填料（沥青等）和防水情况；对敞开式伸缩缝要检查它的活动构件及其与镶嵌部位的联接状况、排水槽的情况等。

4. 结构材料质量的考察

对桥梁结构的材料特性在无正式的文件资料证实，或者从已搜集到的资料分析中发现结构材料有问题时，就应该采取措施测定结构材料的特性。同时，结构材料的实际强度（如钢材、混凝土的极限强度）以及弹性模量是重要的物理力学性能指标，它们对正确估计和判断试验结构的承载能力和实际的工作状态有着重要的意义，同时它们也是试验数据的准确处理和正确判断的依据，因此在桥梁结构试验之前，必须通过各种方法比较准确地确定它。

在结构试验中，确定材料的力学性能的主要方法有两种，即直接测定法和间接测定法。

直接测定法是常用的主要方法，它要求把材料按规定做成标准试件（按试验结构所采用的材料及其配合比、施工方法及成型条件制作），然后在材料试验机上，用规定的标准试验方法进行加载测定。如果试件尺寸和试验方法不符合标准规定时，应将试验结果按规定换算到标准试件的结果。

对于桥梁结构的鉴定性试验，由于没有标准试件作证而判断结构实际的承载能力和变形特征，则常常采用从结构非重要部位挖取材料来制成标准的或者非标准试件，

用标准方法测定的方法。对于混凝土和圬工结构多采用间接测定法，又称非破坏性试验。这种方法是用专门的设备和仪器，直接测定与材料强度有关的硬度、密度等物理量，再通过理论分析和经验公式，即可间接地求出结构材料的力学性能指标。

§ 2—3 试验方案的确定

试验方案的设计是桥梁结构静力试验的中心环节。试验方案的设计就是对整个试验的全过程作一个全面的规划和切实的安排。一般试验方案的设计应根据试验目的，在充分考察和研究试验对象现状的基础上，对试验的规模、形式、种类作一计划，其内容应该包括：试验目的和根据试验目的确定的试验项目、试验场地、时间、经费；试验结构的技术资料；加载方案设计；观测方案设计；试验程序（包括加、卸载程序、观测程序，试验的终止条件等）；试验的准备工作；试验领导组成，人员分工；安全措施等。

一、确定试验目的

桥梁结构的静力试验必须紧紧围绕试验目的开展工作。而试验目的的确定完全是由实际的生产需要或者是桥梁工程科学研究需要决定的。生产鉴定性试验具有直接生产的目的。它以具体结构为试验对象，通过试验对试验结构作出技术结论。这类性质的试验常以下列问题作为试验的目的：

1. 检验桥梁结构的质量，说明工程的安全度和可靠性。对于一般大、中跨径的桥梁或者具有特殊研究目的的桥梁，都要在竣工后通过荷载试验综合地鉴定其工程质量的可靠性，并将该试验报告作为评定工程结构质量优劣的主要技术文件和依据。

2. 判断桥梁结构的实际承载能力，为改建或扩建桥梁工程提供数据和资料，从而有效地利用旧有桥梁。目前，在我国的林区道路上已建成了成千上万座各种形式的桥梁。在这些桥梁中，有些桥梁已不能满足当前通行重型荷载的要求，有的桥梁由于受到其他因素的影响，已经遭到不同程度的损伤和破坏，因此在工程实践中经常采用试验的方法，来确定这些桥梁实际的承载能力和安全度，并据此拟定加固或改建的方案，特别是那些缺乏设计计算资料和图纸资料的旧桥，通过实桥荷载试验来确定承载能力和使用条件就显得更为重要。

3. 处理工程质量事故，先进行试验鉴定，藉以得到必要的技术数据。这些由于受到自然灾害和某些人为因素的影响而损坏的桥梁，必须进行认真的检验，以便为修复或加固提供必要的技术数据。

对于这些以生产需要为目的的桥梁静力试验，大多数是在生产和施工现场，以实桥为对象进行试验的。这些实验可以获得近乎实际工作状态下的技术数据和资料，由于受客观条件的限制，同时参予影响的因素较多，所以这种试验难度较大，试验的精度和准确度都要受到影响。

在桥梁静力试验中，以科学研究需要为试验目的的往往是验证结构设计理论及各种科学假定的正确性，以及某些设计参数的实用性等。随着国民经济的飞跃发展，桥梁工程中不断出现新结构、新材料和新工艺，例如预应力及部分预应力混凝土桥梁、斜桥、弯桥、斜拉桥等等，必然要在设计、施工中提出许多新问题，对这些新课题都要通过多

次的工程实践及科学试验来解决。

由于以科学研究需要为目的的桥梁试验，往往是按照事先制定的科学研究计划有步骤地进行，因此试验结构或者构件也经常是专门为试验目的而设计制造的，因此这类试验大部分是在专门的结构试验室内进行的。因为这样既能突出研究的主攻方向，又可以消除和减少周围环境对试验结果的不利影响。

二、试验结构或构件的设计与生产制作

1. 试验结构或构件的设计

试验结构的设计，一般都是按照试验目的和要求进行的，它是研究性试验的重要环节。试验结构要能明显地反映研究课题的需要，以保证得到所需要的试验结果。

一般试验结构应当按照惯用的计算理论和结构设计规范进行设计，并求出在试验荷载作用下的强度、变形及裂缝等力学性能指标，作为判断或比较试验结果的指标。在有特殊需要时，试验结构也可按试验目的所需要的计算理论和方法进行设计，以便通过试验结果的比较，判断新的设计理论或计算方法的准确性和适用的程度。

桥梁结构在试验中的支撑构件、加载装置、加载方法，测量仪表的安装方法、位置等都应该在设计时加以考虑，并在施工图上提出具体的技术要求，作好技术配合工作。如考虑试验结构安装及加载测试的需要，在试验结构或构件上应预留必要的结构构造：例如在混凝土试验结构的支承位置上预留钢垫板；在试验结构受集中荷载作用的位置上预埋钢板，以防止试验结构受局部挤压而损坏。为了不改变加载点的位置或影响试验的精度，这些附加构造的强度安全储备都要大于试验结构本身的强度安全储备。在有些试验中，为了保证试验结构或构件在预定部位破损，以便得到必要的数据，则对试验结构或构件的其他部位进行必要的局部加固。

2. 预埋测试元件等的考虑

为了保证试验量测的可靠性和仪器安装的方便，可以在试验结构的内部设置预埋件或者预留孔洞。例如安装杠杆应变仪有时需要配合夹具的形式及标距大小而预埋螺栓或预留孔洞；用手持式应变仪来测量时，在试验结构的表面应埋设相应的测点标脚。

当使用电阻应变片对钢筋混凝土结构进行电测时，例如测钢筋应变，可在浇注混凝土前在钢筋上贴好应变片，作好应变片及引出导线的防潮、防水及防止机械损伤的保护处理；如果混凝土保护层不厚，则可在贴片部位预埋泡沫塑料块，在混凝土凝固后凿去露出钢筋，经过以上这些处理后再贴电阻片。由于贴片部位的钢筋需要事先打磨光滑，这对于采用螺纹钢的结构，应特别考虑预留部位尺寸，防止因预留部位狭小而给打磨工作带来困难。

对于一些专门测定混凝土内部应力的预埋测试元件、如钢筋计等的处理，均应按相应的技术要求，用专门就位装置定位，作好相应的防潮、防水、防机械损伤的处理后，安放在混凝土内的设计位置上，然后浇混凝土。

3. 模型设计与制造

当实际的结构尺寸很大或有其他因素影响，不能采用足尺的实际结构进行试验时，可以采用模型试验。结构的模型设计必须根据相似理论，按比例缩小。对于钢筋混凝土结构，由于非弹性状态工作的相似条件难以满足，因此选取的比例不宜太小。对一般较

复杂的桥梁结构要使模型与原型在各个物理量上都能满足相似条件是困难的，此时可根据试验目的，使主要试验内容能满足相似条件的要求。

模型结构可采用有机玻璃、硬质聚氯乙烯、铸铝、薄钢材等材料制作。但结构的破坏特征如破坏荷载往往不能模拟实际结构，只能用来验证结构设计假定与计算方法。钢筋混凝土桥可以用缩小比例的钢筋混凝土模型结构进行试验。目前使用最多的是小石子混凝土，此时结构的尺寸、钢筋尺寸、混凝土骨料的最大粒径都应按比例缩小、符合模型比，同时对试验加载量及量测手段，也要有特殊要求。

采用模型试验时，要特别注意试件的支承条件、支座的类型以及支座基础对模型试验的影响，如支撑刚度不足将影响模型测试结果。因此必要时对支座的结构安装以及测试部位都要进行设计与计算。另外在大型的模型试验中，还必须考虑模型结构的侧向稳定装置，以免加载时模型倾倒发生事故。

4. 试验结构或构件的生产制作：

试验结构的生产制作，要能正确地满足设计要求，做好施工记录，并且研究人员要能亲身参加到试验结构的施工中，亲自控制施工质量，贯彻试验意图，取得第一手材料，这对成果分析是必要的。

对预应力混凝土桥或构件，为了全面了解其工作状况或承载的性能以及预加力对整个试验结构受力的影响，需要经常测定预应力钢丝束的应力值、由于预加力作用而使试验结构产生的反拱值、受拉区的应力状况以及锚头的工作性能等，这些数据都是要从施工过程中开始积累的。

试验结构或构件制作完工后，还要根据实际加工尺寸、材料强度、变形能力和实际支承条件，按照试验的目的要求，对试验结构进行理论计算，要计算出试验结构在加载过程的各个阶段预期的内力值和变形值，提出初步的测试要求，试验结构所要达到的有关数据，如开裂荷载、破坏荷载、设计荷载或者在各级加载情况下的内力分布和挠度曲线、荷载—变形曲线、特别是各种测试数据的最大、最小值。这些理论计算值可以作为确定试验加载设备、选用仪表、规划和布设测点以及确定加、卸载级差等的依据。

三、加载方案设计

在桥梁结构的静力试验中，加载方案设计主要是确定最大加载量、加载设备和加载图示等。在加载方案设计中要说明荷载类型是集中荷载还是均布荷载，说明荷载布置特点以及加载程序（加载速度、持续时间、加、卸载的安排，反复循环次数等）。

四、观测设计

根据试验目的要求，观测设计应说明观测项目、测点布置、仪器型号、观测方法、观测时间及记录方式等。设计中要特别做到观测时间和记录方式同加载程序密切配合，使观测结果不仅能得到试验的数据还能检查和控制试验的进程。为了达到这个目的，在观测设计时，可按加载程序中的特征级别（开裂荷载、设计荷载等），计算出各测试项目的变化量附入观测设计中，以便在试验中随时与观测值进行比较，便于及时发现试验或量测中存在的问题，从而解决问题，保证试验顺利进行。

五、试验的准备工作

一般结构试验的准备工作量很大，结构试验方案中大部分工作都要在加载试验前落