

## 第一节 公路桥梁的特殊检查

特殊检查包括应急检查和专门检验，主要根据桥梁破损状况和性质，采用适当的仪器设备，以及现场勘探、试验等特殊手段和科学分析方法，查明桥梁病害原因、破损程度和承载能力，依据桥梁技术状况评定标准确定桥梁的技术状况，以便采取相应的加固、改善措施。

当桥梁遭受洪水、流冰、漂流物、船舶撞击、滑坡、地震、风灾和超重车辆自行通过等自然灾害或事故后，应立即对结构作详细检查（应急检查）。查明破损状况，采取应急措施，尽快恢复交通。其旨在查明缺损状况，以便采用应急措施，尽快恢复交通，通常由地（市）级公路管理机构的桥梁工程师主持。应急检查是一种扩大的日常检查，主要以视觉检查加经验判别。（同第一章所述，在此不再赘述）

专门检验是对需要进一步判明损坏原因、缺损程度或使用能力的桥梁，要求针对病害进行专门的现场试验检测、检算与分析等鉴定工作，以便进行有效的养护。专门检验通常由省级公路管理机构的总工程师或授权的桥梁检查工程师主持，委托公路桥梁检测中心或具有这种能力的科研设计单位、工程咨询单位，签订专门检查合同后实施。承担专门检验的单位及负责检查的工程师应按合同规定的内容及时间，完成检查任务，并作出检查报告。

一般在下列四种情况下桥梁需作特殊检查：

- 1、在地震、洪水、滑坡、超重车辆行驶和行船或重大漂浮物撞击之后；
- 2、决定对单一的桥梁进行改造、加固之前；
- 3、桥梁定期检查难以判明损坏原因、程度及整座桥的技术状况时；
- 4、桥梁技术状况为四类、五类者。

桥梁特殊检查的项目见表 3-1。

应急检查与专门检验的项目见下表

表 3-1

	洪水	滑坡	地震	超重车行驶(改造前)	撞击
应急检查	上部 栏杆损坏桥体位移和损坏落梁、排水设施失效	因桥台推出而压屈	落梁、支座损坏、错位		被撞构件及联系部位破坏、支座破坏
	下部 因冲刷而产生的沉陷和倾斜	桥台推出胸墙破坏	沉陷、倾斜位移、圪工破坏、抗震墩破坏	墩台裂缝、沉陷	墩台位移
专门检验	结构验算, 水文验算 桥梁静载、动载试验 用精密仪器对病害进行现场调查和实验室分析				

应急检查的目的在于查明缺损状况, 以便采用应急措施, 尽快恢复交通。专门检查的目的在于找出缺损的明确原因、程度和范围, 分析缺损所造成的后果以及潜在缺陷可能给结构带来的危险, 为进一步评定桥梁的耐久性和承载能力以及确定加固维修工作的实施提供依据。专门检查由专家依据一定的物理、化学或无损检测手段对桥梁一个或多个组成部分进行的全面察看、测强、测伤或测缺。

桥梁特殊检查可分为现场检查与实验室测试分析两部分。现场检查可分一般检查和详细检查两个阶段。一般检查象定期检查那样对结构及其附属设施的所有构件或部位进行彻底、视觉和系统的检查, 记录所有缺损的部位、范围和程度。一般检查的结果系是否进行详细检查的依据。详细检查主要是对一些重点部位或典型桥孔采用一些专门技术和检测设备进行深入而细致的检测。

专门检验的前期工作——实施专门检验之前, 承担单位负责检查的工程师应充分收集资料, 包括计算资料(计算所用的程序、方法及计算结果)、竣工图、材料试验报告、施工记录、历次桥梁定期检查和特殊检查报告, 以及历次维修资料等。地(市)级公路管理机构的桥梁检查工程师应予以必要协助。原资料如有不全

或疑问时可现场测绘构造尺寸，测试构件材料组成及性能，勘察水文地质情况。专门检验工作，由地(市)级公路管理机构的桥梁检查工程师负责协调监督。省公路管理机构的总工程师或授权的桥梁检查工程师负责组织有关技术人员对检查报告进行审定。

专门检验的内容大致上可分为如下两个方面：

1、结构材料缺损状况诊断：材料损坏程度检测，材料物理、化学、力学性能测试，缺损原因的分析判断等。

2、结构整体性能、功能状况鉴定：结构承载能力(强度、刚度和稳定性等)鉴定，桥梁抗洪能力的鉴定等。

材料缺损诊断可根据缺损的类型、位置和检测的要求，选择表面测量、无破损检测技术和半破损检测技术(如局部取试样等)等。从结构上钻取或截取的试样宜在有代表性构件的次要部位获取。检测与评定依照相应的试验标准进行。采用没有标准依据的检测技术，应事先通过模拟试验，制定适用的检测细则，保证检测结果具有一定的可靠性。

图 3-1 桥梁特殊检查流程图

桥梁特殊检查的一般流程如图 3-1 所示。

桥梁特殊检查报告应包括下列主要内容：

1、概述检查的一般情况，包括桥梁的基本情况、检查的组织、时间、背景和工作过程等；

2、目前桥梁技术状况的描述，包括现场调查、试验与检测项目及方法、检测数据与分析结果和桥梁技术状况评价等；

3、详细阐述检查部位的损坏程度及原因，并提出结构部件和总体的修理、加固或改善的建议方案。

## 第二节 公路桥梁材料性能检测

自从水泥问世以来，桥梁建设出现了一个飞跃的发展。钢筋水泥混凝土的价格低廉。成形成容易、经久耐用等优点，使之几乎取代了其他所有的桥梁建筑材料。但随着时间的推移，号称“永久结构”的钢筋水泥混凝土出现了一些原先人们所没有认识到的危害，如混凝土的老化、碳化以及钢筋的锈蚀等许多不可逆的物理、化学变化，使钢筋混凝土的寿命大大地打了折扣。

公路桥梁材料性能检测是对其结构及部件的材料质量所存在的缺损状况进行详细检测、试验、判断的过程。是对桥梁的专门检验，属于桥梁诊断的范畴。根据缺损的类型、位置和检测要求可选择①表面测量②无破损检测③半破损检测等

公路桥梁材料性能检测主要内容见图 3-2：

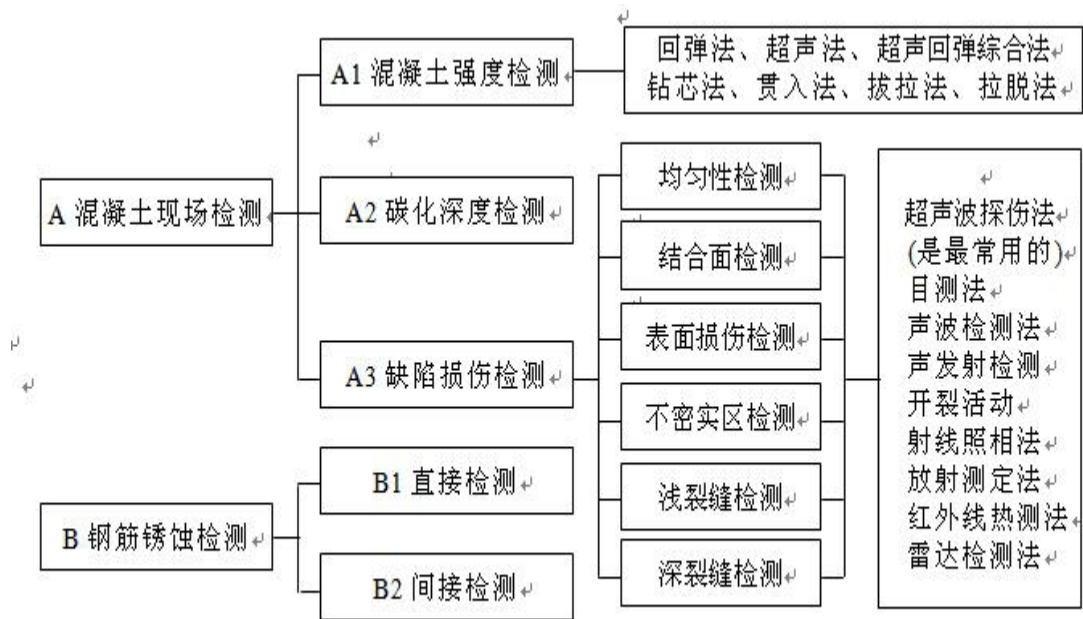


图 3-2 旧桥材料性能检测内容

## 一、混凝土强度的现场检测

检测、评定没有或缺乏技术资料的桥梁时，需直接测定实桥结构材料的机械力学性能。即使技术资料较为完整，为了检验结构材料的实际情况是否与资料相符，也需测定桥梁材料的机械力学性能。因此，混凝土强度的现场检测也很重要。

混凝土强度的现场检测方法目前主要有：非破损检测法和半（微）破损检测法。非破损检测法主要有回弹法、超声波法、超声-回弹综合法等；半（微）破损检测法主要有拔出法、钻芯法、拔脱法、射击法等；其中最常用的方法有回弹法、钻芯法、超声-回弹综合法、拔出法等。

### （一）钻芯法检测混凝土强度

钻芯法检测混凝土强度是指利用专用设备，从混凝土结构中钻取芯样，以测定普通混凝土强度的方法。这是一种直观准确的方法，其使用原则是：

- 1、对试块抗压强度的测试法具有怀疑时；
- 2、因故发生混凝土质量问题；
- 3、混凝土受到损害；
- 4、需经检测很多年使用的结构物如旧桥。

钻芯取样检测混凝土强度应注意以下几个问题：

- 1、有些情况下不宜采用回弹、超声等非破损方法检测混凝土强度时，可采用钻芯取样法。如混凝土内外质量不一致；混凝土变化可腐蚀或火灾；混凝土在硬化过程中冻伤等。

2、结合非破损检测技术，通过钻取少量芯样，以提高非破损检测的测试精度。如非破损测强曲线技术条件差异较大，又如旧混凝土结构等。

3、对于强度等级小于 C10 的混凝土，钻芯过程易破坏砂浆与骨料的粘结力，测试结果不准，不易采用钻芯法。

4、对于正在工作中的结构，特别是经使用多年的旧结构应尽量采用非破损检测技术，必须采用钻心法时，对取样位置、取样数量等应严格控制。

5、钻取芯样后的构件应及时对孔洞进行修补，修补可采用树脂完成微膨胀细骨料混凝土。

钻芯取样的设备主要包括：

- 1、钻取芯样的钻芯机；
- 2、加工芯样或符合试验尺寸要求的锯切机；
- 3、加工芯样消面的研磨机；
- 4、探测钢筋位置的磁感仪、雷达等。

芯样钻取应符合以下要求：

1、芯样钻取位置应尽量选在结构或构件管径较小的部位；选取混凝土强度有代表性的部位；取芯位置应尽量避开钢筋、管线；用钻芯法与非破损法综合测定强度时，应与非破损法取同一测区。

2、按单个构件检测时，每个构件的芯样数不应少于 3 个，较小构件可取 2 个。

3、芯样直径不宜小于骨料最大粒径的 3 倍，并不得小于骨料最大粒径的 2 倍。芯样直径一般为 100mm 或 150mm，芯样的高度直径比应在 1~2 的范围内。

影响芯样强度的因素很多，主要影响因素如下：

1、芯样尺寸，特别是芯样高度对其抗压强度影响较大。一般来说芯样高度与直径均为 100mm 时与 150mm 立方体试件强度相当。

2、芯样含筋率对其强度有一定影响。有螺纹筋的芯样会提高强度，有光圆钢筋的芯样会降低强度，故芯样钻取时应尽可能地避开钢筋。

3、芯样的含水量对强度影响明显。一般而言，含水量多则强度低故按自然干燥状态试验时，芯样应在室内自然干燥 3d；按潮湿状态试验时，芯样应在水中泡 40~48h。

芯样强度的换算值系指芯样将实测强度换算成 150mm，立方体试件的抗压强度值。换算值按下式计算：

- 式中：——试件混凝土强度换算值（MPa），精确至 0.1；  
 ——试验时施加的最大压力（N）；  
 ——芯样平均直径（mm）；  
 ——高径比换算系数，按表 3-2 采用。

强度换算系数

表 3-2

高径比 (h/d)	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
系数	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
	0	4	7	0	3	5	7	9	1	2	4

强度和直径均为 100mm 或 150mm 的芯样试验值可直接作为其强度换算值。单个构件或其层部区域，芯样强度换算值中的最小值为其代表值。

## （二）回弹法现场检测混凝土强度

回弹法主要测试仪器是回弹仪（机械式无损检测仪器）。

因混凝土的抗压强度与其表面硬度之间存在一定的关系，而回弹仪的弹击锤被一定的弹力打击在混凝土表面上；其回弹高度（即回弹值）与混凝土表面硬度有一定的比例关系。因此以回弹值反映混凝土表面硬度，从而推出混凝土的抗压强度。

回弹法在我国的使已用 40 余年的历史。国外使用回弹法的精度不高，有的只能定性判断混凝土的质量，但回弹法在我国应用相当广泛，这不仅是由于回弹法设备简单、操作方便、测试迅速，更是我国已经解决了回弹法使用精度不高和不能推广的关键问题。回弹值影响因素（操作方法、仪器性能、气候条件等）较多，使用不当会产生较大的误差。故须正确掌握操作方法，回弹法检测具体步骤如下：

### 1、测区、测点的选择

单个检测时，应在每个构件上均匀布置测区——对一个方向的尺寸不小于 4.5，另一个方向的尺寸不小于 0.3m 的构件，测区数不应少于 10 个；当不满足上述条件时，测区数不应少于 5 个。

批量检测时，抽检数量不得少于同批构件总数的 30%，且不少于 10 件，每个构件测区数量不应少于 10 个（抽检构件应具一定代表性）。

测区应选在使回弹仪处于水平方向检测混凝土浇筑侧面，当不满足这一要求时，可使回弹仪处于非水平方向的混凝土浇筑侧面、表面、底面。

测区表面应清洁、平整、干燥，不应有接缝、饰面层、粉刷层、油垢、蜂窝、麻面等（否则所测回弹值会偏低），必要时可用砂轮、粗砂纸等清除杂物，磨平不平整处，并擦去残留粉尘、灰屑。

相邻两测区的间距应控制在 2m 以内，测区离构件边缘的距离不宜大于 0.5m。

测区宜在构件的可测表面上均匀分布，并直避开位于混凝土内保护层附近设置的钢筋和预埋铁件；

测区宜在构件的两相对表面上有两个基本对称的测试面（测面），如不能满足这一要求时，一个测区允许只有一个测面；

测区的面积不宜大于  $0.04\text{m}^2$ ；

测点宜在测区范围内均匀分布，相邻两测点的间距一般不小于 20mm。测点距构件边缘或外露钢筋、铁件的距离一般不小于 30mm。测点不应在气孔和外露石子上。

同一测点只能弹击一次，每个测区应记取 16 个回弹值。

## 2、测区平均回弹值的计算

①当回弹仪水平方向测试混凝土浇灌方向的侧面时，应从测区两个相对测试面的 16 个回弹值中，分别去除 3 个最大值与最小值，剩余的 10 个回弹值按下式计算：

## 3、平均碳化深度的计算

混凝土碳化深度会直接影响混凝土表面硬度，故应考虑混凝土碳化深度对混凝土强度的影响。

回弹法测量完成后，选取有代表性的位置测量碳化深度，测点不应少于构件测区数量的 30%，且不应少于 3 次，当出现测区碳化深度值极差大于 2.0mm 时，预示混凝土强度不均匀，要求要求每一测区测量碳化深度。测量碳化深度值时，可用钻头、凿子等合适的工具在测区表面凿成直径约 15mm 的孔洞，其深度大于混凝土的碳化深度（一般取为保护层厚度）。然后除净孔洞中的粉末和碎屑（不得用水冲洗），立即用浓度为 1% 酚酞酒精溶液滴在孔洞内壁的边缘处，再用深度测量工具测量已碳化与未碳化混凝土交界面（颜色变化处）到混凝土土表面的垂直距离多次，取其平均值。该距离即为混凝土的碳化深度值。每次读数精确至 0.5mm。

在测区中选取  $n$  个碳化深度测点，得到相应碳化深度测量值，即可进行平均碳化深度值的计算，公式如下：

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (3-5)$$

式中  $d_m$ ——测区混凝土的平均碳化深度值 (mm), 计算至 0.5mm;

$d_i$ ——第  $i$  个测点的混凝土碳化深度测量值 (mm);

$n$ ——测区的碳化深度测点数。

根据测区混凝土碳化深度值依附录-1 查混凝土强度。

#### 4、测区混凝土强度值计算

构件第  $i$  个测区混凝土强度换算值  $f_{cu,i}^c$  可由平均回弹值  $R_m$  和平均碳化深度值  $d_m$  查测区混凝土强度换算表 (JGJ/T23-2001 的附录 A) 可得。

构件混凝土强度平均值  $m_{f_{cu}^c}$  依据下式计算:

$$m_{f_{cu}^c} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c}{n} \quad (3-6)$$

式中  $m_{f_{cu}^c}$ ——构件混凝土强度平均值(MPa), 精确至 0.1MPa。

$n$ ——单个检测时, 为构件上测区的总和; 抽样检测时, 为各抽检构件测区数之和。

标准差  $s_{f_{cu}^c}$  按下式计算:

$$s_{f_{cu}^c} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^c)^2 - n(m_{f_{cu}^c})^2}{n-1}} \quad (3-7)$$

结构或者构件的混凝土强度推定值  $f_{cu,e}$  应按下列公式确定:

当结构或者构件测区数少于 10 个时:

$$f_{cu,e} = f_{cu,min}^c$$

式中  $f_{cu,min}^c$ ——构件中最小的测区混凝土强度换算值。

当结构或者构件测区强度值中出现小于 10.0MPa 时:

$$f_{cu,e} = 10.0\text{MPa}$$

当结构或者构件测区数不少于 10 个或者按批量检测时:

$$f_{cu,e} = m_{f_{cu}^c} - 1.645 s_{f_{cu}^c}$$

对于按批量检测的构件, 当标准差出现下列其中之一的情况时, 则该批构件全部按单个构件检测: 该批构件混凝土强度平均值小于 25MPa 时,  $s_{f_{cu}^c} > 4.5\text{MPa}$ ;

该批构件混凝土强度平均值不小于 25MPa 时,  $s_{f_{cu}^c} > 5.5\text{MPa}$ 。

## 5、测强曲线



在进行测区强度换算时，要用到测强曲线。测强曲线有统一测强曲线、地区测强曲线和专业测强曲线。统一测强曲线是由全国代表性的材料、成型养护工艺配制的混凝土试件，通过试验所建立的回弹代表值与测区混凝土强度的关系曲线。统一测强曲线已经使用了近 20 年，效果较好，《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T 23-2001）中的测区混凝土强度换算表是据统一曲线绘制的，抗压强度适用范围为 10~60MPa，详见附录—1。地区测强曲线已通过本地区常用的材料、成型养护工艺建立的曲线。专用测强曲线是由与结构或构件混凝土相同的材料、成型养护工艺所建立的曲线。强度换算时应按专用测强曲线，地区测强曲线，统一测强曲线的次序选用。

当检测条件与测强曲线的适用条件有较大差异时，可采用同条件试件或钻取混凝土芯样进行修正，试件或芯样数量不少于 6 个。钻取芯样时每个部位应钻取一个芯样，计算时，测区混凝土强度换算值应乘以修正系数。修正系数按下列公式进行计算：

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i} / f_{cu,i}^c \quad (3-8)$$

或

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cor,i} / f_{cu,i}^c \quad (3-9)$$

式中： $\eta$ ——修正系数，精确至 0.01；

$f_{cu,i}$ ——第  $i$  个 150mm 立方体混凝土试件抗压强度值，精确至 0.1MPa；

$f_{cor,i}$ ——第  $i$  个混凝土芯样试件抗压强度值，精确至 0.1MPa；

$f_{cu,i}^c$ ——对应于第  $i$  个试件或芯样部位回弹值和碳化深度值的混凝土强度换算值。

### （三）超声回弹综合法检测混凝土强度

无损检测，还有一种常用的方法是用超声波的方法来检测混凝土强度，当声波在混凝土中传波时，其纵波波速的平方与混凝土的弹模成正比，与密度成反比，而混凝土的强度又与其密度有关，一般言，声波在混凝土传波速度越快，其强度就越高。正是利用声速与混凝土强度的关系检测混凝土强度的方法即为超声法。

单独采用回弹法和超声法均有其缺陷。对回弹法来说，如果检测条件与测强曲线的适用条件差异较大，且又未能以钻芯取样法时，此时精度就不高。采用超声法时，其精度也在很大程度上取决于检测条件与测强曲线所适用条件之间的差异。所以工程中很少单独采用超声法来测混凝土强度。

超声回弹综合法是以超声波穿透试件内部的声速值和试件表面硬度的回弹值来综合检测结构混凝土的抗压强度的方法。这一方法是，20世纪60年代研究开发出的一种无损检测法，与单一方法比较，其精度高，适应范围广，在我国建工、公路、铁路系统已广泛应用。

综合法中超声波检测仪合格工作频率为10~500kHz的模拟式或数字式低频超声仪。换转器的工作频率一般为50~100kHz，常用的换转器具有厚度振动方式和径向振动方式两类。

换转器的布置方式以测试位置的不同可有三种方法：对测法；角测法；平侧法。换转器布置如图3-4所示。

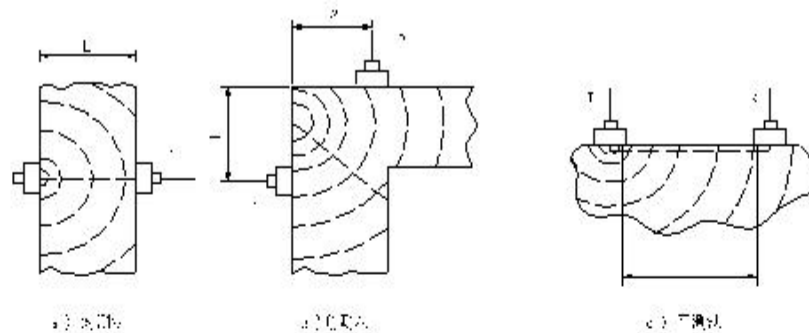


图 3-4 换能器探头的布置方法

综合法的测区及其尺寸等相关要求与回弹法基本相同，但应注意以下几点：

- 1、采用平测法，测区宜为400mm×400mm；
- 2、对于每一测区，应先回弹测试，后超声测试；
- 3、计算混凝土强度时，非同一测区内的回弹值和声速值不得混用。

在进行超声测试时，声速代表值 $V_a$ 应根据测区中3个测点，按下式计算的声

速值

$$V = \frac{\lambda P}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{t_i - t_0}$$

式中： $V$ ——修正后的测区声速代表值（km/s）；

$P$ ——测试面声速修正系数；

$\lambda$ ——测试方法修正系数；

$l_i$ ——第*i*个测点的超声测距（mm）；

$t_i$ ——第  $i$  个测点的声时读数 ( $\mu\text{s}$ );

$t_0$ ——声时初读数 ( $\mu\text{s}$ ).

对测或斜测时,  $\lambda=1$ 。平测时, 宜采用同一构件的对测声速  $V_d$  与平测声速  $V_p$  之比求得修正系数  $\lambda(\lambda=V_d/V_p)$ ; 当被测结构或构件不能进行对测与平测对比时, 宜选取代表性的部位, 以测距  $l=200\sim 500\text{mm}$ , 以  $50\text{mm}$  为一级, 逐点测读相应的声时值  $t$ , 用回归法求出直线方程  $l=a+bt$ , 以回归系数  $b$  代替  $V_d$ 。

在混凝土浇筑顶面或底面对测或斜测时,  $\beta=1.034$ ; 顶面平测时,  $\beta=1.05$ , 底面平测时,  $\beta=0.95$ 。

按前一节中回弹法求出回弹代表值  $R_{ai}$  和声速代表值  $V_{ai}$  后, 应优先采用专用测强曲线或地区测强曲线, 进行强度换算。

当无专用和地区测强曲线时, 可按《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02: 2005) 规定的方法进行验证后, 按《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》的统一测区混凝土抗压强度换算表换算, 也可按下式公式进行强度换算:

1、当粗骨料为卵石时

$$f_{cu,i}^c = 0.0056V_{ai}^{1.439} R_{ai}^{1.769} \quad (3-10)$$

2、当粗骨料为碎石时

$$f_{cu,i}^c = 0.0162V_{ai}^{1.626} R_{ai}^{1.410} \quad (3-11)$$

式中:  $f_{cu,i}^c$ ——第  $i$  个测区混凝土抗压强度换算值 (MPa), 精确至  $0.1\text{MPa}$ 。

测区混凝土强度的计算、修正及评定基本同回弹法, 所不同的是, 当一批构件的抗压强度平均值  $M_{f_{cu}} > 50.0\text{MPa}$  时, 标准差  $S_{f_{cu}} > 6.5\text{MPa}$ 。同时采用钻芯取样

修正时, 综合法要求芯样数量可比回弹法少 2 个。

#### (四) 拔出法检测混凝土强度

拔出法属于微破损检测范畴。它具有精度高, 破损程度小、使用方便适用范围广等特点。这一方法就是在硬化混凝土表面钻孔、磨槽、嵌入锚固件, 使用拔出仪进行拔出试验, 测定极限拔出力, 并根据预先建立的拔出力与混凝土强度之间的相关关系检测混凝土强度。拔出法有两种, 其一是在浇筑混凝土时预先埋入锚固件, 待混凝土硬化后进行拔出试验, 称为预埋拔出法; 其二是在硬化的混凝土构件上嵌入锚固件后进行拔出试验。试验装置见图 3-5。图中三点式拔出试验装置适用于粗骨料最大粒径不大于  $60\text{mm}$  的混凝土, 圆环式试验装置适用于粗骨料最大粒径不大于  $40\text{mm}$  的混凝土。

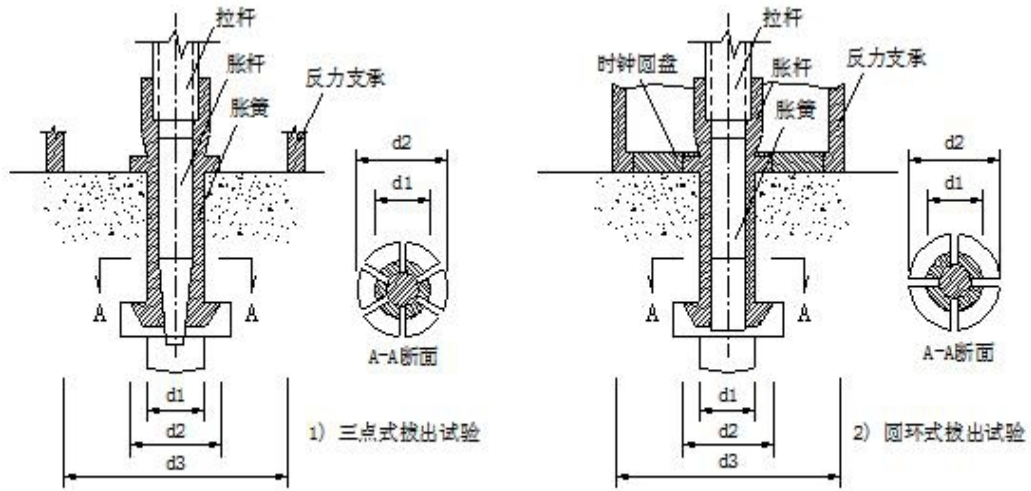


图 3-5 拔出法检测混凝土强度装置简图

## 1、拔出法测试要求

单个构件检测时，应在构件上均匀布置 3 个测点。当 3 个拔出力中的最大拔出力和最小拔出力与中间值之差均小于中间值的 15% 时，布置 3 个测点即可；当最大拔出力或最小拔出力与中间值之差大于中间值的 15%（包括两者均大于中间值的 15%）时，应在最小拔出力测点附近再加测 2 个测点。

当同批构件按批抽样检测时，抽检数量应不少于同批构件总数的 30%，且不少于 10 件，每个构件不应少于 3 个测点。

测点宜布置在构件混凝土成型的侧面，如不能满足该要求，可布置在混凝土成型的表面或底面。构件受力较大及薄弱部位应布置测点相邻测点不应小于 10h，测点距构件边缘的距离不应小于 4h。

测点应避开接缝、蜂窝、麻面部位和混凝土表层的钢筋、预埋件等。

测试面应平整、清洁、干燥，对饰面层、浮浆等应清除，必要时进行磨平处理。

结构或构件的测点应标有编号，并应描绘测点布置的示意图。

在钻孔过程中，钻头应始终与混凝土表面保持垂直，垂直度偏差不应大 3°。

在混凝土孔壁磨环形槽时，磨槽机的定位圆盘应始终紧靠混凝土表面回转，磨出的环形槽形状应规整。

成孔尺寸应满足下列要求：

钻孔直径  $d_1$  应比规定值大 0.1mm，且不宜大于 1.0mm；

钻孔深度  $h_1$  应比锚固深度  $h$  深 20~30mm；

锚固深度  $h$  应符合规定，允许误差为 0.8mm；

环形槽深度  $c$  应为 3.6~4.5 mm。

## 2、混凝土强度换算及推定

混凝土强度换算值根据汇总后的回归方程式 (3-12) 计算

$$f_{cu}^c = AF + B \quad (3-12)$$

$f_{cu}^c$ ——混凝土强度换算值, MPa, 精确至 0.1MPa;

$F$ ——拔出力, kN, 精确至 0.1kN;

$A$ 、 $B$ ——测强公式回归系数。

当被测结构所用混凝土的材料与制定测强曲线所用材料有较大差异时, 可在被测结构上钻取混凝土芯样, 根据芯样强度对混凝土强度换算值进行修正。芯样数量应不少于 3 个, 在每个钻取芯样附近 3 个测点的拔出试验, 取 3 个拔出力的平均值代入式 3-13 计算每个芯样对应的混凝土强度换算值。修正系数如下式:

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cor,i} / f_{cu,i}^c \quad (3-13)$$

式中  $\eta$ ——修正系数, 精确至小数点后两位;

$f_{cor,i}$ ——第  $i$  个混凝土芯样试件抗压强度值, MPa, 精确至 0.1 MPa;

$f_{cu,i}^c$ ——对应于第  $i$  个混凝土芯样试件的 3 个拔出力平均值的混凝土强度换算值, MPa, 精确至 0.1 MPa;

$n$ ——芯样试件数。

单个构件的拔出力计算值按下列规定取值: 当构件 3 个拔出力中的最大或最小拔出力与中间值之差均小于中间值的 15% 时, 取小值作为该构件拔出力计算值; 当加测时, 加测的 2 个拔出力值和最小拔出力值一起取平均值, 再与前一次的拔出力中间值比较, 取小值作为该构件拔出力计算值。将单个构件拔出力计算值代入式 (3-13) 计算强度换算值 (或者用  $\eta$  乘以强度换算值) 作为单个构件混凝土强度推定值, 即

$$f_{cu,e} = f_{cu}^c \quad (3-14)$$

将同批构件抽样检测的每个拔出力按式 3-13 计算强度换算值 (或用修正系数  $\eta$  乘以强度换算值)。

混凝土强度的推定值  $f_{cu,e}$  按下列公式计算:

$$f_{cu,e1} = m_{f_{cu}^c} - 1.645s_{f_{cu}^c} \quad (3-15)$$

$$f_{cu,e2} = m_{f_{cu, \min}^c} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_{cu, \min, j}^c \quad (3-16)$$

$$m_{f_{cu}}^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c \quad (3-17)^{\downarrow}$$

$$s_{f_{cu}}^c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^c)^2 - n(m_{f_{cu}}^c)^2}{n-1}} \quad (3-18)^{\downarrow}$$

式中  $m_{f_{cu}}^c$  ——一批抽检构件混凝土强度换算值的平均值，精确至 0.1 MPa； $\downarrow$

$m_{f_{cu,\min}}^c$  ——该批构件中最小的测区混凝土强度换算值的平均值，精确至 0.1 MPa； $\downarrow$

$f_{cu,\min,j}^c$  ——第  $j$  个构件中的最小测区混凝土强度换算值，精确至 0.1 MPa； $\downarrow$

$f_{cu,i}^c$  ——对应于第  $i$  个测点的混凝土强度换算值； $\downarrow$

$s_{f_{cu}}^c$  ——一批抽检构件混凝土强度换算值的标准差，精确至 0.1 MPa； $\downarrow$

$m$  ——一批抽检的构件数； $\downarrow$

$n$  ——一批抽检构件的测点总数。 $\downarrow$

取式 (3-15)、(3-16) 中的较大值作为该批构件混凝土强度的推定值。 $\downarrow$

对于按批量检测的构件，当全部测点的强度标准差出现下列其中之一的情况时，则该批构件全部按单个构件检测： $\downarrow$

该批构件混凝土强度平均值小于 25MPa 时， $s_{f_{cu}}^c > 4.5\text{MPa}$ ； $\downarrow$

该批构件混凝土强度平均值不小于 25MPa 时， $s_{f_{cu}}^c > 5.5\text{MPa}$ 。 $\downarrow$

## 二、混凝土缺陷损伤的检测

桥梁的施工、使用过程中，往往会产生一些缺陷和损伤。混凝土构件中常见的缺损有裂缝、碎裂、剥落、层离、蜂窝、空洞、腐蚀和钢筋锈蚀等。钢构件中常见的的缺损主要有锈蚀、裂缝（包括由于应力集中和疲劳等引起的裂缝）、机械损伤、局部变形、焊缝缺陷和防护层损坏等。

这些缺陷和损伤往往会严重影响结构物的承载能力和耐久性，因此是桥梁养护工作中必须检测的项目。形成这些缺陷和损伤的主要原因：因施工不当造成内部孔洞、不密实区、蜂窝及保护层不足、钢筋外露等；因混凝土非外力作用裂缝；外力作用形成裂缝；因长期腐蚀或冻融造成构件由表及里的层状疏松。

混凝土探伤以无损检测的手段，确定混凝土内部缺陷的存在、大小、位置和性质。可用于探伤的无损检测手段有：超声脉冲法；射线法；声波检测法；射线照相法；红外线检测法；雷达检测法。其中超声法是目前使用最多、最有效的探伤方法（金属探伤也利用超声波在内部缺陷界面上的反射特性判断内部缺陷状态）。

超声探伤法常用来探查钢材、焊缝和混凝土中存在的裂缝、空洞、夹渣及火灾损伤等。由于混凝土是非匀质材料，必须用方向性弱的低频脉冲（20~150KHZ），且传递距离不大于 80cm；平行于脉冲方向的钢筋对探测结果影响很大，故配筋多的混凝土构件测试方法会有所限制；窄的裂缝会通过接触点或钢筋传递脉冲。所以，超声探伤法最好用来探测较大的空洞和裂缝。

混凝土超声探伤的依据有：因低频超声在混凝土中遇到缺陷时发生绕射，故可按声时、声程的变化，判别和计算缺陷的大小；因超声波在缺陷界面上产生反射，故可按到达接收探头时能量显著衰减的现象判断缺陷的存在及大小；因超声脉冲各频率成分在遇到缺陷时衰减程度不同，故可按接收频率明显降低，或接收波频谱产生差异来判别内部缺陷；因超声波在缺陷处波形转换和叠加，故可按其造成的接收波形畸变现象判别缺陷。

超声法混凝土缺陷检测主要有以下几方面的内容：混凝土均匀性检测；混凝土结合面质量检测；混凝土表面损伤层检测；混凝土不密实区和空洞检测；裂缝检测。这里只介绍一些常用的检测方法，详细内容可参照超声法检测混凝土缺陷技术规程（CECS 21:2000）。

## 1、混凝土均匀性检测

混凝土的不均匀性可引起脉冲速度的差别，这种差别和质量差别相关。脉冲速度的测量可以用来研究混凝土的均匀性，为达此目的，应选定足够均匀地布置该混凝土结构的若干测点，测点间距一般为 200~500mm，测点布置时应避开与声波传播方向一致的钢筋（这种平行方向的钢筋对探测结果影响很大）。

各测点的声速值按下式计算：

各测点的声速值按下式计算：

$$v_i = \frac{L_i}{t_i} \quad (3-19)$$

式中：  $v_i$  ——第  $i$  点混凝土声速值， km/s；

$L_i$  ——第  $i$  点声径长度或称测距值， mm；

$t_i$  ——第  $i$  点混凝土的声时值，  $\mu s$ 。

各测点混凝土的声速平均值  $\bar{v}$  和标准差  $S_v$  及离差系数  $C_v$  按下式计算：

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3-20)$$

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 - n\bar{v}^2}{n-1}} \quad (3-21)$$

$$C_v = \frac{S_v}{\bar{v}} \quad (3-22)$$

式中：  $\bar{v}$  ——声速平均值， km/s；

$n$  ——测点数；

$v_i$  ——第  $i$  点的声速值， km/s；

$S_v$  ——声速标准差；

$C_v$  ——声速离差系数。

根据  $S_v$ 、 $C_v$ ，比较相同测距的同类结构或各部位混凝土均匀性的优劣。

## 2、混凝土结合面质量检测

测试前应确定结合面的位置及走向，以正确确定需测部位及布置测点；结构的被测部位应具有使声波垂直或斜穿结合面的一对平行测试面；布置测点应避开平行声波传播方向的主钢筋或预埋铁件。测点也可采用斜测法布置测点（如图 3-6）测点应使测试范围覆盖全部结合面或有怀疑的部位。各对 T、R 换能器连线的倾斜角及测距应相等。测点的间距视结构尺寸和结合面外观质量情况而定，可控制在 100~300mm。在测出各测点的声时、波幅和频率值后，对某一测区各测点声时、波幅和频率值分别进行统计和异常值判断。当通过结合面的某些测点的数据异常，并可排除其它因素影响时，可判定混凝土结合面在该处结合不良。



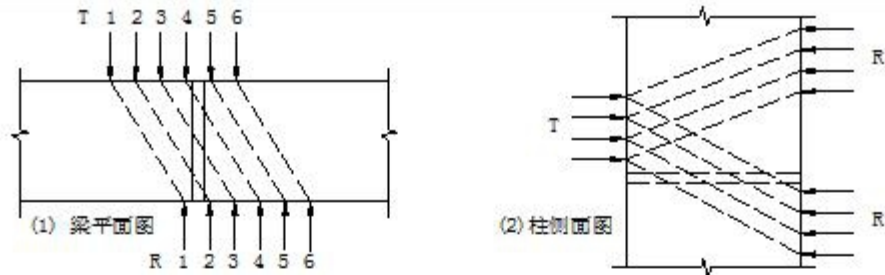


图2-3-7 检测结合面的换能器布置

### 3、混凝土表面损伤层检测

根据结构的损伤情况和外观质量选取有代表性的部位布置测区；结构被测表面应平整并处于自然干燥状态，且无接缝和饰面层；测点布置时应避免 R、T 换能器的连线方向与附近主钢筋的轴线平行。

表面损伤层检测应选用低频的厚度振动式换能器。测试时 T 换能器应耦合保持不动，然后将 R 换能器依次耦合在

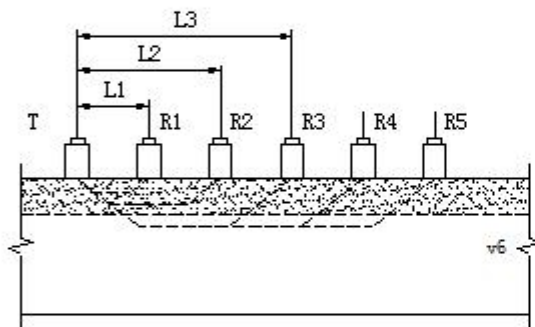


图 3-7 结合面斜测法换能器布置图

测点 1、2、3、……位置上，如图 3-7，读取相应的声时值  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ……，并测量每次 R、T 换能器之间的距离  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ……。R 换能器每次移动的距离不宜大于 100mm，每一测区的测点数不得少于 5 个。当结构的损伤层厚度不均匀时，应适当增加测区数。

以各测点的声时值  $t_i$  与相应测距值  $L_i$ ；绘制“声时—测距”坐标图，如图 3-8，可

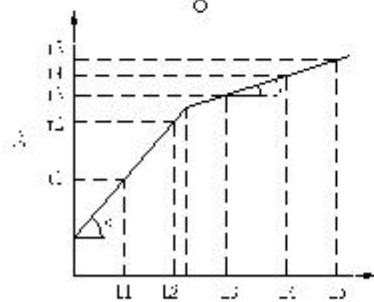


图 3-8 声时—测距“声—时”图

得到声速改变所形成的拐点，并按下式算出损伤混凝土的声速  $v_d$  和未损伤混凝土的声速  $v_n$ 。

$$v_d = ctg \alpha = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \quad (3-23)$$

$$v_n = ctg \beta = \frac{L_4 - L_3}{t_4 - t_3} \quad (3-24)$$

### 4、裂缝检测

超声法除了可用来检测混凝土强度外，还可用来检测混凝土病害，如混凝土的空洞、混凝土损伤等缺陷，也可用来探测钢筋钢束位置。由于裂缝是常见的病害，前述的方法只能检测裂缝宽度而不能测其深度，而超声法就可以解决这一问

题。

当结构的裂缝部位只有一个可测表面且估计的裂缝深度又不大于 500mm 时，可采用单面平测法。测量时应在裂缝处以不同的测距，按跨缝和不跨缝布置测点（避开钢筋），其步骤为：

1) 不跨缝声时测量：如图 3-10 所示，将发射声波的换能器 T 和接收超声波的换能器 R 置于裂缝附近图例，以 T、R 内边缘间距 ( $l'$ ) 从 100mm 开始，以 50mm 为一级递增，分别读取声时值 ( $t_i$ )，绘制时距坐标图 (如图 3-9) 或用回归分析法求出声时与测距之间的回归方程  $l_i = a + bt_i$ 。声波实际传播距离  $l_i$  为：

$$l_i = l' + |a|$$

式中： $l_i$ ——第  $i$  点的超声波实际传播距离 (mm)；

$l'$ ——T、R 内缘间距 (mm)；

$a$ ——回归方程的常数项；

则回归系数  $b$  即为不跨缝平测时混凝土的声速值  $V(km/s)$ 。

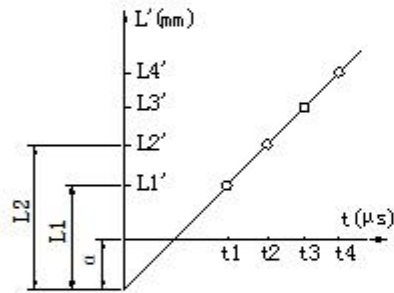


图 3-9 浅裂缝平测时距图

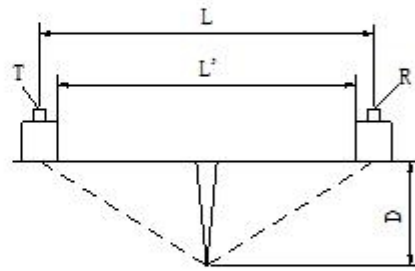


图 3-10 平测法跨缝测试图

2) 跨缝声时测量：如图 3-10 所示，属 T、R 换能器分别置于裂缝两侧， $l'$  从 100mm 起，以 50mm 为级数增加，分别读取声时值  $t_i^0$ ，同时观察管波相位的变化。

根据如图 3-10 所示的几何关系，裂缝深度依下式计算：

$$h_{ci} = l_i / 2 \cdot \sqrt{(t_i^0 V / t_i)^2 - 1} \quad (3-25)$$

$$m_{kz} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n h_{ci} \quad (3-26)$$

式中： $l_i$ ——不跨缝平测时第  $i$  点的超声波实际传播距离 (mm)；

$h_{ci}$ ——第  $i$  点计算的裂缝深度值 (mm)；

$t_i^0$ ——第  $i$  点跨缝平测声时值 ( $\mu\text{s}$ );

$m_{hc}$ ——各测点计算裂缝深度的平均值 (mm);

$n$  ——测点数。

$n$  实验证明, 跨缝测量时, 管波反相与裂缝深度有关, 当在某测距发现管波反相时, 可用该测距及两个相邻测距计算  $h_{ci}$  值, 取此三点  $h_{ci}$  的平均值为裂缝深度值  $h_c$ 。

有时候由于管钢筋或裂缝中局部连通影响而难以发现反相管波, 所以不同的测距计算  $h_{ci}$  和  $m_{hc}$ , 当  $l_i < m_{hc}$  和  $l_i < 3m_{hc}$  时, 应剔除该数据。

当结构的裂缝部位具有两个相互平行的测试表面时, 可采用双面穿透斜测法。测点布置如图 3-11 所示, 将 T、R 换能器分别置于两个测试表面对应测点 1、2、

3……的位置读取相应声时值  $t_i$ 、波幅值  $A_i$  及主频  $f_i$ 。

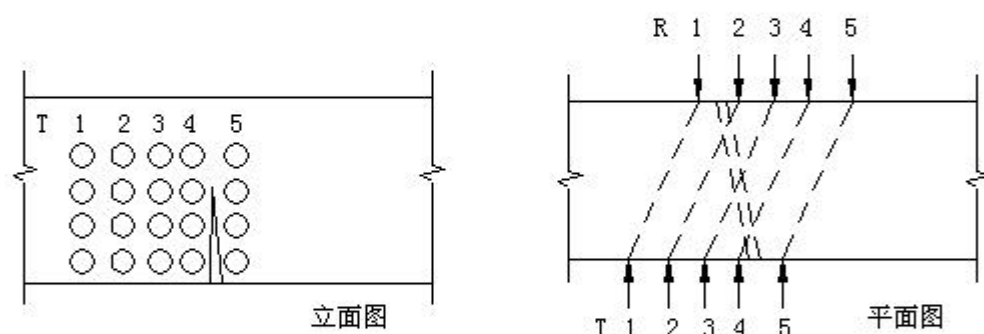


图 3-11 裂缝斜测法示意

当 T、R 换能器的连线通过裂缝, 根据波幅、声时和主频突变可以评定裂缝深度以及是否在所处断面内贯通。

钻孔对测法适用于大体积混凝土, 预计深度在 500mm 以上的裂缝检测。

被检测混凝土应满足: 允许在裂缝两旁钻测试孔, 裂缝中不应有水或泥浆。

被测结构上钻取的测试孔应满足下列要求:

- 孔径应至少比裂缝预计深度深 700mm, 经测试如浅于裂缝深度, 则应加深钻孔。
- 对应的两个测试孔, 必须始终位于裂缝两侧, 其轴线应保持平行。
- 两个对应测试孔的间距宜为 2000mm, 同一结构的各对应测孔间距应相同。
- 若条件允许, 最好在裂缝一侧多钻一个较浅的辅测孔, 测试无缝混凝土的

声学参数，供对比判别之用（图 3-12A）。↵

裂缝检测应选用频率为 20~60kHz 的径向振动式换能器，并在其接线上作出等距离标志（一般间隔 100~400mm）。测试前先向测试孔中注满清水，然后将 R、T 换能器分别置于裂缝两侧的对立孔中，以相同高程等间距从上至下同步移动，逐点读取声时值、波幅值和换能器所处的深度（图 3-12B）。↵

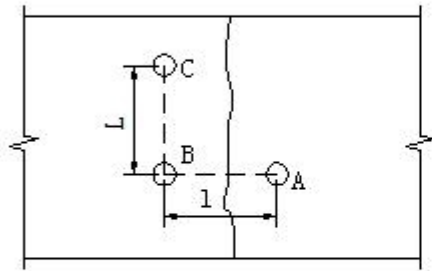


图 3-12A 深裂缝钻孔检测辅助孔示意↵

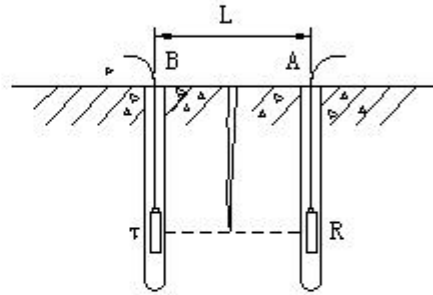


图 3-12B 深裂缝钻孔检测立面示意↵

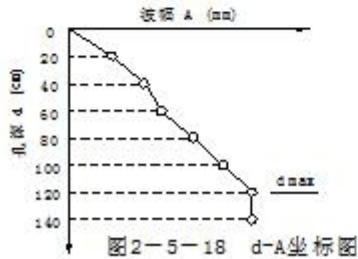


图 3-13 d-A 坐标图↵

以换能器所处深度  $d$  与对应的波幅  $A$  绘制  $d-A$  坐标图(如图 3-13)。从图中亦可看出：随着换能器的下移，波幅逐渐增大，当换能器下移至某一位置后，波幅达到最大值继而稳定，该位置所对应的深度  $d_{max}$  即为裂缝深度  $h_c$ 。↵

### 三、钢筋锈蚀的直（间）接检测

钢筋混凝土构件中钢筋的锈蚀往往与混凝土的病害相互联系。一方面，混凝土的密实度、渗水性、含水量、含氯盐量、碳化深度、保护层厚度不足和开裂等等诸多因素导致钢筋锈蚀；一方面，钢筋的锈蚀又促使了混凝土的进一步破损。依据是否通过检验混凝土的质量状况来检测钢筋锈蚀状况，对钢筋锈蚀的评定技术可分为直接评定和间接评定两种。直接检测钢筋锈蚀技术主要有：

1、半电池电位检测法——利用与一已知的、并保持常量的基准电极的极电位相比较，有效地测量混凝土中钢筋的极电位，从而判定钢筋是否锈蚀。该法虽然不能提供锈蚀速率的具体数据，但它是目前唯一可用于现有桥梁直接检测混凝土锈蚀程度的非破损技术。该检测技术设备简单，便于现场检测，在钢筋混凝土桥梁结构的耐久性评定中广泛应用。

2、重量损失法与截面损失法——这两种方法都需要在桥梁构件上截取已锈蚀钢筋的试件进行检测（局部破损检测），缺点是仅能反映桥梁构件局部的锈蚀率。

间接评定钢筋锈蚀技术主要有：

1、混凝土碳化深度的现场检测——用 2%的酚酞酒精溶液喷洒在混凝土的新鲜断面处。PH≥10 时显示紫红色，说明未碳化；PH<10 时为无色，说明已碳化。若碳化深度到达钢筋部位，混凝土失去保护作用，则钢筋可能被锈蚀。

2、混凝土保护层厚度现场检测——利用保护层测定仪检测钢筋的混凝土保护层厚度是否足够。当取芯或钻孔时，也用来探测钢筋位置。在评价缺乏资料的桥梁时，可用其估测钢筋直径。目前产品的检测深度达 220~250mm，精确度为±5%。

3、混凝土电阻率检测——混凝土的电阻率与其含水量有关，是控制钢筋锈蚀的因素之一，电阻率越高，锈蚀电流越弱。当电阻率超过 12000 Ω·cm 时，钢筋不大可能锈蚀；当电阻率低于 500 Ω·cm 时，钢筋肯定锈蚀。

4、混凝土中氯离子含量检测——用来评定氯盐对钢筋的锈蚀。

5、混凝土气透性检测——通过其对碳化和有害离子侵蚀的抵抗力，间接评定钢筋。

### (一) 钢筋锈蚀自然电位的检测

钢筋锈蚀是一个电化学过程，钢筋锈蚀电位的测量是把钢筋与混凝土看作一个半电池，通过检测与参考电极的电位差，来作为钢筋锈蚀电位的量度。该方法是检测钢筋锈蚀的常用的方法，方法简便，对结构无损伤，易于现场实施，结果明确，适用于混凝土构件寿命期间的任何期间，不受构件尺寸，钢筋保护层厚度的限制。

#### 1、钢筋锈蚀电位检测仪的技术要求

1) 钢筋锈蚀电位测量仪应通过技术鉴定，必须具有产品合格证。

2) 仪器的技术性能要求主要有以下 10 点：

测量范围大于 1V ；

准确度优于 0.5%±1mv ；

输出电阻大于 1010 Ω ；

半电池参考电极为铜/硫酸铜电极，温度系数 0.9mv/℃ ；

显示方式为数字显示；

数据输出有标准打印机输出口，按矩阵或序列形成输出电位值并绘制等电位图；

数据可存贮且内存不断电；

电源为直流电，连续正常工作时间不小于 6 小时；

仪器使用环境条件为环境温度 0~+40℃，相对湿度≥85%；

测量联接导线：导线长不应超过 150m，截面积大于 0.75mm<sup>2</sup>。

#### 2、钢筋锈蚀电位检测仪的使用、维护与保管

仪器的使用、日常维护与保管应按相应的说明书规定进行；对于充电电池供电的仪器，应注意每 1~2 个月充放电一次，以保持电池的活性。

#### 3、钢筋锈蚀电位检测仪的校准

铜/硫酸铜电极的校准可使用甘汞电极。将铜/硫酸铜参考电极接于测量仪正极，甘汞电极接于负极，并把两电极同时接触于一块润湿的棉花上，在 22℃ 时两电极之间的电位差在 68±10mv 之间，则铜/硫酸铜电极就是可用的。每次检测之前应对电极进行校准。

二次仪表的校准一般应每年进行一次，当检查测量系统各环节时，

#### 4、钢筋锈蚀电位的测试方法

①铜/硫酸铜参考电极的准备：饱和硫酸铜溶液用试剂级硫酸铜晶体溶解在蒸馏水中制成，当有多余的未溶解硫酸铜晶体积于溶液底部时，可认为该溶液是饱和的。电极铜棒应清洁，无明显缺陷，否则需用稀释盐酸溶液清洁铜棒，并用蒸馏水彻底冲

净。硫酸溶液每月更换，长时间不用再用时也应更换，以保持溶液清洁。溶液应充满电极。

#### ② 测区与测点布置：

测区应根据构件的环境差异，外观检查的结果来确定，应有各种程度和差异的代表，每一种测区数量不宜少于3。

在测区上布置测试网格，网格节点为测点，网格间距可选20×20cm，30×30cm，20×10cm等，根据构件尺寸而定，测点位置距构件边缘应大于5cm，测点数可根据仪器功能要求确定，但一般不宜少于20个测点。

当一个测区内存在相邻测点的读数超过150mv，通常应减小测点的间距。

测区应统一编号，注明位置，并描述外观情况。

③混凝土表面处理：用钢丝刷、砂纸打磨测区混凝土表面，去除涂料、浮浆、污迹、尘土等，并将表面润湿。润湿用电接触液可以用水或加入适最液态洗涤剂的水溶液。

#### ④钢筋锈蚀电位测量系统按要求正确连接、正确操作：

现场检测，铜/硫酸铜电极一般接二次仪表的正输入端，钢筋接二次仪表的负输入端。

局部打开混凝土，在钢筋上钻一小孔并拧上自攻螺钉，用加压型接线夹夹在钉帽上，保证有良好的电联接。若在远离钢筋连接点的测区进行测量，必须用万用表检查内部钢筋的连续性，如不连续，应重新进行钢筋的连接。

铜/硫酸铜参考电极与测点的接触：测量前应预先将电极前端多孔塞充分浸湿，以保证良好的导电性，正式测读前应再次用喷雾器将混凝土表面润湿，但应注意两个测点之间不应留有自由表面水。

### 5、钢筋锈蚀电位测量值的采集

测点读数变动不超过2mv，可视为稳定。在同一测点，同一支参考电极，重复测读的差异不超过10mv；不同的电极重复测读的差异不超过20mv。若不符合稳定要求，应检查测试系统的各个环节。

数据按测量仪器的操作要求存入内存，并于每一工作日之后及时输出处理数据。

### 6、测量时应注意的问题与数据的修正

①混凝土含水量对测量值有明显影响，因此测量时构件应在自然状态，含水量约为2~3%，否则不能使用本指南给出的判据。

②如果环境温度在 $22\pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围之外，要对铜/硫酸铜电极做温度修正。

③各种外界因素产生的杂散电流，影响测量值，特别是靠近地面的测区。应避免各种电磁场的干扰。

④混凝土保护层电阻对测量值产生影响，除测区表面处理要符合规定外，仪器的输入阻抗要符合技术要求。

### 7、测试结果的记录格式与评定

根据电化学原理，钢筋锈蚀自然电位相对于铜/硫酸铜参考电极应为负值，为了提高现场测试的稳定性，本文介绍的方法测得的读数为正值，评定时按惯例将数据加上负号。

数据格式：a)按一定的比例绘出测区平面图，标出相应测点位置的钢筋锈蚀电位，得到数据阵列。b)绘出电位等值线图。通过数值相等各点或内插各等值点绘出等值线，等值线差值宜为100mv。

## 8、钢筋锈蚀电位测试的改善措施：

钢筋锈蚀自然电位的检测，会受到多种因素的干扰，为了提高现场检测结果判读与评定的准确性，可进行少量的现场比较性试验。对于需进行钢筋锈蚀评定的构件，有时已有钢筋暴露或很容易暴露，只要测其周围的锈蚀电位，比较这些钢筋的锈蚀程度和相应的测量值，就可缩小判据的范围，提高准确。通过大面积的检测评定整个被测结构的钢筋锈蚀状态。

### (二)混凝土碳化深度检测法

钢筋混凝土结构中，钢筋处于混凝土的碱性保护之中，混凝土碳化深度一旦到达钢筋，钢筋就失去保护，当外部条件成熟，就会发生锈蚀，因此检测混凝土碳化深度对判断钢筋状态也是很重要的。

#### 1、混凝土碳化深度的检测方法

混凝土碳化深度的检测一般使用酸碱指示剂喷在混凝土的新鲜破损面，根据指示剂颜色的变化，可测量混凝土的碳化深度。

#### 2、混凝土碳化深度检测前的准备：

①目前常用的指示剂为酚酞试剂，配制方法为：75%的酒精溶液与白色酚酞粉末配置成酚酞浓度为1~2%的酚酞溶剂，装入喷雾器备用。溶剂应为无色透明的液体。

②测区位置的选择原则可参照钢筋锈蚀自然电位测试的要求，若在同一测区，应先进行保护层和锈蚀电位、电阻率的测量，再进行碳化深度的测量。

③结构外侧面应布置测区。

④每一测区应布置测试孔三个，成“品”字排列，孔距应根据构件尺寸大小，但应大于2倍孔径。

⑤测孔距构件边角的距离大于2.5倍保护层厚度。

#### 3、碳化深度测量的操作过程

①用装有20mm直径钻头的冲击钻在测点位置钻孔。

②成孔后用园形毛刷将孔中碎屑、粉末清除，并用皮老虎吹净，露出混凝土新茬。

③将酚酞指示剂喷到测孔壁上。

④待酚酞指示剂变色后，用测深卡尺测量混凝土表面至酚酞变色交界处的深度，准确至1mm。酚酞指示剂从无色变为紫色时混凝土未碳化，酚酞指示剂未改变颜色处的混凝土已经碳化。

⑤将测区、测孔统一编号，并画出示意图，标上测量结果。

⑥测量值的整理应列出最大值、最小值和平均值。

#### 4、混凝土碳化对钢筋的影响

若混凝土碳化深度已达到钢筋保护层的厚度，则钢筋失去保护已有锈蚀的危险。

### (三)混凝土中氯离子含量测定法

有害物质侵入混凝土，将会影响结构的耐久性。混凝土中氯离子可引起并加速钢筋的锈蚀；硫酸盐( $SO_4^{2-}$ )的侵入可使混凝土成为易碎松散状态，强度下降；碱的侵入( $K^+$ 、 $Na^+$ )在骨料具有碱活性时，可能引起碱-骨料反应破坏。因此在进行结构耐久性评定时，根据需要应对混凝土中 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 含量进行测定。目前，对混凝土中氯离子含量的测定方法比较成熟，已被普遍应用于现在结构。

氯离子含量的测定方法分析主要有两种：滴定条法——这种方法比较简便，可在现场完成；实验室化学分析法——这种方法结果准确，但对操作人员要求较高；

## 1、滴定条法测定氯离子含量

### (1) 混凝土粉末分析样品的取样部位和数量：

- ①分析样品的取样部位可参照方法 1 及方法 3 的测量原则确定
- ②测区的数量应根据结构的工作环境条件及构件本身的质量状况确定，在工作环境条件、质量状况有明显差异的部位布置测区
- ③每一测区取粉的钻孔数量不宜少于 3 个，取粉孔可与碳化深度测量孔合并使用。
- ④测区、测孔应统一编号

### (2) 混凝土取样方法：

- ①使用直径 20mm 以上的冲击钻在混凝土表面钻孔，钻孔前应先确定钢筋位置；
- ②钻孔取粉应分层收集，一般深度间隔可取 3mm、5mm、100mm、15mm、20mm、25mm、50mm……。若需指定深度处的钢筋周围氯离子含量，取粉间隔可进行调整；
- ③钻孔深度使用附在钻头侧面的标尺杆控制；
- ④用一硬塑料管和塑料袋收集粉末，对每一深度应使用一个新的塑料袋收集粉末，每次采集后，钻头、硬塑料管及钻孔内都应用毛刷将残留粉末清理干净，以免不同深度粉末混杂；
- ⑤同一测区不同孔相同深度的粉末可收集在一个塑料袋内，重量不应少于 25 克，若不够可增加同一测区测孔数量。不同测区测孔相同深度的粉末不应混合在一起。
- ⑥采集粉末后，塑料袋应立即封口保存，注册测区、测孔编号及深度。

### (3) 滴定条法分析步骤：

- ①将采回的样品过筛，去掉其中较大的颗粒；
- ②将样品置于  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  烘箱内烘 2 时后，冷却至室温；
- ③称取 5g 样品粉末(准确度优于  $\pm 0.1\text{g}$ )放入烧杯中；
- ④缓慢加入 50ml (1.0m,  $\text{HNO}_3$ ) 并彻底搅拌直至嘶嘶声停止；
- ⑤先用石蕊试纸检查溶液是否呈酸性(石蕊试纸变红)，如果不呈酸性，再加入适量硝酸；最后加入约 5g 无水碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- ⑥用石蕊试纸检查深溶液是否呈中性，否则再加入少量无水碳酸钠直至溶液呈中性
- ⑦用过滤纸作一锥斗压入液体，当纯净的溶液渗入锥头后，把滴定条插入液体中；
- ⑧待滴定条顶端水平黄色细条变成蓝色，取出滴定条并沿由上至下的方向将其擦干
- ⑨读取滴定条颜色变化处的最高值，然后，在该批滴定条表中查出所对应的氯离子含量值，此值是以百万分之几(PPM)表示的。若分析过程取样 5g，加硝酸 50ml，则将查表所得的值除以 1000 即为百分比含量；
- ⑩若使用样品重量不是 5g 或使用过量的硝酸，则按式 (3-27) 修正其百分比含量



$$\text{氯离子百分比含量} = \frac{a \times b}{10000c} \quad (3-27)$$

式中：a——查表所得的值(ppm)

b——硝酸体积(ml)

c——样品质量(g)

## 2、实验室化学分析法测定氯离子含量

### (1) 混凝土中游离氯离子含量的测定:

该试验目的：测定硬化混凝土中砂浆的游离氯离子含量，为查明钢筋锈蚀原因提供依据。

试验设备包括：托盘天平(称量 100g，感量 10mg)；分析天平(称量 200g，感量 1mg，称量 200g，感量 0.1mg 各一台)；棕色滴定管(25ml 或 50ml)；三角烧瓶(250ml)；容量瓶(100ml、1000ml)；移液管(20ml)；标准筛(孔径 0.63mm)。

化学药品包括：硫酸(比重 1.84)；酒精(95%)；硝酸银；铬酸钾；酚酞；氯化钠。

试剂的配制：

①配制浓度约 5%铬酸钾指示剂：称取 5g 铬酸钾溶于少量蒸馏水中，加入少量硝酸银溶液使出现微红，摇匀后放置过夜，过滤并移入 100ml 容量瓶中，按要求稀释。

②配置浓度约 0.5%酚酞溶液：称取 0.5g 酚酞，溶于 7ml 酒精和 25ml 蒸馏水中。

③配置稀硫酸溶液：以 1 份体积硫酸倒入 20 体积的蒸馏水中。

④配置 0.02N 氯化钠标准溶液：把分析纯氯化钠置于瓷坩埚中加热(以玻璃棒搅拌)，一直到不再有盐的爆裂声为止。冷却后称取 1.2g 左右(精确至 0.1mg)，用蒸馏水溶解后移入 1000ml 容量瓶，并稀释至刻度。氯化钠当量浓度按式 3-28 计算：

$$N = \frac{W}{58.45} \quad (3-28)$$

式中：N——氯化钠溶液的当量深度；

W——氯化钠重(克)；

58.45——氯化钠的克当量。

0.02N 硝酸银溶液(视所测的氯离子含量，也可配成浓度略高的硝酸银溶液)：称取硝酸银 3.4g 左右溶于蒸馏水中并稀释至 1000ml，置于棕色瓶中保存。用移液管吸取氯化钠标准溶液 20ml(V1)于三角烧瓶中，加入 10-20 滴铬酸钾指示剂，

用于配制的硝酸银溶液滴定至溶液刚呈砖红色。记录所消耗的硝酸银毫升数(V2)。

$$N_2 = \frac{N_1 \times V_1}{V_2} \quad (3-29)$$

式中：N2——硝酸银溶液的当量浓度

N1——氯化钠标准溶液的当量浓度

V1——氯化钠标准溶液的毫升数

V2——消耗硝酸银溶液的毫升数

试验步骤包括：

①样品处理：取混凝土中的砂浆约30克，研磨至全部通过0.63毫米筛，然后置于烘箱中加热(105±5℃)2小时，取出后放入干燥器冷却至室温。称取20g(精确至0.01g)，重量为G，置于三角烧瓶中并加入200ml(V3)蒸馏水，塞紧瓶塞，剧烈振荡1-2分钟，浸泡24小时。

②将上述试样过滤。用移液管分别吸取滤液20ml(V4)，置于二个三角烧瓶中，各加2滴酚酞，使溶液呈微红色，再用稀硫酸中和至无色后，加铬酸钾指示剂10-20滴，立即用硝酸银溶液滴定至呈砖红色。记录所消耗的硝酸银毫升数(V5)。

游离氯离子含量按式(3-30)计算：

$$P = \frac{N_2 V_5 \times 0.03545}{G \cdot V_4 / V_3} \times 100 \quad (3-30)$$

式中：P——砂浆样品游离氯离子含量(%)

N2——硝酸银标准溶液的当量浓度

G——砂浆样品重(g)

V3——浸样品的水重(ml)

V4——每次滴定时提取的滤液量(ml)

V5——每次滴定时消耗的硝酸银溶液(ml)

0.03545——氯离子的毫克当量

## (2) 混凝土中氯离子总含量(包括已和水泥结合的氯离子量)的测定：

该试验目的：测定混凝土中砂浆的氯离子总含量，为查明钢筋锈蚀原因提供依据。

试验设备包括：恒温烘箱；分析天平(称量100g，感量0.1mg)；天平(感量0.01g)；酸式滴定管(10ml)两支；容量瓶(100ml和1000ml)；三角锥瓶(250ml)；试剂瓶(1000ml)；移液管(20ml)；玻璃干燥器；研钵；表面皿。化学药品包括：氯化钠；硝酸银；硫氰酸钾；硝酸；铁矾；铬酸钾；氯化钠。

试剂配置步骤为：✎

①0.02N 氯化钠标准溶液的配制：按相关规定执行。✎

②0.02N 硝酸银溶液配制与标定：按相关规定执行。✎

③6N 硝酸溶液的配制：取含量 65~68%的化学纯浓硝酸(HNO<sub>3</sub>)25.8ml 置于容量瓶中，按要求用蒸馏水稀释。✎

④10%铁矾溶液：用 10g 化学纯铁矾溶于 90g 蒸馏水配成；✎

⑤0.02N 硫氰酸钾标准溶液：用天平称取化学纯硫氰酸钾晶体约 1.95g 左右，溶于 100ml 蒸馏水，充分摇匀，装在瓶内配成硫氰酸钾溶液并用硝酸银标准溶液进行标定。将硝酸银标准溶液装入滴定管，从滴定管放出硝酸银标准溶液约 25ml，加 6N 硝酸 5ml 和 10%铁矾溶液 4ml，然后用硫氰酸钾标准溶液滴定，滴定时，激烈摇动溶液，当滴至红色维持 5-10 秒不褪时即为终点。✎

硫氰酸钾标准溶液的当量浓度按式 3-31 计算：✎

$$N_1 = \frac{N_2 V_2}{V_1} \quad (3-31) \quad \text{✎}$$

式中：N<sub>1</sub>——硫氰酸钾标准溶液的当量浓度；✎

V<sub>1</sub>——滴定时消耗的硫氰酸钾标准溶液(ml)；✎

N<sub>2</sub>——硝酸银标准溶液的当量浓度；✎

V<sub>2</sub>——硝酸银标准溶液(ml)。✎

试验步骤为：✎

①取适量的混凝土试样(约 40g 左右)，用小锤仔细除去混凝土试样中石子部分，保存砂浆，把砂浆研碎成粉状，置于 105±5℃烘箱中烘 2 小时。取出放入干燥器内冷却至室温，用感量为 0.01g 天平称取 10~20g 砂浆试样倒入三角锥瓶。

②用容量瓶盛 100ml 稀硝酸(浓硝酸与蒸馏水体积比为 15:85)倒入盛有砂浆试样的三角锥瓶内，盖上瓶塞，防止蒸发。✎

③砂浆试样浸泡一昼夜左右(以水泥全部溶解为度)，其间应摇动三角锥瓶，然后用滤纸过滤，除去沉淀。✎

④用移液管准确量取滤液 20 毫升两份，置于三角锥瓶，每份由滴定管加入硝酸银溶液约 20ml(可估算氯离子含量的多少而酌量增减)，分别用硫氰酸钾溶液滴定。滴定时激烈摇动溶液，当滴至红色能维持 5-10 秒不褪时即为终点。✎

必要时可加入 3~5 滴 10%铁矾溶液以增加水泥含有的 Fe<sup>3+</sup>。✎

氯离子总含量按式 3-32 计算：✎

$$P = \frac{0.03545(NV - N_1V_1)}{GV_2/V_3} \times 100 \quad (3-32)$$

式中：P——砂浆样品中氯离子总含量(%)

N——硝酸银标准溶液的当量浓度

V——加入滤液试样中的硝酸银标准溶液(毫升)

N<sub>1</sub>——硫氰酸钾标准溶液的当量深度

V<sub>2</sub>——每次滴定时提取的滤液量(毫升)

V<sub>3</sub>——浸样品的水量(毫升)

G——砂浆样品重(克)

0.03545——氯离子的毫克当量。

### 3、分析结果的评定：

氯化物浸入混凝土引起钢筋的锈蚀，其锈蚀危险性受到多种因素的影响，如碳化深度、混凝土含水量、混凝土质量等，因此应进行综合的分析。

因氯离子含量引起钢筋锈蚀的危险性可分为三个等级，见表 3-5

钢筋锈蚀危险程度划分 表 3-5

氯离子含量(占水泥含量的百分比)	0.4 以下	0.4~1.0	1.0 以上
钢筋锈蚀危险性	低	中	高

根据每一取样层氯离子含量的测定值，做出氯离子含量深度的分布线，从而可判断氯化物是混凝土生成时已有的，还是结构使用过程中由外界渗入的以及浸入的深度。

#### (四) 钢筋保护层厚度及分布检测法

混凝土保护层为钢筋提供了良好的保护，其厚度和分布的均匀性是影响钢筋耐久性的重要因素，在结构质量检测中必须进行该项目的测量。钢筋保护层的测量是通常使用钢筋保护层测量仪器，其工作原理为电磁感应。当探测传感器靠近钢筋时，传感器的电感量发生变化，两端电压发生变化，从而可测定钢筋的位置、直径和保护层厚度。

#### 1、钢筋保护层测试仪的技术要求：

①钢筋保护层测试仪应通过技术鉴定，必须具有产品合格证。

②仪器的保护层测量范围应大于 120mm。

③仪器的准确度应满足：a) 0~60mm，±1mm    b) 60~120mm，±3mm    c) >120mm，±10%

④可适用钢筋直径范围  $\phi 6 \sim \phi 50$ ，不少于符合有关钢筋直径系列规定的 12 个档次。

⑤仪器应具有在未知保护层厚度的情况下，测量钢筋直径的功能。

⑥仪器适用于常用的碳素钢、低合金钢钢筋和普通水泥。当出现超出仪器适用的钢材、水泥品种范围时，仪器仍能工作，但需做专门的校准以修正测读值。

⑦仪器应能适用于温度  $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度  $\leq 85\%$ ，无强磁场干扰的环境条件。

⑧仪器工作时应为直流供电，连续正常工作时间不小于 6h。

## 2、钢筋保护层测试仪的使用、维护与保管：

①仪器的使用、维护与保管应遵照说明书进行。

②仪器接通电源后宜预热 10 分钟，再进行正式测读。

③在测量的整个过程中，应随时检查和调节仪器的零点。

④测量时应避免强磁场的干扰，两台仪器同时使用相距应大于 2 米。

⑤对于充电电池供电的仪器，应每 1~2 个月充放电一次，以保持电池的活性。

## 3、钢筋保护层测试仪的标定：

①保护层测试仪使用期间的标定校准，使用专用的标定块。当测量标定块所给定的保护层厚度时，测读值应在仪器说明书所给定的准确度范围之内。

②标定块由一根  $\phi 16$  的普通碳素钢筋垂直浇铸在长方体无磁性的塑料块内，使钢筋距四个侧面分别为 15mm、30mm、60mm、90mm。

③标定应在无外界磁场干扰的环境中进行。

④每次检测前均应对仪器进行标定，若达不到应有准确度，应送专门机构维修。

## 4、钢筋保护层测量的一般原则要求：

### ①测区布置原则

按单个构件检测时，应根据尺寸大小，在构件上均匀布置测区，每个构件上的测区数不应少于 3 个

b) 对于最大尺寸大于 5m 的构件，应适当增加测区数量；

c) 测区应均匀分布，相邻两测区的间距不宜小于 2m；

d) 测区表面应清洁、平整、避开接缝、蜂窝、麻面、予埋件等部位。

②测区应注明编号，并记录测区位置和外观情况。

### ③测点数量及要求：

构件上每一测区测点不少于 10 个。

测点间距应小于保护层测试仪传感器长度。

④对某一类构件的检测，可采取抽样的方法，抽样数不少于同类构件数的 30%，且不少于 3 件，每个构件测区布置按单个构件要求进行。

⑤对结构整体的检测，可先按构件类型分类，再按类型进行检测。

## 5、钢筋保护层测量的试验步骤：

①测试前应了解有关图纸资料，以确定钢筋的种类和直径。

②进行保护层厚度测读前，应先在测区内确定钢筋的位置与走向，做法如下：

将保护层测试仪传感器在构件表面平行移动，当仪器显示值最小时，传感器正下方即是所测钢筋的位置。

找到钢筋位置后，将传感器在原处左右转动一定角度，仪器显示最小值时传感器长轴线的方向即为钢筋的走向。

在构件测区表面画出钢筋位置与走向。

③保护层厚度的测读：

将传感器置于钢筋所在位置正上方，并左右稍稍移动，读取仪器显示最小值即为该处保护层厚度；

每一测点值宜读取 2~3 次稳定读数，取其平均值，准确至 1mm；  
应避免在钢筋交叉位置进行测量。

④对于缺少资料，无法确定钢筋直径的构件，应首先测量钢筋直径。对钢筋直径的测量宜采用 5~10 次测读，剔除异常数据，求其平均值的测量方法。

## 6、影响试验准确度的因素及修正：

1) 影响测量准确度的因素有：

- 外加磁场(应予以避免)
- 混凝土具有磁性(测量值应予以修正)
- 钢筋品种(主要是高强钢筋,应加以修正)
- 不同的布筋状况,钢筋间距

当  $D/S < 3$ ，需修正测量值。

其中： $D$  为钢筋净间距， $S$  为保护层厚度

2) 保护层测量值的修正：实际测量时，钢筋直径、材质、布筋状况，混凝土的性质等往往都是未知的，为了准确测量保护层厚度，应予以修正：

钢筋不同位置时的等效直径修正

模型修正法（只能在试验室内完成）：根据图纸资料，用与实际构件相同的材料制成小尺寸模型，通过检测已知的保护层厚度，获得修正系数  $K$  (式 3-33)

$$K = \frac{S_m}{S_s} \quad (3-33)$$

式中  $S_m$ ——仪器读数值

$S_s$ ——保护层厚度实际值

● 标准垫块综合修正（常用于现场检测）：标准垫块用硬质无磁性材料制成，如：工程塑料或电工用绝缘板，平面尺寸与仪器传感器底面相同，厚度  $S_s$  为 10mm 或 20mm，修正系数  $K$  计算方法如下（式 3-34）：

将传感器直接置于混凝土表面已标好的钢筋位置正上方，读取测量值  $S_{m1}$

将标准垫块置于传感器原在混凝土表面位置，将传感器置于其上，读取测量值  $S_{m2}$

$$K = \frac{S_{m2} - S_{m1}}{S_s} \quad (3-34)$$

对于不同钢筋种类和直径应确定各自的修正系数，均应采用 3 次平均求得。

校准孔进行综合修正（常用于现场检测）：

用 6mm 钻头在钢筋位置正上方，垂直于构件表面打孔，手感觉碰到钢筋立即停止，用深度长尺量测钻孔深度，即为实际的保护层厚度，其修正系数见式 2-3-46：

注：对于不同钢种和直径应打各自的校准孔，一般应不少于 2 个，求其平均值。

3) 现场检测的准确度：经过修正后确定的保护层厚度值，准确度可在 10% 以内，因混凝土表面的平整度及各种影响因素仍会给测量带来误差。

### (五) 结构混凝土中钢筋腐蚀的检测技术小结

目前混凝土中钢筋腐蚀的检测技术多种多样，很难笼统地说哪一种好，哪一种不好。表 3-6 中对于它们所提供的信息可否定量，对钢筋腐蚀过程有无干扰，对结构有无损伤（有干扰、有损伤时，就不能重复检测、连续检测），对钢筋腐蚀是否敏感，检测是否简捷可靠，检测设备是否复杂、昂贵等方面进行了综合比较，并就目前是否值得推荐应用于试验室内和工程现场作出了建议。

钢筋腐蚀检测技术

表 3-6

类别	所检测的信息		定量	无损	便捷	对腐蚀无扰动	对腐蚀敏感	经济	数据易处理	推荐		
										室内	现场	
物理方法	外观检查	定性	表面缺陷	×	√	√	√	×	√	√	√	√
		定量	腐蚀量	√	×	×	×	×	×	√	√	△
	称量(探头)	腐蚀量	√	×	×	△	×	×	√	√	×	
	电阻探头	腐蚀量	△	√	△	√	×	△	√	△	×	
	声发射	腐蚀危险	×	√	△	√	√	×	×	△	×	
	涡流	腐蚀量	√	√	√	√	√	△	√	△	√	
	磁通减量	腐蚀量	√	√	√	√	√	√	√	△	√	
	膨胀应变探头	腐蚀量	△	√	√	△	√	√	√	△	√	
电化学方法	半电池电位图	腐蚀危险	×	√	√	√	√	√	√	√	√	△
	极化电阻	腐蚀速度	√	√	√	√	√	△	√	√	√	√
	交流阻抗谱	腐蚀机理、速度	√	√	×	√	△	×	×	×	×	×
	电阻率	混凝土电阻率/腐蚀危险	√	√	√	√	√	√	√	√	√	△
	恒流脉冲	腐蚀速度	√	√	√	√	√	△	△	√	√	√
	电化学噪声	腐蚀机理、速度	△	√	×	√	√	×	×	×	×	×
	极化曲线	腐蚀机理、速度	×	×	△	×	√	△	△	△	△	×
	电偶探头	宏观电偶腐蚀速度	√	√	√	√		△	△	√	√	√

注：√极好；△尚好；×不好。

## 四、公路桥梁构件材料性能检测方法小结

本单元对检测桥梁钢筋混凝土结构材料状况各类方法作一小结，见表 3-7：

检测钢筋混凝土构件材料状况的各种方法

表 3-7

材料缺陷	混凝土评定	钢筋锈蚀评定	对构件的损伤	运用对象
------	-------	--------	--------	------

检测方法	强度	开裂	层离	灌浆空	化学侵	直拉	间拉	速	探测缺	预计原	无破	半破	破	现有结	新建结
目视检测		☆	☆		☆	☆			☆		☆			☆	
硬度法	☆						☆			☆	☆			☆	
Windsor 探针	☆						☆			☆		☆		☆	
CAPO 拔拉法	☆						☆			☆		☆		☆	
LOK 拔拉法	☆						☆				☆	☆			☆
超声波	☆	☆								☆	☆			☆	
声波		☆	☆				☆		☆		☆			☆	
声发射		☆									☆			☆	
红外线		☆	☆								☆			☆	
雷达				☆							☆			☆	
射线照相		☆		☆							☆			☆	
保护层测定							☆			☆				☆	
碳化深度					☆		☆			☆			☆	☆	
氯离子分析					☆		☆			☆		☆		☆	
水泥含量							☆			☆		☆		☆	
吸水性										☆			☆	☆	
半电池电位						☆			☆			☆		☆	
电阻率							☆			☆	☆			☆	
含水量							☆			☆			☆	☆	
电阻探测器						☆		☆			☆				☆
线性极化						☆		☆			☆				☆
重量损失						☆		☆					☆	☆	
凹痕深度						☆		☆					☆	☆	
取芯试验	☆	☆					☆			☆			☆	☆	
染色渗透法		☆											☆	☆	
气渗性试验				☆								☆		☆	

### 第三节 公路桥梁荷载试验检测

公路桥梁结构性能检测对其结构及部件的工作性能所存在的缺损状况进行详细检测、试验、判断，是对桥梁的专门检验。

结构承载能力（强度、刚度、稳定性等）鉴定是结构性能鉴定的主要内容，包括承载能力检测与承载能力评价两方面。出现以下情况之一需对桥梁进行结构性能鉴定：

- 1、桥梁主要承重构件的材料缺损严重影响结构的承载能力；



- 2、桥梁的荷载等级需要提高;
- 3、桥梁需要通过超重车辆;
- 4、桥梁经过重大的加固改建后需要验收;

桥梁承载能力鉴定的主要途径是荷载试验。荷载试验是鉴定桥梁承载能力的一种最直接、最有效的方法。其包括静力荷载试验与动力荷载试验两部分。一般只做静载试验,必要时(如特大桥桥梁检测)增做动载试验,提供辅助性评定指标。

## 一、静力荷载试验

公路桥梁的静力荷载试验(静载试验)——将静止荷载作用于桥梁上指定位置,以便测试出结构的静应变、静位移以及裂缝等,从而推断桥梁结构在荷载作用下的工作状态和使用能力。一般以缓速行驶到桥上特定载重级别的车辆荷载作为静载,在某些情况下也可施加荷重(堆置铁块、水泥、预制块件、水箱等)或者以液压千斤顶装置施力等方式来模拟车载,以达到试验目的。

桥梁静载试验的目的是检验桥梁结构与施工质量,验证桥梁结构设计理论和计算方法,直接了解桥梁结构承载情况,借以判断桥梁结构实际承载能力,为桥梁养护、维修及加固改造提供基础技术资料,充实与发展桥梁养护技术。

### (一) 桥梁静载试验的方案

#### 1、加载方案

当加载分级较为方便时,一般按最大控制截面内力平均分为3~4级。当使用重车加载,车辆的加载、卸载、称重有困难时也可分为2~3级。当前期工作不充分,或桥梁状况较差时,应尽量增多加载分级。如限于条件而加载分级较少时,应在每级加载时,使车辆逐辆缓缓驶人预定的加载位置,以确保试验安全。分级加载,最好每级加载后卸载,也可逐级加载达最大荷载后再逐级卸载。

加载时间要求一为减少温度变化对静载试验的影响,加载试验时间以晚10时至晨6时为宜。当采用加卸载迅速的车辆进行试验时,亦可安排在白昼温差较小的时段。

加载物可选用装载重物的汽车或平板车,或就近利用施工机械车辆。采用车辆加载便于调运和加载布置,加卸载迅速。采用车载既能作静载试验又能作动载试验。加载也可采用重物,按控制荷载的着地轮迹先搭设承载架,再在架上堆放重物或设置水箱进行加载。若加载仅为满足控制截面内力要求,也可采用直接在桥面堆放重物或设置水箱加载。重物加载准备工作量大,加卸、载所需周期较长,交通中断时间亦较长,且试验时温度变化对测点的影响较大,因此宜安排在夜间进行。

加载物应进行称重,可直接称重,由体积换算成重量,也可根据车辆出厂规格确定空车轴重,再根据装载重物的重量及其重心将其分配至各轴,称重误差最大不得超过5%。

加载方案最重要的工作是根据桥梁现有的状况进行结构分析计算。加载的总量与加载位置即要保证桥梁的绝对安全,又要能测试出桥梁的实际受力和变形状况。对于新建桥梁加载的效率系数一般为0.8~1.05。对于旧桥加载多少不能一概而论,具体应参考《公路旧桥承载力评定》。

#### 2、检测方案

公路桥梁荷载试验主测点包括应变测点和位移(挠度)测点,分布在结构受力和变形较大的部位,如弯矩最大、挠度最大、主应力最大的部位。测点的布设如表3-8所示:

公路桥梁荷载试验主测点布置

表 3-8

	截面应力(变)	挠度	沉降	水平位移
简支梁桥	跨中	跨中	支点	墩、台
连续梁桥	跨中、支点	跨中	支点	
悬臂梁桥	支点、牛腿	悬臂端部	支点	
拱桥	拱顶、四分点、拱脚	跨中、四分点	墩、台	墩、台
斜拉桥	跨中、支点截面应变 最外排斜拉索索力 索塔下端截面应变	加劲梁跨中 悬浮式梁端		索塔
吊桥	加劲梁跨中截面应变 加劲梁四分点截面应变 吊杆、主索的拉力 索塔下端截面应变			索塔

依据桥梁调查、检算工作的深度，综合考虑结构特点和桥梁状况等，可加设测点，测点布置如表 3-9 所示。

公路桥梁荷载试验增设测点

表 3-9

测点加设	具体相关内容
应变	①应变沿控制截面桥宽方向的分布
	②应变沿截面高的分布
	③组合构件的结构面上、下缘应变
	④剪切应变测点——可设置应变花检测 梁桥的剪应力也可在截面中性轴处主应力方向设置单一应变测点来进行观测。 梁桥的实际最大剪应力截面应设置在支座附近而不是支座上
	⑤结构薄弱部位的应变
挠度	①沿桥长方向的分布②沿控制截面桥宽方向的分布
其它	①墩台的沉降、水平位移与转角（连拱桥多个墩台的水平位移）
	②温度测点——选择与大多数测点较接近的部位，设置 1~2 处。 可根据需要在桥梁主要测点部位设置一些构件表面温度观测点
	③裂缝监测测点——观测结构承受拉力较大部位及原有裂缝较长、较宽部位 加载过程中应观测裂缝长度与宽度的变化情况及新增裂缝的情况

(二) 桥梁静载试验的准备

1、试验孔(墩)的选择

多孔桥若结构相同，跨径相等，可选择 1~2 个具有代表性的孔(墩)作加载试验。选择时应综合考虑该孔(墩)计算受力是否最不利，该孔(墩)施工是否质量较差，缺陷较多或病害较严重，该孔(或墩)是否便于搭设脚手架与设置测点，是否在试验时便于加载等。

2、搭设试验支架

试验支架应根据测试断面、测试内容进行搭设。支架搭设要因地制宜、就地取材，需方便观测仪表的设置、需保证安全。当桥下净空较高不便设置固定脚手架时，可采用轻便活动吊架。随着生产的发展，桥梁检测车的应用越来越广泛，有取代支架的趋势。

### 3、试验位置放样

静载试验前应在桥面上对加载位置和测点位置进行放样。

### 4、其他

参 数	测 试 设 备		适 用 性	
线 位 移	非 接 触 式	精密水准仪	竖向位移测量	用于 50~200mm 内的近距离测量
		精密经纬仪	水平位移测量	
		近景摄影测量系统	需专门的分析设备	
		激光测量系统	避免环境干扰	
		电子测距仪	用大跨径或长大型结构	
		连通管水平测量装置	装置附着于结构，用于长期观测	
	接 触 式	钢丝挠度计	需要在桥下搭设专用的仪表架 适用于无水或浅水的低矮中小跨径结构	
		百分表		
		各类电学位移传感器		
转 角	两个定距的线位移计			
	水准式倾角仪			
	各类电学倾角传感器			
应 变 及 应 力	机 械 式	杠杆引伸仪	量测表面应变	可用于中 长期观测
		刻痕应变仪		
		手持应变仪		
		千 分 表		
	电 学 的	振弦式传感器	本身的温度效应小	
		卡尔逊差动电阻传感器	能校正本身的温度效应	

其他工作包括准备试验的安全设施、提供电照明设施、通讯联络设施。若检测时需要交通管制的，应根据需要提前申报、准备。

### (三) 桥梁静载试验的仪器设备

桥梁静载试验时需测结构的反力、应变、位移、倾角、裂缝等物理量。静载试验前应首先对测试值进行理论分析估计，选择仪器的精度与量测范围从而选择适当的仪器进行量测。测试仪器按其工作原理可分为机械测试仪器、电测仪器、光测仪器等等。常用仪器有百分表，千分表，位移计，应变仪，应变计（应变片），精密水准仪，经纬仪，倾角仪，刻度放大镜等等，详见表 3-10

	电阻丝、半导体应变计	量测表面应变、要求严格防潮
	其它电学的应变计	
压力	机械式拉（压）力计	用于外部量测
	液压扁千斤顶	
	各类电学的力传感器	
温度	普通液体、双金属温度计	量测表面温度、气温
	热电偶、热敏电阻	量测内部温度分布
	其它电学的温度传感器	

#### （四）试验过程

首先依测点位置实施打磨找平，清洗干净，再粘贴应变片，并作防潮处理，焊接电线；接线；将所有测点编号接入接线箱。

为了排除测试过程中大气温度变化带来的影响，每一断面设置处于同一温度场而不受加荷影响的补偿应变片，一并接入接线箱。

接线联机后，进行试调工作，检查各个应变片，电路通畅，处于良好的可靠状态。开始进行预压，进一步检查应变片读数，反应正常、灵敏，一切无误后，正式按工况位置加载试验。

试验中为尽可能减少混凝土流变特性的影响，采用加载到位后，关闭汽车发动机，持续 5 分钟以上，待数据完全稳定之后再记录；卸载后 10 分钟以上，再进行一次重复加载，以便使结构恢复弹性变形，消除塑性残余变形。

在正式加载前先以一辆车应进行预压，以检验设备是否正常，一切反应良好后卸载，10min 后进行正式加载。加载为分级试加，以防意外。

每一个工况重复三次，若前两次读数基本相同时，亦可不重复第三次。使每一工况获取可靠的数据。

#### （五）桥梁静载试验的报告

试验报告是荷载试验的重要内容。在试验资料整理、分析基础上，提交桥梁静载试验报告，内容如下：

1、试验概况：介绍试验桥的结构形式、构造特点、施工概况。对于鉴定性试验，应说明在施工或设计中存在的技术问题，以及其对承载能力的影响等。对于科研性试验，应说明研究中需解决的问题。

2、试验的目的：介绍桥梁静载实验应达到要求与应完成的任务。

3、试验方案设计：确定测试项目、测试方法，仪器配备、测点布置（附简图）；说明试验荷载情况、加载的情况。

4、试验过程：桥梁静载试验的起止日期，试验各阶段详细情况描述，试验日志等。

5、试验记录摘记：将有代表性的实测数据、以表格或曲线的形式表达出来。

6、试验结果与分析：按桥梁结构静载试验项目，将理论计算值、实测值以及有关的参考限值进行对比、分析，说明理论、实践值的符合程度，从中推断桥梁结构所具有的实际承载能力、抗裂性及安全度等。从试验中所发现的新问题。从现场检查的综合情况，说明试验结构的施工质量。对于科研性试验，还要从综合分析中说明设计计算理论的正确程度和实用程度，以及尚待解决的问题。通过实践，有所创新，甚至总结出相关分析的简化计算公式。

7、桥梁承载能力的技术评价：根据综合分析的结果，得出最后的技术结论，对桥梁承载能力做出科学的评价。同时根据问题，提出桥梁养护加固建议。

8、经验及教训：对试验中的成功经验及不足之处做出客观总结。

## 二、动力荷载试验

公路桥梁的动力荷载试验（动载试验）是将动力荷载（行驶的汽车荷载等）作用于桥梁结构上，以便测出桥梁结构的某些动力特性，从而推断出桥梁结构在动载作用下受冲击、振动影响的特性。

桥梁动载试验的目的是测定动载的动力特性（引起结构产生振动的作用力的数值、方向、频率和规律等），测定桥梁结构的动力特性（自振频率，阻尼特性、固有振型等），测定桥梁结构在动载作用下强迫振动的响应（振幅、动应力、冲击系数、疲劳性能）等。

### （一）桥梁动载试验的激振方法

桥梁动载试验的激振方法主要包括自振法、共振法和脉动法。自振法主要有冲击法（突然加载法）、位移激振法（突然卸载法）。

自振法就是使桥梁产生有阻尼的自由衰减振动，记录的振动图形是桥梁的衰减振动曲线的方法。为使桥梁产生自振，可用突加荷载法和突卸荷载法。

突加荷载法（冲击法）是在被测结构上快速地施加一个冲击作用力，由于施加冲击作用的时间很短，故施加于结构的作用实际是一个冲击脉冲作用。由振动理论可知，冲击脉冲动能传递到结构振动系统的时间，要小于振动系统的自振周期，且冲击脉冲一般都包含了从零到无限大的所有频率的能量，其频谱是连续谱，只有被测结构的固有频率与之相同或很接近时，冲击脉冲的频率分量才对结构起作用，才能激起结构以其固有频率作自由振动。对于中、小型桥梁结构，可用落锤激振器垂直地冲击桥梁，激起桥梁竖直方向的自由振动。如果水平方向冲击桥面缘石，则可激起横向振动。动载试验中也常用到试验车辆，使其在桥面上驶过三角垫木，利用车轮的突然下落对桥梁产生冲击作用，激起桥梁的竖向振动（此时所测得的结构固有频率包括了试验车辆这一附加质量的影响）。采用突加荷载法时，应注意冲击荷载的大小及其作用位置。如果要激起结构的整体振动，则必须在桥梁的主要受力构件上施加足够的冲击力，冲击荷载的位置可按所测结构的振型来确定。冲击引起得自由振动，至少可记录到第一固有频率的震动图形。（用磁带记录仪，通过频谱分析，可获得多阶固有频率参数）突卸荷载法（位移激振法是在结构上预先施加一个荷载作用，使结构产生一个初位移，然后突然卸载，利用结构的弹性使其产生自由振动。

共振法（强迫振动法）是利用激振器，对结构施加激振力，使结构产生强迫振动。改变激振力的频率使结构产生共振现象并依据共振现象来确定结构的动力特性。常用激振器有机械式激振器、电磁式激振器和电气液压式振动台等。

激振器的安装位置和激振方向根据试验目的而定；使用时，激振器需牢固地固定在结构上，由底座将激振器产生的交变激振力传给结构；将两台激振器安放于结构适当位置，反向激振，则可进行扭转振动试验；连续改变激振器频率，当激振力频率与结构固有频率相等时，结构出现共振现象，此时，所记录的频率即为结构的固有频率。

对于复杂的结构，有时需知道基频以后的几个频率。此时可以连续改变激振力的频率，进行“频率扫描”，使结构连续出现第一次共振，第二次共振，……等等，同时记录结构的振动图形，由此可得到结构的基频、第二频率……等等。（图 3-14）然后在共振频率附近进行稳定的激振试验，可准确地测定结构的固有频率与振型。在频率扫描试验时，同时记录结构的振幅变化情况，则可作出共振曲线，即频率——振幅关系曲线，从而确定结构的阻尼特性。

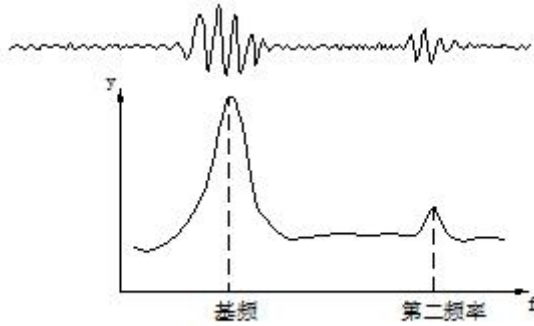


图 3-14 频率扫描中结构振动图

桥梁动载试验中，常由载重车队按从低到高的不同速度驶过桥梁，使结构产生不同程度的强迫振动。在若干次运行车载试验中，当某一行驶速度产生的激振力的频率与结构的固有频率相接近时，结构便产生共振现象，此时结构各部位的振动响应达最大值。在车辆驶离桥跨以后，结构作自由衰减振动，此时可由记录到的波形曲线分析得出结构的动力特性（固有频率、阻尼特性等）

对于刚度较大跨度桥梁结构可采用脉动法，即利用结构由于外界因（如附近车辆、机器等的振动）引起的微小而不规则的振动（脉动）来测试桥梁结构的动力特性。脉动可以明显地反映出结构的固有频率。如图 3-15 所示结构脉动记录曲线，振幅呈现有规律的增减现象（凡振幅大波形光滑之处的频率都相同，而且多次重复出现，此频率即为结构的基频）。若在结构不同部位同时进行检测，同时记录，读出同一瞬时各测点的振幅值，分析它们之间的相位关系，则可得某一固有频率的振型。



图 3-15 结构脉动记录曲线

## （二）桥梁动载试验的仪器设备

动载主要仪器测试有测振传感器、光线示波器、磁带记录仪、数字信号处理系统等。

### 1、测振传感器

测振传感器由惯性质块和弹性元件组成，安装在振动体上与振动体一起振动。测量惯性质块相对于弹性元件的振动。由于是非直接检测，所以，该传感器动力系统的动力特性对测量结构具有重要影响。

测振传感器感受到的振动信号要通过各种转换方式（磁电式、压电式、电阻应变式等）转换成电信号，依据转换方式和所测振动量的不同，测振传感器可分为磁电式速度传感器、磁电摆式传感器和压电式加速度传感器等（图 3-16）

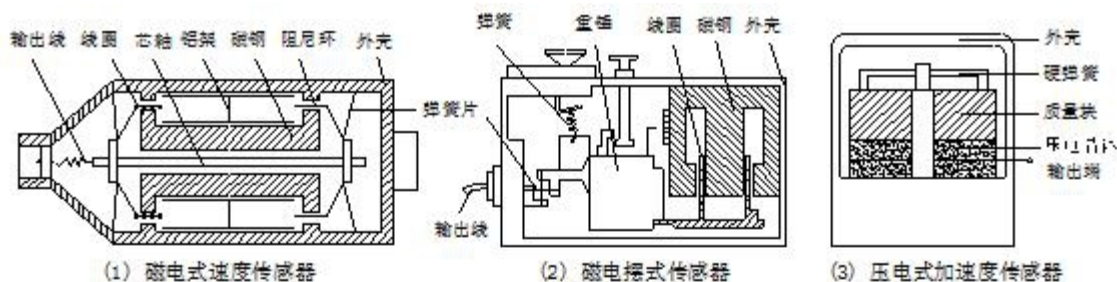


图 3-16 几种常见测振传感器的结构简图

### 2、光线示波器

光线示波器是常用的模拟式记录器，一般用于记录振动测量的数据，它将电信号转为光信号并记录在感光纸或胶片上，得到试验变量与时间的关系曲线。如图 3-17：当振动的信号电流输入振动子线圈时，在固定磁场内的振动子线圈就发生偏转，与线圈连着的小镜片及其反射的光线也随之偏转，偏转的角度大小和方向与输入的信号电流相对应，光线射在前进着的感光记录纸上即留下所测信号的波形，与此同时在感光记录纸上用频闪灯打上时间标记。光线示波器可以同

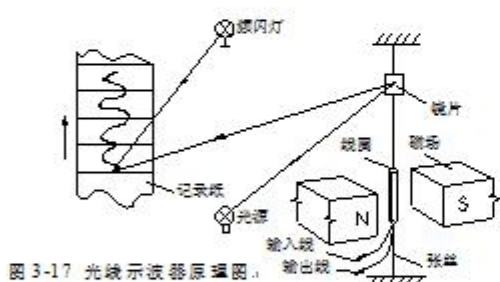


图 3-17 光线示波器原编图。

记录若干条波形曲线，还可用于静载试验数据记录。对光线示波器记录的试验结果行数据处理时，用直尺在曲线上直接量取小，根据标定值按比例换算得到代表试验结果的数值；关于时间数值，可用记录纸上 + 的时间标记按同样方法进行换算。

### 3、磁带记录仪

常用于动载试验的振动测量和静力试验的数据记录，它将电信号转换成磁信号并记录在磁带上，得到的是试验变量与时间的变化关系。

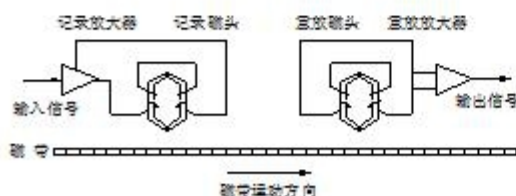


图 3-188 磁带记录仪原编图。

如图 3-18 所示，其由磁带、磁头、磁带传动机构、放大器和调制器等组成，记录时，从传感器传来的信号输入到磁带记录仪，经过放大器和调制器的处理，通过记录磁头把电信号转换成磁信号，记录在以规定速度作匀速运动的磁带上。重放时，使记录有信号的磁带按原来记录时的速度（也可以改变速度）作匀速运动，通过重放磁头从磁带“读出”磁信号，并转换成电信号，经过放大器和调制器的处理，输出给其他仪器。

磁带记录仪的优点有工作频带宽，可同时进行多道记录，并保持多道信号间正确的时间与相位关系，可快(慢)速记录慢(快)速重放，使数据记录和分析更加方便，通过重放可以方便地将磁信号还原为电信号，输送给各种仪器分析等。

#### 4、信号处理系统

信号处理系统的作用是将输入信号通过低通抗混淆滤波器和前置放大器后，经过模数转换器，将模拟电信号转换成数字信号输入给计算机。这些数字信号在相关硬件和软件的支持下得到处理，其结果显示在屏幕上或被打印出来。功能更全的数据处理机应配备磁盘驱动器、输入和输出接口，及特殊语言编制的专用程序。现在还有集数据采集和分析为一体化的智能仪器，可以进行实时数据采集分析，并能实现数据储存，兼顾磁带记录仪和信号处理机二者之长处。

#### 5、动载试验测试系统的组成

动载试验测试系统一般由传感器、放大器和记录仪构成，组成方式主要有三种：电磁式、压电式和电阻应变式。电磁式测试系统由电磁式传感器、信号放大器和记录仪器构成；压电式测试系统由压电式传感器、电压(荷)放大器和光线示波器或磁带记录仪构成；电阻应变式测试系统由电阻式传感器、电阻应变仪和光线示波器或磁带记录仪构成。

电磁式测试系统在桥梁动力测试中常常用到，它通过仪器的组合变换可测位移、速度和加速度。其优点是输出信号强、灵敏度高、稳定性好、抗干扰性好。

压电式测试系统的输出阻抗很高，必须与输入阻抗很高的放大器相连。其自振频率较高，可测频响较宽。其最主要的缺点是抗干扰性差。

电阻应变式测试系统在桥梁动载试验中也常常使用。其传感器可供选择种类较多，如应变计、位移计、加速度计等；所对应的放大器是各类动态电阻应变仪。其优点是：通用性强、应用方便、低频响应好（可从零赫兹开始）；其缺点是：易受温度的影响，抗干扰性较差。

事实上，目前采用的测试系统已经很少由单独的示波器、磁带记录仪和数据分析系统。除了测振传感器如加速度传感器、电阻应变片、机电千分表为发生质的变化外，数据采集系统和分析系统均发生了质的变化，主要表现在现在的测试系统高度集成化，即信号采集、数据分析集成在一起。整套测试体系由传感器、测试系统和计算机构成，数据的记录、分析由计算机完成。

#### （四）桥梁动载试验数据的测试与分析

动载试验的难点在数据分析方面，这方面的内容很多，在这里主要讨论、固有频率、阻尼、振型、动挠度和冲击系数。

##### 1、固有频率

桥梁结构固有频率的测定有两种方法：衰减振动波形法和共振波形法。

结构被激振后，桥梁结构产生自由振动，通过测试系统实测记录结构的衰减振动波形。如图 3-19，在记录的振动波形曲线上，依照下式计算出结构的固有频率  $f$ （为消除冲击荷载影响，舍弃开始的一、二个波形，从第三个波形开始计算）



$$f = \frac{L \cdot n}{S} \quad (3-35)$$

$f$ ——结构的固有频率 (次/s)

$L$ ——记录纸速 (mm/s)

$n$ ——波数

$S$ —— $n$  个波长的距离 (mm)

使用激振器时, 使结构产生连续的周期性强迫振动。在激振器振动频率与结构的固有频率一致时, 结构出现共振现象, 振幅达到最大值, 共振波峰处的频率即为结构的固有频率, 如图 3-20 所示 (其中  $A$  为振幅;  $\omega$  为激振器的频率)

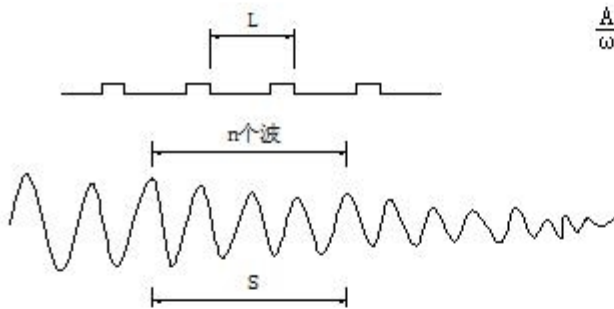


图 3-19 由衰减振动曲线求固有频率

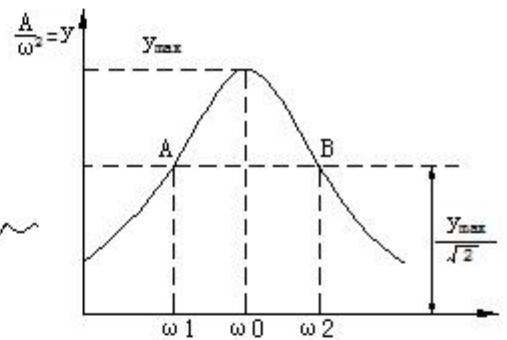


图 3-20 由共振曲线求固有频率

## 2、阻尼比

桥梁结构阻尼的测定有两种方法: 衰减振动波形法和共振波形法。桥梁结构的阻尼特性, 可用对数衰减率  $\delta$ 、阻尼比  $D$ 、阻尼系数  $n$  等来表示。

实测振动衰减曲线如图 3-21 所示, 由振动理论知, 对数衰减率为

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (3-36)$$

$A_i, A_{i+1}$ ——相邻两个波的振幅值, 可直接从衰减曲线上量取

在衰减曲线上量取  $n$  个波形, 可求得平均衰减率  $\bar{\delta}$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{i+n}} \quad (3-37)$$

因为由振动理论，对数衰减率  $\bar{\delta}$  与阻尼比  $D$  的关系为

$$\bar{\delta} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (3-38)$$

且一般材料的阻尼比  $D$  都很小，故得阻尼比计算式

$$D \approx \frac{\bar{\delta}}{2\pi} \quad (3-39)$$

类似地，可利用共振曲线求阻尼系数  $n$ 、阻尼比  $D$ ，如图 3-22 ( $\omega_0$  即结构固有频率)

$$n = \frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_1) \quad (3-40)$$

$$D = \frac{n}{\omega_0} = \frac{1}{2\omega_0(\omega_2 - \omega_1)} \quad (3-41)$$

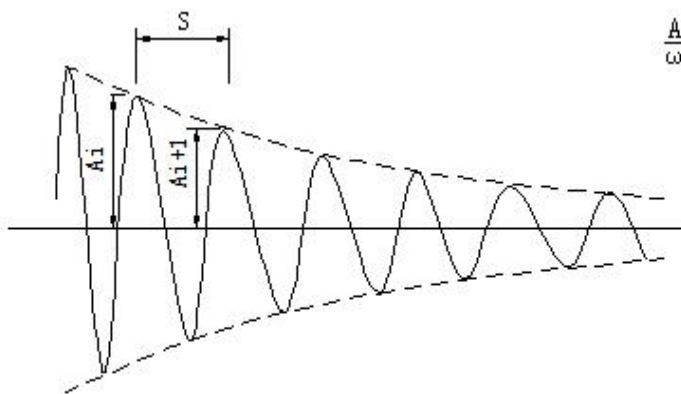


图 3-21 由衰减振动曲线求阻尼特性

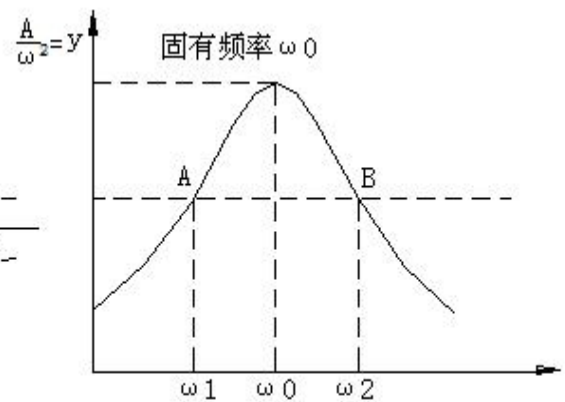


图 3-22 由共振曲线求阻尼特性

### 3、结构振型

结构的振型是其相应于各阶固有频率的振动形式，一个振动系统振型的数目与其自由度数目相等。桥梁结构是一个具有连续分布质量的体系。也就是说，桥梁是一无限多自由度体系，故其固有频率及相应振型也有无限多个。对于一般桥梁结构而言，仅分析其基频（即第一固有频率）即可。对于较复杂的动力问题，也仅需前面几个固有频率。即一般情况下，一次低阶振型才是最重要的。表 3-11 总结了几种有分布质量的梁的振型。

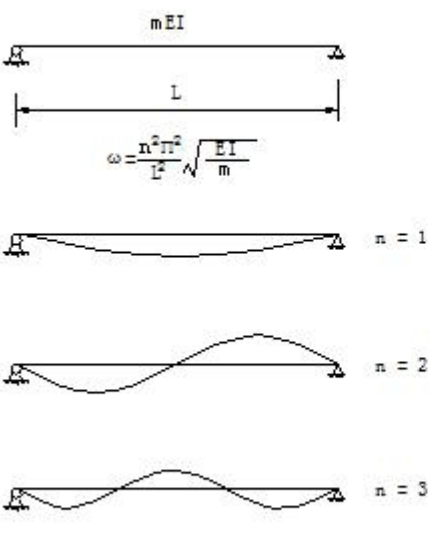
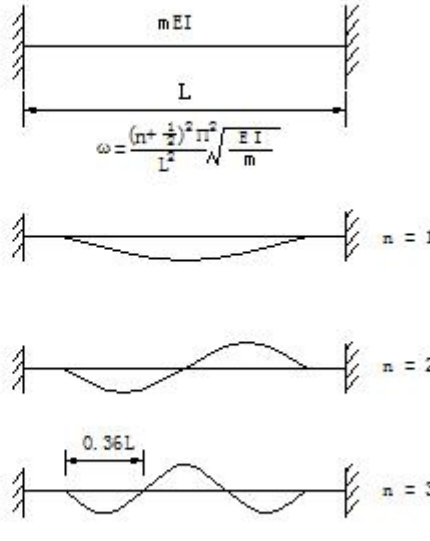
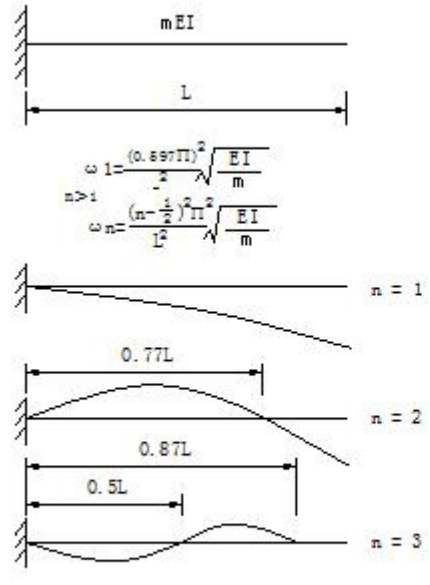
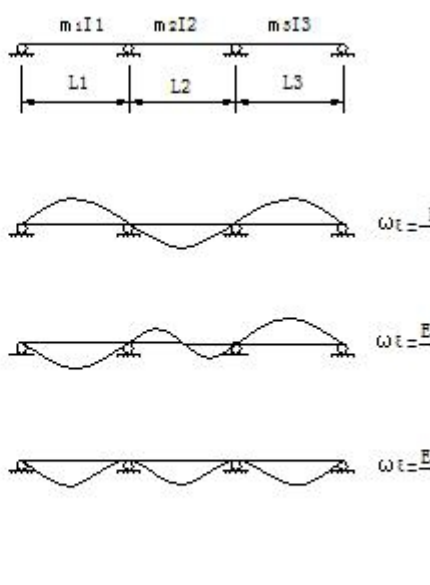
采用共振法测定振型时，将若干传感器安装在桥梁结构各有关部位，当激振装置激发桥梁结构共振时，记录结构各部位的振幅和相位，比较各测点的振幅及相位，即可绘出振型曲线。

振型测试时，传感器测点的布置根据具体结构而定，一般应先根据理论分析，估计振型的大致形状，然后在变位较大的部位布点，连接出振型曲线。

桥梁结构振型的测定可采用多传感器法和单传感器法。多传感器法是在桥梁结构上同时安装许多传感器。该法必须保证预先精确标定所有传感器的灵敏度，在用多路放大器时，还要求放大器特性相同。单传感器法：在桥梁结构只安装一个传感器，但测试时不断改变它的位置，以便测出各点的振幅。该法需对传感器进行多次拆卸和安装，需要有一个作用参考点不能移动的传感器，各次测定值均应同参考点对应比较。现代大型桥梁测试时，常采用个传感器。由于传感器导线有信号衰减问题，长大桥梁试验时要采用多组多个传感器，同时也要设置参考点。

具有分布质量几种梁的振型图

表 3-11

 <p style="text-align: center;"><math>\omega = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}</math></p> <p style="text-align: center;">n = 1</p> <p style="text-align: center;">n = 2</p> <p style="text-align: center;">n = 3</p>	 <p style="text-align: center;"><math>\omega = \frac{(n + \frac{1}{2})^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}</math></p> <p style="text-align: center;">n = 1</p> <p style="text-align: center;">n = 2</p> <p style="text-align: center;">n = 3</p>
<p>a) 简支梁的主振型</p>	<p>b) 固端梁的主振型</p>
 <p style="text-align: center;"><math>\omega_1 = \frac{(0.8927\pi)^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\omega_n = \frac{(n - \frac{1}{2})^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}</math></p> <p style="text-align: center;">n = 1</p> <p style="text-align: center;">0.77L</p> <p style="text-align: center;">n = 2</p> <p style="text-align: center;">0.87L</p> <p style="text-align: center;">0.5L</p> <p style="text-align: center;">n = 3</p>	 <p style="text-align: center;"><math>\omega_1 = \frac{EI\pi^4}{mL^4}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\omega_2 = \frac{EI(0.88)^4}{mL^4}</math></p> <p style="text-align: center;"><math>\omega_3 = \frac{EI(4.50)^4}{mL^4}</math></p>
<p>c) 悬臂梁的主振型</p>	<p>d) 三跨连续梁的主振型</p>

#### 4、冲击系数

桥梁动载试验时，某些部位振动参数如振幅、频率、位移、应力等的测定，可根据试验的具体要求和结构的具体型式布置测点，采用适当的仪表测试。动载作用在结构上产生的动挠度，一般比同样的静载所产生的相应静挠度要大。用动挠度除以静挠度，所得比值即为活载的冲击系数  $1+\mu$ 。因挠度反映了桥跨结构的整体变形，是衡量结构刚度的主要指标，故活载冲击系数综合反映了荷载对桥梁的动力作用。冲击系数  $1+\mu$  与结构型式、车辆速度、桥面平整度等因素有关，故测定时，应使车辆荷载以不同的速度驶过桥梁，并逐次记录跨中挠度的时历曲线，

如图 3-23 所示，可求出冲击系数  $1+\mu$ ：

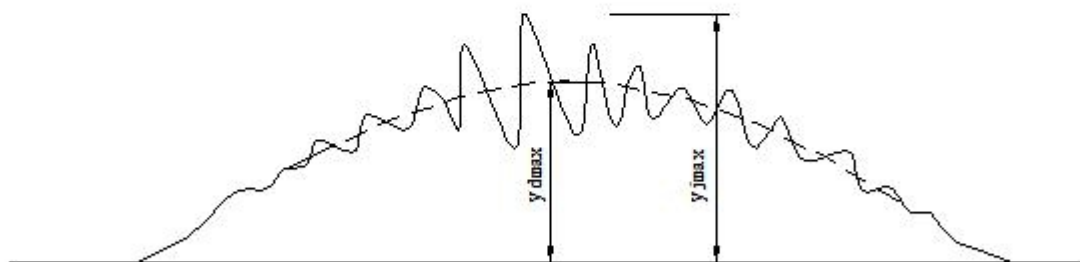


图 3-23 动载作用下结构变形曲线

$$1+\mu = \frac{y_{dmax}}{y_{jmax}} \quad (3-42)$$

$y_{dmax}$ 、 $y_{jmax}$  —— 最大动挠度值、最大静挠度值