

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

交通运输事业的飞速发展，为公路桥梁建设提供了良好的发展机遇。截止到 20 世纪末，我国公路总里程达到 140 万公里，居世界第四位；高速公路总里程达到 1.5 万公里，居世界第三位。已建成永久性公路桥梁 22.5 万余座，总长度达 800 万延米以上。据不完全统计，我国已建成的主跨在 200m 以上的公路、城市、公铁两用桥近 100 余座，其中主跨在 400m 以上的有 30 座，主跨在 600m 以上的有 12 座。我国依靠自己的技术力量，建成了不同结构形式的大跨径悬索桥、斜拉桥、拱桥、连续刚构桥，取得了成功的经验。已建成和即将建成的一批大跨径桥梁，技术复杂，科技含量高，施工难度大，标志着我国桥梁技术已进入世界先进行列。

通过大量的工程建设实践，桥梁设计、施工、监理、科研和检测队伍的素质和实力有较大增强，设计、施工装备已具规模，构造工艺都有创新，桥梁技术水平明显提高。自改革开放以来，特别是近十几年来，公路桥梁建设成就巨大。

在加快公路桥梁建设的同时，必须依靠科技进步，提高工程建设质量。保证新建桥梁的工程质量，是广大桥梁工程建设者义不容辞的责任。竣工验收最有效、最直接的方法就是桥梁荷载试验。

近年来，随着我国交通运输事业的不断发展，大量低等级公路被改建扩建，服役桥梁能否继续使用已成为公路建设决策部门的一件大事。

20 世纪 70 年代以前修建的大量低标准公路桥梁已达到或接近设计基准期。在风、雨、洪水、冰冻、温度变化和湿度等自然因素侵蚀下，甚至在地震、撞击和超载营运的严重损害下，许多桥梁的结构性能发生了巨大变化，有些桥梁已出现不同程度的损伤，甚至其承载能力已大大降低而逐渐演变为危桥，对这类桥梁急需加以综合评定，以便采取相应的技术改造措施或拆除改建等处理方案。同样，实现对服役桥梁结构承载能力评定最有效、最直接的方法也就是桥梁荷载试验。

1.2 荷载试验的目的和意义

桥梁结构荷载试验就是对桥梁结构物进行直接加载测试的一项科学试验工作，其目的是通过荷载试验，了解桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态，从而判断桥梁结构的安全承载能力及评价桥梁的营运质量。对于一些在理论上难以计算的部位，通过荷载试验可达到直接了解其受力状态的目的；通过荷载试验常常有助于发现在一般性检查中难以发现的隐蔽病害；通过荷载试验可以检验桥梁结构的设计与施工质量；通过荷载试验可以确定旧桥结构实际的承载能力，为制定桥梁加固或改建技术方案提供依据。此外，通过对新建桥梁结构的竣工荷载试验以及针对性很强的研究性试验，则可为发展桥梁设计理论和提高施工工艺水平，不断地

积累技术数据并提供科学依据。

桥梁荷载试验是新型桥梁结构性能研究、各类桥梁施工质量与结构承载能力评定工作的重要手段，普及桥梁荷载试验技术，搞好试验工作并作出桥梁结构性能的正确评定，对于推动我国桥梁建设，提高桥梁工程质量，挖掘服役桥梁承载潜能，都具有十分重要的意义。

1.3 荷载试验的任务

桥梁荷载试验的任务是根据试验目的和要求来确定的。一般地说，桥梁荷载试验的主要任务是：

1. 确定桥梁结构的承载能力及营运条件

(1) 对于重要的桥梁结构，除在设计阶段即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桥梁结构的质量和营运条件，分析判断桥梁的实际承载能力。

(2) 对于需改建或加固的桥梁，通过荷载试验可进一步提供桥梁改造技术依据，尤其对于缺少技术资料的旧桥更为重要。

(3) 对于新型桥梁及运用新材料、新工艺等的复杂桥梁结构，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，验证结构计算图式，并探索具有普遍意义的规律，为充实和发展桥梁结构的计算理论和施工工艺积累科学资料。

2. 分析桥梁病害原因及其变化规律

对于遭受到洪水、冰冻、地震、撞击、河床挖坑或冲刷而损伤的桥梁结构或在桥梁建造或使用期间发现有严重缺陷，如过大的变形或裂缝等，常通过桥梁荷载试验进行综合分析研究，提出合理的整治方案和养护措施。

3. 检验桥梁结构的内在质量

对新型桥梁或加固、改建桥梁进行竣工验收鉴定，以对桥梁结构整体受力性能是否达到设计文件和规范标准的要求作出评价，检验预期的设计效果。

1.4 荷载试验的内容和依据

根据试验荷载的作用性质，桥梁荷载试验可分为静载试验和动载试验。

桥梁结构的静载试验和动载试验，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。静载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。动载试验则是研究分析桥梁结构在车辆荷载或其他动力荷载作用下的振动特性所必须的。

在桥梁动载试验中，按作用方式可将动力荷载分为冲击荷载、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，采用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影响因素的综合性技术指标。冲击系数的数值范围一般是通过桥梁动载试验，并

经综合分析研究确定的。

1. 荷载试验的主要内容

桥梁的荷载试验是一项复杂而细致的工作，技术含量高，应根据荷载试验的目的进行认真的调查分析，必要时进行相关理论分析。荷载试验的主要内容为：

- (1) 荷载试验的方案拟定（包括静载试验与动载试验测试项目）；
- (2) 荷载试验的测点设置与测试仪器、设备组配；
- (3) 荷载试验的加载等级控制与试验过程安全控制；
- (4) 试验数据分析与结构性能评定；
- (5) 试验报告编写。

2. 荷载试验的依据

公路桥梁荷载试验应以国家和交通部颁布的有关公路桥涵的法规、技术标准、设计规范为依据进行，对于某些新结构以及采用新材料、新工艺的桥梁，无相关条款规定时，可以借鉴国外或国内其他行业的相关规范、规程的有关规定。我国结构工程的标准和规范可以分为：

(1) 综合基础标准，如《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—92) 是指导制定专业基础标准的国家统一标准。

(2) 专业基础标准 如《公路工程技术标准》(JTJ 001—97)、《公路工程可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)，是指导专业通用标准和专业专用标准的行业统一标准。

(3) 专业通用标准。

(4) 专业专用标准。

公路桥梁荷载试验主要涉及的专业通用标准和专业专用标准有：

专业通用标准：

公路桥涵设计通用规范 (JTJ 021—89)

公路砖石及混凝土桥涵设计规范 (JTJ 022—85)

公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTJ 023—85)

公路桥涵地基与基础设计规范 (JTJ 024—85)

公路桥涵钢结构及木结构设计规范 (JTJ 025—86)

公路工程抗震设计规范 (JTJ 004—89)

公路工程质量检验评定标准 (JTJ 071—98)

公路旧桥承载能力鉴定方法 (试行)(1988)

专业专用标准：

公路斜拉桥设计规范 (试行)(JTJ 027—96)

公路悬索桥设计规范 (正在制定)

大跨径公路桥梁抗风设计规范 (正在制定)

大跨径公路桥梁抗震设计规范 (正在制定)

需要说明的是，上述专业通用标准和专业专用标准有的正在修订之中，进行荷载试验时应按新颁布的标准执行。

1.5 荷载试验的预备工作

一般情况下 桥梁荷载试验应按三个阶段进行 即计划与准备阶段、加载与测试阶段、分析总结阶段。

计划与准备阶段的工作是顺利地进行桥梁荷载试验的必要条件。桥梁荷载试验与桥梁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、研究试验桥梁的有关技术文件，考察试验桥梁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。

荷载试验正式进行之前应做好下列准备工作：

1. 试验孔(或墩、塔)的选择

对多孔桥梁中跨径相同的桥孔(或墩、塔)可选 1~3 孔具有代表性的桥孔(或墩、塔)进行加载试验。选择时应综合考虑以下因素：

- (1)该孔(或墩、塔)计算受力最不利；
- (2)该孔(或墩、塔)施工质量较差、缺陷较多或病害较严重；
- (3)该孔(或墩、塔)便于搭设脚手架、便于设置测点或便于实施加载。

选择试验孔的工作应与制定计划前的调查工作结合进行。

2. 搭设脚手架和测试支架

脚手架和测试支架应分开搭设互不影响，脚手架和测试支架应有足够的强度、刚度和稳定性。脚手架要保证工作人员的安全，方便操作。测试支架要满足仪表安装的需要，不因自身变形影响测试的精度，同时还应保证试验时不受车辆和行人的干扰。脚手架和测试支架设置要因地制宜、就地取材、便于塔设和拆卸，一般采用木支架或建筑钢管支架。当桥下净空较大或为深水河流而不便搭设固定脚手架时，可考虑采用轻便活动吊架，两端用尼龙绳或细钢丝绳固定在栏杆或人行道缘石上。整套设置使用前应进行试验以确保安全，活动吊架如需多次使用可做成拼装式以便运输和存放。

目前国内部分地区已拥有桥梁专用检测车 其突出特点是快速、灵活、方便、安全 可作为桥梁荷载试验移动脚手架使用。

晴天或多云天气下进行荷载试验时，阳光直射下的应变测点应设置遮挡阳光的设施，以减小温度变化造成的测试误差。雨季进行荷载试验时，则应准备仪器、设备等的防雨设施，以备不时之需。

桥下或桥头用活动房或帐篷搭设临时实验室，安放数据采集仪器等，并供测试人员临时办公和看管设备之用。

3. 静载试验加载位置的放样和卸载位置的安排

静载试验前应在桥面上对加载位置进行放样，以便于加载试验的顺利进行。如加载工况

较少、时间允许，可在每次工况加载前临时放样。如加载工况较多，则应预先放样，且用不同颜色的标志区别不同加载工况时的荷载位置。如试验荷载采用载重汽车，一般以汽车后轴或中轴控制荷载位置。

静载试验荷载卸载的安放位置应预先安排。卸载位置的选择既要考虑加卸载方便，离加载位置近一些，又要使安放的荷载不影响试验孔（或墩、塔）的受力，一般可将荷载安放在桥台后一定距离处。对于多孔桥，也可将荷载停放在桥孔上，但一般应停放在距试验孔较远处，以不影响试验测试为度。

4. 试验人员组织及分工

桥梁荷载试验是一项技术性较强的工作，最好能由专门的桥梁试验技术人员来承担，也可由熟悉这项工作的技术人员为骨干组织试验队伍来承担。应根据每个试验人员的特长进行分工，每人分管的仪表数目除考虑便于进行观测外，应尽量使每人对分管仪表进行一次观测所需的时间大致相同。所有参加试验的人员应能熟练运用所分管的仪器设备，否则应在正式开始试验前进行演练。为使试验有条不紊地进行，应设试验总指挥 1 人，其他人员的配备可根据桥梁荷载试验的规模等具体情况考虑。

5. 其他准备工作

荷载试验的安全设施、供电照明设施、通讯联络设施、桥面交通管制等工作应根据荷载试验的需要提前进行准备。

如采用汽车车辆作为试验荷载，应提前预约租用汽车并确定载重物，按试验要求对车辆型号、轴距和轴重力等参数进行测试并记录。

第 2 章 静载试验方法

2.1 试验荷载工况的确定

为了满足鉴定桥梁承载力的要求，试验荷载工况的选择应反映桥梁结构的最不利受力状态。简单结构可选 1~2 个工况，复杂结构可适当多选几个工况，但不宜过多。在进行各荷载工况布置时，可参照截面内力（或变形）影响线进行，一般设两三个主要荷载工况，同时可根据试验桥梁结构体系的具体情况再设若干个附加荷载工况，但主要荷载工况必须保证。下面给出常见桥型的试验荷载工况。

1. 简支梁桥试验荷载工况

(1) 主要工况

跨中最大正弯矩工况。

(2) 附加工况

$l/4$ 截面最大正弯矩工况；

支点最大剪力工况；

桥墩最大竖向反力工况。

2. 连续梁桥试验荷载工况

(1) 主要工况

主跨支点最大负弯矩工况；

主跨跨中最大正弯矩工况。

(2) 附加工况

边跨最大正弯矩工况；

主跨桥墩最大竖向反力工况；

主跨支点最大剪力工况。

3. 悬臂梁桥 T 形刚构桥 试验荷载工况

(1) 主要工况

墩顶支点最大负弯矩工况；

锚固孔跨中最大正弯矩工况。

(2) 附加工况

墩顶支点最大剪力工况；

挂孔跨中最大正弯矩工况；

桥墩最大竖向反力工况。

4. 连续刚构桥试验荷载工况

(1) 主要工况

主跨墩顶最大负弯矩工况；

主跨跨中最大正弯矩工况。

(2) 附加工况

墩顶支点最大剪力工况；

边跨最大正弯矩工况；

桥墩台最大反力工况。

5. 无铰拱桥试验荷载工况

(1) 主要工况

拱顶最大正弯矩工况；

拱脚最大负弯矩工况。

(2) 附加工况

拱脚最大水平推力工况；

$l/4$ 截面最大正弯矩和最大负弯矩工况；

$l/4$ 截面正负挠度绝对值之和最大工况。

6. 两铰拱桥试验荷载工况

(1) 主要工况

拱顶最大正弯矩工况；

拱脚最大水平推力工况。

(2) 附加工况

$l/4$ 截面最大正弯矩和最大负弯矩工况；

$l/4$ 截面正负挠度绝对值之和最大工况。

7. 斜拉桥试验荷载工况

(1) 主要工况

主梁中孔跨中最大正弯矩工况；

主梁墩顶支点最大负弯矩工况；

主塔塔顶纵桥向最大水平变位与塔脚截面最大弯矩工况。

(2) 附加工况

中孔跨中附近拉索最大拉力工况；

主梁最大挠度工况；

辅助墩最大竖向反力工况。

8. 悬索桥试验荷载工况

(1) 主要工况

加劲梁跨中最大正弯矩工况；

加劲梁 $l/8$ 截面最大正弯矩工况；
主塔塔顶纵桥向最大水平变位与塔脚截面最大弯矩工况。

(2) 附加工况

加劲梁最大竖向挠度工况；
主缆锚跨索股最大张力工况；
加劲梁梁端最大纵向漂移工况；
吊杆（索）活载张力最大增量工况。

9. 组合体系桥试验荷载工况

(1) 主要工况

根据组合体系所呈现的主要力学特征，结合上述各类桥梁主要工况综合确定。

(2) 附加工况

根据组合体系所呈现的主要力学特征，结合上述各类桥梁附加工况综合确定。

此外，对桥梁施工中的薄弱截面或缺陷修补后的截面，或者旧桥结构损坏部位、比较薄弱的桥面结构，可以专门进行荷载工况设计，以检验该部位或截面对结构整体性能的影响。

对于梁式结构（简支梁、连续梁、T构、连续刚构等）的最大挠度工况，一般与最大正弯矩工况相同。

使用车辆加载而又未安排动载试验项目时，可在静载试验项目结束后，将加载车辆多辆车则相应地进行排列，沿桥长慢速行驶一趟，以全面了解荷载作用于桥面不同部位时结构的承载状况。

2.2 试验荷载等级的确定

1. 控制荷载的确定

为了保证荷载试验的效果，必须先确定试验的控制荷载。控制桥梁设计的活荷载有下列几种：

- (1) 汽车和人群（标准计算荷载）；
- (2) 挂车或履带车（标准验算荷载）；
- (3) 需通行的特殊重型车辆。

分别计算设计时所采用的控制荷载或由试验目的所决定的荷载对结构控制截面产生的内力（或变形）的最不利值并进行比较，取其中最不利者对应的荷载作为控制荷载。

荷载试验应尽量采用与控制荷载相同的荷载，而组成控制荷载（标准设计荷载）的车辆是由运管车辆统计而得的概率模型。当客观条件所限，采用的试验荷载与控制荷载有差别时，为保证试验效果，在选择试验荷载的大小和加载位置时采用静载试验效率 η_q 进行控制。

2. 静载试验效率

静载试验效率为：

$$\eta_q = \frac{S_s}{S} \quad (2-2-1)$$

式中： S_s ——静载试验荷载作用下控制截面内力计算值；

S ——计入冲击系数 $(1 + \mu)$ 的控制荷载作用下控制截面最不利内力计算值；

其中： μ ——按规范采用的冲击系数，平板挂车、履带车和重型车辆取 $\mu = 0$ 。

η_q 值可采用 0.8~1.05，当桥梁的调查、检算工作比较完善而又受加载设备能力所限， η_q 值可采用低限；当桥梁的调查、检算工作不充分，尤其是缺乏桥梁计算资料时， η_q 值应采用高限。总之，应根据前期工作的具体情况来确定 η_q ，一般情况下 η_q 值不宜小于 0.95。

荷载试验宜选择在温度稳定的季节和天气条件下进行。当温度变化对桥梁结构内力的影响较大时，应选择温度内力较不利的季节进行荷载试验，否则应考虑用适当增大静载试验效率 η_q 来弥补温度影响对结构控制截面产生的不利内力。

当控制荷载为挂车或履带车而采用汽车荷载加载时，考虑到汽车荷载的横向应力增大系数较小，为了使截面的最大应力与控制荷载作用下载面最大应力相等，可适当增大静载试验效率 η_q 。

2.3 加载方式及设备的选择

1. 静载加载分级与控制

为了加载安全和了解结构应变和变位随试验荷载增加的变化关系，对桥梁荷载试验各主要工况的加载应分级进行，而且一般安排在开始的几个加载程序中执行。附加工况一般只设置最大内力加载程序。

1) 分级控制的原则

(1) 当加载分级较为方便时，可按最大控制截面内力荷载工况均分为 4~5 级。

(2) 当使用载重车加载，车辆称重有困难时也可分成 3 级加载。

(3) 当桥梁的调查和验算工作不充分，或桥况较差，应尽量增多加载分级。如限于条件，加载分级较少时，应注意每级加载时，车辆荷载应逐辆缓缓驶入预定加载位置，必要时可在加载车辆未到达预定加载位置前分次对控制测点进行读数监控，以确保试验安全。

(4) 在安排加载分级时，应注意加载过程中其他截面内力亦应逐渐增加，且最大内力不应超过控制荷载作用下的最不利内力。

(5) 根据具体条件决定分级加载的方法，最好每级加载后卸载，也可逐级加载达到最大荷载后逐级卸载。

2) 车辆荷载加载分级的方法

(1) 逐渐增加加载车辆数。

(2) 先上轻车后上重车。

(3) 加载车位于内力影响线的不同部位。

(4) 加载车分次装载重物。

以上各法亦可综合采用，以方便加载分级实施。

3) 加卸载的时间选择

为了减少温度变化对试验造成的影响，加载试验时间以 22:00 至早晨 6:00 为宜，尤其是采用重物直接加载，加卸载周期比较长的情况下只能在夜间进行试验。对于采用车辆等加卸载迅速的试验方式，如夜间试验照明等有困难时亦可安排在白天进行试验，但在晴天或多云的天气下进行加载试验时每一加卸载周期所花费的时间不宜超过 20min。

4) 加载分级的计算

根据各荷载工况的加载分级，按弹性阶段计算结构各测点在不同荷载等级下的理论计算

变位（或应变），以便对加载试验过程进行分析和控制。计算采用的材料弹性模量，如已做材料试验的用实测值，未做材料试验的可按规范规定取值。

2. 加载设备的选择

静载试验加载设备可根据加载要求及具体条件选用，一般有以下两种加载方式：

(1) 可行式车辆。

可选用装载重物的汽车或平板车，也可就近利用施工机械车辆。选择装载的重物时，要考虑车厢能否容纳得下，装载是否方便。装载的重物应置放稳妥，以避免车辆行驶时因摇晃而改变重物的位置。

采用车辆加载优点很多，如便于调运和加载布置，加卸载迅速等。采用汽车荷载既能做静载试验又能做动载试验，这是目前较常采用的一种方法。

(2) 重物直接加载。

一般可按控制荷载的着地轮迹先搭设承载架，再在承载架上堆放重物或设置水箱进行加载。如加载仅为满足控制截面内力要求，也可采取直接在桥面堆放重物或设置水箱的方法加载。承载架的设置和加载物的堆放应安全、合理，能按要求分布加载重量，并不使加载设备与桥梁结构共同承载而形成‘卸载’现象。

重物直接加载准备工作量大，加卸载所需周期一般较长，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试验。

此外，其他一些加载方式也可根据加载要求因地制宜采用。

3. 加载物重力的称量

可根据不同的加载方法和具体条件选用以下方法对所加重物的重力进行称量：

(1) 称重法。

当采用重物直接在桥上加载时，可将重物化整为零称重后按逐级加载要求分堆置放，以便加载取用。

当采用车辆加载时，可将车辆逐轴驶上称重台进行称重。如没有现成可供利用的称重台，可自制专用称重台进行称重。

(2) 体积法。

如采用水箱加载，可通过量测储水体积来换算储水的重力。

(3) 综合计算法。

根据车辆出厂规格确定空车轴重（注意考虑车辆零配件的更换和添减汽油、水、乘员重力的变化），再根据装载重物的重力及其重心将其分配至各轴。装载物最好采用外形规则的物体整齐码放，或采用松散均匀材料（如砂子等）在车厢内摊铺平整，以便准确确定其重心位置。

无论采用何种方法确定加载物重力，均应做到准确可靠，其称量误差最大不得超过 5%。最好能采用两种称量方法互相校核。

2.4 测点设置

1. 主要测点的布设

布设的测点不宜过多，但要保证观测质量。有条件时，同一测点可用不同的测试方法进行

校对。一般情况下，对主要测点的布设应能控制结构的最大应力（应变）和最大挠度（或位移）。几种常用桥梁体系的主要测点布设如下：

(1) 简支梁桥

跨中挠度 支点沉降 跨中截面应变。

(2) 连续梁桥

跨中挠度，支点沉降，跨中和支点截面应变。

(3) 悬臂梁桥（T形刚构桥）

悬臂端部挠度，支点沉降，支点截面应变。

(4) 无铰拱桥

跨中与 $1/4$ 处挠度 拱顶、 $1/4$ 和拱脚截面应变。

(5) 斜拉桥

主梁中孔跨中挠度 支点沉降 跨中截面应变 塔顶纵桥向最大水平位移 塔脚截面应变。

(6) 悬索桥

加劲梁跨中与 $1/8$ 和 $3/8$ 处挠度 支点沉降 跨中与 $1/8$ 和 $3/8$ 处截面应变 塔顶纵桥向最大水平位移，塔脚截面应变。

(7) 组合体系桥

根据组合体系所呈现的主要力学特征，结合上述各类桥梁的主要测点布设综合确定测点位置。

挠度 变位 观测点 对于整体式梁桥，一般对称于桥中轴线布设。截面设单点时，布置在桥中轴线上，截面设双点时，布置在梁底或梁顶面两侧，其横向间距尽可能大一些；对于多梁式桥，可在每梁底布置一个或两个测点；对于索塔，一般布置在索塔纵桥向对称面相应位置。截面抗弯应变测点应设置在截面横桥向应力可能分布较大的部位，沿截面上、下缘布设，横桥向测点设置一般不少于 3 处，以控制最大应力的分布。

当采用测定混凝土表面应变的方法来确定钢筋混凝土结构中钢筋承受的拉力时，考虑到混凝土表面已经可能产生的裂缝对观测的影响，测点的位置应合理进行选择。如凿开混凝土保护层直接在钢筋上设置拉应力测点，则在试验完后必须修复保护层。

2. 附加测点的布设

根据桥梁调查和检算工作的深度，综合考虑结构特点和桥梁目前状况等可适当加设以下测点：

- (1) 挠度沿桥长或沿控制截面桥宽方向分布；
- (2) 应变沿控制截面桥宽方向分布；
- (3) 应变沿截面高度分布；
- (4) 组合构件的结合面上、下缘应变；
- (5) 墩台的沉降、水平位移与转角，连拱桥多个墩台的水平位移；
- (6) 剪切应变；
- (7) 其他结构薄弱部位的应变；
- (8) 裂缝的监测。

一般应实测控制截面的横向应力增大系数。当结构横向联系构件质量较差，连接较弱时，则必须测定控制截面的横向应力增大系数。简支梁跨中截面横向应力增大系数的测定，既可

采用观测跨中沿桥宽方向应变变化的方法，也可采用观测跨中沿桥宽方向挠度变化的方法进行计算或用两种方法互校。

对于剪切应变测点一般采取设置应变花的方法进行观测。为了方便，对于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，即设在自梁底支承线与水平成 45°方向斜线与截面中性轴的交点上。

3. 温度测点的布设

选择与大多数测点较接近的部位设置 1~2 处气温观测点。此外，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，尤其对于温度敏感的大跨径索支承体系桥梁，宜沿跨径长度方向多设置一些气温观测点。

2.5 测试仪器设备

桥梁静载试验时 需要量测结构的反力、应变、位移、倾角和裂缝等物理量 应选择适当的仪器进行量测。常用的量测仪器有百分表、千分表、位移计、应变计(应变片)应变仪、精密水准仪、经纬仪、全站仪、倾角仪和刻度放大镜等。这些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。机械式仪器具有安装与使用方便、迅速和读数可靠的优点，但需要搭设观测脚手架，而且需用试验人员较多，观测读数费时，不便于自动记录。电测仪表安装调试比较麻烦，影响测试精度的因素也较多，但测试和记录均较方便，便于数据自动采集记录。荷载试验应根据测试内容和量测值的大小选择仪器，试验前应对测试值进行理论分析估计，以便选择仪器的精度和量测范围。静载试验常用测试仪器的使用精度和量测范围见表 2-5-1。

静 载 试 验 常 用 仪 表 及 适 用 范 围 表 2-5-1

量测内容	仪表名称	最小分画值	适用量测范围	备 注
应变	千分表	2×10^{-6}	$50 \times 10^{-6} \sim 2000 \times 10^{-6}$	需配附件
	杠杆引伸仪	2×10^{-6}	$50 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$	需配附件
	手持应变仪	5×10^{-6}	$100 \times 10^{-6} \sim 20000 \times 10^{-6}$	需配表脚
	电阻应变仪	1×10^{-6}	$50 \times 10^{-6} \sim 5000 \times 10^{-6}$	需贴电阻片
位移或挠度	千分表	0.001mm	0.1 ~ 0.8mm	需配表座及吊架
	百分表	0.01mm	0.3 ~ 8mm	需配表座及吊架
	百分表(长标距)	0.01mm	0.3 ~ 25mm	需配表座及吊架
	挠度计	0.1mm	> 1mm	需配表座及钢丝
	精密水准仪	0.1mm	> 2mm	需配特制水准尺
	电阻应变位移计	0.01mm	0.3 ~ 25mm	需配表座
倾角	经纬仪	0.5mm	> 2mm	需配短尺
	水准式倾角仪	2.5"	20" ~ 1°	需固定支架
裂缝	刻度放大镜	0.05mm	0.05 ~ 5mm	需搭脚手架

1. 机械式仪表量测装置

机械式仪表的量测装置一般由机械式仪表即百分表（位移计）、千分表、挠度仪和引伸仪等与适当的夹具和连接装置组合，直接量测结构物在荷载作用下的位移和应变。其中百分表（位移计）的基本构造如图 2-5-1 所示，千分表结构与百分表（位移计）基本相同，它们与其他附属装置配套后可用于量测位移、应变、力及倾角等。

1) 接触式位移量测装置

接触式位移量测装置是由百分表（位移计）等与夹具（各种形式的磁力表架）组合而成，如图 2-5-2 所示，其中百分表（位移计）的量测性能见表 2-5-1。

应用接触式位移计量测装置测读挠度时应注意下列几个问题：

(1) 作为固定位移计的不动点支架必须具有足够的刚性。采用磁性或万能百分表架时，表架连杆不可挑出太长。

(2) 位移计测杆与所量测的位移方向完全一致。测点表面需经一定处理，如在混凝土、石料等表面粘贴小块玻璃片或金属薄片等，以避免结构变形后由于测点垂直于百分表测杆方向的位移而使位移计产生误差。如果上述方式还不足以消除误差，则不宜采用此量测方法。

(3) 位移计使用前后要仔细检查测杆上下活动是否灵活，并及时清洁。

(4) 位移计使用日久或经过拆洗修理后必须经过标定。标定可以使用更高精度的百分表或千分表进行。

2) 张线式位移量测装置

张线式位移量测装置是由百分表（位移计）与张线钢丝等组成，如图 2-5-3 所示。张线钢丝直径一般选用 0.3~0.5mm，其一端接在桥梁结构的测点上，另一端悬吊适当的重物，百分表（位移计）通过夹具和钢丝相连接。结构受荷载后产生位移，引起钢丝上下移动，钢丝则带动位移计测杆移动，随指针转动即可测读位移变化量。

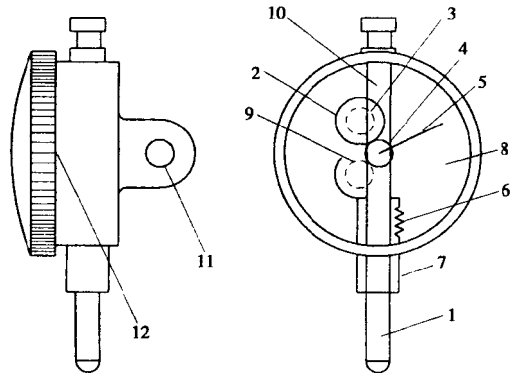


图 2-5-1 百分表构造示意

1-测杆；2-小齿轮；3-扇形齿轮；4-中央齿轮；5-长针；6-弹簧；7-轴颈；8-壳体；9-扇形齿轮；10-平齿；11-孔环；12-表盘

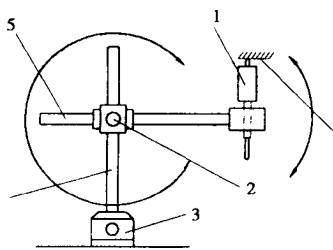


图 2-5-2 接触式位移量测装置

1-位移计；2-弹簧夹具；3-底座；4-竖杆；5-横杆；6-结构上的测点

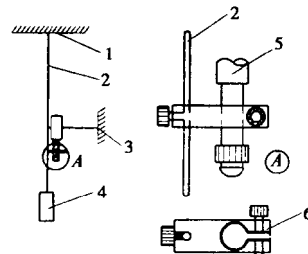


图 2-5-3 张线式位移量测装置

1-结构上的测点；2-细钢丝；3-不动点；4-重物；5-位移计测杆；6-夹具

3)机械式应变测量装置

机械式应变测量装置一般由千分表和特制的夹具组成，如图 2-5-4 所示。固定千分表和顶杆的夹具可用钢、铜或铝合金等制成，按照选定的标距以粘贴或预埋的方式固定在结构需测量应变部位的表面处。

粘贴是最常用的固定方式。在混凝土结构表面上粘贴夹具时，应先将混凝土表面用砂轮机打磨，除去泥灰后再用细砂布略为磨光，用丙酮等擦净，随后用胶粘剂将夹具按选定的标距粘上，待胶固化后即可安装千分表进行量测。

机械式应变测量装置主要用于量测结构构件的轴向应变。常用的量测标距对混凝土为 10~20cm，对砖石砌体则更大。当应变值变化范围很大或需用大标距测定应变时，采用这种装置是非常合适的。

应该指出，对受荷后会发生曲率变化的构件，不宜采用机械式应变测量装置来测定其表面的应变。仅当构件截面变形满足平截面假定且曲率变化很小时，才能从机械式应变测量装置所测读的虚应变（又称视应变）值推算出实际应变。

4)手持式应变仪

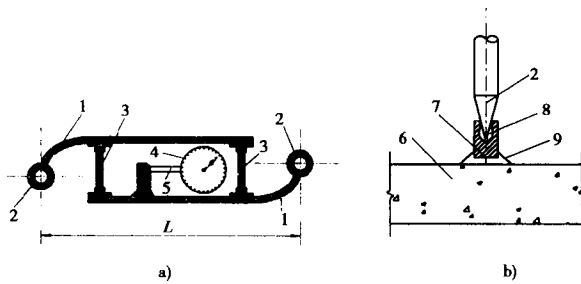


图 2-5-5 手持式应变仪

1.刚性金属杆 2.插足 ;3.薄钢片 4.位移计 ;5.位移计测杆 6.试件 ;7.小点 .
金属块 ;8.孔穴 ;9.粘贴剂

器的插轴钢夹相吻合。

钻孔与插轴钢夹相吻合，可以保证钢夹与测孔的接触相对稳定，以便减少读数误差，保证测读的准确性。测孔制作如图 2-5-6 所示，其中图 a)表示用在圬工结构上的粘贴式钢脚标，钻孔要求同图 b)；图 b)表示直接在钢结构杆件上钻孔。

(2)采用横向温度补偿法消除温度变化的影响。

在长期量测过程中，初读数和加载读数不可能在同一温度条件下读取，因此，在量测读数中不仅包含了受载应变 ϵ_p ，而且还包含了温度应变 ϵ_t 。为了从

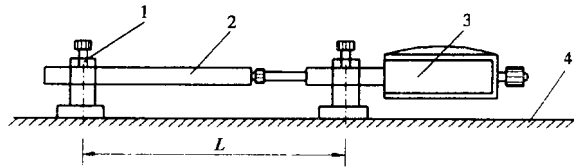


图 2-5-4 机械式应变测量装置

1-金属夹具 2-顶杆 ;3.位移计 ;4.试件

手持式应变仪也是一种用千分表量测应变的仪器，如图 2-5-5 所示。其特点是不用固定安装在结构测点上，使用时可临时安装在各测点上进行测试，用后收起，并能保持数据的连续性，适用于现场较长期连续地观测结构应变的场合。

使用手持式应变仪应注意下面几

(1) 标距两端的测孔必须钻得和仪器

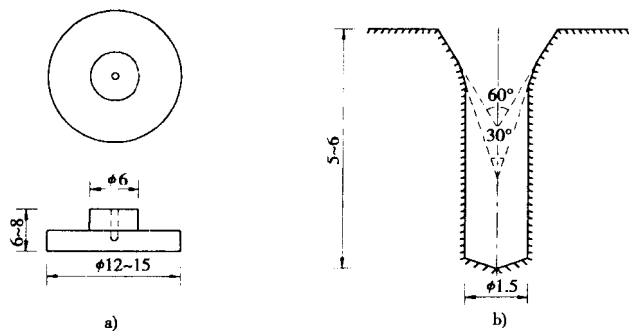


图 2-5-6 测孔制作 (尺寸单位 mm)

读数中扣除温度部分的影响，就要在量测过程中进行“温度补偿”。在布置应变测点的同时，在与之垂直的方向布置温度补偿测点，如图 2-5-7 所示。

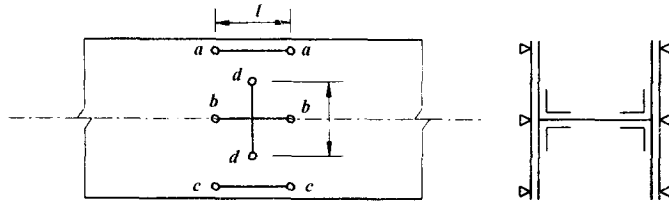


图 2-5-7 横向温度补偿测点布置

测点 $a-a$ 、 $b-b$ 和 $c-c$ 分别为杆件应变测点， $d-d$ 为温度补偿测点，它垂直于应变测点，且在杆件中部。当对测点 $a-a$ 、 $b-b$ 和 $c-c$ 进行读数时，也对测点 $d-d$ 进行读数，于是有：

$$\left. \begin{aligned} \epsilon'_{a} &= \epsilon_{a} + \epsilon_{t} \\ \epsilon'_{b} &= \epsilon_{b} + \epsilon_{t} \\ \epsilon'_{c} &= \epsilon_{c} + \epsilon_{t} \\ \epsilon'_{d} &= \epsilon_{t} - \nu\epsilon_{b} \end{aligned} \right\} \quad (2-5-1)$$

式中： ν ——材料泊松比；

ϵ_{t} ——温度应变；

ϵ'_{a} 、 ϵ'_{b} 、 ϵ'_{c} 和 ϵ'_{d} ——分别为 $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 和 $d-d$ 测点的仪表应变读数。

求解上述联立方程组可得：

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{t} &= \frac{\nu\epsilon'_{b} + \epsilon'_{d}}{1 + \nu} \\ \epsilon_{a} &= \epsilon'_{a} - \frac{\nu\epsilon'_{b} + \epsilon'_{d}}{1 + \nu} \\ \epsilon_{b} &= \frac{\epsilon'_{b} - \epsilon'_{d}}{1 + \nu} \\ \epsilon_{c} &= \epsilon'_{c} - \frac{\nu\epsilon'_{b} + \epsilon'_{d}}{1 + \nu} \end{aligned} \right\} \quad (2-5-2)$$

将各测点实测的结果代入上式，即可求得结构在消除温度影响后的实际受力应变值。

(3) 专人使用手持式应变仪。

手持式应变仪操作较为简单，但量测的精度会随操作人员和每次操作方式的改变而改变。因此，量测时不宜更换使用者，并要保持仪器与试件表面垂直，每次对仪器施加的压力要尽量相等，且使仪器插足时应在同一孔穴等，以减少量测误差。

5) 机械式转角量测装置

转角的量测系统有两种，一种是用倾角仪及夹具组成的量测系统；另一种是利用两个位移计及相应夹具组成的量测系统，均可以进行结构截面、桁架节点、支座等处的转角测试。

图 2-5-8 所示为水准管式倾角仪的构造，其原理是利用高灵敏度的水准管来测定结构节点、截面或支座处的转角。将仪器用夹具 5 安装在测点后，用微调螺丝使水准管的气泡调平居中，结构变形后气泡漂移，再转动微调螺丝使气泡重新居中，度盘上前后两次读数差即代表该测点的转角。这种仪器最小读数有的可达 $1'' \sim 2''$ ，量程为 3° 。其优点为尺寸小、精度高、使用简便；缺点是受外界温度影响很大，且不宜受阳光曝晒，以免水准管爆裂。

图 2-5-9 所示为由位移计组成的转角量测装置。结构受力变形后测得 A、B 两点处的位移 a_1 、 a_2 则该截面的转角为：

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_2 - a_1}{l} \quad (2-5-3)$$

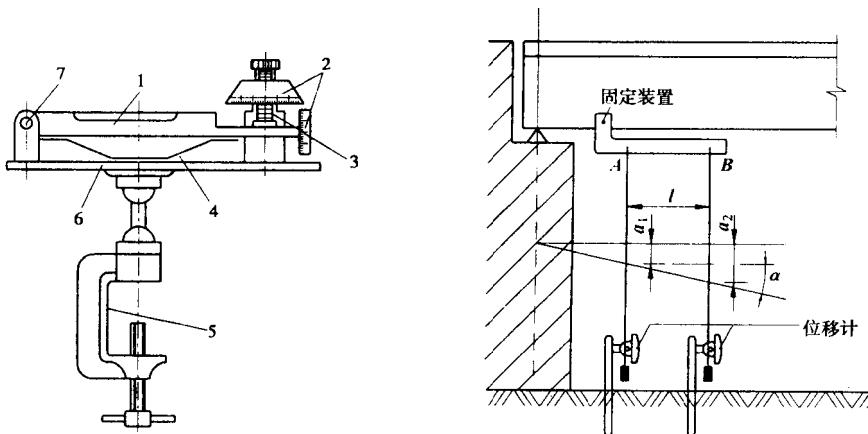


图 2-5-8 水准管式倾角仪构造示意图 2-5-9 位移计组成的转角量测装置

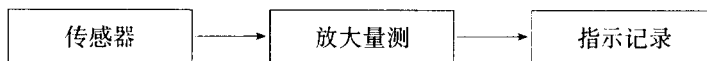
1-水准管;2-刻度盘;3-微调螺丝;4-弹

簧片;5-夹具;6-基座;7-活动铰

由机械式仪表组成的量测装置量测准确度高，对环境适应力强，有一定的灵敏度，使用简单，工作可靠，可重复使用，且较经济耐用，其性能在许多方面都能满足结构试验的要求。因此，机械式仪表组成的量测装置是静载试验中常用的量测仪器。

2. 电测式量测装置

静载试验所用的电测式量测装置主要是指由传感器（电阻应变片、应变计）等测试元件将结构位移或应变等机械量转换成电信号，通过放大和接收将电信号又以机械量值给出量测值的一种量测系统。这种量测装置基本上由三部分组成，即：



电测方法能高效率、准确地量测结构表面、内部各部位的变形和其他参数的变化，可以远距离操纵并自动记录。因此，电测技术在桥梁荷载试验中获得了广泛的应用。

1) 电阻应变片

电阻应变片又称电阻应变计，简称应变片或电阻片，它是非电量电测中最重要的变换器，与其他测试方法比较，有如下的一些优点：

灵敏度高。

由于利用电阻片将非电量转换为电量，再经电子仪器进行放大、显示和记录，所以能获得很高的放大倍数，从而达到很高的灵敏度。

电阻片尺寸小且粘贴牢固。

对于结构十分紧凑以至其他量测仪表（如杠杆引伸仪）根本无法安装的情况，电测法就能发挥更大的作用。电阻片尺寸小的另一个重要意义在于可以用来量测局部应力。现在电阻片

的标距甚至可以小于 1mm，这对于应力集中区的量测比较合适。

电阻片质量小。

这是一个突出的优点，它使得电测不仅可以作静态应力的量测，而且可以在动态应力分析方面发挥独特的作用。应变片的基长可以制作得很短，并且有很高的频率响应能力，因此在应变梯度较大的构件上量测时仍能获得一定的准确度，在高频动应变量测中具有很好的动态响应。

使用环境较宽松。

可以在高温（80~100℃）、低温（-100~-70℃）等特殊条件下成功使用。

此外，由于应变片输出的是电信号，就易于实现量测数字化和自动化。应变片已在桥梁荷载试验中得到了最广泛的应用。

应变片电测法的主要缺点是粘贴工作量大，重复使用困难等。为克服这些缺点，人们利用电阻应变片的工作原理，通过某种转换器间接地测定出被量测的数值，这种转换器称为电阻式应变传感器。

(1) 电阻应变片的构造

电阻片一般由敏感丝栅、底基、覆盖层、引出线等组成如图 2-5-10 所示。其中在电阻片两端电阻丝圆心的间距 l 称为电阻片的标距，最外侧两电阻丝间的距离 b 称为电阻片的宽度。

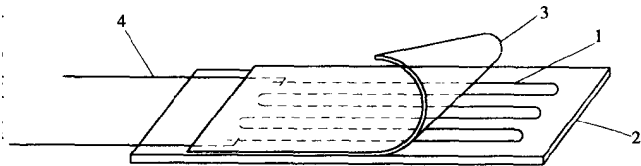


图 2-5-10 电阻应变片的构造

1-敏感丝栅；2-底基；3-覆盖层；4-引出线

敏感丝栅是应变片的主体，一般由康铜、镍铬或镍铬铝合金制成，直径为 0.02~0.05mm。为了使应变片有足够的电阻值，常把一定长度的电阻丝做成栅状。

底基和覆盖层起定位和保护敏感丝的作用，并使之和被测试件之间绝缘。常用的有纸基和胶基两种。纸质底基一般用厚度为 0.015~0.020mm 的机械强度高、绝缘性好的纸张制作，胶基是用性能稳定、绝缘度高、耐腐蚀的聚合胶制成，可长期稳定工作。

引出线是用来连接量测导线的，一般使用直径约为 0.15~0.30mm 的镀银、镀锡的软铜线，在制造应变片时与电阻丝焊接在一起。

粘结剂把丝栅牢固地粘贴在底基和覆盖层之间，使三者形成一个整体。

(2) 电阻应变片的种类

应变片的种类很多，至今各种规格的应变片已有两万多种。在桥梁荷载试验中，目前常用的电阻应变片有以下几种：

金属丝式应变片。

金属丝式应变片中最常用的形式为丝绕式，又称为圆角线栅式，如图 2-5-11 所示。它的制造设备和技术都较简便，但横向灵敏度较箔式应变片为大（横向灵敏度会给量测带来一定的误差）。金属丝式应变片常用的金属材料是康铜、镍铬合金、铁镍铬合金和铂铱合金等，多为纸基应变片。

② 短接式应变片。

短接式应变片是在一排拉直的平行电阻丝之间预定的标距上，用较粗的导线相间地造成短路如图 2-5-12 所示。它的制造设备和技术都更为简便，突出优点在于其几何形状比较容易保证，横向效应系数接近于零。纸基和胶基应变片均常用。