



普通高等教育土建类规划教材

# 道桥检测 技术

● 董祥 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育土建类规划教材

# 道桥检测技术

主 编 董 祥  
副主编 卢成江 袁玉卿  
参 编 程有坤 葛文璇 李丽慧 梅 健  
王继果 沈 正 张 伟 段影娜

机械工业出版社

本书系统论述了道路与桥梁工程检测技术。全书共分为7章, 主要内容包  
括: 道桥工程检测基础知识、道桥工程原材料检测、路基工程现场检测、  
路面工程现场检测、道路附属设施与交通工程设施检测、桥梁结构检测、  
桥梁荷载试验等。

本书根据现行技术标准和试验规程编写, 主要针对公路路基路面工程  
及公路桥梁工程, 兼顾城市道路与桥梁工程。本书内容系统全面, 既介绍  
试验规程, 又不乏对重点检测技术的深入分析, 可以满足不同层次读者的  
需求。

本书不仅可作为高等学校道路工程、机场工程、桥梁工程、市政工程、  
土木工程等专业的本科生教材, 还可供相关专业研究生或高职生使用;  
也可供从事道桥设计、施工、监理、科研的工程技术人员学习参考, 并  
可用作交通、市政行业试验检测人员的职业培训教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

道桥检测技术/董祥主编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 5

普通高等教育土建类规划教材

ISBN 978-7-111-33339-5

I. ①道… II. ①董… III. ①道路工程—检测—  
高等学校—教材②桥梁工程—检测—高等学校—教材  
IV. ①U41②U446

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 018715 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 马军平 责任编辑: 马军平 臧程程 刘涛

版式设计: 张世琴 责任校对: 陈延翔

封面设计: 张静 责任印制: 乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·27 印张·668 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-33339-5

定价: 49.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着近年来我国交通基础设施建设的蓬勃发展，道路与桥梁建设无论是在数量上还是质量上均取得了很大成绩。新材料和新工艺在道桥工程中的应用呈现加速化趋势，一方面促进了建设水平的提高，另一方面也对包括检测技术在内的工程技术提出了更高的要求。

自 2002 年至今，我国交通行业的技术标准和试验规程修订频繁。道路与桥梁工程专业是一个实践性很强的专业，该专业的本科生必须牢固掌握常用的工程检测技术，并熟悉现行标准、规程及其修订的精神实质。为体现近年来标准修订的变化及其对道桥检测技术的影响，我们根据现行标准编写了本书。

本书作为本科生的工程检测类教材，不能不引介现行标准的条文，但不能简单地退化为规程汇编。为此，我们在撰写过程中，在详细介绍检测方法的基础上，对于关键性检测技术力求讲清该项检测有何工程意义（如果不严格检测易导致何种工程问题），检测指标反映了什么，我国现行检测方法还存在哪些问题，国外有哪些先进的检测方法（我国方法的改进方向是什么）等。即不仅让学生学习如何进行试验检测，也要引导他们思考为何要进行某项检测，以及如何改进等更为深入的问题。

本书主要针对公路路基路面工程和公路桥梁工程，同时兼顾到城市道路与桥梁工程的内容，共包括 7 章，分别为：道桥工程检测基础知识、道桥工程原材料检测、路基工程现场检测、路面工程现场检测、道路附属设施与交通工程设施检测、桥梁结构检测、桥梁荷载试验等。各章撰写分工如下：第 1 章由李丽慧编写；第 2 章第 2.1 节由王继果和张伟共同编写，第 2.2 节和第 2.3 节由程有坤编写，第 2.4 节、第 2.6 节和第 2.7 节由董祥编写，第 2.5 节由段影娜和沈正共同编写，第 2.8 节由葛文璇编写；第 3 章由袁玉卿编写；第 4 章由卢成江编写；第 5 章由梅健编写；第 6 章和第 7 章由葛文璇编写。全书由董祥担任主编并统稿，卢成江和袁玉卿担任副主编。承蒙南京市市政公用工程质量安全监督站史文娟同志在百忙之中协助校对了本书所引用的标准和规程，东南大学 2010 级研究生于华洋为本书的资料整理做了大量的工作，在此表示衷心的感谢。

由于编著者水平所限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言	
<b>第1章 道桥工程检测基础知识</b> .....	1
1.1 道桥工程检测的目的与意义 .....	1
1.2 道桥工程检测概况 .....	2
1.3 道桥工程检测数据的处理与分析 .....	3
1.4 道桥工程质量检测的评定方法 .....	22
思考题和习题 .....	25
<b>第2章 道桥工程原材料检测</b> .....	27
2.1 土 .....	27
2.2 石料与集料 .....	54
2.3 石灰与水泥 .....	84
2.4 沥青材料 .....	96
2.5 无机结合料稳定材料 .....	147
2.6 水泥混凝土与砂浆 .....	157
2.7 沥青混合料 .....	200
2.8 钢材 .....	254
思考题和习题 .....	275
<b>第3章 路基工程现场检测</b> .....	277
3.1 路基工程质量检查项目 .....	277
3.2 路基压实度检测 .....	287
3.3 路基强度和模量检测 .....	302
3.4 路基回弹弯沉检测 .....	312
思考题和习题 .....	319
<b>第4章 路面工程现场检测</b> .....	320
4.1 路面基层质量检查项目 .....	320
4.2 路面基层检测 .....	326
4.3 路面面层质量检查项目 .....	330
4.4 路面现场检测技术 .....	335
4.5 路面检测新技术 .....	357
思考题和习题 .....	361
<b>第5章 道路附属设施与交通工程         设施检测</b> .....	363
5.1 道路排水设施检测 .....	363
5.2 道路防护与支挡工程检测 .....	368
5.3 交通标志与标线检测 .....	370
5.4 道路视线诱导设施与防眩设施检测 .....	372
5.5 道路隔离设施和防护设施检测 .....	374
5.6 道路机电工程设施检测 .....	377
思考题和习题 .....	383
<b>第6章 桥梁结构检测</b> .....	384
6.1 桥梁工程检测概述 .....	384
6.2 桥梁基础检测 .....	389
6.3 桥梁上部结构检测 .....	401
思考题和习题 .....	416
<b>第7章 桥梁荷载试验</b> .....	417
7.1 桥梁荷载试验的目的与主要内容 .....	417
7.2 桥梁荷载试验的试验方案与 测点设置 .....	418
7.3 桥梁静载试验 .....	420
7.4 桥梁动载试验 .....	422
思考题和习题 .....	424
<b>参考文献</b> .....	425

# 第1章 道桥工程检测基础知识

**【本章提要】** 道桥工程检测对于保证道路与桥梁工程的建设质量具有重要意义。本章在介绍我国道桥工程检测概况的基础上，重点介绍了道桥工程检测的数据处理分析和质量评定方法，这些知识是从事道桥检测工作的基础。

## 1.1 道桥工程检测的目的与意义

交通运输作为我国经济建设中重点投资建设的行业，正以前所未有的规模和速度向前发展。截止到2008年年底，我国高速公路通车总里程达到6万km，稳居世界第二位；公路通车总里程已达373万km，比新中国成立初期的8万km增长了45倍。我国的桥梁工程无论在建设规模上，还是在科技水平上，尤其在大跨径悬索桥、斜拉桥、拱桥和连续刚构桥建设方面均已跻身世界先进行列。各种功能齐全、造型美观的立交桥、高架桥，横跨长江、黄河等大江大河的特大跨度桥梁频频建成。我国每年用于道路与桥梁基础设施建设的费用高达2000亿，可以预计今后交通基础设施建设仍将保持一段时期的高速发展。尽管我国在道路与桥梁建设方面已取得了很大成就，但建设质量还不尽如人意。由于种种原因，道路与桥梁工程中出现了很多质量事故，如云南富民县昆禄二级公路开通不到半年便全路变为“豆腐渣”，给国家造成将近6000万元的损失，究其原因是偷工减料；重庆綦江彩虹桥建成运营不到三年便倒塌，使40人死于非命，损失达1亿元，主要原因是施工过程中相关人员玩忽职守、偷工减料、使用大量的劣质材料、没有进行严格的检验。上述这些工程问题，如果进行严格检测、及时处理，是完全可以避免的。因此，道路与桥梁工程检测工作必须受到足够的重视。

工程检测工作不仅是道路和桥梁施工技术管理中一个重要的组成部分，也是施工质量控制和竣工验收评定工作中不可缺少的一个主要环节。通过检测能充分利用当地原材料，迅速推广应用新材料、新技术和新工艺；能用定量的方法科学地评定各种材料和构件的质量；能合理地控制并科学地评定工程质量。因此，道路与桥梁工程检测工作对于提高工程质量、加快工程进度、降低工程造价、推动施工技术进步等起着极为重要的作用。

道路与桥梁工程检测技术融试验理论、操作技能和道桥工程专业知识于一体，是工程设计参数确定、施工质量控制、施工验收评定、养护管理决策的主要依据。工程检测机构的职能是对工程项目或产品进行检测，根据检测的结果判断工程质量或产品质量状态。随着道路与桥梁技术等级的提高，各级管理部门和施工单位已对加强质量检测和控制在给予了高度重视，有效推动了道桥检测技术的发展。一方面，对新检测仪器和检测方法的研发不断深入，并应用到实际工程中；另一方面，对检测人员的教育和培训不断加强，专业素质较高的检测队伍正在形成，工程检测体系不断得到完善。

## 1.2 道桥工程检测概况

### 1.2.1 国内外道桥工程检测技术现状

随着科技的进步，国内外道桥工程检测仪器不断改进，许多检测新技术已开始广泛应用，使得道桥工程质量检测的手段更为快捷、准确、简便、安全。目前，在美国、欧洲、日本等交通运输较发达的国家和地区，道桥工程检测技术发展很快，达到了较高的水平。在路基路面压实度、承载力、平整度、弯沉以及路面病害综合检测等方面均研制了相应的自动化检测设备，有的检测设备还具有较为完善的数据处理功能。

相比之下，我国道桥工程检测技术的研究起步较晚，虽然近年来发展较快，但总体水平还比较落后。我国从“七五”计划开始，已陆续开展了一些路面检测技术的研究和产品的研发，基本已覆盖了各种主要的检测技术，形成了一定的基础研究力量。20世纪80年代中后期开始从国外引进各种先进的工程检测仪器，为工程检测新技术的研发与推广奠定了基础。交通部和相关研究部门经过十多年对进口仪器的技术消化吸收，极大地促进了在颁布施行的测试规程和检验评定标准中相关设备和参数的编制和规定。一些科技研发机构借鉴国外先进的制造技术和使用经验，已生产出相同类型的国产检测设备。自动弯沉仪、各类平整度测试仪、道路雷达探测仪、摩擦系数测试车等都有国产化产品，其“性价比”较之昂贵的进口仪器具有一定的优势。

我国现行规范中已经引入了一些较为先进且成熟的检测技术，但在实际工程中，由于受到各种条件限制，这些新技术的推广和应用并未普及，特别是路基和路面压实度、厚度的测定，仍然依赖破坏性较大的取芯法和灌砂法；而在路面检测方面，贝克曼梁、三米直尺、摆式摩擦仪等仍是主要的检测工具。

目前，我国道桥工程检测体系已经建立、检测人员队伍正在不断扩大，但相对高速发展的道桥建设而言，还远远不能适应新形势下建设的需要，问题之一在于检测人员仍比较缺乏。一些新上岗的检测人员虽然经过了系统培训，但缺乏实际工作经验，技术素质有待进一步提高。

就总体而言，我国在道桥工程检测技术方面相对落后。因此，深入系统地开展道桥工程检测技术的研究，开发具有自主知识产权的道桥工程检测技术，完善我国道桥工程检测规程和行业标准，对全面提高我国道路与桥梁工程的建设质量具有重要意义。

### 1.2.2 道桥工程检测技术的发展趋势

#### 1. 道桥工程检测技术发展的总体趋势

近20年来，国际上道桥工程检测技术发展十分迅速，总的发展趋势是由人工检测向自动化检测发展，由破损检测向无损检测发展，由一般技术向高新技术发展。如机电一体化技术和高精度传感器被应用于弯沉检测，激光技术被应用于路面断面检测，雷达技术被应用于路基路面的厚度和压实度检测，模式识别和图像处理技术被应用于路面病害观测等。同时，传统的手工检测方式已开始逐步被自动化检测方式所取代，主要表现在检测方式、检测数据采集和处理、检测安全性等方面的改进。新型道桥工程检测设备所追求的目标是准确、高效

和安全,即以电子和机械自动化测量代替人工测量,并通过计算机和专用软件实现检测数据的自动采集、记录和统计分析等。这样不仅避免了人为因素对检测结果的干扰,而且可以成倍提高测试速度和采样频率,极大地增强了检测效率和现场安全性。此外,运用计算机网络技术和数据挖掘技术对道桥工程检测数据进行处理和分析,能改变以往工程检测数据的信息“孤岛问题”,对有效检测并监控道桥工程的建设质量具有十分重要的意义。

## 2. 道桥工程检测设备的发展趋势

近年来,世界各国研制的道桥检测设备不断改进,其发展目标体现在以下几方面。

(1) 高精度。随着新产品的研发,各类检测仪器的分辨率和测试精度不断提高。另外,能在野外各种严酷环境中进行检测作业,提高设备的工作稳定性,尤其是使各种电子产品能够抵御诸如温度、湿度、振动及空中干扰波的影响,将进一步提高测试结果的准确性。

(2) 实时化。能够对现场采集的大量数据进行实时的分析和计算,提高检测评价的时效性。此外,可利用宽带网实现测试数据的远程传送,实现室内工作站与测试现场同步监控。

(3) 标准化。建立统一的标准体系,使检测同一指标的不同设备测试结果之间具有相关可比性。

(4) 智能化。针对检测对象的复杂变化,利用计算机和智能软件,使操作人员能够更为轻松灵活地运用自动化测试仪器进行工作。

(5) 多功能。应用各类小型化、微型化和集成化的自动控制技术,将各种检测功能汇集在同一个系统中,提高测试效率。目前已出现能够同时测试路面平整度、纹理构造深度、车辙、横纵坡、弯道半径的多功能测试系统,以后有望在此基础上增加路况和雷达探测功能。

## 1.3 道桥工程检测数据的处理与分析

工程质量评价是以检测数据为依据的,检测采集到的大量原始数据必须经过分析处理才能取得可靠的检测成果。如有些数据要经过无量纲化处理之后才具备可比性;原始数据中存在着各种误差,甚至有时还要剔除一些错误数据。

### 1.3.1 检测数据的分析

工程检测中采集到的原始数据种类多、数量大,由于人们认识能力的局限,科学技术水平的限制以及量测数值不能以有限位数表示(如圆周率 $\pi$ )等原因,在对某一对象进行试验或量测时,即使使用极为精密的仪器,所测得的数值与其真实值也不会完全相等,这种差异即称为误差。但是随着科学技术的发展,人们认识水平的提高和实践经验的增加,量测的误差数值可以被控制到很小的范围,或者说量测值可更接近于其真实值。

#### 1. 真值

真值即真实值,是指在一定条件下,被测量的、客观存在的实际值。真值通常是一个未知量,一般所说的真值是指理论真值、规定真值和相对真值。

(1) 理论真值。理论真值也称绝对真值,如平面三角形三内角之和恒为 $180^\circ$ 。

(2) 规定真值。国际上公认的某些基准量值,如1982年国际计量局米定义咨询委员会



提出新的米定义为“米等于光在真空中  $1/299792458\text{s}$  时间间隔内所经路径的长度”，这个米基准就当做计量长度的规定真值。规定真值也称约定真值。

(3) 相对真值。计量器具按精度不同分为若干等级，上一等级的指示值即为下一等级的真值，此真值称为相对真值。如在力值的传递标准中，用二等标准测力计校准三等标准测力计，此时二等标准测力计的指示值即为三等标准测力计的相对真值。

## 2. 误差

(1) 误差的表示方法。根据误差表示方法的不同，误差有绝对误差和相对误差两大类。

### 1) 绝对误差

$$\Delta L = L - L_0 \quad (1-1)$$

式中， $\Delta L$  为绝对误差； $L$  为实测值； $L_0$  为被测量的真值。

但是，大多数情况下，真值是无法得知的，因而绝对误差也无法得到。一般只能应用一种更精密的量具或仪器进行测量，所得数值称为实际值。实际值更接近真值，可用来代替真值计算误差。

绝对误差具有以下性质：有单位，与被测量的单位相同；能表示测量的数值是偏大还是偏小以及偏离程度；不能确切地表示测量所达到的精确程度。

2) 相对误差。相对误差是指绝对误差与被测真值(或实际值)的比值

$$\delta = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \approx \Delta \frac{L}{L} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中， $\delta$  为相对误差。

相对误差不仅能反映测量的绝对误差，而且能反映出测量时所达到的精度。相对误差具有以下一些性质：无单位，通常以百分数表示，而且与被测量所采用的单位无关(而绝对误差则不然，测量单位改变，其值亦改变)；能表示误差的大小和方向(因为相对误差大时绝对误差亦大)；能表示测量的精确程度(当测量所得绝对误差相同时，则测量的量大者精度高)。因此，通常都用相对误差来表示测量误差。

**【例 1-1】** 用毫米钢尺测量某路面结构层的厚度为 50mm，且已知钢尺最大绝对误差为 0.5mm，问此结构层的真正厚度是多少？相对误差是多少？

解： $L = 50\text{mm}$ ， $\Delta L = 0.5\text{mm}$ 。

真正厚度  $L_0 = L \pm \Delta L = (50 \pm 0.5)\text{mm}$ 。

相对误差  $\delta = \Delta L/L = 0.5/50 = 1\%$ 。

(2) 误差的来源。在任何测量过程中，无论采用多么完善的测量仪器和测量方法，也无论在测量过程中怎样细心和注意，都不可避免地会产生误差。产生误差的原因是多方面的，可以归纳如下：

1) 装置误差，主要由测量仪器设备(装置)的设计制造、安装、调整或使用不当所产生的误差。如试验机度盘示值不均匀，等臂天平不等臂，仪器安装不垂直、偏心等所产生的误差。

2) 环境误差，由于各种环境因素达不到要求的标准状态所产生的误差。如混凝土养护条件达不到标准的温度、湿度要求等所产生的误差。

3) 人员误差，测试者生理上的最小分辨力和固有习惯所产生的误差。如读数时，始终偏左或偏右、偏上或偏下、偏高或偏低等所产生的误差。

4) 方法误差, 调试者未按规定的操作方法进行试验所产生的误差。如进行强度试验时, 试块偏心放置、加荷速度过快或过慢等所产生的误差。

需要指出, 以上几种误差来源, 有时是联合作用的, 可作为一个独立的误差因素来考虑。

(3) 误差的分类。就误差的性质而言, 可分为系统误差、随机误差(或称偶然误差)和过失误差(或称粗差)。

1) 系统误差。在同一条件下, 多次重复测试同一量时, 误差的数值和正负号有较明显的规律。系统误差通常在测试之前就已经存在, 而且在试验过程中, 始终偏离一个方向, 在同一试验中其大小和正、负号相同, 如试验机示值的偏差等。系统误差容易识别, 并可通过试验或用分析方法掌握其变化规律, 在测量结果中加以修正。

2) 随机误差。在相同条件下, 多次重复测试同一量时, 出现误差的数值和正负号没有明显的规律, 它是由许多难以控制的微小因素造成的。如原材料特性的正常波动, 试验条件的微小变化等。由于每个因素出现与否, 以及这些因素所造成的误差大小、方向事先无法知道, 有时大, 有时小, 有时正, 有时负, 其发生具有随机性, 因而很难在测试过程中加以消除。但是, 这种误差的统计规律是完全可以掌握的, 可以用概率论与数理统计方法对数据进行分析 and 处理, 以获得可靠的测量结果。

3) 过失误差。过失误差明显地歪曲试验结果, 如测错、读错、记错或计算错误等。含有过失误差的测量数据是不能采用的, 必须利用一定的准则从测得的数据中剔除。因此, 在进行误差分析时, 只考虑系统误差与随机误差。

### 1.3.2 数据的统计

#### 1. 数据统计的特征量

用来表示统计数据分布及其某些特性的特征量分为两类: 一类表示数据的集中位置, 如算术平均值、中位数等; 一类表示数据的离散程度, 主要有极差、标准离差、变异系数等。

(1) 算术平均值。算术平均值是一组数据集中位置最有用的统计特征量, 通常用样本的算术平均值来代表总体的平均水平。样本的算术平均值用  $\bar{x}$  来表示, 样本用  $x$  来表示。如果  $n$  个样本数据为  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , 那么, 样本的算术平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-3)$$

**【例 1-2】** 某路段沥青混凝土面层抗滑性能检测, 摩擦系数的检测值共有 10 个测点, 测得的结果分别为 58、56、60、53、48、54、50、61、57、55(摆值)。求摩擦系数的平均值。

**解:** 摩擦系数的平均值为

$$\bar{F}_B = \frac{1}{10}(58 + 56 + 60 + 53 + 48 + 54 + 50 + 61 + 57 + 55) = 55.2(\text{摆值})$$

(2) 中位数。在一组数据  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  中, 按其大小顺序排列, 以排在正中间的一个数表示总体的平均水平, 称为中位数, 或中值, 用  $\bar{x}_i$  表示。 $n$  为奇数时, 正中间的数只有一个;  $n$  为偶数时, 正中间的数有两个, 则取两个数的平均值为中位数, 即

$$\bar{x} = x_{\frac{n+1}{2}} \quad (n \text{ 为奇数}) \quad (1-4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{2}(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}) \quad (n \text{ 为偶数}) \quad (1-5)$$

**【例 1-3】** 检测值同“例 1-2”，求中位数。

解：检测值按大小次序排列为：61、60、58、57、56、55、54、53、50、48(摆值)，则中位数为

$$F_B = \frac{F_{B(5)} + F_{B(6)}}{2} = \frac{(56 + 55)}{2} = 55.5 \text{ (摆值)}$$

(3) 极差与标准偏差。平均值虽然给出了数据分散的位置，但不能给出分散的大小。可以得到具有相同平均值的两组试验资料，如 A 组：24、21、20、19、16；B 组：25、23、18、16、18。

虽然 A、B 两组的平均值都是 20，但是它们的分散程度是不一样的。如果观测值远离平均值，表示分散程度大；如果靠近平均值，表示分散程度小。常用标准偏差和极差来表示试验资料的分散程度。

在一组数据中最大值与最小值之差，称为极差，记作  $R$ 。

**【例 1-4】** 求上例中检测数据的极差。

解：
$$R = F_{\max} - F_{\min} = 61 - 48 = 13 \text{ (摆值)}$$

极差没有充分利用数据的信息，但计算十分简单，仅使用于样本容量较小 ( $n < 10$ ) 的情况。

标准偏差有时也称标准离差、标准差或称方均差，它是衡量样本数据波动性(离散程度)的指标。在质量检验中，总体的标准差一般不易求得。样本的标准偏差  $S$  按下式计算

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1-6)$$

**【例 1-5】** 求上例中的标准差  $S$ 。

解：
$$S = \sqrt{\frac{(58 - 55.2)^2 + (56 - 55.2)^2 + (60 - 55.2)^2 + \cdots + (55 - 55.2)^2}{10 - 1}} = 4.13 \text{ (摆值)}$$

(4) 变异系数。标准偏差反映样本数据的绝对波动状况。当测量较大量值时，绝对误差一般较大；而测量较小量值时，绝对误差一般较小。因此，用相对波动的大小，即变异系数更能反映样本数据的波动性。

变异系数用  $C_v$  表示，是标准偏差和算术平均值的比值，即

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1-7)$$

**【例 1-6】** 若甲路段沥青混凝土路面面层的摩擦系数算术平均值为 55.2(摆值)，标准偏差为 4.13(摆值)；乙路段的摩擦系数算术平均值为 60.8(摆值)，标准偏差为 4.27(摆值)，求两段路的变异系数。

解：甲路段 
$$C_v = \frac{4.13}{55.2} = 7.48\%$$

乙路段 
$$C_v = \frac{4.27}{60.8} = 7.02\%$$

甲路段的标准差小于乙路段的标准差，但甲路段的变异系数大于乙路段的变异系数，说

明甲路段的摩擦系数相对波动比乙路段的大，面层抗滑稳定性较差。

## 2. 数据的统计方法

(1) 直方图。直方图即质量分布图，是把收集到的工序质量数据，用相等的组距进行分组，按要求进行频数(每组中出现数据的个数)统计，再在直角坐标系中以组界为顺序、组距为宽度在横坐标上描点，以各组的频数为高度在纵坐标上描点，然后画成长方形(柱状)连接图。下面结合实例说明绘制直方图的方法与步骤。

【例 1-7】某沥青混凝土拌和过程中，油石比的抽检结果列于表 1-1 中，试绘制该检测结果的直方图。

1) 收集数据。一般应收集不少于 50~100 个数据，本例为 100 个数据。

2) 数据分析与处理。从收集的数据中找出最大值与最小值，并计算其极差。

本例中最大值  $x_{\max} = 6.4$ ，最小值  $x_{\min} = 5.5$ ，极差  $R = x_{\max} - x_{\min} = 6.4 - 5.5 = 0.9$ 。

表 1-1 油石比检测数据

顺序	数 据										最大	最小	极差
1	6.1	6.3	5.8	5.9	5.9	6.1	6.0	6.0	5.8	5.8	6.3	5.8	0.5
2	5.8	5.9	6.2	5.8	5.9	6.0	6.0	6.2	6.2	5.9	6.2	5.8	0.4
3	5.7	5.6	5.9	5.7	5.8	5.9	5.9	5.8	5.7	6.0	6.0	5.6	0.4
4	6.0	6.0	6.1	6.0	5.9	5.7	6.1	5.8	5.8	5.9	6.1	5.7	0.4
5	5.9	5.9	5.6	6.0	6.1	6.1	6.3	5.7	6.2	5.7	6.3	5.6	0.7
6	5.6	5.7	5.8	5.6	6.0	6.1	6.0	5.9	6.0	6.1	6.1	5.6	0.5
7	6.1	5.8	6.3	5.5	6.2	6.0	6.0	5.9	6.1	6.0	6.3	5.5	0.8
8	5.9	5.9	6.0	5.9	6.0	5.8	6.0	6.0	6.1	5.8	6.1	5.8	0.3
9	5.9	6.4	5.9	5.9	5.9	6.0	6.0	6.2	6.1	6.1	6.4	5.9	0.5
10	6.1	5.8	6.0	5.5	6.3	6.2	6.2	6.3	6.1	6.0	6.3	5.5	0.8

3) 确定组数与组距。通常先定组数，后定组距。组数用  $B$  表示，应根据收集数据总数而定。当数据总数为 50 以下时， $B = 5 \sim 7$  组；总数为 50~100 时， $B = 6 \sim 10$  组；总数为 100~250 时， $B = 7 \sim 12$  组；总数为 250 以下时， $B = 10 \sim 20$  组。

组距用  $h$  表示，其计算公式： $h = \frac{R}{B-1}$ 。本例中，取组数  $B = 10$ ，则组距  $h = \frac{0.9}{10-1} = 0.1$ 。

4) 确定组界值。为避免数据恰好在组界上，组界值要比原数据的精度高一位。

$$\text{第一组的上界值} = x_{\min} - \frac{h}{2}$$

$$\text{第一组的下界值} = x_{\min} + \frac{h}{2}$$

第一组的上界值就是第二组的下界值，第二组的下界值加上组距  $A$  即为第二组的上界值，其余依次类推。

本例中，第一组的组界值为： $\left(5.5 - \frac{0.1}{2}\right) \sim \left(5.5 + \frac{0.1}{2}\right) = 5.45 \sim 5.55$

5) 统计频数。组界值确定后按组号来统计频数、频率(相对频数)。

本例的统计结果列于表 1-2 中。

表 1-2 频数统计表

序号	分组区间	频数	相对频数	序号	分组区间	频数	相对频数
1	5.45 ~ 5.55	2	0.02	7	6.05 ~ 6.15	15	0.15
2	5.55 ~ 5.65	4	0.04	8	6.15 ~ 6.25	8	0.08
3	5.65 ~ 5.75	8	0.08	9	6.25 ~ 6.35	5	0.05
4	5.75 ~ 5.85	14	0.14	10	6.35 ~ 6.45	1	0.01
5	5.85 ~ 5.95	21	0.21	合计		100	1.00
6	5.95 ~ 6.05	22	0.22				

6) 绘制直方图。以横坐标为质量特征, 纵坐标为频数(或频率)作直方图, 如图 1-1 所示。

由图 1-1 可知, 如果收集的检测数据量越来越多, 分组越来越细, 即当样本大小  $n$  充分大时, 直方图将越对称, 而台阶形的折线也将趋于一条光滑曲线。这条线称为概率分布曲线。这条曲线有如下特点: 单峰性, 即曲线在均值处有极大值; 对称性, 即曲线有一对称轴, 轴的左右两侧曲线是对称的; 有一水平渐近线, 即曲线两头将无限接近于横轴; 在对称轴左右两边曲线上离对称轴等距离的某处, 各有一个拐弯的点(拐点)。

概率分布曲线的形式很多, 在道桥工程检测中的用途主要有: 估计可能出现的合格率、考察工序能力、判断质量分布状态和判断施工能力等。

(2) 正态分布。设连续型随机变量的概率密度为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (-\infty < x < \infty) \quad (1-8)$$

式中,  $\mu$ 、 $\sigma$  ( $\sigma > 0$ ) 为常数, 则称  $X$  服从参数为  $\sigma$  的正态分布, 记为  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,  $\mu$  为均值,  $\sigma$  为方均差。

$f(x)$  的图形如图 1-2 所示, 它具有如下性质:

1) 曲线关于  $x = \mu$  对称, 表明对于任意  $h > 0$ , 有

$$P\{\mu - h < x \leq \mu\} = P\{\mu < x \leq \mu + h\}$$

2) 当  $x = \mu$  时, 取到最大值, 即

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

$x$  离  $\mu$  越远,  $f(x)$  的值越小。这表明对于同样长度的区间, 当区间离  $\mu$  越远,  $x$  落在这个区间上的概率越小。

在  $x = \mu \pm \sigma$  处曲线有拐点, 曲线以  $x$  轴为渐近线。

另外, 如果固定  $\sigma$ , 改变  $\mu$  的值, 则图形沿着  $x$  轴平移, 而不改变其形状, 如图 1-2 所示, 可见正态分布的概率密度曲线  $y = f(x)$  的位置完全由  $\mu$  参数所确定,  $\mu$  称为位置参数。

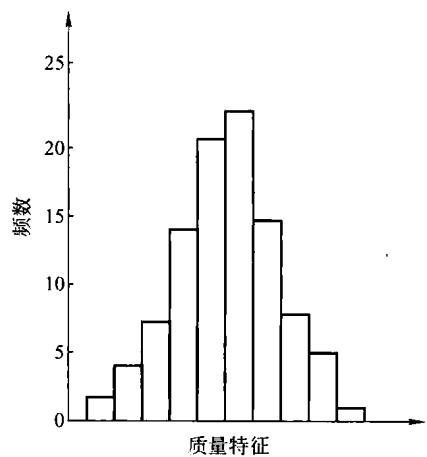


图 1-1 直方图

如果固定  $\mu$ , 改变  $\sigma$ , 由于最大值  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ , 可知当  $\sigma$  越小时, 图形变得越尖 (图 1-3), 因而  $x$  落在  $\mu$  附近的概率越大。

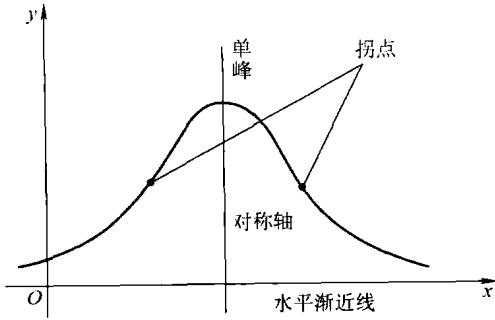


图 1-2 正态分布的概率密度曲线图

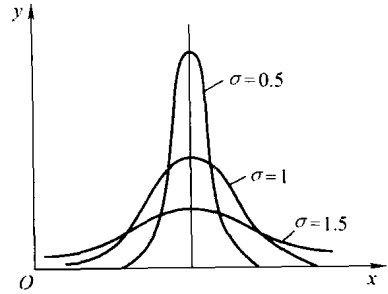


图 1-3 正态分布

特别指出, 当  $\mu=0$  时, 称  $X$  服从标准正态分布。其概率密度和分布函数分别用  $f(x)$ 、 $\varphi(x)$  表示, 即有  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2}}$ ,  $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}}dt$ 。 $\varphi(x)$  可根据编制好的函数表查用。一般, 若  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 则  $Z = \frac{X-\mu}{\sigma} \sim N(0,1)$ 。

对于任意区间的  $(x_1, x_2)$ , 有

$$P\{x_1 < x \leq x_2\} = \varphi\left(\frac{x_2 - \mu}{\sigma}\right) - \varphi\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right)$$

利用上式, 可以求得双边置信区间的几个主要数据

- $P\{\mu - \sigma < x < \mu + \sigma\} = 68.26\%$
- $P\{\mu - 2\sigma < x < \mu + 2\sigma\} = 95.45\%$
- $P\{\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma\} = 99.73\%$
- $P\{\mu - 1.96\sigma < x < \mu + 1.96\sigma\} = 95.00\%$

如图 1-4 所示, 通常称  $\sigma$  为保证率系数 (也有的用  $Z_n$  表示), 其取值与公路的等级有关, 而且常常用样本的平均值  $\bar{x}$ 、标准差  $S$  分别代替上述公式  $\mu$  与  $\sigma$ 。

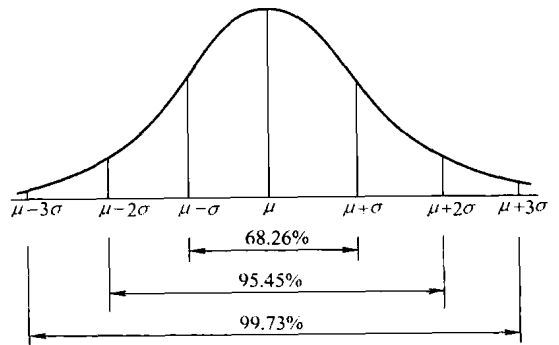


图 1-4 正态分布与置信区间

(3)  $t$  分布。设  $X \sim N(0,1)$ ,  $Y \sim \chi^2(n)$ , 并且  $X$  与  $Y$  相互独立, 则称随机变量  $T = \frac{X}{\sqrt{Y/n}}$  服从自由度为  $n$  的  $t$  分布, 记为  $T \sim t(n)$ ,  $t$  分布的概率密度函数为

$$h(t, n) = \frac{\Gamma\left[\frac{(n+1)}{2}\right]}{\sqrt{\pi n} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{-(n+1)/2} \quad (-\infty < t < \infty) \quad (1-9)$$

当  $n$  足够大时, 分布近似于  $N(0,1)$  分布。但对于较小的  $n$ ,  $t$  分布与  $N(0,1)$  分布相差

很大。对于给定的  $a(0 < a < 1)$ ，对称满足条件： $P\{t > t_a(n)\} = \int_{a(n)}^{\infty} h(t, n) dt = a$  的点  $t_a(n)$  为  $t(n)$  分布的上  $a$  分位点，如图 1-5 所示。

由  $t$  分布上  $a$  分位点的定义及  $h(t, n)$  图形的对称性知： $t_{1-a}(n) = -t_a(n)$ 。

分布的上  $a$  分位点可从  $t$  分布表中查得。在  $n > 45$  时，就用近似  $t$  分布(图 1-6)  $t_a(n) \approx Z_n$ 。对于常用的  $a$  值，这样近似值相对误差最大不超过 1.3%。

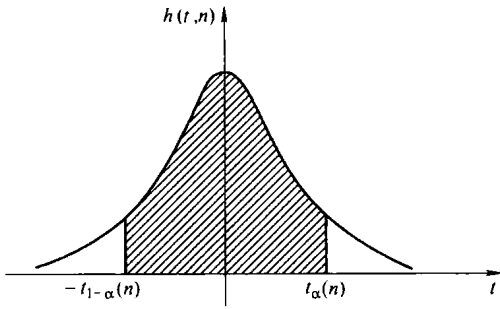


图 1-5  $t$  分布分位点

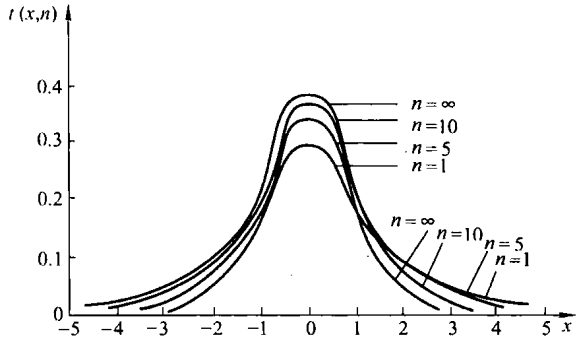


图 1-6  $t$  分布

在施工质量评价中，常需要解决总体标准差  $\sigma$  未知时，如何估计平均值置信区间的问题。为解决这一问题，就利用样本标准差  $S$  代替总体标准差  $\sigma$ 。

若  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  是总体  $N(\mu, \sigma)$  的样本， $\bar{x}$ ， $S^2$  分别是样本均值和样本方差，则有

$$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \sim t(n-1) \quad (1-10)$$

因此，根据给定的  $\beta$  和自由度  $n-1$ ，由分布概率系数表查，可得到平均值  $\mu$  的双边置信区间为

$$\left( \bar{x} - t_{\frac{1-\beta}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t_{\frac{1-\beta}{2}}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (1-11)$$

同理，可得平均值的单边置信区间

$$\mu < \bar{x} \pm t_{1-\beta}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1-12)$$

### 3. 数据的表达方法

处理检测数据和报告检测结果应遵守的原则：用来表示测定结果，计算值所能达到的精度一定要与仪表的精度相适应，不能夸大或缩小，并要对数据进行深入分析，以便得到各参数之间的关系，或通过数学解析的方法，导出各参数之间的函数关系，这是数据处理的任务之一。

测量数据的表达方法通常有表格表示法、图形表示法和经验公式法三种。

(1) 表格表示法。简称表格法，这种方法在自然科学和工程技术上用得特别多。在科学试验中一系列测量结果通常是先列成表格后，再进行分析。表格有两种：一种是试验检测数据记录表，另一种是试验检测结果表。表格法应用广泛，但存在下列缺点：

1) 尽管测定次数多，步长已经相当小，但表格法总不能给出所有自变量对应的函数值。

2) 表格法不易看出变量间变化规律, 而只能大致估计该函数递增或是递减。

3) 表格法对试验数据不易进行数学解析。

因此, 只有当各变量的函数关系无需获得, 或为了便于计算, 才将数据列成表格。若想得到未测定的某值时, 可用内插法估计。

(2) 图形表示法。函数图形是坐标系中一些测试数据点的轨迹, 工程领域中把数据绘制成图形几乎是一种普遍而又重要的做法。图形法的显著优点, 就是醒目, 极易从图形上看出函数的变化规律。但是, 对图形进行数学解析也相当困难, 同时想从图形上得到某点对应的函数值时, 误差常常会显得过大。

图示法的基本要点为:

1) 坐标的大小与分度的选择应与测量数据的精度相适应。分度过粗时, 影响原始数据的有效数字, 绘图精度将低于试验中参数测量的精度; 分度过细时会高于原始数据的精度。坐标分度值不一定自零起, 可用低于试验数据的某一数值作为起点和高于试验数据的某一数值作为终点, 曲线以基本占满全幅坐标纸为宜。

2) 坐标轴应注明分度值的有效数字、名称和单位, 必要时还应标明试验条件, 坐标的文字书写方向应与该坐标轴平行, 在同一图上表示不同数据时应该用不同的符号加以区别。

3) 测量数据往往是分散的, 如果用短线连接各点得到的就不是光滑的曲线, 而是折线, 这需要对曲线进行平滑处理。由于每一个测点总存在误差, 按带有误差的各数据所描的点不一定是真实值的正确位置。根据足够多的测量数据, 完全有可能作出一光滑曲线。决定曲线的走向应考虑曲线应尽可能通过或接近所有的点, 但曲线不必强求通过所有的点, 尤其是两端的点。当不可能时, 则应移动曲线尺, 使得曲线两边的点数接近相等。此时, 所绘制的曲线与实测值之间误差的平方和最小。另外, 还可以采用拟合曲线法, 用 EXCEL 等程序来平滑曲线。

(3) 数学公式法。测量数据不仅可用图形表示出函数之间的关系, 而且可用与图形对应的一个公式来表示所有的测量数据, 当然这个公式不可能完全准确地表达全部数据。因此, 常把与曲线对应的公式称为经验公式, 在回归分析中则称之为回归方程。该法利用试验数据, 根据某种数学原理和原则建立试验方程——经验公式。该法的优点是:

1) 结构紧凑, 能用一个较简单的公式代替全部及尚未测定但在试验范围内的所有数据。

2) 凡在公式中所表示出的具有实际意义的自变量值, 都可求得对应的函数值。

3) 利用该公式可进行必要的解析与运算, 与理论公式具有同等的作用和效能。

根据一系列测量数据, 如何建立公式, 建立怎样的公式, 是这个方法中最基本的问题。所建立的公式能正确表达测量数据的函数关系, 往往不是一件容易的事情, 在很大程度上取决于试验人员的经验和判断能力, 而且建立公式的过程比较繁琐, 有时还要多次反复才能得到与测量数据更接近的公式。

建立公式的基本步骤大致可以归纳如下:

1) 描绘曲线。以自变量为横坐标, 函数量为纵坐标, 将测量数据描绘在坐标上, 并把数据点描绘成测量曲线。

2) 对所描绘的曲线进行分析, 确定公式的基本形式。如果数据点描绘的基本上是直线, 则可用一元线性回归方法确定直线方程。如果数据点描绘的是曲线, 则要根据曲线的特



点判断曲线属于何种类型。判断时可参考现成的数学形状加以选择，对选择的曲线则按一元非线性回归方法处理。如果测量曲线很难判断属于何种类型，则可按多项式回归处理。

3) 曲线化直。如果测量数据描绘的曲线被确定为某种类型的曲线，则可先将该曲线方程变换为直线方程，然后按一元线性回归方法处理。

如双曲线  $\frac{1}{y} = a + b \frac{1}{x}$ ，坐标变换时令  $y' = \frac{1}{y}$ ， $x' = \frac{1}{x}$ ，即取  $\frac{1}{y}$  为纵坐标， $\frac{1}{x}$  为横坐标，双曲线就变成直线了，所得线性方程为  $y' = a + bx'$ 。其他形式的曲线也可按类似的方法化为直线。

4) 确定公式中的常量。代表测量数据的直线方程或经曲线化直后的直线方程表达式为  $y = a + bx$ ，可根据一系列测量数据确定方程中的常量  $a$  和  $b$ ，其方法一般有图解法、端值法、平均法和最小二乘法。

5) 检验所确定公式的准确性。用测量数据中自变量值代入公式计算出函数值，看它与实际测量值是否一致，如果差别很大，说明所确定的公式基本形式可能有错误，则应建立另外形式的公式。

### 1.3.3 数据的处理方法

#### 1. 数据的修约

(1) 有效数字。有效数字的概念可表述为：由数字组成的一个数，除最末一位数字是不确切值或可疑值外，其他数字皆为可靠值或确切值，则组成该数的所有数字包括末位数字称为有效数字，除有效数字外其余数字为多余数字。

对于“0”这个数字，它在数中的位置不同，可能是有效数字，也可能是多余数字。

整数前面的“0”无意义，是多余数字。对纯小数，在小数点后、数字前的“0”只起定位、决定数量级的作用(相当于所取的测量单位不同)，所以，也是多余数字。

处于数中间位置的“0”是有效数字。处于数后面位置的“0”是否算有效数字可分三种情况：

1) 数后面的“0”，若把多余数字的“0”用10的乘幂来表示，使其与有效数字分开，这样在10的乘幂前面所有数字包括“0”皆为有效数字。

2) 作为测量结果并注明误差值的数值，其表示的数值等于或大于误差值的所有数字，包括“0”皆为有效数字。

3) 除上面两种情况外的数后面的“0”则很难判断是有效数字还是多余数字，因此，应避免采用不确切的表示方法。

一个数的有效数字占有的数位，即有效数字的个数，为该数的有效位数。

为弄清有效数字的概念，举例如下：

00297、0.0516、9.02、 $8.03 \times 10^2$ ，这四个数的有效位数均为3，有效数字都是3个。

再如，测量某一试件，得到其有效面积  $A = 0.0501502\text{m}^2$ ，测量极限误差  $\delta_{\min} = 0.000005\text{m}^2$ ，则测量结果应表述为  $A = (0.050150 \pm 0.000005)\text{m}^2$ 。误差的有效数字为一位，即5；而有效面积的有效数字为5个，即50150；因为尾数2小于误差的数量级，故为多余数字。

若给出的数值为81700，则为不确定的表示方法，它可能是  $817 \times 10^2$ ，也可能是  $8.17 \times 10^4$ 。即有效数字可能是3个、4个或5个。若无其他说明，则很难判定其有效数字究竟是个。