

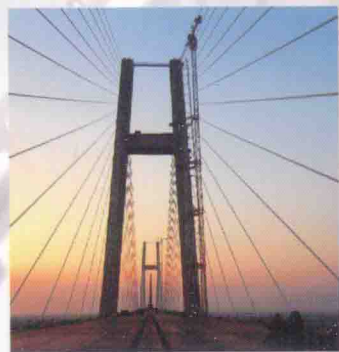
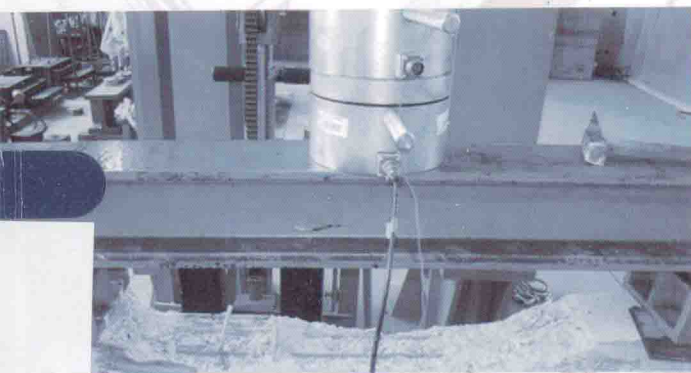


面向21世纪课程教材  
普通高等院校土木工程“十二五”规划教材

主 编◎路 韡 李子奇  
副主编◎樊燕燕 马卫华  
主 审◎杨子江

# 土木工程结构实验与检测实用技术

TUMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN YU JIANCE SHIYONG JISHU



西南交通大学出版社

面向 21 世纪课程教材

普通高等院校土木工程“十二五”规划教材

# 土木工程结构实验与 检测实用技术

主 编 路 韡 李子奇

副主编 樊燕燕 马卫华

主 审 杨子江

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

土木工程结构实验与检测实用技术 / 路韡, 李子奇  
主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2015.3  
面向 21 世纪课程教材 普通高等院校土木工程“十二  
五”规划教材  
ISBN 978-7-5643-3809-1

I. ①土… II. ①路…②李… III. ①土木工程-工  
程结构-结构试验-高等学校-教材②土木工程-工程结  
构-检测-高等学校-教材 IV. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 051504 号

---

面向 21 世纪课程教材  
普通高等院校土木工程“十二五”规划教材

土木工程结构实验与检测实用技术

主 编 路 韡 李 子 奇

责任编辑 罗在伟

封面设计 墨创文化

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区交大路 146 号)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

---

印 刷 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印 张 17

字 数 445 千

版 次 2015 年 3 月第 1 版

印 次 2015 年 3 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-3809-1

定 价 35.00 元

---

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

随着土木工程行业的迅猛发展，众多新理论、新体系及新工艺的结构可通过试验进行有益的探索和验证；新建工程的施工质量及可靠性可通过试验或检测进行评估；大批既有结构在逐步进入老化期后，其安全性、耐久性亦可通过检测进行鉴定。因此，结构试验与检测已成为科学研究和生产鉴定工作的重要手段。

在“推动高校教育内涵式发展”的教育背景下，如何使学生掌握基本试验、检测的方法，并在本科阶段学习后，能够在继续深造学习、研究工作或工程现场操作中学以致用，是编写本书的重要原因。希望学生通过该课程的学习达到以下目的：掌握基本的实验操作技巧，养成良好的实验习惯，激发实验兴趣，并能够开展开放性、创新性试验；获得结构检测的基本方法和正确指导，建立结构鉴定、评估的基本概念。

为此，全书共 12 章分为 2 个部分。第 1 部分由 1、2、3、4、5、6、7 章组成，为教学实验部分，主要介绍了土木工程结构实验的基础知识、仪器的校准、基本结构实验的方法，旨在建立学生对实验的基本概念，培养其动手能力和实验习惯。第 2 部分由 8、9、10、11、12 章组成，为工程检测部分，主要介绍了建筑结构、桥梁工程、隧道工程、混凝土结构状况与耐久性、地基基础的检测、试验与评定方法，旨在确立检测、评估的基本方法和程序，使学生了解规范的检测方法，为日后的工程检测工作提供参考。

本书第 1、2、3、4、5 章由西北民族大学路韡编写，第 6 章由唐山学院马卫华编写，第 9、10、12 章由兰州交通大学李子奇编写，第 7、8、11 章及附录由兰州交通大学樊燕燕编写。全书由路韡、李子奇主编，路韡统稿。

本书由杨子江教授担任主审。感谢杨子江教授在百忙之中对全书进行审阅并提出宝贵意见。

限于作者的水平和经验，书中难免存在遗漏和不当之处，欢迎读者批评指正。

编 者

2014 年 12 月

# 目 录

## 第 1 篇 教学实验

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论                | 1  |
| 1.1 土木工程试验与检测的意义         | 1  |
| 1.2 试验与检测的一般程序           | 1  |
| 1.3 结构试验与检测课程的特点         | 2  |
| 第 2 章 基础知识               | 3  |
| 2.1 试验技术术语               | 3  |
| 2.2 法定计量单位               | 7  |
| 2.3 数值修约规则               | 11 |
| 2.4 极限数值的表示和判定           | 15 |
| 2.5 数据的统计特征              | 18 |
| 第 3 章 仪器设备的校准            | 22 |
| 3.1 概 述                  | 22 |
| 3.2 百分表                  | 23 |
| 3.3 钢卷尺                  | 25 |
| 3.4 回弹仪                  | 27 |
| 3.5 拾振器                  | 28 |
| 3.6 S 型拉压力传感器            | 30 |
| 3.7 静态电阻应变仪              | 31 |
| 3.8 穿心式千斤顶               | 33 |
| 3.9 金属超声波探伤仪斜探头          | 37 |
| 3.10 裂缝观测仪               | 39 |
| 3.11 非金属超声波检测仪           | 40 |
| 3.12 钢筋探测仪               | 41 |
| 第 4 章 基本实验               | 43 |
| 4.1 结构变形(挠度)的测量实验        | 43 |
| 4.2 电阻应变片的认识与粘贴实验        | 48 |
| 4.3 电桥的接桥方式和静态电阻应变仪的使用实验 | 56 |
| 4.4 混凝土裂缝观测实验            | 59 |
| 第 5 章 结构静动力实验            | 61 |
| 5.1 结构静力实验——焊接钢桁架        | 61 |

|            |                          |           |
|------------|--------------------------|-----------|
| 5.2        | 结构动力特性实验——自由振动法          | 64        |
| 5.3        | 结构动力特性实验——脉动法            | 67        |
| 5.4        | 结构动力反应实验——测试结构冲击系数       | 70        |
| 5.5        | 索力测试实验                   | 73        |
| <b>第6章</b> | <b>钢筋混凝土受弯构件性能实验</b>     | <b>76</b> |
| 6.1        | 钢筋混凝土受弯构件正截面性能实验         | 76        |
| 6.2        | 钢筋混凝土受弯构件斜截面性能实验         | 81        |
| 6.3        | 钢筋混凝土柱偏心受压性能实验           | 86        |
| <b>第7章</b> | <b>无损检测实验</b>            | <b>90</b> |
| 7.1        | 回弹法测试混凝土强度实验             | 90        |
| 7.2        | 超声回弹综合法测试混凝土强度实验         | 92        |
| 7.3        | 反射波法检测桩基完整性及信号分析实验       | 95        |
| 7.4        | 电磁感应法检测钢筋位置、间距、保护层厚和直径实验 | 96        |

## 第2篇 工程检测

|             |                    |            |
|-------------|--------------------|------------|
| <b>第8章</b>  | <b>建筑结构检测与鉴定</b>   | <b>98</b>  |
| 8.1         | 建筑结构检测鉴定的背景和任务     | 98         |
| 8.2         | 建筑结构检测的方法和依据       | 100        |
| 8.3         | 建筑结构鉴定的方法和依据       | 108        |
| 8.4         | 建筑结构鉴定标准的基本内容      | 111        |
| <b>第9章</b>  | <b>桥梁工程检测与评定</b>   | <b>130</b> |
| 9.1         | 桥梁工程试验检测的任务和意义     | 130        |
| 9.2         | 桥梁工程试验检测的内容和依据     | 131        |
| 9.3         | 桥梁工程质量检验评定的依据和方法   | 134        |
| 9.4         | 桥梁养护管理检查与评定        | 140        |
| 9.5         | 桥梁静载试验             | 142        |
| 9.6         | 桥梁动载试验             | 153        |
| <b>第10章</b> | <b>隧道工程检测与评定</b>   | <b>158</b> |
| 10.1        | 公路隧道工程的特点及常见质量问题   | 158        |
| 10.2        | 隧道工程试验检测的内容和依据     | 160        |
| 10.3        | 公路隧道工程质量检验评定的依据和方法 | 163        |
| 10.4        | 公路隧道结构检查与评定        | 164        |
| 10.5        | 隧道锚杆拉拔力测试          | 169        |
| 10.6        | 锚杆轴力测试             | 171        |
| 10.7        | 地质雷达对隧道衬砌的检测       | 172        |
| 10.8        | 钢架应力测试             | 177        |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <b>第 11 章 混凝土结构状况与耐久性检测及评定</b> ..... | 179 |
| 11.1 回弹法检测混凝土强度 .....                | 179 |
| 11.2 超声回弹综合法检测混凝土强度 .....            | 184 |
| 11.3 钻芯法检测混凝土强度 .....                | 188 |
| 11.4 超声法检测混凝土结构缺陷 .....              | 192 |
| 11.5 电磁感应法检测钢筋位置、间距、保护层厚和直径 .....    | 209 |
| 11.6 钢筋锈蚀电位的检测 .....                 | 212 |
| 11.7 混凝土中氯离子含量的检测 .....              | 215 |
| 11.8 混凝土电阻率的检测 .....                 | 217 |
| <b>第 12 章 地基基础试验与检测</b> .....        | 219 |
| 12.1 地基平板载荷试验 .....                  | 219 |
| 12.2 静力触探试验 .....                    | 224 |
| 12.3 标准贯入试验 .....                    | 231 |
| 12.4 低应变反射波法检测桩基完整性 .....            | 234 |
| 12.5 声波透射法检测桩基完整性 .....              | 241 |
| 12.6 桩的钻芯检测 .....                    | 247 |
| 12.7 单桩竖向抗压静载试验 .....                | 251 |
| <b>附表 测区混凝土强度换算表</b> .....           | 255 |
| <b>参考文献</b> .....                    | 262 |

# 第1篇 教学实验

## 第1章 绪论

### 1.1 土木工程试验与检测的意义

在科学技术的发展过程中,科学试验起着非常重要的作用。对土木工程而言,建筑材料、结构体系、设计计算理论、施工方法是其发展进步的四个主要支柱,从土木工程设计理论的演变历史来看,每一种新材料、新体系、新工艺和新结构理论的建立和发展,一般都建立在大量的科学试验、生产实践的基础上。试验研究对于推动和发展工程结构科学研究和技术革新等方面起着重要的作用。

一般说来,土木结构主要可划分为建筑结构、桥梁结构、地下结构三大类,这三类结构虽然在功能用途、结构形式、施工方法等方面有一定的差异,但在建筑材料、设计计算理论、试验检测方法等方面存在密切的联系,在建设程序、质量检验、工程验收等方面基本一致。可以说,不同的土木结构虽然在形式上有一定区别,但具有同样的、内在的技术基础与建设管理流程。另一方面,土木工程作为一门传统的、古老的学科,虽然近30年在设计理论、结构体系、施工工艺技术等方面取得了非常大的进展,但仍未从根本上改变其半理论、半经验的本质。如一些设计参数往往需要通过现场试验勘察来确定,设计理论、计算模型也需要通过试验研究进行检验验证,试验研究与勘察测试仍然具有不可替代的作用。

随着我国大规模的土木工程建设进入中后期,一方面,土木工程中新结构、新材料、新工艺的不断发展,迫切需要通过试验、检测、监测技术来验证土木工程的设计计算理论,检验土木工程的施工质量,提升土木工程建设的技术水平;另一方面,随着既有土木结构服役年限的增长、病害的发展、用途功能的改变,需要通过检测技术来保障结构的安全使用,提高结构的可靠性与耐久性,提升土木结构运营与养护的技术水平。因此,土木工程试验与检测技术日益受到人们的重视,并不断得到发展和提高。

### 1.2 试验与检测的一般程序

一般情况下,土木工程试验与检测可分为三个阶段,即准备规划阶段、加载与观测阶段、分析总结阶段,其内容简要叙述如下:

准备规划阶段是土木工程试验检测顺利进行的必要条件,该阶段工作包括技术资料的收集,如检测工作需要收集设计文件、施工记录、监理记录、既有试验资料等,科学研究工作需要收集课题研究的现状和发展前景等;包括加载方案制定、量测方案制定、仪器仪表选用和校



准等方面(必要时进行结构设计内力计算);还包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试等现场准备工作。可以说,检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节,这一阶段是在各项准备工作就绪的基础上,按照预定的试验方案与试验程序,利用适宜的加载设备进行加载,运用各种测试仪器,观测试验结构受力后的各项性能指标如挠度、应变、裂缝宽度、加速度、位移等,并采用适宜的记录手段记录各种观测数据和资料。需要强调的是,对于静载试验应根据当前所测得的各种技术数据与理论计算结果进行现场分析比较,以判断结构受力行为是否正常,是否可以进行下一级加载,以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全,这对于破坏性静载试验、存在病害的既有结构进行静载试验时尤为重要。

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程,原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料,受各种因素的影响,一般显得缺乏条理性与规律性,未必能深刻揭示试验结构的受力行为规律。因此,应对它们进行科学的分析处理,去伪存真、去粗存精、由表及里,综合分析比较,从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号,有时还需要按照数理统计的方法进行分析,或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理,或按照有关规程的方法进行分析或判断。测试数据经分析处理后,按照相关规范、规程以及试验检测的目的要求,对检测对象做出科学的判断与评价,必要时提出相应的设计、施工或运营维护建议。这一阶段的工作,直接反映整个检测工作的质量。

以上三个阶段的工作完成后,将全部检测工作依据相应规范、按照一定格式、规范地体现在试验检测报告中。试验检测报告内容主要包括试验概况、试验检测目的与依据、试验检测方案、试验检测日期及试验过程、试验记录图表摘录、试验主要成果与分析评价、技术结论等几个方面。

### 1.3 结构试验与检测课程的特点

基于土木工程科学研究与生产鉴定工作的发展形势,土木行业需要大量既懂试验操作、数据分析,又能组织开展试验,进而获得客观、准确的试验结果的人员。本书便以此为目的,分别介绍了基本的实验操作和工程检测项目。在教学实验部分,主要介绍与实验相关的基础知识,使学生熟悉实验术语和数据记录的规范方式;列举了土木工程结构实验所使用的基本仪器的校准方法,使学生在科学试验或生产鉴定检测前首先对使用的仪器进行校准,以保证量测数据真实、可靠,并培养良好的试验习惯;编写了基本结构实验项目,使学生掌握基本的实验操作方法和实验技能,为日后的科研和检测工作打下良好的基础。在工程检测部分,介绍了建筑结构、桥梁工程、隧道工程、混凝土结构状况与耐久性、地基基础的检测、试验与评定方法,旨在确立检测、评估的基本方法和程序,使学生了解规范的检测方法,为日后的工程检测工作提供参考。

本课程是一门实践性很强、涉及知识面较宽的专业技术课程,与通常的理论课程相比,更加注重理论联系实际,更加注重实际应用。在学习的过程中,要注意实验、试验与检测的区别,三者都是一种实践活动,但“实验”侧重于验证既定结果或结论,本书第一篇的各项实验希望以既定结果来检验学生在实验中的操作技巧与分析能力;“试验”侧重于探究,偏重于研究;“检测”侧重于在已有的技术规程或标准指导下,对结构或构件做出鉴定性的测试,偏重于评定。除此之外,应注重实践操作环节,通过动手实践加深对所学知识理解,并获得基本训练,在思考和实践中培养发现问题、分析问题和解决问题的能力。

## 第2章 基础知识

### 2.1 试验技术术语

#### 1. 真 值

在一定条件下完善刻画一个量或定量特性所定义的值。

注：量或定量特性的真值是一个理论上的概念，通常无法确切获得。

#### 2. 约定真值

对于给定的目的，赋予一个量或定量特性的可用于替代其真值的值。

注：通常对于给定的目的，由于约定真值和真值充分接近，故认为约定真值和真值的差可忽略。

#### 3. 测 量

以确定量值为目的的一组操作。

#### 4. 测 试

按照规定的程序，为对某给定产品、过程或服务确定一个或多个特性所进行的技术操作。

#### 5. 计 量

实现单位统一、量值准确可靠的活动。

#### 6. 测量方法

进行测量时所用的，按类别叙述的一组操作逻辑次序。

#### 7. 测量程序

进行特定测量时所用的，根据给定的测量方法具体叙述的一组操作。

#### 8. 测量结果

按规定的测量程序所获得的量值。

#### 9. 测试结果

按规定的测试方法所获得的特性值。

注：测试方法应指明观测是一个还是多个，报告的测试结果是观测值的平均数还是它的其他函数（例如中位数或标准差）。它可以要求按适用的标准进行修正，如气体的体积按标准温度和压力进行的修正。因此一个测试结果可以通过几个观测值计算的结果。最简单情形，测试结果即为观测值本身。

## 10. 测量仪器的示值

测量仪器所给出的量的值。

## 11. 准确度

测试结果或测量结果与真值间的一致程度。

注：(1) 在实际中，真值用接受参照值代替（接受参照值：用作比较的经协商同意的标准值）。

(2) 术语“准确度”：当用于一组测试或测量结果时，由随机误差分量和系统误差分量组成。

(3) 准确度是正确度和精密度的组合。

## 12. 精密度

在规定条件下所获得的独立测试结果或测量结果间的一致程度。

注：(1) 精密度仅依赖于随机误差的分布，与真值或规定值无关。

(2) 精密度的度量通常以表示“不精密”的术语来表达，其值用测试结果或测量结果的标准差来表示。标准差越大，精密度越低。

(3) 精密度的度量严格依赖于所规定的条件，重复性条件和再现性条件为其中两种极端情况。

## 13. 测量结果的重复性

重复性条件下的精密度。重复性可以用测量结果的分散性定量地表示。

注：重复性条件包括：

(1) 相同的测量程序或测试方法。

(2) 同一操作员。

(3) 在同一条件下使用的同一测量或测试设施。

(4) 同一地点。

(5) 在短时间间隔内的重复。

## 14. 测量结果的再现性

再现性条件下的精密度。再现性可以用结果的离散特性来定量表示。

注：再现性条件包括：

(1) 由不同操作员。

(2) 按相同的方法。

(3) 使用不同的测试或测量设施。

(4) 对同一测试或测量对象进行观测。

(5) 独立测试结果或测量结果的观测条件。

## 15. 实验标准差

对同一被测量做  $n$  次测量，表征结果分散性的量按下式算出：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2-1)$$

式中  $x_i$  —— 第  $i$  次测量的结果；

$\bar{x}$ ——平均值。

注：(1) 当将  $n$  个值视作分布的取样时， $x$  为该分布期望的无偏差估计。

(2)  $s/\sqrt{n}$  为  $x$  分布的标准差的估计，称为平均值的标准偏差。

(3) 将平均值的标准偏差称为平均值的标准误差是不正确的。

## 16. 不确定度

表征值的分散性，与测试结果或测量结果相联系的参数，这种分散可合理归因于接收或测试特性的特定量。

注：(1) 测量或测试的不确定度通常由许多分量构成，其中某些分量可基于一系列量测结果的统计分布，用标准差的形式估计。其余分量可基于经验的或其他信息的概率分布，也用标准差形式估计。

(2) 不确定度的分量对离散有贡献，包括那些由系统效应引起的，如修正值和参考测量标准有关的分量。

(3) 不确定度不同于根据测量结果或测试结果已涵盖期望为表征的范围估计，后者估是精密度的度量而非准确度的度量，且仅在没有定义真值时使用。当用期望替代真值时，表达“不确定度的随机分量”。

## 17. 标准不确定度

以标准偏差表示的测量不确定度。

## 18. 扩展不确定度

确定可望包含合理赋予被测量分布的大部分的一个测量结果区间的量。

## 19. 接受参照值

用作比较的经协商同意的标准值。

注：接受参照值来自于：

(1) 基于科学原理的理论值或确定值。

(2) 基于一些国家或国际组织的实验工作的指定或认证值。

(3) 基于科学或工程组织赞助下，合作实验工作中的同意值或认证值。

(4) 当以上三种均不能获得时，则用期望值，即指定测量集合的均值。

## 20. 结果误差

测试结果或测量结果与真值的差。

注：(1) 在实际中，真值用接受参照值代替。

(2) 当有必要与相对误差相区别时，有时也称为测量的绝对误差。

## 21. 偏差

一个值减去其参考值。

## 22. 相对误差

测量误差除以被测量的真值，其真值实际上用的是约定真值。

## 23. 随机误差

测量结果与在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差。

注：(1) 随机误差等于误差减去系统误差。

(2) 因为测量只能进行有限次数，故可能确定的只是随机误差的估计值。

#### 24. 系统误差

在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差。

注：(1) 如真值一样，系统误差及其原因不能完全获知。

(2) 对测量仪器而言，其示值的系统误差称作偏移。

#### 25. 修正值

用代数方法与未修正测量结果相加，以补偿系统误差的值。

注：(1) 修正值等于负的系统误差。

(2) 由于系统误差不能完全获知，因此这种补偿并不完全。

#### 26. 修正因子

为补偿系统误差而与未修正测量结果相乘的数字因子。

由于系统误差不能完全获知，因此这种补偿并不完全。

#### 27. 测量系统

组装起来以进行特定测量的全套测量仪器和其他设备。

#### 28. 测量设备

测量仪器、测量标准、参考物质、辅助设备以及进行测量所必需的资料和资料的总称。

#### 29. 测量仪器的准确度

测量仪器给出接近于真值的响应能力。准确度是定性的概念。

#### 30. 测量仪器的示值误差

测量仪器示值与对应输入量的真值之差。

#### 31. 溯源性

任何一个测量结果或计量标准值，都能通过一条具有规定不确定度的连续比较链，与计量基准联系起来。

#### 32. 参考物质（标准物质）

具有一种或多种足够均匀和很好的确定的特性，用以校准测量装置、评价测量方法或给材料赋值的一种材料或物质。而附有证书的经过溯源的标准物质称有证标准物质。在标准物质证书和标签上均有 CMC 标记。

注：标准物质的作用有：

(1) 作为校准物质用于仪器的定度（化学分析仪器）。

(2) 作为已知物质用以测量评价测量方法。

(3) 作为控制物质与待测物质同时进行分析。

当标准物质得到的分析结果与证书给出的量值在规定限度内一致时，证明待测物质的分析结果是可信的。标准物质分为两级：一级由国家计量部门制作颁发或出售，二级由各专业部门制作供厂矿或实验室日常使用。

## 2.2 法定计量单位

我国计量法规定国际单位制计量单位和国家选定的其他计量单位，为国家法定计量单位。国家法定计量单位的名称、符号由国务院公布。我国允许使用的计量单位是国家法定计量单位。国家法定计量单位由国际单位制单位和国家选定的非国际单位制单位组成。

国际单位制是我国法定计量单位的主体，国际单位制如有变化，我国法定计量单位也将随之而变化。国际单位制是我国法定计量单位的基础，一切属于国际单位制的单位都是我国的法定计量单位。

### 2.2.1 国际单位制

国际单位制是国际计量大会（CGPM）采纳和推荐的一种一贯单位制，SI 作为国际单位制通用的缩写符号。下面就国际单位制的相关内容介绍如下：

#### 1. 国际单位制的构成

国际单位制的内容包括国际单位制（SI）的构成体系、SI 单位、SI 词头、SI 单位的十进倍数与分数单位的构成以及它们的使用规则。国际单位制的构成如图 2-1 所示。

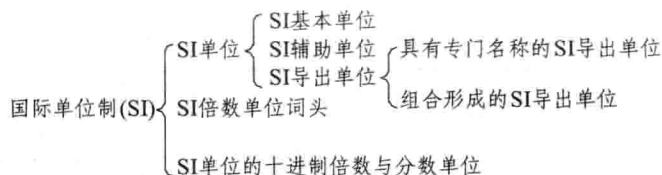


图 2-1 国际单位制构成简图

#### 2. SI 单位

##### (1) SI 单位的组成

SI 单位包括 SI 基本单位、SI 辅助单位、SI 导出单位。

##### ① SI 基本单位

国际单位制以表 2-1 中的 7 个单位为基础，这 7 个单位称为 SI 基本单位，又称为国际单位制的基本单位。

表 2-1 SI 基本单位

| 物理量名称 | 物理量符号   | 单位名称   | 单位符号 |
|-------|---------|--------|------|
| 长度    | $L$     | 米      | m    |
| 质量    | $m$     | 千克（公斤） | kg   |
| 时间    | $t$     | 秒      | s    |
| 电流    | $I$     | 安（安培）  | A    |
| 热力学温度 | $T$     | 开（开尔文） | K    |
| 物质的量  | $n(v)$  | 摩（摩尔）  | mol  |
| 发光强度  | $I(Iv)$ | 坎（坎德拉） | cd   |

② SI 辅助单位

弧度和球面度两个 SI 单位，国际计量大会并未将它们归入基本单位和（或）导出单位，而称之为 SI 辅助单位，又称为国际单位制辅助单位。这两个单位列于表 2-2，它们既可以作为基本单位使用，又可以作为导出单位使用。原则上说，它们是无量纲的导出单位，但从实用出发不列为 SI 导出单位。使用上根据需要，既可以用弧度或球面度，也可以用“1”。

表 2-2 SI 辅助单位

| 量的名称 | 单位名称 | 单位符号 |
|------|------|------|
| 平面角  | 弧度   | rad  |
| 立体角  | 球面度  | sr   |

③ SI 导出单位

导出单位是用基本单位和（或）辅助单位以代数形式所表示的单位。这种单位符号中的乘和除使用数学符号。如速度的 SI 单位为米每秒（m/s），角速度的 SI 单位为弧度每秒（rad/s）。属于这种形式的单位称为组合单位。

某些 SI 导出单位在国际计量大会通过了专门的名称和符号，见表 2-3。使用这些专门名称以及用它们表示其他导出单位，往往更为方便、明确。如“功”的 SI 单位通常用焦耳（J）代替牛顿·米（N·m）。

表 2-3 具有专门名称的 SI 导出单位

| 量的名称          | SI 导出单位 |             |               |  |
|---------------|---------|-------------|---------------|--|
|               | 名称      | 符号          | 其他表示式         |  |
|               |         |             | 用 SI 单位示例     | 用 SI 基本单位                                  |
| 频率            | 赫[兹]    | Hz          | —             | $s^{-1}$                                   |
| 力，重力          | 牛[顿]    | N           | —             | $m \cdot kg \cdot s^{-2}$                  |
| 压力，压强，应力      | 帕[斯卡]   | Pa          | $N/m^2$       | $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$             |
| 能[量]，功，热量     | 焦[耳]    | J           | $N \cdot m$   | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$                |
| 功率，辐[射能]通量    | 瓦[特]    | W           | J/s           | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$                |
| 电荷[量]         | 库[伦]    | C           | —             | $A \cdot s$                                |
| 电压，电动势，电位，电势  | 伏[特]    | V           | W/A           | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$   |
| 电容            | 法[拉]    | F           | C/A           | $m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$ |
| 电阻            | 欧[姆]    | $\Omega$    | V/A           | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$   |
| 电导            | 西[门子]   | S           | A/V           | $m^{-2} \cdot kg \cdot s^3 \cdot A^2$      |
| 磁通[量]         | 韦[伯]    | Wb          | $V \cdot s$   | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$   |
| 磁通[量]密度，磁感应强度 | 特[斯拉]   | T           | $Wb/m^2$      | $kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$             |
| 电感            | 亨[利]    | H           | $Wb/A$        | $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$   |
| 摄氏湿度          | 摄氏度     | $^{\circ}C$ | —             | K  |
| 光通            | 流[明]    | lm          | $cd \cdot sr$ | $m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd$                |
| （光）照度         | 勒[克斯]   | lx          | $lm/m^2$      | $m^{-2} \cdot cd \cdot sr$                 |

表 2-1 ~ 表 2-3 确定了单位的名称及其简称,用于口述,也可用于叙述性的文字中。

组合单位的名称与其符号表示的顺序一致,符号中的乘号没有对应的名称,除号的对应名称为“每”字,无论分母中有几个单位,“每”字都只出现一次。例如:比热容的单位符号是  $J/(kg \cdot K)$ ,其名称是“焦耳每千克开尔文”。

乘方形式的单位名称,其顺序应是指数名称在前,单位名称在后,指数名称由相应的数字如“次方”两字而成。例如:断面惯性矩单位符号为  $m^4$ ,其名称为“四次方米”。

如果长度的二次和三次幂分别表示面积和体积,则相应的指数名称为“平方”和“立方”,否则应称为“二次方”和“三次方”。例如:体积单位符号是  $m^3$ ,其名称为“立方米”。

书写单位名称时,不加任何表示乘或(和)除的符号或(和)其他符号。例如:电阻率单位符号是  $\Omega \cdot m$ ,其名称为“欧姆米”,而不是“欧姆·米”、“欧姆-米”、“[欧姆][米]”等。

### (2) SI 单位的倍数单位

表 2-4 列出了 SI 单位的倍数单位,倍数单位的词头(SI 词头)名称、简称及符号。词头用于构成 SI 单位的倍数单位,但不得单独使用。

表 2-4 SI 倍数单位词头

| 所表示的因数    | 词头名称  | 词头符号 | 所表示的因数     | 词头名称  | 词头符号  |
|-----------|-------|------|------------|-------|-------|
| $10^{18}$ | 艾[可萨] | E    | $10^{-1}$  | 分     | d     |
| $10^{15}$ | 拍[它]  | P    | $10^{-2}$  | 厘     | c     |
| $10^{12}$ | 太[拉]  | T    | $10^{-3}$  | 毫     | m     |
| $10^9$    | 吉[咖]  | G    | $10^{-6}$  | 微     | $\mu$ |
| $10^6$    | 兆     | M    | $10^{-9}$  | 纳[诺]  | n     |
| $10^3$    | 千     | k    | $10^{-12}$ | 皮[可]  | p     |
| $10^2$    | 百     | h    | $10^{-15}$ | 飞[母拖] | f     |
| $10^1$    | 十     | da   | $10^{-18}$ | 阿[托]  | a     |

词头与所紧接的单位,应作为一个整体对待,它们一起组成一个新单位(十进倍数单位),并具有相同的幂次,而且还可以根据习惯和其他单位构成组合单位。例如:

$1 \text{ cm}^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$ ,  $1 \mu\text{s}^{-1} = (10^{-6} \text{ s})^{-1} = 10^6 \text{ s}^{-1}$ ,  $1 \text{ mm}^2/\text{s} = (10^{-3} \text{ m})^2/\text{s} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $10^6 \text{ eV}$  可写成为  $\text{MeV}$ ,  $10^{-3} \text{ L}$  可写成为  $\text{mL}$ ,  $10^{-3} \text{ tex}$  可写成为  $\text{mtx}$ 。

注:由于质量的 SI 单位名称“千克”中,已包含 SI 词头“千”,所以质量的十进倍数单位由词头加在“克”前构成,如用  $\text{mg}$  而不得用  $\mu\text{kg}$ 。

### (3) 其他单位

由于一些单位使用十分广泛而且十分必要,可与 SI 并用的我国法定计量单位见表 2-5。

表 2-5 与 SI 并用的我国法定计量单位

| 量的名称 | 单位名称  | 单位符号 | 与 SI 单位的关系  |
|------|-------|------|---|
| 时间   | 分     | min  | $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$                    |
|      | [小]时  | h    | $1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3\,600 \text{ s}$ |
|      | 日,(天) | d    | $1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$  |



续表 2-5

| 量的名称   | 单位名称   | 单位符号   | 与 SI 单位的关系  |
|--------|--------|--------|---|
| 平面(角)  | 度      | (°)    | $1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$   |
|        | [角]分   | (')    | $1' = (1/60)^\circ = (\pi/10\ 800) \text{ rad}$   |
|        | (角)秒   | (")    | $1'' = (1/60)' = (\pi/648\ 000) \text{ rad}$  |
| 体积, 容积 | 升      | L (l)  | $1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$  |
| 质量     | 吨      | t      | $1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$   |
|        | 原子质量单位 | $\mu$  | $1 \mu \approx 1.660\ 565\ 5 \times 10^{-27} \text{ kg}$  |
| 旋转速度   | 转每分    | r/min  | $1 \text{ r/min} = (1/60) \text{ s}^{-1}$   |
| 长度     | 海里     | n mile | $1 \text{ n mile} = 1\ 852 \text{ m}$ (只用于航程)   |
| 速度     | 节      | kn     | $1 \text{ kn} = 1 \text{ n mile/h} = \left(\frac{1\ 852}{3\ 600}\right) \text{ m/s}$<br>(只用于航程) |
| 能      | 电子伏    | eV     | $1 \text{ eV} \approx 1.602\ 189\ 2 \times 10^{-19} \text{ J}$                                  |
| 级差     | 分贝     | dB     |   |
| 线密度    | 特[克斯]  | tex    | $1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg/m}$  |

## 2.2.2 SI 单位及其倍数单位的应用

根据使用方便的原则来选用 SI 单位的倍数单位。通过适当的选择, 可使数值处于实用范围内。使用 SI 单位及其倍数单位具体原则举例说明如下:

(1) 选用 SI 单位的倍数单位, 一般应使用量的数值处于 0.1 ~ 1 000 范围内。

例如:  $1.2 \times 10^4 \text{ N}$  可写成 12 kN,  $0.003\ 94 \text{ m}$  可写成 3.94 mm,  $11\ 401 \text{ Pa}$  可写成 11.401 kPa,  $3.1 \times 10^{-8} \text{ s}$  可写成 31 ns。

在某些情况下习惯使用的单位可以不受上述限制, 如大部分机械制图使用的单位可以用毫米, 导线截面积使用的单位可以用平方毫米, 领土面积用平方千米。

在同一个量的数值中, 或叙述同一个量的文章里, 为对照方便, 使用相同的单位时, 数值不受限制。词头 h、da、d、c (百、十、分、厘), 一般用于某些长度、面积和体积。

(2) 对于组合单位, 其倍数单位的构成最好只使用一个词头, 而且尽可能是组合单位中的第一个单位采用词头。

只通过相乘构成的组合单位在加词头时, 词头通常加在第一个单位之前。

例如: 力矩的单位 kN · m, 不宜写成 N · km。

只通过相除构成的组合单位, 或通过乘和除构成的组合单位, 在加词头时词头一般都应加在分子的第一个单位之前, 分母中一般不用词头, 但质量单位 kg 在分母中时例外。

例如: 摩尔内能单位 kJ/mol, 不宜写成 J/mmol; 比能单位可以写成 kJ/kg。

(3) 在计算中为了方便, 建议所有量均用 SI 单位表示, 将词头用 10 的幂代替。

(4) 有些国际单位制以外的单位, 可以按习惯用 SI 词头构成倍数单位, 但它们不属于国际单位制。如 MeV、mCi、mL 等。摄氏温度单位摄氏度, 角度单位度、分、秒与时间单位日、