

高等学校函授教材

# 材料力学

马奇光 编

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书是为高等工科院校土建、水利、机械等专业编写的一本函授教材，也可用作其它专业函授生和青年自学教材，还可供工程技术人员及在校学生作为参考书。

全书共十六章，内容包括：绪论及基本概念，轴向拉伸与压缩，剪切，扭转，截面图形的几何性质，弯曲内力，弯曲应力，弯曲变形，应力、应变分析基础，强度理论，组合变形下构件的强度计算，能量法，超静定系统，压杆稳定，动载荷，疲劳强度和断裂韧性。

除每章中附有学习指导、复习思考题、习题外，书中还有初谈、再谈、三谈如何学习材料力学及课程结束语等内容，帮助读者自学。

## 高等学校函授教材 材 料 力 学 马 奇 光 编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 30.25印张 686千字

1983年12月第一版 1983年12月北京第一次印刷

印数 00001—14110册 定价 3.10元

书号 15143·5156

## 前 言

为了适应我国社会主义建设事业的需要，必须培养人数众多的科技人才，这项任务只靠全日制大学是不能在短期内完成的。因此，要办好函授教育及鼓励自学，培养更多的科技人才。本教材就是为函授生和自学青年而编写的。

二十几年前，我曾为北京水利水电学院函授生编写过一本供自学用的《材料力学函授教材》。函授生反映：内容易懂，讲解通俗，适合自学。以后，武汉水利电力学院、华东水利学院、吉林水电学院也曾给函授生用过这一教材。水利电力以及土建、机械系统的在职干部也索取它作为参考，有的院校学生也用此书作为课后复习参考书。

现根据1980年5月教育部召开的高等工科学教材编审委员会扩大会议上讨论的“《材料力学》编写大纲（四年制土建、水利、机械等类专业用）”的内容，参考了国内外出版的材料力学教材和有关资料，结合过去函授生自学和普通班学生学习时常发生困难的问题，重新编写了这本教材。

本教材中有[ ]和〈 〉括号的内容，按大纲要求分别为土建类和机械类专业所需要的；有\*号的内容，按大纲要求可根据专业需要选择使用；为了避免与结构力学重复，“虚功原理”内容没有编入。

本教材在编写过程中，有不少同志给予大力支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，本书可能存在不当或错误之处，希望读者批评指正。

编者

1982.4.5

# 主 要 符 号 表

| 字 符             | 字 符 意 义           | 国 际 单 位 制                                | 工 程 单 位 制                             |
|-----------------|-------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|
| (英文字母)          |                   |                                          |                                       |
| $A$             | 截面面积              | $m^2, mm^2$                              | $cm^2, mm^2$                          |
| $D$             | 直 径               | $m, mm$                                  | $cm, mm$                              |
| $E$             | 弹性模量              | $MPa, GPa$                               | $kg/cm^2, kg/mm^2$                    |
| $G$             | 剪切弹性模量            | $MPa, GPa$                               | $kg/cm^2, kg/mm^2$                    |
| $J_p$           | 极 惯 矩             | $m^4, mm^4$                              | $cm^4, mm^4$                          |
| $J_y, J_z$      | 惯 矩               | $m^4, mm^4$                              | $cm^4, mm^4$                          |
| $J_x$           | 惯 积               | $m^4, mm^4$                              | $cm^4, mm^4$                          |
| $K$             | 安全系数              | 无量纲量                                     | 无量纲量                                  |
| $K_d$           | 动荷系数              | 无量纲量                                     | 无量纲量                                  |
| $K_o, K_r$      | 有效应力集中系数          | 无量纲量                                     | 无量纲量                                  |
| $K_1$           | 应力强度因子(第 I 型)     | $kN \cdot mm^{-3/2}, MPa \cdot \sqrt{m}$ | $kg \cdot mm^{-3/2}$                  |
| $K_{IC}$        | 平面应变断裂韧度          | $kN \cdot mm^{-3/2}, MPa \cdot \sqrt{m}$ | $kg \cdot mm^{-3/2}$                  |
| $M_0$           | 外力偶矩              | $N \cdot m, kN \cdot m$                  | $kg \cdot cm, kg \cdot mm, t \cdot m$ |
| $M$             | 弯 矩               | $N \cdot m, kN \cdot m$                  | $kg \cdot cm, kg \cdot mm, t \cdot m$ |
| $M_K$           | 扭 矩               | $N \cdot m, kN \cdot m$                  | $kg \cdot cm, kg \cdot mm, t \cdot m$ |
| $M_x$           | 对 $x$ 轴的扭矩        | $N \cdot m, kN \cdot m$                  | $kg \cdot cm, kg \cdot mm, t \cdot m$ |
| $M_y, M_z$      | 对 $y$ 轴、 $z$ 轴的弯矩 | $N \cdot m, kN \cdot m$                  | $kg \cdot cm, kg \cdot mm, t \cdot m$ |
| $M_{x\alpha n}$ | 相当弯矩(折算弯矩)        | $N \cdot m, kN \cdot m$                  | $kg \cdot cm, kg \cdot mm, t \cdot m$ |
| $M^0$           | 由单位载荷引起的弯矩        | $N \cdot m, kN \cdot m$                  | $kg \cdot cm, kg \cdot mm, t \cdot m$ |
| $N$             | 轴 力               | $N, kN$                                  | $kg, t$                               |
|                 | 功 率               | $W, kW$                                  | 马力, $kW$                              |
| $P$             | 集中力(载荷)           | $N, kN$                                  | $kg, t$                               |
| $P_{cr}$        | 压杆的临界载荷           | $N, kN$                                  | $kg, t$                               |
| $Q$             | 剪 力               | $N, kN$                                  | $kg, t$                               |
|                 | 载 荷               | $N, kN$                                  | $kg, t$                               |
| $R$             | 合 力               | $N, kN$                                  | $kg, t$                               |
|                 | 支 反 力             | $N, kN$                                  | $kg, t$                               |
| $S_y, S_z$      | 静 矩               | $m^3, mm^3$                              | $cm^3, mm^3$                          |
| $U$             | 应 变 能             | $J(N \cdot m)$                           | $kg \cdot m$                          |
| $V$             | 体 积               | $m^3, mm^3$                              | $cm^3, mm^3$                          |
| $W_y, W_z$      | 抗弯截面模量            | $m^3, mm^3$                              | $cm^3, mm^3$                          |
| $W_p$           | 抗扭截面模量            | $m^3, mm^3$                              | $cm^3, mm^3$                          |
| $W$             | 外 力 功             | $J(N \cdot m)$                           | $kg \cdot m$                          |
| $X, Y, Z$       | 沿 $x, y, z$ 轴的分力  | $N, kN$                                  | $kg, t$                               |
| $b$             | 截面宽度              | $m, mm$                                  | $kg, t$                               |
| $d$             | 直 径               | $m, mm$                                  | $cm, mm$                              |
| $e$             | 偏 心 距             | $m, mm$                                  | $cm, mm$                              |
| $f$             | 梁的挠度              | $m, mm$                                  | $cm, mm$                              |
| $h$             | 截面高度              | $m, mm$                                  | $kg, t$                               |
| $i_y, i_z$      | 惯性半径              | $m, mm$                                  | $cm, mm$                              |
| $l$             | 梁的跨度, 杆的长度        | $m, mm$                                  | $m, cm, mm$                           |
| $n$             | 轴的转速              | $rad/S$                                  | 每分钟转数                                 |
| $q$             | 分布力集度             | $kN/m$                                   | $kg/cm, kg/m, t/m$                    |
| $r$             | 半 径               | $m, mm$                                  | $cm, mm$                              |

续表

| 字 符                                           | 字 符 意 义           | 国 际 单 位 制                                   | 工 程 单 位 制                                                                  |
|-----------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $r$                                           | 交变应力的循环特征         | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $t$                                           | 温 度               | $^{\circ}\text{C}$                          | $^{\circ}\text{C}$                                                         |
| $n$                                           | 比 能               | $\text{J}/\text{m}^3, \text{J}/\text{mm}^3$ | $\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3, \text{kg}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3$ |
| $x, y, z$                                     | 坐标轴( $x$ 轴代表杆件轴线) |                                             |                                                                            |
| $y$                                           | 梁的挠度              | $\text{m}, \text{mm}$                       | $\text{cm}, \text{mm}$                                                     |
| $[y]$                                         | 梁的许可挠度            | $\text{m}, \text{mm}$                       | $\text{cm}, \text{mm}$                                                     |
| (希腊字母)                                        |                   |                                             |                                                                            |
| $\alpha$                                      | 线膨胀系数             | $1/^{\circ}\text{C}$                        | $1/^{\circ}\text{C}$                                                       |
| $\alpha_0, \alpha_T$                          | 理论应力集中系数          | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $\beta$                                       | 表面状态系数            |                                             |                                                                            |
| $\gamma$                                      | 剪 应 变             | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $\delta$                                      | 伸 长 率             | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $\varepsilon$                                 | 线 应 变             | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ | 主 应 变             | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $\theta$                                      | 杆的单位长度扭转角         | $\text{rad}/\text{m}$                       | $\text{rad}/\text{cm}$                                                     |
| $\varphi$                                     | 体积应变              | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $[\theta]$                                    | 单位长度杆的许可扭转角       | $^{\circ}/\text{m}$                         | $^{\circ}/\text{m}$                                                        |
|                                               | 梁的许可转角            | $\text{rad}$                                | $\text{rad}$                                                               |
| $\lambda$                                     | 压杆的长细比            | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $\mu$                                         | 压杆的长度系数           | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $\nu$                                         | 横向变形系数(泊松比)       | 无量纲量                                        | 无量纲量                                                                       |
| $\rho$                                        | 曲率半径              | $\text{m}, \text{mm}$                       | $\text{m}, \text{cm}, \text{mm}$                                           |
| $\sigma$                                      | 正 应 力             | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_{max}$                                | 最大正应力             | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
|                                               | 应力循环中的最大正应力       | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_{min}$                                | 最小应力              | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
|                                               | 应力循环中的最小正应力       | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$                | 主 应 力             | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_l$                                    | 拉 应 力             | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_a$                                    | 压 应 力             | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_{xd}$                                 | 相当应力              | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_m$                                    | 应力循环中的平均应力        | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_a$                                    | 应力循环中的应力振幅        | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $[\sigma]$                                    | 许用拉(压)应力          | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
|                                               | 许用弯曲应力            | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_{cr}$                                 | 压杆的临界应力           | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_r$                                    | 材料的持久极限           | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_p$                                    | 比例极限              | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_e$                                    | 弹性极限              | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_s$                                    | 屈服极限              | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_{0.2}$                                | 名义屈服极限            | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\sigma_b$                                    | 强度极限              | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\tau$                                        | 剪 应 力             | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\tau_{max}$                                  | 最大剪应力             | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $[\tau]$                                      | 许用剪应力             | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\tau_p$                                      | 剪切比例极限            | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |
| $\tau_s$                                      | 剪切屈服极限            | $\text{MPa}$                                | $\text{kg}/\text{cm}^2, \text{kg}/\text{mm}^2$                             |

续表

| 字 符       | 字 符 意 义  | 国 际 单 位 制  | 工 程 单 位 制   |
|-----------|----------|------------|-------------|
| $\varphi$ | 扭 转 角    | rad        | rad         |
|           | 稳定折减系数   | 无量纲量       | 无量纲量        |
| $\psi$    | 面积缩减率    | 无量纲量       | 无量纲量        |
| $\Delta$  | 线位移(角位移) | m, mm(rad) | cm, mm(rad) |

## 国际单位制与工程单位制

国际单位制是1960年第十一届国际计量大会通过的，其国际代号为SI，我国简称为国际单位制。1977年国务院决定在我国逐步采用国际单位制。同时，教育部提出“为了使新编的教材在单位制方面符合现代化要求，让学生在学习期间尽早熟悉国际单位制，为全国采用国际单位制进行准备”，因此，本书中采用的是国际单位制。为了便于换算，特列国际单位制与工程单位制换算表如下。

考虑到当前工程实际中仍在工程单位制，所以在本书中某一单位初次出现时将同时列出工程单位制，以便读者对照。

国际单位制与工程单位制换算表

| 量                 | 国 际 单 位 制 |                 |                       | 工程单位制           | 换 算 关 系                                                                                                                  |
|-------------------|-----------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | 名 称       | 代 号             |                       |                 |                                                                                                                          |
|                   |           | 中 文             | 国 际                   |                 |                                                                                                                          |
| 长 度               | 米         | 米               | m                     | m               | $1\text{cm} = 10\text{mm} = 10^{-2}\text{m}$                                                                             |
|                   | 毫米        | 毫米              | mm                    | cm              | $1\text{m} = 10^4\text{cm}$                                                                                              |
|                   |           |                 |                       | mm              | $1\text{mm} = 10^{-1}\text{cm}$                                                                                          |
| 面 积①              | 平方米       | 米 <sup>2</sup>  | m <sup>2</sup>        | m <sup>2</sup>  | $1\text{cm}^2 = 10^{-4}\text{m}^2 = 10^2\text{mm}^2$                                                                     |
|                   | 平方厘米      | 厘米 <sup>2</sup> | cm <sup>2</sup>       | cm <sup>2</sup> | $1\text{mm}^2 = 10^{-2}\text{cm}^2$                                                                                      |
|                   | 平方毫米      | 毫米 <sup>2</sup> | mm <sup>2</sup>       | mm <sup>2</sup> | $1\text{m}^2 = 10^4\text{cm}^2$                                                                                          |
| 时 间               | 秒         | 秒               | S                     | S, min          | $1\text{S} = 1/60\text{min}$                                                                                             |
| 体积①、面积矩、抗弯(扭)截面模量 | 立方米       | 米 <sup>3</sup>  | m <sup>3</sup>        | m <sup>3</sup>  | $1\text{cm}^3 = 10^{-6}\text{m}^3 = 10^3\text{mm}^3$                                                                     |
|                   | 立方厘米      | 厘米 <sup>3</sup> | cm <sup>3</sup>       | cm <sup>3</sup> | $1\text{mm}^3 = 10^{-3}\text{cm}^3$                                                                                      |
|                   | 立方毫米      | 毫米 <sup>3</sup> | mm <sup>3</sup>       | mm <sup>3</sup> | $1\text{m}^3 = 10^6\text{cm}^3$                                                                                          |
| 惯矩、极惯矩、惯积         | 毫米四次方     | 毫米 <sup>4</sup> | mm <sup>4</sup>       | cm <sup>4</sup> | $1\text{cm}^4 = 10^{-8}\text{m}^4 = 10^4\text{mm}^4$                                                                     |
|                   | 米四次方      | 米 <sup>4</sup>  | m <sup>4</sup>        | mm <sup>4</sup> | $1\text{mm}^4 = 10^{-4}\text{cm}^4$                                                                                      |
|                   |           |                 |                       |                 | $1\text{m}^4 = 10^8\text{cm}^4$                                                                                          |
| 力                 | 牛顿        | 牛               | N                     | kg              | $1\text{kg} = 9.807\text{N}(\approx 10\text{N})$                                                                         |
|                   | 千牛顿       | 千牛              | kN(10 <sup>3</sup> N) | t               | $1\text{t} = 9.807\text{kN}(\approx 10\text{kN})$                                                                        |
|                   |           |                 |                       |                 | $1\text{N} = 0.102\text{kg}(\approx 0.1\text{kg})$<br>$1\text{kN} = 0.102\text{t}(\approx 0.1\text{t})$                  |
| 载荷集度              | 牛顿每米      | 牛/米             | N/m                   | kg/cm           | $1\text{kg/cm} = 9.807 \times 10^2\text{N/m}$<br>$= 0.9807\text{kN/m}$                                                   |
|                   | 千牛顿每米     | 千牛/米            | kN/m                  | t/m             | $1\text{N/m} = 0.102 \times 10^{-2}\text{kg/cm}$<br>$1\text{t/m} = 9.807\text{kN/m}$<br>$1\text{kN/m} = 0.102\text{t/m}$ |

续表

| 量                       | 国 际 单 位 制                                                     |                                                    |                                                    | 工程单位制                                                                    | 换 算 关 系                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | 名 称                                                           | 代 号                                                |                                                    |                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|                         |                                                               | 中 文                                                | 国 际                                                |                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 力矩                      | 牛顿米                                                           | 牛·米                                                | N·m                                                | kg·cm<br>kg·m                                                            | 1kg·cm = 9.807×10 <sup>-2</sup> N·m<br>1N·m = 10.2kg·cm<br>= 0.102kg·m                                                                                                                                                                                                  |
| 应力<br>压强                | 牛顿每平方米<br>(基本单位)<br>简称帕斯卡<br>兆帕斯卡<br>(常用单位)                   | 牛/米 <sup>2</sup><br><br>帕<br>兆帕                    | N/m <sup>2</sup><br><br>Pa<br>MPa                  | kg/cm <sup>2</sup><br>kg/mm <sup>2</sup>                                 | 1Pa = 1N/m <sup>2</sup><br>1kg/cm <sup>2</sup> = 9.807×10 <sup>4</sup> N/m <sup>2</sup><br>1kg/mm <sup>2</sup> = 9.807×10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup><br>1N/m <sup>2</sup> = 0.102×10 <sup>-4</sup> kg/cm <sup>2</sup><br>= 0.102×10 <sup>-6</sup> kg/mm <sup>2</sup> |
| 弹性模量                    | 千兆帕斯卡                                                         | 千兆帕                                                | GPa                                                | 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup><br>10 <sup>4</sup> kg/mm <sup>4</sup> | 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup> = 98.07GPa<br>1GPa = 0.0102×10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>                                                                                                                                                                       |
| 应力强度因子、<br>平面应变断裂韧<br>度 | 千牛·毫米的<br>- $\frac{3}{2}$ 次方<br>兆帕斯卡·米<br>的 $-\frac{1}{2}$ 次方 | 千牛·<br>毫米 <sup>-3/2</sup><br>兆帕· $\sqrt{\text{米}}$ | kN·mm <sup>-3/2</sup><br><br>MPa $\sqrt{\text{m}}$ | kg·mm <sup>-3/2</sup>                                                    | 1kg·mm <sup>-3/2</sup><br>= 9.807×10 <sup>-3</sup> kN·mm <sup>-3/2</sup><br>= 0.31MPa $\sqrt{\text{m}}$<br>1MPa $\sqrt{\text{m}}$ = 3.226kg·mm <sup>-3/2</sup>                                                                                                          |
| 功、<br>能                 | 焦耳                                                            | 焦                                                  | J(或N·m)                                            | kg·cm                                                                    | 1J = 1N·m<br>1kg·cm = 9.807×10 <sup>-2</sup> J                                                                                                                                                                                                                          |
| 比能                      | 焦耳每立方米                                                        | 焦/米 <sup>3</sup>                                   | J/m <sup>3</sup>                                   | kg·cm/cm <sup>3</sup>                                                    | 1kg·cm/cm <sup>3</sup> = 9.807×10 <sup>4</sup> J/m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                         |
| 功率                      | 瓦特<br>千瓦特                                                     | 瓦<br>千瓦                                            | W(或J/S)<br>kW                                      | kg·m/S<br><br>马力                                                         | 1kg·m/S = 9.865W<br>1W = 0.102kg·m/S<br>1kW = 102kg·m/S<br>1马力 = 75kg·m/S<br>= 735.5W                                                                                                                                                                                   |
| 速度                      | 米每秒                                                           | 米/秒                                                | m/S                                                | m/S                                                                      | —                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 加速度                     | 米每秒每秒                                                         | 米/秒 <sup>2</sup>                                   | m/S <sup>2</sup>                                   | m/S <sup>2</sup>                                                         | —                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 平面角                     | 弧度                                                            | 弧度                                                 | rad(或r)                                            |                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 角速度                     | 弧度每秒                                                          | 弧度/秒                                               | rad/S                                              | rad/S                                                                    | —                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 角加速度                    | 弧度每秒每秒                                                        | 弧度/秒 <sup>2</sup>                                  | rad/S <sup>2</sup>                                 | rad/S <sup>2</sup>                                                       | —                                                                                                                                                                                                                                                                       |

① 在国际单位制中，一般不用cm作为长度单位，但在面积和体积的计算中可以例外，即允许使用cm<sup>2</sup>和cm<sup>3</sup>分别作为面积和体积的单位。

# 目 录

## 前言

## 主要符号表

## 国际单位制与工程单位制

## 初谈如何学习材料力学 ..... 1

## 第一章 绪论·基本概念 ..... 5

### 第一节 材料力学的任务及研究对象 ..... 5

### 第二节 变形固体的基本假定及小变形条件 ..... 6

### 第三节 外力及其分类 ..... 8

### 第四节 内力与截面法 ..... 9

### 第五节 应力的概念 ..... 10

### 第六节 位移与应变的概念 ..... 12

### 第七节 力与变形、应力与应变之间的关系简介 ..... 15

### 第八节 材料力学处理问题的方法 ..... 16

### 第九节 构件的分类·杆件变形的基本形式 ..... 16

### 第十节 材料力学与其他课程的联系 ..... 18

### 学习指导 ..... 19

### 小结 ..... 21

### 复习思考题 ..... 21

## 第二章 轴向拉伸与压缩 ..... 22

### 第一节 轴向拉伸与压缩的概念和实例 ..... 22

### 第二节 轴向拉伸与压缩时横截面上的内力——轴力·轴力图 ..... 23

### 第三节 轴向拉伸或压缩时横截面上的应力 ..... 26

### 第四节 拉(压)的变形·虎克定律 ..... 30

### 第五节 应变能的概念 ..... 35

### 第六节 局部应力的概念 ..... 39

### 第七节 拉伸和压缩时材料的力学性能 ..... 41

### 第八节 轴向拉伸(压缩)时的强度计算 ..... 48

### 第九节 拉伸(压缩)超静定问题 ..... 55

### 学习指导 ..... 66

### 复习思考题 ..... 68

### 习题 ..... 68

## 第三章 剪切 ..... 72

### 第一节 剪切的概念和实例 ..... 72

### 第二节 铆钉连接的实用计算 ..... 74

### 学习指导 ..... 80

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 复习思考题 .....                      | 81  |
| 习题 .....                         | 81  |
| <b>第四章 扭转</b> .....              | 84  |
| 第一节 扭转的概念和实例 .....               | 84  |
| 第二节 扭转时轴上外力偶的计算·扭矩及扭矩图 .....     | 85  |
| 第三节 薄壁圆筒的扭转 .....                | 89  |
| 第四节 圆轴扭转时的应力和变形 .....            | 92  |
| 第五节 圆形截面极惯矩的计算 .....             | 96  |
| 第六节 圆轴扭转时的应变能 .....              | 98  |
| 第七节 实心 and 空心圆轴扭转时的强度及刚度计算 ..... | 100 |
| *第八节 密圈螺旋弹簧的应力与变形 .....          | 103 |
| 第九节 矩形截面杆扭转问题的主要结果 .....         | 106 |
| *第十节 薄壁杆件的自由扭转 .....             | 108 |
| 第十一节 考虑材料塑性时圆轴的极限扭矩 .....        | 109 |
| 学习指导 .....                       | 110 |
| 复习思考题 .....                      | 111 |
| 习题 .....                         | 112 |
| 再谈如何学习材料力学 .....                 | 114 |
| <b>第五章 截面图形的几何性质</b> .....       | 116 |
| 第一节 基本概念 .....                   | 116 |
| 第二节 静矩 .....                     | 116 |
| 第三节 惯矩、惯积和极惯矩 .....              | 121 |
| 第四节 惯矩和惯积的平行移轴公式 .....           | 125 |
| 第五节 惯矩和惯积的转轴公式·截面的主惯矩和主惯轴 .....  | 128 |
| 学习指导 .....                       | 136 |
| 复习思考题 .....                      | 137 |
| 习题 .....                         | 138 |
| <b>第六章 弯曲内力</b> .....            | 140 |
| 第一节 平面弯曲的概念和实例 .....             | 140 |
| 第二节 梁的支座及其支反力 .....              | 141 |
| 第三节 梁横截面上的内力——剪力与弯矩 .....        | 146 |
| 第四节 剪力图与弯矩图 .....                | 151 |
| 第五节 载荷集度、剪力及弯矩之间的微分关系 .....      | 159 |
| 第六节 按叠加原理作剪力图与弯矩图 .....          | 167 |
| 学习指导 .....                       | 169 |
| 复习思考题 .....                      | 169 |
| 习题 .....                         | 170 |
| <b>第七章 弯曲应力</b> .....            | 173 |
| 第一节 剪力、弯矩与梁内应力的关系 .....          | 173 |
| 第二节 纯弯曲时横截面上的正应力 .....           | 173 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第三节 纯弯曲理论的推广·正应力强度条件 .....        | 178 |
| 第四节 提高梁弯曲强度的措施 .....              | 182 |
| 第五节 梁弯曲时的剪应力及其强度条件 .....          | 185 |
| 第六节 弯曲中心的概念 .....                 | 191 |
| 第七节 考虑材料塑性时梁的极限弯矩 .....           | 193 |
| *第八节 平面曲杆弯曲公式简介 .....             | 197 |
| 学习指导 .....                        | 200 |
| 复习思考题 .....                       | 201 |
| 习题 .....                          | 201 |
| <b>第八章 弯曲变形</b> .....             | 205 |
| 第一节 梁弯曲时的挠度和转角·挠曲轴近似微分方程 .....    | 205 |
| 第二节 用积分法求梁的挠度和转角 .....            | 208 |
| 第三节 用叠加原理求梁的挠度和转角 .....           | 213 |
| 第四节 梁的刚度校核·提高梁的刚度的措施 .....        | 219 |
| 第五节 梁弯曲时的应变能 .....                | 221 |
| 学习指导 .....                        | 223 |
| 复习思考题 .....                       | 224 |
| 习题 .....                          | 224 |
| <b>第九章 应力、应变分析基础</b> .....        | 226 |
| 第一节 直杆受轴向拉伸或压缩时斜截面上的应力 .....      | 226 |
| 第二节 应力分析的基本概念 .....               | 229 |
| 第三节 平面应力状态的实例 .....               | 231 |
| 第四节 平面应力状态下应力分析的解析法 .....         | 233 |
| 第五节 平面应力状态下应力分析的图解法 .....         | 238 |
| 第六节 三向应力状态的概念·一点处的最大应力 .....      | 247 |
| 第七节 梁的主应力及主应力迹线 .....             | 254 |
| 第八节 广义虎克定律·体积变形 .....             | 256 |
| 第九节 三向应力状态下的弹性比能 .....            | 259 |
| 第十节 $E$ 、 $G$ 、 $\nu$ 之间的关系 ..... | 261 |
| 第十一节 平面应力状态下的应变分析 .....           | 262 |
| 学习指导 .....                        | 266 |
| 复习思考题 .....                       | 267 |
| 习题 .....                          | 268 |
| <b>第十章 强度理论</b> .....             | 271 |
| 第一节 材料的破坏形式 .....                 | 271 |
| 第二节 强度理论的概念 .....                 | 273 |
| 第三节 四个强度理论 .....                  | 274 |
| *第四节 莫尔强度理论 .....                 | 281 |
| 学习指导 .....                        | 284 |
| 复习思考题 .....                       | 285 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 习题 .....                       | 286 |
| 三谈如何学习材料力学 .....               | 287 |
| 第十一章 组合变形下构件的强度计算 .....        | 290 |
| 第一节 组合变形的概念和实例 .....           | 290 |
| 第二节 斜弯曲时的应力和强度计算 .....         | 291 |
| 第三节 弯曲与拉伸(压缩)组合时的应力和强度计算 ..... | 295 |
| 第四节 偏心压缩(拉伸)时的应力和强度计算 .....    | 298 |
| 第五节 截面核心 .....                 | 303 |
| 第六节 弯曲与扭转组合时的强度计算 .....        | 309 |
| 学习指导 .....                     | 312 |
| 复习思考题 .....                    | 314 |
| 习题 .....                       | 315 |
| 第十二章 能量法 .....                 | 318 |
| 第一节 杆件的应变能计算 .....             | 318 |
| 第二节 单位载荷法 .....                | 324 |
| *第三节 图形互乘法 .....               | 330 |
| 第四节 功的互等定理和位移互等定理 .....        | 338 |
| 第五节 卡氏定理 .....                 | 339 |
| 学习指导 .....                     | 344 |
| 复习思考题 .....                    | 345 |
| 习题 .....                       | 346 |
| 第十三章 超静定系统 .....               | 348 |
| 第一节 超静定系统的概念和实例 .....          | 348 |
| 第二节 简单超静定梁的解法 .....            | 349 |
| 第三节 用力法正则方程解简单超静定问题 .....      | 358 |
| 学习指导 .....                     | 363 |
| 复习思考题 .....                    | 364 |
| 习题 .....                       | 364 |
| 第十四章 压杆稳定 .....                | 366 |
| 第一节 压杆稳定的概念 .....              | 366 |
| 第二节 细长压杆临界载荷的欧拉公式 .....        | 368 |
| 第三节 欧拉公式的适用范围·临界应力总图 .....     | 372 |
| 第四节 压杆的稳定校核 .....              | 376 |
| 第五节 压杆稳定校核的折减系数法 .....         | 377 |
| 第六节 提高压杆稳定性的措施 .....           | 381 |
| *第七节 纵横弯曲的概念 .....             | 383 |
| 学习指导 .....                     | 385 |
| 复习思考题 .....                    | 386 |
| 习题 .....                       | 387 |
| 第十五章 动载荷 .....                 | 389 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 第一节 动载荷的概念和实例 .....           | 389        |
| *第二节 匀加速运动杆件的应力和变形计算 .....    | 390        |
| 第三节 用能量概念计算杆件受冲击时的应力和变形 ..... | 395        |
| 第四节 提高杆件抗冲击能力的措施 .....        | 403        |
| 学习指导 .....                    | 405        |
| 复习思考题 .....                   | 406        |
| 习题 .....                      | 406        |
| <b>第十六章 疲劳强度和断裂韧度 .....</b>   | <b>409</b> |
| 第一节 交变应力·疲劳破坏 .....           | 409        |
| 第二节 材料的持久极限及其测定方法 .....       | 413        |
| 第三节 影响材料持久极限的因素 .....         | 415        |
| 第四节 构件持久极限的确定 .....           | 421        |
| 第五节 带裂纹体断裂的概念 .....           | 424        |
| 第六节 应力强度因子与材料的断裂韧度 .....      | 426        |
| 学习指导 .....                    | 437        |
| 复习思考题 .....                   | 438        |
| 习题 .....                      | 438        |
| 课程结束语 .....                   | 439        |
| 习题答案 .....                    | 443        |
| 附录I 另一种根据叠加原理作弯矩图的方法 .....    | 447        |
| 附录II 型钢规格表 .....              | 452        |

# 初谈如何学习材料力学

材料力学是一门基础技术课。它不仅提供了固体力学方面必要的基本理论和给出设计或校核构件的计算方法，而且它的研究问题的方法，对于工程技术人员今后的学习和工作也是极其有益的。因此，有志于充实技术科学知识为我们伟大祖国建设做出贡献的读者，应该下定决心，树立信心，把材料力学学习好。

## 一、关于材料力学的一些特点及学习要求

要学好这门课程，首先要把握住这门课程的特点。它一方面以数学、物理学、理论力学等为基础；另一方面将工程技术中带有一般性的力学问题抽象出来作为研究对象；所以它是基础科学和工程技术两者之间的桥梁。因此，材料力学的特点就在于：它广泛利用高等数学、物理学及理论力学的知识，以一些假定和试验资料为依据，建立理论，从而解决工程实际中一定范围内的力学问题。所以，在学习这门课程时，不仅有一些理论或公式推导，还会遇到有关的假定、试验等内容的叙述。切不可仅仅注意前者，而忽略了后者。

其次，材料力学的研究对象是自然界真实的物体。真实的物体都是相当复杂的。因此，材料力学遇到的矛盾多，所研究的具体问题的样式多，所得到的公式多，近似的地方多。读者要善于从复杂多样的问题中，找出彼此之间的联系与区别，从中理解特殊和一般、矛盾与发展的关系。

还要注意，自学应该是循序渐进的、有计划地、主动灵活地进行。根据以往的经验，凡是学过高等数学、物理学、理论力学的读者要看懂这本书的内容并不困难。但是，这却可能成为个别读者看得快，忘得快，遇到习题就困难的原因。有的读者在学习这门课程之前，已经具备了一定的力学知识，这是很可贵的，这样会有助于更深入地理解本书中的内容。有人讲：最重要的东西往往是最简单的。那些基本的东西，往往虽然简单，但却最重要。这确实是至理名言。那些刚学习时感到轻松，愈学愈困难的人，往往是对基本的内容学得过于草率的人。在下面关于如何使用本书的一些说明中提出了学习这门教材的一般性方法及途径，希予注意。

此外，在学习这门课程以前，应该复习一下数学中有关坐标转换、极限、导数、微分、积分以及常系数一阶和二阶线性齐次微分方程的概念和简单解法。这些知识将在本书中经常遇到。

## 二、关于如何使用本书的一些说明

为了便于读者自学，本书在正文以外每章均附有内容提要、学习指导、复习思考题及习题等内容。建议读者自学时注意以下几个问题：

### 1. 内容提要的目的

为了引导读者自学，在每章正文前面，简短地指出全章内容梗概和基本要求等。

## 2. 阅读正文的方法

建议读者在自学每章正文时，采取粗读与精读相结合的方法。

在读完内容提要以后，将每章的内容从头到尾地粗读一遍。粗读的主要目的是涉猎全章内容，了解本章各个主要问题是如何提出来的，怎样解决的。并且根据个人的情况，结合学习提要，明确自己认为疑难的部分，将它们作为精读时的重点。

在粗读以后，阅读一遍学习指导以便进一步明确学习要求，然后精读全章，从而掌握住全章的内容，使书本知识变为自己的知识。在精读时，可以以每一节为单元，注意每节中的中心问题、主要概念、数学关系、重要公式和结论等。精读时，除了注意本书中黑体字的部分外，自己也可以在书上注出必要的记号或划上红线。如能作自学笔记、学习心得就更有助于学习了。在读完一节以后，要思索一下本节的问题是如何提出的，怎样解决的，其中引出了些什么概念、重要公式[标有章号的，如(1-1)]以及如何将这些结论用于解决实际问题。读者还必须注意材料力学的公式所代表现象的物理本质，以及推导过程中应用的假定所起的作用，必须很好地了解和公式结论相配合的图，要能够独立画出有关理论推导的附图。

在有些章节之后附有例题，它是书中的一个重要组成部分，也是理论的实际应用。阅读例题要和正文同样地认真和仔细，要将注意力不仅放在计算本身，并且要放在解题的方法步骤、理论根据和它的物理意义方面。

在读完全章之后，要再次阅读学习指导，检查自己是否真正掌握了全章重点、各部分内容之间的联系及公式推导的主要过程等等。

## 3. 自学指导的意义

指出全章的重点，概括该章的主要内容和方法，提出一些学习中容易出现的而又不宜于在正文中解决的问题。

自学指导应该结合正文学习，在精读正文的前后反复仔细地阅读它，将会加深读者对正文的理解，帮助掌握书中的重点。

## 4. 复习思考题的作用

在每章之后的复习思考题，包括巩固基本概念和基本理论的问题，公式推导和运用方面的问题，以及解题方面可能遇到的问题等。这是用以促使读者检查自己是否掌握了所学内容，读者可以把解答写在自己的笔记中。

## 5. 解答习题的要求

在每章到一个段落时，都指出需要作的那部分习题。这些习题包括巩固理论和概念、基本训练、联系实际等方面的内容。习题作得正确与否，一方面取决于读者对正文的理解；一方面还在于实际计算上的熟练。少数习题不一定局限于该章涉及的内容，而是具有一定的综合性，起阶段复习的作用。

在解题之前务必要掌握所学的理论及有关例题，解题时要避免不求甚解地死套公式。

本书中附有习题答案，但建议读者一定要正确地加以使用。在解题前先看答案，从中去猜测解法，或者在解题以后立即去对答案，都是有害于培养独立工作能力的。建议读者

在解题遇到困难时，应反复阅读正文及有关例题；在解出结果后，自己检查结果是否合理及数字有无错误；最后再与本书答案核对。这样做是有利于培养自己独立解决问题和独立检查计算结果的能力的；这两方面的能力都是一个工程技术人员所必须具备的。

### 三、关于计算的一些问题

通过学习材料力学可以培养计算能力，这是工程技术人员的一项基本功。因此，遇到算题必须重视数字计算，力求准确、迅速而又简捷地得出结果，并能及时核算以保证计算无误。

很多经验表明：凡是计算作业上书写零乱、涂抹不清的，解题者必然是思路不清、错误百出而且费时最多。因此，读者在作材料力学习题时，应尽可能地避免乱涂乱改、不按一定规则和层次的作法。为了帮助读者做好作业，提出以下几点供参考：

(1) 作题之前必先领会题意，找出已知条件，了解题的要求，判断题的性质，决定应该使用的理论和全部作题方法后再进行计算。又如对于同一习题有几种不同解法时，应选择最恰当的方法。对于比较复杂的问题，能在计算开始前，先拟一个简短的解题步骤再作往往是必要的。务必避免马马虎虎地下手，以免造成时间的浪费。

(2) 在数字的演算中，要学会利用计算工具。计算器、计算尺能大量节省时间，因而是学习过程中不可缺少的重要工具。一般说，计算尺虽然所能提供的数字位数较少，但已能满足一般工程计算的要求。

(3) 对于数值结果应注意有效数字的问题。我们说一个数有  $n$  位有效数字，就代表着该数字的前面  $n - 1$  位是绝对可靠的；比如说这个数字有三位有效数字，就等于说它的前两位是绝对可靠，而第三位是大致可靠的，当然三位以后就不可靠了，所以一般就以 0 表示。比如说 34,600 有三位有效数字，就是说 34 是绝对可靠的，6 是大致可靠的，实际上的数字可能是 34,550 到 34,640 中间的任何数字，比如可能是 34,637。

当然一个数字有效位数愈多，愈是精密，但是工程中无论由实验或测量所得到的数字精确度都有一定的限制，一般说都是只有三位有效数字（也有时用四位有效数字），由这样的数字经过计算所得到的结果，一般也只有三位有效数字，所以在计算时只取三位有效数字就可以了。如以一个已知圆周的长求直径的例子来说：若圆周长度为 100mm，直径  $D$  为

$$D = \frac{100}{\pi} = \frac{100}{3.14} = 31.84\cdots\cdots\text{mm}$$

这里的圆周长为 100mm，它往往不是十分精确测量得来的，再量一次的话，可能只有 99.9mm；也就是说 100mm 是三位有效数字。因此取  $\pi = 3.14$ ，它也是三位有效数字，如取  $\pi = 3.1416$ ，则无甚意义，因为 100mm 仅是三位有效数字。

对于上面的计算结果，只应取  $D = 31.8\text{mm}$ ，这个数字的误差一定是极小的；第四位数字一定靠不住，如果取上七八位，则显然更没有什么意义，只是徒费计算时间而已。材料力学中的大部分数据都是仅取三位有效数字的。

(4) 在一个计算式中重量或长度以及面积、体积等所用的单位必须一致。

例如在国际单位制中，长度的单位习惯上常用米（用m代表）或者毫米（用mm代表），重量的单位常用牛顿（用N代表）或者千牛（用kN代表）。在一个计算式中长度、重量所用的单位要统一。若有

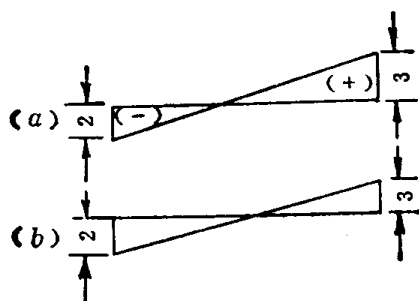
$$P=40\text{kN}, l=1\text{m}, E=200\text{GPa} \text{ (即 } 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \text{ )}, A=8\text{cm}^2$$

把这些数字代入一个公式  $\frac{Pl}{EA}$  时，应该将所有长度的单位都统一用m（或者mm）、重量的单位都统一用N，再进行计算，按此得

$$\frac{Pl}{EA} = \frac{40 \times 10^3 \times 1}{200 \times 10^9 \times 8 \times 10^{-4}} = 0.00025\text{m}$$

结果所得的单位是m，这是易于理解的，因为  $\frac{Pl}{EA}$  单位化简后为

$$\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^2} = \text{m}$$



初谈 图 1

如果忽视了同一计算式中单位的统一，则计算结果必然是错误的。

(5) 在材料力学的计算作业（习题）中，绝大部分需要绘图。在图中的标高、长度必须按比例绘出。例如图（a）是按比例绘制的，是要求的形式，但决不能绘成图（b）的形式。图（b）虽然注明标高，但并未按比例，所以仍是不容许的。因为不按比例画图，既难以避免错误，也不容易发现一些严重错误。

(6) 不要使用带分数及除号÷，例如：

$$1.5 \times 2 + \frac{3}{4} = \frac{15}{4}, \text{ 不能写成 } 1.5 \times 2 + \frac{3}{4} = 3 \frac{3}{4}$$

$$8 + \frac{3}{4} = 8.75, \text{ 不能写成 } 8 + 3 \div 4 = 8.75$$

因为带分数极易被误解为  $3 \times \frac{3}{4}$ ，而除号÷在有些书籍中常被用来代表另一意义，即  $3 \div 4$  被表示为从3至4。

(7) 作业不是草稿，不要在作业上约分。如果在作业上进行演算，不仅不美观，而且很难再去检查计算中所发生的错误，这是得不偿失的。

(8) 在计算过程中，必须按层次写出计算步骤，并将每一步骤引用的式子写出。例如：若题中给出的条件为： $a=3.6$ ， $b=10.8$ ，又  $ax+b=0$ 。当求x值时必须写成：

$$\text{因} \quad a=3.6, b=10.8, \text{ 又 } ax+b=0$$

$$\text{故} \quad x = -\frac{b}{a} = -\frac{10.8}{3.6} = -3$$

这两部分是缺少不得的。如果直接写成

$$x = -3$$

那么，作题的正误是极难检查的。其后果是多费时间，多费脑力。

以上几点如能认真执行，不仅对读者做作业有益处，并且对将来工作中的实际计算工作也将会有好处的。