

# 机械零件强度 计算手册

# 机械零件强度计算手册

И. А. 比尔格爾  
〔苏〕 Б. Ф. 绍尔 著  
Г. Б. 约西列维奇

姚兆生 译  
马 骥 校



机械工业出版社

本书是从原书第三版(1979年版)译出的, (第一版1959年发行, 第二版1966年发行)。

本书主要讲解各种联接(螺纹联接、法兰联接、键与花键联接、过盈联接与焊接联接), 各种传动(齿轮传动、滚珠螺旋传动、带传动和链传动), 弹簧、轴、轴承和活塞式发动机、汽轮机、燃气轮机与压缩机零件的强度计算。阐述确定各种结构元件(杆、环、板和壳体等)应力和变形的的方法。介绍零件的接触强度和疲劳强度的计算方法, 叙述低周疲劳、热强度、可靠性理论要点、技术诊断学的理论基础、提高机器零件寿命的工艺方法以及自动化设计基础等问题。

本书供从事各种机器和设备设计的广大工程设计人员使用, 还可以供高等院校有关专业的师生参考。

**Расчет на прочность деталей  
машин**

**СПРАВОЧНИК**

**И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр**

**Г. Б. Иосилевич**

**Москва «Машиностроение» 1979**

\* \* \*

**机械零件强度计算手册**

**[苏] И. А. 比尔格尔, Б. Ф. 绍尔,**

**Г. Б. 约西列维奇 著**

**姚兆生 译 马 骥 校**

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850×1168<sup>1/32</sup>·印张 31<sup>1/8</sup>·插页 2·字数 825 千字

1987年3月北京第一版·1987年3月北京第一次印刷

印数 00,001—12,100·定价 9.60 元

\*

统一书号: 15033·6382

# 序 言

可靠性、强度、耐久性和寿命等问题在现代工程技术上非常重要。

由于对速度、经济性、耐久性、可靠性的要求不断地提高，以及要求不断地减轻机器的重量，强度计算变得越来越复杂。各种强度计算方法要考虑机器的不同使用工况、材料的实际性能、载荷条件、制造工艺、运转性能和许多其它因素。

在进行机械零件和结构的强度计算时，越来越广泛地应用杆、板、壳理论、弹性理论、塑性理论、蠕变理论和断裂力学的成果。所有这些使设计师在研制机器的过程中不能完成十分可靠的强度计算，而且只能是孤立地进行这些计算。

本书讲述在机器和结构设计时便于直接应用的机械零件强度计算方法。编写本书时，考虑了设计师在各种理论知识方面的素养。

第一篇介绍主要机械零件强度计算方面的必要的基本知识。

第二篇中大部分内容也是介绍最简单的计算公式和图表，并且给出某些典型结构元件强度的精确计算方法。

本篇着重地说明了各种零件强度问题的物理本质。力求使计算方法简单和便于利用。在本篇中还对所用的应力水平做了分析。

对于工程计算来讲，计算方法应该越简单越好，应该尽力避免繁琐。在本篇中，各种零件的强度计算方法有些是按苏联国家标准和各种规范手册中规定的方式给出的，有些是根据苏联和其它一些国家的设计实践材料介绍的，因此，计算时可以利用机械零件应力的统计资料与数据。

第三篇介绍杆、板和壳的强度、刚度、稳定性和振动计算中

#### IV

确定应力的方法。

由于电子计算机在工程设计中获得了广泛的应用，所以，本版增加了考虑材料弹性、塑性和蠕变时的结构数值计算方法一章。

本书特别侧重于手册性质的材料。

第四篇介绍机械零件强度和可靠性的评估问题。本篇中还有一章专门讲述在现代技术各个先进领域中占有很大作用的自动化设计问题。

在本书的这一版中，新增加了许多章，并且对老版中的许多章的内容做了重大的修改。

第四、十七、十九、二十一、二十二、二十四、二十五、三十二、三十三、三十五和三十六章是技术科学博士、И. А. 比尔格尔教授写的。第一、二、十一、十五、二十和二十五章是技术科学博士、Б. Ф. 绍尔教授写的。第六至第八章、第十三章和第十四章是技术科学博士、Г. Б. 约西列维奇教授写的。第三、五、十、十二、二十六至三十一和三十四章是 И. А. 比尔格尔和 Г. Б. 约西列维奇合写的。第十六章是 И. А. 比尔格尔和 Б. Ф. 绍尔合写的。

根据作者们的请求，技术科学副博士 А. И. 叶罗什金写了第九章。

很遗憾，本书的原作者之一——技术科学博士 Р. М. 什涅伊杰维奇教授已经故去，不能参加这一版的编写工作。

# 目 录

## 序言

### 第一篇 强度计算基础

第一章 应力状态的主要类型	1
第一节 应力和变形	1
第二节 拉伸和压缩	3
第三节 弯曲	6
第四节 剪切和挤压	10
第五节 扭转	11
第六节 应力集中	13
第七节 温度应力	15
第八节 应力状态	16
第二章 结构材料的机械性能和强度的估量	17
第一节 静应力下的材料性能	17
第二节 高温与低温情况下的材料性能	23
第三节 交变应力下的材料性能	28
第四节 低周强度和热强度	34
第五节 断裂和断口	36
第六节 强度的估量	38
第七节 静应力下的安全系数	39
第八节 承载能力安全系数	40
第九节 交变应力下的安全系数	42
第十节 不同工况下持久强度的安全系数	43
第十一节 不同工况下的疲劳安全系数	45

### 第二篇 强度计算

第三章 螺纹联接	46
第一节 螺纹紧固联接零件的材料、覆层和检查	46

第二节	螺纹联接的简化计算	49
第三节	螺纹联接的精确计算	54
第四节	扭转应力的计算	62
第五节	预紧力大小的选择	66
第六节	螺纹各圈间的载荷分布和螺纹联接件上的应力集中	67
第七节	静载下的强度	73
第八节	交变载荷下的强度	79
第四章	法兰联接	89
第一节	法兰联接的类型	89
第二节	简化算法	90
第三节	非接触型法兰联接的精确计算	96
第四节	法兰和管子的应力状态	109
第五章	键和花键联接	116
第一节	键联接	116
第二节	花键联接	119
第三节	花键联接的强度计算	123
第四节	花键联接的磨损	128
第六章	机器零件的过盈联接	132
第一节	过盈联接的不松动条件和接触压力	132
第二节	计算的过盈量与需要的过盈量	141
第三节	交变载荷作用下过盈联接的强度	145
第七章	电焊与钎焊联接	149
第一节	焊接的主要类型	149
第二节	焊接的质量检查	152
第三节	静载荷作用下焊接的计算	153
第四节	主要结构因素和工艺因素对疲劳强度的影响	158
第五节	交变载荷作用下的强度计算	168
第六节	钎焊联接	169
第八章	轴	175
第一节	轴的结构形状和材料	175
第二节	主要技术要求	179
第三节	轴上的载荷与计算简图	180

第四节	轴的静强度、刚度和稳定性的计算 .....	182
第五节	疲劳强度计算 .....	188
第六节	振动计算 .....	193
第七节	轴的临界转速 .....	194
第九章	滚动轴承 .....	197
第一节	主要特性 .....	197
第二节	滚动体间负荷的分布 .....	201
第三节	轴承的运动学和动力学 .....	203
第四节	滚动轴承的承载能力 .....	205
第五节	轴承的选择 .....	213
第六节	轴承的润滑 .....	214
第七节	滚动轴承提前失效的一些原因 .....	219
第十章	弹簧 .....	222
第一节	概述 .....	222
第二节	螺旋弹簧 .....	224
第三节	圆柱形螺旋弹簧的计算 .....	226
第四节	静强度计算 .....	237
第五节	疲劳强度计算 .....	237
第六节	冲击载荷的计算 .....	238
第七节	碟形弹簧 .....	240
第八节	开槽弹簧 .....	242
第九节	环形弹簧 .....	244
第十节	环状波形弹簧 .....	245
第十一节	橡胶弹性元件 .....	246
第十一章	齿轮传动 .....	254
第一节	主要符号 .....	256
第二节	直齿强度的简化计算 .....	258
第三节	全苏国家标准ГОСТ 21354-75规定的 计算公式的结构 .....	265
第四节	作用在齿上的载荷 .....	267
第五节	沿着接触线长度(齿宽)上载荷分布的不均匀性(齿 向载荷分布系数 $K_{\beta}$ ) .....	268



第六节	各齿之间力的静态分配 (齿间载荷分配系数或者端面载荷分配系数 $K_a$ )	280
第七节	扭转振动下齿上的动态作用力 (扭转振动动载荷系数 $K_{\alpha p}$ )和共振状态	287
第八节	重合接触时齿上的动态作用力 ( $K_{\alpha}$ 和 $K_{\alpha'}$ )	293
第九节	齿的弯曲强度计算	302
第十节	齿有效表面接触疲劳计算	312
第十一节	不同工况下齿轮传动装置的工作	319
第十二节	斜齿轮、人字齿轮和锥齿轮的传动和M. И. 诺维科夫齿轮传动的计算特点	321
第十二章	滚动螺旋传动	327
第一节	滚动螺旋传动的结构和材料	327
第二节	滚动螺旋传动的计算	329
第十三章	带传动	340
第一节	传动用三角带的材料和结构	341
第二节	带传动力学	342
第三节	带传动的计算	348
第四节	齿形带传动	352
第五节	带传动装置的计算与设计步骤	357
第十四章	链传动	359
第一节	链传动的结构和材料	359
第二节	链传动中的力	364
第三节	链传动主要参数的选择	365
第四节	链传动的承载能力	368
第五节	链传动装置的设计和使用特点	375
第六节	链传动装置的计算步骤	377
第十五章	活塞式发动机零件的强度计算	379
第一节	曲轴的计算	379
第二节	连杆的计算	390
第三节	活塞销的计算	395
第四节	活塞环的计算	398
第五节	活塞顶的计算	400

第十六章	透平机械零件的计算 .....	401
第一节	由离心力引起的叶片的受拉计算 .....	401
第二节	叶片的弯曲计算 .....	407
第三节	叶片叶型截面部分的强度安全系数 .....	420
第四节	等强度叶片 .....	421
第五节	被冷却的叶片 .....	424
第六节	叶片的弯曲振动 .....	425
第七节	扭曲叶片 .....	435
第八节	铰接叶片 .....	447
第九节	带围带的叶片 .....	453
第十节	叶片叶根的计算 .....	458
第十一节	叶片的振动 .....	465
第十二节	叶轮的计算 轮廓应力 .....	475
第十三节	叶轮强度的安全系数 .....	479
第十四节	等强度叶轮的绘型 .....	488
第十五节	叶轮计算的基本方程式 .....	491
第十六节	等厚度叶轮的应力和变形 .....	493
第十七节	变厚度叶轮的应力和变形 .....	498

### 第三篇 结构元件中应力与变形的确定

第十七章	杆的弯曲 .....	512
第一节	剪力和弯矩 .....	512
第二节	弯曲应力与弯曲变形 .....	515
第三节	杆的弹性线 .....	526
第四节	利用莫尔积分法确定挠度 .....	532
第五节	变截面杆的挠度与转角 .....	538
第六节	考虑塑性变形时杆的弯曲 .....	540
第十八章	杆的扭转 .....	546
第一节	圆轴 .....	546
第二节	椭圆形横截面杆 .....	548
第三节	矩形截面杆和薄壁杆 .....	550
第四节	剪应力的分布 .....	551

第五节	塑性变形的计算 .....	552
第六节	管状杆 .....	554
第十九章	环的计算 .....	557
第一节	环的平面变形 .....	557
第二节	环的轴对称变形 .....	567
第二十章	压杆的稳定性 .....	577
第一节	欧拉公式 .....	577
第二节	临界载荷计算的一般情况 .....	579
第三节	临界载荷计算表 .....	582
第四节	初挠度和力的偏心作用对杆弯曲变形的影响 .....	582
第五节	压杆的强度和刚度计算 .....	588
第六节	弹塑性变形下的失稳 .....	592
第七节	弹塑性变形下杆的侧向弯曲 .....	594
第八节	稳定性的动力分析 随动载荷的作用 .....	597
第九节	受热时的失稳 .....	600
第二十一章	弹性系统的振动 .....	602
第一节	基本概念 .....	602
第二节	动刚度法 .....	603
第三节	利用动刚度法确定系统的固有振动频率 .....	606
第四节	扭转振动 .....	610
第五节	弯曲振动 .....	615
第六节	某些动系统的固有振动频率 .....	621
第二十二章	轴的临界转速 .....	624
第一节	带有一个圆盘的轴 .....	624
第二节	带有数个圆盘的轴 .....	632
第三节	带有连续分布质量的轴 .....	634
第二十三章	板的计算 .....	667
第一节	圆板 .....	667
第二节	安全膜片(保护膜片) .....	686
第三节	矩形板 .....	687
第二十四章	圆柱形壳体的强度计算 .....	691
第一节	基本公式 .....	691

第二节	长圆柱形壳体的计算 .....	694
第三节	短圆柱形壳体的计算 .....	697
第四节	壳体中的温度应力 .....	711
第二十五章	板、环和壳的稳定性 .....	714
第一节	板的稳定性 .....	715
第二节	环的稳定性 .....	720
第三节	圆柱形壳体的稳定性 .....	720
第四节	锥形壳体的稳定性 .....	734
第五节	球形和椭圆形壳体的稳定性 .....	735
第六节	温度应力作用下板和壳的稳定性 .....	737
第七节	各向异性壳体的稳定性 .....	738
第八节	加强壳的稳定性 .....	739
第二十六章	结构计算的数值方法 .....	744
第一节	变分方程式 .....	744
第二节	变分—差分法 .....	748
第三节	有限元法 .....	753
第二十七章	考虑塑性和蠕变时结构的计算 .....	767
第一节	弹性方程式 .....	767
第二节	塑性方程式 .....	770
第三节	蠕变方程式 .....	777
第四节	考虑塑性与蠕变时结构的强度计算(简单加载) .....	778
第五节	复杂加载情况下结构的强度计算 .....	784
第二十八章	机械零件中的应力集中和变形集中 .....	795
第一节	基本概念 .....	795
第二节	孔附近的应力集中 .....	796
第三节	平面的和轴对称的切口与台肩的应力集中 .....	802
第四节	塑性变形和蠕变状态下的应力集中与变形集中 .....	804
第五节	结构元件中的应力集中 .....	809
第二十九章	接触问题 .....	815
第一节	简单形状零件的接触 .....	816
第二节	结构的接触问题 .....	828
第三节	结构接触问题的一般解法 .....	842

第四篇 强度和可靠性的评定

第三十章	复杂应力状态下的强度计算 .....	853
第一节	静强度准则 .....	853
第二节	持久强度准则和低周强度准则 .....	867
第三十一章	疲劳强度的计算 .....	864
第一节	疲劳强度的基本规律 .....	864
第二节	零件疲劳极限的确定 .....	875
第三节	疲劳强度条件 .....	878
第四节	疲劳强度安全系数的确定 .....	882
第五节	疲劳强度的统计模型 .....	893
第三十二章	破坏概率和安全系数 .....	895
第一节	破坏概率 .....	896
第二节	应力和强度极限在任意规律分布情况下的破坏概率 .....	898
第三节	统计的强度安全系数 .....	903
第三十三章	可靠性理论基础 .....	909
第一节	基本概念 .....	909
第二节	可靠性规则 .....	910
第三节	无故障工作概率、故障分布密度和故障率 .....	913
第四节	可靠性理论的基本方程式 .....	916
第五节	故障率随工作时间而变化的一般规律 .....	917
第六节	预测无故障工作的概率 .....	917
第七节	可靠性的指数分布律 .....	918
第八节	无故障工作时间的正态分布 .....	920
第九节	无故障工作时间的威布尔分布 .....	921
第十节	元件串联系统的可靠性 .....	921
第十一节	元件并联系统的可靠性 .....	922
第十二节	具有几个并联工作元件的系统的可靠性分析 .....	923
第十三节	在使用中的产品数目的计算 .....	925
第十四节	可靠性的定量指标 .....	926
第三十四章	提高机械零件寿命的工艺方法 .....	927
第一节	残余应力 .....	927

第二节	表面塑性变形法强化机械零件 .....	931
第三节	热处理和化学热处理 .....	939
第四节	残余应力的确定 .....	940
第三十五章	技术诊断学的理论基础 .....	947
第一节	技术诊断学任务的提出 .....	947
第二节	判断的概率法 .....	949
第三节	统计解题方法 .....	955
第四节	存在不定区域时统计解题的方法 .....	958
第五节	测量诊断法 .....	959
第六节	测量方法中解题法则的补充 .....	962
第七节	特征量空间分离法 .....	963
第八节	逻辑诊断法 .....	967
第三十六章	自动化设计基础 .....	969
第一节	自动化生产的结构 .....	969
第二节	数学模型的结构 .....	970
第三节	模型的级和模型类别 .....	972
第四节	建立自动化设计系统的一般原则 .....	973
第五节	优化的目标和方法 .....	975
参考文献	.....	978

# 第一篇 强度计算基础

## 第一章 应力状态的主要类型

### 第一节 应力和变形

机器工作时，它的零件上受外力作用，例如，零件本身的重量，蒸汽压力、离心力等。在这些外力的作用下，零件的尺寸与形状要发生变化，也就是要产生变形。为了保证机器正常地工作，必须控制变形，变形值要很小。

如果把某一个重物  $Q$  挂到杆上 (图 1-1)，那么杆便要伸长

一个量  $\Delta l$ ，然后停止变形。物体质点间产生的内力阻止杆的伸长。为了确定内力，我们应用截面法。我们假设用平面  $\Pi$  把杆截断，并且去掉杆的上半部分。为了使杆的下半部分维持平衡，在  $\Pi$  截面上应该作用有平衡重物  $Q$  的内力 (图 1-2, a))。在不同的面积  $\Delta F$  上将作用着不同的力  $\Delta P$ ，取比值

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (1-1)$$

试验表明，当杆受拉时，在给定制面的所有各点上  $p$  均为常数。 $p$  值称为总应力。在截面的各不同点上的应力不相等

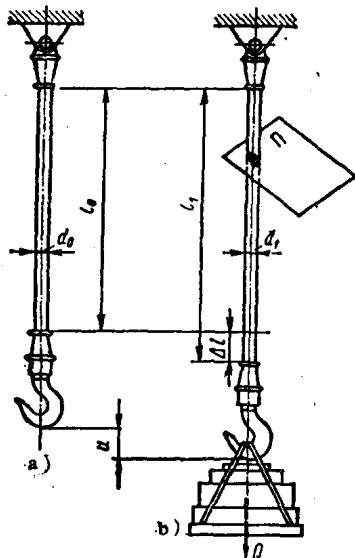


图1-1 拉伸载荷作用下杆的伸长和杆末端的位移

a) 变形前杆的位置 b) 变形状态下杆的位置

的时候，例如，在弯曲的情况下，也是用公式 (1-1) 确定这些应力，但是  $\Delta P$  是指非常小的面积上的作用力。在工程上，使用  $\text{kgf/cm}^2$  或者  $\text{kgf/mm}^2$  来度量应力  $\ominus$ 。

可以把总应力分解为两个分应力 (图 1-2, b))。把面的法线方向的分应力叫做正应力  $\sigma$ 。把切于力作用平面内的分应力称为剪应力  $\tau$ 。

把应力分成正应力和剪应力的原因是：材料对这两种应力作用的抵抗性能是不同的。

应力总是对于一定的点和通过该点的面上的一定的位置来研究的。如果已知沿着通过某一点的三个相互垂直面上作用的应力，那么，就可以求出通过该点其它面上的应力。

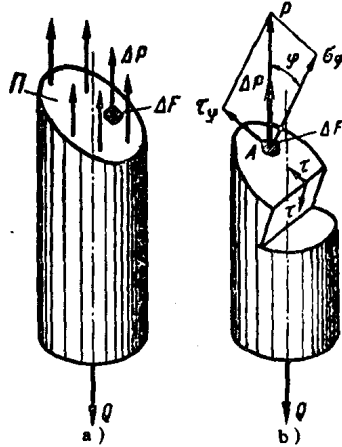


图 1-2 弹性内力

如果正应力是拉应力，则认为它是正的。因为结构材料抵抗拉应力的能力低于抵抗压应力的能力，所以，正应力的符号对于强度计算来讲很重要。而剪应力的符号则无关紧要。

由微元体的平衡条件知道，相互垂直的两个面上的剪应力是相等的 (图 1-2, b))。通过物体上任何一点均可以引出三个相互垂直的平面，而且这些面上的剪应力等于零，称这三个面为主平面；同时把作用在它们上面的正应力叫做主应力。其中一个主应力是该点的最大总应力，而另一个主应力则是最小总应力。

当物体变形时，它上面各点的相互位置发生变化，即点得到了位移。例如，在重物  $Q$  的作用下 (图 1-1)，杆的下端向下移动了一个大小为  $u$  的距离，此时，杆的上端原地不动。杆两端

$\ominus$  在国际单位制中，力用  $N$  (牛顿) 度量，而应力用  $\text{Pa}$  (帕斯卡) 度量 ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ) 或者用  $\text{MPa}$  (兆帕斯卡) 度量 ( $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} \approx 10 \text{ kgf/cm}^2 = 0.1 \text{ kgf/mm}^2$ )。准确值为  $1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ MPa}$ 。



位移的不同与载荷作用下杆长度的变化有关。就本例而言，杆伸长的绝对值 $\Delta l = l_1 - l_0$ 等于位移 $u$ ，并且取决于杆的长度。杆的变形可用相对伸长（轴向应变或线应变）来表示：

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-2)$$

相对伸长是一个无量纲的量，常常用百分比表示。例如，如果长度 $l_0 = 1\text{ m}$ 的杆，伸长量 $\Delta l = 1\text{ mm}$ ，则

$$\varepsilon = \frac{1}{1000} \times 100\% = 0.1\%。$$

在一般的情况下，可以把物体微元体的变形分解为引起它的体积改变的相对伸长和造成微元体形状改变的剪应变（图1-3）。剪应变 $\gamma_i$ （ $i = 1; 2$ ）等于微元体初始直角的变化值。

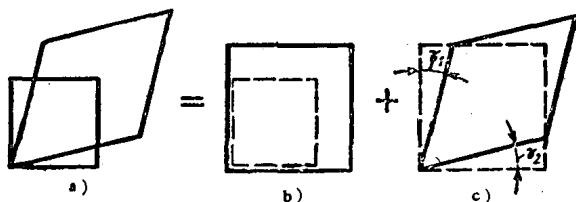


图1-3 总变形分解为相对伸长与剪应变

- a) 总变形    b) 由于各面的伸长而引起的体积变化  
c) 由于剪应变引起的形状变化 $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$

如果已知物体给定点沿着三个相互垂直方向上的伸长和剪应变，那就可以求出其它任何方向上的变形。

微元体每一边的相对伸长 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 和 $\varepsilon_3$ 导致其体积 $V_0$ 的相对变化：

$$\theta = \frac{\Delta V}{V_0} \approx \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (1-3)$$

## 第二节 拉伸和压缩

在许多杆形零件上，主要载荷是沿着杆（压机的滑杆、连杆、汽轮机的工作叶片等）的轴线方向作用的，这时，杆件受拉