

01
大学学校试用教材

材料力学

上册

浙 江 大 学 南 京 工 学 院 西 安 交 通 大 学
西 北 工 业 大 学 陕 西 机 械 学 院 华 中 工 学 院 合 编
镇 江 农 业 机 械 学 院 华 东 工 程 学 院 上 海 工 业 大 学
浙 江 大 学 刘 鸿 文 主 编

人 民 教 育 出 版 社

材 料 力 学

上 册

浙 江 大 学 南 京 工 学 院 西 安 交 通 大 学
西 北 工 业 大 学 陕 西 机 械 学 院 华 中 工 学 院 合 编
镇 江 农 业 机 械 学 院 华 东 工 程 学 院 上 海 工 业 大 学
浙 江 大 学 刘 鸿 文 主 编

人 民 教 育 出 版 社

本书是根据一九七七年十一月教育部委托召开的高等学校工科力学教材会议讨论的机械类多学时材料力学教材编写大纲编写的。分上、下册出版。上册内容包括：绪论、拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲强度、弯曲变形、应力状态理论和强度理论、组合变形、平面曲杆等九章和平面图形的几何性质(附录)。下册内容包括：用能量法计算变形、静不定系统、动载荷、交变应力、压杆稳定、电测应力分析基础、弹性力学的平面问题、有限单元法简介、线弹性断裂力学简介等九章。除下册最后三章为选修内容外，其余都为基本内容。弹性力学的平面问题一章中有关厚壁圆筒及组合厚壁筒部分，也可以作为独立专题讲授。

高等学校试用教材

材 料 力 学

上 册

浙 江 大 学 南京工学院 西安交通大学
西北工业大学 陕西机械学院 华中工学院 合编
镇江农业机械学院 华东工程学院 上海工业大学
浙江大学 刘鸿文 主编

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新华书店上海发行所发行

湖北省新华印刷厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 11 2/16 字数 268,000

1979年2月第1版 1979年7月湖北第1次印刷

印数 1—130,000

书号 15012·0118 定价 0.92 元

前 言

本书是根据一九七七年十一月教育部委托召开的高等学校工科力学教材会议讨论的机械类多学时材料力学教材编写大纲编写的。参加编写工作的同志有：西安交通大学陈瀚，陕西机械学院吴士艳，西北工业大学金志刚，华中工学院胡逾，南京工学院胡增强，镇江农机学院倪德耀，华东工程学院龚育宁，上海工业大学宁俊，浙江大学林建兴、曹曼玲、刘鸿文。由刘鸿文负责主编。此外，华中工学院梁广基、镇江农业机械学院徐雅宜、浙江大学吕荣坤等同志也参加了部分编写工作。

1978年9月在杭州为本书初稿召开了审稿会议。会议由上海交通大学金忠谋、夏有为，重庆大学袁懋昶、刘相臣等同志主持。参加会议的有哈尔滨工业大学、东北重型机械学院、清华大学、北京航空学院、天津大学、山东工学院、国防科学技术大学、中南矿业学院等院校的同志。与会同志对初稿进行了认真的讨论，提出不少修改意见，对本书的定稿工作起了很大作用，谨此致谢。

按照机械类多学时材料力学教材编写大纲的要求，本书一至十五章和附录I为基本内容。十六至十八章其他章节中标有*号的部分为选修内容。即使是基本内容，也不一定要全部讲授，教师可根据实际情况作一些必要的取舍。

编写本书时，我们在运用辩证唯物主义阐述材料力学基本规律，贯彻理论联系实际，反映科学技术的最新发展，删繁就简等方面，作过一些努力。但因时间仓促，并限于编者的政治和业务水平，难免还存在不少缺点和不妥之处，希望使用本书的广大教师和读者提出批评和指正，以利于教材质量的进一步提高。

编 者

1979.2.

上册 目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 材料力学的任务	1
§ 1-2 变形固体及其基本假设	3
§ 1-3 外力及其分类	5
§ 1-4 内力、截面法和应力的概念	6
§ 1-5 线应变与角应变	9
§ 1-6 杆件变形的基本形式	11
第二章 拉伸与压缩	14
§ 2-1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	14
§ 2-2 轴向拉伸或压缩时横截面上的内力和应力	15
§ 2-3 轴向拉伸(压缩)时的强度计算	20
§ 2-4 直杆轴向拉伸或压缩时斜截面上的应力	24
§ 2-5 材料在拉伸时的机械性质	26
§ 2-6 材料在压缩时的机械性质	34
*§ 2-7 温度、时间和加力速度对材料机械性质的影响	37
§ 2-8 许用应力与安全系数	40
§ 2-9 轴向拉伸或压缩时的变形	41
*§ 2-10 变截面杆的应力和变形计算	44
§ 2-11 应力集中的概念	47
习题	49
第三章 剪切	56
§ 3-1 剪切的概念和实用计算	56
§ 3-2 挤压和挤压的实用计算	60
§ 3-3 纯剪切的性质	63
习题	65

第四章 扭转	69
§ 4-1 扭转的概念和实例	69
§ 4-2 外力偶的计算、扭矩和扭矩图	70
§ 4-3 圆轴扭转时的应力、强度条件	74
§ 4-4 圆轴扭转时的变形、刚度条件	81
§ 4-5 圆柱形密圈螺旋弹簧的计算	85
§ 4-6 非圆截面杆扭转的概念	91
* § 4-7 开口薄壁杆件和闭口薄壁杆件的自由扭转	94
习题	99
第五章 弯曲强度	107
§ 5-1 平面弯曲的概念和实例	107
§ 5-2 受弯杆件的简化、静定梁的基本形式	108
§ 5-3 剪力和弯矩	113
§ 5-4 剪力方程和弯矩方程、剪力图和弯矩图	116
§ 5-5 载荷集度、剪力和弯矩间的微分关系	122
§ 5-6 纯弯曲时梁横截面上的正应力	126
§ 5-7 横力弯曲时梁的正应力、正应力强度条件	133
§ 5-8 弯曲时的剪应力	138
§ 5-9 弯曲剪应力的强度校核	146
* § 5-10 开口薄壁截面的弯曲中心	148
§ 5-11 提高弯曲强度的一些措施	153
习题	162
第六章 弯曲变形	171
§ 6-1 工程实际中的弯曲变形问题	171
§ 6-2 挠曲线的微分方程、刚度条件	172
§ 6-3 用积分法求弯曲变形	175
§ 6-4 用叠加法求弯曲变形	181
§ 6-5 有限差分法	186
§ 6-6 提高弯曲刚度的一些措施	194
习题	197

第七章 应力状态理论、强度理论	204
§ 7-1 应力状态的概念	204
§ 7-2 二向应力状态和三向应力状态的实例	206
§ 7-3 二向应力状态分析——解析法	209
§ 7-4 二向应力状态分析——图解法	214
§ 7-5 三向应力状态的概念	220
§ 7-6 广义虎克定律	222
* § 7-7 材料的三个弹性常数 E 、 G 、 μ 间的关系	225
§ 7-8 简单和复杂应力状态下的弹性变形能	227
§ 7-9 强度理论的概念	230
§ 7-10 常用的四种强度理论	232
习题	238
第八章 组合变形	244
§ 8-1 组合变形的概念和实例	244
§ 8-2 斜弯曲	245
§ 8-3 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	251
§ 8-4 扭转与弯曲的组合变形	258
* § 8-5 组合变形的普遍情况	265
习题	267
第九章 平面曲杆	276
§ 9-1 概述	276
§ 9-2 曲杆横截面上的内力和应力	277
§ 9-3 平面曲杆纯弯曲时横截面上的正应力	278
§ 9-4 中性层曲率半径 r 的确定	283
§ 9-5 曲杆弯曲正应力公式的讨论	289
§ 9-6 曲杆平面弯曲的强度条件	290
习题	293
附录 I 平面图形的几何性质	296
§ I-1 静矩和形心	296
§ I-2 惯性矩和惯性半径	300
§ I-3 惯性积	304

§ I-4 平行移轴公式.....	305
§ I-5 转轴公式与主惯性轴.....	309
习题	313
附录 II 型钢表	317
表 1 热轧等边角钢	317
表 2 热轧不等边角钢	324
表 3 热轧普通槽钢	332
表 4 热轧普通工字钢	335
附录 III 上册习题答案.....	338

第一章 绪 论

§ 1-1 材料力学的任务

机械或结构物的每一组成部分称为构件。任一构件都由某种材料制成,并受某些载荷的作用。例如车床主轴通常由碳素钢制成,而作用于主轴上的载荷有切削力、齿轮啮合力以及卡盘和工件的重力等。为保证机械或结构物的正常工作,在载荷作用下的构件都应该有足够的承担载荷的能力(简称承载能力)。构件的承载能力主要由以下三方面来衡量:

第一,要求构件具有足够的强度。例如冲床的曲轴在正常工作的冲压力作用下,不应该折断。储气罐或氧气瓶在规定的压力作用下,不允许爆破。可见,所谓强度是指构件在载荷作用下抵抗破坏的能力。

第二,要求构件具有足够的刚度。构件的形状和尺寸将因载荷的作用而发生改变,即发生变形。但变形不应超过正常工作所允许的限度。例如在外力作用下的机床主轴,即使有足够的强度,若变形过大,仍会影响工件的加工精度。又如当齿轮轴的变形过大时(图 1-1, a),将使轴上的齿轮啮合不良,并引起轴承的不均匀磨损(图

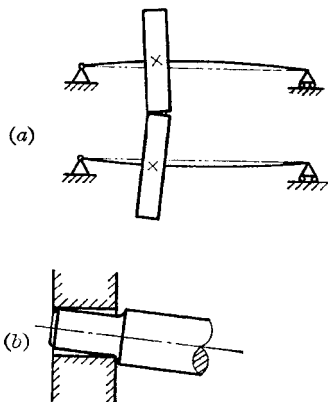


图 1-1

1-1, b)。因而,所谓刚度是指构件在外力作用下抵抗变形的能力。

第三, 要求构件具有足够的稳定性。例如内燃机中的挺杆、千斤顶中的螺杆等细长直杆(图 1-2, a 和 b), 在压力作用下便有被压弯的可能。为了保证正常工作, 要求它们始终保持直线形式, 亦即要求原有的直线平衡形态保持不变。所以, 所谓稳定性是指构件保持其原有平衡形态的能力。

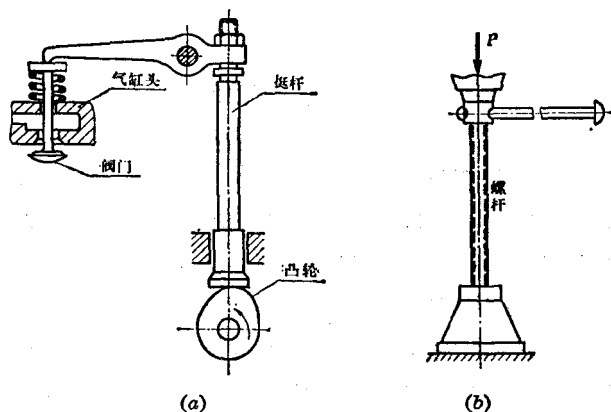


图 1-2

若构件的截面尺寸过小, 或材料选用不当, 在外力作用下将不能满足上述要求, 从而影响机械的正常工作。反之, 如构件尺寸过大, 或选用材料过好, 虽然满足了上述要求, 但构件的承载能力却未必能充分发挥, 浪费了材料, 又增加了机械的重量和成本。材料力学的任务就是在保证满足强度、刚度和稳定性要求的前提下, 以最经济的代价, 为构件选择适宜的材料, 确定合理的形状和尺寸, 为设计构件提供必要的理论基础和计算方法。

在实际工程问题中, 一般说, 要求构件具有足够的强度、刚度和稳定性。但对某些特殊构件, 却又往往有相反的要求。例如, 为了保证机器不致超载, 当载荷到达某一极限值时, 要求安全销立即破坏。又如各种车辆中的缓冲弹簧, 在保证强度的要求下, 又力求

有较大的变形,以发挥其缓冲作用。

构件的强度、刚度和稳定性与所用材料的机械性质(力学性质)有关,而材料的机械性质要由实验来测定。此外,有些实际问题的理论分析结果,并不完全可靠,有待实验结果的验证。还有些问题现在还没有理论结果,必须用实验的方法来测定。所以实验研究和理论分析同样是完成材料力学任务的重要手段。

§ 1-2 变形固体及其基本假设

制成各种构件的材料一般均为固体。在外力作用下固体将发生变形,统称为变形固体。变形固体的性质是多方面的,从不同的角度研究问题,侧重面也不一样。研究构件的强度、刚度和稳定性时,往往忽略变形固体的一些次要性质,根据其主要性质作某些假设,将它们抽象为一种理想模型,以便进行分析,简化计算。在材料力学中对变形固体所做的假设是:

1. 连续性假设 即认为组成物体的物质毫无空隙地充满了整个物体的几何容积。从物质结构来说,组成固体的粒子之间实际上并不连续,但它们之间所存在的空隙与材料力学中所研究的构件尺寸相比,极其微小,可以忽略不计,这样就可以认为物体在其整个几何容积内是连续的。

2. 均匀性假设 即认为在物体内,各处的性质完全相同。就工程上使用最多的金属来说,组成金属的各个晶粒的机械性质,并不完全相同。但因材料力学所研究的构件或构件的某一部分,其所包含的晶粒为数极多,而且无规则地排列,其机械性质是所有各晶粒的性质的统计平均值,所以可以认为构件内各部分的性质是均匀的。

材料力学并不根据物质的粒子结构来研究物体内的受力和变

形, 因此可以把变形固体抽象为均匀连续的模型, 运用数学工具, 从而得出满足工程要求的实用理论。但对接近于分子或晶粒那样大小的范围内所发生的现象, 用均匀连续假设, 就往往得不到合理的结果。

3. 各向同性假设 即认为物体在各个方向上具有完全相同的机械性质。具备这种属性的材料称为各向同性材料。就金属的单一晶粒来说, 在不同方向上, 其机械性质并不一样, 但金属物体包含着数量极多的晶粒, 而且各晶粒的方位又是杂乱无章地排列, 其在各个方向上的性质就接近相同了。铸钢、铸铜和玻璃等都可认为是各向同性材料。材料力学中所讨论的变形固体, 都假设为是各向同性的。

在各个方向上具有不同机械性质的材料, 称为各向异性材料, 如胶合板、纤维织品和木材等。

4. 小变形条件 在不同情况下, 变形固体因外力作用而引起的变形, 其数值可能很小, 也可能颇大; 但材料力学所研究的问题, 限于变形的大小远小于构件原始尺寸的情况。这样, 在研究构件的平衡和运动时, 就可以忽略构件的变形, 而按变形前的原始尺寸进行分析计算。例如在图 1-3 中, 简易吊车的各杆因受力而变形, 引起支架几何形状和外力位置的变化。但由于 δ_1 和 δ_2 都远小于吊车的其他尺寸, 所以在计算各杆受力时, 仍然可用吊车变形前的几何形状和尺寸。今后将经常使用小变形的概念以简化分析计算。至于构件变形过大, 超出小变形条件, 一般不属于材料力学研究的范围。

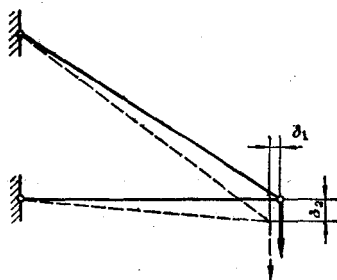


图 1-3

工程上常用的各种材料在外力作用下将产生变形。试验指出:当外力不超过一定限度时,绝大多数材料在外力解除后都可恢复原状。但如外力过大,超过一定限度,则外力解除后,只能部分复原,而遗留下一部分不能消失的变形。随外力解除而消失的变形称为弹性变形;而外力解除后不能消失的变形称为塑性变形,也称残余变形或永久变形。一般情况下,要求构件只发生弹性变形,而不允许发生塑性变形。

§ 1-3 外力及其分类

作用于构件上的外力(包括载荷和支反力),按其作用方式可分为体积力和表面力。体积力连续分布于物体内部各点,例如物体的自重就是体积力,惯性力也作为体积力处理。体积力的单位是牛顿/米³,记为 N/m^3 。表面力是作用于物体表面上的力,又可分为分布力及集中力。连续作用于物体表面某一面积上的力称为分布力,例如作用于油缸内壁的油压力,作用于船体上的水压力等均均为分布力。分布力的单位是牛顿/米²或兆牛/米²,分别记为 N/m^2 和 MN/m^2 。有些分布力是沿构件的轴线作用的,如楼板对屋梁的作用力,其强弱程度以沿轴线每单位长度内作用多少力来度量,计算单位是牛顿/米或千牛/米,分别记为 N/m 和 kN/m 。若外力分布的面积远小于物体的整体尺寸,或者沿构件轴线分布的长度远小于轴线的尺寸,就可以看作是作用于一点的集中力。例如火车轮对钢轨的压力、轴承对轴的反作用力等,都可以看作是集中力。集中力的单位是牛顿或千牛,分别记为 N 和 kN 。

按载荷随时间变化的情况,又可把载荷分成静载荷和动载荷。若载荷缓慢地由零增加到某一定值,以后即保持不变,或变动很不显著,即为静载荷。例如,当把机器缓慢地置放在基础上时,机器

的重量对基础的作用便是静载荷。若载荷随时间而变化,则为动载荷。按其随时间变化的方式,动载荷又可分为交变载荷与冲击载荷。交变载荷是随时间作周期性变化的载荷,例如当齿轮转动时,作用于每一个齿上的力都是随时间按周期性变化的。冲击载荷则是物体的运动在瞬时内发生突然变化所引起的载荷,例如急刹车时飞轮的轮轴、锻造时汽锤的锤杆等都受到冲击载荷的作用。

在静载荷和动载荷两种情况下,材料所表现出来的性能颇不相同,分析方法也有差异。因为静载荷问题比较简单,而且在静载荷下所建立的理论和分析方法,又是解决动载荷问题的基础,所以我们首先研究静载荷问题。

§ 1-4 内力、截面法和应力的概念

物体因受外力而变形,其内部各部分之间因相对位置改变而引起的相互作用就是内力。我们知道,即使不受外力,物体的各质点之间,依然存在着相互作用的力,材料力学中的内力是指外力作用下,上述相互作用力的变化量,所以是物体内部各部分之间因外力而引起的附加的相互作用力,即“附加内力”。这样的内力随外力的增加而加大,到达某一限度时就会引起构件破坏,因而它与构件的强度是密切相关的。

为了显示出构件在外力作用下 $m-m$ 截面上的内力,用平面假想地把构件分成 I 、 II 两部分(图 1-4, a)。任取其中一部分,例如 II ,作为研究对象。在部分 II 上作用的外力有 P_3 和 P_4 ,欲使 II 保持平衡,则 I 必然有力作用于 II 的 $m-m$ 截面上,以与 II 所受外力平衡,如图 1-4, b 所示。根据作用与反作用定律可知, II 必然也以大小相等、方向相反的力作用于 I 上。上述 I 与 II 之间相互作用的力就是构件在 $m-m$ 截面上的内力。按照连续性

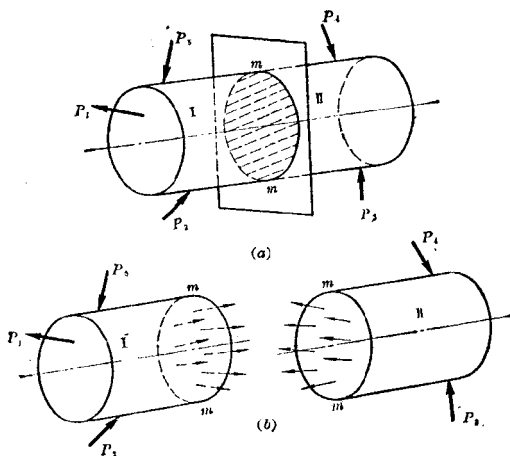


图 1-4

假设, 在 $m-m$ 截面上各处都有内力作用, 所以内力是分布于截面上的一个分布力系。今后我们也把这个分布内力系的合力 (有时是合力偶) 称为截面上的内力。

对我们所研究的部分 II 来说, 外力 P_3 、 P_4 和 $m-m$ 截面上内力保持平衡, 根据平衡条件就可以确定 $m-m$ 截面上的内力。

上述用截面假想地把构件分成两部分, 以显示并确定内力的方法称为截面法。可将其归纳为以下三个步骤:

(一) 欲求某一截面上的内力时, 就沿该截面假想地把构件分成两部分, 任意地留下一部分作为研究对象, 并弃去另一部分。

(二) 用作用于截面上的内力代替弃去部分对留下部分的作用。

(三) 建立留下部分的平衡条件, 确定未知的内力。

例 1-1 钻床如图 1-5, a 所示, 在载荷 P 作用下, 试确定 $m-m$ 截面上的内力。

解: 1. 沿 $m-m$ 截面假想地将钻床分成两部分。取 $m-m$ 截面以上部分

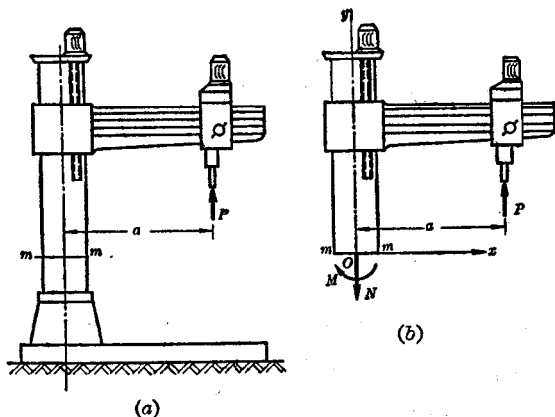


图 1-5

进行研究(图 1-5, b), 并以截面的形心 O 为原点, 选取坐标系如图所示。

2. 外力 P 将使 $m-m$ 截面以上部分沿 y 轴方向位移, 并绕 O 点转动, $m-m$ 截面以下部分必然以内力 N 及 M 作用于截面上, 以保持上部的平衡。

3. 由平衡条件

$$\begin{aligned}\Sigma Y=0, & \quad P-N=0 \\ \Sigma M_O=0, & \quad Pa-M=0\end{aligned}$$

由此求得内力 N 和 M 为

$$N=P, \quad M=Pa$$

在例 1-1 中, 内力 N 和 M 是整个 $m-m$ 截面上分布内力系的合力及合力偶, 用它们可以说明 $m-m$ 截面以上部分的内力和外力的平衡关系, 但不能说明分布内力系在截面内某一点处的强弱程度。为此, 我们引入内力集度的概念。设在某一受力构件的 $m-m$ 截面上, 围绕 A 点取微小面积 ΔF (图 1-6, a), ΔF 上内力的合力为 ΔP , 这样, 在 ΔF 上内力的平均集度定义为

$$p_m = \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (a)$$

p_m 称为 ΔF 上的平均应力。一般说, $m-m$ 截面上的内力并不是均

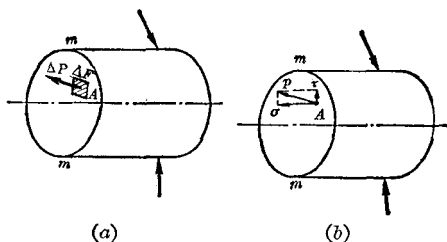


图 1-6

匀分布的，因此平均应力 p_m 随所取 ΔF 的大小而不同，所以它还不能真实地表明内力在 A 点处的强弱程度。为消除 ΔF 面积大小的影响，无限地缩小 ΔF ，当其趋近于零时，极限值

$$p = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{dP}{dF} \quad (1-1)$$

即为 A 点处的内力集度，称为 A 点处的应力。 p 是一个矢量，一般说既不与截面垂直，也不与截面相切。通常把应力 p 分解成垂直于截面的分量 σ 和切于截面的分量 τ (图 1-6, b)。 σ 称为正应力， τ 称为剪应力。应力的常用单位是兆牛/米²，记为 MN/m²。

§ 1-5 线应变与角应变

为了研究构件截面上内力分布规律，必须对构件内一点处的变形作深入的研究。设想把构件分割成无数微小的正六面体，在外力作用下这些微小正六面体的边长必将发生变化。例如图 1-7, a 表示从受力构件的某一点 A 的周围取出的一个正六面体，其与 x 轴平行的棱边 ab 的原长为 Δx 。变形后 ab 边的长度变为 $(\Delta x + \Delta u)$ ， Δu 称为线段 ab 的绝对变形 (图 1-7, b)。由于 Δu 的大小与原长度 Δx 的长短有关，不能完全表明线段 ab 的变形程度。如在线段 ab 内各点处的变形程度相同，则比值