

工程力学策略与定性

常连方 编著



中国地质大学出版社

工程力学策略与定性

常连方 编著

中国地质大学出版社

内 容 简 介

本书内容涉及工程力学的诸多领域,特别是结构静力学、结构动力学、弹性稳定性及流体-弹性力学等。取材重实用,包括有一些独特问题及其独特解算方法。

本书强调对物理概念的理解及辨异,注意定性判断、直观洞察、解题策略及简易估算。

本书可供力学、建筑、水利、机械等专业的学生、教师及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学策略与定性/常连方编著. —武汉:中国地质大学出版社,1996. 11

ISBN 7-5625-1032-6

I. 工…

II. 常…

III. ①工程力学②策略③定性

IV. TB12

出版发行 中国地质大学出版社(武汉市喻家山·邮政编码 430074)
责任编辑 贾晓青 责任校对 熊华珍
印 刷 武汉水利电力大学印刷厂

开本 850×1168 1/32 印张 8.25 字数 220 千字
1996 年 11 月第 1 版 1996 年 11 月第 1 次印刷 印数 1—2 000 册
定价:12.50 元

前 言

——略论建筑结构的力学定性

在建筑力学中,有许多充满智慧的解题策略和简化算法,也有不少定性的研究成果。这些知识有力地促进了建筑力学的研究和应用。

定性和定量是相辅相成的两个方面,许多解题策略和简化算法是以反映结构性态本质的定性知识为基础的。许多定性概念往往是在多次定量计算中重复出现后才被总结发现出来的,也有些是从假说或猜想中产生再经过实验或理论推演以证明其正确与否的。

在以往的建筑力学著作中,讲述定量计算的书籍很多,但着重讲定性知识者则很少。为此,笔者认为很有必要编写一些内容偏重定性的书。在这种书中,应强调直观判断、定性洞察和近似评估;尽可能避免冗长的数学推演,对有些内容可只给出结论及其物理意义的理解,而不进行严格的证明。

所谓定性,是一个内容非常广阔的领域,包括一大堆概念范畴,比如:有无、大小、新旧、先后、主次、简繁、偏安全、偏危险、临界状态、门坎值、离散、连续、时间域或空间域、频率域或复域、可比性、相似性、可能性、对偶性、耦合或解耦、一般或个别、恒正恒负或恒零、大于等于小于或介于、有关无关、有限无限、线性非线性、稳定性、唯一性或多值性、上限或下限、相对或绝对、守恒或逸散、暂态或稳态、随机或定常、自激或旁激、是什么不是什么、可用或不可用等等。此外,对于诸多观点、思路、定理乃至科学方法论等也可广义地归类于定性知识的范畴。

定性知识的用处很多。在近代,由于电子计算机技术的高度发展,解决力学问题的数值方法非常有效和普遍。但数值方法的弱点是就事论是而较难显示共性,而且有相当多的场合没有必要进行

精确的数值计算。不少计算机程序对应用者而言具有黑箱性质,所以工程师要善于对结构的性态作定性分析和近似估算,以便对计算机提供的数值成果的可靠性给出应有的评价。对建筑师而言,定性和估算更是必备的基本技能。

对建筑结构的破坏性态及危险部位的判定对于新结构的设计及既存结构承载变动的可行性决策至关重要。比如,拱结构设计中最为要紧的是用以抵抗横推力的支墩。一个既存结构改承新荷载时,只需判定最危险截面是否可以通过。总之,定性可帮助人们分清主次,抓住关键。

在建筑力学中有许多临界性态或数量界限。超过临界状态的数量界限,问题的性态将发生质的变化。比如,中心受压的直杆,当压力超过临界值时将发生弯曲。又如,若荷载的频率很低,则结构的反应可按静力计算,但当频率接近结构的自由振动频率时,将发生强烈的振动。在各种各样的运动稳定性问题中,临界值的研究常居首要地位。比如,在风激振动中,有弯-扭临界风速、扭振临界风速,还有舞振临界风速等。当风速超过任一个临界值时,结构都将发生大振幅的危险振动。

内力分布及应力分布的均匀性是影响用材是否经济的一个重要因素。构件中的弯矩往往被视为不受欢迎的一种内力,它导致横截面上的应力分布不均,使材料的潜力不能充分发挥。定性知识可以帮助人们设法消除或减小这种不利影响。例如,设计刚架时,若在构件布局上使其各结点不会发生线位移,则在结点荷载作用下就成为无矩刚架(若计及杆件的可伸缩性,虽有弯矩但也很小);拱壳结构若用合理形状则可得无矩状态;温克尔地基上的平板,不论形状如何,只要其上的外力是均布的,就总是无矩的;多跨静定梁中的弯矩虽不能消除,但若合理布置诸铰的位置,就可使弯矩值沿梁长的分布比较均匀。

定性知识中的上、下限定理对技术人员处理工程问题是非常有用的。据说某工程施工单位,有人取笑一位工程师,称之为八分

之一工程师,因为他核算梁的最大弯矩时常用 $ql^2/8$ 。其实,这位工程师的确善于应用上限估计:不论梁的支承条件如何,在均布荷载作用下,最大弯矩总超不过 $ql^2/8$ 。

人们对力学定性知识的取得也同样服从通常的认识规律,这里不打算重复论述。现在只简述一下取得定性知识的几个途径:

(1) 关于力学定性的书虽然很少,但也有非常优秀的专著。哈尔克维奇的《自振》就是一例。这是一本不用数学介绍自激振动性态和机制的名著,影响很大。但更多宝贵的定性知识却分散地隐藏于大量文献之中,需要有意识地去发掘、整理和开发应用。

(2) 实验观察提问和概括。当积累的资料多了,观察的现象重复多了,就会使认识发生质变,提出假说,再进一步实验验证。这里所说的实验也包括思想实验。为检验自己的一个新提法是否正确或是否有普遍性,可用枚举肯定法和简例否定法——只要有一个简单例子通不过就可肯定所拟提法不正确或适用范围有限。不要轻易放过偶然出现的有趣现象,因为必然的东西往往在偶然的机会有我们展现。比如位移的互等性,可能在一个算例中出现,但它却有一般性。要善于提出问题,要在时间和空间上进行多范畴的全方位思考。比如:当看到一般书中对有势力举出不少正面例子时,可追问到底有哪些反面实例可说明无势力;当看到一般书中讲低阻尼时的振动性态时,可追问一下超阻尼及临界阻尼时的振动性态如何;等等。

(3) 理论推演。比如:从量纲分析中可检验公式或答案的正确性;从不同学科公式的对比可发现自然界许多现象的相似性,从而发展比拟方法;由特例分析可从个别中启示一般;利用极端分析可得到公式的界限或使一般公式退化,看它能否和特例公式相衔接。在作理论推演时,为了定性理解,要重视数学过程和物理过程的一致。当然,也有暂时不一致的情况,如在傅立叶谱分析中往往引进“负频率”的概念。但这只是手段上的借助,最终还得和物理一致。在理论推演中,具体问题具体分析有助于得到简易直观的结果。比

如在第一和第二主应力的鉴别问题上,不少书本颇费力讲解,然而热莫契金却独辟新路,导出了非常方便的公式。不要盲从过去,不要热中一般,最一般的公式往往是最笨的公式。对待理论推演,卡曼曾推崇一个信条“用复杂抽象的推演能得到的结果往往可用简单直观的方法精确或近似地得到它”。正是卡曼成功地将韦斯特戈德用复杂数学导出的坝面地震动水压力直观地表述为附加质量。

当用理论方法去证明一个定性命题时,要注意证明方法的局限性有时会掩盖所论命题的普遍适用性。例如变形体的虚功原理本可适用于线性、非线性,但一般书中多用线性前提去证明,这就给学生以假象,误以为它只适用于线性。

力学定性与教学也有很密切的关系。作为教师若不善于抽象概括和直观定性,而只偏重于罗列材料,一般说来是很难有好的教学效果的。中国有句古话:“知所先后则近道矣”。这里所说的先后也包括有主次的意思,也就是一种定性。课堂上使人不得要领的叙述往往是教师对论题理解不够深刻的直接结果,而能够一语道破深入浅出的叙述往往来源于教师深思熟虑的探讨,而且还来源于有善喻的本领。这里的善喻必须以相似性、可比性为依据,这也是一种定性。欲使学生掌握正面,最好也从反面对比入手,而且要和邻近的概念相区别。这里所说的正反、邻近、区别等都是定性。比如有的教师讲快慢时说:“速率只有大小,而速度则不仅有大小而且有方向”。这要比孤立地单独讲速度或速率的效果好。再如有的教师讲波动时说:“行波和驻波不同,其特点是后一质点的运动情况总要效法前一质点的运动,只是在时间上落后一些。”这样要比只写一个行波的表达式好得多。简明是科学中的美,而力学定性则是这种美的重要侧面。

在力学的教学中,还有许多很精辟的定性概括,有的被编成易记易用的口诀,下边举若干例子:

关于圆周长和直径的近似关系“周3径1”;

关于特定直角三角形三个边长的关系“3:4:5”;

关于应力集中的消除“砍掉你的棱角”；
关于随机量极值的估计“ 3σ 法则”；
建楼后地基沉降“开挖量和楼重等量置换”；
关于工字梁的力学作用“翼抗弯腹抗剪”；
关于阻尼的作用“阻尼削峰、广谱减振”。

其中有些概括虽然是近似的，但抓到了主流，和精确值相比往往是八九不离十，工程中是够用的。再如莫尔圆，有人编出口诀：

块上一面，圆上一点；
块上转一，圆上转二；
垂直两面，直径两端。

这里的块，指的是所取微单元体。

在教学中，往往采用先定性后定量、先结论后证明的方法，也就是中国古代的先知其然而后再知其所以然。这种教法往往可收到思路清楚、经纬分明的效果。曾有名家看书也是先看结论后看证明或自己独立试图证明的。

学习要强调整理解，只有理解了的东西才能长期记忆和灵活应用，而理解的重要内容是定性。

对于科学内容，许多时候为了表达简明，常将状态公式化，但为了便于理解和记忆，也常将公式状态化，即将公式所反映的内容用图形或简明的过程等形象地表达出来。例如，一端固定另端简支梁的固端抗弯刚度的公式是 $3EI/l$ 。若用力矩分配过程，很容易求得这个结果。即先将简支端也固定起来，这时原固定端的抗弯刚度为 $4EI/l$ ，新固定端产生的力矩为 $2EI/l$ ，当后者取消时将传给原固定端 $-EI/l$ ，然后叠加即得 $4EI/l - EI/l = 3EI/l$ 。这就是以记过程代替记结论的一个例子。

力学定性和科普一样，都应属于高层次的工作，因为如果对问题没有深刻的理解和研究，就不可能作出深入浅出一语道破的论述。诚望国内外同行在力学定性的领域共同开发。笔者水平有限，仅将自己的部分心得体会写在这个小册子里，不当之处欢迎指正。

符号说明

a	静力位移广义坐标
$a(t)$	动力位移广义坐标
$\dot{a}(t)$	$a(t)$ 对时间 t 取一次导数, 即 $\dot{a}(t) = \frac{da(t)}{dt}$
$\ddot{a}(t)$	$a(t)$ 对时间 t 取两次导数, 即 $\ddot{a}(t) = \frac{d^2a(t)}{dt^2}$
$X(x)$	位移的形状函数
$X'(x)$	$X(x)$ 对 x 取一次导数, 即 $X'(x) = \frac{dX(x)}{dx}$
$X''(x)$	$X(x)$ 对 x 取两次导数, 即 $X''(x) = \frac{d^2X(x)}{dx^2}$
u	位移
v	速度
θ	强迫力的圆频率。 2π 秒内振动次数
ω	自由振动圆频率
ω_d	计及阻尼影响时的自由振动圆频率
f	工程频率。每秒振动次数
ω_{ii}	仅存在第 i 个质体时体系的圆频率
Ω_{ii}	仅允许第 i 个自由度局部振动时的圆频率
$\bar{m}$	单位杆长的质量
m_{ij}	广义质量
k	弹性刚度
k_{ij}	广义刚度
k_g	几何刚度
P_{ii}	静力广义荷载
$P_{ii}(t)$	动力广义荷载
$p_{y,\xi}$	在水域中, 点 ξ 处单位简谐加速度在点 y 处引起的简谐动水压力

$\hat{p}_{y,\xi}$	$p_{y,\xi}$ 的幅值
$p'_{y,\xi}$	在水域中, 点 ξ 处单位简谐位移在点 y 处引起的动水压力
$\bar{m}^*$	附连水质量沿杆长的分布集度
b^*	附连水的宽度
ω^*	在水介质中结构的自由振动圆频率
$U(z, t)$	风速
$\bar{U}(z)$	风速中的时均值
$v(z, t)$	风速中的脉动值

目 录

第一章 若干概念	(1)
§ 1-1 建筑结构的计算简图以及对称性和倍数原理的应用	(1)
§ 1-2 荷载简图的等价变换和转移	(3)
§ 1-3 正负号规定的绝对准则与变形准则、正负号规定及公式推导	(7)
§ 1-4 线性体系的叠加原理和基本结构方法	(8)
§ 1-5 几种几何刚度	(10)
§ 1-6 强度和刚度验算的前提——几何稳定和弹性稳定	(12)
第二章 一般定理	(14)
§ 2-1 静定体系的性质	(14)
§ 2-2 超静定体系的性质	(17)
§ 2-3 线性体系的静力学互等定理	(20)
§ 2-4 关于变形体虚功原理的提法和证法	(22)
§ 2-5 刚元体系、有限元变形体系和微分元变形体系的虚功原理	(22)
§ 2-6 莫尔方法及其机动几何证法	(25)
§ 2-7 求超静定结构位移的简化方法	(26)
§ 2-8 超静定结构的一个虚功公式	(27)
§ 2-9 势能极值原理	(29)
§ 2-10 结构承载能力的下限定理	(31)
第三章 几种常用结构的静力性态及估算	(32)
§ 3-1 梁	(32)

§ 3-2	柱	(42)
§ 3-3	桁架	(46)
§ 3-4	拱	(50)
§ 3-5	刚架	(53)
§ 3-6	板的交叉梁系比拟、强者多劳原理及梁条理论	(57)
§ 3-7	剪切滞后的概念、薄壁杆翼板的有效宽度	(59)
第四章	若干特种结构的静力性态及估算	(63)
§ 4-1	超静定热力管道的 Spielvogel 定理	(63)
§ 4-2	圆弧梁和闭合圆弧梁的 Beizeno 定理	(64)
§ 4-3	加肋管的地基梁比拟和弯管的 Karman 理论 ...	(66)
§ 4-4	褶皱屋面和圆球形屋顶	(68)
§ 4-5	充气薄膜柱体和充水薄膜坝	(70)
§ 4-6	求解渡槽内力的策略	(73)
§ 4-7	深梁应力及近似验算	(74)
第五章	位移法的策略思想及若干独特方法	(77)
§ 5-1	位移法的解题策略	(77)
§ 5-2	β 方程及其应用	(78)
§ 5-3	力矩分配法的策略特点及集体分配方法	(80)
§ 5-4	剪力分配和无剪力分配法	(84)
第六章	广义位移法	(88)
§ 6-1	解题策略与典型方程	(88)
§ 6-2	在静力问题中应用举例	(89)
§ 6-3	有初始弯曲的结构	(92)
§ 6-4	悬挂曲线柔索的轴向刚度	(95)
第七章	弹性稳定性若干问题	(98)
§ 7-1	极限方法和随域平衡	(98)
§ 7-2	能量方法及临界荷载值的上下限	(100)
§ 7-3	不同性态荷载的临界值	(103)

§ 7-4	剪切变形对临界荷载值的影响	(106)
§ 7-5	失稳位移曲线的正交性	(108)
§ 7-6	临界荷载值的变化率	(109)
§ 7-7	弹性失稳临界荷载的测定方法	(110)
第八章	几种结构的失稳临界荷载	(114)
§ 8-1	可变向荷载作用下圆拱和圆环的稳定性	(114)
§ 8-2	铰接桁架的整体弹性稳定性	(118)
§ 8-3	有弹性支承结构的稳定性、弹性支承的临界似 绝对刚度	(121)
§ 8-4	受压平板的失稳后效	(128)
第九章	广义单自由度体系的振动	(130)
§ 9-1	振动微分方程及广义振子	(130)
§ 9-2	三铰或两铰圆拱反对称振动的基频 ——计及不同性态死荷载的影响	(132)
§ 9-3	广义单自由度体系的振动反应	(134)
第十章	多自由度体系的振动	(138)
§ 10-1	自由振动基本方程及自由振动频率解的验算 公式	(138)
§ 10-2	二自由度体系自由振动的频率圆和振幅相位	(143)
§ 10-3	刚度或质量改变对频率的影响 ——频率的变化率公式	(145)
§ 10-4	部分自由度被约束时体系频率的变化 ——频率间隔性定理	(146)
§ 10-5	频率的移位定理	(147)
§ 10-6	振型的正交性	(149)
§ 10-7	振型叠加法计算强迫振动纲要	(151)
§ 10-8	初始激发引起的振动 ——广义初位移和广义初速度	(152)

§ 10-9	振型叠加法计算瞬时荷载的反应 ——广义冲量的概念	(154)
§ 10-10	振动计算中对称性的利用	(155)
§ 10-11	动力反应互等定理	(156)
第十一章	动力吸振器及其他机智体系	(159)
§ 11-1	动力吸振器的工作机理及其在广义自由度体 系上的应用	(159)
§ 11-2	广义动力吸振器 ——多自由度体系的行为自控	(163)
§ 11-3	非荷载作用点的消振及消振可能性的判断方法	(166)
§ 11-4	静力机智体系举例	(168)
§ 11-5	抗震抗风机智体系举例	(171)
第十二章	实用流体-弹性力学初步	(175)
§ 12-1	静水中杆的振动	(175)
§ 12-2	挡水坝振动激发的动水压力	(176)
§ 12-3	地震时挡水坝动力反应的求解策略	(182)
§ 12-4	倾斜坝面上地震动水压力的 Karman 解法 ...	(185)
§ 12-5	挡水板上的地震动水压力	(188)
§ 12-6	动水压力影响函数的概念及应用	(190)
§ 12-7	风激振动概念	(195)
§ 12-8	风激扭转舞振、静力及动力发散	(197)
§ 12-9	风激竖向舞振	(199)
§ 12-10	Karman 涡激振动	(202)
§ 12-11	广义单自由度体系顺风向随机风激反应算法 纲要	(203)
§ 12-12	高层建筑顺风向反应的拟静力算法	(206)
第十三章	专论	(212)
§ 13-1	常见的振动图象	

——过渡、拍、共振、傅立叶谱	(212)
§ 13-2 低阻尼、临界阻尼及超阻尼对振动性态的影响	(215)
§ 13-3 振型广义荷载的分布与零型荷载的失落	(218)
§ 13-4 位移法及力法的失效	(221)
§ 13-5 地震荷载的概念辨异	(222)
§ 13-6 简支梁上活荷激发振动的静力学比拟	(226)
§ 13-7 傅立叶级数的虚功比拟以及和多项式联合应用	(230)
§ 13-8 结构上质量和刚度的傅立叶分解	(234)
§ 13-9 用傅立叶级数计算短时荷载引起的反应	(237)
§ 13-10 悬吊体系的重力刚度	(239)
§ 13-11 非平行吊杆体系的自由振动	(241)
§ 13-12 多自由度悬吊体系的自由振动及抗震算法纲要	(243)

第一章 若干概念

§ 1-1 建筑结构的计算简图以及对称性和倍数原理的应用

对结构进行力学分析时,一个首要工作是确定计算简图,即将真实情况抽象成理想化的、基本上能正确反映其力学性态的简化图形,包括结构主体、支承约束以及荷载等。关于这些,在一般建筑力学教本中都已讲过,在这里只打算介绍一下对称性和倍数原理的应用。所谓结构的对称性是指其尺寸、刚度以及支承约束的对称性。所谓力或位移的对称性,可用图 1-1-1 理解之。图 1-1-1(a)为正对称,其两边沿对称轴摺合后,大小及指向完全重合。图 1-1-1(b)是反对称的,其两边沿对称轴摺合后,大小重合但指向相反。

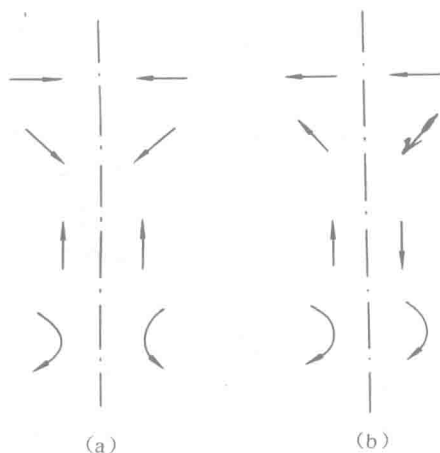


图 1-1-1

图 1-1-2(a)是一个对称结构,可将作用在它上边的任意外力分解为正对称的力和反对称的力分别作用于结构。正对称外力作用下取出的半个结构如图 1-1-2(b),反对称外力作用下取出的半个结构如图 1-1-2(c)。只需计算结构的一半,另一半的答案按正对称或反对称规律补充起来就可以了。再将正对称解和反对称解叠加,就得到原题目的答案。

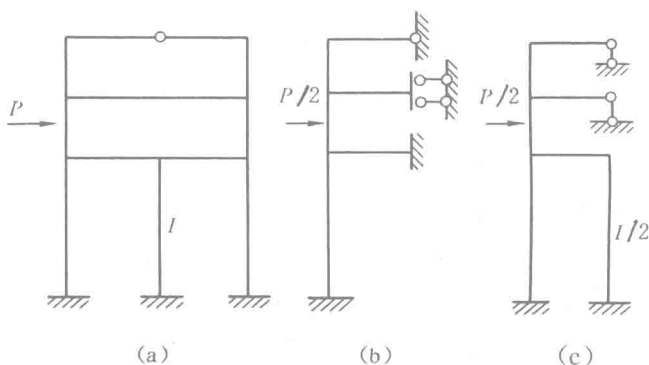


图 1-1-2

图 1-1-3(a)所示刚架各杆的刚度 ($i = EI/l$) 值标记在各杆的中部。它代表这么一类刚架,其特征是可以将它分解为如图 1-1-3(b)、(c)、(d)各单跨刚架的叠加,而且这些单跨刚架的刚度有倍数关系。比如图 1-1-3(c)和图 1-1-3(d)的刚度分别是图 1-1-3(b)刚度的 3 倍和 6 倍,3 个单跨刚架的刚度叠加起来正好等于原刚架的刚度。将结点荷载按刚度比例分配给各单跨刚架,分别计算,并将结果叠加即得原刚架的答案。这就是倍数原理的基本概念。

最后应指出,用逆推法先设定多种如图 1-1-3(b)、(c)、(d)图,可叠加构造出多种符合倍数关系的刚架。