

高等學校教學用書

結構力學

(增訂版)

上 冊

楊耀乾編著

高等教育出版社

高等学校教学用书



结 构 力 学

(增订版)

上 册

楊 颯 乾 編 著

高等教育出版社

本書增訂版分上下二冊：上冊包括靜定結構與結構變位；下冊包括超靜定結構以及結構穩定與結構動力學。其中靜定結構與超靜定結構部分系參照我國“工業與民用建築”專業、“鐵路與公路橋樑隧道”專業和“鐵道建築”專業的結構力學統一數學大綱編寫，並適當地增加了一些在目前的工程實踐中常遇的問題，如力矩分配法以及變截面剛架的計算等。至於結構穩定與動力學部分系參照蘇聯“鐵道橋樑”專業1965年的結構力學大綱編寫。

本書經中華人民共和國教育部審查同意作為土建類各學校試用教材。

結 構 力 學

(增訂本)

上 冊

楊耀乾 編著

高教教育出版社出版 北京東門內大街25號

(北京郵電印刷廠承印 北京郵電印刷廠051號)

京華印書局印裝 新華書店發行

統一書號15010·698 開本550×1168 $\frac{1}{32}$ 印張11 $\frac{5}{8}$

字數268,000 印數0001—7,000 定價(7) 冊1.80

1965年2月第1版(含對水5.64版)

1960年3月增訂第1版 1960年3月第1版第1次印刷

增訂版序

当“結構力学”再版的时候，我們进行了全書的增訂与修改工作，其目的在于使本書更能适合于 1958 年教育革命之后的新形势，更能适合于高等工业学校土建类各专业之用，使理論与实际更好地結合起来。

在增訂版中，除第七章与第九章外，其他各章均有所修改或增刪；其主要修訂部分如下：

增加了第十四章二鉸拱和第十七章变截面剛架的計算（包括单层工业厂房的計算）。第十八章按极限荷載的結構計算方法是全部重写的。关于土压力与擋土牆一章的內容，現在一般趋向于移在“土壤力学与地基基础”課程中講授，因此在本書內这一部分的内容被編入了附录中。在靜定結構部分的各章中，加强了关于靜定剛架的計算。为了扩大机动法在靜定結構中的应用，在附录中增加了一节“在机动法中求瞬心的方法”。此外，在原有章节中，增加或修改較多者有：第一章緒論及基本概念，第三章影响綫的一般理論及其应用，第四章多跨靜定梁，第五章靜定梁式平面桁架，第六章推力結構，第八章关于結構变位的一般原理，第十二章超靜定桁架的計算，第十六章形变法，以及第二十章結構动力学等。

几乎全部习题（第七与第九章除外）是重編的，使其更能适合于土建类各专业的教学之用。在桥梁、隧道以及工业与民用建筑中的一些实际问题被編入了有关各章的教材或习题中。

在第一版中所发现的錯漏之处均經改正。

本書在再版之后，分二册发行。上册包括靜定結構与結構变位；下册包括超靜定結構、結構的穩定与动力的計算。

本書的增訂與修改工作得到了唐山鐵道學院結構力學教研組全體教師的協助，特此致謝。

楊蒲乾

1959年8月于唐山

初版序

自从 1952 年开始教学改革以来，在结构力学的教学工作中，我們一直是以普洛柯費耶夫与史密尔諾夫著的結構理論三卷为教科書，并以达尔柯夫与庫茲聶錯夫著的結構靜力学为主要参考書来进行教学的。几年来的經驗告訴我們，由于这些苏联的教科書与中国的学生实际之間存在着一定的距离，并且由于譯文的文理不易为中国学生所接受的緣故，使我們在教學工作中遭遇到一些困难。因此在教改工作进行了四年之后的今天，有必要編写一本专为中国学生閱讀的結構力学教科書。这就是編写本書的目的。

本書包括三部分：結構力学 I——靜定結構；結構力学 II——超靜定結構；結構力学 III——結構穩定与結構动力学。其中第一二两部分是參照我国铁路与公路桥梁隧道专业以及铁道建筑专业的結構力学統一教学大綱編写的；第三部分是參照苏联铁道桥梁专业 1955 年的結構力学大綱編写的。就本書的內容來說，比这些大綱的要求稍微多了一些，并且鉴于力矩分配法在現場的广泛应用，因此也以一节的分量作了簡要的介紹。在使用本書时，編者認為完全沒有必要把本書的全部內容統統給学生講解，并且在一节之內，也只能是有重点地給学生詳細講解。正是为了这个目的，所以本書的敘述上力求詳細，以便学生在教师的启发之下能够自己独立鑽研。

目前由于教学計劃尚时有改变，从而教学大綱，特别是实施性教学大綱，也必須作相应的修改。因此，編者建議，使用本書的教師們請按大綱的要求与学生的水平来决定講授內容的去取。書中以小字排印的部分应考虑首先加以抛弃，即使是大字排印的部分也可以考虑作适当的精簡。对学生的要求來說，当然，其中靜定結構与超靜定結構部分是

最基本的，因此这些部分的内容应当少精简些，其余部分可以多精简些。本书的第三部分，结构稳定与结构动力学，也可以作为选修课程的教科書之用。

本書主要取材于普氏与史氏的结构理論，其次是达氏与柯氏的结构靜力学。主要参考書籍附于書末。

本書于最后脫稿之前，承金宝楨、王龙甫、李廉銀三位教授詳加审阅，并提出了許多有益的意見，編者曾据此加以修改。謹致謝忱。

本書第十九章系由陈英俊副教授执笔，靜定与超靜定結構部分的习题与答案系由徐文煥、項忠权、陈大鵬、唐昌榮、王业敏五位同志所編制，以上均經編者加以校閱；全書并由唐山鐵道学院結構力学教研組的全体教师分担了校对工作，特此致謝。

本書曾在唐院試用过一次，并根据初次实践的經驗作了一定的修改。限于編者的水平，書內难免有不适当以及錯漏的地方，希望使用本書的教师与讀者指正。

楊渾乾

1957年12月

上册目录

增訂版序	iii
初版序	v
第一章 緒論及基本概念	1
§1.1 結構力學及其任務	1
§1.2 結構力學的發展簡史	2
§1.3 結構的計算簡圖及其分類	4
§1.4 荷載的型式	6
§1.5 計算方法	8
第二章 平面結構的機動分析	10
§2.1 平面結構的支座	10
§2.2 支座的機動分析	13
§2.3 平面結構的自由度及可變度	15
§2.4 平面桁架的自由度及可變度	18
§2.5 穩定結構的形成	19
§2.6 以機動法檢查結構的穩定性	22
習題	25
第三章 影響綫的一般理論及其應用	30
§3.1 影響綫概念	30
§3.2 以靜力法作直接荷載下的單跨梁影響綫	32
§3.3 以靜力法作間接荷載下的影響綫	38
§3.4 以機動法作影響綫的概念	41
§3.5 以機動法作梁與剛架的影響綫	43
§3.6 利用影響綫求应力	46
§3.7 最不利的荷載位置	49
§3.8 特殊情形	53
§3.9 几种常用的标准荷載制	56
§3.10 利用換算荷載求最大内力	61
§3.11 簡支梁的絕對最大力矩	64
習題	70
第四章 多跨靜定梁	77
§4.1 多跨靜定梁的形成	77

§4.2 多跨静定梁在静荷载下的计算	79
*§4.3 以图略法画力矩图与剪力图	83
§4.4 多跨静定梁的影响线	88
习题	91
第五章 静定梁式平面桁架	98
§5.1 一般概念	98
§5.2 静定梁式平面桁架的分类	101
§5.3 求桁架内力的层析法	104
*§5.4 通路法	115
§5.5 代替法	120
§5.6 再分析架的形成及其作用	128
§5.7 再分析架的内力分析	129
§5.8 以层析法画桁架内力影响线	133
§5.9 再分析架的影响线	147
*§5.10 桁架外形对杆件内力的影响	154
习题	158
第六章 推力结构	167
§6.1 推力结构的分类	167
§6.2 三铰拱的数解法	170
§6.3 三铰拱的图解法	174
§6.4 三铰拱的合理拱轴	177
§6.5 三铰拱与三铰刚架的内力图	179
§6.6 三铰拱的影响线	184
§6.7 核心力矩	189
§6.8 三铰桁架拱的内力影响线	193
§6.9 混合结构的计算	199
*§6.10 悬式结构的计算	201
习题	205
第七章 空间桁架	216
§7.1 引言	216
§7.2 空间力系的平衡	219
§7.3 空间结构的支座及其稳定性	218
§7.4 空间桁架的形成及其稳定性	220
§7.5 以结点法求内力	225
§7.6 以截面法求内力	227
§7.7 分解为平面桁架的计算方法	230
*§7.8 代替法	230

习题	232
第八章 关于结构变位的一般原理	235
§8.1 通論	235
§8.2 变功与位能	237
§8.3 虚功	243
§8.4 互等定理	246
§8.5 求变位的基本公式及其应用	248
§8.6 以解析法求结构变位示例	250
*§8.7 位能微分法——卡斯奇诺路定理	255
§8.8 图解解析法	258
§8.9 图解解析法示例	262
*§8.10 阶形柱的变位	266
§8.11 温度变位	267
§8.12 基础沉降作用下的变位	273
§8.13 变位影响綫	274
§8.14 彈性荷載法	276
§8.15 在实体截面结构中彈性荷載的公式	281
§8.16 在桁架中彈性荷載的公式	285
*§8.17 桁架变位图解法基础	286
*§8.18 简单桁架的变位图解法	287
*§8.19 复杂桁架的变位图解法	290
习题	291
附录 I 土压力与挡土牆	298
*§1 一般概念	298
§2 极限平衡理論的基本假定	300
§3 主动土压力及其破裂角	301
§4 用图解法求土压力	303
§5 土压力分布及其作用点	305
§6 活荷載的影响	307
§7 牆面为曲折綫时的图解法(图 15)	307
§8 用解析法求土压力	308
§9 牆后填土浸水对土压力的影响	310
§10 被动土压力	311
§11 助金理論	316
§12 粘合力的影响	316
§13 挡土牆稳定的計算	316
§14 挡土牆强度的計算	318
*§15 板桩牆的計算	320

习题	332
附录 II 在机动法中求瞬心的方法	325
附录 III 习题答案(上册各章)	320

第一章 緒論及基本概念

§ 1.1 結構力學及其任務

一切由人手創造出來的東西，凡用以支承或平衡外來的荷載者，謂之結構。工程上所用的結構常用一根或許多杆件或部件連接而成。這些杆件可以是軸向受拉的拉杆或系杆，軸向受壓的壓杆、支撐或柱，受到撓曲的梁，受到扭曲的軸，或同時受有幾種不同作用的複式杆件。此外，還可以用受力更為複雜的薄壁構件、大面積的平板或薄殼等作為結構的主要部件。除了受到扭曲的軸以外，其他各種類型的杆件或部件在工程結構中是常遇到的。

工程師在設計一個工程結構時，他必須知道，從安全與經濟的觀點出發，在結構的各部分應該採用什麼樣的尺寸大小，才能滿足結構的強度與剛度的要求。為此，他不得不需要將實際的結構變成為紙上的計算簡圖，又不得不將實際載重簡化成為設計用荷載，從而可以分析結構各部分的受力情形以及整個結構的變形。在材料力學中曾經研究了一根簡單杆件的穩定問題。同樣地，當一個結構在變形時，也有喪失穩定的可能，這些有關結構穩定的計算，也是工程師所必須知道的。同時，由於生產的發展與擴大，機器的使用更為廣泛而且速度亦大為提高，這樣就迫使工程師們面對着另一個問題，就是如何在動力荷載的作用下來分析結構的強度、變形與穩定的問題。

由上所述，可見結構力學的任務，在於研究在靜力與動力作用下，結構的內力、變形與穩定性的分析。此外，結構力學的任務也應該包括結構外形對其內力與變形的影響。

工程師在設計結構時所面臨的一個總的問題是，如何在安全的條件下來貫徹節約的原則。1956年9月16日周恩來總理在中國共產黨

第八次全国代表大会上所作“关于发展国民經济的第二个五年计划的建議的报告”中，曾經向全国人民呼吁繼續励行節約。他說：“在第二个五年计划期間，由于国家建設規模的扩大，我們在物資供应、資金来源和技术力量等方面，还会遇到很多困难，而勵行節約，合理地使用物力、財力和人力，正是克服这些困难的一項重要办法”。为了貫徹又好又省的目的，工程師們就必须充分运用結構力学中所述的科学分析方法，来尽可能地节省材料和合理地改进設計方法。在我国发展国民經济的第一个五年期間，此种事例是屢見不鮮的。

由于生产力的不断发展，推动着結構力学这門科学的不断扩大与深化。现在，它本身已发展成为結構靜力学、結構动力学与結構稳定等几門独立的学科，而散体压力理論以及按极限荷载的結構計算等部門正在逐漸脫胎而出成为独立的学科。結構力学本身又是建筑力学的一个部門，正如材料力学是建筑力学的一个部門一样。一般地說，材料力学是对于单一杆件的分析，而結構力学是对于一个結構的分析。然而它們的严格分界是沒有的。

§1.2 結構力学的發展簡史

祖国古代的文明史充分地显示出祖国劳动人民在結構工程方面的創造能力。在远古的时候，石料是最初被利用为建筑材料的。我們的祖先对于石料的抗压性能有了一定的認識，并且由于他們穴居于山洞之中，从而启发了他們对于拱形的利用。远在秦代的时候（二千多年前），我們已經創造了最古老的偉大工程——万里长城。长城的截面形状，基本上与現代的重力式擋土牆相类似，而它的城門洞做成了拱圈形状。拱的作用很早就被利用于桥梁工程中。远在隋代的时候，距今一千三百多年前，杰出的工程師李春建造了跨过汶水的赵州桥，这是跨度約为 37 米的开式石拱桥。拱的理論是結構力学中的一个重要部分，而它却早已体現在古代偉大的拱桥工程以及其他的拱式結構中。以

懸索來支承橋面系的懸式橋梁是近代橋梁中的重要形式之一；然而它的設計思想早已體現在十七世紀末所建成的瀘定鐵索橋，此橋在四川省境內跨越大渡河，全長 311 米。總之，歷史的記載充分地說明了祖國古代工程建築的偉大成就。這些成就非但隱藏着許多重要的力學原理，而且凌駕於當時歐洲的科學技術水平之上。然而，畢竟由於被落后的封建制度生產關係所限制，束縛着生產力，從而使結構的建造與設計長期停留在經驗的階段。

力學，作為一門科學來說，大約是在十六七世紀的時候形成的。在十六世紀，達·芬奇曾經在這一方面發表過正確的理論，不過他的貢獻始終停留在稿子上。在十七世紀四十年代，伽利略從事於力學的研究，他的成就奠定了力學的基础。在十八世紀中，俄國彼得堡科學院院士歐拉對直杆穩定的問題作出了重要的貢獻。

可是，結構力學一直到十九世紀初葉才從力學中分裂出來，作為一門獨立的科學。當時由於鐵路的出現，需要荷載大、跨度長的橋梁；在這樣的環境下結構力學得到了發展。在這個時候以前已經有了關於梁的變形的一些假設和結論。這些結論被以後的許多實驗證明了。在十九世紀中，由於運輸航運的發展，出現了一些關於板與殼的理論。進入到二十世紀後，隨着生產力的發展，生產技術的提高，就有了大規模的鋼鐵生產。因此在十九世紀末二十世紀初的期間，就出現了桁架理論。隨之而起的是關於桁架合理形狀的研究以及桁架變形的理論。至於混凝土的被用作建築材料，不過是近幾十年的事。由於鋼筋混凝土結構的整體性與連續性，使剛性構架的理論有了進一步的發展。近年來，由於機械工業的發展，作用在結構上的振動力愈形增大，這樣就使結構動力學得到了飛躍的發展。晚近航空工業的迅速發展，進一步擴大與深化了關於薄壁杆件以及薄板與薄殼的理論。

世界學者如：納維哀、克拉潘朗、儒拉夫斯基、舒霍夫、卡斯奇梁諾、摩爾、普羅斯古拉柯夫、雅辛斯基、加隆金、柏潑考維奇、伏拉索夫等，在

結構力學方面有杰出的貢獻。

在解放以前，祖國學者在結構力學方面的研究工作受到了反動統治階級的阻撓和摧殘。雖然如此，仍舊有少數的科學家孜孜於這一方面的學術研究工作，他們的成果散見於國內外的期刊雜誌上，對本門科學作出了一定的貢獻。隨着祖國大陸的解放，社會主義建設的迅速發展，生產力大大地提高，科學水平得到了新的高漲。在黨和政府的號召、鼓勵與領導下，深信新中國的學者繼承着祖先的光榮傳統，行將對結構力學本身以及它對於祖國建設的作用作出偉大的貢獻。

§ 1.3 結構的計算簡圖及其分類

結構分析的工作常常根據結構的計算簡圖進行^①。結構的計算簡圖與實際結構之間尚存在着一定的差別。為了實用的理由，我們常常需要對實際結構作一些必要的簡化，保留其中的主要因素、作用與條件，略去其中的次要因素與作用，使其簡化成為一個既簡單又較精確的結構計算簡圖。有時，在初步設計中採用一個很簡單然而精確度不高的簡圖，然後在最後設計中改用另一個在計算上較繁而精確度較高的圖形。

確定一個結構的計算簡圖，特別是比較複雜的結構計算簡圖，決不是一件容易的工作，它需要有結構計算的豐富經驗，以及對結構各部分的受力情形有正確判斷的能力。

在結構力學中，我們常用“結構”這一名詞，實際上它指的是結構的計算簡圖。

結構的類型很多，可以按不同的方法加以分類。

一個結構總是具有長、寬、高三個方向的尺寸的。凡是三個尺寸都很大的結構，稱為實體結構，如擋土牆（圖 1.1）等。結構之長寬方向內的

^① 對實際結構的實驗分析除外。

尺寸很大而其厚度很小者謂之薄壳(壁或板)結構,如板、壳(圖 1.2)等。由一根或許多根杆件連接而成,每根杆件的長度很长但其截面的兩個尺寸很小,由此所形成的結構稱為杆接結構,如梁與柱合成的結構(圖 1.3)以及桁架(圖 1.4)等均屬之。

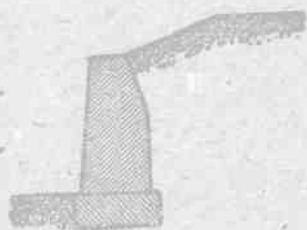


圖 1.1

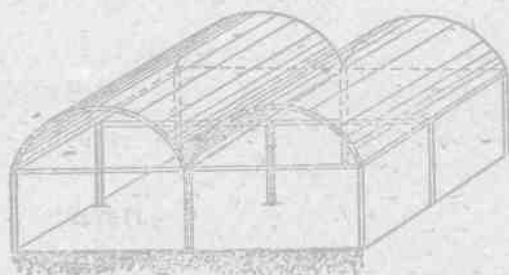


圖 1.2

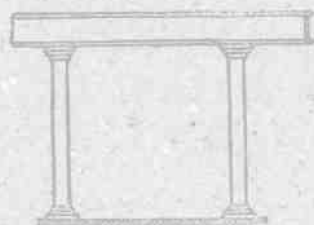


圖 1.3



圖 1.4

杆接結構,又可按其各根杆件之是否排列在同一平面內而分為平面結構與空間結構二種。凡各杆的軸以及全部的外力均在一個平面內者,謂之平面結構,如圖 1.4 所示者即其一例;凡不具備上述條件的杆接結構,稱為空間結構(圖 1.5)。

就連接的方法而言,則杆接結構又可分為桁架與剛架兩種。桁架系在各杆之間用沒有摩擦阻力的鉸連接而成,故各杆在結點處可以自由旋轉(圖 1.4)。而剛架則系指具有有一個以上剛性結點的結構,如圖 1.3 所示。所謂剛性結點,系指:當結構變形時,在結點處杆軸末端的切綫之間的夾角始終維持不變的結點。

按支承反力的方向而言,結構又可分为梁式結構(圖 1.4)与推力結構(圖 1.7)。前者在豎直荷載作用下仅有豎直反力,而后者則在豎直荷載作用下还发生水平反力。

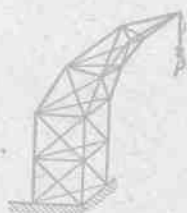


圖 1.5

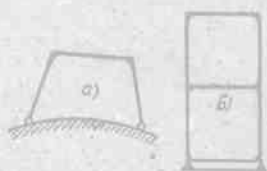


圖 1.6

就結構幾何圖形的穩定性來說,我們又可以把它分为幾何穩定与幾何不穩定的兩種結構。在任何種荷載作用下,恒能保證靜止状态的結構称为穩定結構;反之則为不穩定結構。穩定結構又可分为靜定与超靜定二種。前者其內力与反力均可由靜力平衡的条件來求得,而后者則須借助于結構變形的額外条件來決定。圖 1.8 a 所示为一靜定穩定的結構;圖 1.8 b 所示为一超靜定穩定的結構;而圖 1.8 c 則为一不穩定的幾何图形。



圖 1.7



圖 1.8

§ 1.4 荷載的型式

現我們來研究作用在結構上的外力。外力为一向量,有一定的着力点、方向与大小。

作用于任何結構上的外力分为荷載与反力。作用在結構上的風、人群、結構自重等为荷載。在荷載作用下阻止結構移动的支点抵抗力