

高等学校教学用书

结构力学

上册

金宝楨主编

高等教育出版社

高等学校教学用书



結 構 力 学

上 册

金宝楨主編

高等~~教育出版社~~社



本書系教育部約請金寶楨教授主編的“結構力學”的上冊，全書參照“工業與民用建築”、“水工建築”、“水道港口”等專業的教學大綱編寫而成，由教育部審查同意作為高等學校這些專業的試用教材。

本書分上下兩冊出版。上冊部分的主要內容為靜定結構學，擋土牆，彈性體系的一般理論；下冊部分的主要內容為超靜定結構，結構的彈性穩定理論和結構動力學基礎。

本書上冊的分工為：金寶楨教授編寫第一、五、十一等三章；楊式德教授編寫第二、三、四、九、十等五章；朱寶華教授編寫第六、七、八等三章。

本書除可供有關專業作教學之用外，亦可供有關工程技術人員參考用。

結 構 力 學

上 冊

金寶楨主編

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7號

(北京市書刊出版業營業許可証出字第054號)

京華印書局印刷 新華書店發行

統一書號15010·727 開本850×1168¹/₃₂ 印張11⁵/₁₆ 編246

字數280,000 印數0001—6,000 定價(10)¥1.70

1958年9月第1版 1958年9月北京第1次印刷

上册目录

第一章 緒論	1
§ 1-1. 結構力学的任务	1
§ 1-2. 結構力学發展簡史	2
§ 1-3. 結構計算簡圖的概念	10
§ 1-4. 結構計算簡圖的分类	12
§ 1-5. 平面杆件体系支座的分类及其計算簡圖	15
§ 1-6. 荷载的分类	16
第二章 結構的机动分析	18
§ 2-1. 机动分析的目的	18
§ 2-2. 平面体系的自由度	18
§ 2-3. 几何構造分析	23
§ 2-4. 机动分析总结	27
習題	28
第三章 靜定結構的一般概念	30
§ 3-1. 靜定結構的定义和特征	30
§ 3-2. 零載法	34
§ 3-3. 靜定結構的特性	35
習題	37
第四章 多跨靜定梁	41
§ 4-1. 多跨靜定梁的組成	41
§ 4-2. 多跨靜定梁的数解法	43
§ 4-3. 索多边形及其簡單应用	49
§ 4-4. 多跨靜定梁的圖解法	55
§ 4-5. 多跨梁的撓度圖及傾角圖	53
習題	60
第五章 影响綫通論及其对于靜定梁的应用	62
§ 5-1. 結構在动力行載作用下所提出的問題	62
§ 5-2. 影响綫的概念	63
§ 5-3. 用靜力法作簡支梁的影响綫	65
§ 5-4. 伸臂梁及多跨靜定梁的影响綫	69
§ 5-5. 集中力系的作用	73

§ 5-6. 分布載的作用	75
§ 5-7. 結点荷載的影响	77
§ 5-8. 用机动法作梁的影响綫	79
§ 5-9. 荷載的最不利位置的決定	84
§ 5-10. 等效均布載及其应用	89
§ 5-11. 簡支梁內絕對最大弯矩的決定	92
習題	95
第六章 实体三鉸拱及三鉸剛架	98
§ 6-1. 实体拱的簡史及其基本概念	98
§ 6-2. 求支座反力的数解法	103
§ 6-3. 豎向荷載下的弯矩圖,剪力圖及軸力圖	105
§ 6-4. 三鉸拱在豎向荷載下的合理軸形	110
§ 6-5. 求支座反力的圖解法,合力多边形及压力綫	113
§ 6-6. 核点弯矩及法向应力	119
§ 6-7. 影响綫	121
§ 6-8. 用零点法繪影响綫	124
§ 6-9. 三鉸剛架	126
§ 6-10. 多跨及多層的三鉸体系	125
習題	133
第七章 無推挽力的平面桁架	142
§ 7-1. 桁架的概念及發展簡史	142
§ 7-2. 桁架的分类	144
§ 7-3. 桁架瞬变性的静力特征	151
§ 7-4. 桁架的几何構造分类	154
§ 7-5. 結点法	157
§ 7-6. 內力圖解法(馬克斯威尔-克利莫那圖)	161
§ 7-7. 截面法(立脫尔法)	165
§ 7-8. 桁架外形对杆件內力的影响	170
§ 7-9. 杆件代替法(亨奈貝尔格法)	174
§ 7-10. 通路法	179
§ 7-11. 組合桁架的計算	183
§ 7-12. 桁架的影响綫	189
習題	208
第八章 有推挽力的平面桁架	215
§ 8-1. 概論	215
§ 8-2. 有推挽力的平面桁架的計算方法	216
§ 8-3. 鏈与梁式桁架联合的結構	221

§ 8-4. 牽索桁架	225
習題	230
第九章 空間桁架	234
§ 9-1. 空間桁架的計算圖	234
§ 9-2. 空間桁架的机动分析	236
§ 9-3. 空間桁架的內力計算·結点法	243
§ 9-4. 截面法	246
§ 9-5. 分解成平面桁架法	248
§ 9-6. 通路法	249
習題	252
第十章 散体压力的理論基础和擋土牆的計算	254
§ 10-1. 引論	254
§ 10-2. 散体的抗剪强度	255
§ 10-3. 主动土压力和被动土压力	257
§ 10-4. 庫倫理論	259
§ 10-5. 庫尔曼圖解法	262
§ 10-6. 利勃汉定理	263
§ 10-7. 龐西萊圖解法	265
§ 10-8. 土压力公式	269
§ 10-9. 压力集度圖	272
§ 10-10. 各种因素对土压力的影响	275
§ 10-11. 重力擋土牆的强度計算	281
§ 10-12. 擋土牆傾复及滑动的核算	283
習題	287
第十一章 彈性体系的一般理論	290
(I)超靜定体系的一般概念	290
§ 11-1. 超靜定性的意义	290
§ 11-2. 超靜定次数的确定	291
§ 11-3. 超靜定体系的特性	291
§ 11-4. 超靜定体系計算方法的分类	295
(II)彈性体系的基本定理	296
§ 11-5. 实功	297
§ 11-6. 虛功	307
§ 11-7. 功的互等定理	308
§ 11-8. 位移互等定理	310
§ 11-9. 撓度曲綫作为位移的影响綫	312
§ 11-10. 反力互等定理	313
§ 11-11. 反力和位移的互等关系	314

(III) 結構位移的計算	315
§ 11-12. 計算結構位移的用途及其理論基礎	315
§ 11-13. 位移公式	316
§ 11-14. 用圖形相乘法計算位移	323
§ 11-15. 由于溫度变化的位移	330
§ 11-16. 由于支座移动的位移	333
§ 11-17. 用彈性荷載法計算位移	335
§ 11-18. 用于实体体系的彈性荷載的实用公式	339
§ 11-19. 用于桁架的彈性荷載的实用公式	342
§ 11-20. 桁架位移的圖解法	345
§ 11-21. 繪制三鉸拱的位移圖	350
§ 11-22. 超靜定体系的位移計算	351
習題	353
主要參考書目	358

第一章 緒論

§ 1-1. 結構力学的任务

从广义來說，結構力学是一門研究各种結構的强度、穩定性和剛度的一般原理与計算方法的科学。

凡用建筑材料造成的并能承受一定荷載的物体，都可以称为結構；这个名詞适用于大桥或小梁，也适用于鋼屋架或混凝土壩。設計新的結構时，我們計算它們的强度和穩定性的目的，是要保證这些結構具有足够而非过分的坚固性，以符合安全和經濟的双重原則。其次，我們計算这些結構的剛度的目的，是使它們不致發生显著的撓度、沉陷和振动。这些現象对結構本身虽無多大危險，但从运用方面着想，是不妥当的。

不仅設計新的結構需要上述的計算，就現有結構來說，如果要求它們承受新的而为过去未曾料到的荷載，也必須进行驗算。借助于这种驗算，即可查明結構究竟能否安全地担負新的荷載，从而断定是否需要加固。

广义的結構力学应包括材料力学，狹意的結構力学，彈性理論和塑性理論四部分。材料力学是研究梁或杆在各种不同力的組合下的作用，狹意的結構力学（即目前所研究者，有些人称它为結構理論）一般从事于梁或杆組成的杆件体系（有时簡称杆系）的研究，如多跨梁、桁梁、拱、剛架等等。彈性理論所研究的或者是屬於材料力学的比較深奧的問題，也可能是超出材料力学范圍或不能用这一学科的基本方法所能解答的問題。至于塑性理論，它所研究的是塑性物体和彈性物体的形变和应力。解决与結構的載荷量有关的問題时，就需要应用这种理論。

实际上,上述四部分之間并不存在着严格的界限,有些問題可以屬於这一部分或另一部分。

我們不能把結構力學看成一种純粹数学性的課程,因为它既然研究由某种建筑材料做成的实际体系的內力和形变,所以它的結論應該以材料的实际性質为依据。因此,結構力學也象建筑材料課程一样,必須充分利用已有的实验結果。

力學是一門技术科学,它是从自然科学和工程技术的互相結合产生出来的^①。任何一門技术科学都是从工程技术的实践,經過科学的分析和提煉,从而創造出具有普遍应用的工程理論。因此,結構力學也象其他的力學一样,是从实践中来,到实践中去,是为工程技术服务并能指导工程技术前进的一門學問。同时,一个力學工作者要有相当廣闊的知識面,从自然科学到生产实践;只有这样,他才能把理論和实际很好地結合起来,从而創造出有科学根据的工程理論。

在發展我国国民經济的第一个和第二个五年計劃中,基本建設的投資總額是巨大的。党和政府一再号召全国人民,努力增产,厉行節約。为了在基本建設中貫徹節約的指示,首先要树立正确的設計思想和提高設計質量,同时在設計中还要注意从各方面考虑節約建筑材料,特別是鋼材。因此,如何充分运用結構力學的分析方法以實現国家頒布的技术政策,正是結構設計師們的光荣而又艰巨的任务。

§ 1-2. 結構力學發展簡史^②

从發展历史来看,結構力學是較古老的科学之一;在其發展初期,它并不是一門独立的科学,而是和力學不可分的。

^① “技术科学”这个新概念,我国著名力學家錢学森曾对此有所闡述,見他在第一次全国力學学术报告会开幕式上的專題報告“論技术科学”,1957年2月5日。

^② 可參看 И. М. Рабинович, “建筑力學教程”(中譯本),第一卷,第一分册,第7—16頁,高教出版社,1953;及 H. M. Westergaard, “One hundred fifty years advance in structural analysis”, Proceedings, A. S. C. E., 四月份, 1923。

恩格斯在其天才著作“自然辯證法”中寫道：^①“必須研究自然科學各個部門的順序的發展。首先是天文學，單單為了定季節，游牧民族和農業民族就絕對需要它。天文學只有借助於數學才能發展。因此也就不得不從事於數學的研究。後來，在農業發展的某一階段和在某些國家（埃及的引水灌溉），而特別是隨着城市和大建築物的產生以及手工業的發展，力學也發展起來了。不久，航海和軍事也都需要它。它也需要數學的幫助，因而又推動了數學的發展。這樣，科學的發生和發展從開始起便是由生產所決定的”。由此可見，一切科學的發展，包括結構力學在內，其依賴於生產的程度，超過生產依賴於科學的程度。

我國古代的技术人員和劳动人民對於建築工程的實踐是有輝煌成就的。例如在房屋方面，遠在公元前 1400 年以前，我們智慧的祖先已能利用天然材料創造一種架成結構的建築體系^②。從安陽發掘出來的

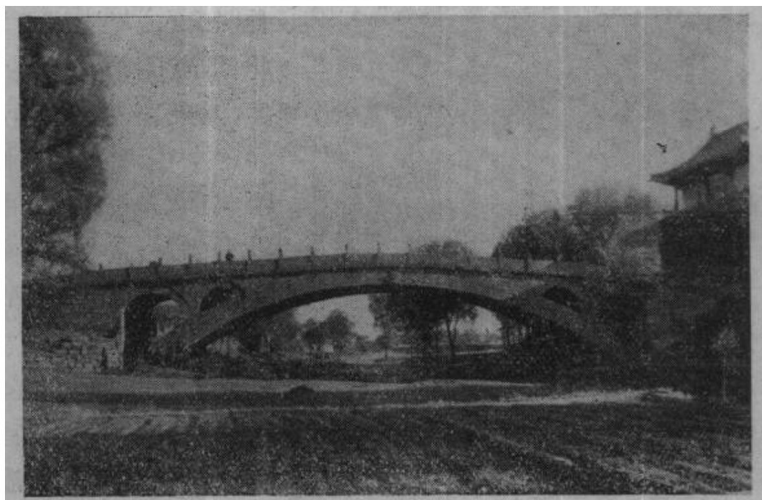


圖 1. 河北趙縣安濟橋(建於隋朝: 公元 581—618)

① 見恩格斯，“自然辯證法”，人民出版社 1955 年版，第 149 頁（譯文稍有修改——編者）。

② 梁思成，“造屋——骨架結構法”，刊在“中國的世界第一”，第二冊，第 19 頁，上海大公報出版，1951。

于歐洲。根據水經注卷 16 谷水條的記載可以証實，拱在橋梁上的應用在晉朝(公元 317—420 年)已經開始，可能還要早些^①，其次如飛橋的建築，在南北朝(公元 420—580 年)曾流行于西北一帶。這是一種伸臂式的結構，多用木材做成，其兩端各筑伸臂梁，用以支承中間的簡梁，以跨越較寬的河谷。又在我國西南各省的河流中多有索橋(吊橋)的建築，其最出色者當推西康跨越大渡河的鐵索橋^②，其橋台高 27 公尺，跨長 104 公尺，寬 3 公尺，系用 9 根粗鐵鏈組成，中五根平列承托橋板，其餘四根則用作扶欄。此橋建于清康熙 45 年(公元 1696 年)，在 45 年之後才在英國出現了一座跨度只有 70 英尺的鐵索橋。據考，索橋的建築最初是由中國傳到歐洲的。此外較著名者是四川灌縣的竹索橋^③，跨過寬達 320 余公尺的岷江江面，充分表現古代勞動人民就地取材的智慧。在中國古代的水利結構方面，最突出者是灌縣的都江堰，這是秦朝(公元前 221—202 年)蜀郡太守李冰率子二郎和川西的廣大勞動人民所建造的。筑堰的材料是當地出產的竹子和卵石，用直徑一公尺、長約 33 公尺的竹籠，中間填滿卵石，堆砌成堤，把岷江分成內外兩江；內江灌溉，外江排洪。這座構造簡單而規模宏偉的結構，已經利用了兩千多年，至今仍然完好，為中外水工結構專家所稱道。

古代工程結構的建造者為了供給結構足夠的強度，主要是根據他們的經驗和一些合乎邏輯的想法，來決定結構各部分的尺寸。在那些時候，根本還沒有關於結構計算的科學。

實際上，結構力學是在十九世紀前半期才從力學劃分出來而成為一門獨立的科學。這是主要由於當時為了發展商業資本需要進行許多的建設工作，包括鐵路、橋梁和工廠等建築。所以，當時的生產建設給結構力學提出了新的任務和要求，因而促成這門科學的迅速發展。

① 劉敦楨，“石軸柱橋”，中國營造學社彙刊，第五卷，第一期。

② 陳孔步，“瀘定鐵索橋”，登在“中國的世界第一”，第三冊，第 61 頁。

③ 梁思成，“索橋”，登在“中國的世界第一”，第三冊，第 7 頁。

在十七世紀，著名的意大利物理學家、數學家 and 天文學家伽利略 (Galileo, 1564—1642) 曾從事於材料強度的研究。在 1638 年，他出版了“兩門新科學”一書，初步地討論了一些強度的問題。繼伽氏之後，俄國的優秀學者羅蒙諾索夫 (М. В. Ломоносов, 1711—1765) 對材料強度問題又作了進一步的研究；他曾創制了一些檢驗材料的儀器，從而奠定了實驗材料機械性質的科學基礎。

瑞士大數學家歐拉 (L. Euler, 1707—1783) 對柱和梁的彎曲問題做了很多研究，並斷定其中的位能為一最小值。法國的拉格朗治 (J. L. Lagrange, 1736—1813) 除創立了虛位移原理的一般形式外，還在 1770—1773 年間研究了長柱的穩定問題；同時庫倫 (C. A. Coulomb, 1736—1806) 曾精確地定出梁內中性軸的位置，並創立了土壓力理論和脆性材料破壞時的最大剪力說。

卓越的俄國技師庫列賓 (И. П. Кулибин, 1733—1818) 曾在各種領域內完成了不少創造性工作。例如，他利用一般的力學原理在 1776 年設計了一座越過涅瓦河而具有 300 公尺跨度的木拱橋，並用一模型定出三鉸拱上的推力，開結構模型實驗的先聲。

在十九世紀初葉，法國的納維葉 (Navier, 1785—1836) 對梁內应力、梁的撓度和吊橋的分析貢獻很大。從這世紀的三十年代開始，鐵路橋梁的修築成為工程建設事業中最複雜的工作之一，而且這種技術問題的複雜性與年俱增。當時由於工商業資本的發展，不僅需要加強鐵路建築，而且還要增加其運輸能力。因此，就有了較重的機車和車輛通過橋梁，產生了較複雜的行載體系。同時，由於河道中間流速較高和兩岸土質鬆軟，不能建築造價較低的橋座，所以就需要採用較大的跨度並對土壓力作進一步研究。由於橋梁跨度的增加，就有必要考慮放棄實梁而尋求較為經濟合理和重量較輕的結構型式。在此情況下，就迫切要求鋼桁架的應用及其計算方法的研究。

關於橋梁桁架的分析，其最初創出合理的解答者當推俄國的著名

桥梁工程师茹拉夫斯基(Д. П. Журавский, 1821—1891)。法国的著名工程师克拉貝隆(B. P. E. Clapeyron, 1799—1864)在1857年發表了連續梁的三弯矩定理。

在十九世紀後半期,由于建筑技术的不断改良,致促进了結構力学的飞躍进展。由于鉚接鋼結構应用范围的扩大,就需要研究結点刚度对杆件內力的影响問題。在長跨桥中,由于風力和閘力的考虑,就要求建立空間桁架的理論。在此期內和本世紀初叶,曾涌現出不少优秀学者对結構力學作出巨大貢獻,其最著名者,在俄国有研究三鉸拱和复式格子桁架的高劳文(Х. С. Головин, 1844—1904),研究杆件彈性穩定問題的雅辛斯基(Ф. С. Ясинский, 1856—1899),研究結構靜力學和空間桁架的舒霍夫(В. Г. Шухов, 1853—1939)等人;在瑞士有研究圖解靜力學的柯尔曼(Culmann, 1821—1881);在英国有建立內力圖和位移互等定理的馬克斯威尔(J. C. Maxwell, 1831—1879);在意大利有創立位移通解的最小功原理的卡斯蒂里亞諾(A. Castigliano, 1847—1884);在德国有研究超靜定結構一般理論的莫尔(Otto Mohr, 1835—1918)和穆勒布列斯劳(H. F. B. Müller-Breslau, 1851—1925)等人。

在本世紀之初,鋼筋混凝土还未博得人們的信任;后来由于建筑技术的不断改进,無論在工業、桥梁和土工結構各方面,这种材料都已得到了广泛的应用。这种材料的特殊性要求新的結構型式,因而需要新的計算方法。在此形势下,剛架、平板以及壳体与薄壁結構的研究就蓬勃起来了。

由馬克思主义武装起来的苏联学者們善于把科学研究和生产实际密切結合起来;同时,苏联的大規模社会主义建設也促进了科学事業的迅速發展。因此,苏联的学者对于現代結構力學的貢獻远远超出其他国家之上^①。

① 关于三十年来苏联在結構力學方面所作出的貢獻,可參看 И. М. 拉賓諾維奇的“苏联杆件体系建筑力學的成就”,中譯本,金濤譯,科学出版社出版,1955。

彈性力學、塑性力學、薄壁結構理論和抗震結構理論的研究標志着本世紀結構力學的發展方向。優秀的斯大林獎金獲得者蘇聯科學院院士加僚爾金(Б. Г. Галеркин, 1871—1945)對彈性力學的研究, 斯大林獎金兩次獲得者符拉索夫(В. З. Власов)教授對薄壁杆件和壳体結構的強度、剛度與振動的研究, 伊柳辛(А. А. Ильюшин)教授對塑性力學的研究, 伯恩施坦(С. А. Бернштейн)教授和克雷洛夫(А. Н. Крылов)院士對結構動力學的研究, 拉賓諾維奇(И. М. Рабинович)教授和普洛柯費耶夫(И. П. Прокофьев)教授對結構力學一般問題的研究, 都獲得了巨大的成就。俄國人鐵木生柯(С. П. Тимошенко)教授對彈性力學和彈性穩定的研究, 也是很著名的。

近百年來, 由於帝國主義的侵略和壓迫, 我國長期處於半殖民地狀態, 工業不能得到發展。因此, 我國雖擁有不少優秀的科學工作者, 但限於客觀環境很難做出較顯著的成績。自從中華人民共和國成立, 中國的一切科學都從帝國主義和反動派的束縛下得到解放, 而跟祖國發展國民經濟的偉大生產建設密切地聯繫起來, 因而獲得了向前發展的良好條件。在結構力學研究方面, 已經有了良好開始, 並取得了初步成績。解放後九年來, 全國勞動人民在中國共產黨和毛主席英明領導下, 在蘇聯專家們無私幫助下, 在各個生產戰綫上都獲得了無比光輝的成就。在已完成的許多偉大工程建設中, 武漢長江大橋的建設便是最值得歌頌的范例之一^①。該橋是一公路鐵路兩用橋, 總長 1670 公尺(正橋長 1156 公尺, 為三聯連續梁, 每聯三孔), 須澆混凝土和鋼筋混凝土 126300 立方公尺, 石砌圻工 25440 立方公尺, 安裝鋼梁 24805 公噸, 工程之艱巨浩大, 為世界造橋史上所罕見。值得引為自豪的是, 從大橋的初步設計、技術設計、拼制鋼梁, 一直到施工安裝, 都是我國優秀的工程技術人員在蘇聯專家指導下勝利完成的。不僅如此, 由於該橋在橋

^① 該橋的工程建設情況詳載武漢大橋工程局編的“武漢長江大橋(工程建設)”, 人民鐵道出版社出版, 1957。

墩基础方面采取了世界上最先进的管柱鑽孔施工方法，大大縮短了工

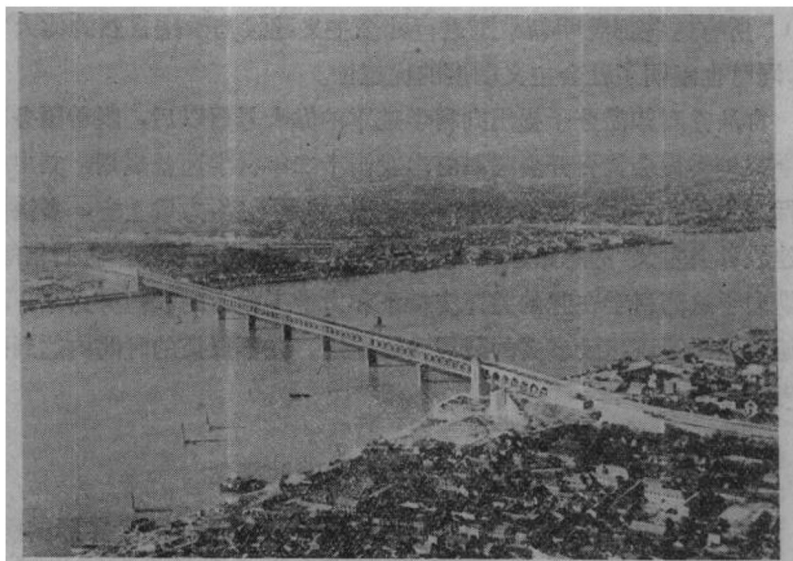


圖 3. 武汉長江大桥鳥瞰

期，提前二年完成了大桥全部工程。这是中国人民解放以来在科学知識水平和技术力量上获得显著提高的表现，也是旧中国人民难以想象所能出現的奇績。其他值得我們歌頌的偉大工程建設还是很多的，例如：已于 1958 年元旦正式全綫通車的、施工艰巨复杂、变天險为坦途的宝成铁路(全長 668 公里中計有土石方六千多万公方，隧道二百八十多座，桥梁九百多座，其中有不少是具有独特風格的連孔石拱)，正在建設的号称黄河咽喉、具有 120 公尺高、約一公里長的攔河大壩的三門峽水利樞紐工程(水庫容量达 640 亿公方，需用几万吨鋼筋，几十万吨水泥，几百万吨砂料和石料等)和正在緊張施工將成为我国第二鋼都的武鋼联合企業工程(包括采矿、选矿、燒結、煉鉄、煉鋼、煉焦、化工与耐火材料等十五个主体生产厂矿和三十多个輔助生产車間与附屬車間；將拥有世界上第一流的技术設備，生产过程將是高度机械化与自动化的；1958 年內將建成的一号高爐是我国目前規模最大、技术装备最新的高

爐，其全部安裝量有五千多噸，爐壳共有二十二圈，相當於二十層樓高)。所有這些都說明新中國進行社會主義建設與改造自然的偉大氣魄，同時也證明了社會主義制度的優越性。

自從黨對知識分子提出向科學進軍的偉大號召以後，跟着國務院科學規劃委員會就召開會議制訂出我國十二年科學遠景規劃，其中也包括力學研究在內。目前黨中央又提出“鼓足干劲，力爭上游，多快好省建設社會主義”的總路線，以迎接技術革命與文化革命。我們相信，結構力學這門科學在黨的關懷支持下和力學工作者的積極努力下，必能隨着祖國經濟建設事業的發展飛躍前進，在不很長的時間內達到國際先進水平。

§ 1-3. 結構計算簡圖的概念

作結構的內力計算時，我們常用一種簡化圖形來代替實際結構。這種簡化圖形叫做結構計算簡圖。從目前的科學水平來說，要想嚴格地按照結構（特別是較為複雜的結構）所有各部分的相互作用進行完全精確的分析，幾乎是不可能的；即使可能，其分析的艱巨程度將喪失工程上的實用價值。

因此，選定結構計算簡圖是結構分析中一個異常重要而必須首先解答的問題。應該明確的是，建立結構計算簡圖必須滿足兩個基本要求：(1) 從結構本身的工作情況來說，在忽略了一些次要因素以後，它應該尽可能正確地反映問題的本質；(2) 從計算的工作量來說，它應該尽可能簡化內力的分析過程。計算同一結構時，亦可在不同計算階段採用幾種計算簡圖；即在初步選定杆件截面時，可用一種較為簡單的計算簡圖，而在最後計算時，再用一種較為複雜的計算簡圖。

茲舉一兩個結構計算簡圖的例子。圖 1-1, *a* 示一短跨梁橋。直接作用於橋面板上的荷載將通過 *a, b, c, d* 各橫梁傳到主梁，最後再由主梁傳到橋台。實際上，由橫梁支承的橋面板是連續的，每一橫梁與橋