

高等學校教學用書

飛機結構力學

Я. Д. ЛИВШИЦ 著

許玉贊 黃玉珊 顧松年譯

高等教育出版社



航空工程

航空工程系列教材

飛機結構力學

編者：王勳、張維、張維、張維
主編：王勳、張維、張維、張維



航空工程系列教材

高等學校教學用書



飛 機 結 構 力 學

Я. Д. 利夫希茨著

許玉贊 黃玉珊 顧松年譯

高等教育出版社



本書係根據蘇聯國立國防工業出版社 (Оборонгиз) 出版的 Я. Д. 利夫希茨 (Я. Д. Лившиц) 著“飛機結構力學”(Строительная механика самолета) 1946 年版譯出。原書經蘇聯航空工業部教育司審定為航空學院結構力學教程的教學參考書。

本書共十章，前四章敘述桿系結構力學的一般基礎，第五章專論整片系統的原理，以後五章指出它們在飛機各部份的計算上的應用。

參加本書翻譯工作的有華東航空學院許玉贊、黃玉珊、顧松年等同志。

飛 機 結 構 力 學

書號24(圖22)

利 夫 希 茨 著

許 玉 贊 等 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 瑞 瑞 廠 一 七 〇 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新 華 書 店 總 經 售

京 華 印 書 局 印 刷

北 京 南 新 華 街 甲 三 七 號

開本850×1092 1/28 印張15 13/14 字數356,000

一九五四年六月北京第一版 印數1—2,000

一九五四年六月北京第一次印刷 定價¥24.000

卷頭語

在編寫本課程時曾提出一個任務：在這本緊湊的書裏要把桿系和整片系統的結構力學的一般基礎連起來說明，並且指示出它們在飛機的一些基本部分的計算上的應用。書的內容和範圍是適應於近來在大多數航空高等學校所採用的“飛機結構力學”的課程大綱的。按照這些，書中還考慮飛機各部分上的載荷，引用一些“強度規範”的基本條例和運用它們的例子。假定在着手學習“飛機結構力學”時，聽過了在航空高等學校大綱範圍內的“材料力學”，就是說：包括較大細長比的壓彎的支柱計算，非圓斷面扭轉的概念，關於轉心的基本概念等等，並且也聽過了“航空概論”，因而有關於飛機上主要機件的構造的觀念。

本課程沒有預料能完全闡明一切飛機強度的問題，因為顧計到同學在這一門學問內的更進一步地擴大和深入係次一課程——“飛機構造”及強度計算的任務之一。因此沒有涉及在機翼和機身上斷口的影響，特別型式機翼的計算等等問題。只有不用一些瑣細章節來充滿本書，纔有可能做下面這種辦法：詳細地討論到基本原則上的問題，使本書對第一次教學對象的學生來說能夠不太笨重並易於瞭解。課程的一些基本章節還用詳細的數字例題來說明。

本書中在說明所有問題時，傾向於從一般的通解出發，把它們導引到應用公式。像限制扭轉的機翼計算就是用瓦格涅（Вagner），別達也夫（Беляев），伍曼斯基（Уманский），和奧拉索夫（Власов）等人新的著作中所闡明的一般理論為基礎來說明的。同時也給出應用到機翼載荷特點上的方程式求法。在說明混合的和懸臂的起落架圖式的計算和有剛性節點的發動機架的計算時，採用密些斯（Mises）和軋爾爾諾夫（Горбунов）所研究出的動量矢陣的方法。和一些解析方法在一起混合

系統。這些系統的組成，它們構件內力的決定和它們剛度的校驗都要在現在這課程裏考慮到。

除了上列一些結構力學的任務以外，在校驗構造強度時，還發生動力學的計算的問題。對飛機構造而言，這些問題是機翼，尾面和發動機架的振動計算。例如，在飛機的某些“臨界”速度下，機翼的振動振幅劇烈地增長起來，並很快地促使它們毀壞。這些速度的決定也在振動計算問題之列。關於動力學的強度的科學上發展引向建立一些不同的課程：例如，С. 別倫希欽 (С. Бернштейн) “結構動力學概念”和格羅斯曼 (Гроссман) “飛機各部分振動”等等。在本書中不考慮動力學的計算的問題。

緒 言

在飛行，降落，以及起飛和滑走時，飛機上作用着外力——載荷。這些載荷在某一些情況下作用在降落裝置上面，而在另一些情況下則作用在機翼尾面等上面，促使飛機構造受力，在它的構件中引起內力。

結構力學的第一個任務就是決定在構造的構件中的內力。已知外載荷的大小和性質（由空氣動力的計算或者以實驗數據為基礎而得到的），並且有了構造簡圖；工程師利用結構力學的方法，可求得系統中所有構件的內力，並選擇橫向尺寸（或者校驗由構造上的考慮所決定的尺寸），以保證每一構件的強度，穩定性和最大可能的輕度。各種構件上斷面的選擇和校驗的方法在“材料力學”課程中說明。

結構力學的第二個任務就是校驗系統的剛度，即它的變形的決定。“材料力學”給出個別構件受不同載荷的變形求法，而在“結構力學”中則給出一些方法，使工程師利用這些方法，已知個別構件的變形，可以求出整個系統的變形，並把它們與容許的變形相比較。

最後，“結構力學”中還弄清楚一些普通規則，形成一個系統的一些個特的構件應該服從這些規則聯結起來，使作用在構造上的載荷分佈在構件中間，而不是由一些，比做說，軟弱的系統組合來承受的。

這樣，“結構力學”從事於：

1. 由不同的聯結構件而成的系統的組成分析和性質研究。
2. 各種系統型式構件中內力的決定。
3. 剛度的決定，就是說，各種系統的節點和構件的位移的決定。

在飛機構造中採用：a, 有鉸鏈節點的桿系，所謂桁架構造，б, 有剛性節點的桿系，所謂剛架構造，в, 整片薄壁構件的系統和 г, 本書中還提出一些圖解的方法。在說明飛機各部分的計算時，着重在每一個情

況的計算的前提，以使學生能完全了解有關的設計方式以及它與實際構造的適應性。

本課程與副教授 Д. В. 伐因貝格 (Д. В. Вайнберг) 聯合寫成，伐因貝格編寫第 II 和第 III 兩章，以及第 V 章的 § 12 和 § 13。

我將永遠地感謝古比雪夫航空學院學生 П. В. 澤特齊克 (П. В. Цидзик) 參加在修訂本書時誠懇的工作。古比雪夫航空學院學生米爾 (Миль)，賴夫曼 (Рейфман)，和托洛斯 (Троц) 等繪製附圖，以 Ф. И. 斯傑皮可夫 (Ф. И. Стебиков) 和 А. М. 索衣費爾 (А. М. Соффер) 爲代表的管理處協助本書出版，教授 А. А. 伍曼斯基和副教授 В. Т. 巴衣可夫 (В. Т. Байков) 的評閱，提出很多寶貴的教育了著者的意見，和副教授 Б. А. 馬爾恩 (Б. А. Марьин) 仔細地校閱本書；我謹此誌謝。

著者

目 錄

卷頭語

緒 言

第一章 靜定平面桿系的計算	1
§ 1. 平面桁架的組成	1
1. 桁架組成的觀念、必需的桿數、最簡單的幾何不變性系統	1
2. 複雜桁架的組成	5
3. 幾何不變性的研究	6
4. 桁架的固定、在飛機結構上所用的支點的型式	8
5. 自由系統與拘束系統、拘束系統幾何不變性的必要條件	10
6. 桁架的靜定	11
7. 零應力桿	12
8. 幾何不變性的一般準則、幾何不變性的靜力準則	14
9. 桁架反力的數解與圖解	15
10. 關於三鉸拱的概念	19
§ 2. 平面桁架構件中內力的決定	22
1. 計算的前提	22
2. 分離節點法、數解、圖解	22
3. 馬克斯威爾-克雷蒙那圖	25
4. 繪製馬克斯威爾-克雷蒙那圖的幾個特殊情況	29
5. 貫穿斷面法	30
6. 貫穿斷面法的數解、利特爾法	31
7. 貫穿斷面法的圖解、庫爾曼法	41
8. 應用庫爾曼法的馬克斯威爾-克雷蒙那圖的繪製	42
9. 桿子代替法(漢尼貝格法)	43
10. 用漢尼貝格法的幾何不變性的研究	45

11. 具有節點間載荷的桁架的計算	46
§ 3. 桁架變形的決定	47
1. 問題的提出	47
2. 可能位移的原理與它在彈性桿系上的應用	47
3. 按照莫爾法節點位移的數解	49
4. 節點位移的圖解、懸臂桁架的維烈奧圖	55
5. 在兩支點上的桁架維烈奧圖的繪製	59
6. 桁架緣桿撓曲線的繪製	62
第二章 靜不定平面桁架的計算	63
§ 4. 靜不定桁架的特性	63
1. 靜不定的分析	63
2. 靜不定桁架的型式	65
3. 靜不定桁架的特性	67
§ 5. 靜不定桁架中內力的決定	68
1. 基本系統的選擇	68
2. 力的方法的經典方程式	70
3. 例題	72
4. 裝配應力與溫度應力的決定	78
5. 靜不定桁架桿子斷面的選擇	82
§ 6. 桿系按照極限載荷的計算	82
1. 理論的基本原理	82
2. 例題	86
3. 反覆載荷的影響	90
第三章 有剛節的平面系統的計算	92
§ 7. 剛架計算	92
1. 剛架系統的特性	92
2. 飛機構造上剛架系統的應用	94
3. 靜不定的分析	94

4. 靜定剛架上內力圖的繪製	99
5. 剛架系統的彈性位移	105
6. 按照力的方法的靜不定剛架計算	117
7. 對稱剛架的情形	122
8. 卡思的義安諾定理對於剛架計算的應用	126
§ 8. 混合系統的計算	127
1. 混合系統的一般特性	127
2. 平面混合系統的計算例題	130
第四章 空間系統的計算	133
§ 9. 空間系統的組成	133
1. 飛機的空間系統的类型	133
2. 最簡單的空间系統的組成	134
3. 空間系統的固定、拘束的系統	137
4. 幾何不變性與靜定的分析	138
§ 10. 空間系統桿件內的力量的決定	143
1. 分離節點法的內力的決定	143
2. 分離節點法的數解	143
3. 分離節點法的圖解	148
4. 貫穿斷面法的內力的決定	150
5. 分成平面桁架法的內力的決定	156
6. 桿子代替法的內力的決定	158
7. 靜不定空間桁架的計算	159
§ 11. 混合空間系統的計算	161
1. 混合空間系統的类型	161
2. 空間梁上彎矩、扭矩、縱向力和剪力的決定	163
3. 關於動量的概念	167
4. 空間梁與混合系統的計算例題	169
第五章 薄片結構的計算原理	181

§ 12. 薄板的彎曲與穩定性	181
1. 作為飛機結構元件的薄板	181
2. 薄板分類與它們的受力特性	182
3. 硬板的彎曲、基本公式的推演	184
4. 邊界條件	189
5. 關於矩形薄板的計算	190
6. 圓柱式彎曲	191
7. 計算公式和圖表	192
8. 軟板	195
9. 薄板的穩定性	196
10. 薄板的加固	200
11. 關於曲板的穩定性	205
§ 13. 薄壁梁	206
1. 有抗彎骨架的薄壁梁受力特性	206
2. 喪失穩定性以後梁內的應力分佈	208
3. 計算例題	212
§ 14. 薄壁構件的彎曲	215
1. 作為飛機結構元件的薄壁構件	215
2. 正應力的決定	216
3. 剪應力的決定	219
4. 表皮不受正應力的情況	227
5. 考慮斜削的剪應力的決定	229
§ 15. 彎曲時沒有扭轉的條件、彎心	231
1. 彎曲時沒有扭轉的條件	231
2. 開口斷面彎心位置的決定	234
3. 閉合斷面彎心位置的決定	240
§ 16. 薄壁斷面的扭轉	244
1. 物理現象	244
2. 開口斷面的純扭	246
3. 開口斷面的限制扭轉	252

4. 閉合斷面的純扭	262
5. 閉合斷面的限制扭轉	268
第六章 飛機機翼計算	280
§ 17. 作用在機翼上的載荷	280
1. 飛機各部分載荷的特點	280
2. 關於實用載荷和設計載荷的概念	280
3. 在飛行中和在降落時的過載	282
4. 強度規範	284
5. 機翼的計算和試驗情況、實用過載的決定	285
6. 載荷沿翼展和沿周界的分佈	289
7. 雙翼機的翼面間空氣動力的分佈	301
§ 18. 表皮不受力懸臂機翼的計算	302
1. 設計的前提	302
2. M 和 Q 圖的繪製	303
3. 第二種型式機翼的計算	307
§ 19. 表皮受力的懸臂機翼的校驗計算	315
1. 設計的前提	315
2. 彎曲減折係數	316
3. 剪減折係數	321
4. 彎曲計算	322
5. 彎心位置的決定	326
6. 扭轉的計算	327
7. 機翼的限制扭轉	330
8. 有受表皮力的懸臂機翼的校驗計算數字例題	340
第七章 飛機尾面計算	349
§ 20. 作用於尾面上的載荷	349
1. 作用於水平尾面上的載荷	349
2. 作用於垂直尾面上的載荷	353
§ 21. 水平尾面計算	355

1. 水平安定面計算圖形	355
2. 昇降舵計算圖形	356
3. 昇降舵計算	357
§ 22. 垂直尾面計算	360
第八章 起落架計算	362
§ 23. 作用在起落架上的力量	362
1. 起落架的設計情況和載荷	362
2. 尾輪或尾橈的設計情況和載荷	364
§ 24. 在壓縮的減震器下起落架圖形的構成	365
1. 懸臂起落架	365
2. 圖 325 所示的圖形的起落架	365
3. 角錐起落架	366
§ 25. 起落架構件中應力的決定	368
1. 設計載荷的方式	368
2. 懸臂起落架的計算	369
3. 角錐起落架的計算	370
4. 剛架式起落架的計算	371
5. 尾輪和尾橈的計算	375
第九章 發動機架計算	376
§ 26. 發動機架上的載荷	376
1. 設計情況	376
2. 作用力的數值和方向	376
3. 計算載荷方式	378
§ 27. 星形發動機的發動機架計算	378
1. 計算的前提	378
2. 內力計算方式	379
3. 承受在對稱面內的力量時內力的決定	380
4. 承受垂直於對稱面的力量時內力的決定	381

5. 在力矩 M_x 作用情況中內力分佈的特徵	383
6. 內力的圖解法	383
§ 28. 直列式發動機的發動機架計算	384
1. 計算圖形	384
2. 梁桁架式發動機架的計算	385
3. 剛架式發動機架的計算	386
第十章 機身計算	387
§ 29. 機身上的載荷	387
1. 飛行和降落時作用在機身上的載荷	387
2. 機身設計情況	388
§ 30. 表皮受力的機身的計算	389
1. 計算圖形	389
2. 計算的前提	389
3. 彎曲計算	390
4. 扭轉計算	396
5. 無桁條機身的計算	399
6. 桁條計算	400
7. 隔框的計算	401
§ 31. 桁架機身的計算	404
1. 設計的前提	404
2. 彎曲計算	406
3. 扭轉計算	407
附錄	(1—12)
I. 矩形和簡單梯形機翼的翼展向載荷分佈	
II. 有矩形中翼的梯形機翼的翼展向載荷分佈 ($2l_n = 0.25l$)	
III. 有矩形中翼的梯形機翼的翼展向載荷分佈 ($2l_n = 0.50l$)	
IV. 由於機身和缺口的影響的補充載荷數值	
V. e^x 和 e^{-x} 的數值表	
參考書目	(13—17)

飛機結構力學

第一章 靜定平面桿系的計算

§ 1. 平面桁架的組成

1. 桁架組成的觀念、必需的桿數、最簡單的幾何不變性系統

支在兩個或許多支點的，或者一端固定的，承受彎曲的梁是所有結構的最通行的構件。例如，單翼機懸臂機翼的桁梁是一端固定的梁，支撐式機翼的桁梁是在兩個支點上的梁。當飛機降落時機身側面的腹板是支在起落架與尾樑上的梁。梁由兩個緣桿及腹板所組成；受拉和受壓的緣桿承受正交力，腹板聯結在緣桿之間並承受剪力。彎矩隨翼展的增加而增大，爲了減小緣桿中的應力以及梁的撓度，必須增加梁的高度。同時爲了保證穩定性必須把腹板增厚（即使腹板中的剪應力是很小的），或者用構件來增加它的剛度。在高的梁上整片的腹板是不經濟的，於是必然產生了以某種腹桿來代替它的想法。在飛機構造中，爲了減少重量，常常在整片的腹板上打孔，但在較高的梁上，就用桿子來代替整片的腹板。在桁梁的固定端往往採用有格孔的腹板，而在高度減小了的梁梢則常用整片的腹板。

腹桿與緣桿之間用兩種型式的節點來聯結起來。第一種節點不能抵抗桿子間角度的改變，亦即節點不能承受彎矩。這種節點叫做鉸節（圖 1）。第二種節點保證着桿子間角度的不變性，亦即可以抵抗彎矩。這種節點叫做剛節（圖 2）。

實際上既沒有理想的鉸節，也沒有絕對的剛節，但是爲了簡化計

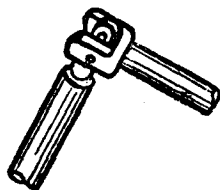


圖 1

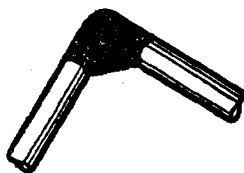


圖 2

算，仍舊把它們當做是這樣的。最近在結構力學中擬定有彈性節點的系統計算方法。

本章中我們來研究所有的桿子都分佈在一個平面裏的桿系；以後我們可以看到空間力系的計算常常簡化成一些平面力系來計算。

我們將假定外力是作用在同一個平面裏的。在一個平面裏兩根桿子有着三個相對的自由度（互相間沿兩坐標軸移動的可能與桿子間角度改變的可能）。用鉸節把這些桿子聯結起來，我們就使它們失去兩個相對的自由度。

如果格孔系統的緣桿是由分開的直桿所組成的（圖 3），各緣桿之間以及緣桿和腹桿之間都用鉸聯結，並且外力僅僅作用在節點上，那麼當整個系統承受彎曲時，系統的個別桿子保持直的，僅受拉力或壓力。由於鉸節特徵而得的這個特性是可作為類似系統的特徵的。

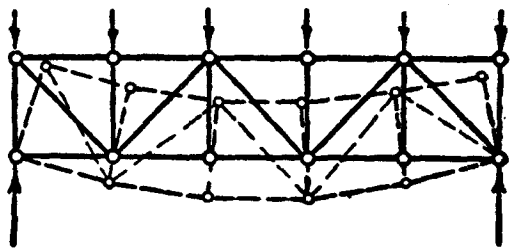


圖 3

如果外力作用在節點之間，那麼在直接承受載荷的桿上還加上彎曲（“局部”彎曲）。

所聯結的桿子的位置對結構來講是很有關係的、在圖 4 上示鉸節的方框。在作用它的節點上的力（這些力可能很小）的影響下，方框變成菱形，這時桿子的長度並不改變，亦即桿子中沒有出現內力。