



A.M. 包格登諾夫-秋林著

航空工程力学



国防工业出版社

航空工程力学

A.M.包格登諾夫-秋林 著

汪乔森 周懋运 譯
張宝琴 刘世兴



国防工业出版社

本書共分三篇，第一篇為“靜力學”，第二篇為“運動學”，第三篇為“動力學”。本書的特点是講解清楚，例題多(157個)。原書為航空工業中等技術學：教學及參考用書，但亦可作為航空工廠技術人員自修參考用書。

А. М. Богданов-Черрин
МЕХАНИКА
В АВИАЦИОННОЙ
ТЕХНИКЕ
Государственное
издательство оборонной промышленности
Москва 1952

本書系根據蘇聯國防工業出版社
一九五二年俄文版譯出

航 空 工 程 力 學

〔蘇〕包格登諾夫-秋林 著

汪喬森 周懋運 譯
張寶琴 劉世興

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
北京五三六工廠印刷 新華書店發行

*

850×1168 耗 1/32·16 1/2 印張·240,000 字

一九五八年三月第一版

一九五八年三月北京第一次印刷

印數：960 冊 定價：(10) 2.70 元

前 言

根据多年来的教学經驗，作者深深体会到：如果能按照讀者所熟悉的各种实际材料来叙述理論，那么就能够使大家更仔細地研究和更好地領会理論力学的主要法則和定律。

本書可供航空工程师、航空技术員和具有一般中学文化水平的机械員使用。所以在書中引用了許多航空工程的实例，并且是根据初等数学来叙述的。也正由于这个緣故，使本書所研究的航空实例的范围受到了一定的限制。書中許多场合，在研究飞机及航空发动机各个部分等的实际运动时，均以研究其初步近似运动（匀变速运动）来代替。可是这种限制絲毫无损于我們所得到的理論上的結論的基本意义。本書对于希望不采用复杂的数学計算即能理解或复习理論力学中一些基本和較重要法則的文化程度較高的讀者也是有所裨益的。

A.A.柯斯莫傑米揚斯基教授和Г·Н·斯維什尼科夫教授在校閱本書初稿时提出了許多宝貴的意見，作者謹向他們表示深深的謝意，并在最后整理文稿时已将这些意見考虑进去。最后作者向校訂本書的B.T.拜科夫副教授表示謝意。

作 者

緒 論

苏联航空技术的迅速发展，促使各种各样的飞机发动机器材有了根本的变化和显著的改进。为了掌握較近期的技术更为优越的現代航空技术，并且为了善于合理地运用它們，就应当将实践的經驗与理論素养結合起来。同时应当記住，要想順利地和有意識地掌握航空技术的理論基础，沒有理論力学一般定律的知識是不可能的。

理論力学是研究物質最簡單的运动——机械运动的、即空間位置随時間变化而发生的簡單变化的科学。飞机和发动机个别部分的运动，这些都是机械运动的实例。确定机械运动的一般定律是理論力学的主要任务。

应当着重指出，机械运动是物質运动的最簡單形式，但不是物質运动的唯一形式。絕不能将各种形式的物質运动归結为簡單的位移。对物質来講，运动本身包括着宇宙間所发生的一切过程和变化。空間和時間与运动着的物質是不可分割的。辯証唯物論教导我們：运动、空間和時間是物質存在的形式。研究机械运动仅是科学的第一个任务。

本書在叙述上采用了理論力学一般的划分方法，即将它分为：靜力学、运动学和动力学。

在靜力学中研究平衡的条件，在运动学中研究不涉及相互作用的物体机械运动的几何特性，最后，在动力学中确立了相互作用着的物体的机械运动的一般定律。

理論力学中的某些概念，在太古时候就已有。随着社会实际需要的增长，理論力学的内容中某些錯誤的地方得到了糾正，并在研究和总结人們生产經驗的基础上，充实了許多新的、更完善的概念和定义。

力学不是学者們閉門創造出来的，而是在實踐中、在巨大的灌溉系統的工程中、在古老城市的建筑中、在船舶的制造中、在作战拋射武器的机器等的制造中产生的。生产实践的需要引起了力学的产生和进一步的发展。力学一語起源于希腊字“Μεχανή”即机器和工具。古代希腊人用“Μεχανή”一詞，将那时的机器和工具工作同应用知識联系起来。以后从应用的力学中才开始逐漸地产生出理論的萌芽。

古代希腊的偉大学者和哲学家亚里斯多德（公元前384~322年），在他的著作“力学”中除简单地叙述了当时的各种工具和机器之外，首先发表了杠杆的定律。但是在“物理学”的著作中，他所发表的机械运动定律是不正确的。

例如，亚里斯多德錯誤地認為：在真空中落体的速度和物体的重量成比例，为了保持匀速直綫运动必須有經常作用的力等等。

偉大的希腊数学家和力学家阿基米德（公元前287~212年）解决了古代世界生产实践中所提出的許多重要問題。他发明了各种各样的机器和設備（揚水机，起重装置，作战拋射武器的机器等）。同时阿基米德認為：为了更准确而深入地解决实践問題，必須作理論上的探討。阿基米德在論述平面图形的平衡和重心的著作中，創立了杠杆的理論，并发明了重心的学說。阿基米德在他的著作“論漂浮在液体中的物体”中，发现了浸入液体中物体重量減輕的液体靜力学定律。阿基米德以本身的研究工作奠定了靜力学和液体靜力学的基础。

在将近两千年的期間內，阿基米德和亚里斯多德的学說中沒有增添过一点新的內容。这时处在生产力发展水平低微、生产力增长极其緩慢的奴隸制度和封建制度的时期。但是無論生产力发展得如何緩慢，在封建社会里資本主义的生产方法已經产生，并逐漸开始成熟，新的社会阶级——城市资产阶级的产生。

上升的资产阶级竭力使生产力发展，并关心建立科学部門，以便于解决由生产实践需要所提出的問題。提出的問題有：水力和风力在工业上的应用、創造水力和风力发动机的傳动机构、

改进钻床、车床和升降运输机构等。

偉大的意大利学者伽利略（1564~1642）的贡献，对于发展力学有着特别重要的意义。伽利略用精密实验证实的简单推论指出：在真空中落下的一切物体，所得的加速度相同，从同一高度落下时，在同一时间内，获得相同的速度，而与物体的重量无关。伽利略所制定的物体在真空中降落的定律，推翻了亚里斯多德错误的论断，即在真空中落体的速度与物体的重量成正比的说法。伽利略进而指出：物体在常力作用下，作匀变速运动，而不是像亚里斯多德所认为的作匀速运动。他作了许多关于匀变速运动性质的有力的论证。最后，伽利略指出：沿水平方向或与水平成某一角度地抛出的物体的轨迹，呈抛物线形。

伽利略在详细地研究了物体沿斜面的运动后，发现了惯性定律，确定了在水平面上运动的物体如果不受到阻碍其运动的阻力，那末它将作匀速直线运动。

伽利略是动力学这一門新科学的創始者，他的著作“关于科学的两个领域（力学和局部运动）讲话和数学证明”（1638）奠定了动力学的基础。

现代古典力学基础的最后建立工作，是由牛顿（1643~1727）完成的。牛顿在他的著作“自然哲学的数学原理”（1687）中确定了力学的主要定律，并应用这些定律来研究各种变速运动，其中包括物体在具有阻抗介质中的运动。

牛顿所发现的万有引力定律扩大了力学的应用范围，并給新科学——天体力学奠定了基础。

牛顿与拉普拉斯（1646~1716）是分析无穷小的創始人。一直到生产实践的需要超出了机械运动研究的范围以前，牛顿所发明的解决动力学问题的方法，在物理学中一直被广泛地采用着。

由于蒸汽机^①的发明，并在工业上得到了极迅速的推广，因而

① 著名的俄罗斯热力学家，伊万·伊万诺维奇·包尔朱诺夫（1728~1765），在公元1763年~1765年发明并制造了世界上第一台双气缸蒸汽动力机，而英国人瓦特在1784年才制造成蒸汽机。

必須研究运动的热力形态，以及确定运动的热力形态轉变为机械形态时数量間的相互关系。

天才的学者，俄罗斯的第一个科学院院士 M.B. 罗蒙諾索夫 (1711~1765) 发现了最偉大的自然定律——运动和物質不灭定律，現在定律恰如其份地取名为罗蒙諾索夫定律。

应当指出，直到最近还将物質不灭定律的发现，毫无根据地妄归在法国化学家巴烏阿傑 (1743~1794) 身上，这人很晚才重复了罗蒙諾索夫的實驗。能量不灭定律的发明情况也是这样，把这项发明說成是德国学者麦伊耶尔 (1814~1873) 和克里木戈利茲 (1821~1894) 的，可是他們都是在罗蒙諾索夫之后 100 年才发表了这一定律的。

罗蒙諾索夫不顧任何权威者的言論，大胆地打破了陈旧的腐朽的傳統，在科学中开拓了新的途徑。罗蒙諾索夫以他的出色的研究和卓越的发现，大大地赶过了其他同时代的西欧科学家。充滿民族自豪感和热爱祖国的罗蒙諾索夫，怀着不屈不撓的精神，同科学院中的外国强霸势力，同阻碍俄罗斯科学发展，并力图把俄国人从科学界中排挤出去的異族伪学者們进行斗争。罗蒙諾索夫坚定地相信俄罗斯人民的創造力量，并竭力地关心“使俄罗斯人学会，并使他們显示出自己的长处”。他是最古老的国立莫斯科大学的創始人，这个大学已光荣地以这位先进俄罗斯科学的天才創始人罗蒙諾索夫的名字来命名了。

里昂拉得·欧拉 (1707~1783) 与罗蒙諾索夫同时在俄罗斯科学院中工作了許多年。欧拉在他的力学著作中，极有成果地采用了解析的方法 (无穷小的解析方法)。欧拉利用这种方法，研究出剛体旋轉运动的理論。欧拉所导出的方程式成为陀螺仪的理論基础。

法兰西学者达朗柏尔 (1717~1783) 是与罗蒙諾索夫同时代的人，他提供出建立动力学方程式的特殊方法。以“达朗柏尔理論”聞名于世的这种方法，在各种結構的动力学計算中获得了广泛的应用。拉格朗日 (1736~1813) 在他著名的著作“解析力学”

(1788) 中，基本上完成了研究力学問題的解析方法。

俄罗斯学者，科学院院士М·В·奥斯特罗格拉得斯基(1801~1861)进一步充实了拉格朗日的著作。他用最一般的方式导出力学体系的运动方程式，并将此方程式应用于撞击的理論。

十九世紀末叶，在机器制造业的巨大成就和多次滑翔机飞行試驗的基础上，为飞机的制造准备了充份的前提条件。А·Ф·莫查依斯基(1825~1890)制造和設計了世界上第一架双蒸汽发动机的飞机。

在1881年，А·Ф·莫查依斯基得到了他所发明的飞机的专利特許証。1882年他制造成了飞机，不久并进行了飞机的飞行試驗。于是他就完成了世界上第一次飞机的飞行。

經過了二十年，在1903年末，萊特兄弟才駕駛汽油发动机的飞机完成了飞行。

偉大的俄罗斯学者Н·Е·儒柯夫斯基(1847~1921)的貢獻，对于航空事業的發展有着特別重要的意义。他研究并創立了力学的新領域——空气动力学。В·И·列宁恰如其份地称贊航空科学的創始者儒柯夫斯基为“俄罗斯航空之父”。儒柯夫斯基研究了力学各种領域內一系列最困難的問題。他著了“論运动的稳定性”和“航空理論基础”。他創立了机翼的升力理論，即名聞世界文獻的“儒柯夫斯基原理”；并发明了螺旋桨的渦流原理。

Н·Е·儒柯夫斯基致力于力学的几何法的研究。由于儒柯夫斯基广泛地采用了这种方法，使理論力学基本課程具有了特別的明显性。

应当指出，早在1892年，儒柯夫斯基就在理論上証明了“死筋斗”是絕對可能的。

在1913年，俄罗斯的軍事飛行員П·Н·聶斯捷洛夫完成了世界上第一个“死筋斗”。現在将高級特技动作称为“聶斯捷洛夫筋斗”。过了一个时期，法兰西飛行員別古才完成了聶斯捷洛夫筋斗的一部份。

科学院院士，社会主义劳动英雄С·А·查普雷金(1857~1942)

导出了力学系統的一般运动方程式，即著名的查普雷金方程式。查普雷金在“論燃气流”的著作中（1902），創立了空气动力学新的篇幅——气体动力学的基础。

卓越的学者和发明家 K. Э. 齐奥可夫斯基（1857~1935），斯大林同志称之为“出色的科学活动家”，他是反作用运动理論的創始人。

M. B. 麦彻尔斯基（1859~1935）教授的貢獻，对于可变質量物体的力学发展有着重要的意义。他作出了可变質量質点运动的主要方程式的結論。麦彻尔斯基創立了众所周知的理論力学教程和理論力学习題集。

沙皇政府并不支持俄罗斯科学家們的科学发现和发明，相反地对外国的一切却极尽奴顏卑膝的崇拜，而对本国的科学发明却置之不理和加以阻碍。

偉大的十月社会主义革命，解放了俄罗斯人民的創造力，并給先进的苏联科学的发展提供了无限的可能性。在苏联国家中，科学的发展是由社会主义經濟的发展所决定的。科学家的大軍、大量的科学研究机关同生产人員一起，不断地解决着共产主义建設和巩固苏联国防力量实践中所提出的各种复杂問題。在解决中心問題的过程中，各門科学，其中包括力学在內，也在逐步发展着。

在科学家和生产者的創造性的合作中，表现出科学与实践是一致的，科学家与人民是一致的。科学家們积极地参加了偉大的全民的共产主义建設，积极地参加实现改造自然的斯大林計劃，这是一个合作的光輝例子。

在苏联每年都有成千上万的科学家，工业和农业的革新者，由于他們卓越的科学成就、发明和彻底地改善了生产方法而获得了斯大林奖金。这一点証明了苏联科学有深刻的人民性。在斯大林奖金获得者的光荣名单中也有在力学的各个領域中因自己的貢獻而聞名的学者們的名字。

由列宁、斯大林党所鼓舞着的苏联科学家們正积极地参加着偉大的共产主义建設事业。

目 录

前 言	VII
緒 論	1

第一篇 靜 力 学

一般概念	1
§ 1. 力	1
§ 2. 绝对剛体	4
§ 3. 平衡	5
第 一 章 靜力学的基本定义和法則	6
§ 4. 基本定义。基本法則。力沿其作用綫的轉移	6
§ 5. 力的平行四边形和力的三角形	9
§ 6. 作用与反作用	18
§ 7. 約束与約束的反作用力	19
§ 8. 可变形物体的平衡	26
§ 9. 力分解成两个分力	27
第 二 章 共面汇交力系	34
§ 10. 力的多边形。共面匯交力系平衡的圖解条件	34
§ 11. 三力情况	38
§ 12. 力在座标軸上的投影。力在座标軸上投影的確定	43
§ 13. 共面匯交力系合力的解析求法	48
§ 14. 共面匯交力系平衡的解析条件	52
第 三 章 平行力系	58
§ 15. 两个同向平行力的合成	58
§ 16. 两个反向平行力的合成	60
§ 17. 力分解为与它平行的兩分力	65
§ 18. 力对于一点的力矩	70
§ 19. 合力的力矩定理	77
§ 20. 穩定力矩和傾复力矩的概念	85

§ 21. 共面平行力系的合成	87
§ 22. 共面平行力系的平衡条件	90
第 四 章 共面力偶的理論	94
§ 23. 力偶和力偶矩	94
§ 24. 力偶的等价定理	98
§ 25. 共面力偶的合成。力偶的平衡条件	101
第 五 章 共面任意力系	105
§ 26. 力向給定点的搬移	105
§ 27. 平面力系簡化为一个力和一个力偶	107
§ 28. 平面力系的平衡条件	115
§ 29. 平面力系平衡方程式的各种形式	128
§ 30. 桁架的概念	130
§ 31. 解析求定桁架杆件內力的截面法	133
第 六 章 摩 擦	138
§ 32. 一般概念。滑动摩擦	138
§ 33. 滚动摩擦	154
第 七 章 重 心	157
§ 34. 平行力的中心	157
§ 35. 重心	161
§ 36. 確定平面圖形重心座标的一般公式	162
§ 37. 复雜平面圖形面積重心的確定	165
§ 38. 面積的靜力矩的概念	174
§ 39. 簡單体積的重心位置	175
第 八 章 图解靜力学基础	176
§ 40. 求平面力系合力的圖解法	177
§ 41. 求平面圖形重心的圖解法	183
§ 42. 平面力系簡化为一力偶的条件	190
§ 43. 平面力系平衡的条件	191
§ 44. 確定支座反作用力的圖解法	192
§ 45. 確定桁架杆件內力的圖解法	196
第 九 章 空間汇交力系	206
§ 46. 力的平行六面体	207
§ 47. 力在空間座标軸上的投影	208
§ 48. 空間匯交力系合力的解析求法	216

§ 49. 空間匯交力系平衡的解析条件	219
第十章 力对于軸的力矩	227
§ 50. 力对于軸的力矩的求法	227
§ 51. 作用于具有固定軸的剛体上的力的平衡条件	232
§ 52. 飞机平衡的概念	235

第二篇 运动学

一般概念	238
第十一章 直綫运动	242
§ 53. 匀速直綫运动。速度。经过的路程	242
§ 54. 匀速直綫运动圖	248
§ 55. 匀速直綫运动的速度圖	253
§ 56. 匀变速直綫运动。加速度。速度	255
§ 57. 匀变速直綫运动方程式	260
§ 58. 变速直綫运动的平均速度。瞬时速度	269
§ 59. 匀变速直綫运动圖	275
§ 60. 匀变速直綫运动速度圖	280
§ 61. 变速直綫运动中加速度的概念	290
§ 62. 曲柄联杆机构的活塞运动	292
第十二章 点的圆周运动	311
§ 63. 点的等速圆周运动。点的圆周运动的向量	311
§ 64. 等速圆周运动中的加速度	314
§ 65. 匀变速圆周运动中的加速度。法向加速度。切向加速度	321
§ 66. 点在变速曲綫运动中加速度的概念。法向加速度。切向加速度	329
第十三章 剛体繞定軸的轉动	333
§ 67. 剛体繞定軸的匀速轉动。角速度	335
§ 68. 繞定軸匀速轉动的剛体上各点的速度和加速度	337
§ 69. 圆柱齿輪的簡明概念	342
§ 70. 剛体繞定軸的匀变速轉动。角加速度。角速度。轉动方程式	348
§ 71. 剛体在繞定軸变速轉动中的平均角速度。在給定瞬时的 角速度	358
§ 72. 繞定軸匀变速轉动的剛体上各点的速度和加速度	364
第十四章 复合运动	372

§ 73. 速度合成定理。速度的平行四边形。速度的三角形	372
§ 74. 相对速度的确定	384
§ 75. 加速度合成定理	390

第三篇 动力学

第十五章 动力学的基本定义和定律

§ 76. 牛顿定律。质量	400
§ 77. 基本单位的绝对单位制与工程单位制	404

第十六章 应用动力学基本方程式解决某些最简单的

問題	408
----------	-----

§ 78. 在真空内没有初速度的情况下, 航空炸弹的降落	409
§ 79. 不具初速度的航空炸弹在空气中的降落	410
§ 80. 跳伞	413
§ 81. 航空炸弹在真空内有水平初速度的降落	414
§ 82. 炮弹在真空中的运动	418

第十七章 动力学的一般定理

§ 83. 内力和外力	429
§ 84. 重心运动的定理	430
§ 85. 关于反作用运动的概念	441
§ 86. 功的概念, 在作直线运动时不变力的功	449
§ 87. 功的基本定理	454
§ 88. 在曲线运动时重力的功	456
§ 89. 直线运动时变力所作的功	458
§ 90. 求变力作功的图解法	459
§ 91. 示功图	461
§ 92. 功率。效率	462
§ 93. 物体在平行移动时的动能	463
§ 94. 平行移动时物体动能变化定理	465
§ 95. 机械能守恒定律	470

第十八章 达朗贝尔原理

§ 96. 惯性力	471
§ 97. 达朗贝尔原理	475
§ 98. 静平衡和动平衡的概念	479

第十九章 物体繞定軸的轉动	48
§ 99. 物体繞定軸轉动时的动力学方程式。慣性矩	483
§ 100. 慣性矩的度量單位。慣性半徑。簡單几何形狀的物体的 慣性矩	487
§ 101. 繞定軸轉动的物体的动能	490
§ 102. 轉矩的功	492
§ 103. 轉矩，馬力与每分鐘轉速之間的关系	493
§ 104. 物体在繞定軸轉动时的动能变化定理	495

第一篇 靜 力 學

一 般 概 念

§ 1. 力

力的概念是力学中基本概念之一。由实例我們可以了解到，这个概念是与运动从一个物体傳遞或轉移到另一个物体的概念密切地連系着的。如在飞机发动机的工作过程中，当燃料的混合气在气缸中燃燒后，气体分子的运动轉移給活塞，活塞的运动傳遞給联杆，联杆的运动又傳遞給装着螺旋桨的曲軸，然后傳遞給整个飞机。

钻床工作的过程也是这样的。軸的运动通过許多中間构件傳遞給主軸，主軸与钻头一起钻入工件中。

当錘击鍛件时，錘子的运动轉移到鍛件上。这时被傳遞的运动不仅表現在鍛件随同铁錘的振动上，而且也表現在产生变形，鍛件質点的分子运动，鍛件的发热等上面。

研究了任一机器、任一組合件的工作过程之后，我們就可确信：一个物体的运动經常以最簡單的机械位移的形式轉移或傳遞給另一个物体，但有时也以較复杂的运动形式轉移或傳遞給另一个物体。

这个断語是直接由一般的运动不灭定律而得到的，根据运动不灭定律，运动是不能創造的，而仅能傳遞的。

恩格斯說：“如果任何一种运动从一个物体轉移到另一个物体，那末只要这一运动是自己轉移的，只要它是主动的，人們就可以把它看作运动的原因，只要这一运动是被轉移的，人們就可以把它看作被动的；由于这个原因，这主动的运动，就显现为力，而这被动的运动就显现为力的表現。根据运动不灭定律，从这里

自然而然地得出結論說：力和它的表現是恰恰同样大小的，因为在这两种场合下都是同一个运动”^①。

从这个观点看来，轉移到活塞上的燃料混合气質点的运动，称为作用在活塞上的力；傳遞給連杆的活塞运动，称为作用在連杆上的力等等。运动从一个物体轉移到另一物体，只有在具备一切必需条件时才能够实现。必备条件即使缺少一个的话，那么在这缺少的条件具备以前，运动是轉移不了的。現代航空发动机运动轉移的条件是复杂而且多样的。当缺少必备条件之一的时候，发动机就会“起动不起来”。根据这一点，常常有人会作出如下不正确的結論：只要具备了所缺少的条件就能够激起力，力是以隱蔽的形式存在于物体的内部的。人类在对其周圍事物的活动中产生了力的概念，人类的身体具有使运动轉移的手段。例如，借助手上的筋肉，人可使其他物体产生位移。虽然早已証明，肌肉力只是运动的轉移，但是，人們还是常常这样說：肌肉力产生运动。

以后我們便将这种由一个物体轉移到另一个物体的主动运动称为力。

現在再一次着重指出，应用力的概念时，决不能把这个概念加上那种根本不正确的意思，即認為力是运动的原因，它能够产生或消灭运动。运动对物質來說并不是附加于其上的，而是物質存在的形式。运动是运动本身的原因，运动的“产生”，并不需要任何外来不相干的“力”。

各种不同性質运动的量，不論是自己轉移的或者是被轉移的，都可以測量出来，这正如运动的方向能确定出来一样。由此可得出这样的結論，一切的力都有着一定的大小和一定的方向。

在力学中，这种量称为有向量或簡称向量。这就是說力是一种向量。

除了向量以外，在力学中还有这样的一种量，只要知道它的

① 恩格斯，自然辯証法，第237頁。人民出版社1955年中譯本。