

大气飞行动力学

B. 埃特肯 著

何植岱 许佩扬 周士林 译
范立钦 徐瑞娟 王建培
何植岱 校



科学出版社

1979

内 容 简 介

本书主要介绍飞机的稳定性和操纵性,围绕着这一中心,同时还介绍了所需的数学及系统理论的基础知识,以及进行分析所用的坐标轴系和运动方程。

本书内容较新、体系完整,材料极为丰富,既考虑到近年来飞行器类型的增加和飞行范围的扩大,也考虑到计算机的应用。

B. Etkin

DYNAMICS OF ATMOSPHERIC FLIGHT

John Wiley & Sons, Inc. 1972

大 气 飞 行 动 力 学

B. 埃特肯 著

何植岱 许佩扬 周士林 译

范立钦 徐瑞娟 王建培

何植岱 校

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年9月第一版 开本: 850×1168 1/32

1979年9月第一次印刷 印张: 18 1/4

印数: 0001—6,500 字数: 480,000

统一书号: 13031·414

本社书号: 627·13-2

定 价: 3.30 元

译者的话

本书内容较新。考虑到近期内飞行器类型的变化和飞行范围的扩大，也介绍了有关飞行力学所特殊需要的基础知识。因此在北美和西欧的一些国家都曾采用它作为飞行力学学科的教科书。

本书主要介绍飞机的稳定性和操纵性(第六至十二章)。但其基础部分(第二、三章)以及坐标轴系和运动方程(第四、五章)的内容，也适用于其它类型的飞行器。就飞机飞行力学中的稳定性和操纵性部分来说，本书体系比较完整，内容比较丰富，且利用计算机做了不少算例以和理论相验证。本书对航空院校的教员、学生以及从事飞机设计和气动计算工作的人员都有一定参考价值。

本书的不足之处是较少将所述理论与实际飞机的飞行结果进行必要的分析和比较。在公式推导、分析说明、图表、印刷排版方面也有一些错误。在译校过程中，已尽可能更正或注出。

对于无需了解在大气紊流中飞行(第十三章)内容的人员，可以不必阅读第二、三章中介绍的随机过程理论和随机输入反应等问题，这样可以节省时间和精力。

本书在译校工作中必定存在缺点和错误，希读者予以指正。

译者

前 言

本书原打算作为我在 1959 年出版的著作《飞行动力学——稳定性和操纵性》一书的一般的修订本。然而在写作过程中发现,由于近十年来的发展和我自己对课题认识的变化,仅作“一般修订”是不可能的。因此本书实际上是一本全新的书,体制和内容都和它的前身很不相同。造成这种变化的两个主要因素是:(1)飞行器类型的大量增加和飞行领域的大为扩大、特别是在高超音速和宇宙飞行方面,(2)计算机突飞猛进的发展。

第一个因素使我不得不放弃长期来采用的简化假定,即地球表面可用惯性空间的固定平面来代表,并不得不在数学模型中考虑到由于地球曲率和旋转所引起的全部复杂问题。

第二个因素具有两方面的深远影响。其一是人们不再受限于初级的计算方法,在工业上为了研究和设计而建立关于系统的高度复杂的数学“模拟”,现在已经很普遍了。因此不太强调简化近似,而愈来愈需要建立精确的(虽然是复杂的)数学模型。计算技术革新的另一个影响(至少在我看来)是将现代代数(矢量-矩阵分析)作为基本解析工具,这是数值计算的理想工具。第三位的影响是由于能够利用先进的计算机,我已用来计算许多数字实例,以说明典型的结论和如何应用理论。

和前一本书一样,我继续强调了基础知识的重要性。正如我在《飞行动力学——稳定性和操纵性》一书的前言中所说过的那样:“飞机和火箭的设计技巧是发展得如此之快,而所涉及的各种外形和飞行领域变化是如此之大,以致人们几乎不能说什么典型的外形和典型的结论。每一个新的改变本身都带有它自己的独特问题。在这些领域中的工程技术人员必须善于迅速发现这些问题,并作好充分准备去解决它们。他们必须准备放弃长期以来所

沿用的方法和假定，并满怀信心地沿着新的方向进行探索。这种探索（以及这种信心）的正确依据在于对基本原理和技巧的透彻了解。”对此，T. 赫克(Hacker, 见文献 1.11)作了恰当的补充：对基本原理和技术理解中的任何疑点将会动摇我们的信心，而“为彻底了解基本原理和技术所作的努力，应出自发展基本原理和改进基本技术的渴望。”

第二和第三章，为后面的内容提供了数学和系统理论方面的基础。熟悉这些知识的读者会发现它有助于复习和参考。而对于不具有这些知识的读者，学习它们对于了解本书其它部分是很重要的。第四和第五章建立飞行器的普遍数学模型，并包括这些模型的若干明显的变型。空气动力学部分在第六至八章中探讨，而一些特殊方面的应用，以及许多已算好的实例，在第九至十三章中介绍。例中列举的飞行器从短距起落直到高超音速。仅仅出于篇幅上的考虑，我才删去了在前一本书中搜集的颇为丰富的附录材料。这些材料现在可由美国空军的《稳定和操纵方法手册》(Handbook of Stability and Control Methods)以及英国皇家航空学会所编《图表数据集》(Data Sheets)中得到。基于时间和篇幅上的考虑，还略去了计划中的有关宇宙飞行器进入大气层的动力学的章节，但第五章的普遍方程中已包含了这一情况。

本书是为学生和工程技术人员而写的。第二至五章作为入门的课程并不是很适当的，但对严格要求自己使得在这一领域内能够从事工作的学生来说则是合适的。其余各章，为入门课程提供了广博而有用的知识，此时，用的是将地面视作平面情况下的不太严格的小扰动方程的形式。

B. 埃特肯

1971 年于多伦多

目 录

译者的话

前言

| | | |
|-----|-------------------------|-----|
| 第一章 | 绪论 | 1 |
| 第二章 | 解析工具 | 8 |
| 2.1 | 引论 | 8 |
| 2.2 | 矢量-矩阵代数 | 8 |
| 2.3 | 拉普拉斯变换和傅里叶变换 | 9 |
| 2.4 | 在微分方程上的应用 | 16 |
| 2.5 | 反变换法 | 17 |
| 2.6 | 随机过程理论 | 20 |
| 2.7 | 计算机计算 | 40 |
| 第三章 | 系统理论 | 42 |
| 3.1 | 概念和术语 | 42 |
| 3.2 | 传递函数 | 50 |
| 3.3 | 自治线性不变系统 | 55 |
| 3.4 | 线性不变系统的反应 | 70 |
| 3.5 | 时变和非线性系统 | 94 |
| 第四章 | 参考系及其转换 | 102 |
| 4.1 | 符号 | 102 |
| 4.2 | 在飞行器动力学中使用的参考系的定义 | 104 |
| 4.3 | 角度的定义 | 109 |
| 4.4 | 矢量的转换 | 112 |
| 4.5 | 以转动角表示的 \mathbf{L} 矩阵 | 114 |
| 4.6 | 矢量导数的转换 | 115 |
| 4.7 | 矩阵的转换 | 117 |
| 第五章 | 非定常运动的一般方程 | 118 |

| | | |
|---------------------------|----------------------------|------------|
| 5.1 | 在任意运动参考系中的速度和加速度 | 118 |
| 5.2 | 几种参考系的角速度 | 121 |
| 5.3 | 飞行器质心的位置、速度和加速度 | 126 |
| 5.4 | 任意系统的运动方程 | 131 |
| 5.5 | 风轴系中的力方程 | 138 |
| 5.6 | 体轴系中的力和力矩方程(欧拉方程) | 140 |
| 5.7 | 方程组的讨论 | 142 |
| 5.8 | 平面地球的近似 | 147 |
| 5.9 | 定常状态 | 149 |
| 5.10 | 小扰动理论 | 152 |
| 5.11 | 精确的线化气动力和拉普拉斯变换方程 | 165 |
| 5.12 | 弹性自由度 | 168 |
| 5.13 | 无因次方程 | 175 |
| 5.14 | 无因次方程组的拉普拉斯变换式 | 191 |
| 5.15 | 从一体轴系到另一体轴系的气动导数的变换 | 193 |
| 第六章 纵向空气动力特性(第一部分) | | 199 |
| 6.1 | 基本的纵向力 | 199 |
| 6.2 | 俯仰刚度和可能的飞行外形 | 201 |
| 6.3 | 一般外形的俯仰刚度 | 204 |
| 6.4 | 纵向操纵 | 215 |
| 6.5 | 操纵面的铰链力矩 | 225 |
| 6.6 | 升降舵松浮对升力和力矩的影响 | 228 |
| 6.7 | 调整片的应用 | 231 |
| 6.8 | 平衡操纵力 | 235 |
| 6.9 | 操纵力梯度 | 239 |
| 6.10 | 机动性——每 g 升降舵偏角和每 g 操纵力 | 240 |
| 第七章 纵向空气动力特性(第二部分) | | 246 |
| 7.1 | 配重和弹簧 | 246 |
| 7.2 | 增升装置对平衡和俯仰刚度的影响 | 248 |
| 7.3 | 动力装置对平衡和俯仰刚度的影响 | 251 |
| 7.4 | 结构柔性的影响 | 259 |
| 7.5 | 地面效应 | 261 |

| | | |
|-------------------------------|-------------------------------|------------|
| 7.6 | 重心范围 | 262 |
| 7.7 | 纵向空气动力导数 | 264 |
| 7.8 | V 导数 | 265 |
| 7.9 | q 导数 | 269 |
| 7.10 | $\dot{\alpha}$ 导数 | 278 |
| 7.11 | 空气动力传递函数 | 287 |
| 7.12 | z 导数 | 287 |
| 7.13 | 气动弹性导数 | 289 |
| 7.14 | 公式综述 | 292 |
| 第八章 横侧空气动力特性 | | 294 |
| 8.1 | 偏航刚度(风标稳定性) | 294 |
| 8.2 | 航向操纵 | 298 |
| 8.3 | 滚转刚度 | 299 |
| 8.4 | 滚转操纵 | 301 |
| 8.5 | β 导数 | 304 |
| 8.6 | p 导数 | 309 |
| 8.7 | r 导数 | 314 |
| 8.8 | 公式综述 | 318 |
| 第九章 定常飞行的稳定性 | | 319 |
| 9.1 | 纵向模态;平面地球近似 | 319 |
| 9.2 | 纵向模态的近似方程 | 327 |
| 9.3 | 纵向静稳定性的一般理论 | 333 |
| 9.4 | 飞行状态对一架亚音速喷气式运输机纵向模态的影响 | 336 |
| 9.5 | 一架短距起落飞机的纵向特性 | 354 |
| 9.6 | 一架亚音速喷气式运输机的横侧特性 | 359 |
| 9.7 | 横侧模态的近似方程 | 367 |
| 9.8 | 一架短距起落飞机的横侧特性 | 372 |
| 9.9 | 风的垂直梯度的影响 | 375 |
| 9.10 | 高超音速飞行时的稳定性特征 | 381 |
| 第十章 对操纵动作的反应(开环) | | 396 |
| 10.1 | 前言 | 396 |
| 10.2 | 对升降舵输入的反应 | 398 |

| | | |
|-----------------------------------|---------------|------------|
| 10.3 | 对油门的反应 | 414 |
| 10.4 | 横侧定常状态 | 417 |
| 10.5 | 横侧频率反应 | 424 |
| 10.6 | 对副翼和方向舵的瞬态反应 | 434 |
| 10.7 | 急剧机动时的惯性交感 | 438 |
| 第十一章 闭环操纵 | | 448 |
| 11.1 | 一般原理 | 448 |
| 11.2 | 沉浮抑制举例 | 452 |
| 11.3 | 操纵系统运动方程 | 458 |
| 11.4 | 短距起落飞机增稳系统举例 | 467 |
| 11.5 | 高度和下滑轨迹控制举例 | 474 |
| 11.6 | 闭环系统的稳定性 | 482 |
| 第十二章 驾驶员和操纵品质(本章作者:里德和埃特肯) | | 487 |
| 12.1 | 驾驶员 | 487 |
| 12.2 | 补偿显示时驾驶员的数学模型 | 489 |
| 12.3 | 追踪显示时驾驶员的数学模型 | 496 |
| 12.4 | 驾驶员未来的作用 | 499 |
| 12.5 | 飞机的操纵品质 | 502 |
| 12.6 | 飞行模拟器 | 505 |
| 12.7 | 操纵品质研究的结果 | 506 |
| 12.8 | 纵向操纵品质 | 507 |
| 12.9 | 横侧操纵品质 | 514 |
| 12.10 | 操纵品质要求 | 521 |
| 第十三章 大气紊流中的飞行 | | 524 |
| 13.1 | 引论 | 524 |
| 13.2 | 大气紊流的描述 | 525 |
| 13.3 | 对飞机的输入 | 538 |
| 13.4 | 算例 | 551 |
| 13.5 | 突风减轻 | 558 |
| 参考文献 | | 560 |

第一章 绪 论

本书研究在大气中飞行的飞行器的运动。因此它属于工程科学的一个分支，称之为应用力学。上面三个加重点号的词值得进一步讨论。首先考虑飞行一词，这个词在字典上的定义含义颇广，它指的是在空气中的运动。最早当然是应用于鸟类飞行，然而我们也说“飞石”或“火箭”，所以“飞行”不一定要包含升力的概念。在“神仙们的飞行”中，甚至抽去了大气介质的概念。作为一个合乎逻辑的科学定义，我们建议将飞行定义为穿过流体介质或真空的运动，例如人造卫星“飞”过太空以及潜艇“飞”过水域。应该注意的是，在空气中的一艘飞船和在水中的一艘潜艇从力学观点来看是相同的——在这两种情况下，重力均被浮力所平衡。介质的密度可以分为三个量级¹⁾。飞行器一词意指由某种方式联结在一起的变形体的任意组合所构成的任一个飞行的物体。现举例说明之：(1) 步枪弹丸是最简单的一种飞行器，可视为一个单一的理想刚体。(2) 一架喷气运输机是较为复杂的飞行器，它包括一个弹性主体(机体和附联于其上的其它部分)，旋转部分(喷气发动机)，枢接部分(气动操纵面)和液体部分(油箱中的燃油)。(3) 用一条长的柔索和轨道飞行器相连的宇宙航行者是所讨论到的一般类型的飞行器中更为复杂的一例。应注意到，按照上面的定义，飞行器并不一定携带货物或乘员，虽然在一般情况下是带有的。上两个定义的理由仅在于对所有这些例子所用到的工程科学是共同的，而且有关运动问题建立方程和求解的方法大体上也是一致的。

象下定义时常见的情况那样，我们总能找到一些不太符合定义的例子。有一些在交界面上运动的特殊情况，它们可以包括或不包括在飞行之内——例如水面船、水翼船和气垫船等。这方面

1) 指前面提到的真空、大气和水的密度。——译者

值得注意的是水翼船和气垫船的发展经常是与宇宙空间工业的发展相关联的。上述这些情况和“真实”飞行的主要区别在于后者实质上是作三维运动,而在交界面上的飞行器(以及汽车、火车等)是近似在二维范围内运动。然而两者的基本原理和方法仍是一样的,研究这些“表面”飞行器时只需在细节上作某些修改。

在定义了飞行器和飞行之后,我们较为仔细地继续考察运动一词意味着什么。通常将运动再细分为几类:

整体运动:

- (i) 飞行器质心的轨迹。
- (ii) “姿态”运动,即飞行器整体的旋转运动。

精细运动:

- (i) 旋转部分和枢接部分,如发动机、陀螺及气动操纵面的相对运动。
- (ii) 弹性结构的变形运动,如机翼的弯曲和扭转。
- (iii) 液体的晃动。

这种区分,从与不同的运动有关的技术问题以及从这些问题分析的陈述的观点来看,都是有益的。不言而喻,对于飞机、空间飞行器、导弹、火箭等的设计和运转问题来说,研究这些运动必定是重要的。为了能列出公式并求解有关问题,必须依靠工程科学中的好几门基础学科。其相互关系在图 1.1 中表示。由图可以十分清晰地看出,从事飞行动力学工作的人员需要对工程科学的好几个分支作深入的学习,且在其业务的运用方面,也涉及广泛的知识面。

在各类飞行器、各类运动以及各种飞行介质中,本书仅对所有各种可能情况作有限的探讨,重点是大气中的飞机的飞行。然而所推导的普遍方程和给出的求解方法略加修改,即可推广到一般问题所包括的其它情况。

早在莱特兄弟飞行的年代里,发展这一学科所需要的全部基础科学和数学就已见诸文献。牛顿和十八、十九世纪的其他学者,如伯努利、欧拉、拉格朗日和拉普拉斯等人,奠定了固体力学、流体

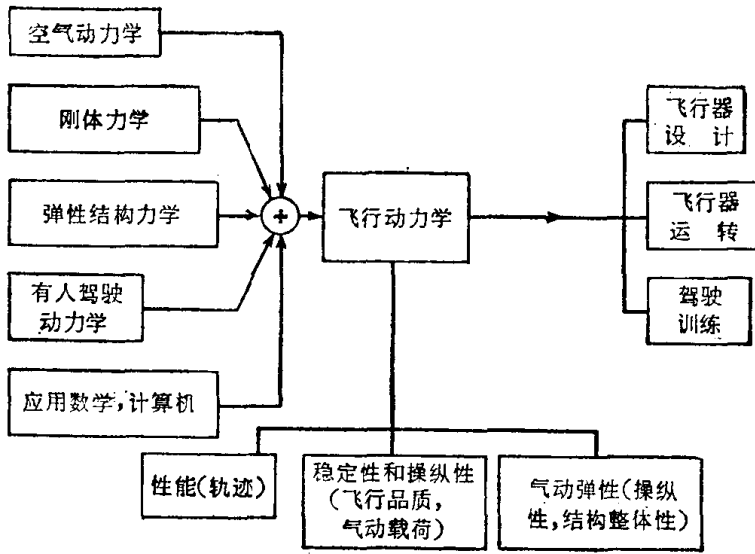


图 1.1 学科关系的方块图

力学和数学的基础。其在航空方面所需要的应用，大多在 1900 年后由许多国家的学者所完成，其中特别要提出的是莱特兄弟、布赖恩 (G. H. Bryan)、兰契斯特 (F. W. Lanchester)、亨萨克 (J. C. Hunsaker)、葛劳渥 (H. B. Glauert)、琼斯 (B. M. Jones) 和盖茨 (S. B. Gates)。这些先驱者在解析和实验方面引进了并扩展了基础知识，而这些知识奠定了全部现代运用的基础¹⁾。知识的主要部分在当时被一些教科书很好地引用，如见文献 1.4。同时，主要在美国和英国，作为实际设计的基础，也积累了大量气动数据。

牛顿运动定律建立了诸外力和合成运动之间的关系。这些定律，除相对论和量子动力学范畴外，对所有的“常规”力学，以及大部分天体力学都是适用的。那么，飞行动力学和应用力学的其它分支的区别何在呢？主要在于飞行动力学所需考虑的外力场的特殊性质，以及它没有对于一般机器和机构十分重要的运动约束，还在于飞行中所采用的操纵系统的特殊性质。外力场可分为：

“强”场：

1) 在 1970 年纪念冯·卡门 (von Kármán) 的报告会上，珀金斯 (C. D. Perkins) 对早期的发展史作了极好的说明。

- (i) 重力场
- (ii) 空气动力场
- (iii) 浮力场
- “弱”场:
- (iv) 磁场
- (v) 太阳辐射场

应该注意到, 这些场中的两个场, 即空气动力场和太阳辐射场, 对于飞行器除产生动量交换(力)外, 还产生重要的热交换. 有时热问题和力学问题是不可分的(参见文献 1.5). 对于大气飞行和海洋航行或潜行来说, 在这些场中只有强场是重要的, 只有在宇宙飞行中弱场才是重要的. 还应注意到, 即使在大气飞行中, 重力也不总能近似看成是惯性坐标中的一个不变的矢量. 地球的旋转和曲率, 以及重力平方反比律, 在某些高速和高空飞行的情况下, 变得重要起来(见第五及第九章).

对空气动力的估算和测量是飞行动力学主要的和显著的特点. 这项工作的范围在图 1.2 中表示. 由图可以看出, 即使对于

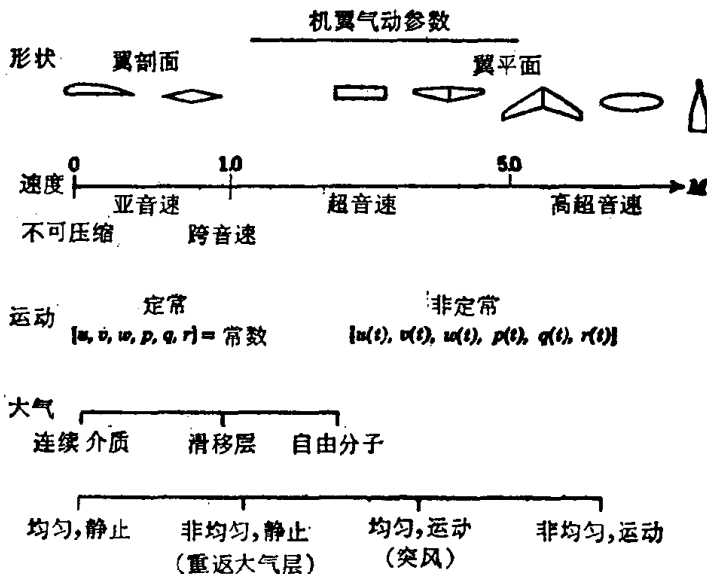


图 1.2 机翼气动力问题概貌

单独机翼，所须考虑的变数范围已经非常之大，更不用说加上推进系统(螺旋桨、喷气发动机、火箭)以及复合外形(机翼+机身+尾翼)的复杂情况了。

如上所述，牛顿定律指明了运动和外力之间的关系，最常见的问题是给定力的规律来求运动，但我们也必须知道一些重要的变型问题：

1. 第一类逆问题——已知受力系统及其运动而求力。
2. 第二类逆问题——已知力和运动而求受力系统的一些常数。
3. 混合问题——未知数是力、系统和运动参数的组合。

当我们试图从观察飞行中的飞行器的运动，或风洞中模型的运动而求空气动力时，上述逆问题或混合问题的例子常常出现。另一实例是通过观察人造卫星轨道的摄动来推算地球重力场的变化。这些问题与“对象识别”或“参数识别”问题密切相关，而在系统理论中这一问题是当前最感兴趣的问题。(逆问题曾在《飞行动力学——稳定性和操纵性》一书第十一章中介绍，本书予以省略。)

问题的类型

工程实践中出现的飞行动力学问题有以下主要类型：

1. “性能”计算，如速度、高度、航程和燃油消耗量的定量计算。
2. 轨迹计算，如发射，重返大气层，正常轨道及着陆等的轨迹计算。
3. 运动稳定性。
4. 飞行器对操纵动作及推力变化的反应。
5. 飞行器对大气紊流的反应及如何控制问题。
6. 气动弹性振动(颤振)。
7. 驾驶员-飞行器组合体的评价(操纵品质)。

不难理解，因所须探讨的飞行器种类很多，在飞行动力学者的

行列中还分有许多与上述问题类型有某种关系的专门化。在现代空间工业范畴内, 这些问题很少是简单的或常规的问题。相反地, 它们总是在分析、计算和实验上提出一些重大的新的要求。

飞行动力学者的工具

飞行动力学者用以解决飞行器设计和运转问题的工具可以归纳为三个方面, 即

解析工具

计算工具

实验工具

飞行动力学所用解析工具和力学的其它分支所用的基本相同。应用数学是分析者的得力工具(它有时是如此有吸引力, 以至竟引得分析者脱离了飞行动力学的范畴)。应用数学的重要分支之一就是现在所谓的系统理论, 它包括随机过程和最佳理论。这一理论已成为分析的核心工具。近年来引起广泛注意的另一分析工具是稳定性理论, 它是李雅普诺夫在十九世纪提出的, 并在使用英语的各国中得到发扬而放射光彩。至少在有人驾驶的飞行器范围内, 飞行器的稳定性本身并不象人们所设想的那样重要。它对于成功的操纵飞行既不是必要的, 也不是充分的条件。良好的飞机在其飞行范围的某一部分内, 有着轻微的不稳定模态, 相反地, 一个完全稳定的飞行器倒可能具有完全不能允许的操纵品质。真正重要的是性能判据, 故从分析和计算方面, 耗费大量精力去寻求非线性及时变系统的稳定边界可能并没有什么实用价值。另一方面, 计算定常状态的小扰动稳定性, 亦即作为系统研究的常规部分的线性本征值问题, 倒是确实很有用的, 从实用角度来看, 它能提供足够的稳定性知识。

在计算方面最重要的事实是, 在过去十年间, 计算机的利用根本改变了本学科原用的计算方法。十多年前所无法解决的系统性能, 系统设计及最佳化等问题, 现在几乎已成为例行之事了。

飞行动力学者的实验工具一般是专用的。首要的是用以寻求

空气动力输入量的实验工具，适应于大气飞行中大多数情况的风洞和激波管，目前已被世界各主要空气动力实验室采用。除固定实验设备外，还有作动力学研究用的空气弹道靶场，以及火箭推进和火炮发射的自由飞模型设备。与这些通用设备发展的同时，发展了无数的探测设备和仪表，其中主要是为测力及压强、温度、加速度、角速度等用的电子设备和电子仪表。

其次，还必须提一提直接为飞行动力学者服务的实验工具——飞行模拟器。飞行模拟器主要研究驾驶员和飞行器的配合问题。它对研究各种全新的飞行情况，如太空舱重返大气层，或垂直起落的转翼机从悬停到前飞的过渡阶段，是一种重要的手段。早在原型阶段之前，就必须确保驾驶员操纵飞行器的能力。这一点不通过实验是无法办到的，尽管对人力驾驶数学模型的研究在这方面取得了某些有限的进展。大战前的一种初级设备——林克(Link)训练器，发展到今天已成为一种高度复杂和先进的装置。为最新的主要机型而建造的专用模拟器，既是驾驶员训练的有效手段，又为研究飞行器飞行品质和人力驾驶动力学问题提供了一项研究工具。