

性能基础

1.1 性能概述

1.1.1 性能的定义

飞机性能(aircraft performance)是飞机在质量力、空气动力和发动机推力等外力作用下表现出来的运动能力,是飞机在特定条件下的飞行表现。飞机性能侧重于评价飞机按预期方式或途径的运动效果,以安全性和经济性为主,如图 1.1.1 所示。

飞机飞行表现的好坏受到多种因素影响,这些因素被称为飞行条件,主要包括气动特性、动力特性、大气环境、机场环境、规章要求等。飞机性能分析工作是在飞行活动开展前,在既定飞行条件下,评估飞机从 A 点飞至 B 点的表现是否能够达到安全预期和经济预期。

从保守的角度研究飞机的运动表现是飞机性能的研究特点,特别是在安全相关研究中,所考虑的飞行条件既不是最好条件也不是平均条件,而是最不利条件。因此,开展飞机性能分析可以提高飞机在实际运行中的可靠性。

在飞机性能研究过程中会涉及大量参数指标。这些参数指标,特别是与安全相关的参数指标,多源于航空规章要求或飞机手册要求。它们专注于评估飞机安全飞行的能力,具有科学性、合理性、严肃性和指导性。人们基于过往航空活动的经验和教训,从概率学和统计学的角度开展论证并经局方或制造商慎重评估后定立了这些参数指标。尽管部分参数指标定立的背景和过程早已湮没在航空活动的历史长河中,但并不影响它们对当前航空活动的指导意义。

值得注意的是,这些参数指标不一定是单次飞行活动中引导飞行员的操作目标,而是对最不利条件下开展若干次飞行活动所设定的底线。它们是人们为了研究飞机运动特性而设立的约束条件或边界条件。飞行员只有熟悉并掌握这些参数指标,才能够在复杂、多变的实际运行条件下对自己所驾驶飞机的安全性了然于胸。



图 1.1.1 飞机性能的关注点



1.1.2 性能研究的内容

飞机性能研究起源于飞行力学,是在飞行器设计和应用领域,以空气动力学、航空推进理论为基础对飞行器的运动规律和特性开展综合研究,并逐步形成的系统化内容,如图 1.1.2 所示。受编写目的所限,本书主要围绕飞行员应了解和掌握的民用运输飞机性能知识展开。

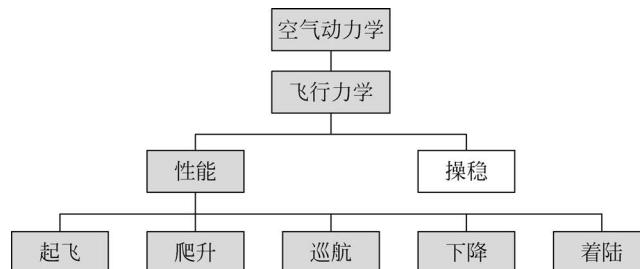


图 1.1.2 飞机性能的学科渊源

学习飞机性能需要读者具有一定的航空理论基础,并能够实际运用,具体如下:

- (1) 空气动力学、飞行力学、航空动力装置、大气物理、航空仪表等;
- (2) 质点的加减速运动、圆周运动等基本牛顿运动和受力分析方法;
- (3) 航空相关的物理量和指标参数,如升力、阻力、重力、推力、升力系数、阻力系数、地面摩擦系数、高度、温度、密度、速度、时间、距离、油耗等;
- (4) 基本工程分析思想,如分步积分求解、迭代循环求解等;
- (5) 工程数据表达方法,如图形法、表格法、曲线法等;
- (6) 飞行能力描述方法,如最小速度、最大速度、最小爬升梯度、最大距离、最大重量、最小高度、最大高度等。

民用运输飞机在执行飞行任务时会经历起飞、离场、爬升、巡航、下降、进近、着陆等阶段,特殊情况下还可能经历中止起飞、中止着陆、应急下降、单发下降、单发巡航等阶段。上述部分或全部阶段的航迹组合被称为飞行剖面,并可进一步分为垂直剖面和水平剖面。飞机性能多关注垂直剖面内的运动问题,如图 1.1.3 所示。

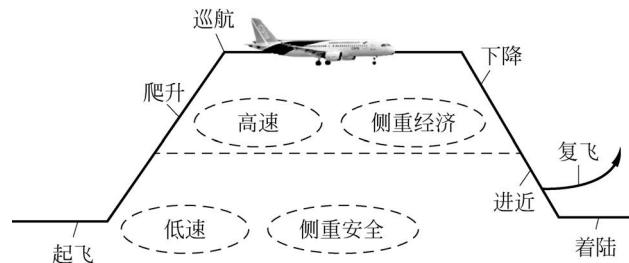


图 1.1.3 运输飞机典型的飞行阶段

飞机性能研究的侧重点也因飞行阶段而异。在起飞、离场、进近、着陆等低空低速飞行阶段,飞机的稳定性和操纵性较差且易面临复杂的气象和地形条件,此时确保飞行安全是第



一要务,研究内容多为速度是否合理、距离是否超限、梯度是否达标、航迹能否越障、重量是否超限等与安全相关的内容。

而在爬升、巡航、下降等高空高速飞行阶段,飞机的稳定性和操纵性较好且气象和地形条件干扰减少,研究内容多为飞行时间是否短、飞行距离是否长、飞行油耗是否低、飞行成本是否高等与经济相关的内容。

1.1.3 性能规章

民用运输飞机是飞机制造厂商生产的产品,它必须由所在国家或地区民航当局开展适航审定后,才能交付公共航空承运人投入航空运输服务。公共航空承运人使用这些产品来开展运输活动的过程同样受到民航当局监管。许多国家尽管拥有自己的航空管理机构,但不一定发展自己的审定和运行规章体系,而是接受国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)、美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)或欧洲航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)的条例及由其批准的飞机飞行手册。

在20世纪50年代,即喷气式客机时代的初期,全球的民航管理机构较多,如美国联邦航空管理局、英国民用航空局、澳大利亚民用航空局、德国联邦航空局、法国民用航空局、日本民用航空局、加拿大交通运输部等。20世纪80—90年代,随着英国、法国和德国共同组建成立了联合航空局(Joint Aviation Authorities, JAA),规章条例缩减为只剩FAA和JAA规章条例。到2002年,一个新的机构,欧洲航空安全局(EASA)承担了集中行使其各成员国民航管理主权的职责,并在2020年更改中文名称为欧盟航空安全局。

成立于1944年的国际民航组织(ICAO)负责全球多个国家民航组织的协调工作。ICAO发布的附件包括各缔约国必须遵守的标准和建议采纳的措施,其中附件8是航空器适航性要求,附件6是运行规章。

在我国,中国民用航空局(Civil Aviation Administration of China, CAAC)监管的航空公司需要遵守的规章条例被称为中国民用航空规章(China Civil Aviation Regulations, CCAR)。与适航相关的部分是《运输类飞机适航标准》(CCAR-25-R4),与运行相关的部分是《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》(CCAR-121-R8),如图1.1.4和图1.1.5所示。

在美国,FAA监管的运营人执行的规章条例被称为联邦航空法规(FAR),其中与航空公司运行相关的部分主要是《运输类飞机适航标准》(FAR-25)及《国内、国际和补充运行合格审定规则》(FAR-121)。

在欧洲,EASA监管的航空公司需要遵守的规章条例被划分为两大类别,其中与适航相关的部分由EASA以审定规范(certification specifications, CS)的形式发布,如CS-25,与运行相关的部分由欧盟(EU)以实施规则(implementation rules, IR)的形式发布且具有强制性,如IR-OPS-CAT。

FAA和CAAC常以咨询通告(advisory circular, AC)的形式,EASA则多以可接受的符合性方法(acceptable method of compliance, AMC)和指导材料(guidance materials, GM)

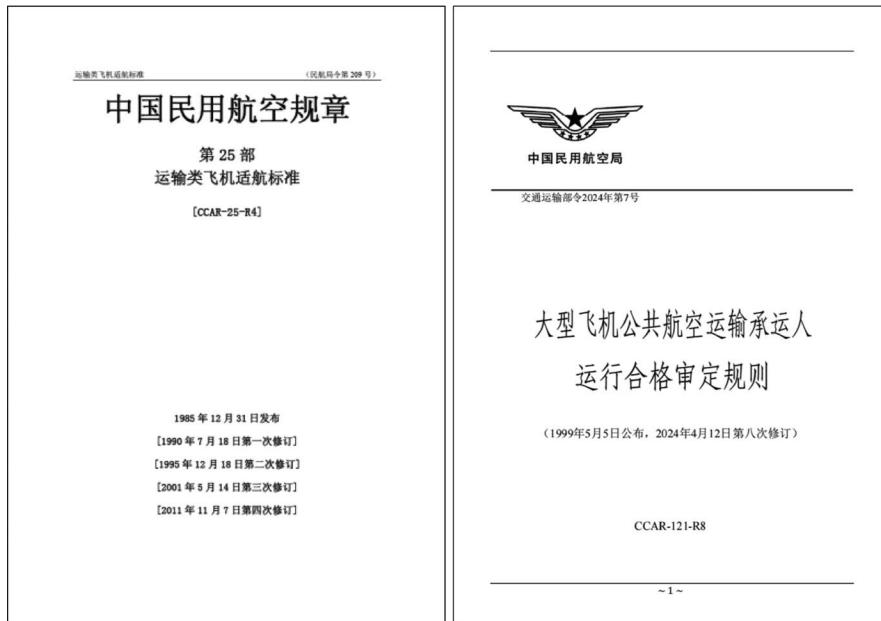


图 1.1.4 CCAR-25 和 CCAR-121

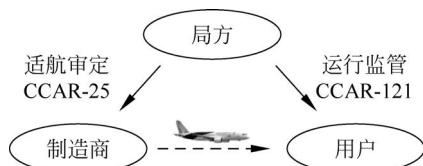


图 1.1.5 适航与运行

的形式对其规章条例涉及的条款内容进行进一步解释或形成更加具有指导性的技术规范,进而明确操作实施细则。因此,飞行员需要对涉及飞机性能的规章条款和相关规范有较为全面的了解和认识。

近年来,随着 ARJ21-700 支线喷气式客机和 C919 干线喷气式客机的研制、试飞、生产、运行等活动日益广泛地开展,中国民航不断加强适航审定能力建设。“十三五”期间,中国民航局适航审定部门已在建设基础能力、提高审定能力、完善规章体系、拓展国际合作等方面取得显著成就。“十四五”期间,中国民航进一步将“支持国产民用飞机运行”作为深化民航改革的重要内容,着力支持 ARJ21 飞机成功运营和 C919 飞机的交付运行,争取在飞机性能、运行控制及经济性方面达到国际水平。

1.1.4 性能分类

飞机制造厂商在将新机型投入商业使用前,需要开展设计、制造、试验试飞、适航取证试飞等复杂工作,如图 1.1.6 所示。以 C919 飞机为例,在取证试飞阶段所面临的风险与难度极高的试飞科目包括失速试飞、最小离地速度试飞和自然结冰试飞。这些试飞科目的内容均与飞行性能密切相关。在取证试飞过程中测量获得的性能数据,称为审定数据或演示数据,多由试飞员以规定的方法通过大量反复的飞行演示获得,是测量结果的统计值,可称为测量性能。

飞机制造厂商为了确保生产的机型在交付后能够胜任未来在全球不同地区和不同环境下的飞行任务,如平原地区、高原地区、炎热地区、寒冷地区、多风地区、多雨地区等,需要在

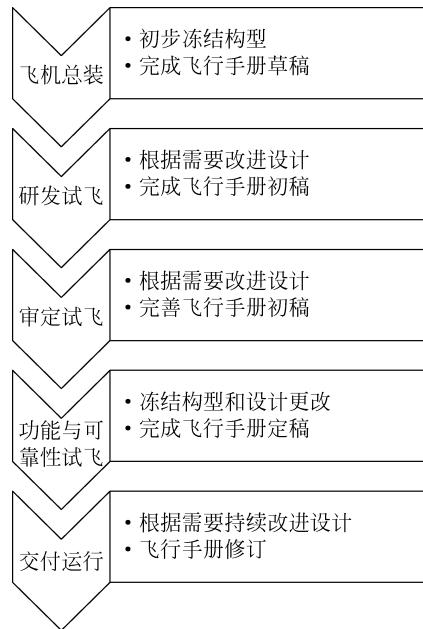


图 1.1.6 主要试飞阶段

测量性能的基础上进行调整,进而建立能够指导机队(多架飞机)运行的合理数据。这些调整后的数据是正常运维条件下该机队依循飞机飞行手册的要求开展飞行活动时能够达到的平均能力,通常称为总性能(gross performance)。总性能能够帮助使用者了解该型飞机机队的平均表现。

平均,是一种常用的统计方法,可表明各观测值相对集中的位置。因此,总性能只能反映机队的一般水平,即飞机表现的集中分布趋势,并不意味着该机队每一架飞机都能够达到总性能要求。在评估安全风险较高的性能内容时,如越障,若以总性能去判断机队的越障安全性,后果就十分严重。此时,有必要在总性能的基础上扣减一定的安全裕量,才能够获得该机队中任意个体皆能达到的能力水平,这就是净性能(net performance),如图 1.1.7 所示。

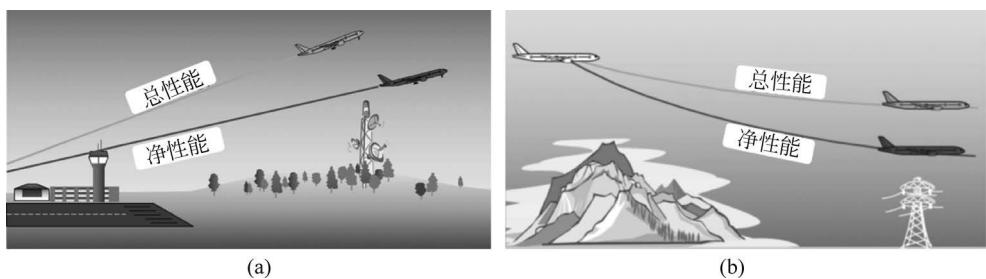


图 1.1.7 总性能与净性能关系示意图
(a) 一发失效后的爬升阶段; (b) 一发失效后的飘降阶段

从统计的角度出发,在总性能基础上扣减的裕量越大,获得的净性能水平越低,机队中能够达到该安全水平的飞机也就越多。如此一来,也意味着整个机队为了确保少数能力表



现欠佳的飞机个体的安全,不得不放弃其余能力表现良好的飞机可能创造的收益。为了获得可在安全和收益之间取得平衡的净性能,人们需要依循局方颁布的规章条例确定在特定飞行情景下应削减多少裕量。

1.1.5 性能相关手册

飞行员常接触的与飞机性能相关的手册有飞机飞行手册(aircraft flight manual,AFM)、飞行机组操作手册(flight crew operating manual,FCOM)、快速参考手册或快速检查单(quick reference handbook,QRH)等,如图 1.1.8 所示。不同手册的内容、结构、对象和适用场景有所差异,因为飞机的优化、升级、改造会使得同一机型可能具有若干不同的配置,所以手册通常具有适配机型的标识号。飞行员核实并使用与执飞机型匹配的手册非常有必要。



图 1.1.8 ARJ21-700 飞机的 AFM、FCOM 和 QRH

1. AFM

CCAR-121.137 条指出,每一种型号的民用运输飞机都应具有适航当局批准的飞机飞行手册(AFM)。它是飞机制造厂商编写的技术出版物,是飞机的产品说明书。它帮助使用者掌握与飞机取证安全水平等价的必要信息、使用限制、操作程序、性能信息等。

AFM 具有行政性法律规范效力,是飞行机组操作手册(FCOM)、快速参考手册或快速检查单(QRH)、重量平衡手册(weight and balance manual, WBM)等其他手册的基础。AFM 中诸如环境边界限制、重量限制、速度限制和 AFM 里其他限制都具有强制性。在 AFM 中提供了一部分性能信息,这些性能信息是依循 CCAR-25 及相关咨询通告要求建立的限制,从规范的角度管理并支配每一架飞机在起飞、着陆及其他飞行阶段的性能。

由于起飞和着陆是规章要求最多、最严格的飞行阶段,所以 AFM 手册中的起飞和着陆内容用以帮助飞行员确定一架飞机的最大重量,以符合规章中相关的速度限制、距离限制、爬升梯度限制和超障裕度限制等。只有当飞行员在某些极端情况下认为当前操作是保证安全所必需的,才有权抛开 AFM 的束缚。AFM 侧重于与安全性相关的性能内容,对与经济性相关的参数,如巡航速度、等待燃油流量等性能的陈述较少。



2. FCOM 和 QRH

为向飞行员提供更具针对性的帮助,飞机制造厂商依据 CCAR-121.133 条(b)(8)款提供了飞行机组操作手册(FCOM)。在 FCOM 中提供的性能信息包括签派放行性能、飞行中性能等。FCOM 从满足飞行员执飞航线任务需要的角度进行编排,囊括了在所有预计航线飞行中安全和有效操作航空器所需的使用极限、操作程序、性能与系统资料等。FCOM 建立了具体的标准化操作程序和动作,常作为机组改装训练、复训和熟练检查的参考和指南。《航空器的持续适航文件》(AC-91-11 R2)明确了 FCOM 手册的主要内容包括使用说明、运行限制、正常程序、非正常程序、性能数据、航空器系统说明等。当 FCOM 与 AFM 内容冲突时,以 AFM 为准。非运输类航空器可以使用 AFM 来替代 FCOM。

快速参考手册(QRH)主要包含各类非常规和紧急情况下的操作程序和指导,侧重解决“发生了什么”“怎么做”,以确保飞行员在飞行过程中遭受各种意外情况时能够快速应对。譬如,在本书 5.2 节提及的达到着陆评估,就需要机组在航班到达前通过 QRH 中提供的快速换算表格来获得到达着陆距离。

3. CDL、MEL

飞机制造厂商通常在 AFM 手册中提供允许缺损放行的相关内容,在经过局方审核批准后获得合法授权。对于飞行员,判断一架飞机在构型缺损后能否实施飞行需要依循构型缺损清单(configuration discrepancy list,CDL)。CDL 是 AFM 的附录,具有行政性法律规范效力。CDL 项目没有时效限制,经由 CDL 授权的带缺失部件的飞机可被视为是一种审定构型。

同样,判断飞机在设备故障后能否实施飞行需要依循最低设备清单(minimum equipment list,MEL)。放行一架带有非工作系统的飞机,常伴随某些限制,譬如重量限制、高度限制、速度限制等。此时,可能需要运营人对这类放行建立特殊保障及运行程序,还可能需要建立飞行员掌握的特殊程序。

民用运输飞机作为由数百万个零部件及设备组成的庞大系统,不排除在日常使用过程中会面临设备故障或部件缺损的情况,如果不区分是否影响飞机的安全水平就停止投入飞行活动,由此带来的关联影响和附加损失也是巨大的。毕竟在某些情况下确实有必要放行一架设备带故障的飞机或者放行一架外形结构出现缺损的飞机。

4. AFM 和 FCOM 中的性能内容

AFM 通常分为若干章,另有一个或多个附录。现以国产 ARJ21-700 飞机的 AFM 为例进行简要介绍,AFM 的基本结构见表 1.1.1。

表 1.1.1 ARJ21-700 飞机 AFM 的基本结构

名 称	简 介
00 章-正文前资料	内封、版权页、发送函、更改摘要、有效章节清单、飞机及附录有效性、设计更改清单、附录适用性、更改单记录、临时更改单记录、临时更改单目录
01 章-概述	目录、前言、说明、几何数据



续表

名 称	简 介
02 章-限制	目录、一般使用限制、重量和装载、空速和运行参数、动力装置、系统
03 章-应急程序	目录、前言、发动机火警、双发失效、反推装置非指令打开、发动机尾喷失火、烟雾或火警、空调和增压、APU、迫降、水上迫降、紧急撤离、电气、飞行操纵
04 章-非正常程序	目录、前言、动力装置、单发操作、飞行操纵、电气、液压、燃油、起落架和刹车、自动飞行、导航、指示与记录、空调和增压、气源、防冰和除雨、杂项
05 章-正常程序	目录、前言、外部安全检查、初始驾驶舱准备、外部检查、驾驶舱准备、推出或启动前、启动发动机、启动后、滑行、起飞前、起飞、爬升和巡航、下降、进近、着陆、复飞、着陆后、发动机关车、离机、地形告警系统、交通防撞系统、严重颠簸中飞行、风切变、结冰条件操作、ACARS、RVSM
06 章-性能	目录、概要、推力设置、基准失速速度、抖振包线、最小操纵速度、起飞安定面调定，以及： <ul style="list-style-type: none"> • 起飞性能，包括起飞场长图、场长限重图、起飞爬升图、爬升限重图、刹车能量限重图、净起飞飞行航迹、越障参考爬升梯度图、起飞越障图、最大改平高度图、三阶段水平距离图、最后阶段净爬升梯度图、最后阶段速度图、转弯梯度损失图、起飞速度 V_1 图、起飞速度 V_R 图、起飞速度 V_2 图； • 航路性能，包括航路爬升净梯度图、航路爬升速度、正净梯度航路爬升重量图； • 进近和着陆爬升梯度，包括进近爬升梯度图、着陆爬升梯度图； • 着陆性能，包括进近爬升限重图、着陆爬升限重图、着陆场长图、进近爬升速度图、着陆爬升速度图、参考速度图； • 噪声级
07 章-附录	目录、CDL

FCOM 通常由三册或四册组成。现仍以 ARJ21-700 飞机的 FCOM 为例进行简要介绍，FCOM 的基本结构见表 1.1.2。

表 1.1.2 ARJ21-700 飞机 FCOM 的基本结构

名 称	简 介
第 1 册-系统描述	该部分提供与飞机相关的基本信息和系统介绍：飞机总述、空调增压、自动飞行、通信、电源、设备装备、防火、飞行控制、燃油、液压、防冰除雨、指示记录、起落架、照明、导航、氧气、气源、水和废水、中央维护系统、辅助动力装置、舱门、动力装置
第 2 册-操作程序	本部分提供安全有效地操纵飞机所需的操作程序和信息，包括运行通告、使用限制、非正常程序、应急程序、正常程序、补充程序。 <ul style="list-style-type: none"> • 非正常程序，“……本部分提供精简的非正常程序，这些程序源于系统故障或失效，或包含特殊系统的使用或常规系统的特殊使用。以此保护机组和乘客，使之不受严重伤害，并维持飞机的适航性……”； • 正常程序，“……本部分的正常程序包括一个或一系列行为，或防止错误的行为。这些程序行为如果没有被遵守，就可能给飞机的适航性或给乘客和机组的安全带来不利影响……”



续表

9

名 称	简 介
第 3 册-性能	<p>本部分提供安全有效地操纵飞机所需的性能信息,包括使用数据、签派性能、飞行中性能、单发性能。其中:</p> <ul style="list-style-type: none"> 使用数据包括风分量图、速度转换、压力高度转换、几何高度转换、国际标准大气; 推力设置包括工作状态、推力数据表; 起飞包括起飞场长数据表、起飞速度数据表; 爬升包括爬升策略、爬升数据表; 巡航包括最佳和最大高度、远程巡航和固定速度巡航数据表; 巡航中快速检查包括快速检查数据表、地面/空中距离转换表; 等待包括等待数据表; 下降包括下降策略、下降数据表; 着陆包括进近爬升和着陆爬升速度、实际着陆距离、所需着陆距离; 复飞包括复飞限制重量数据表; 备降包括备降计划数据表、地面/空中距离转换表; 简化飞行计划包括飞行计划剖面、简化飞行计划、地面/空中距离转换表; 单发飞行包括单发巡航、单发等待、单发飘降

手册中的性能内容多以图表形式供机组使用。这些图表是设计者提供性能数据的智慧结晶,是传递飞机性能信息的工程手段。尽管对于大多数初次接触者来说较为复杂且不够直观,但只要掌握这些图表的组成特点和使用方法,使用者就能够更加深入地理解性能规律和特性。本书后续章节将对部分典型图表进行介绍。

随着现代计算机技术和机载设备技术的发展,越来越多的飞机制造厂商和航空公司用户尝试对纸质图表性能内容进行数字化改造,如图 1.1.9 所示。数字化能够大幅减少查图表流程,提高生产运行效率,对于航空安全有积极的意义。然而,数字化的“所见即所得”也容易造成使用者对飞机性能内容遗忘生疏的结果,所以加深对图表的理解仍然是飞行员夯实专业基础进而掌握性能规律和特性的必要途径。

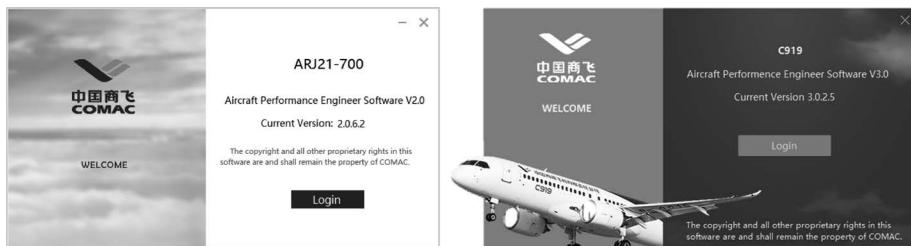


图 1.1.9 性能仿真软件

1.2 大气环境

1.2.1 大气概述

民用运输飞机的活动范围局限于大气环境以内,其飞行表现与大气状态密切相关,如图 1.2.1 所示。大气中富含的氧气是民用运输飞机动力装置产生动力的助燃物源泉,组成大气的空气



微团通过相对运动帮助飞机获得升力及副产物阻力,因此,飞行员有必要了解大气的特性。

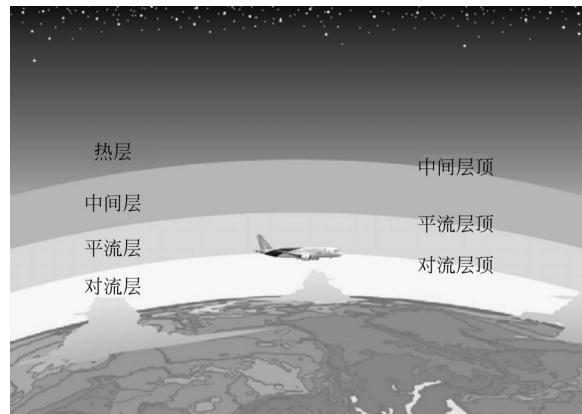


图 1.2.1 运输飞机的活动范围

大气热量的主要来源是太阳辐射。大部分太阳辐射通过加热地面,由地面释放出长波辐射来加热大气。近地面的空气受热膨胀后,密度减小,气压降低,热量逐步向高处传递,会使得空气气温随着海拔的升高而逐渐下降,达到某一高度后气温不再降低,该高度被称为对流层顶。以对流层顶为界,其下为对流层,其上为平流层,如图 1.2.2 所示。平流层底部的

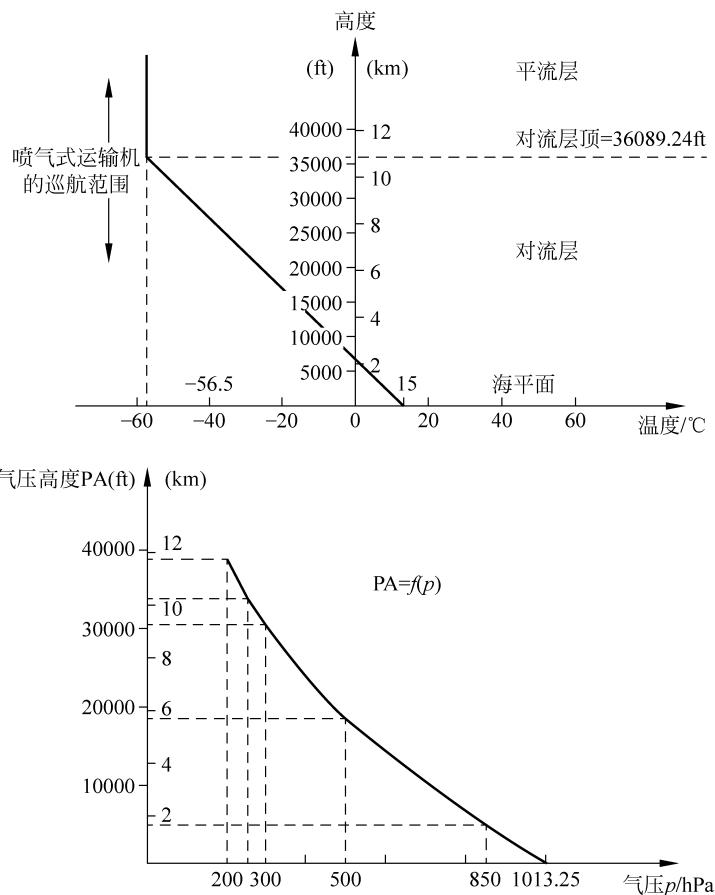


图 1.2.2 温度和气压随高度的变化特性