

机械工程概述

1.1 机械工程发展简史

1.1.1 基本概念

1. 机械

机械(machine)源自希腊语 mechine 及拉丁文 mecina,原指“巧妙的设计”。作为一般性的机械概念,可以追溯到古罗马时期。古罗马建筑师马可·维特鲁威在其著作《建筑十书》中给出了最早的关于机械的定义(见图 1.1):“机械就是把木材结合起来的装置,主要对于搬运重物发挥效力。”

随着社会的发展,机械的定义也发生了变迁。20 世纪后,机械为机器和机构的泛称,是将已有的机械能或非机械能转换成便于利用的机械能,以及将机械能转换为某种非机械能用机械能来做一定工作的装备或器具。如图 1.2 所示,目前机械分为三类。第一类机械包括风力机、水轮机、汽轮机、内燃机、电动机、气动马达、液压马达等,统称为动力机械;第二类机械包括发电机、热泵、液压泵、压缩机等,统称为能量变换机械;第三类机械是利用人、畜或动力机械所提供的机械能改变工作对象(原料、工件或工作介质)的物理状态、性质、结构、形状、位置等,如数控机床、造纸机械、粉碎机械、物料搬运机械等,统称为工作机械。

在中国,“机械”中“机”的原意是局部的关键,“械”的原意是某一具体的器械或器具,这两个字连在一起,便构成了一般性的机械概念。



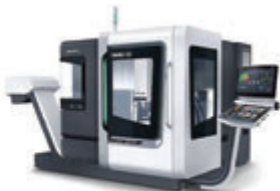
图 1.1 马可·维特鲁威定义的机械(起重机)



(a) 航空发动机



(b) 发电机



(c) 数控机床

图 1.2 现代机械示例

2. 机械工程

机械工程是一门以自然科学、技术科学为理论基础,结合生产实际经验,研究各类机械的设计、制造、运行控制、维护以及开发各类机械装备与系统的工程技术学科。《研究生教育学科专业目录(2022年)》不再统一规定国家二级学科目录,只保留门类、一级学科。《学位授予和人才培养学科目录(2011年)》(2018年修订)中机械工程一级学科下属机械制造及其自动化、机械电子工程、机械设计及理论和车辆工程4个二级学科,目前许多高校在研究生复试、培养、论文方向仍沿用上面4个传统,有的还自主设置二级学科。

机械工程的服务领域很广,现代产业、工程领域以及人们日常生活中都需要应用机械。总的来说,现代机械工程有五大服务领域。

(1) 研制和提供能量转换机械,包括将热能、化学能、原子能、电能、流体压力能和天然机械能转换为适合于应用的机械能的各种动力机械,以及将机械能转换为所需要的其他能量(电能、热能、流体压力能、势能等)的能量转换机械,如图1.3所示。

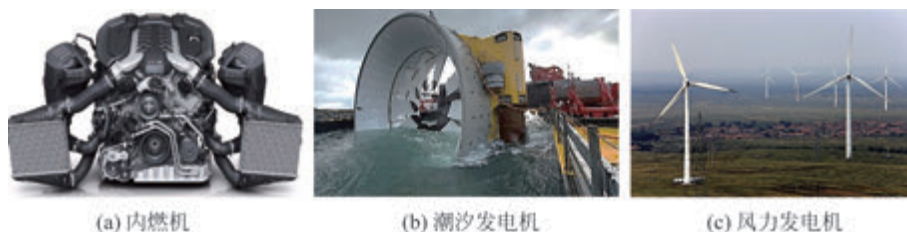


图 1.3 能量转换机械示例

(2) 研制和提供用以生产各种产品的机械,包括应用于第一产业的农、林、牧、渔业机械和矿山机械(见图1.4),以及应用于第二产业的各种重工业机械和轻工业机械。



图 1.4 工业机械示例

(3) 研制和提供从事各种服务的机械,包括交通运输机械,物料搬运机械,办公机械,医疗器械,通风、采暖和空调设备,除尘、净化、消声等环境保护设备等(见图1.5)。



图 1.5 服务机械示例

(4) 研制和提供家庭及个人生活中应用的机械,如洗衣机、电冰箱、钟表、照相机、运动器械等(见图 1.6)。



图 1.6 家用机械示例

(5) 研制和提供各种机械化武器,如图 1.7 所示。



图 1.7 武器装备示例

1.1.2 古代机械

人类与动物的区别在于能够制造和使用工具。根据所使用工具的材料不同,古代人类相继经历了石器时代、青铜时代和铁器时代。

大约 200 万年前,人类学会了制造和使用简单的木制和石制工具,如石刀、石斧、石锤、木棒等,如图 1.8 所示。石器时代持续了上百万年。



图 1.8 古代工具

大约 15000 年前,人类学会了制作和使用简单的机械,如杠杆、滑轮、轮轴、斜面、螺旋、尖劈等,开始了农耕和畜牧。

公元前 5000 年前后,埃及开始冶炼铜,并用铜制造工具和武器。公元前 1400 年前后,小亚细亚半岛上的赫梯王国掌握了冶炼铁的技术,最早开始大量地生产铁,并在很多场合用铁代

替了铜。自远古一直到第一次工业革命以前,木材也始终是制造工具甚至机器的主要材料。

古代机械的发展与人类文明的发展同步,主要集中在希腊、罗马、埃及、中国四个地区。

图 1.9 所示为中国古代机械。



(a) 古代起重机



(b) 东汉时期鼓风机——水排机构

图 1.9 中国古代机械

公元前 600 年至公元 400 年,是希腊古典文化的繁荣期,产生了一批著名的哲学家和科学家。对简单机械进行归纳的任务就是由古希腊学者阿基米德、希罗完成的,图 1.10 和图 1.11 所示分别为阿基米德螺旋输水机和古希腊攻城机械。但随着公元 5 世纪西罗马帝国的灭亡,希腊和罗马的古典文化归于沉寂,欧洲进入发展缓慢的中世纪。

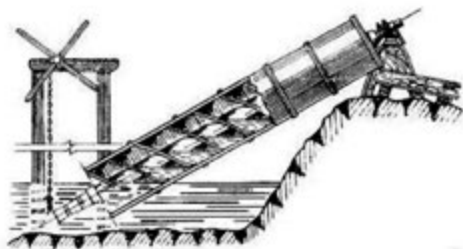


图 1.10 阿基米德螺旋输水机



图 1.11 古希腊攻城机械

埃及使用工具最早,创造了杠杆、滑轮、螺旋等六种“简单机械”(见图 1.12)。这些简单机械是后来机械发展的根基。



图 1.12 古埃及使用原木和杠杆搬运建造金字塔的石块

公元后,埃及从创造的前沿淡出,而中国则进入了“黄金时代”。古代中国的机械发明和工艺技术种类多、涉及领域广、水平高,涌现出一批卓越的发明家,在世界上长期居于领先地位。

位。但明朝中后期开始实行“闭关锁国”政策,到清朝则更变本加厉,隔断了中外科技文化的交流,阻碍了资本主义萌芽的发展。

古代机械的发明首先是为了人类的衣食住行:农耕、灌溉、谷物处理、纺织、车与舟。为了农业,要懂得天象,这就出现了观测天象的仪器;由于狩猎和族群之间斗争的需要,就出现了武器;为了冶炼金属,就出现了鼓风机。

铸造、锻造、退火和淬火技术与金属的使用和冶炼相伴而生。在古罗马时代,已经使用了落锤。公元前1300年,埃及出现了原始的切割木制工件的车床,同时中国古代的铸造技术也已发展到很高的水平。

古代机械的产生是一些能工巧匠依靠直觉和灵感创造出来的,它来源于实践,而缺少科学理论的指导。近代和当代所创造的一些机构和机器,如车床、汽轮机、水轮机、螺旋输送机在古代已有雏形,虽然十分简陋,但其原理与今天的机械是相通的。古代机械使用人力、畜力、水力和风力作为动力,没有先进的动力是古代机械发展缓慢的原因之一。

1.1.3 近代机械工程

公元14—16世纪,在意大利首先出现了资本主义生产方式的萌芽,地理大发现为世界市场的出现提供了条件。经济基础的变化带来了上层建筑的变革:在几百年间,欧洲陆续发生了文艺复兴等一系列思想解放运动,继之以英国、法国等国家发生的资产阶级革命,世界进入近代。

达·芬奇(见图1.13)开始了近代机械科技的研究。欧洲钟表制造业是精密机械制造的先导之一。

17世纪,牛顿(见图1.14)创立了经典力学,它是近现代力学和机械工程发展的科学基础。



图 1.13 达·芬奇



图 1.14 牛顿

在18世纪中叶开始的第一次工业革命中,出现了使用机器进行生产的热潮。瓦特在前人工作的基础上,改进、发明了蒸汽机,如图1.15所示,为人类提供了空前强大的动力,并出现了以铁路和轮船为代表的交通运输革命。大型的、集中的工厂生产系统取代了分散的手工业作坊。随着近代的车床、镗床、刨床、铣床的发明,机械制造业在英国诞生。机械工程的发展在第一次工业革命的进程中起着主导作用。

18世纪末,机械工程高等教育首先在法国发展起来,推动了机构运动学在1834年被承认为一个独立的学科。随着机械工业的壮大,1847年,英国机械工程师学会从民用工程师

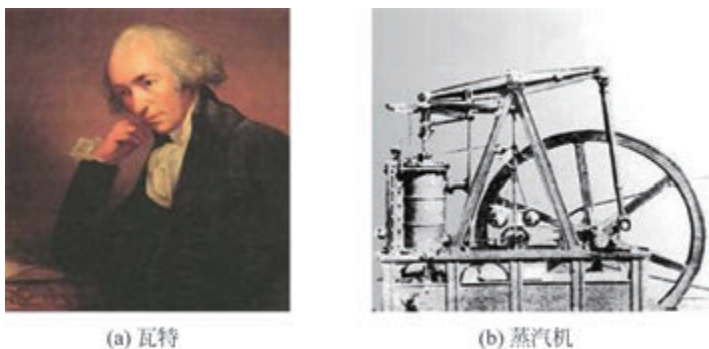


图 1.15 瓦特和蒸汽机

学会中独立出来,机械工程作为工程技术中的一个独立领域得到了正式的承认。

19 世纪中叶,发生了第二次工业革命。随着电力的广泛应用,世界进入了电气时代(见图 1.16);随着新型炼钢法的出现,世界进入了钢铁时代。奥托发明内燃机,推动了以汽车和飞机为代表的新的交通运输革命。水轮机、汽轮机、燃气轮机、喷气式发动机等动力机械大发展,采矿、冶金、化工、轻工等各工业部门广泛地实现了机械化和电气化。通用机床走向成熟,各种精密机床、专用机床快速发展。机械工程的发展在第二次工业革命的进程中起着骨干作用。



图 1.16 电力与第二次工业革命

在两次工业革命中,机械开始向高速化、轻量化、精密化、自动化方向发展。伴随着这一发展趋势,形成了机构学、机械设计学、机械动力学等机械基础学科。金属切削刀具的材料,从工具钢发展到高速钢、硬质合金和陶瓷,切削速度不断提高,在这一过程中,建立了金属切削理论和机械精度理论。动力机械、各种生产机械的理论也都获得了飞跃发展。近代的机械工程学科在 19 世纪上半叶诞生,到 20 世纪上半叶基本形成。

泰勒提出的科学管理制度和福特首创的大批量生产模式,从 20 世纪初开始在一些国家广泛推行,对机械工业的发展起到了巨大的推动作用。

在第一次工业革命中,发明机器的主要是工匠、机械师,他们依靠的是在实践中积累起来的经验;而在第二次工业革命中,科学家走在了工程师的前面,理论开始发挥指导作用。

1.1.4 现代机械工程

19 世纪末至 20 世纪 30 年代发生了新物理学革命,这是现代科技发展的科学基础。第

二次世界大战(简称“二战”)催生了电子计算机、火箭和原子能三大技术。“二战”后,世界大范围的和平形成了有利于经济和科技发展的大环境,第三次工业革命兴起。前两次工业革命都首先是动力革命,而第三次工业革命是以电子计算机技术统领的,以航天技术、生物技术、新材料技术和新能源技术为核心领域的一次信息化革命(见图 1.17)。

在和平的环境中形成了更大的世界市场,激烈的竞争推动着机械产品不断地改进、提高和创新。机械工业和机械科技获得了全面的发展,其规模之大、气势之宏、水平之高,都是前两次工业革命所远远不能比拟的。

新时期,很多机械产品进一步向高速、重载、大功率方向发展;同时,对机械的轻量化、可靠性、精密性、经济性提出了更为苛刻的要求。人们在机器的外观、色彩和式样方面的追求也更高,降低机器对环境的不良影响也成为新时期对机械产品的新要求。



图 1.17 计算机与第三次工业革命

由于对产品多样化和个性化的追求,以及竞争的加剧导致的买方市场的形成,从 20 世纪 60 年代起,机械工业由大批量生产模式开始向多品种、小批量生产模式转变。

新技术革命的各个核心领域向机械领域提供了新技术、新材料、新能源;同时,这些领域也向机械领域提出了研制所需要的新设备的要求。无论是给予,还是索取,都是对机械科技发展的推动。新物理学革命以来,物理、数学的进展提供了新的理论基础和强大的计算手段。新时期的机械设计与机械制造呈现了全新的面貌。机械工程学科得到全面大发展。

现代设计方法形成,它包含计算机辅助设计、优化设计、可靠性设计、动态设计、创造性设计、绿色设计等许多具体方法。提出现代设计方法的目的:一是要向市场推出具有优良甚至超等性能的产品;二是要向市场快速地推出适应不同要求的多样化、个性化产品。在新时期,机械设计摆脱了经验和半经验设计阶段,向快速化、自动化、可视化和智能化迈进。

先进制造技术形成,其核心是以计算机技术为统领,提高生产率、提高精度、提高制造过程的自动化程度。从机械控制的自动化、电气控制的自动化发展到计算机数字控制的自动化,数控机床和加工中心的广泛使用,特种加工技术的发展和运用,直至无人车间和无人工厂,切削速度和加工精度在不断地提高。随着材料技术的进步,难加工材料的切削加工技术和特种加工技术发展起来。增材制造技术的出现,将使未来的制造模式发生巨大的变化。

机械正走向全面自动化、网络化、智能化。控制工程理论、计算机技术与机械技术相结合,在机械工程中产生了一个新的学科——机械电子工程,出现了一批机电一体化产品。特别是现代汽车、高速铁路车辆、飞机、航天器、大型发电机组、IC 制造装备、机器人、精密数控机床和大型盾构掘进机械等复杂机电系统,其机械结构复杂,动力学行为复杂。它们处于机械设计与制造领域的最高端,很多新方法、新技术出于这些高端领域的需要而产生,随后才向一般机械制造领域扩散。

新时期的机械设计向机械学理论提出了新的课题,断裂力学、多体力学、数值方法等领域的进步为机械学理论的发展注入了新的活力。包含机构学、机械强度学、机械传动学、摩擦学、机械动力学、机器人学和微机械学的现代机械学理论得到了空前的发展。

1.2 机械工程与社会发展

根据国家统计局《三次产业划分规定》(国统设管函〔2018〕74号),制造业属于第二产业,是指将制造资源(物料、能源、设备、工具、资金、技术、信息和人力等),按照市场要求,通过制造过程,转化为可供人们使用和利用的工业品与生活消费品的行业,包括农副食品加工业、金属制品业、通用设备制造业、专用设备制造业、通信设备、计算机及其他电子设备制造业等30个大类。

机械制造业是制造业的重要组成部分,是指从事各种动力机械、起重运输机械、农业机械、冶金矿山机械、化工机械、纺织机械、机床、工具、仪器、仪表及其他机械设备等生产的行业。

机械制造业是国民经济的装备部,国民经济各部门的生产水平、产品质量和经济效益等在很大程度上取决于机械制造业所提供的装备的技术性能、质量和可靠性。中华人民共和国成立以来,特别是改革开放40多年来,中国装备制造业取得了令人瞩目的成就。从总量规模看,中国现已位居世界领先地位,跻身世界装备制造业大国行列。

1.2.1 机械对人类社会发展的两面性

从远古到现代社会、从猿到人,由于人类生存和生活的需要、社会生产发展的需要,以及探索科学技术的需要,甚至战争的需要,机械及机械工程由粗糙到精密,由简单到复杂,由低级到自动化、智能化。机械工程的发展促进了人类社会进步和现代文明的建立。

机械工程是现代社会进行生产和服务的五大要素(人、资金、能量、材料和机械)之一,并且能量和材料的生产还必须有机机械的参与。任何现代产业和工程领域都需要应用机械,例如农业、林业、矿山等需要农业机械、林业机械、矿山设备;冶金和化学工业需要冶金机械、化工机械;纺织工业需要纺织机械;食品加工工业需要食品加工机械;房屋建筑和道路、桥梁、水利等工程需要工程机械;电力工业需要动力机械;交通运输业需要各种车辆、船舶、飞机等;各种商品的计量、包装、储存、装卸需要各种相应的工作机械。就是人们的日常生活,也越来越多地应用各种机械,如破碎机、汽车、自行车、缝纫机、钟表、照相机、洗衣机、电冰箱、空调机、吸尘器,等等。

机械工程成为以相关的自然科学和技术科学为理论基础,结合在生产实践中积累的技术经验,研究和解决在开发、设计、制造、安装、运用和修理各种机械中的全部理论和实际问题的一门应用学科。各个工程领域的发展都要求机械工程有与之相适应的发展,都需要机械工程提供所必需的机械。某些机械的发明和完善,又导致新的工程技术和新的产业的出现和发展。例如大型动力机械的制造成功,促成了电力系统的建立;机车的发明,促成了铁路工程和铁路事业的兴起;内燃机、燃气轮机、火箭发动机等的发明和进步以及飞机和航天器的研制成功,促成了航空、航天工程和航空、航天事业的兴起;高压设备(包括压缩机、反应器、密封技术等)的发展,促成了许多新型合成化学工程的成功。机械工程在各方面不断提高的需求的压力下获得了发展动力,同时又从各个学科和技术的进步中得到了改进和创

新的能力。

机械对人类社会的影响十分显著,无论哪一个时代,可以说如果没有机械,就不会有那个时代的发展,就不会有那个时代的崛起,就不会有那个时代的兴盛,这是大多数人的观点。但任何事物都有两面性,这是辩证唯物主义的观点,经过历史的检验,这样的观点显然是正确的,因此,机械也存在两面性,机械既能给我们创造幸福,同时也会给我们带来灾难。

现代社会,机械给我们的生活带来了极大的便利。汽车是 20 世纪机械工程的主要贡献之一;在航空航天方面,飞机的出现使我们仅用几小时就能远渡重洋;而在探索宇宙上,机械更是发挥了不可或缺的作用,比如阿波罗登月计划中,推力高达 $3.34 \times 10^7 \text{ N}$ 的三级运载火箭、指令与服务舱、登月舱是三项关键的工程开发;丰富廉价的能源是支撑经济发展和社会繁荣的重要因素,电能的传送改变了全球数亿人的生活方式和生活质量;农业机械化则在农业生产发展中起主力军作用,是增加农民收入及改善农民生活的基础,是乡风文明的保障,是改善农村面貌的重要手段,提高了农产品的市场竞争力;集成电路、空调等冷藏系统进入了家家户户,提高了人类的生活质量;而生物工程应用工程的原理、分析方法和设计手段制造出的人造器官、人工关节和生物材料等帮助病人延续生命、恢复活力。

但是,机械的迅速发展和社会进一步工业化也给人类社会带来了负面影响。工业化产生了很多对环境有害的物质,带来了生态污染、环境破坏,打破了自然原有的平衡;机械工具的进步,使人类的欲望空前膨胀,人们利用技术尽情地向自然攫取,无所节制,完全不考虑后果,地球已经伤痕累累。随着科技的飞速发展,机械被广泛应用于战争,与冷兵器时代相比,应用机械化武器杀伤力更大。为寻求战略平衡,各个国家大力发展各种各样杀伤力更大的武器装备,人类坐在火药桶上生活,稍有不慎,就会被自己制造的武器消灭殆尽。

1.2.2 机械工程的伟大成就

1. 汽车

经过 100 多年的不断改进、创新,凝聚了人类的智慧和匠心,并得益于石油、钢铁、铝、化工、塑料、机械设备、电力、道路网、电子技术与金融等多种行业的支撑,汽车成为今日具有多种型式、不同规格,广泛用于社会经济生活多个领域的交通运输工具。自 1970 年以来,全球汽车数量几乎每隔 15 年翻一番,截至 2026 年 7 月,全球汽车保有量 16.5 亿~17.0 亿辆。2026 年 2 月 28 日,国家统计局发布《中华人民共和国 2025 年国民经济和社会发展统计公报》,公报显示:2025 年年末全国民用汽车保有量 36611 万辆。得益于亨利·福特提出的基于加工和装配流水线的大量生产方式(见图 1.18),汽车进入了寻常百姓家。

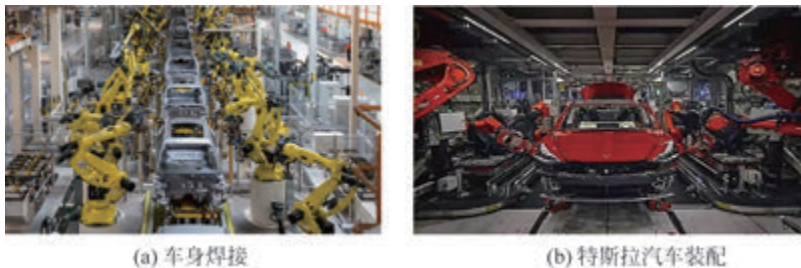


图 1.18 汽车制造流水线

大量生产方式的生产模式下,劳动力也像零件一样是“互换”的,不仅在车间,而且在技术部门也最大限度地利用了分工的思路;组织结构纵向一体化,不靠采购关系,所有零件厂内自制,以保证交货期;为了保证零件的互换性,大量采用自动化、半自动化机床,多数只生产一种零件,按零件工艺排列机床;产品质量高、产量大、成本大幅下降、组装简单、修理方便;生产线是移动或连续组装,装配工时大大减少,单件生产模式下装配一辆汽车需要 500~600min,而在大量生产模式下装配一辆汽车仅需 5~8min,甚至不到 3min。

进入 20 世纪 80 年代,汽车逐渐步入电子化、智能化,新兴的电子技术取代汽车原来单纯的机电液操纵控制系统,以应对安全、排放、节能日益严格的要求。最初由电子控制的燃油喷射、点火、排放、防抱死制动、驱动力防滑、灯光、故障诊断及报警系统等,20 世纪 90 年代以后,陆续出现了智能化的发动机控制、自动变速、动力转向、电子稳定程序、主动悬架、座椅位置、空调、刮水器、安全带、安全气囊、防碰撞、防盗、巡航行驶等自动控制系统。汽车新技术的推出并不能完全避免汽车使用过程中对环境的污染,所以绿色能源逐渐成为汽车的首选,新能源汽车和电动汽车技术将是一个主要的发展方向(见图 1.19 和图 1.20)。日本是电动汽车技术发展速度最快的少数几个国家之一,特别是在混合动力汽车产品发展方面,日本居世界领先地位。目前汽车产业链各个层面都在研发节能技术,通用、福特、大众、戴姆勒-克莱斯勒、丰田、本田等汽车制造商都在积极研制可以利用无线电技术充电的小型电动汽车。近年来,我国新能源汽车发展迅猛,新能源汽车技术位居世界领先地位。2025 年,我国新能源汽车产量为 1662.6 万辆,销量为 1649 万辆,连续第 11 年位居全球首位。

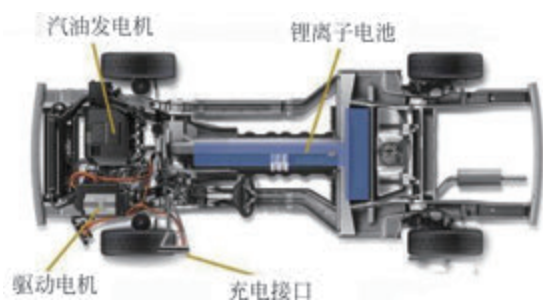


图 1.19 插电混合动力汽车



图 1.20 特斯拉 Model X 电动汽车

2. 飞机

自飞机发明以来,它已日益成为现代文明不可缺少的运载工具,深刻地改变和影响着人们的生活。飞机的发明也使航空运输业得到了空前发展。由于发明了飞机,人类环球旅行的时间大大缩短了。

1903 年,美国莱特兄弟设计制造的飞机试飞成功,这是世界上首次实现重于空气的航空器的有动力、可操纵的飞行。20 世纪 70 年代出现的宽机身客机大大提高了载客能力,由以前客机的 100~150 人增加到 350~500 人。代表性的机型有美国的波音 747、空客 A380(见图 1.21)。英国、法国合作的协和超音速客机则是历史上第一种投入运营的超音速客机,但从商业角度讲并不成功。20 世纪 80 年代初研制的中程客机的特点是省油、低噪声和机载设备先进,代表性机型有美国的波音 757、波音 767 和欧洲的 A310 等。