



# 航空气象学

赵树海 编

气象出版社

(京)新登字046号

### 内 容 简 介

本书较系统、全面地讲述了航空气象学方面的基本知识,分析了大气环境对飞机飞行的影响及航空气象保障等问题,是一本内容比较全面的航空气象学教材。本书经中国气象局高等学校气象类教材编审领导小组审查,确认为大学本科通用教材。

本书可供高等院校气象专业的师生使用,还可供航空航天气象人员、飞行人员、航空管制人员阅读参考。

### 航空气象学

赵树海 编

责任编辑:黄丽荣 终审:顾仁俭

封面设计:牛涛 责任技编:席火光 责任校对:白璐

\*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

\*

开本:850×1168 1/32 印张:11.375 字数:292千字

1994年10月第一版 1994年10月第一次印刷

印数:1—5000

ISBN7-5029-1648-2/P·0665 (课)

定价:10.00元

## 前 言

这本《航空气象学》主要是作为大专院校气象专业的教材而编写的。它以空军气象学院使用的军事气象教材为基础，参考了国内外近年出版的同类文献及最新研究成果，并根据多年教学和工作实践经验而写成的。本课程一般在大学四年级讲授，这时候学员已具备了必要的数理基础和专业知识。

全书共分九章，内容包括温、压、湿、风、云、能见度对飞行的影响，飞机积水、飞机颠簸和飞机尾迹，我国航空气候及航空气象保障等航空气象学的各个方面，是一本内容比较全面的航空气象学教材。同时，在编写过程中，注意了其通用性和实用性，有关气象保障的规定和技术标准尽量按国际或国家统一规定，并收入了近年来国内外一些较实用的预报指标和预报方法（如飞机颠簸、飞机积冰的预报等）。也包括了作者多年来在航空气象学方面的科研成果。

本书在编写过程中，中国民航局气象处、北京民航局张岗高级工程师提供了部分资料，南京大学党人庆教授审阅了全书并提出了宝贵意见，徐景芳、张贤姣为本书绘制了插图，在此一并表示感谢。

恳切希望读者对本书中存在的缺点和错误给予批评和指教，以便今后予以改正。

编者

1993年9月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
第一节 航空气象学的研究对象和内容.....	( 1 )
第二节 航空气象学的过去、现在和 未来的发展.....	( 2 )
第三节 航空器、飞行分类和空中交通管制.....	( 5 )
第四节 标准大气.....	( 11 )
<b>第二章 大气物理状态对飞机的影响</b> .....	( 19 )
第一节 飞机的空气动力.....	( 19 )
第二节 大气物理状态对气压高度表和空速表示度 的影响.....	( 26 )
第三节 气温和空气密度对平飞需要速度和最大速 度的影响.....	( 29 )
第四节 气温、气压对燃料消耗、载重量和升限的 影响.....	( 33 )
第五节 气温和空气密度对飞机起飞着陆的 影响.....	( 37 )
<b>第三章 风对飞行的影响</b> .....	( 43 )
第一节 风对飞机起飞、着陆及上升率的影响.....	( 43 )
第二节 风对航行的影响.....	( 49 )
第三节 风对伞降的影响.....	( 55 )
第四节 低空风切变及其对飞机起飞和着陆的 影响.....	( 59 )
第五节 下击暴流及其对飞机起飞和着陆的 影响.....	( 89 )

<b>第四章 飞机颠簸</b> .....	( 114 )
第一节 飞机颠簸的形成.....	( 114 )
第二节 飞机颠簸的强度等级及其影响因子.....	( 123 )
第三节 飞机颠簸层的某些统计结果及 空间分布特征.....	( 128 )
第四节 几种环境条件下的飞机颠簸.....	( 131 )
第五节 颠簸对飞行的影响.....	( 141 )
第六节 飞机颠簸的预报.....	( 144 )
<b>第五章 飞机积冰</b> .....	( 159 )
第一节 飞机积冰的形成.....	( 159 )
第二节 飞机积冰的类型及强度.....	( 171 )
第三节 积冰对飞行的影响及除冰方法.....	( 176 )
第四节 飞机积冰的气象条件及预报.....	( 180 )
<b>第六章 云和能见度对飞行的影响</b> .....	( 194 )
第一节 允许飞行的最低气象条件.....	( 194 )
第二节 云和能见度对飞行的影响.....	( 196 )
第三节 各类云及雷暴活动区中的飞行条件.....	( 201 )
第四节 不同气象条件下的飞行能见度.....	( 218 )
第五节 云和能见度的预报.....	( 225 )
第六节 飞机尾迹.....	( 240 )
<b>第七章 高空、高速飞行与气象</b> .....	( 252 )
第一节 高速飞行的空气动力特性.....	( 252 )
第二节 高空飞行的气象条件及特点.....	( 258 )
第三节 高空大气环境对飞机飞行的影响.....	( 266 )
第四节 大气和空间环境对航天活动的影响.....	( 272 )
<b>第八章 中国航空气候</b> .....	( 280 )
第一节 中国航空气候要素的分布.....	( 280 )
第二节 中国各区航空气候特征.....	( 293 )
<b>第九章 航空气象勤务</b> .....	( 303 )

第一节	建造和使用机场时应考虑的水文气象条件.....	( 303 )
第二节	航空天气预报.....	( 313 )
第三节	航空气象保障.....	( 323 )
主要参考文献	.....	( 354 )

# 第一章 绪 论

## 第一节 航空气象学的研究对象和内容

航空气象学是研究气象条件同飞行活动和航空技术之间的关系，航空气象保障的方式和方法，以及飞行器在地球大气层中飞行时的气象等问题的一门学科。航空气象学属应用气象学范畴。在实际工作中，航空气象的主要任务是保障飞行安全，提高航空效率，在不同的气象条件下，有效地运用航空技术，顺利完成飞行任务。

航空气象学的研究内容主要包括两个方面：一是研究气象条件对飞行的影响，二是航空气象保障的技术和方法。对飞行影响较大的气象问题主要有：

(1) 气压、气温、空气密度。航空发动机的工作特性，飞机的空气动力性能，以及高度表、速度表的示度等都与大气的压力和温度有关。了解它们对飞机性能的影响，对于飞机设计、发挥飞机性能和实施气象保障都有重要意义。

(2) 风。风是影响飞行的主要气象要素之一。机场跑道方向一般按照盛行风向确定。逆风起落，便于稳定操纵飞机，缩短滑跑距离，侧风着陆，操纵要复杂得多。由于飞机起落时高度和速度的余量都很小，低空风的突然变化（风切变）往往会导致严重事故。

(3) 云和能见度。这是影响飞行的另外两个主要气象要素。尽管一些机场和飞机配有盲目着陆设备和自动着陆系统，但在决断高度以下，还是要靠飞行员目视操纵。机组气象条件及机场开放条件，主要依据云高和能见度确定。



(4) 强对流天气。强对流天气多系中小尺度天气系统形成，变化剧烈，难于准确预报。飞机在强雷暴云中形成强烈的颠簸和积冰，强对流天气系统产生的大风、暴雨、雷暴、冰雹等灾害性天气，以及雷暴云云下出现的强烈低空风切变和下击暴流等是飞行的严重障碍。

(5) 飞机颠簸。当飞机与大气湍流的尺度相近时，会出现俯仰颠簸、摇晃以至抖动的颠簸现象。

(6) 飞机积冰。飞机在含有过冷却水滴的云雨层中飞行，机体表面温度达到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下时，突出部位就会积冰。积冰破坏飞机的气动外形，增加飞机阻力和油耗，妨碍静压系统仪表指示，影响飞机的稳定性与操纵性。

(7) 飞机电击。电击可击穿飞机的表面，导致机上电子仪表、设备故障，甚至击中油箱引起爆炸。

航空气象保障就是为航空提供需要的气象情报及提出趋利避害的综合措施。其目的是充分利用有利天气，避开不利天气，预防和减少危险天气的危害，顺利完成飞行任务。

## 第二节 航空气象学的过去、 现在和未来的发展

航空气象学是在气象学与航空密切联系中发展起来的。20世纪航空活动兴起之后，航空气象学开始萌芽，1903年12月17日，美国W.莱特和O.莱特兄弟在做人类首次飞行时，先用叶轮式风速表观测了地面风速，这是第一次航空气象观测。1915年，美国气象局的一名官员乘坐军用飞机，在圣迭戈附近观测了山区的气流。当时人们认为飞机在垂直气流中的突然升降是跌入了“空气的洞穴”。早期的航空气象学主要着眼于地面风和对流层下部的气流对飞行的影响。当时的航线天气预报只包括：雷暴、总云量（3千米以下）、地面风、高空风（3千米以下）和能见度。20世

20年代末，出现了无线电探空仪，人们开始能获取空中的温度和气压的资料，这对航空气象学的研究和发展有重要的促进作用。随着飞行高度的扩展，云雾、雷暴、积冰、大气湍流、大气能见度以及它们的预报方法，都成为航空气象学研究的内容。第二次世界大战后，开始用雷达探测强对流天气，这对保障飞行的安全有重大作用。50年代以后出现了喷气式飞机，其巡航高度一般可到9—12千米，超音速运输机的巡航高度可达20千米左右，飞机逐渐大型化，起飞着陆区和高空航线上气象条件的探测和预报成为重要的航空气象问题。随着气象仪器的更加完善，激光技术、气象卫星和电子计算机的使用，航空气象学的发展进入了一个新阶段。

航空气象保障始于20世纪20年代。1919年9月，国际气象组织（IMO）在巴黎召开的第四届理事会上，决定建立航空气象学应用委员会，1935年在华沙召开的第七届理事会上决定把它改名为国际航空气象学委员会（简称ICAeM），1951年3月，世界气象组织又将国际航空气象学委员会改名为航空气象学委员会（简称CAeM）。随着飞机性能的提高，空中交通量的增大以及微电子技术的发展，航空气象保障的内容、方式和方法由早期的人工操作进入了当前自动化阶段。

在中国，从1927年起各机场就设有测候所。1939年，中华民国航空委员会设立空军气象总台，1947年成立民用航空局，下设气象科和为数不多的机场气象台。在解放区，1945年就开始建立机场气象台。1949年中华人民共和国成立后，建立了比较完善的航空气象组织，使中国的航空气象事业迅速发展，逐步构成了装备有气象雷达、卫星云图接收装置、激光测云仪和移频通信、气象传真机等先进设备的航空气象台站网，在航空天气预报和航空气象保障方面开始有了较大的发展，特别是近年来，推广应用计算机技术，使各种气象仪器的性能和航空气象保障的整体能力及自动化程度，都有极其迅速的提高，为今后航空气象学的发展，

开创了一个广阔的前景。

随着航空事业的发展、技术性能的提高，不但气象对飞行的影响依然存在，而且对航空气象保障的要求也随之提高。由于空运量的不断增加，气象因素造成的飞行事故也决不能忽视。如1982年7月9日在美国新奥尔良国际机场，一架B-727飞机在起飞时遇到强烈低空风切变而坠毁，造成153人死亡，9人受伤。1991年1月爆发的海湾战争，是自二次世界大战以来规模最大的现代化战争。尽管交战双方使用了包括导弹、隐形飞机等在内的最现代化新式武器，但也始终摆脱不了气象的影响。特别是对于空军作战影响更大。在开战17小时后，美国就公开透露了天气对轰炸的不利影响，美国出动的战斗轰炸机有20%因天气等因素的影响未能击中目标，甚至使出去执行任务的F-16战斗机因气象条件恶劣无法找到目标而带着炸弹返回。海湾战争及近些年由于气象原因造成的严重飞行事故说明，现代航空仍然离不开气象保障。

目前，飞行活动和气象条件之间正在从气象条件决定能否飞行，变为在复杂气象条件下如何飞行。航空气象学的研究也不再停留在过去那种研究气象条件对飞行的影响上面，而是解决如何在各种天气条件下保障飞行安全问题，即实现“全天候”飞行。全天候飞行系统也不是不要考虑气象条件，而是要按照实际大气条件来调整系统的工作状态。在未来的航空活动中，除了低能见度、大气湍流、雷暴、高空气象条件的探测和预报仍需逐步解决之外，形成强烈扰动和危害飞行的中、小尺度天气系统的预报方法、高速处理、传输并显示大量气象情报的高功能自动化、客观定量化航空气象保障系统，以及人工影响云雾改善飞行环境的理论和方法，都是航空气象学继续深入研究和解决的问题。

### 第三节 航空器、飞行分类和空中交通管制

#### 一、航空器

航空器是指能在大气层内进行可控飞行的各种飞行器。任何航空器都必须产生一个大于自身重力的向上的力，才能升入空中。根据产生向上力的原理不同，航空器可分为两大类：轻于空气的航空器（如气球）和重于空气的航空器（如飞机），前者靠空气静浮力升空，后者靠空气动力克服自身重力升空。

航空器的应用比较广泛。在军事上，它可用于航空侦察、轰炸、反潜、空战，运输兵员、武器和作战物资；在民用上，可完成货运、客运、农运、渔业、林业、气象、探矿、空中测量，空中摄影等方面的任务。此外，航空器还是进行科学研究的一种重要工具。在人造地球卫星、载人飞船等航天器出现之前，有关高空气象、大气物理、地球物理、地质学、地理学等方面的许多研究工作，都借助于航空器，即使在航天器出现之后，由于航空器的价格较低，运用方便，仍是在高空进行科学研究的重要工具。

飞机是最主要的、应用范围最广的航空器。自1903年12月7日美国莱特兄弟设计制造的“飞行者”1号进行人类首次成功试飞以来，飞机的性能有了显著提高，已研制出最大飞行速度超过三倍音速、飞行高度达30千米的军用侦察机，活动半径可达4000多千米，载弹量超过20吨的超音速轰炸机和载客300—500人、能进行洲际飞行的旅客机。直升机的历史虽然只有40多年，也已发展成为比较完善的、有特殊功能（垂直起降，空中悬停）的航空器。

飞机按用途分为军用飞机和民用机两大类。军用飞机是按各种军事用途设计的飞机，其中主要包括歼击机（战斗机）、截击机、歼击轰炸机、强击机（攻击机）、轰炸机、反潜机、侦察机、预警机、电子干扰飞机、军用运输机、空中加油机、舰载飞机

表1.1 几种民航飞机的技术性能

名称 (国别)	几何尺寸			起飞 静推力 (10牛)	客舱尺寸 高×宽 (米)	客座数	重量(千克)			性能		
	翼展 (米)	机长 (米)	机高 (米)				翼面积 (米 <sup>2</sup> )	使用 空重	最大起 飞重量	最大 载重	巡航速度 (千米/时)	航程 (千米)
"三叉戟" (英)	29.87	34.97	8.23	135.82	3×5420	2.02×3.44	115	33203	65315	12156	959	3910
波音737-300 (美)	28.91	33.40	11.13		2×9070	2.11×3.45	149	32500	56472		927	2570
图154A (前苏联)	37.55	47.90	11.40	201.45	3×10500	2.02×3.58	167	43500	90000	20000	900	2520
伊尔62M (前苏联)	43.20	53.12	12.35	279.6	4×10990	2.12×3.49	186	69400	165000	23000	900	8000
波音747-200B (美)	59.64	70.66	19.33	511	4×22031	2.54×6.13	452	172220	351535	56000	967	9636
A-300B <sub>2</sub> (西德)	44.64	53.62	16.53	260	2×23130	2.54×5.35	331	87500	142000	34600	911	3334
伊尔86 (前苏联)	48.06	59.54	15.81	320	4×13000	2.61×5.70	350		20600	42000	950	3600
波音767-200 (美)	47.24	48.51	15.85	283.3	2×21750	2.87×4.72	218	80330	127000	26760	850	3760
"协和"号 (英、法)	25.56	62.10	11.40	358.25	4×17260	1.95×2.63	128	78700	185065	42700	M2.04	5110
图144 (前苏联)	28.8	65.7	12.85	433	4×17500		140	85000	180000	41000	M2.2	6500

等。民用机则泛指一切非军事用途的飞机，包括旅客机、货机、公务机、农业飞机、运动机、救护机、试验研究机等。其中旅客机、货机和客货两用飞机又统称民用运输机。现代运输机具有快速、舒适、安全可靠的优点，并且不受复杂地形的影响，能在两地之间完成最短距离的航行。

表1.1和表1.2列出了几种民用和军用飞机的技术性能。

表1.2 几种军用飞机的战术技术性能

名称 (国别)	加力 静推力 (10牛)	几何尺寸(米)		重量(千克)		最大速度 (M数)	最大航程 (千米)
		机长	翼展	起飞重量	载弹量		
米格 25 (前苏联)	2×12300	22.8	14.0	35400		3.0	500*
米格 27 (前苏联)	8300	15.7	14.0	15570	3000	1.7	2500
F-15 (美)	2×10810	19.43	13.05	19090		2.5	1200*
F-16 (美)	10836	15.03	10.01	10680		2.0	460*
B-52 (美)	发动机功率 8×7569 (千瓦)	49.05	56.4	221350	27000	1010(千米/时)	16093
B-1 (美)	4×13337	45.78	23.84— 41.67	179170	27200	2.2	4800*
图26 (前苏联)	2×19613	40.23	26.21— 34.5	12250	9000	2.0	4200*

\* 为活动半径或作战半径。

## 二、航空器的飞行分类

航空器(飞机、直升机)的飞行，按飞行高度常分为超低空、低空、中空、高空和超高空飞行五种情况。高度的划分没有统一的界限标准，而且还随着科学技术的进展和人类认识的深化而改变。通常把离地面100米以下的飞行叫超低空飞行，可用于农业作业、旅游、搜索和救援、强击和脱离敌区等。高度在100

—1000米的飞行叫低空飞行，可用于训练、伞降、空投、侦察、强击和农林作业等。高度在1000—7000米的飞行叫中空飞行，可用于训练、巡逻、轰炸和航线飞行等。高度在7000—15000米的飞行叫高空飞行，可用于训练、侦察、轰炸、拦击、巡逻和航线飞行等。高度大于15000米的飞行叫超高空飞行，可用于侦察、截击等。

飞行按速度又可分为五种情况：(1)低速飞行。 $M$ 数在0.3以下，可以不考虑空气压缩性的影响；(2)亚音速飞行。 $M$ 数约在0.3—0.8，空气压缩性对飞行的影响只有量的变化，无质的突破；(3)跨音速飞行。 $M$ 数约在0.8—1.2之间，航空器表面的局部流速可达到音速，开始出现激波<sup>1)</sup>，随着 $M$ 数的增大，超音速区域逐渐扩大，一直持续到大体上 $M$ 数等于1.2左右，流动呈现亚音速和超音速共存的局面。在跨音速区域内，气流分离现象严重，空气阻力剧增，飞行稳定性变坏；(4)超音速飞行。 $M$ 数约在1.2—5.0之间。此时，整个流场都达到超音速，流动的性质与亚音速相比有本质的不同；(5)高超音速飞行。 $M$ 数约在5.0以上。高超音速流的激波和附面层有强烈干扰，使分析变得更为复杂。航空器前缘由于气流受到强烈的压缩，会出现温度达数千摄氏度的激波层。这样高的温度会使周围空气分子分解甚至电离，给航空器的设计和制造带来许多新问题。

此外，还可把航空器的飞行按性质分为训练、战斗、商务和特种飞行（如试飞、科研和表演等）。按驾驶和领航条件，可分为目视飞行和仪表飞行。目视飞行指飞行员用目力观察天地线及地标，判断飞机的飞行状态，确定飞机位置的飞行。仪表飞行指飞行员按飞机上仪表的指示操纵飞机，判断飞机状态，测定飞机位置的飞行。按飞行区域，分为本场飞行和航线飞行。在机场区域的飞行称本场飞行，沿航线的飞行称航线飞行。按昼夜时间，

---

1) 见第七章。

分为昼间飞行和夜间飞行。昼间飞行指从日出到日落之间的飞行，夜间飞行指从日落到日出之间的飞行。按气象条件，可分为简单气象飞行和复杂气象飞行。简单气象飞行指飞行员在可以目视地标和发光点的气象条件下飞行，通常指晴空飞行或云量7成以下（含7成）的飞行，以及云量7成以上的云下飞行。复杂气象飞行指飞行员在看不清或看不见地标或发光点的气象条件下的飞行，通常指云中飞行，云量8—10成的云上飞行，或能见度小于规定的云下飞行，飞行人员主要依靠机上仪表、领航设备以及地面导航设备来驾驶飞机和执行任务。

### 三、空中交通管制

空中交通管制是利用技术手段对飞行活动进行监视和控制，以保证安全和有秩序地飞行。按国际民用航空组织的规定，空中交通管制的主要任务是：防止飞机在空中相撞；防止机场区域内飞机同障碍物相撞；保证空中交通通畅和飞行秩序。空中交通管制是在国家空中管制的原则下实施的。

#### 1. 空中交通管制中心

航路飞行控制中心枢纽，空中交通管制系统的**关键机构**，简称管制中心。从各种渠道送来与飞行有关的信息，经过处理加工，又从这里发出各种指令管制飞机的飞行。幅员较大的国家一般都设有十几个以至数十个这样的管制中心。现代化的管制中心一般都装有自动化的设备，它的任务是提供准确的飞行动态，实施飞行的调配，保证空中交通安全和通畅，最大限度地提高航路和机场的交通量。作为管制依据的有关飞行信息来自三个方面：（1）不断监视着本区飞机飞行航迹的雷达和二次雷达所监测到的信息，一般用微波传输到管制中心的计算机；（2）本区域气象部门发布的气象预报；（3）飞行计划，包括飞机起飞进入航路，飞机从其他区域管制中心进入本区的飞行计划信息。这些信息经过计算机处理后，显示在管制员台板的显示器上。管制员通过显示器所显示的信息对飞行进行管制。



## 2. 管制空域的划分

根据统一划定的飞行航线（空域），为实施空中交通管制的需要，在飞行航线的空间划定不同形式的管制空域，并在地面配置必要的导航设施。管制空域的主要形式有：

(1) 航路：航路是可航行空域中的标志性通道，它连接航空港（导航设施）与空中交通管制交点，通常在飞行频繁的大城市之间划设。航路以连接地面导航设施之间的连线为中心线，有上限高度和下限高度，其宽度通常为距中心线两侧各10千米。航线飞行的飞机都要在航路内飞行并接受管制。

(2) 空中走廊：在飞行条件受限制、飞行极其频繁或机场密集的地区，为了保证空中交通的安全和飞行秩序而划设空中走廊，宽度一般为8—10千米。飞机在走廊内飞行必须保持规定的航向和高度，严格遵从管制员的指挥。

(3) 管制区：为确定各空中交通管制中心管辖的范围，将航路通过的空域又划分为管制区，凡在一个管制区内的航路飞行的飞机，必须服从这一区域空中交通管制中心的管制。管制区的下限高度通常要高于地面200米。

(4) 航站管制区：通常是以机场为中心、半径50—100千米范围的空域，但不包括机场管制塔台所管的范围。

(5) 塔台管制区：通常是以机场为中心、半径9千米左右由地面向上延伸的圆柱形空间。

(6) 等待空域：因为机场起降航线拥挤或天气原因，飞机不能立即着陆时，一些机场都划有等待空域。它通常设在全向信标台附近，飞机可在这个空域的指定高度上绕圈飞行，等待批准着陆。着陆的顺序是最低层飞机先着陆，其它飞机按次序逐层下降等待。