

民航飞行技术与飞行安全科研基地 研究系列丛书

Aircraft Performance
..... Analysis in High Elevation/Complex
Terrain Airports and Routes

高原/地形复杂机场和航线运行的 飞机性能分析

■ 余江 编著

 西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书

**Aircraft Performance Analysis in High
Elevation/Complex Terrain Airports and Routes**
**高原/地形复杂机场和航线运行的
飞机性能分析**

余 江 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书对运输类飞机在高原和复杂地形运行中的性能问题进行了系统论述。包括：高原运行中的性能变化、审定和运行要求，起飞越障分析的步骤和方法，越障限重的确定，一发失效应急程序的制定，航路发动机失效情况下的越障问题，航路座舱释压下的供氧分析问题等。在各章节的内容中，均以 CCAR、FAR、JAR、ICAO 法规要求为导向，以具体机型和实际算例为主线，同时兼顾了波音和空客机型。

本书要求读者具备一定的飞行性能基础知识和民航实际运行经验。

本书可作为相关高等院校和航空公司在性能和运行方面的高级培训教材，适合性能工程师、飞行机组、飞行签派、运行控制、飞行安全等相关领域人员使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

高原/地形复杂机场和航线运行的飞机性能分析 / 余江编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2006.7

(民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书)
ISBN 7-81104-269-X

I. 高... II. 余... III. 民用航空—飞机—飞行品质
IV. V212.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 039502 号

民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书
高原/地形复杂机场和航线运行的飞机性能分析

余 江 编 著

*

责任编辑 孟苏成
责任校对 韩松云
封面设计 何东琳设计工作室
西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 230 mm 印张: 14.25 插页 1

字数: 289 千字

2006 年 7 月第 1 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-81104-269-X

定价: 49.00 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



作者简介

余江，1967年生，重庆涪陵人。北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系飞行力学专业毕业，获工学学士、硕士学位。西南交通大学交通运输学院交通运输规划与管理专业毕业，获工学博士学位。

现任中国民航飞行学院飞行技术学院副教授，主要从事飞行性能分析、飞行运行管理、航空运输系统运行优化、运输飞行经济性方面的课程教学和研究工作。

2003年与他人合著《飞行原理》教材(西南交通大学出版社出版)，2005年获民航总局教材二等奖。1998年和2000年分别获省部级科研成果二等奖与三等奖各一次，院级科研成果一等奖两项。主持一项省部级项目，参与一项国家级自然科学基金项目和四项省部级项目，主持9项院级科研项目。共发表专业学术论文18篇，其中10篇发表在核心期刊。

E-mail:cafucperformance@gmail.com

民航飞行技术与飞行安全科研基地研究系列丛书

委 员 会

主任委员 郑孝雍

副主任委员 李书文 陈布科 黎 新

委 员 (按姓氏笔画为序)

王大海 王照明 李卫东 李书文 李 宜

成义如 刘晓东 刘清贵 伍开元 朱代武

陈布科 张子彦 罗晓利 饶绍武

秘 书 孙海东

序

飞机性能工作在航空公司运行中已占据日益重要的地位，它是性能工程、飞行操作、飞行签派、运行控制、飞行安全等民航核心技术领域的基础。

我国高原面积辽阔、地形复杂，在这些区域的机场进行航空商业运行并确保飞行安全，存在着很多急需解决的性能问题。除了对飞机的适航认证及运行批准外，更多的问题应由航空公司自己解决。如何在这样的地形环境下，满足相关法规的运行要求，从而保障飞行安全，一直是中国民航从局方到航空公司都极为关注的问题。

这些年来，中国民航对于运行的法规建设和相关要求正逐步加强，且得到局方和航空公司的高度关注。1999年5月，CCAR 121部出台；2000年2月，民航总局（以下简称总局）飞行标准司（以下简称飞标司）发布咨询通告AC-FS-2000-2“关于制定起飞一发失效应急程序的通知”；2001年12月，又发布咨询通告AC-121FS-006“飞机航线运营应进行的飞机性能分析”。这些法规和要求涉及高原/地形复杂机场和航线运行的诸多方面。

为贯彻执行运行法规，总局多次组织职能部门、航空公司、飞机制造厂商等召开专门的技术研讨会。2003年，总局飞标司在成都举办全国民航飞机性能工作研讨会，对进一步贯彻落实两个咨询通告提出了要求，发布了飞机航线运营应进行的飞机性能分析的范本；2004年10月，民航总局在成都举办了高原机场运行管理和保障研讨会，总结了民航高原机场运行保证安全的经验，提出了加强飞机性能管理和应用工作的具体要求，提高了航空公司进入高原机场运行的门槛；2005年7月，总局飞标司在大连组织了针对一发失效应急程序的技术会议，拟定了起飞一发失效应急程序制作的范本，讨论了应急程序的审核报批程序，初步确定全国范围内需制定起飞单发应急程序的机场名称及数量；2005年11月，民航总局在北京与美国波音公司、FAA共同召开了一发失效应急程序国际研讨会，全面介绍了美国同行在一发失效应急程序制作和审批方面的经验和要求。这些努力也体现了我们从民航大国走向民航强国的决心。

我国航空公司经过多年的高原运行，形成了很多自己独到的方法，但在大多数方面仍偏于粗放型和经验型，在对运行法规符合性方面差距仍然较大。局方日益提高的运行

要求与民航界薄弱的技术储备间的矛盾仍很突出，我们迫切需要在理论研究和实际运行方面做更多、更细致的工作。

在此，我很欣慰地看到由中国民航飞行学院余江博士编著的这本关于高原/地形复杂机场和航线运行方面的性能专著。该书对目前航空公司在满足法规符合性中所遇到的几个难点性能问题进行了较有深度地研究和阐述，不仅内容全面而且还很及时，特别适合民航的现实需要，对实际运行有着重要的指导作用。

希望民航有关从业人员认真阅读本书，同时也期盼能有更多有价值的书籍和专著问世，以利于全面提高民航飞行运行的安全水平。

民航总局飞行标准司司长



2006年6月5日

前 言

飞机的性能是飞行运行的基础，航空公司必须满足法规要求的性能裕度来确定航线和日常飞行运行数据。例如，确定最大起飞重量便是典型的日常性能工作。飞行性能工作不但要求具有一定的飞行力学、空气动力学、飞机设计基础，要求具备广博的机型知识和民航实际运行经验，更为重要的是，还必须对民航相关法规和要求有深入和正确的理解。

常规的飞行性能教材和相关资料，已对大部分性能分析内容进行了讲授。但是，到目前为止，笔者尚未看到专门针对高原、复杂地形区域运行的性能问题进行深入、系统分析的培训讲义或教材。随着中国民航总局运输类飞机运行法规的颁布（1999年CCAR121部），和民航总局按照法规要求对航空公司进行监管力度的不断加强，再加上我国独特的高原运行环境，补充这方面知识和培训的要求日渐高涨。有感于此，笔者在多年的性能培训、教学经验和科研工作的基础上，编写了这本专著，以期填补这一领域的空白。

本书要求读者具备一定水平的飞行性能基础和民航实际运行经验，因此，并没有对一些基础的飞行性能分析理论进行详细讲授。全书共分5章：第1章，高原运行中的性能变化，主要讲授了高原运行的审定、运行特点和起飞着陆中的性能变化等问题。第2章，起飞越障分析，专门对地形复杂机场中的起飞分析进行了阐述，重点为各种情况下的越障限重确定问题。第3章，一发失效应急程序，系统讲授了地形复杂机场中一发失效起飞情况下的应急程序制定问题。第4章，航路越障分析，讲授了高原航线在一发/双发失效情况下的越障问题，重点是飘降分析。第5章，航路供氧分析，针对高原航线在座舱释压情况下，在满足越障和氧气要求限定下的应急程序问题。

在各章节的内容中，均以法规要求、具体机型和实际算例为主线，达到理论和实际相结合的性能分析目的。本书写作中还同时兼顾了波音和空客机型、美国联邦航空法规和欧洲联合适航要求，以期较大范围的覆盖民航运行实际。

由于飞机的运行是按照法规和手册来进行的，它们均大量使用英美制，这已经成为全球民航界飞机运行的标准。本书的大量数据图表取自于这些法规和手册，其中单位符

号多采用大写，如 KG (kg)、FT (ft)、M (m) 等，本书保留使用这些国际民航界的通用术语、单位和符号，以方便民航界读者学习和使用。

本书的写作得到了国家自然科学基金 (60472128) 和民航总局科研基金 (人发 2005-174) 的支持，在出版中得到了民航总局飞行技术与飞行安全科研基地的资金资助。民航总局飞标司蒋怀宇司长在百忙中审阅本书并作序，中国空气动力研究与发展中心伍开元研究员 (博士生导师)、民航总局飞标司贾建卿高工、中国民航飞行学院刘晓明副教授、民航西南管理局权康帅高工、民航西南管理局云南安监办靳学斋机长对本书进行了审稿，提出了很多宝贵意见，在此深表感谢。在本书的编写中还得到了中国民航飞行学院科研处王大海教授，总局飞行技术与飞行安全科研基地黎新高工，中国国际航空股份有限公司邸伟机长、徐瑞机长以及飞行技术学院领导和飞行力学教研室同仁的大力支持和鼓励。本书部分内容使用了总局、空客和波音公司的培训/会议资料，在此一并表示感谢。

由于编著者水平所限，书中错误和不当之处在所难免，望广大读者批评指正。

余江

2006年6月

目 录

第 1 章 高原运行中的性能变化	1
1.1 高原机场和航线运行的特点	1
1.2 高原运行的性能基础	5
1.3 高度及其低温修正	16
1.4 涡扇发动机的高原特性	22
1.5 高度对低速空气动力特性的影响	26
1.6 高度对起飞性能的影响	28
1.7 高度对着陆性能的影响	33
第 2 章 起飞越障分析	44
2.1 概念及法规背景	44
2.2 转弯分析	49
2.3 飞行航道的调整	54
2.4 越障分析-AFM 图表	57
2.5 越障分析-AFM-DPI 软件	78
2.6 机场分析表	85
2.7 相关法规原文	90
第 3 章 一发失效应急程序	95
3.1 一发失效应急程序的意义	95
3.2 标准仪表离场程序与一发失效应急程序	96
3.3 一发失效应急程序制定所需的资料和数据	101
3.4 正常起飞分析	104
3.5 SID 飞行的性能验证	111
3.6 应急程序航迹的确定	121
3.7 应急程序航迹的性能验证	130
3.8 应急程序的完成	136

第 4 章 航路越障分析	138
4.1 正常下降、非正常下降与飘降	138
4.2 飞机的一发失效性能	140
4.3 航路运行的法规和要求	145
4.4 飘降分析的内容	153
4.5 其他需要考虑的事项	164
4.6 航路越障分析—波音算例	167
4.7 相关法规原文	174
第 5 章 航路供氧分析	178
5.1 缺氧对人体生理的影响	179
5.2 机载供氧系统的类型与特点	180
5.3 相关法规要求	184
5.4 供氧分析的内容	187
5.5 航路供氧分析—波音算例	198
5.6 相关法规原文	205
附 录	213
一、符号表	213
二、缩略语表	214
三、单位转换表	216
参考资料	217

目前,在国内民航界,一般定义机场标高大于 1 500 m 的机场为高原机场,标高大于 2 560 m 的机场为高高原机场。表 1.1 列出了我国西南地区的高原机场和高高原机场概况,其中备注一栏中,“离”表示离场程序要求的梯度;GP 表示 ILS 下滑道坡度;E 表示东;N 表示北;S 表示南。

表 1.1 西南地区高原机场一览表

序号	机场名称	跑道(m×m)	标高[m (ft)]	导航设备	备注
1	昌都/邦达	4 200×45	4 334.0 (14 219)	14-ILS, DME, VOR	
2	拉萨/贡嘎	4 000×45	3 569.5 (11 711)	27-ILS, DME, VOR, NDB	离 E4.5%
3	九寨/黄龙	3 200×45	3 447.7 (11 311)	20-ILS, DME, VOR	离 N5.7%GP3.3
4	迪庆/中甸	3 600×45	3 287.9 (10 787)	16-ILS, DME, VOR	GP3.1
5	丽江/三义	2 500×45	2 242.6 (7 358)	20-ILS, DME, VOR, NDB	离 N5.3%GP3.5
6	大理/荒草坝	2 600×45	2 155.4 (7 071)	17-ILS, DME, VOR	离 S3.7%GP3.2
7	攀枝花/保安营	2 800×45	1 980.2 (6 497)	20-ILS, DME, VOR	
8	昭通	2 600×45	1 935.7 (6 351)	04-ILS, DME, VOR, NDB	
9	临沧/博尚	2 400×45	1 896.5 (6 222)	16-ILS, DME, VOR	离 N5.7%S4.0%GP3.2
10	昆明/巫家坝	3 400×45	1 894.9 (6 217)	03/21-ILS, DME, VOR	离 N5%
11	保山	2 400×45	1 644.1 (5 460)	19-ILS, DME, VOR	离 N3.6%
12	西昌/青山	3 600×50	1 558.0 (5 111)	36-ILS, DME, VOR, NDB	离 S3.3%

在表 1.1 所列的四个高高原机场中,大型运输航空公司开辟定期航线使用的飞机机型如表 1.2 所列(截至 2005 年)。

表 1.2 西南地区高高原机场运行的机型

机场	使用机型
九寨/黄龙	B737-600、B737-700、B757-200、A319、A320
拉萨/贡嘎	B737-700 (24K)、B757-200、A319、A340
昌都/邦达	B757-200、A319
迪庆/中甸	B737-700、B737-800、B757-200、A319

高原机场及航线运行中,会涉及很多低海拔地区运行所没有的新问题。这些问题涉及法规认证、操作程序、飞行性能、飞行安全等诸多领域。概括起来可分为以下几个方面:

1. 运行环境复杂

中国西部的机场多为高原山区机场，运行区域海拔较高。如邦达机场的标高为 4 334 m (14 219 ft)，是迄今为止世界上最高的民用机场。

净空环境差，起飞离场和着陆下滑进近梯度大。如九寨/黄龙机场离场程序要求的上升梯度达到 5.7%，仪表进近下滑道达到 3.3°。机场建于一连续的山腰上，海拔 3 448 m，机场北侧是一个逐渐展开的缓坡，东侧、西侧和北侧均有山谷或沟壑，机场南侧多山，50 km 半径内有高山 57 座，位于机场东南东 7 km 处的红星岩海拔 5 003 m，机场东南 25 km 处的岷山主峰雪宝顶海拔 5 588 m。

气象条件复杂，低云、低能见度，多雷暴、阵性风和风切变。高原山区的乱流比一般山地更为强烈，以青藏高原来说，那里群山重叠，峭壁高耸，地形动力乱流十分显著；而且因为高原上空气稀薄，太阳辐射强，气温变化大，热力乱流也强，二者常结合在一起，形成强烈乱流。所以，高原飞行中飞机颠簸是很常见的，在山口、狭谷地带，午后颠簸更为强烈。如成都—拉萨高原航线，冬春季节的高空风速高达 300 km/h，遇到严重的风切变，剧烈的颠簸可以把人抛离座位。从九寨/黄龙机场监测站的统计资料看：2003 年 10 月至 2004 年 4 月多次发生风切变，造成飞机返航的有 5 次。监测发现风切变多次发生在主降方向，距跑道北头 13~20 km 左右、相对跑道面 1 000~1 500 m 左右是产生风切变的区域。

航路最低安全高度高，通信导航信号受地形影响大，导航设备限制使用。如成都—拉萨高原航线，全长 1 300 km，起飞离开成都平原便进入了安全高度在 6 334 m（昌都前）和 7 470 m（昌都后）的地形险峻的高山区。在航路两侧，有多座高度在 8 000 m 以上的山峰。航线高山区终年积雪，渺无人烟，几乎没有平地，能提供导航的昌都导航台，信号摆动大且接收距离近。

对飞机性能、发动机和机载设备要求高。飞行操纵及飞行程序复杂，对飞行机组的基本驾驶技术和综合素质要求高。

机场基础设施薄弱，空管手段和设备较为落后。在运行保障、运行合格审定以及行业监管方面的工作难度很大。

2. 高原运行对飞机系统和性能的要求

飞机的飞行活动范围由飞机的环境包线确定。环境包线又称使用限制包线，是考虑到飞机的飞行、结构、动力装置、功能和设备特性的各种限制，确定的飞机允许使用的环境温度和气压高度范围。在包线内，飞机的飞行性能和飞机设备都符合审定的要求。

环境包线给出了飞机在正常情况下的最大起降高度。典型飞机的最大起降高度为：
A319/A320：9 200 ft；B737/B757：8 400 ft。

为了使飞机能够在正常环境包线以外的机场起降运行，飞机制造厂商必须向适航管

理当局进行性能取证和包线扩展，提供高高度机场的起飞性能数据。例如，对于 B757 的取证起降高度为 14 000 ft，对于 A319 的取证起降高度为 14 500 ft。

在座舱高度超出环境包线的最大起降高度一定值之后，会出现“客舱高度过高”的警告。例如，A319/A321 出现这一警告的座舱高度阈值固定在 9 550 ft。未经改装的飞机不允许在高于 9 200 ft 以上运行。A320 的环境包线见图 1.2，图中 OAT 为外部大气温度。

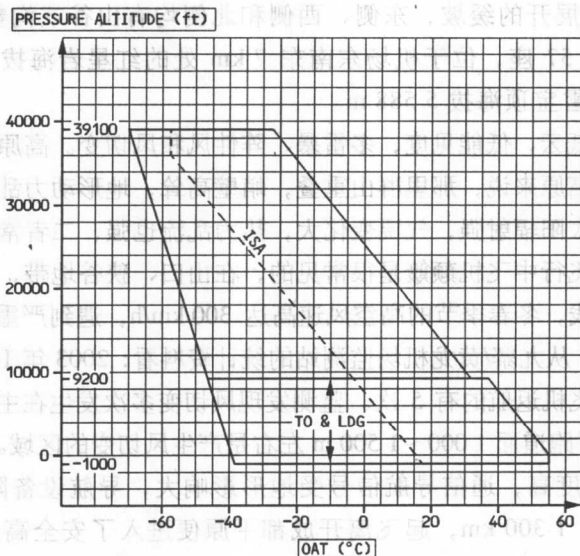


图 1.2 A320 环境包线

在座舱高度超出环境包线的最大起降高度，继续增加到一定值之后，会导致客舱旅客氧气面罩自动脱落，需要改装飞机客舱旅客氧气面罩自动脱落的新阈值。例如，空客系列的飞机这一座舱高度值为 14 000 ft，为在更高高度的机场运行，新审定阈值重新设定为 16 000 ft，从而允许飞机在超过 14 000 ft 以上的机场进行起降。

通过座舱内专门设计的高高度开关，来分别控制飞机在高原机场和低海拔机场起降。图 1.3 给出了空客驾驶舱面板上的高高度电门示意图。

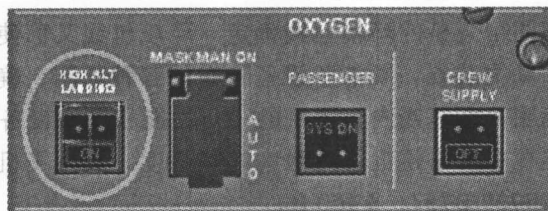


图 1.3 空客驾驶舱面板上的高高度电门

运输类飞机必须保证,在巡航中任意一点出现发动机失效的情况下,仍能提供足够的安全水平。双发飞机考虑一发失效,三发和四发飞机考虑两发同时失效,并确保在这样的情况下飞机能够安全飞越航路障碍物。这种性能分析称为飘降分析。

飘降分析以飞机净航迹为基础,在最大重量和最坏天气状况下,对飞机在飘降过程中和飘降改平后的飞行进行越障检查,越障考虑的范围以航空运行法规规定为准(CCAR121为航迹两侧各25 km)。

飘降分析的结果是确定可以安全越障的最大起飞重量,即航路安全高度限重;确定航路上发动机失效后可安全越障的临界决策点、航路备降场等。

法规要求,高空运行的增压式运输类飞机,必须考虑巡航中座舱释压问题。必须按法规规定的、按高度和时间确定的供氧量来对机组和旅客进行供氧。山区高原航线飞行,飞机在座舱释压后,由于障碍物的限制,可能不能马上下降到一个较低的高度(10 000 ft),在全发状态下确保飞机的实际航迹以法规要求越障,并且,飞行下降剖面在飞机的氧气系统限制以内。这种分析称为飞机的供氧分析。

供氧分析的结果一是确保飞机氧气系统在航路任意一点发生座舱释压后,飞机供氧量能满足法规要求;二是确定航路临界决策点、航路备降场、紧急下降程序。

高原机场一般常常伴随着飞行性能下降和机场净空条件差的问题,按照法规的要求,必须确保起飞、着陆中出现一发失效情况下的飞行安全。高原机场面临着一发失效后飞机上升/复飞梯度减小,真空速增大,其结果导致飞机一发失效离场轨迹和复飞轨迹的拉长和降低,为此必须进行专门的越障分析,以及制定与机型相关的一发失效应急程序。

以上所有这些工作均取决于地形和障碍物的分布,因此获取准确和可靠的地形数据是其前提。在现阶段,完成这项工作需要进行大量的手工地图作业。

高原机场的运行还涉及其他方面的细节问题。如发动机性能的降低问题、超温问题、飞行性能的降低问题、刹车能量管理和爆胎问题、高原气候特点问题、山区机场气象特点问题、缺氧对生理和心理的影响问题、机组配合与决策问题,等等。这些都将导致高原机场的运行有别于低海拔地区机场。

1.2 高原运行的性能基础

1.2.1 密度比、温度比、压强比

根据国际标准大气(ISA),海平面标准气温为 15°C ,对流层内其他高度处的外部大气温度OAT可计算为:

$$OAT = 15 - 0.001\ 981\ 2 \times h_p + \Delta ISA \quad (^\circ\text{C})$$

式中, h_p 为以英尺表示的压力高度 (Pressure Altitude); 对流层上的 OAT 为常值 -56.5°C 。

性能计算中常常需要计算真空速, 计算真空速就必须知道大气密度。为使这种计算简便化, 引入三个概念: 密度比、温度比、压强比。

密度比是当地高度大气密度与国际标准大气海平面密度之比, 用符号 σ 表示, 因此:

$$\sigma = \rho / \rho_0$$

在英美制中的密度单位为 slug/ft³。海平面标准密度为 0.002 37 slug/ft³。

温度比是当地高度大气温度与国际标准大气海平面温度之比, 用符号 θ 表示, 因此:

$$\theta = T / T_0 = T / 288.15$$

上式中温度单位为绝对温度开。对流层内, 温度比还可直接计算为:

$$\theta = \frac{288.15 - (0.001\ 981\ 2 \times h_p) + \Delta ISA}{288.15}$$

压强比是当地高度大气压强与国际标准大气海平面压强之比, 用符号 δ 表示, 因此:

$$\delta = P / P_0$$

对流层内, 压强比还可直接计算为:

$$\delta = \left(\frac{288.15 - 0.001\ 981\ 2 \times h_p}{288.15} \right)^{5.255\ 88}$$

最后, 三个概念的关系为:

$$\delta = \sigma \times \theta$$

下面通过一个具体实例来说明上述公式的用法。

例 1.1 某机场的实际温度为 30°C , 标准海压高度 3 000 ft, 求空气密度。

解 温度比

$$\theta = T / T_0 = (273.15 + 30) / 288.15 = 1.052\ 1$$

查国际标准大气表 (见表 1.3) 得到, 3 000 ft 处的压强比 $\delta = 0.896\ 2$, 因此, 密度比

$$\sigma = \delta / \theta = 0.896\ 2 / 1.052\ 1 = 0.851\ 8$$

所求的空气密度为:

$$\rho = \rho_0 \sigma = 0.002\ 37 \times 0.851\ 8 = 0.002\ 024\ 7 \text{ slug/ft}^3$$

另外还需要提及的是, 一般所指的温度均为外部静止大气的温度即 OAT, 这一概念