

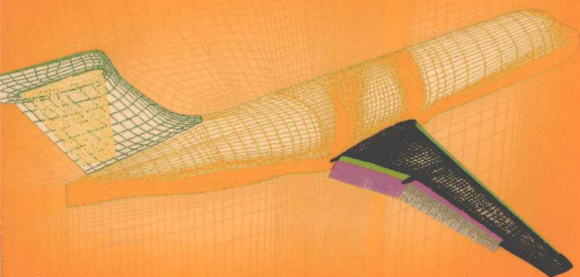


大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

运输类飞机的空气动力设计

Aerodynamic Design of Transport Aircraft

【荷兰】艾德·奥波特 著
顾诵芬 吴兴世 杨新军 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

运输类飞机的空气动力设计

Aerodynamic Design of Transport Aircraft

【荷兰】艾德·奥波特 著
顾诵芬 吴兴世 杨新军 译

基于艾德·奥波特经罗纳尔德·斯林格兰德增订的原始讲稿

原书版面设计制作
德比尔·J·W·雷森克
托比尔·范登博格
贾斯汀·H·孔宁



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书在原福克飞机公司气动部门负责人为荷兰代尔夫特理工大学航空航天工程学院编写的教材基础上修订增补,旨在为现代高亚声速民用运输类飞机的部件和全机空气动力设计提供指南。

全书共 45 章,涵盖基本原理和各种理论方法,深入浅出地阐明复杂气动现象的机理,提供丰富的飞机型号风洞实验及飞行试验数据支持,介绍了适航规章对运输类飞机气动设计的重大影响。本书面向民用飞机研制实践编撰,内容丰富,并有确切的信息来源。

本书可供从事飞机研制的航空工程技术人员参考,也适用于飞机设计和空气动力学专业的高年级大学生和研究生。

(运输类飞机的空气动力设计)

© E. Obert

This translation of *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* is published by arrangement with IOS Press under the imprint Delft University Press in Amsterdam, the Netherlands.

上海市版权局著作权合同登记章图字:09-2010-087

图书在版编目(CIP)数据

运输类飞机的空气动力设计/(荷)奥波特(Obert, E.)著;
顾诵芬,吴兴世,杨新军译.—上海:上海交通大学出版社,
2010

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-06864-4

I. ①运… II. ①奥…②顾…③吴…④杨…
III. ①运输机—空气动力学 IV. ①V271.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 195657 号

运输类飞机的空气动力设计

[荷兰] 艾德·奥波特 著

顾诵芬 吴兴世 杨新军 译

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:36.75 字数:729 千字

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-06864-4/V 定价:168.00 元

版权所有 侵权必究

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编：

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、两院院士）

副总主编：

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司副董事长、总经理）

马德秀（上海交通大学党委书记、教授）

编 委：（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘 洪（上海交通大学航空航天学院教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系主任、教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪 海（上海交通大学航空航天学院副院长、研究员）

沈元康（国家民航总局原副局长、研究员）

陈 刚（上海交通大学副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学副校长、教授）

金兴明（上海市经济与信息化委副主任、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅 山（上海交通大学航空航天学院研究员）

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、重于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展,应用和体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008 年 5 月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教 1 时,亲自撰写了《飞机性能捷算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》、《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展 50 年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理 50 多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》), 由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》) 等国外最新科技的结晶; 国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》、《民用飞机气动设计》等专业细分的著作; 也有《民机设计5000问》、《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助, 体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命, 凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果, 具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性, 既可作为实际工作指导用书, 亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养, 有益于航空工业的发展, 有益于大飞机的成功研制。同时, 希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空, 并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

谨以此书纪念罗纳德·斯林格兰德博士和汉斯·维腾堡教授。
维腾堡教授鼓励作者加入福克公司并随后担任代尔夫特理工大学航空航天工程学院的兼职教授。

艾德·奥波特

原版前言

作者早在受聘为代尔夫特理工大学航空航天工程学院兼职教授时,就萌发了写这本书的冲动。当时,作者的主要工作是主持福克飞机公司的气动、性能和初步设计部门。

这本书经过了长期的酝酿。最初是1987年的一系列讲稿,主要是一些图示材料辅以极少量英文注释。课程名为“气动设计和飞机运行”。1996年福克公司破产之后,学院担心公众对航空工程兴趣大减,这门课程停开,作者与学院的关系也就结束了。

两年后,重新评估形势,公众对航空工程仍然很感兴趣,所以这门课程又恢复了。该课程更名为“运输类飞机的空气动力设计”,由作者以前在福克公司的同事罗纳德·斯林格兰德主讲。罗纳德主要使用作者的讲稿,但采取对他的讲课录像的新办法。三名学生助理:德比尔·雷森克、托比尔·范登博格和贾斯汀·孔宁承担了将用英语讲解的课程录像整理成文稿的艰巨任务。他们完成得非常好。2007年夏天,这项工作取得长足进展,保证完成的初版新讲稿可及时供秋季新学年使用。

2007年10月罗纳德·斯林格兰德在轻型飞机空中相撞事故中不幸遇难。作为弥补措施,作者应邀继续完成这门课程,并校订新讲稿。

学院决定不受这些不幸事件的影响,讲稿还是要作为教科书出版。这就要求重新考虑书中的内容。首先需要更新,因为原书稿基本上是20年前的内容。其次,如果本书用于比航空航天学院更大的范围,所使用的语言要规范化。作者承担了这些任务,取得了目前的成果。但是如果没有作者的上述三位助教的不懈努力和奉献,版面设计和全貌就不会这么出色。

本书主要是描述性的。假定读者熟悉空气动力学、飞机稳定性和操纵性以及性能分析的基本知识。如果需要了解详细的气动设计过程、相关的计算机程序和详尽的量化性能分析,读者应再查找其他文献资料。书中的插图和示例取自许多文献,已在插图标题和书末参考文献栏目注明。所介绍的部分数据或许已经过时,但出于其历史价值,还是予以保留。

部分插图没有注明来源。在遍及全世界、成百上千的用户都使用某些飞机型号的时代,很难设想制造商数据能限定在预想的小范围内。性能工程师手册、飞行模拟器手册、销售宣传材料等分发给各种对象。现代制造项目需要合作伙伴、承包商、供应商等等互相保持有广泛数据交换的密切接触。制造商的销售代表和用户的机队采购部门代表之间具有正式的和非正式的联系。正如在军界和政治情报界一样,敏感信息被局限在一个外部世界不了解的封闭圈子里,但是对其最感兴趣的竞争对手方面常常也知晓这些信息。尽管本书中部分信息没有交代出处,读者可以放心,它们有根有据。

作者的好友和过去的同事卡尔·P·斯托克斯校阅了本书,他后来供职于英国 BAE 系统公司沃顿分部。为了加快推出本书,作者只吸取了他纠正语言方面重大笔误的意见。如仍有英语文字使用不当或提供信息有误之处,作者负全部责任。

最后,作者感谢荷兰国家航空航天实验室 NLR 的布莱姆·爱森纳(现已退休),他推导了第 10 章介绍的当地静压和当地马赫数之间的关系,还要感谢尼克·沃格特(过去供职福克飞机公司,现就职波音公司)检查和订正了作者在第 24 章中表述的关于现代计算流体动力学方法应用的观点。

艾德·奥波特

符 号 表

符号	物理量	单位
a	声速	m/s 或者 ft/s
A 、 A_w	机翼展弦比	—
A_h	水平尾翼展弦比	—
A_v	垂直尾翼展弦比	—
A_∞	无穷远处入口流管横截面积	m ² 或者 ft ²
A_E 、 A_e	喷管面积	m ² 或者 ft ²
A_{HL}	进口面积	m ² 或者 ft ²
A_{TH}	喉道面积	m ² 或者 ft ²
b 、 b_w	机翼翼展	m 或者 ft(英尺, 1 ft = 3.048 × 10 ⁻¹ m)
c	弦长	m 或者 ft
$\bar{c}$	平均气动弦长	m 或者 ft
c_d	翼型剖面阻力系数, $c_d = D / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 c \right)$	—
c_r	方向舵弦长	m 或者 ft
c_v	垂直尾翼弦长	m 或者 ft
C_D	阻力系数, $C_D = D / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S \right)$	—
C_D	排放系数(质量流量系数)	—
C_{D_i}	诱导阻力系数, $C_{D_i} = D_i / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S \right)$	—
C_{D_0}	零升阻力系数, $C_{D_0} = D_0 / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S \right)$	—

C_{Dp}	翼型阻力系数	—
$C_{D_{trim}}$	配平阻力系数	—
$C_{D_{lmin}}$	最小型阻系数	—
c_f	平均摩擦系数 ^① , $c_f = \text{摩擦力} / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 l \right)$	—
$\bar{c}_f, C_F$	等效平板摩擦阻力系数	—
c_l	翼剖面升力系数, $c_l = L / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 c \right)$	—
$c_{l_{max}}$	翼剖面最大升力系数	—
C_{h_a}	副翼铰链力矩系数	—
C_{h_r}	方向舵铰链力矩系数	—
C_{h_e}	升降舵铰链力矩系数	—
C_l	滚转力矩系数	—
C_L	升力系数, $C_L = L / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S \right)$	—
$C_{L_{app}}$	着陆进场升力系数	—
C_{L_h}	水平尾翼升力系数, $C_{L_h} = L_h / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S_h \right)$	—
C_{L_v}	垂直尾翼升力系数, $C_{L_v} = L_v / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S_v \right)$	—
$C_{l_{max}}$	最大升力系数	—
$C_{l_{T=0}}$	无尾升力系数	—
$C_{l_{trim}}$	配平升力系数	—
$C_{L, \alpha}$	升力线斜率	$\frac{1}{(^\circ)}$ 或者 $\frac{1}{\text{rad}}$
ΔC_L	由于襟翼偏转带来的升力系数变化	—
$(\Delta C_L)_{\alpha=0}$	$\alpha = 0$ 时由于襟翼偏转带来的升力系数变化	—
C_m	俯仰力矩系数, $C_m = M / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S \bar{c} \right)$	—
C_{m_0}	飞机的无尾零升俯仰力矩系数	—
$C_{m_{T=0}}$	无尾俯仰力矩系数	—
$C_{m_{30}}$	力矩参考点位于 $0.30 \bar{c}$ 时的俯仰力矩系数	—

① 此处指翼型或二元平板的摩擦系数,译者注。

c_n	剖面法向力系数	—
C_n	偏航力矩系数, $C_n = N / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S b \right)$	—
C_p, c_p	压强系数, $c_p = (p - p_0) / \left(\frac{1}{2} \rho V_0^2 \right)$	—
$c_{p_{crit}}, c_p^*$	$M_{loc} = 1.0$ 时的压强系数	—
$c_{p_{min}}$	最小压强系数	—
$c_{p_{TE}}$	后缘压强系数	—
C_T	比油耗	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \text{kgf}^{-1}$ 或者 $\text{lb} \cdot \text{h}^{-1} \text{lbf}^{-1}$
C_T	螺旋桨总拉力系数, $C_T = T / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 S_w \right)$	—
C_T	推力系数, $C_T = \text{实际总推力} / \text{理想总推力}$	—
C_v	速度系数	—
c. g.	重心	—
D	阻力	N, kgf 或者 lbf, 1 kgf = 9.81 N
D_i	诱导阻力	N, kgf 或者 lbf, 1 lbf = 4.448 N
D_0	零升阻力	N, kgf 或者 lbf
D_{prop}	螺旋桨直径	m 或者 ft
D_{HL}	进气道进口直径	m 或者 ft
D_{TH}	进气道喉道直径	m 或者 ft
e	“奥斯瓦尔德”效率系数	—
F	总推力	N, kgf 或者 lbf
F_c	升降舵杆力	N, kgf 或者 lbf
g	重力加速度	m/s^2 或者 ft/s^2
h	高度	m 或者 ft
i_h	平尾(水平安定面)安装角	(°) 或者 rad
J	螺旋桨进距比, $J = V / (n D_{prop})$, 其中 $n = \text{每分钟的转速}$	—
k, k_s	分布的或者等效砂粒粗糙度的颗粒尺寸	mm 或者 in(英寸, 1 in = 2.54 cm)

K	形状因子	—
L	升力	N, kg 或者 lb
L, l	长度	m 或者 ft
L_h	平尾升力	N, kg 或者 lb
l_h	平尾力臂	m 或者 ft
L_v	垂直尾翼升力(侧力)	N, kg 或者 lb
m	质量	kg 或者 lb
$\dot{m}, W_A$	质量流量	kg/s 或者 lb/s
M	俯仰力矩	Nm, kgf · m 或者 lbf · ft
M	马赫数	—
M_0, M_∞	自由流马赫数	—
M_L, M_{loc}	当地马赫数	—
M_{MO}	最大使用马赫数	—
M_D	设计俯冲马赫数	—
M_{SBO}	抖振发生时激波前方的当地马赫数	—
n	法向过载	—
N	偏航力矩	Nm, kgf · m 或者 lbf · ft
p	滚转速率	(°)/s 或者 rad/s
p	静压	N/m ² , kgf/m ² 或者 lbf/ft ²
p_0, p_∞	自由流静压	N/m ² , kgf/m ² 或者 lbf/ft ²
p_t, p_T	总压	N/m ² , kgf/m ² 或者 lbf/ft ²
p_{T_∞}	自由流总压	N/m ² , kgf/m ² 或者 lbf/ft ²
p_{T_2}	压气机端面处的总压	N/m ² , kgf/m ² 或者 lbf/ft ²
q	动压, $q = \frac{1}{2}\rho V^2$	N/m ² , kgf/m ² 或者 lbf/ft ²
q_0	自由流动压	N/m ² , kgf/m ² 或者 lbf/ft ²
q_h	平尾处的平均动压	N/m ² , kgf/m ² 或者 lbf/ft ²
r	偏航速率	(°)/s 或者 rad/s
r	曲率半径	m 或者 ft
R	普适气体常数	—
R	航程	km 或者 n mile
Re, R	雷诺数	—

Δs	空气质点单元面积	m^2 或者 ft^2
S	覆盖距离	km 或者 n mile
S, S_w	机翼面积	m^2 或者 ft^2
S_h	平尾面积	m^2 或者 ft^2
S_v	垂直尾翼面积	m^2 或者 ft^2
S_{wet}	浸润面积	m^2 或者 ft^2
t	翼型剖面厚度	m 或者 ft
T	温度	$^{\circ}\text{C}$
T	推力	N , kgf 或者 lbf
T_C	单个螺旋桨拉力系数	—
	$T_C = T / \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \frac{\pi}{4} D_{\text{prop}}^2 \right)$	
T_T	总温	$^{\circ}\text{C}$
u	边界层中的气流流动速度	m/s 或者 ft/s
U	边界层边缘处的气流流动速度	m/s 或者 ft/s
V	空速, 流动速度	m/s 或者 ft/s
V_0	自由流速度	m/s 或者 ft/s
V_1	发动机失效起飞决断速度	m/s 或者 kn (节, $1 \text{ kn} = 1.852 \text{ km/h} = 0.514 \text{ m/s}$)
V_2	单发失效初始爬升速度	m/s 或者 kn
V_e	排气速度	m/s 或者 ft/s
$\bar{V}_h$	平尾容量系数, $\bar{V}_h = S_h L_h / (S_w \bar{c})$	—
V_{app}	进场速度	m/s 或者 kn
V_D	设计俯冲速度	m/s 或者 kn
V_{LO}	离地速度	m/s 或者 kn
V_{MC}	最小操纵速度	m/s 或者 kn
V_{MO}	最大使用速度	m/s 或者 kn
V_{MU}	最小离地速度	m/s 或者 kn
V_S	失速速度	m/s 或者 kn
W	重量	N , kgf 或者 lbf
X, x	沿 X 轴到原点的距离	m 或者 ft
$x_{a.c.}$	气动中心位置	m 或者 ft

$x_{c.g.}$	重心位置	m 或者 ft
$x_{n.p.}$	中性点位置	m 或者 ft
Y, y	沿 Y 轴到原点的距离	m 或者 ft
Z, z	沿 Z 轴到原点的距离	m 或者 ft
α	迎角	($^{\circ}$) 或者 rad
α_0	无尾飞机零升力迎角	($^{\circ}$) 或者 rad
α_h	平尾平均迎角	($^{\circ}$) 或者 rad
α_v	垂直尾翼平均迎角	($^{\circ}$) 或者 rad
$\alpha_{C_{L=0}}$	零升力迎角	($^{\circ}$) 或者 rad
α_R	相对于基准线的迎角, 常常采用机身中线 作为基准线	($^{\circ}$) 或者 rad
β	侧滑角	($^{\circ}$) 或者 rad
β	桨叶角	($^{\circ}$) 或者 rad
γ	飞行航迹角	($^{\circ}$) 或者 rad
γ	比热比	—
δ	大气压比, $\delta = p/p_0$	—
δ_a	副翼偏度	($^{\circ}$) 或者 rad
δ_e	升降舵偏度	($^{\circ}$) 或者 rad
δ_f	襟翼偏度	($^{\circ}$) 或者 rad
δ_r	方向舵偏度	($^{\circ}$) 或者 rad
δ_s	前缘缝翼偏度	($^{\circ}$) 或者 rad
δ_{sa}	副翼扰流板偏度	($^{\circ}$) 或者 rad
δ_{sp}	扰流板偏度	($^{\circ}$) 或者 rad
δ^*	边界层位移厚度	m 或者 ft
ϵ	下洗角	($^{\circ}$) 或者 rad
ϵ_0	$\alpha = 0$ 时的下洗角	($^{\circ}$) 或者 rad
λ	尖削比	($^{\circ}$)
Λ	后掠角	($^{\circ}$) 或者 rad
ν	运动黏度	m^2/s 或者 ft^2/s
μ	(跑道和轮胎之间摩擦) 摩擦系数	—
ρ	空气密度	kg/m^3 , kgs^2/m^4 或 者 lbs^2/ft^4

σ	大气密度比 $\sigma = \rho/\rho_0$	—
θ	大气静温比, $\theta = T/T_0$	—
θ	扩散段偏角	(°)或者 rad
θ	动量厚度	m 或者 ft
η	沿翼展方向的机翼相对站位, $\eta = y/(b/2)$	—
φ	机翼后掠角(英国标识)	(°)或者 rad
ω	角速度	(°)/s 或者 rad/s