

研究尾旋的风洞试验技术

Wind Tunnel Techniques for Studying Spin

李永富 陈洪 编著



国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

研究尾旋的风洞试验技术/李永富,陈洪编著. —北京:国防工业出版社,2002.8

ISBN 7-118-02738-3

I. 研… II. ①李… ②陈… III. 立式风洞—风洞试验 IV. V211.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 086780 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6¼ 156 千字

2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:17.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	殷鹤龄			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	崔士义	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	彭华良	韩祖南	舒长胜

前 言

尾旋是飞机最复杂也是最危险的飞行状态之一,常被称之为极限状态飞行。为了分析和预测尾旋、防止尾旋事故,人们为之苦心研究已近 90 年。尾旋预测技术随飞机性能提高而逐步发展和完善,但要完全消除尾旋的潜在威胁,对尾旋和尾旋预测技术的进一步研究,仍是一项长期而艰巨的任务。特别是现代和未来高性能战斗机在大迎角下的过失速机动飞行,伴随的是非对称、非定常和高度非线性的气动特性,这对包括尾旋和尾旋改出特性的飞机动力学特性的正确分析和准确预测提出了更高、难度更大的要求,同时也将使相关的分析和预测技术不断向前推进。

大量军用和通用飞机的设计和使用经验表明,在从飞机初步设计阶段到原型机试飞的整个研制过程中,必须同时或交叉采用多种预测技术,才可能成功地预测给定飞机的失速/尾旋特性。

本书仅仅阐述预测研究飞机尾旋的风洞试验技术以及通过这些技术获得的数据的分析应用,不具体涉及其他预测飞机尾旋的技术。在介绍了飞机尾旋的基本概念后,重点叙述立式风洞尾旋试验技术和普通风洞试验技术即低速大迎角静态测力、强迫振荡运动、圆锥运动(旋转天平测力)和非定常气动力(大幅度快速俯仰振荡运动)等风洞试验技术,以及如何运用这些风洞试验技术获得的气动数据来分析飞机的大迎角空气动力特性、飞机大迎角飞行动态特性和预测飞机的极限状态飞行——失速/尾旋特性。

本书的编写,综合了国内外出版物中诸多作者和研究人员的研究成果,也包含了编者自己长期从事风洞试验设备研制、试验技术研究、风洞试验和尾旋特性预测分析所积累的经验。当然,有些章节的内容可能不够完善,但编者希望本书能为从事飞机失速/尾

旋风洞试验研究以及飞机气动设计的工程师们提供可能的指导或有益的参考。

贺德馨、沈礼敏两位研究员审阅了本书手稿,并提出了宝贵意见,编者在此深表谢意;同时也对在本书的编写、出版过程中给予热情支持和帮助的其他同志表示感谢。

由于编者水平限制,本书肯定有不少不妥之处、甚至错误,特别是在使用新颁布的空气动力学和飞行力学的概念、量和符号的标准方面对原有公式、符号等的变换中难免会有疏漏,欢迎读者批评指正。

编 者

2000年5月

目 录

主要符号	1
第一章 飞机尾旋研究概况	6
1.1 飞机尾旋研究的回顾	6
1.2 飞机尾旋研究的任务	8
1.3 预测研究飞机尾旋的技术	9
参考文献	10
第二章 基本定义和概念	12
2.1 坐标轴系和飞机运动状态参数	12
2.2 飞机的飞行状态	18
2.3 飞机的运动特性	26
参考文献	30
第三章 飞机的运动方程	31
3.1 研究飞机尾旋的运动方程	31
3.2 空气动力数学模型	33
3.3 飞机的失速和尾旋动态特性参数	37
参考文献	38
第四章 模型自由飞风洞试验	39
4.1 模型自由飞试验的相似准则	39
4.2 模型失速/偏离自由飞风洞试验	40
4.3 立式风洞模型自由飞尾旋试验	42
参考文献	56
第五章 普通低速风洞试验技术	58
5.1 大迎角静态测力风洞试验技术	58
5.2 强迫振荡风洞试验技术	68

5.3 旋转天平风洞试验技术	78
5.4 非定常气动力风洞试验技术	89
参考文献	97
第六章 飞机低速大迎角空气动力特性	100
6.1 静态空气动力特性	100
6.2 振荡运动中的空气动力特性	116
6.3 旋转运动中的空气动力特性	125
6.4 大迎角非定常空气动力特性	135
参考文献	143
第七章 飞机大迎角飞行动态特性	145
7.1 最大可用升力	145
7.2 近失速/过失速	147
7.3 偏离解析	160
7.4 偏离/尾旋进入	163
7.5 极限状态飞行——尾旋的预测分析	164
7.6 尾旋改出	165
参考文献	167
第八章 失速和尾旋特性预测	170
8.1 风洞自由飞法	170
8.2 预测分析法	171
8.3 相关性分析	182
参考文献	183

Contents

Main Symbols	1
Chapter 1 Survey of Airplane Spin Research	6
1.1 A Brief Review of the History of Airplane Spin Research	6
1.2 Mission of Airplane Spin Research	8
1.3 Techniques to Predict and Study Airplane Spin	9
References	10
Chapter 2 Basic Definitions and Concepts	12
2.1 Axis Systems and Aircraft Motion State Parameters	12
2.2 Aircraft Flight States	18
2.3 Aircraft Motion Characteristics	26
References	30
Chapter 3 Airplane Motion Equations	31
3.1 Motion Equations for Studying Airplane Spins	31
3.2 Aerodynamic Mathematical Models	33
3.3 Dynamic Behavior Parameters of Airplane Stall and Spin	37
References	38
Chapter 4 Free-Flight Tests of Model in Wind Tunnels	39
4.1 Similarity Criteria for Free-Flight Tests of Model	39
4.2 Wind Tunnel Free-Flight Tests of Model for	

Stall/Departure	40
4.3 Spin Tests of Model in Vertical Wind Tunnels	42
References	56
Chapter 5 Techniques for Studying Airplane Stall/	
Spin in Common Low Speed Wind Tunnels	58
5.1 Static Force Test Techniques at High Angles of Attack	58
5.2 Forced Oscillation Test Techniques	68
5.3 Rotary Balance Test Techniques	78
5.4 Test Techniques for Measuring Unsteady Aerody- namics	89
References	97
Chapter 6 Low speed Aerodynamic Characteristics of	
Aircraft at High Angles of Attack	100
6.1 Static Aerodynamic Characteristics	100
6.2 Aerodynamic Characteristics in Oscillation Motion	116
6.3 Aerodynamic Characteristics in Rotary Motion	125
6.4 Unsteady Aerodynamic Characteristics at High Angles of Attack	135
References	143
Chapter 7 Dynamic behaviors of Aircraft Flight at High	
Angles of Attack	145
7.1 Maximum Permissible Lift	145
7.2 Near-Stall/Past-Stall	147
7.3 Departure Analysis	160
7.4 Departure/Spin Entry	163
7.5 Limit State Flight—Spin Prediction Analysis	164
7.6 Spin Recovery	165
References	167

Chapter 8 Stall and Spin Characteristics Prediction	170
8.1 Method of Wind Tunnel Free Flight of Model	170
8.2 Method of Analytical Prediction	171
8.3 Correlation Analysis	182
References	183

主要符号

A	体轴系轴向力	N
	振荡运动振幅	(°), rad
b	机翼展长	m
C	侧力	N
$c_A(\bar{c})$	机翼平均气动弦长	m
C_A	体轴系轴向力系数	
C_C	侧力系数	
C_D	阻力系数	
C_L	升力系数	
$C_{L\alpha}$	升力线斜率	1/(°), 1/rad
C_l	滚转力矩系数	
C_{lp}	滚转阻尼导数	1/rad
C_{lr}	交叉动导数	1/rad
$C_{l\beta}$	横向静稳定导数	1/(°), 1/rad
$C_{l\dot{\beta}}$	洗流时差动导数	1/rad
$C_{l\delta_a}$	副翼操纵效率	1/(°), 1/rad
$C_{l\delta_r}$	滚转力矩系数对方向舵偏角导数	1/(°), 1/rad
C_m	俯仰力矩系数	
C'_{m0}	迎角 $\alpha=0^\circ$ 时的俯仰力矩系数	
C_{mCL}	纵向静稳定导数	
C_{mq}	俯仰阻尼导数	1/rad
$C_{m\alpha}$	纵向静稳定导数	1/(°), 1/rad
$C_{m\dot{\alpha}}$	洗流时差动导数	1/rad

$C_{m\delta e}(C_{m\varphi})$	升降舵(平尾)操纵效率	$1/(\circ), 1/\text{rad}$
C_N	体轴系法向力系数	
C_n	偏航力矩系数	
C_{np}	交叉动导数	$1/\text{rad}$
C_{nr}	偏航阻尼导数	$1/\text{rad}$
$C_{n\beta}$	航向静稳定导数	$1/(\circ), 1/\text{rad}$
$C_{n\dot{\beta}}$	洗流时差动导数	$1/\text{rad}$
$C_{n\beta D}$	动方向稳定性参数	$1/(\circ)$
$C_{n\beta Dd}$	包括静、动导数的偏离解析判据	$1/(\circ)$
$C_{n\delta a}$	偏航力矩系数对副翼偏角的导数	$1/(\circ), 1/\text{rad}$
$C_{n\delta r}$	方向舵操纵效率	$1/(\circ), 1/\text{rad}$
C_Y	体轴系横向力系数	
$C_{Y\beta}$	横向力系数对侧滑角的导数	$1/(\circ), 1/\text{rad}$
D	阻力	N
f	振荡频率	Hz
$Fr = \frac{V^2}{gl}$	弗劳德数	
g	重力加速度	m/s^2
H	高度	m
I_P	发动机转子对转轴的转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
I_x, I_y, I_z	飞机对机体轴的转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
I_{xy}, I_{yz}, I_{zx}	飞机对机体轴的惯性积	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$K = \frac{l_l}{l_m}$	模型线性尺度缩尺系数	
k	振荡减缩频率	
l	特征长度	m
L	升力	N
	滚转力矩	$\text{N} \cdot \text{m}$
LCDP(AADP)	横侧操纵偏离参数	$1/(\circ)$
m	质量	kg

M	俯仰力矩	$N \cdot m$
Ma	马赫数	
N	体轴系法向力	N
	偏航力矩	$N \cdot m$
	尾旋圈数	
n_x	沿机体轴的纵向过载	
n_y	沿机体轴的横向过载	
n_z	沿机体轴的法向过载	
P	发动机推(拉)力	N
p	飞机绕机体轴 x 的滚转角速度	rad/s
$\bar{p}=p(b/2V)$	无因次滚转角速度	
q	飞机绕机体轴 y 的俯仰角速度	rad/s
$\bar{q}=q(\bar{c}/2V)$	无因次俯仰角速度	
$q_\infty=\frac{1}{2}\rho V^2$	速压	Pa
r	飞机绕机体轴 z 的偏航角速度	rad/s
	尾旋半径	m
$\bar{r}=r(b/2V)$	无因次偏航角速度	
Re	雷诺数	
S	机翼面积	m^2
$Sr=\frac{fl}{V}$	斯特劳哈尔数	
T	周期	s
t	时间	s
V	飞行速度或风洞试验气流速度	m/s
Y	体轴系横向力	N
α	迎角	$(^\circ), rad$
$\alpha_{-\beta}$	β 轴稳定性指示	$(^\circ)$
α_δ	δ 轴稳定性指示	$(^\circ)$
β	侧滑角	$(^\circ), rad$
$\delta(\delta_j)$	操纵面偏角	$(^\circ), rad$

δ_a	副翼偏角	(°),rad
$\delta_c(\varphi)$	升降舵(平尾)偏角	(°),rad
δ_r	方向舵偏角	(°),rad
θ	俯仰角	(°),rad
$\theta_a(\gamma_a)$	气流俯仰角	(°),rad
$\Lambda = 1 - \frac{I_{zx}^2}{I_x I_z}$	惯性积修正因子	
Λ_w	机翼后掠角	(°)
λ	无因次旋转参数或称旋转率 振荡圆锥运动中旋转矢量 Ω 与 速度矢量 V 之间的夹角	(°)
ρ	空气密度	kg/m ³
ϕ	滚转角	(°),rad
$\phi_a(\mu_a)$	气流倾侧角	(°),rad
ψ	偏航角	(°),rad
$\psi_a(\chi_a)$	气流偏航角	(°),rad
ω	总角速度	rad/s
ω_p	发动机转速	rad/s
$\Omega(\omega_v)$	圆锥运动角速度	rad/s

下标符号说明

avg	平均
buf	抖振
CG	重心
cop	耦合
cr	临界
f	全尺寸
m	模型
max	最大
ncr	近临界

os	振荡运动
pm	许用
Rot	旋转运动
rl	反横操纵
s	失速
sd	侧滑偏离
subcr	亚临界
supcr	超临界
sw	失速警告
tr	配平
us	非定常
ϕ	圆锥运动