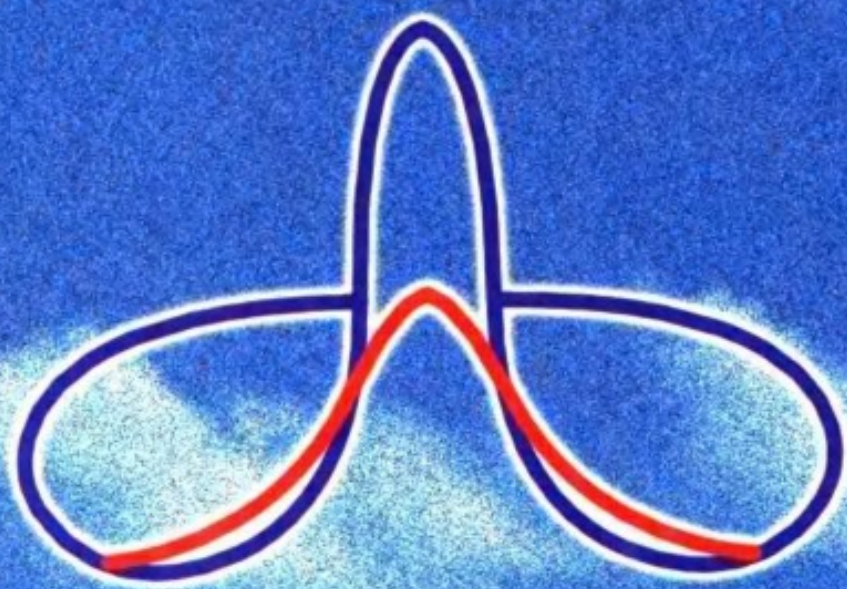


疲劳性能试验设计 和数据处理

——直升机金属材料疲劳性能可靠性手册——

高镇同 蒋新桐 熊峻江 郭光海 编著
于伟民 夏千友 王三平 曾本银



北京航空航天大学出版社

09901085

疲劳性能试验设计和数据处理

—直升机金属材料疲劳性能可靠性手册—

HK51/25

高镇同 蒋新桐 焦峻江 郭光海 编著
于伟民 夏千友 王三平 曾存银



C0465253

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书根据疲劳可靠性设计、损伤容限设计和疲劳性能测试的需要,全面系统地介绍了现代材料疲劳性能试验设计和数据统计处理方法。本书还可作为直升机金属材料疲劳性能可靠性手册,共提供了143条各类直升机金属材料疲劳性能可靠性曲线、179个各类曲线和曲面方程、40个疲劳强度缩减因数,还提供了11幅等寿命曲线。对典型疲劳试样的制备作了简短的说明。在附录中备有所需的统计数字计算用表,便于查阅。

本书可供从事直升机结构强度的科技人员使用,也可作为一般机械制造业和冶金工业等方面进行疲劳研究工作的人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

疲劳性能试验设计和数据处理:直升机金属材料疲劳性能可靠性手册/高镇同等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,1999.5

ISBN 7-81012-861-2

I. 疲… II. 高… III. ①直升机-航空材料;金属材料-疲劳试验-手册②直升机-航空材料;金属材料-可靠性试验-手册 IV. V 250.2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 01754 号

疲劳性能试验设计和数据处理

高镇同 蒋新桐 熊峻江 郭光海 编著
千伟民 夏千友 王三平 曾本银

责任编辑 王小青

责任校对 张韵秋

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路 37 号,邮编 100083,发行部电话 82317024

<http://www.buaapress.cn.net>

E-mail:pressell@publica.bj.cninfo.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:12.25 字数:309 千字

1999 年 5 月第 1 版 1999 年 5 月第 1 次印刷 印数:2000 册

ISBN 7-81012-861-2/V·049

定价:25.00 元

前 言

目前机械工程设计处于变革时代,正由传统的“安全系数”保障强度裕度的设计思想朝向以力学分析和概率方法相结合的可靠性设计演进。为了对产品进行疲劳可靠性设计、概率损伤容限设计、可靠性寿命估算及故障分析、衡量材质的疲劳性能、新材料的研制和推广应用、工艺规范的合理制定和质量控制以及对载荷谱的编制提供有关数据,都需对各种材料进行疲劳性能测试。由于疲劳试验结果存在很大的分散性,为提供准确可靠的疲劳性能数据及合理安排试验程序,本书吸取了国内外先进经验和最新研究成果,针对我国航空工业和一般机械工业发展需要,提供了高周疲劳、低周疲劳和疲劳裂纹扩展的性能测试方法及其数据处理方法。这些方法是:

- (1) 可疑观测值的取舍方法;
- (2) 成组试验法;
- (3) 单侧容限因数法;
- (4) 升降法;
- (5) $p-S-N$ 曲线测定方法;
- (6) $p-S_a-S_m-N$ 曲面测定方法;
- (7) $p-\Delta\epsilon_e-N$ 曲线测定方法;
- (8) $p-\Delta\epsilon_p-N$ 曲线测定方法;
- (9) $p-da/dN-\Delta K$ 曲线测定方法;
- (10) $p-K_m-da/dN-\Delta K$ 曲面测定方法;
- (11) 疲劳寿命分散因数法;
- (12) 疲劳强度缩减因数法。

应该指出:疲劳裂纹形成寿命存在很大的分散性,疲劳裂纹扩展寿命分散性较小。长期以来,美国、俄罗斯、英国和日本等在确定飞机结构使用寿命时,只采用单一的试验寿命分散因数,不区分裂纹形成寿命与裂纹扩展寿命,显然,此种做法欠妥。在我国飞机结构定寿和延寿工作中,也发现采用单一寿命分散因数与实际情况不符,为此,于1982年我们在第一届全国疲劳会议上提出“双寿命分散因数”,即裂纹形成寿命分散因数和裂纹扩展寿命分散因数。十多年来,该因数已成功地应用于歼击机、强击机、运输机、教练机等十余种机型的定寿和延寿,保障了飞行安全。经长期实践证明:双寿命分散因数定寿法是符合我国实际情况行之有效的方法。特别是,对飞机左右两个机翼同时进行试验,若其中之一破坏即停止试验,在此种情况下所建立的双寿命分散因数有重要使用价值,在国内外尚属首创。

疲劳寿命和疲劳损伤实际上受应力幅值 S_a 和应力均值 S_m 共同作用控制。为提供作为疲劳可靠性设计和寿命估算等使用,本书提出了计及应力幅值和应力均值的高周疲劳性能以及疲劳裂纹扩展速率的数据处理方法,并给出了这些性能的曲面表达式。此部分内容在国内外尚属首次载于手册之中。

根据随机理论和统计学原理,首次提出了“定量方程随机化”方法——首先,将确定性疲劳性能曲线、曲面方程随机化,导出疲劳性能曲线、曲面的随机方程;然后,采用极大似然法,估计这些随机方程的参数,进而得到疲劳性能可靠性曲线、曲面公式。此方法在国内外尚属首创。

书中所介绍的疲劳性能测试方法,均以数理统计理论为依据。利用这些方法,可以经济、合理地提供比较可靠的试验数据。为了使各个实验室获得的试验结果具有“可比性”与“再现性”,除了需要统一的试验方法外,疲劳试样的标准化和规格化也是十分重要的。为此,本书对疲劳试样的制备也作了介绍。

书中提供的直升机金属材料疲劳性能可靠性曲线、曲面公式和图表,可用于直升机结构设计阶段的疲劳寿命估算和可靠性评定。还可根据这些材料疲劳性能曲线的形状参数,测定直升机构件的疲劳性能曲线,并确定其疲劳强度缩减因数。

另外,根据《量和单位》的国标(GB3101-93)中对系数(coefficients)、因数或因子(factors)的新定义,对本书中的“应力集中系数”、“疲劳寿命分散系数”、“疲劳强度缩减系数”、“单侧容限系数”、“标准差修正系数”、“相关系数”、“变异系数”等名词进行了相应的规范,即将这些名词中的“系数”改为“因数”,特此说明。

在本手册的编写过程中,有些试验数据取自《航空金属材料疲劳裂纹扩展速率手册》(颜鸣皋主编,北京航空材料研究所,1984)、《飞机结构金属材料力学性能手册》(吴学仁主编,北京:航空工业出版社,1997)及中国航空材料数据库。作者对有关单位和个人深表谢意!

作 者

1998年12月

目 录

第一章 试验方法与数据处理

1.1 定义、符号和术语	1
1.2 疲劳试样及其制备	6
1.3 可疑观测值的取舍	15
1.4 成组试验法	17
1.5 单侧容限因数法	19
1.6 升降法	21
1.7 $S-N$ 曲线和 $p-S-N$ 曲线测定	23
1.8 S_s-S_m-N 曲面和 $p-S_s-S_m-N$ 曲面测定	24
1.9 低周疲劳试验方法	26
1.10 $\Delta\epsilon_e-N$ 曲线和 $p-\Delta\epsilon_e-N$ 曲线测定	28
1.11 $\Delta\epsilon_p-N$ 曲线和 $p-\Delta\epsilon_p-N$ 曲线测定	30
1.12 疲劳裂纹扩展速率试验方法	31
1.13 $da/dN-\Delta K$ 曲线和 $p-da/dN-\Delta K$ 曲线测定	32
1.14 $K_m-da/dN-\Delta K$ 曲面和 $p-K_m-da/dN-\Delta K$ 曲面测定	34
1.15 疲劳寿命分散因数法	36
1.16 疲劳强度缩减因数法	40

第二章 直升机金属材料高周疲劳性能试验数据和可靠性曲线图表

2.1 LY12CZ 铝合金板材(轴向加载)	42
2.2 LY12CS 铝合金板材(轴向加载)	53
2.3 LY12CZ 阳极化铝合金板材(轴向加载)	61
2.4 LY12CZ 铝合金包铝板材(轴向加载)	63
2.5 LC4 高强度铝合金板材(轴向加载)	74
2.6 LD10CS 铝合金棒材(轴向加载)	90
2.7 18Cr2Ni4WA 钢棒材(旋转弯曲)	94
2.8 40CrNiMo 钢棒材(旋转弯曲)	97
2.9 30CrMnSiA 钢棒材(轴向加载)	101
2.10 18CrMn2MoBA(GC-11) 钢板材(反复弯曲)	105

第三章 直升机金属材料低周疲劳性能试验数据和可靠性曲线图表

3.1 LY12CZ 铝合金棒材	108
3.2 LY12CZ 铝合金厚板	110

3.3	LD10CZ 铝合金棒材	112
3.4	LC4CS 铝合金棒材	114
3.5	30CrMnSiA 钢棒材	116
3.6	1Cr18Ni9Ti 钢棒材	118

第四章 直升机金属材料疲劳裂纹扩展速率试验数据和可靠性曲线图表

4.1	LY12 铝合金 (规格状态一)	120
4.2	LY12 铝合金 (规格状态二)	126
4.3	LY12 铝合金 (规格状态三)	132
4.4	LY12 铝合金 (规格状态四)	137
4.5	LC4 铝合金 (规格状态一)	143
4.6	LC4 铝合金 (规格状态二)	150
4.7	LD2 铝合金	154
4.8	18CrMn2MoBA (GC-11) 钢 (规格状态一)	158
4.9	18CrMn2MoBA (GC-11) 钢 (规格状态二)	160
4.10	18Cr2Ni4WA 钢	161
4.11	40CrNiMoA 钢	163
4.12	30CrMnSiA 钢 (规格状态一)	165
4.13	30CrMnSiA 钢 (规格状态二)	170

第五章 附录

5.1	相关因数检验表	173
5.2	标准差修正因数 β 值	173
5.3	95%置信度的 t_r 值	173
5.4	90%置信度的 t_r 值	174
5.5	标准正态偏量 u_p 值	174
5.6	最少观测值个数表之一	175
5.7	最少观测值个数表之二	176
5.8	应力集中因数图线	177

参考文献	186
------------	-----

第一章 引 子

在动物世界中,昆虫是最早获得飞行能力的。在脊椎动物当中,中生代的翼龙是最出众的会飞行的爬行动物,但它们在 6000 万年前已在地球上绝迹。鸟类和哺乳动物当中的蝙蝠则是飞行能力最强的高等脊椎动物类群——鸟类的飞行历史已有 12000 万年,而蝙蝠的飞行经历只有 5000 万年。

鸟类、昆虫和蝙蝠这些飞行能手,就其空气动力布局和躯体结构而言,最大的一个共同特点是:都长有可以向两侧伸展的飞行器官——翅膀,或称之为翼(wing)。

不过,有些动物,其躯体的一些部分变形成为宽阔的膜状物,而没有形成完整的翼,只能借助于空气动力支撑其部分体重,进行滑翔。例如:

飞蜥 体侧皮肤可扩张成翼膜并与四肢连接,借助此特殊的“升力面”能够滑翔 60~70 米的距离。

飞蛙 前后趾间长有宽大的膜蹼,爬到树梢跳跃时,借助其脚蹼状的“升力面”可滑翔几十米远。

飞鱼 大幅度摆动其尾鳍,可产生足以冲出水面跃入空中的反作用力;靠胸鳍——飞鱼的“翅膀”快速摆动可获得以 5~8 米/秒的速度贴近水面滑行 100~500 米之能力。

人为万物之灵。自有人类以来,他们就本能地思索着自己是否也能够像鸟类、昆虫、蝙蝠那样,在空中自由飞翔的问题,并大胆地进行各种尝试。

在人类探索离地升空技术途径的奋斗历程中,中国人一马当先:

● 2000 多年前中国人发明的风筝(kite)被誉为世界最早的飞行器。风筝的平稳飞行性能表明,除了采用鸟类和昆虫那种扑翼方式外,采用固定翼面、拉(推)力与升力分开的方式也可以实现飞行。风筝的发明及其广为流传,对后来飞机的发明有极为重要的启迪作用:

(1) 1804 年,英国的航空科学家 G. 凯利曾用风筝作机翼制成一架固定翼的滑翔机模型,后来又制作了一架可以乘人的风筝滑翔机,用绳子牵引起飞;

(2) 世界航空先驱、美国飞机发明家莱特兄弟,于 19 世纪末曾深入研究了鸟类和风筝的飞行,制造了一架形如风筝的滑翔机进行试验,然后进行滑翔机的载人飞行试验,并于 1900 年完成了第一次载人滑翔飞行;

(3) 俄国的飞行器研究家和发明家 A. Ф. 莫扎伊斯基,自 1856 年起开始研制重于空气的飞行器,也曾经采用放风筝的方式研究他研制的飞机。

● 汉武帝(公元前 140~前 87 年)时淮南王刘安门客编著的《淮南万毕术》中就提到:把鸡蛋掏空,在里面点燃艾火,空蛋壳即可乘风飞去——这正是 1800 多年后载人热气球升空的基本原理。五代(公元 907~960 年)时,就有人用竹和纸制作方形大灯,在底盘上点

燃松脂,当热空气充满灯体时即可凌空升起。它首先用作军事联络信号。这种谓之松脂灯(也有人称之为孔明灯)的轻于空气的飞行器正是800多年后法国人蒙哥尔费兄弟发明的热气球之雏型。

● 火箭,这个名词最早出现在三国时期(公元220~265年)的古代典籍中。12世纪在中国已有利用喷射原理和爆炸作用的火药武器,1274年和1281年元世祖出兵东征时就使用过威力较大的震天雷炮。14世纪末,有个叫万户的中国人在其座椅的背后安装了47支当时最大的火箭,左右手各持一只大风筝,试图利用火箭的推力和风筝的升力升空。此举使万户成为世界上第一个利用火箭推力进行飞行试验的探索者。为了纪念这位传奇式的飞行勇士,后人把月球表面东方海附近的一座环山以万户命名。

中国古代的火箭到13世纪才传入阿拉伯国家,然后再经阿拉伯人传到欧洲——这是举世公认的事实。正因为这样,在美国宇航中心休斯顿展览馆内挂着一幅中国在12世纪初燃放“起火”的示意图,旨在向公众说明当今的宇宙火箭原理启蒙于中国。所谓“起火”,是在南宋年代中国人发明的一种火炮——在火药筒上捆一根细长竹竿,点然后能直冲云霄。它是利用自身喷气的反作用力向前推进,这无疑是最早靠自身喷气推进的真正火箭之雏型。

● 竹蜻蜓——用竹子或木材削成细长呈扭曲状的薄片,用双手急搓置于其中央的立轴,便能一边迅速旋转,一边上升。这种在中国早已广为流传的玩具正是当今直升机的始祖。18世纪才传入欧美,有人称为“中国陀螺”,也有人谓之“中国竹蜻蜓”(Chinese top)。在Devon Francis写的《直升机的故事》一书里有这样一段描述:“在基督耶稣降生以前,中国人已会用竹蜻蜓实行机械飞行了。公元1796年,Sir George Cayley制造了几个竹蜻蜓,用鲸骨和钟表发条来转动,成绩很好。其中一个竹蜻蜓曾飞行27米高”。

更为妙不可言的是,若把这种竹蜻蜓横放,便是螺旋桨了。世界航空先驱、美国飞机发明家莱特兄弟在其动力飞行器的研制过程中,就曾仿制过这种竹蜻蜓。

此外,4000多年前中国人发明的桨、橹、扇子和风扇,正是后来用以推进轮船、飞艇、飞机前进的螺旋桨之雏型;4000多年前,中国人就发现并巧妙地应用了降落伞的增阻减速之原理,公输般时代发明的晴天遮阳、雨天挡雨的伞到了明朝又有了降落伞的作用了。这正是现已广为应用的航空救生伞、降落伞、回收伞以及返回式航天器所用的回收伞之雏型;公元1000年以前中国人发明的走马灯实为当今燃气轮的始祖。

鸟类、昆虫和蝙蝠的飞行,甚至是天上飘浮的云彩,都足以引起只能在地面行走的古人对飞行的向往。各种令人神往的神话传说就是例证。然而,在社会生产力低下的年代,人类的飞行理想始终无法付诸实现。

人类在探索离地升空技术途径的进程中,历尽艰辛,付出了极大的代价,主要经历了三个时期(参见表1)。

表 1 航空发展的三个时期

时 期	重 大 技 术 突 破
飞行的探索时期 (20 世纪以前)	1783 年 11 月 21 日,法国人 J. F. P. 罗齐埃和 M. 达尔朗德乘坐蒙哥尔费的热气球,在巴黎实现了人类首次升空自由飞行——这标志着人类航空发展的第一次重大突破。
活塞式发动机飞机时期 (20 世纪初至 40 年代中期)	1903 年 12 月 17 日,美国的莱特兄弟用自己制造的飞机实现了人类首次持续的、有动力的、可操纵的飞行,开创了现代航空的新纪元——这是人类航空发展的第二次重大突破。
喷气式飞机时期 (20 世纪 40 年代中期以来)	第二次世界大战后,喷气式飞机的诞生和突破音障,是航空发展史上的第三次重大突破,从此飞机进入了超音速飞行速域。

第二章 人类仿鸟扑翼飞行的尝试

人类飞行实践的第一步尝试,是单纯模仿鸟类飞行的飞人试验。早在中国的西汉王莽时代(公元 23~25 年),就有人用鸟羽做成两只翅膀装在身上,并在头部和身上连接羽毛,再装上环钮等器件进行了飞人试验——虽然只飞行了几百步就落地,但毕竟迈出了大胆探索的第一步。中世纪后,欧洲也有不少人作过类似的尝试。

无数的实践表明,人类无法沿着扑翼飞行这条技术途径实现自己升空之目的,其主要原因是:

● 鸟的骨络强度高而重量轻,羽毛轻巧而富有弹性,所构成的“升力面”——翅膀其比强度高,因而鸟的翼载荷很小——鸟翼载荷的增加与其体重的立方根成正比。例如,乌鸦的翼载为 30 帕,野鸭的翼载为 100 帕,天鹅的翼载为 200 帕。而人类至今还没有制造出与自己体重相配的鸟状“升力面”,而且人体的重量相当大,体形也不是适于飞行的流线型,这就使得“飞人”的翼载荷比鸟类大得多。

● 法国航空界的领导人之一查尔斯·雷纳(Charles Renard, 1847~1905)经过深入研究后指出,鸟类飞行时单位重量所需要的功率与其翼载荷的平方根成正比,即

$$\frac{P}{W} = K \sqrt{\frac{W}{\rho S}}$$

式中 P ——可用功率(即鸟类飞行时所能使用的肌肉力量)

W ——飞鸟的体重

ρ ——飞行高度相应的空气密度

S ——鸟翼的面积

K ——常数

鸟翼的胸肌十分发达,其心脏搏动与新陈代谢极为迅速——飞鸟的心脏就像发动机一样,它必须发出足够的功率才能支持其高能耗的飞行动作。例如,鹭的心脏占其体重的 8%,飞行能手蜂鸟则高达 22%;麻雀在飞行时的心率可达 800 次/分。而人体的肌肉比率太小,心脏所占的比率太低(只有 0.5%),心脏跳动的速度太慢(正常人的心率约为 70 次/分。)试验证明,体格健壮的运动员在 10 分钟内有可能连续发出 0.26 千瓦的功率;但按每千克体重所能发出的功率计算,则无法与鸟类相比;即使在 0.1 秒左右的短暂时间内能够发出 1.47 千瓦的功率,也无法完成有实际意义的飞行。

英国物理学家 R. 胡克(Robert Hooke, 1635~1703)指出,倘若人也长有双翼,得有 2 米的胸宽才能容纳足够的肌肉以实现自力飞行。

如果能制造出模仿鸟和昆虫飞行技巧的扑翼机(参见图 1),它在低速飞行时所需的功率比一般固定翼飞机小得多,而且能够像鸟和昆虫那样具有优越的垂直起落能力。但

是,要真正实现像鸟类翅膀那样的复杂运动,或是像蜻蜓和其他昆虫翅膀那样作高频扑扇运动则是极为困难的——有关扑翼机的控制技术、制作材料和结构设计诸多方面的问题至今未能妥善解决。

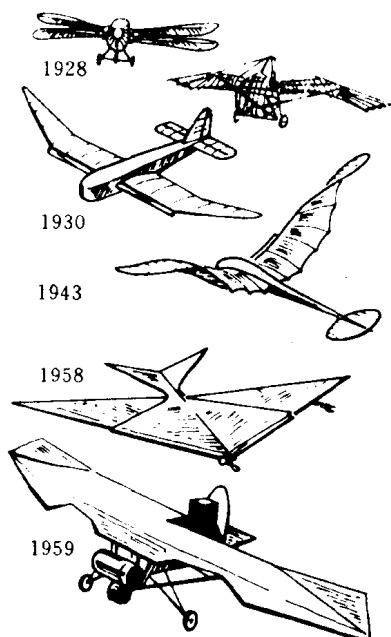


图1 几种典型的扑翼机方案

因此,人类无法依靠自己的体力或通过扑翼机实现升空之目的。事实上,早在17世纪后期,意大利的G. A. 博雷利探讨了人类肌肉与飞行的关系后,就明确指出:“人类靠自己的体力作灵巧的飞行是绝对不可能的。”

● 统计分析表明,鸟翼的扑动频率 ω_b 与其体重 W_b 基本上呈反比的关系,即 $\omega_b \propto \frac{1}{W_b}$ 。若此规律也制约着人类制造的飞行器,这些飞行器只能采用不扑动的机翼——因为人类的飞行器即使与最重的飞鸟相比,其重量也是非常大的,因而飞行器翼面的扑动频率 ω_a 趋近于零,即 $\omega_a \rightarrow 0$ 。

尽管如此,那些勇于探索扑翼飞行和滑翔的志士,其历史功绩是不可磨灭的。诚然,由于他们对飞行原理和基本理论缺乏必要的认识,因而他们的实践带有很大的盲目性,对航空科学的发展没有起到应有的作用。

在18世纪以前,只有意大利的著名画家、学者、航空科学先驱列奥纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452~1519)对飞行理论进行了大量科学的研究。他在学习和研究绘画艺术的同时,广泛涉猎数学、力学、建筑、医学、机械、解剖、水利、冶金、植物学等方面的知识,他是人类史上少有的百科全书式人物。

达·芬奇对航空科学的贡献可归纳为如下几个方面：

● 通过观察与实验、理论与经验相结合的方法，认识 and 解决航空科学的若干重大问题，其中包括：

- A) 确认通过模仿自然的机器可以实现人类的飞行；
- B) 确认通过仔细剖析鸟类的飞行可以揭示飞行的基本原理

● 1505 年写成的图文参半的研究手稿《论鸟的飞行》，涉及航空研究的三大领域：

A) 关于飞行的原理和理论

- (1) 鸟的持续飞行原理——即空气的升力原理；
- (2) 鸟类有效地利用气流飞行的技巧；
- (3) 鸟类所采取的各种省力飞行措施。

B) 关于飞行的稳定与控制

他指出鸟类的飞行转向和产生控制力的方式可分为 7 类：

- (1) 风的影响；
- (2) 翅膀的不同扇扑方式；
- (3) 飞行惯性的控制；
- (4) 尾巴的利用；
- (5) 引力中心位置的控制

他强调指出，当重心与升力中心重合时，鸟的飞行是稳定的；若两者不重合，鸟的飞行姿态就会发生变化，鸟可以不断调整头、双翅、尾巴的位置和姿态使升力中心位置发生移动；

- (6) 用腿作为减速器；
- (7) 利用翅瓣操纵。

C) 关于飞行器的设计——包括扑翼机、降落伞和直升机。

由此可见，达·芬奇是航空科学的开创者，他的研究成果理应对人类航空的发展产生巨大的促进作用。遗憾的是，他那些具有开创性的研究成果被长期埋没了——他没有把自己的研究手稿公开发表，外人对此一无所知。更为令人可惜的是，当拿破仑军队于 18 世纪末侵入佛罗伦萨并将他的遗物运回法国后，研究其手稿的人都是些艺术家、历史学家或考古学家，航空界根本无人知晓他在航空科学方面的杰出贡献。直到 20 世纪 20 年代，人们才发现早在 400 多年前这位航空科学先驱已经作了大量奠基性的工作。然而，达·芬奇对航空的发展实际上没有起到应有的作用，这是历史的悲剧。

经过漫长的、艰难的探索与无数次的反复实践，人类终于找到了几条行之有效的离地升空技术途径：

- 根据孔明灯/热空气气球原理而发明了轻于空气的飞行器；
- 受风筝和鸟类滑翔、翱翔的启迪，靠固定的翼面产生升力；
- 受竹蜻蜓和昆虫飞行的启发，靠旋转翼面而直升飞行。

第三章 人类升空飞行的第一次重大突破 ——气球、飞艇的发明与发展

1783年6月4日,法国的航空先驱、热空气气球发明人蒙哥尔费兄弟(Montgolfier brothers,兄J. M. 蒙哥尔费,1740~1810;弟J. E. 蒙哥尔费,1745~1799)在昂纳内首次公开表演了他们制作的热气球——直径达10米的热空气气球升到457米的高度,在空中飘荡了10分钟左右,然后落回地面。

1783年9月19日,蒙哥尔费兄弟应法国国王路易十六和法兰西科学院的邀请前往巴黎凡尔赛宫为国王、群臣和十多万市民作热空气气球的飞行表演。气球下吊挂着装有羊、鸡、鸭各一只的笼子,升到518米高时开始下降,最后安全降落在距升空点3.2千米外的地面,气球在空中飘飞了8分钟。

1783年11月21日,法国人F. P. 罗齐埃和M. 达尔朗德乘坐蒙哥尔费兄弟制作的热气球(直径15米、高23米、质量约800千克)升到1000米高度,在巴黎上空飘飞了25分钟——实现了人类第一次在空中飞行,最后安全降落在距起飞点约8.9千米的地方(参见图2)。

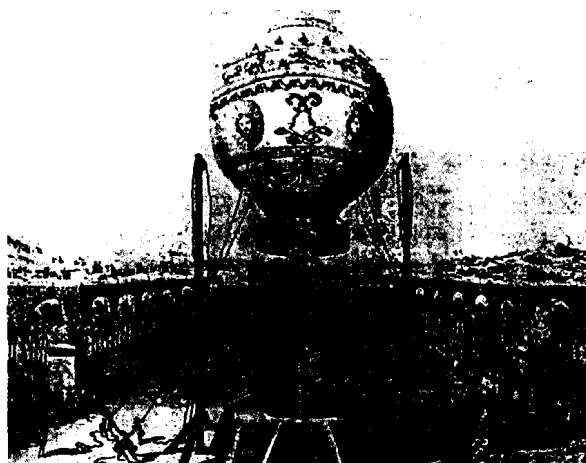


图2 1783年11月21日,法国人罗齐埃和达尔朗德乘坐蒙哥尔费的热气球在巴黎升空的情景

1783年12月1日,法国物理学家J. A. C. 查理和他的助手乘坐他制作的世界第一个

氢气球在巴黎向 40 万观众作公开飞行表演。直径 8.4 米的圆球形氢气球在 45 分钟内飘飞了 40 千米。随后,查理教授又进行了 30 分钟的单人飞行,并升至 2000 米的高度。在人类史上,这位教授就成了第一个到达这个飞行高度的人。

查理教授对气球技术的突出贡献在于他实现了几项重大的技术改进,从而奠定了现代气球的基本结构,并实现了对气球的升降控制:

(1) 采用三角楔形布拼制球体。

(2) 在气球的上半球用一个大网子罩起来,在其周边均布 20 根绳索,并用这些绳索联结吊篮——吊篮及其载荷的力就可以通过大网子均匀地分布在整個上半球上,而不是直接作用在气球球体的几个点上,因而气球结构的承载能力就可以大大提高。

(3) 在气球顶部安装一个手动的放气阀门,并由一根穿过球体直通吊篮的绳索控制——阀门打开释放一部分氢气后,气球的飞行高度就会随之下降。

(4) 在气球的吊篮里配置镇重(沙袋)——抛弃一些镇重,气球就可以升高。

(5) 在气球球体的底部开一个小口——其功能就像一个安全阀:当环境温度升高或随飞行高度增加大气压力减小时,球内的氢气就会膨胀,此时即可通过小口泄漏出去,使气球内部保持常压。

20 世纪 20 年代以后,出现了用氦气代替氢气的氦气球。

1960 年前后,载人气球的升空高度已达 34.5 千米,不载人气球达到 46 千米,气囊容积最大可达 140 万米³,载重量超过 5000 千克。

1852 年 9 月 24 日,法国发明家亨利·吉法尔(Henri Giffard)驾驶着他研制的世界第一艘飞艇(长 44 米、最大直径 12 米,外形呈橄榄状的软袋囊中充填了 2500 米³ 的煤气,艇重 750 千克,一台 160 千克重、2.2 千瓦的蒸汽机驱动一个转速为 110 转/分的 3 叶螺旋桨)从巴黎向特拉普以 8 千米/小时的速度飞行了 27 千米——使飞艇成为人类史上第一

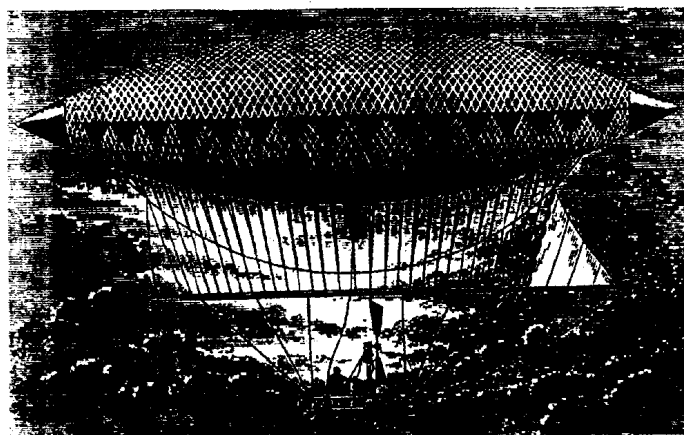


图 3 1852 年 9 月 24 日,法国发明家 H. 吉法尔驾驶着他研制的世界第一艘飞艇从巴黎飞向特拉普

种带动力的、可操纵的、能进行持续飞行的载人飞行器(参见图 3)。

1900 年 7 月 2 日,德国的飞艇制造家、大型实用硬式飞艇的发明人 F. 齐伯林(Ferdinand von Zeppelin,1838~1917)设计的第一艘大型硬式充氢飞艇 LZ1(长 128 米、直径 11.7 米、氢气囊总容积约 11300 米³,装 2 台 11.8 千瓦船用发动机)试飞成功(参见图 4)。

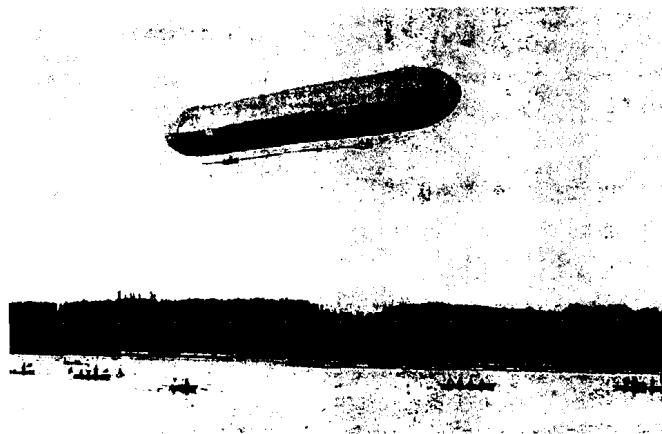


图 4 德国人 F. 齐伯林研制的世界第一艘大型硬式飞艇 LZ1

1909 年,齐伯林创办了世界第一家民用航空公司——德莱格(Delag)飞艇公司。1910 年 6 月该公司首次使用 LZ7 型“德意志”号(Deutschland)硬式充氢飞艇开辟客运服务,随后又陆续将几艘硬式充氢飞艇投入航线使用。到 1914 年第一次世界大战爆发前的 4 年间,该公司在德国国内总共飞行了 175535 千米,总飞行时间 3175 小时,运送旅客 34028 人次,无一人伤亡。

在第一次世界大战(1914~1918)的 4 年间,飞艇技术获得较快的发展并广泛应用于战争:英国和法国都建立了小型软式飞艇队,执行反潜、侦察、巡逻任务;德国建立了齐伯林飞艇队(101 艘齐柏林式飞艇以及其他型式的飞艇总计 160 艘),用于海上巡逻、远程轰炸和空运等军事活动(其中包括轰炸伦敦 51 次,空袭巴黎 3 次……);交战双方用飞艇护航约 90000 艘舰船。

由于飞艇体积庞大、速度低、飞行不灵活,因而极易受到攻击(参见表 2),而且飞机的飞行性能不断提高,因而飞艇在军事方面的应用逐步为飞机所取代。但是,商用飞艇仍在发展。

表 2 第一次世界大战中德军使用的 101 艘
齐柏林硬式飞艇的战况统计一览表

飞 艇 战 况	飞艇架数	所占比例
被对方飞机/高炮击落,因故障被对方捕获, 因积雪自行坠落后而损失	39	38.6%
意外损失	25	24.7%
报废	20	19.8%
战争后期德军自己破坏	6	5.9%
被对方缴获	5	5.0%
技术故障而损失	4	4.0%
运往意大利	2	2.0%

1918 年 12 月,英国海军根据在其境内击落的德国 LZ-76 号飞艇和在法国缴获的德国 LZ-104 号飞艇制造了 R. 34 巨型硬式充氢飞艇(参见图 5)——艇身长 196 米,直径 24 米,气囊容积为 55000 米³,有效载重 26 吨;艇上装有 5 台 183.9 千瓦的发动机,最大飞行速度 96 千米/小时,巡航速度 72 千米/小时。1919 年 7 月 2 日至 7 月 6 日,该飞艇成功地完成了飞越大西洋试验,整个飞行历时 108 小时 12 分钟,航程 5797 千米——R. 34 号硬式飞艇成为世界上第一架由东向西不着陆飞越大西洋的航空器(参见图 6)。可是,好景不长,1921 年 1 月 28 日,这艘巨型飞艇在约克郡山区低空飞行时撞山坠毁,这使英国的飞艇发展一度处于停顿状态。

美国的飞艇研制工作虽然起步较晚,直至 1911 年才建立起飞艇制造业,1915 年生产出第一艘软式飞艇,但美国政府对飞艇的发展很感兴趣,把设在阿克伦的古德伊尔、泰勒和腊伯公司作为发展飞艇的专门机构,并着手开展科学研究工作。第一次世界大战期间,古德伊尔公司(Goodyear)为协约国生产了近 100 艘软式飞艇。

更为重要的是,美国最先拥有飞艇的理想浮升气体——氦。1903 年美国在其中部的堪萨斯州发现了氦气田,1917 年投入工业生产。虽然氦气的比浮力(10.3758 牛/米³)略低于氢气(氢气的比浮力为 11.1799 牛/米³),但它是一种惰性气体,不易燃烧。1922 年美国军方作出决定,以后生产的飞艇一律以氦气作为浮升气体——这就使得飞艇的安全性发生了根本的改变。

第一次世界大战后,美国从德国和英国引进硬式飞艇制造技术,于 1919 年制造出美国第一艘硬式飞艇 ZR1 号——这是世界上第一艘充氦气飞艇。该飞艇的气囊容积 60832 米³,装有 6 台 191.1 千瓦发动机,最大飞行速度为 107 千米/小时。可惜这艘巨型飞艇于 1925 年 9 月在俄亥俄州的一场暴风雨中失事。