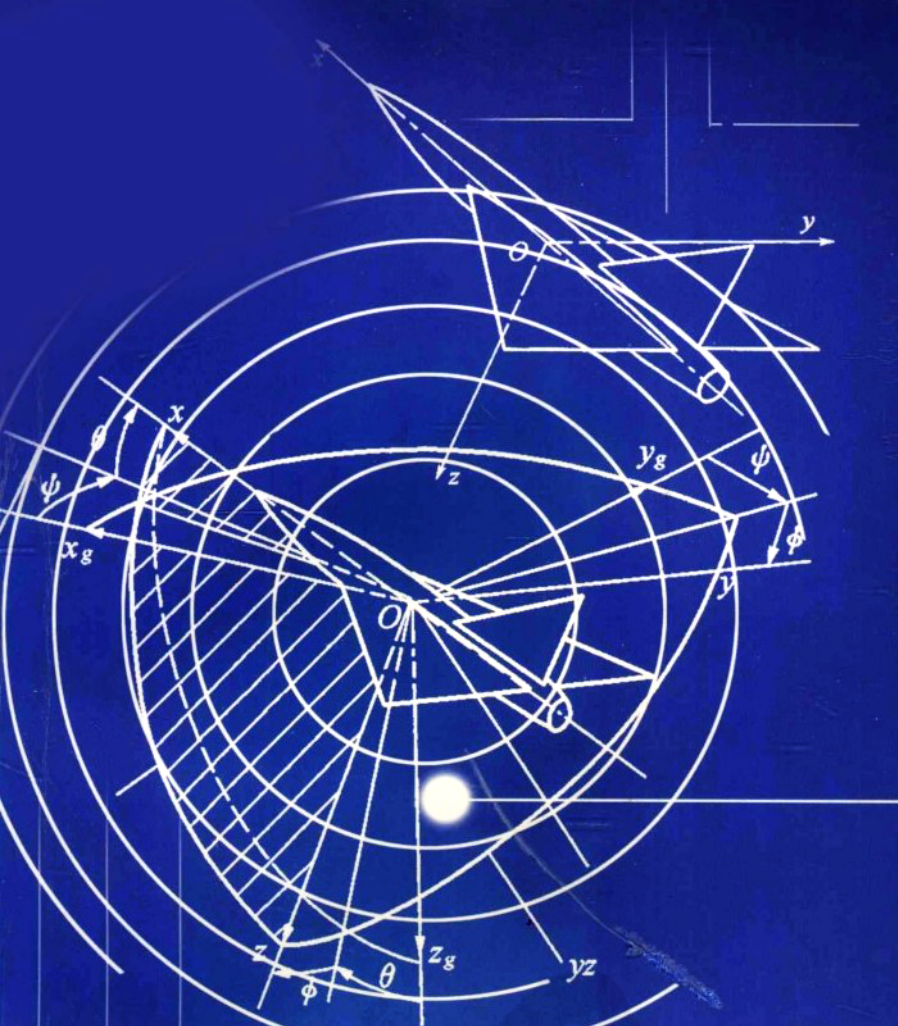




高载荷动态飞行仿真技术及应用

由俊生 由勇 著 · 黑龙江科学技术出版社

高载荷

动态飞行仿真技术及应用

由俊生 由勇 著

黑龙江科学技术出版社

中国·哈尔滨

图书在版编目(CIP)数据

高载荷动态飞行仿真技术及应用/由俊生等著. —哈尔滨:
黑龙江科学技术出版社, 2002. 12

ISBN 7-5388-4231-4

I. 高... II. 由... III. 航空器—过载飞行—动态
仿真—技术 IV. V216.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 095870 号

责任编辑 曲家东

封面设计 张洪冰

高载荷动态飞行仿真技术及应用

GAOZAIHE DONGTAI FEIXING FANGZHEN JISHU JI YINGYONG

由俊生 由 勇 著

出 版 黑龙江科学技术出版社

(150001 哈尔滨市南岗区建设街 41 号)

电话 (0451)3642106 电传 3642143(发行部)

制 版 哈尔滨德赛图文技术开发有限公司

印 刷 哈尔滨市龙林印刷厂

发 行 黑龙江科学技术出版社

开 本 850×1168 1/32

印 张 13.875

字 数 350 000

版 次 2002 年 12 月第 1 版·2002 年 12 月第 1 次印刷

印 数 1—1 000

书 号 ISBN 7-5388-4231-4/TB·96

定 价 25.00 元

前 言

近年来,新一代高性能战斗机,成为世界各先进国家的主战飞机。充分发挥飞机的性能,最大限度地提高其作战能力,是国防、军事、飞机制造、飞行训练和航空医学领域的重要课题。高载荷动态飞行仿真技术主要研究战斗机的飞行载荷对飞行员飞行技能和心理、生理承受能力的影响及高载荷环境下的人员防护。

高载荷动态飞行仿真系统是典型人在回路实时仿真系统,是飞行仿真和载人离心机两大技术领域发展的集成。本书以高载荷动态飞行模拟器为背景,讲述了高载荷飞行仿真建模理论和方法、仿真计算机、软硬件设置、仿真环境设备(含视景系统、综合航行驾驶系统、远距操纵系统、火控系统、音响系统等)、航空医学监测系统,同时对载人离心机的控制、高载荷运动平台、安全和环境等系统进行了分析。

本书结合某新型战机飞行仿真系统研究技术的发展和30多年航空工程及系统仿真研究的科研经验编著,同时得到了空军工程大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、空军第一飞行学院、空军第二航空学院、空军航空医学研究所、空军第八研究所、空军军训研究所、北京蓝天模拟器研究中心、中国大电机研究所、天津传动研究所、沈阳飞机制造公司、哈尔滨飞机制造公司等单位多位专家、学者的指教和飞行仿真界同行的帮助,在此表示感谢。希望为系统仿真和载人离心机技术研究领域提供有价值的参考书。由于作者水平有限,有错误或不当之处,望请批评指正。

作 者

2002年11月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.0 定义	(1)
1.1 动态飞行理论的研究与发展	(4)
1.2 动态飞行空气动力学研究	(6)
1.3 飞行载荷对飞行员的生理与心理影响	(10)
1.4 飞行抗荷与正压呼吸	(14)
1.5 载人离心机的发展	(17)
1.6 飞行仿真技术的研究与发展	(25)
1.6.1 定义	(25)
1.6.2 实时飞行仿真系统技术特点	(27)
1.6.3 实时飞行仿真系统发展概况	(28)
1.6.4 飞行模拟器的研制发展	(30)
1.6.5 军机飞行模拟器研制的近期发展	(38)
1.6.6 动态飞行仿真技术特点	(42)
1.6.7 动态飞行仿真系统发展概况	(44)
第二章 动态飞行仿真系统	(48)
2.1 概述	(48)
2.2 高载荷动态飞行仿真系统的组成及原理	(49)
2.3 高载荷动态飞行仿真系统功能	(55)
2.4 高载荷动态飞行仿真建模与算法	(58)
2.5 离心机—动态飞行模拟器介绍	(61)
2.5.1 用途	(63)
2.5.2 总体技术要求	(63)
第三章 飞行仿真建模与仿真数据库	(65)
3.1 概述	(65)

3.2 数学模型·····	(65)
3.2.1 基本概念及一般形式·····	(65)
3.2.2 动态飞行仿真模型的组成·····	(67)
3.2.3 建模方法·····	(68)
3.3 坐标轴系与符号系统·····	(71)
3.3.1 坐标轴系与角度·····	(71)
3.3.2 坐标轴系之间的转换·····	(75)
3.4 计算机辅助计算·····	(76)
3.4.1 多项式的插值法·····	(77)
3.4.2 样条插值·····	(80)
3.5 动态飞行仿真数据库·····	(82)
3.5.1 数据库管理技术·····	(82)
3.5.2 动态飞行仿真数据库的开发·····	(87)
3.5.3 动态飞行仿真数据库的开发方法·····	(88)
3.5.4 数据库开发中的几个主要问题·····	(89)
第四章 飞行力学仿真 ·····	(95)
4.1 概述·····	(95)
4.2 刚性飞机的一般运动方程·····	(95)
4.2.1 运动方程的推导·····	(96)
4.2.2 旋转部件的影响 ·····	(101)
4.2.3 飞机相对于固定坐标轴系的方位和轨迹 ·····	(101)
4.2.4 重力在机体坐标系的分量 ·····	(104)
4.3 飞行运动方程小结 ·····	(104)
4.4 方向余弦矩阵 ·····	(105)
4.5 四元数法 ·····	(108)
第五章 高载荷动态模型 ·····	(111)
5.1 动态飞行仿真中人体六自由度模型 ·····	(111)
5.1.1 飞行员坐标 ·····	(112)
5.1.2 数学模型建立 ·····	(113)

5.2	动态飞行仿真运动平台速度与加速度场的描述	··· (117)
5.3	基于人体感知觉的运动修正	····· (122)
第六章	飞机系统仿真	····· (132)
6.1	飞行座舱仿真	····· (132)
6.2	飞行仪表系统仿真	····· (136)
6.2.1	大气系统仪表	····· (137)
6.2.2	航向姿态指示仪表	····· (138)
6.2.3	屏幕显示仪表	····· (139)
6.3	综合驾驶航行系统仿真	····· (140)
6.3.1	综合导航系统仿真	····· (146)
6.3.2	惯性导航系统仿真	····· (156)
6.3.3	垂直航向综合信息系统仿真	····· (161)
6.3.4	飞行自动控制系统仿真	····· (165)
6.3.5	飞行操纵系统	····· (170)
6.4	火控系统仿真	····· (183)
6.4.1	火控系统概述	····· (183)
6.4.2	火控系统主要任务	····· (184)
6.4.3	机载火控系统的组成	····· (185)
6.4.4	火控系统的功用	····· (185)
6.4.5	机载火控系统工作原理	····· (194)
6.4.6	火控系统的交联	····· (194)
6.4.7	火控系统仿真特点	····· (196)
6.4.8	火控系统主要制导设备	····· (196)
6.4.9	火控系统的发展趋势	····· (201)
6.4.10	火控系统仿真要点	····· (201)
6.5	通讯系统	····· (202)
6.5.1	动态飞行模拟器的通讯系统	····· (202)
6.5.2	无线电通讯系统仿真	····· (203)
6.6	发动机系统仿真	····· (205)

6.6.1	发动机系统组成及工作原理	(206)
6.6.2	发动机系统的仿真方法	(209)
6.7	音响系统	(210)
第七章	视景系统	(215)
7.1	概述	(215)
7.2	计算机成像方法	(219)
7.3	视景系统基本参量与显示要求	(223)
7.3.1	基本参量	(223)
7.3.2	数字图像的显示	(229)
7.4	基本图形生成算法	(231)
7.5	窗口与裁剪	(237)
7.5.1	窗口及视区变换	(238)
7.5.2	线段裁剪	(240)
7.5.3	多边形裁剪	(247)
7.5.4	字符裁剪	(251)
7.5.5	隐藏面的消除	(252)
7.5.6	扫描梯形的划分	(253)
7.5.7	纹理	(253)
7.6	OpenGL 技术	(254)
7.6.1	什么是 OpenGL	(254)
7.6.2	用 OpenGL 画几何体	(255)
7.6.3	光照处理	(264)
7.6.4	混合、反走样	(272)
7.6.5	纹理映射	(277)
7.6.6	Windows NT Windows 95 环境下 OpenGL 的使用	(282)
第八章	高载荷航空医学系统	(292)
8.1	加速度生理研究动态	(293)
8.2	加速度生理仿真	(294)

8.3	飞行员抗荷措施	(296)
8.4	航空医学训练	(297)
8.5	飞行加速度系统防护	(298)
8.6	航空医学监测系统	(305)
第九章	计算机系统	(311)
9.1	主计算机的性能	(312)
9.1.1	操作系统	(313)
9.1.2	处理器字长	(313)
9.1.3	主频	(313)
9.1.4	运算处理能力	(313)
9.1.5	系统总线速度或称系统总线带宽	(314)
9.1.6	输入/输出带宽	(314)
9.1.7	可扩展性	(315)
9.1.8	内存的配置	(316)
9.2	计算机网络的性能要求	(316)
9.3	I/O 接口系统性能要求	(321)
9.4	I/O 接口系统实例	(321)
9.4.1	主控制器的功能	(323)
9.4.2	通用数字量输入/输出板 (UDIO)	(324)
9.4.3	模拟量输入板 (AI)	(324)
9.4.4	模拟量输出板 (AO)	(325)
9.4.5	控制板	(325)
9.4.6	通讯板	(325)
9.5	基于 HLA 的仿真程序	(326)
9.5.1	HLA 高层体系结构技术概述	(326)
9.5.2	RTI (Run Time Infrastructure) 介绍	(329)
9.6	HLA 仿真程序设计	(333)
9.6.1	联邦执行的生命周期	(334)
9.6.2	联邦成员的程序框架	(338)

9.6.3 HLA 仿真程序实例	(346)
第十章 动力系统	(363)
10.1 概述	(363)
10.2 机械臂设计	(364)
10.3 主动力系统	(366)
10.3.1 主马达	(366)
10.3.2 主电机控制系统	(367)
10.4 辅助动力系统	(380)
10.4.1 滚转驱动装置	(380)
10.4.2 倾斜驱动装置	(381)
10.5 安全系统设计	(381)
10.5.1 高载荷动态飞行模拟器影响安全 主要因素	(382)
10.5.2 高载荷动态飞行模拟器的安全系统结构	(396)
10.5.3 烟/火探测系统	(402)
10.5.4 独立的安全监测系统	(402)
第十一章 飞行指挥控制系统	(404)
11.0 总体描述	(404)
11.1 飞行指挥控制台	(405)
11.2 工程师控制台	(406)
11.3 航空医学控制台	(408)
11.4 飞行与航医准备工作间	(409)
11.5 飞行讲评室	(409)
11.6 能源供给控制工作间	(409)
11.7 资料、备件、维修工作间	(410)
11.8 安全管理与救护站	(410)
第十二章 动态飞行仿真系统工程管理与评估	(411)
12.1 飞行仿真系统工程管理的发展和形成	(411)
12.2 国际质量保证标准 ISO9000 简介	(412)

12.3	ISO9000 质量保证模式的要素	(413)
12.4	动态飞行仿真系统生产过程的特点	(414)
12.5	飞行仿真系统制作过程的质量管理体系建立	(414)
12.6	动态飞行仿真工程管理的内容和目标	(415)
12.7	动态飞行仿真系统生产计划	(416)
12.8	动态飞行仿真系统的质量计划	(417)
12.9	动态飞行仿真系统的过程控制	(417)
12.10	动态飞行仿真工程的质量记录	(419)
12.11	动态飞行仿真工程中的纠正和预防措施	(419)
12.12	动态飞行仿真系统设计评审和验证	(420)
12.13	动态飞行仿真系统的测试和检验	(421)
12.14	动态飞行仿真系统制作过程中的协调管理	(423)
参考文献		(425)

第一章 绪 论

高载荷动态飞行仿真技术，主要研究的是高性能战斗机的飞行载荷（ $-3G \sim +9G$ ）对飞行员和飞机的影响；对飞行员高载荷飞行技能和心理、生理承受能力的影响；对飞机高载荷防护设备功能进行分析。为研究飞行载荷对人的影响、高载荷飞行训练方法和研制动态飞行模拟器提供技术理论依据。

高性能战斗机，在飞行训练和空战机动飞行中，经常处于高载荷飞行环境。高载荷飞行技术与抗荷正压呼吸技巧已成为充分发挥战机先进性能、实现战斗力的关键因素之一。同时高载荷又可能给飞行员造成“灰视”、“黑视”和意识丧失（ $G-LOC$ ），危及飞行安全，飞行高载荷防护成为飞行训练的重要技术，也是研究加速度对人体影响的重要课题。在实际飞行训练中，战术飞行课目大部分含有高载荷动作，要求飞行员经常反复训练，以熟练掌握高载荷飞行技术和高 G 值防护能力，适应高性能战斗机作战训练需要。

高载荷动态飞行仿真技术已受到世界各国空军、海军和陆军航空兵的极大重视，在航空医学和飞行仿真领域得到迅速发展。

1.0 定义

高载荷动态飞行仿真技术：是集飞行仿真技术与载人离心机技术于一体，以相似原理、控制理论、计算机技术、信息技术及应用领域的专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型对实际的或设想的系统进行动态试验研究的一

门综合技术。

其特点是既涵盖了飞行仿真系统的技术，又融合了航空生理学、心理学研究成果和飞行加速度防护技术的发展成就。

航空事业的飞速发展，给飞行仿真技术及相关理论的发展带来了无限生机，也不断地提出更高的要求。尤其是各国的军用飞机处于升档换代的发展阶段，新型飞机的研制、试飞、性能品质试验验证、飞行员训练和战术战法研究都要求进行飞行仿真系统研究。飞行仿真技术基础是数值仿真和实物仿真，这些在各高等院校和研究单位得到迅速发展。伴随着计算机的发展，数值仿真几乎在各个领域得到充分的应用；对高深的理论、复杂的计算和复杂的事件建立数学模型进行求解，取得了成功。实时仿真在20世纪突飞猛进发展，取得巨大成果。在航空、石油化工、交通运输、电力冶金、机器制造领域等都得到了重视。尤其是在实际研究过程中难以进行或根本无法进行的实验，如高危险性飞行动作、探索性飞行动作和验证含毁灭性结论的飞行试验项目，更显示了系统仿真技术的生命力。

飞行仿真对飞机的研制、飞行理论的验证和模拟飞行训练起到了重要作用，尤其是一些有风险的空中动作更应该在模拟器上训练，既取得了预期效果又保证了飞行安全，并且有些探索性研究课目也只能在模拟器上进行。仿真技术的飞速发展奠定了动态飞行模拟器研制的技术基础，同时模拟器的逼真程度与时俱进。

当前，新一代战斗机的高性能也使飞机经常处于过载飞行状态，甚至高达9G的高载荷状态，现有的模拟器在模拟训练方面确实发挥了重大作用，但是其过载能力仅限于1.8G以下，无法承担高载荷模拟飞行训练任务。研究高载荷动态飞行模拟技术，成为新型飞机在产品型号研制过程中对飞机进行试验、验证和评估，对飞行员驾驶技术进行培训、战术课目动作进行训练和战术战法研究的重要手段，这就要求飞行仿真技术理论的发展与之相适应。高载荷动态飞行模拟器能实时产生高载荷飞行环境，进行

高载荷条件下的飞行训练。

在动态飞行模拟器中，产生动力以满足动态感觉的方法包括离心机、环形车、悬索等形式。因为离心机在航空医学领域内已有几十年的发展历史，甚至早于模拟器的发展，同时近期载人离心机在动态飞行仿真方面取得了巨大的进展，因此采用载人离心机的动力形式，有部分成熟技术可借鉴，加快了研制进程，降低了研制动态飞行模拟器的风险程度，也便于集成当代前沿技术，提高动态飞行模拟器的总体性能，尽快投入高载荷飞行训练与研究应用。所以，一般以离心机为动感平台进行动态飞行仿真技术研究。

动态飞行仿真技术是将航空医学发展的前沿技术—载人离心机技术移植于当前通用的飞行模拟器中，或者说是载人离心机作为飞行模拟器动态感觉平台，弥补了飞行仿真设备缺少较高飞行载荷这一缺陷。

这是从事航空工程和飞行仿真研究的专家们多年追求——在地面能模拟飞行载荷感觉。过去有一种说法，飞行模拟器再好，就是对飞机的重要指标都进行了逼真的模拟，也只能是对飞机进行N-1的模拟，总是缺一项飞行载荷动感模拟。而这“1”项欠缺，恰恰又是新型战斗机的训练精髓。高载荷机动飞行是发挥高性能飞机的最佳性能，提高战术技术能力、克敌制胜的具体体现。甚至国际上有一种说法：如果一个国家空军或一个新型飞机的飞行员没有经过高载荷（9 G）的飞行训练，其作战能力就要打折扣，无法达到高档水平。新型飞机的高性能，要求高载荷模拟飞行训练与之适应，促进了动态飞行仿真技术的发展。

动态飞行仿真是对高载荷环境的高度仿真，在基本飞行课目的训练和研究方面，又不能完全替代常规的飞行模拟器，与常规飞行模拟器形成飞行训练互补的先进装备。在美国及北约空军采用飞行模拟器训练学员和新改装的飞行员，对飞行员进行基本飞行驾驶技术训练；而用载人离心机训练作战部队飞行员，主要进

行高载荷防护能力和高载荷作战飞行技术训练。

1.1 动态飞行理论的研究与发展

飞行力学是研究飞行器在大气层内运动规律的学科，而其中的动态飞行动力学理论研究也随着飞行事业的发展而占有重要地位。20 世纪末期，新式高性能战斗机的出现更使人们倍加重视飞行动态理论的研究和应用。在实际飞行中，尤其是战斗机的战术机动飞行，飞行动力学理论成为多种技术的基础，指导着飞机的研制生产、飞行技术与战术技术、飞行训练和飞行仿真技术的新发展。这些从航空史的发展中得到了充分的证明。

1903 年第一架动力飞机升空飞行成功，人们对飞行规律的认识日益深化，在实际飞行中，对飞行规律的研究得到验证。1904 年英国勃瑞安把运动状态的稳定性理论第一次运用到飞机上来。1892 年茹可夫斯基从理论上论证了斤斗飞行的可能性。20 年后，1912 年俄国飞行员聂斯捷洛夫最先作出大坡度盘旋，推翻了当时各国认为飞行坡度超过 20 度就会失事的错误见解，并于 1913 年第一次完成斤斗飞行。1915 年，德国飞行员殷麦曼成功试飞半斤斗翻转。1934 年，由美国朗德主编、7 个国家 20 多位学者合编的《空气动力学》问世，该著作对起飞、着陆、盘旋、斤斗、失速、螺旋、俯冲等理论问题作了系统的分析和计算，进一步对飞行动态理论进行了研究。这就使飞行力学发展成为一门独立的学科的同时，动态飞行动力学理论的研究也取得了新发展。

民用航空飞机由于飞行平稳，不做特技动作，动态飞行的变化量不太突出。而战斗机则不同，它把高载荷动态飞行能力作为体现飞机性能的主要手段。第一次世界大战就有人用简单的飞行器运载、投掷炸弹，基本开始做一些相应有效的飞行动作。第二次世界大战则大规模使用飞机进行空战，动态飞行取得了很大发

展。著名的英德空战，仅从英国空军的飞机数量和质量上难以和当时工业极度发达的德国比拟，但总体上看英国空军战胜了德国空军，除军事、政治原因外，主要是英空军战术动作高机动化，也就是对动态飞行理论的充分应用。此后，受到战争的激励，动态飞行技术受到广泛的重视。

战后的航空技术飞速发展，从低速、亚音速飞行直至高亚音速飞行，飞行领域的扩大和新型飞机的频频出现，给飞行力学提出了不少新的课题，例如快速滚转中迎角和侧滑角发散问题。1948年菲利普斯首先提出了“气动惯性旋转”现象，并对此作了理论分析。其他如飞行员诱发振荡（PIO）和“飞行轨迹稳定性问题”也在各国学者的努力下逐步得到深入的分析研究。在航空技术的发展过程中，自动化装置，包括操纵时改善稳定性和操纵性的闭环系统也合理的列入到有人驾驶飞机中，使飞机性能向前跨越了一大步。

在20世纪四五十年代飞机突破音障，出现了第一代战斗机。主要特征：最大马赫数 $M=1.3$ 左右；飞机多采用后掠翼及细长机身；动力装置为加力涡轮喷气发动机；机载武器为航炮、火箭及第一代空——空导弹。代表机型为美国的 F-100 和前苏联的米格-19。

在20世纪五六十年代，飞机突破了热障，出现了第二代超音速战斗机，其主要特征：最大飞行马赫数为 $2.0\sim 2.5$ ，飞机为大后掠角机翼和后掠翼、三角翼、变后掠翼，还出现小展弦比平直翼。发动机推力增大，推重比增高，机载武器以近距红外导弹、中距雷达制导的导弹为主，并配有航炮。代表机型有美国 F104、F-4、前苏联的米格-21、米格-23、法国的幻影-III、瑞典的 Saab-37 等。

第三代超音速战斗机出现在20世纪六七十年代，主要特征：是最大飞行马赫数为 2.0 左右，但爬升率、盘旋半径、稳定和瞬时盘旋角速度、加速度等都有大幅度提高。飞机气动布局采用了

边条翼、机动前翼和翼身融合体等先进技术，动力装置改成了带加力的涡扇发动机，推重比高。普遍采用电传操纵系统和主动控制技术中的防宽稳定性技术。机载速射航炮、第三代中程导弹及近距格斗导弹，并装有全方位、全天候、高度自动化的火控系统。座舱仪表出现了电子综合显示器，火控系统出现了平视显示器。代表机型有美国的 F-15、F-16；前苏联的米格-29、苏-27、苏-30；法国的幻影 2000 等。而法国的阵风，德、英、意、西联合研制的 EFA-2020 及瑞典的 JSA-39 为三代半超音速战斗机，具有更高的战术技术性能。

第四代超音速战斗机预计近期装备部队，投入实战运行。其强调了隐身技术；超音速巡航；超音速机动；短距起落和良好的可维护性。其气动布局除第三代战斗机已采用的边条翼、翼身融合、近距耦合鸭式布局外，还采用前掠翼以及减少雷达散射面积（RCS）的隐身设计，机体结构大量采用复合材料。动力装置采用低通道的涡扇发动机或变循环发动机，主动控制技术比第三代战斗机有新发展，除继续使用稳定性技术外，直接力矩控制得到实际应用。机载武器装备机动性好，大离轴角发射和发射后不管的第四代导弹，火控系统与飞行控制系统交联，导航应用全球卫星定位系统（GPS）、机载数字雷达和高度综合化、小型化电子设备。代表机型目前只有美国的 F-22 先进技术战斗机（Advanced Technology Fight）。

1.2 动态飞行空气动力学研究

随着飞机的升档换代，对动态飞行的研究着重于特技飞行、失速和螺旋、气动惯性旋转等动作飞行载荷（ $-3 \sim +9G$ ）状态飞行下的理论实验研究。《飞机飞行力学》属理论研究，而飞行模拟实验和自由飞行模拟实验属于飞行试验，是研究飞行力学学科的必要手段。飞行模拟器，特别应强调的是具有能模拟高载荷