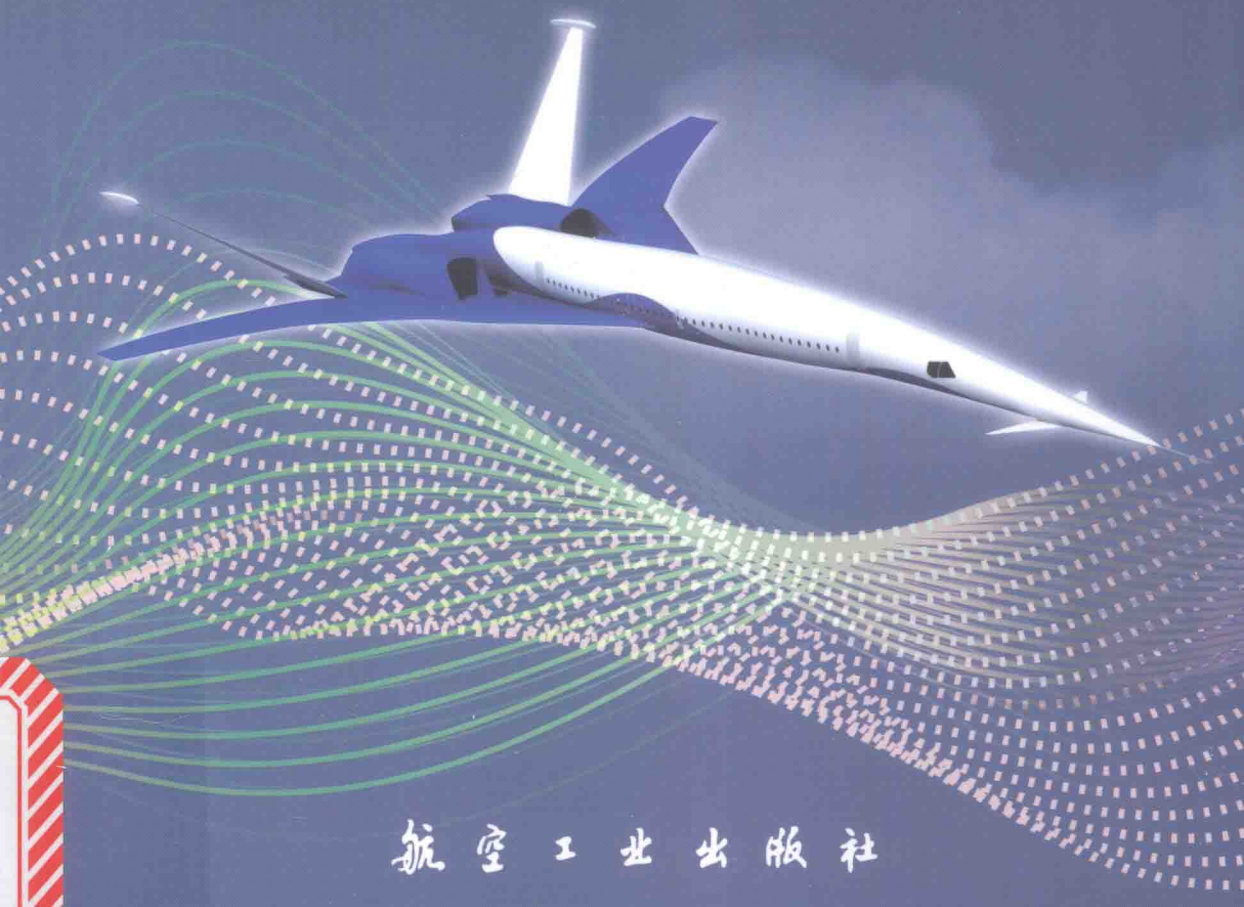


中国商飞北京民用飞机技术研究中心科研成果

民机前沿技术

ADVANCED TECHNOLOGIES FOR COMMERCIAL AIRCRAFT

王光秋 陈 黎 主编



航空工业出版社

民机前沿技术

王光秋 陈 黎 主编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书重点介绍了部分国内外正在开发的民机前沿技术,包括超声速和新概念民机及其动力装置发展战略,以及复合材料液体成形、镁铝合金、结构健康监测、等离子体流动控制和燃料电池等前沿技术。此外,还系统介绍了由“地沟油”等废弃油脂提炼航空生物燃油的基本技术途径和方法,以及民机客舱内病毒传播和可用于下一代空管系统的飞机尾涡控制等绿色环保技术。本书主要适合从事民机技术研究的科研人员阅读,同时也可供大中专院校师生、航空爱好者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

民机前沿技术/王光秋,陈黎主编. --北京:航空工业出版社,2017.5

ISBN 978-7-5165-1204-3

I. ①民… II. ①王… ②陈… II. ①民用飞机—高技术 IV. ①V271

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第115534号

民机前沿技术

Minji Qianyan Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017年5月第1版

2017年5月第1次印刷

开本:710×1000 1/16

印张:23.5

字数:363千字

印数:1—1000

定价:68.00元

《民机前沿技术》编写组

主 编 王光秋 陈 黎

成 员 (按姓氏笔画排序)

王 轶	王志峰	冯荣欣	朱萃汉	汲生成
李 江	杨 彬	张伶英	张志雄	陈志平
林大楷	胡忠民	夏 明	卿新林	蔡 建
熊美蓉				

前 言

随着社会经济的发展和水平的提高，人们已越来越多地选择飞机作为出行工具。与此同时，全球气候不断变暖的影响也使世界各国对环保的要求不断提高，节能减排已成为新型民用飞机设计的重要指标。在此背景下，新型绿色环保商用客机将是继波音 787 和空客 A350 之后，世界下一代民机发展的重点。因此，可用于下一代先进民机的前沿技术逐渐成为民机主制造商和供应商关注的重点。

《民机前沿技术》一书是在中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心（简称中国商飞北研中心）近年部分科研项目成果的基础上编撰而成，其内容反映了中国商飞北研中心在世界民机前沿技术领域的部分最新研究成果。本书力求以通俗易懂的语言对目前国内外正在开发的一些民机前沿技术进行简要介绍，使广大读者能够初步了解这些技术的基本概念、技术特点、应用领域和发展前景；同时也希望本书能够起到抛砖引玉的作用，为探索我国民机前沿技术以及研制下一代新型民机贡献绵薄之力。需要指出的是，本书重点是对国内外已经探索多年并取得一定进展，但尚未在现有民机中得到应用的部分前沿技术进行集中介绍，而已经在波音 787、空客 A350 等新一代民机中得到应用的先进技术，如复合材料、多电、环控等技术，本书并未涉及。

本书第 1 章由王光秋、陈黎撰写，第 2 章由陈黎撰写，第 3 章由汲生成撰写，第 4 章由王光秋、杨彬撰写，第 5 章由王光秋、张伶英、胡忠民、朱萃汉撰写，第 6 章由王光秋、李江撰写，第 7 章由王志峰、王光秋撰写，第 8 章由胡忠民、冯荣欣撰写，第 9 章由熊美蓉、陈志平撰写，第 10 章由王轶、卿新林、蔡建撰写，第 11 章由林大楷撰写，第 12

章由汲生成、王光秋撰写，第 13 章由夏明、张志雄撰写。全书的选题、统稿、审阅和定稿等工作由主编王光秋、陈黎负责。

本书内容所涉及的民机前沿技术研究工作是在中国商飞总部（第 3、第 4、第 6、第 7 章相关课题）、工信部（第 1、第 2、第 13 章）、科技部（第 9 章）、北京市科委（第 8、第 10 章）、中国商飞—波音航空节能减排技术中心（第 5、第 11、第 12 章）、杭州能源工程技术有限公司（第 5 章）等单位的支持和帮助下完成的，在此，一并对以上单位及相关管理和技术人员表示衷心感谢！中国商飞北研中心的各级领导和同事对完成相关课题和出版本书始终给予了大力支持和帮助，中航出版传媒有限责任公司和本书责编为该书的编写、出版做了大量工作，在此对以上单位和个人表示诚挚的感谢！

由于编者水平有限，加之时间仓促，本书在技术观点阐述、内容编排等方面难免存在不足和错误之处，敬请广大读者及时批评指正。

编者

2017 年 2 月

目 录

第1章 美国未来超声速客机发展战略及近期进展

- 1.1 NASA 超声速客机“三步走”发展战略提出背景及主要内容 //1
- 1.2 美国工业界开展 N+1、N+2、N+3 代超声速客机研究的近期进展 //4
 - 1.2.1 N+1 代超声速公务机 //4
 - 1.2.2 N+2 代小型超声速客机 //7
 - 1.2.3 N+3 代大型超声速客机 //10
- 1.3 美国超声速客机发展战略对他国的启示 //13
- 参考文献 //15

第2章 商用货运无人机技术发展现状及应用前景

- 2.1 商用货运无人机相对于传统货运飞机的优势 //17
- 2.2 发展货运无人机的技术可行性 //22
- 2.3 货运无人机实用化所面临的技术挑战 //25
- 2.4 国外在相关领域的研究现状 //27
- 参考文献 //30

第3章 欧美未来民用航空技术发展规划

- 3.1 未来民用客机计划的提出背景 //31
- 3.2 欧美主要计划内容及其进展 //38
- 3.3 未来展望 //68

第4章 民机动力装置发展趋势

- 4.1 民用涡扇发动机发展概况 //70
- 4.2 新构型发动机技术发展 //82
 - 4.2.1 齿轮传动涡扇 (GTF) 发动机 //86
 - 4.2.2 开式转子发动机 (Open Rotor) //91
- 4.3 超声速客机发动机发展趋势 //96
 - 4.3.1 变循环发动机 //99
 - 4.3.2 涡轮冲压组合发动机 //107
- 4.4 未来民用发动机产品发展与需求预测 //116
 - 4.4.1 单通道客机与发动机 //116
 - 4.4.2 双通道客机与发动机 //117
 - 4.4.3 超声速客机与发动机 //119

第5章 利用废弃动植物油脂制备航空生物燃油技术

- 5.1 航空生物燃油发展概况 //123
 - 5.1.1 航空生物燃油发展背景 //124
 - 5.1.2 航空生物燃油制备技术 //126
 - 5.1.3 发展航空生物燃油技术的意义和面临的挑战 //129
- 5.2 国内外航空生物燃料研究状况及最新进展 //130
 - 5.2.1 国内外航空生物燃料研究近况 //131
 - 5.2.2 国际主流航空生物燃油生产工艺路线简介 //132
 - 5.2.3 技术储备型工艺路线 //133
- 5.3 HRC 技术的先进性及技术路线 //133
 - 5.3.1 不同技术路线特点和经济效益比较 //133
 - 5.3.2 HRC 技术先进性 //134
 - 5.3.3 HRC 技术路线 //135
 - 5.3.4 HRC 技术创新点 //136

- 5.4 HRC 技术介绍 //137
 - 5.4.1 利用“地沟油”等废弃油脂制备生物柴油 //137
 - 5.4.2 生物柴油加氢制备脂肪醇 //137
 - 5.4.3 脂肪醇脱水制备烯烃 //139
 - 5.4.4 烯烃加氢裂化制备航空燃油 //139
 - 5.4.5 精馏航空煤油 //141
 - 5.5 经济性分析 //142
 - 5.5.1 收率分析 //142
 - 5.5.2 加工成本分析 //143
 - 5.6 HRC 技术路线特点和创新点 //143
 - 5.6.1 HRC 技术路线主要特点 //144
 - 5.6.2 HRC 技术路线的创新点 //144
 - 5.7 HRC 技术发展展望 //145
 - 参考文献 //146
-

第6章 等离子体流动控制技术发展现状及应用前景

- 6.1 流动控制技术概述 //148
 - 6.1.1 机翼绕流的流场结构 //148
 - 6.1.2 现代流动控制技术 //151
 - 6.2 等离子体流动控制技术 //153
 - 6.2.1 等离子体简介 //154
 - 6.2.2 等离子体激励器 //154
 - 6.2.3 等离子体流动控制机理及应用 //160
 - 6.3 等离子体流动控制研究现状 //166
 - 6.4 等离子体流动控制面临的主要问题和挑战 //170
 - 参考文献 //172
-

第7章 燃料电池技术及其在民用航空领域的应用

- 7.1 燃料电池原理及特点 //173
 - 7.1.1 原理及分类 //173

- 7.1.2 燃料供应 //176
- 7.1.3 技术特点 //178
- 7.2 燃料电池的应用背景 //180
 - 7.2.1 机载系统功率需求不断提高 //180
 - 7.2.2 机载系统能源效率有待提升 //182
- 7.3 燃料电池的应用方向 //185
 - 7.3.1 为机载系统供电 //185
 - 7.3.2 供热、供水、供气 //188
 - 7.3.3 燃料电池混合发动机 //189
- 7.4 国内外研究进展 //191
 - 7.4.1 波音公司 //191
 - 7.4.2 空中客车公司 //194
 - 7.4.3 国内研究状况 //197
 - 7.4.4 专利布局 //198
- 7.5 主要问题和挑战 //200
- 7.6 小结 //202
- 参考文献 //203

第8章 新材料新工艺

- 8.1 新材料——轻质合金 //205
 - 8.1.1 更轻更强的铝锂合金 //206
 - 8.1.2 次承力结构中崭露头角的镁合金 //210
- 8.2 新型层板结构 //215
 - 8.2.1 纤维增强铝合金/铝锂合金层板 //216
 - 8.2.2 GLARE 层板研究现状 //217
 - 8.2.3 GLARE 层板的未来发展 //219
- 8.3 新工艺 //220
 - 8.3.1 减少连接件的新型连接工艺 //221
 - 8.3.2 突破传统机械加工工艺的增材制造技术 //224
- 8.4 结束语 //230
- 参考文献 //230

第9章 复合材料液体成形技术

- 9.1 民机复合材料应用背景 //233
- 9.2 液体成形技术概况 //235
 - 9.2.1 液体成形技术分类 //238
 - 9.2.2 液体成形关键技术 //244
- 9.3 国内外民机应用现状 //255
- 9.4 未来展望 //261
- 参考文献 //262

第10章 先进民机健康管理技术

- 10.1 引言 //264
- 10.2 民机健康管理技术发展概况 //265
 - 10.2.1 民机系统健康管理技术发展现状 //265
 - 10.2.2 民机结构健康监测技术发展现状 //268
- 10.3 民机综合健康管理技术 //270
 - 10.3.1 民机综合健康管理系统的功能定义 //270
 - 10.3.2 民机综合健康管理系统的架构 //271
 - 10.3.3 民机综合健康管理系统的核心技术 //274
- 10.4 民机结构健康监测技术 //276
 - 10.4.1 民机结构健康监测需求 //276
 - 10.4.2 民机结构健康监测先进传感器 //278
 - 10.4.3 民机结构健康监测关键技术 //281
- 10.5 民机综合健康管理演示验证 //288
- 10.6 结语 //291
- 参考文献 //292

第11章 飞机尾涡分析技术研究

- 11.1 飞机尾涡概况及其危害 //294
- 11.2 飞机尾涡特性 //296

- 11.3 飞机尾涡研究现状 //298
 - 11.3.1 尾涡模型测试 //299
 - 11.3.2 尾涡数值模拟 //299
 - 11.3.3 飞机尾涡探测研究 //300
- 11.4 飞机尾涡分析技术应用展望 //312
- 参考文献 //313

第12章 病菌在民航客机机舱内的传播

- 12.1 机舱内病菌传播的研究方法 //316
- 12.2 试验方法 //320
- 12.3 数值模拟方法 (CFD) //321
- 12.4 概率分析方法 //324
- 12.5 国内外研究现状 //325
- 12.6 总结 //331
- 参考文献 //331

第13章 超声速客机座级、航程与速度对经济性的影响

- 13.1 引言 //334
- 13.2 基于经济性的座级、航程与速度匹配设计 //335
 - 13.2.1 燃油重量计算方法 //335
 - 13.2.2 座级对经济性的影响研究 //337
 - 13.2.3 航程对经济性的影响 //340
 - 13.2.4 速度对经济性的影响 //341
 - 13.2.5 座级、航程与速度的建议值 //345
- 13.3 超声速客机的初步方案 //346
 - 13.3.1 超声速客机的发展 //346
 - 13.3.2 备选气动布局筛选 //347
 - 13.3.3 超声速客机方案概述 //352
- 13.4 与常规构型的对比 //359
- 13.5 结论 //362
- 参考文献 //363

第 1 章

美国未来超声速客机发展战略及近期进展

为了抢占世界民机技术发展的制高点,维持美国在相关领域的领先地位,美国国家航空航天局(NASA)近年来已经着手研究未来民机的长远发展问题,并对今后 20~30 年内先进民机的发展进行了规划。该计划按时间顺序分为 $N+1$ 、 $N+2$ 和 $N+3$ 三个阶段(即三代,“三步走”战略), $N+1$ 代表近期(2015 年), $N+2$ 代表中期(2020—2025 年), $N+3$ 代表远期(2030—2035 年)目标。这三个阶段中的每一代民机均同时包括亚声速和超声速两类飞机。以此“三步走”战略思想为指导,美国工业界在 NASA 的主导下,从 2005 年开始对未来超声速客机的概念方案及关键技术展开新一轮评估研究。到目前为止,相关工作已取得很大进展,并获得了相当重要的技术成果。

1.1 NASA 超声速客机“三步走”发展战略提出背景及主要内容

美国在超声速民用运输机研究领域历史悠久,最早可追溯到 20 世纪 50 年代初(波音公司 1952 年就开始利用缩比模型进行超声速客机技术研究)。但是出于对未来民用航空运输市场的定位以及与潜在对手竞争等原因,多年来美国一直专注于高速大型超声速客机的发展。例如 60—70 年代,与欧洲“协和”和苏联图-144 同期推出的波音 2707 超声速客机方案(后于 1971 年下马)就被要求载客量(250 人,“协和”仅为 100~140 人)、航程(可飞越太平洋,“协和”勉强飞越大西洋)和巡航速度($Ma2.7$,“协和”仅为 $Ma2.04$)等性能指标全面超越竞争

对手。直至 90 年代, NASA 实施的“高速研究/高速商用运输机”计划(HSR/HSCT, 后于 1999 年被取消) 方案仍被定位为一种巡航速度 $Ma2.4$ 、300 座级、航程可横跨太平洋的大型超声速客机。

然而, 包括美国在内的世界各国多年来的研究表明, 导致“协和”、图-144 等第一代超声速客机“技术成功, 商业失败”的两大主要原因是经济性和环保性差。即使今天, 这两个问题仍未得到妥善解决, 反而随着人们节能环保意识的不断增强, 显得更为突出。在这样的背景下, 要想使新一代超声速客机在具备与同代远程亚声速客机相当的航程、载客量等指标的同时, 还能满足各国在油耗、噪声、声爆、氮氧化物(NO_x) 排放等方面提出的日趋严格甚至苛刻的要求, 仍存在着难以克服的巨大技术障碍。若近期内适当放宽新机的部分性能指标要求, 先行发展一种尺寸重量(质量) 相对较小、速度相对较慢的超声速客机, 所面临的技术困难则小得多。以超声速客机最引外界关注, 并且亟待解决的声爆问题^①为例, 相比快速大型飞机, 在慢速小型飞机上解决就更加容易。研究表明, 声爆强度与飞机的速度有关, 即同等技术条件下飞机速度越快, 产生的声爆也越强烈; 另一方面也和飞机的大小(这涉及飞机的载客量、航程等性能指标) 密切相关, 同等飞行条件(速度、高度等) 下小型飞机产生的声爆远不及大型飞机强烈。不仅如此, 当飞机的大小、速度等指标降低后, 对气动外形、结构材料、动力装置等要求也会相应降低, 这将有助于进一步减小技术难度, 并降低研制成本。

有鉴于此, NASA 开始将近期的关注重点逐步转向较小、更安静、更清洁并且更高效的超声速客机, 尤其是巡航速度 $Ma1.6 \sim 1.8$ 甚至更低的中、小型超声速公务机, 而将发展高速大型超声速客机的目标推迟到更长远的未来去实现。从这一思想出发, NASA 为今后超声速客机发展制订了一条“由小到大、由近到远、由慢到快”的发展途径, 将未来 $N+1$ 、 $N+2$ 和 $N+3$ 代超声速客机分别定位为超声速公务机、小型超声速客机和大型超声速客机, 并且各代飞机需达到的平台性能指标

① 按照美国法律规定, 声爆强度超标的民机将不允许在陆地尤其是居民区上空飞行。

(载客量、巡航速度、航程等)和需满足的节能环保标准(油耗、机场噪声、声爆强度和氮氧化物排放量等)逐步提高,最终通过N+1、N+2和N+3三代飞机“三步走”,分阶段实现多年来的超声速客机发展目标。在此基础上,NASA还制订了各代飞机需达到的初始技术指标,见表1-1。

表1-1 NASA未来超声速客机发展战略的近期、中期和远期技术目标

阶段划分	N+1 (2015年)	N+2 (2020—2025年)	N+3 (2030—2035年)
飞机类型	超声速喷气公务机	小型超声速客机	大型高效超声速客机
巡航速度/ Ma	1.6~1.8	1.6~1.8	2.0; 1.6~2.0 (低声爆持续 飞行速度)
航程/n mile	4000 (跨大西洋)	4000 (跨大西洋)	6000 (跨太平洋)
载客量/人	6~20	35~70	100~200
声爆强度/PLdB	65~70	65~70	65~70 (低声爆 条件下飞行); 75~80 (无限制条件飞行)
机场噪声裕度(低于 第三阶段噪声标准)/ EPNdB	10	10~20	20~30
巡航飞行时排放(每 千克燃油氮氧化物排放 量)/g	与目前的亚声速 飞机相当	<10	<5; 颗粒物和 水蒸气 排放同时 减少
油耗/(人·英里/磅 燃油)	1.0	3.0	3.5~4.5

1.2 美国工业界开展 N+1、N+2、N+3 代超声速客机研究的近期进展

根据 NASA 的安排, N+1 代超声速喷气公务机的研究工作主要由湾流航宇公司、Aerion 公司和超声速航宇国际公司 (SAI) 等负责, 而以波音公司和洛克希德-马丁公司 (简称洛马公司) 为首的两个研究团队 (成员均来自美国工业界和各大大学) 则并行开展 N+2、N+3 代超声速客机的概念研究。

1.2.1 N+1 代超声速公务机

美国国内对超声速公务机已进行了超过 10 年的探索, 部分研究工作甚至在 NASA 提出其超声速公务机发展计划之前就已经开始, 目前相关技术日益成熟。按照美国媒体的乐观估计, 实用的超声速公务机很可能将在今后 10 年内正式投入市场。这类飞机以湾流航宇公司近年推出的“安静超声速喷气机” (Quiet Supersonic Jet, QSJ) 为典型代表, Aerion 公司研制的“超声速喷气公务机” (Supersonic Business Jet, SBJ) 和超声速航宇国际公司研制的“安静超声速运输机” (Quiet Supersonic Transport, QSST) 也属于这一类型, 这三种飞机在设计上各有特色。

1. 湾流航宇公司的 QSJ 方案

湾流航宇公司的“安静超声速喷气机”起飞重量 10 万磅 (约 45400kg), 载客 15 人左右, 巡航速度 $Ma1.8$, 航程 4800n mile (约 8890km)。其突出特点是采用了民用飞机上非常罕见的可变后掠翼布局。按照湾流航宇公司的评估, 采用可变后掠翼布局尽管会增加飞机的结构重量, 但带来的好处却更多: 一方面可降低飞机对机场跑道长度的要求, 使其能够在通常适合亚声速喷气机起降的机场 (跑道长 1800m 左右) 使用; 另一方面通过改变机翼后掠角和翼尖形状, 还有助于降低飞机噪声。

为了在声爆水平方面满足要求, 湾流航宇公司根据近年来与 NASA 合作实施的“安静长钉” (Quiet Spike) 计划的研究成果, 拟在飞机头

部加装一套声爆抑制装置，它是一根可伸缩的矛状尖头长杆，可将飞行中产生的强激波分解为三道在空间中相互平行传播的弱激波，从而减轻声爆强度。与此同时，该机还采用了特殊设计的进气道，能够在不影响发动机工作效率和增加飞行阻力的前提下，减轻声爆并降低噪声。此外，该机今后还可能配装由通用电气公司研制的变循环发动机，使飞机在起降、加速、亚声速和超声速等各种飞行状态下的性能得到兼顾，届时其油耗、噪声和声爆等指标还将进一步改善。图 1-1 为 QSJ 外形假想图。

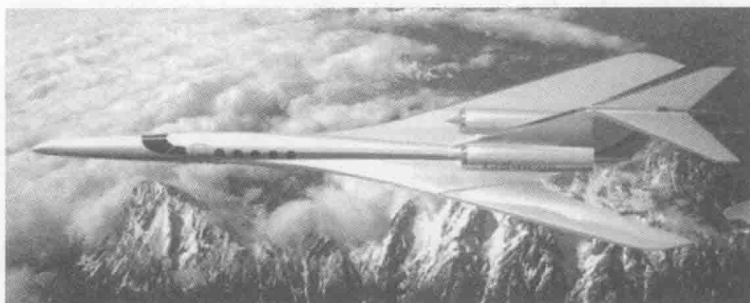


图 1-1 湾流航空公司 QSJ 外形假想图

2. Aerion 公司 SBJ 方案

目前 Aerion 公司正在研制的“超声速喷气公务机”采用了“梯形平直机翼 + 倒 T 形尾翼”的常规布局，机长 148.3ft (约 45.4m)，起飞重量 9 万磅 (约 40860kg)，载客 8~12 人，最大巡航速度 $Ma1.6$ ，无声爆飞行持续巡航速度 $Ma1.1 \sim 1.2$ ，航程超过 4000n mile (约 7400km)。预计 SBJ 将于 2019 年首飞，2021 年后推向市场。

SBJ 引人注目之处在于其没有沿用超声速飞机上常见的后掠翼或三角翼，而是在 Aerion 公司获得专利的超声速“自然层流”(Natural Laminar Flow, NLF) 技术基础上，采用了相对厚度和展弦比均较小的梯形平直机翼 (其外形类似于著名的 F-104 战斗机)。这种布局不仅有助于减小机翼外形尺寸，减轻结构重量，提高副翼效率，降低飞行阻力，更重要的是使飞机在具备较好的超声速飞行性能的同时，兼顾了跨声速和低速飞行性能，当其以 $Ma0.9 \sim 1.1$ 的速度飞行时，可保持与 $Ma1.6$ 超声速巡航飞行时同样高的气动效率，并且可以在通常适于亚声速飞机