

飞机设计技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

THE SURVEY OF
X-PLANES

X 系列飞行器概览

段卓毅 主编



航空工业出版社

X 系列飞行器概览

段卓毅 主编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书对美国 X 系列飞行器从 20 世纪 40 年代的贝尔 X-1, 直到最新的 X-56 多用途技术验证平台的研制历史、结构、系统、设备、推进系统、技术性能参数等内容进行了翔实而系统的描述, 在相当程度上反映了美国航天航空高技术探索发展的脉络, 对我国开展空天高技术研究发展具有重要的参考价值。

本书的读者对象主要为航空工程技术人员, 也可供高等院校航空专业师生, 或者空军、海军航空兵、陆军航空兵等相关领域的有关人员及航空爱好者阅读。

图书在版编目 (C I P) 数据

X 系列飞行器概览 / 段卓毅主编. -- 北京: 航空工业出版社, 2017. 1

(飞机设计技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1141 - 1

I. ①X… II. ①段… III. ①飞行器—基本知识
IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 302608 号

X 系列飞行器概览
X Xilie Feixingqi Gailan

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 1 月第 1 版

2017 年 1 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 56.5

字数: 1272 千字

印数: 1—2000

定价: 238.00 元

《X 系列飞行器概览》

编委会

主 编 段卓毅

执行主编 李文正 孙侠生 朱海秦 黄 诚
史卫民 欧阳润根

副 主 编 郭圣洪 张令波 罗云宝 常 斌
陈开陶 席小宁 雷武涛 李 巍

统 编 朱 璐 许云峰 王立行

编 写 朱 璐 杨 戈 张兴国 施 维
陈绍宇 潘 睿 张 伟 何红娥
王 玲

审 校 雷武涛 蒲宏斌 王银虎 史永强
周 林 蒋 彪 耿建中

前 言

半个多世纪以来，美国发展的先进技术验证机系列不仅为构筑美国在世界航空航天领域的技术领先地位做出了重要贡献，也为人类实现突破声障、过失速机动、短距垂直起降、进入太空等一系列重要的航空航天探索研究立下了汗马功劳。在世界百年航空发展史中，美国的X系列先进技术验证机的发展衍变虽然只历经了半个多世纪的时间，但它们对推动美国乃至整个世界的航空技术的进步与发展起着十分重要的“开天先锋”的作用。

1947年10月14日，第一架X系列验证机X-1率先突破声障，实现了人类超声速飞行的梦想。时至今日，美国一共研制了55型X系列验证机，其中航空领域的32型、航天方面的23型。航空领域的X系列验证机主要聚焦于当时航空领域最具探索性和前瞻性的新概念飞行器所独具的空气动力、结构强度、飞行控制、飞机/发动机一体化设计及试飞验证问题，涵盖了跨声速、超声速、前掠翼布局、高机动性、短距垂直起降、隐身技术、翼身融合体布局、弹性机翼技术、超声速低声爆技术以及复合直升机及旋翼/固定翼飞机等。航天方面的验证机早期集中于火箭动力飞行试验，关注升力体布局，解决空天飞行返回大气层时的最佳气动布局问题，近些年则更多注重空天一体飞行器相关技术（包括动力装置，如超燃冲压发动机技术）的试飞验证。

编写本书的初衷是想将迄今为止美国人实现升空飞行的从贝尔X-1到最新的X-56多用途技术验证平台的研制背景、所验证的核心技术、总体方案、空气动力、结构强度、机载系统、推进装置、性能参数等，以一种富有逻辑而通俗易懂的形式进行全面而系统的介绍，使从事航空航天事业的科技人员和管理人员有一册随手可阅的案头卷、枕边书。

在与编写小组一起广泛收集国内外素材的同时，欣喜地获赠李文正先生编译的《X系列飞行器》（该书介绍了X-1到X-45），如获至宝。是简单地将后续X系列型号补齐，续貂前著，让读者在研读任何一卷时，难免生发只窥一斑、难见全豹之感，还是参考前篇，将从X-1到X-56统一架构、系统编撰，清晰全貌地展现并揭示X系列的发展脉络？答案无疑

是后者。

思忖再三，还是与李文正先生联系，交流想法后，李文正先生亦表赞同，同时还在百忙之中审阅全稿并给予悉心指导。

中国航空工业历经 60 多年的发展，特别是最近十多年的奋起直追，已经初步实现了从望尘莫及到望其项背的追赶。然而，要成为真正意义上的航空大国和航空强国，实现从望其项背到并驾齐驱的赶超，甚至一骑绝尘的领跑，除了追踪研究美国航空航天最新成就之外，还要探究航空航天新型装备研发必须遵循的内在科学规律，以系统工程的思维，潜心研究实现从创新概念到实用装备必须经历的关键路径，循“规”蹈“矩”，做到创新与实用的完美统一。

这也是我们实现从测仿到创新的必由之路。衷心希望广大航空航天事业的科研工作者能够从本书中得到启迪和帮助。

段卓毅

2016. 1

目 录

第 1 章	贝尔飞机公司 X-1	(1)
第 2 章	贝尔飞机公司 X-2	(51)
第 3 章	道格拉斯公司 X-3	(80)
第 4 章	诺斯罗普公司 X-4	(97)
第 5 章	贝尔飞机公司 X-5	(111)
第 6 章	康维尔公司 X-6	(132)
第 7 章	洛克希德公司 X-7A、X-7A-3、X-7B 和 XQ-5	(154)
第 8 章	航空喷气工程公司 X-8A、X-8B、X-8C 和 X-8D	(171)
第 9 章	贝尔飞机公司 X-9	(185)
第 10 章	北美航空公司 X-10	(196)
第 11 章	康维尔公司 X-11	(212)
第 12 章	康维尔公司 X-12	(227)
第 13 章	瑞安公司 X-13	(233)
第 14 章	贝尔飞机公司 X-14、X-14A 和 X-14B	(248)
第 15 章	北美航空公司 X-15 和 X-15A-2	(267)
第 16 章	贝尔飞机公司 X-16	(351)
第 17 章	洛克希德公司 X-17	(368)
第 18 章	希勒飞机公司 X-18	(382)
第 19 章	寇蒂斯-莱特公司 X-19	(394)
第 20 章	波音公司 X-20	(407)
第 21 章	诺斯罗普公司 X-21A	(427)
第 22 章	贝尔航空航天特克斯特朗公司 X-22A	(442)
第 23 章	马丁-玛丽埃塔公司 X-23A	(459)
第 24 章	马丁-玛丽埃塔公司 X-24A、X-24B 和洛克希德公司 X-24C	(467)
第 25 章	本森飞机公司 X-25、X-25A 和 X-25B	(492)
第 26 章	施韦策飞机公司 X-26A 和洛克希德公司 X-26B	(498)
第 27 章	洛克希德公司 X-27	(513)
第 28 章	乔治·佩雷拉飞机公司 X-28A	(523)
第 29 章	格鲁门公司 X-29A	(530)

第 30 章	X-30A	(546)
第 31 章	洛克韦尔国际公司/DASA X-31A	(561)
第 32 章	波音公司 X-32A 和 X-32B	(578)
第 33 章	洛克希德-马丁公司 X-33	(597)
第 34 章	轨道科学公司 X-34	(617)
第 35 章	洛克希德-马丁公司 X-35A、X-35B 和 X-35C	(630)
第 36 章	波音公司 X-36A	(655)
第 37 章	波音公司 X-37	(663)
第 38 章	比例复合材料公司/NASA X-38	(681)
第 39 章	空军研究实验室 X-39	(696)
第 40 章	波音公司 X-40A 和 X-40B	(698)
第 41 章	X-41	(706)
第 42 章	X-42	(708)
第 43 章	微型飞机公司 X-43	(710)
第 44 章	洛克希德-马丁公司 X-44	(718)
第 45 章	波音公司 X-45A	(722)
第 46 章	波音公司 X-46A	(728)
第 47 章	诺斯罗普-格鲁门公司 X-47	(729)
第 48 章	波音公司 X-48	(760)
第 49 章	皮亚斯基飞机公司 X-49A	(765)
第 50 章	波音公司 X-50A	(768)
第 51 章	波音公司 X-51A	(773)
第 52 章	X-52	(803)
第 53 章	波音公司 X-53	(804)
第 54 章	湾流宇航公司 X-54	(828)
第 55 章	洛克希德-马丁公司/极光飞行科学公司 X-55	(832)
第 56 章	洛克希德-马丁公司 X-56	(840)
附录 1	X 飞行器彩色图集	(855)
附录 2	缩略语表	(882)
参考文献		(894)

第1章 贝尔飞机公司 X-1

1.1 X-1 (第一代)

1.1.1 承制商

贝尔飞机公司 (位于纽约州布法罗)。

1.1.2 出资方

美国空军、国家航空咨询委员会 (NACA)^① 和贝尔飞机公司。

1.1.3 项目发起

X-1 飞机的正式合同 (W33-038-ac-9183) 于 1945 年 3 月 16 日签订。其他工作在 1943 年 10 月就已经开始进行了。X-1 项目的辅助研究于 20 世纪 30 年代中期就已逐步开始。



图 1-1 停在贝尔飞机公司纽约州惠特菲尔德工厂的第一架 X-1 (序列号 46-062)

(不久后于 1946 年 1 月在佛罗里达州派因卡斯尔空军基地开始滑翔飞行试验,

图中高频无线电天线清晰可见, 引人注目的是相对厚度 10% 的机翼,

后来改为 8% 的更匀称的机翼)

1.1.4 任务

设计 X-1 飞机的目的是对飞机在以声速或超声速飞行时的动力特性进行全尺寸研究。最重要的能力是安全地对跨声速飞行包线进行探索。项目开始时, 超声速飞行对稳定性和控制的影响可能是最重要的两项研究任务。后来, 结构动力学、推进和生理现象也成了主要的研究目标。

1.1.5 研制数量

共 3 架, 空军序列号分别为 46-062、46-063 和 46-064。最初这些飞机都用

^① 于 1958 年改称为美国国家航空航天局 (NASA)。

的是“XS-1”这个名字，在研制和初步飞行试验进程中才去掉“S”（代表“超声速”）这个字母。

1.1.6 研制历史

X-1 是第一架名称中带“X”（表示“试验”）的飞机。计划是在第二次世界大战期间提出的，当时空气动力学家和结构工程师们开始担心空气压缩性可能成为影响高速飞机性能的主要障碍。

不幸的是，当时作为研究工具的风洞，几乎没有做过速度在 $Ma0.75$ 和 $Ma1.3$ 之间的研究。跨声速激波反射，即试验模型的激波经风洞壁反射回模型这一现象，极大地妨碍了对这一关键速度领域的气流特性的科学研究。NACA 兰利研究中心经多年研究，才解决了这个问题（在风洞壁上开缝），但这已经是 1946 年 X-1 开始飞行试验以后的事了。



图 1-2 在派因卡斯尔的无动力滑翔飞行试验时间虽短但很有成效（贝尔飞机公司的首席试飞员杰克·伍拉姆斯认为 X-1 飞机极易操作，飞起来很舒服）

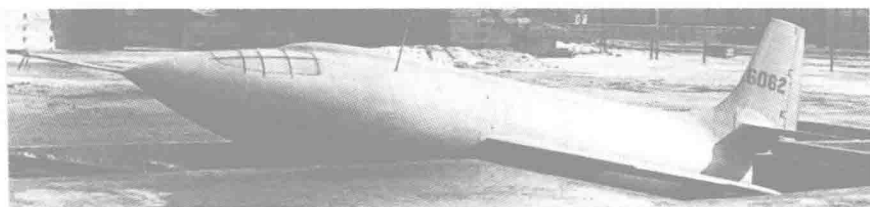


图 1-3 在惠特菲尔德工厂，没有研制出用于 B-29 载机的液压升降系统之前，装 X-1 飞机的方法是让 X-1 飞机退入特殊的坑里，然后将 B-29 向它的上方牵引就位

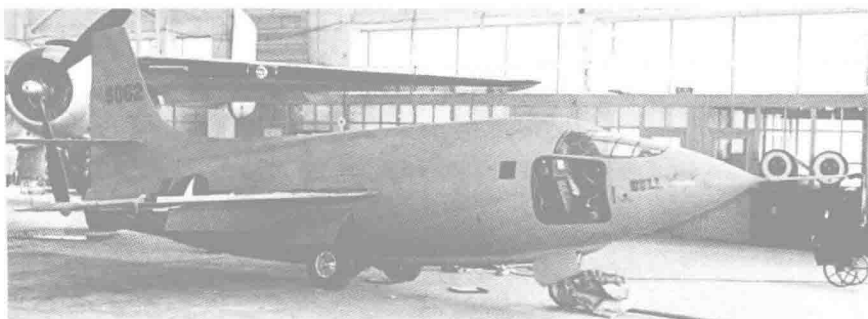


图 1-4 在惠特菲尔德工厂称重台上的首架 X-1 飞机（接着就运到穆罗克空军基地进行动力飞行试验，注意无线电天线已拆下）

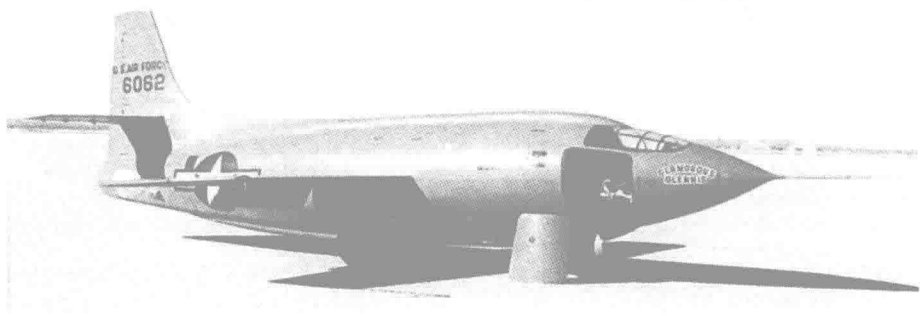


图 1-5 停在穆罗克空军基地干湖床上的 46-062 号飞机（时间可能是 1947 年末或 1948 年初。
机头上“迷人的格兰尼斯”来源于耶格尔的夫人格兰尼斯·耶格尔）

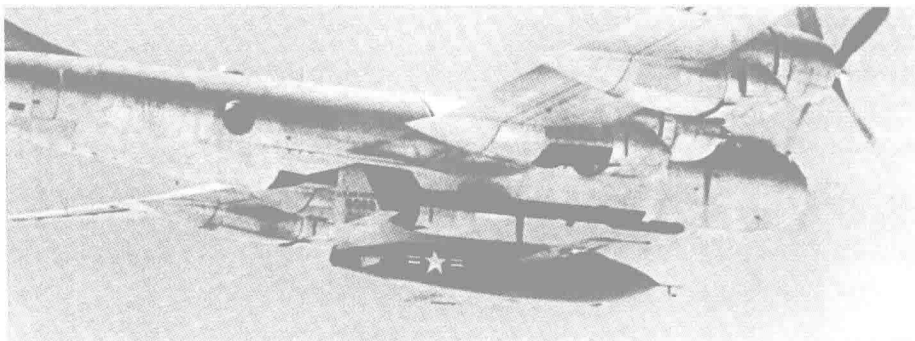


图 1-6 这张空中发射图中的 46-062 号机喷涂成黄白色，说明已经到了在当时的爱德华兹空军基地进行的飞行试验的晚期（值得注意的是载机为 EB-50D 轰炸机）

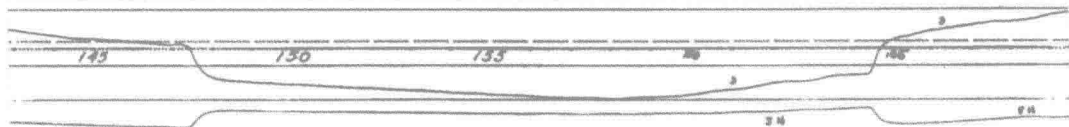


图 1-7 图中所示为 46-062 号机于 1947 年 10 月 14 日进行超声速飞行获得的
历史上很著名的压力曲线（中间窄的部分代表进行超声速飞行的时间）

在 1944 年，NACA、空军和海军进行了一个压缩性研究飞机的设计和工程研究，目的是确定最合理和便利的开发方式。

美国跨声速飞机计划中最关键的人物也许是埃兹拉·科奇尔。1939 年，在赖特-帕特森空军基地担任工程师的科奇尔建议，陆军航空团研制一架全尺寸、有人驾驶跨声速研究机。当时他的建议没有受到足够重视。但 4 年后，当第二次世界大战即将缓慢而痛苦地结束时，压缩性造成的影响已经到了不可忽视的程度，对跨声速飞行现象的浓厚兴趣终于获得了急需的政府和工业部门的支持。

1944 年初，科奇尔重新开始了跨声速飞机的研究，并着手进行火箭与喷气推进装置（以及冲压发动机）特性的对比研究。最后的结论是，火箭推进的研究机能提供优越的性能和更大的通用性。

在科奇尔的悉心指导下，赖特-帕特森空军基地由 F. D. 奥雷泽奥和 G. W. 贝利

组成的工程小组，着手设计一架可望用于探索跨声速飞行包线的飞机。科奇尔将奥雷泽奥和贝利的工作概况向陆军航空团和 NACA 的几个工程小组做了介绍。这些工程小组很快就认定跨声速飞机项目的确很有意义。NACA 工程师约翰·斯塔克，一位高速研究机的长期支持者，十多年来一直主张对这样的计划提供支持。

实际上，斯塔克促使了 1944 年 3 月 15 日高速飞机会议的召开。会上，陆军航空团和海军第一次被要求支持设计开发和建造一种跨声速飞机。当时，NACA 的政治地位和财力都不足以单独支持这个计划。然而 NACA 还是答应，如果陆军和/或海军为设计和生产提供资金，他们将负责飞行试验。

对科奇尔的初期工作做了一番评审之后，NACA 对用火箭发动机作为推力的建议持强烈的保留意见：NACA 工程师们认为涡轮喷气发动机是更安全的——虽然无可否认是更保守的——方案，并要求科奇尔重新考虑他的提议。

当科奇尔和空军继续研究他们的方案时，海军开始了一项完全独立的跨声速研究机计划。这个计划最终催生了道格拉斯 D-558-I 飞机，这是一架成功的试验机，但没有空军火箭推进研究机那样的超凡魅力和高速能力。

1944 年夏天，科奇尔从他的上级西奥多·冯卡曼博士那儿获得了开工和经费许可，可以寻找承制商并开始研制被称为 MX-524 的项目。但令科奇尔没有料到的是，寻找研制飞机的承制商成了个难题。

1944 年期间，美国航空工业正处于一个大规模的战时生产计划中，该计划最终交付了数千架用于作战的飞机。实际上，当时美国国内的每家制造商和承包商的主承包和子承包工作任务都非常饱满。

到 1944 年秋季，科奇尔已经感到有些灰心了，他碰到的每个承包商，尽管都承认跨声速试验平台的必要性，但又认为该计划经济规模太小，时间又紧，不值得投入大量的人力。

11 月 30 日，贝尔飞机公司工程部主任罗伯特·伍兹（贝尔飞机公司的 3 个创始人之一）到赖特-帕特森空军基地拜访科奇尔。实际上他们俩对跨声速空气动力学都保持着极大的兴趣：在这重要的日子里，伍兹决定进行拜访，希望科奇尔能够向他通报跨声速研究的最新进展。

科奇尔很热情，很快就将谈话引导到他钟爱的“ $Ma0.999$ ”飞机项目。出乎意料的是，他发现伍兹是一个很感兴趣的听众，而且更重要的是，还是一个全尺寸跨声速飞机的鼓吹者。

在听了科奇尔的方案并注意到空军只要求飞机在 $Ma0.8$ 以下能保证安全性和可操纵性时，伍兹直截了当地说，贝尔飞机公司可以研制这架拖延了很长时间的“研究飞机”。

几天后，伍兹返回纽约州布法罗附近的贝尔飞机公司工厂，他带了由科奇尔提供的一些文件，这些文件描述了研究机的基本设计参数。在贝尔飞机公司飞机设计总工程师罗伯特·斯坦利的协助下，他们俩开始组织研制新试验机的团队。保罗·埃蒙斯、本森·哈姆林、罗伊·桑德斯、特罗姆和斯坦利·史密斯都在名单之列，史密斯后来成了项目总工程师，再后来成了贝尔 X-2 计划的负责人。

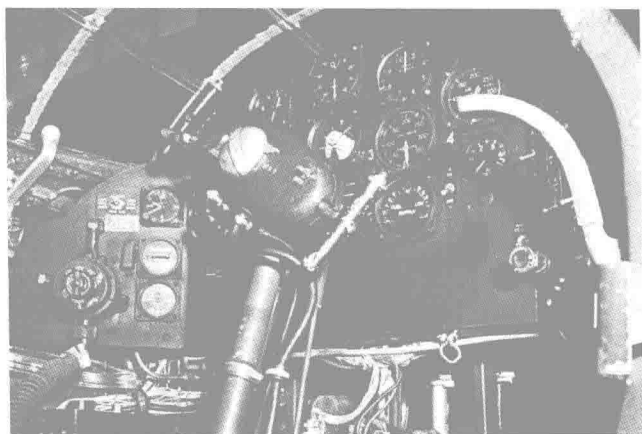


图 1-8 即使按第二次世界大战后的标准, 序列号为 46-062 的 X-1 座舱都相当简单, 唯一不一般的是 H 形操纵杆, 理论上能为飞行员提供较大的机械操纵力

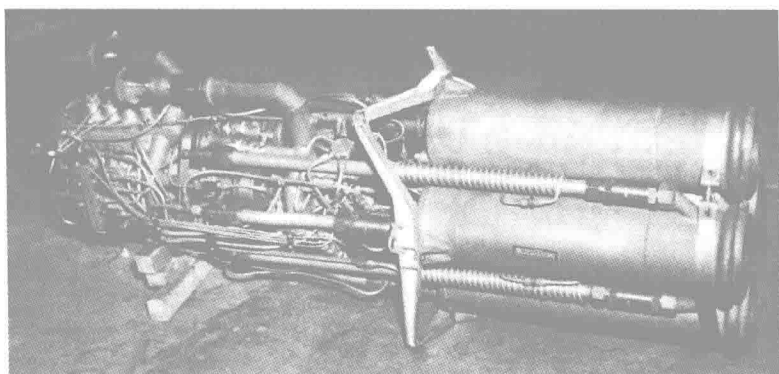


图 1-9 反作用动力公司的 4 管 XLR11 火箭发动机 (额定推力为 6000lbf^①, 是第一批适用于载人飞行的火箭发动机)

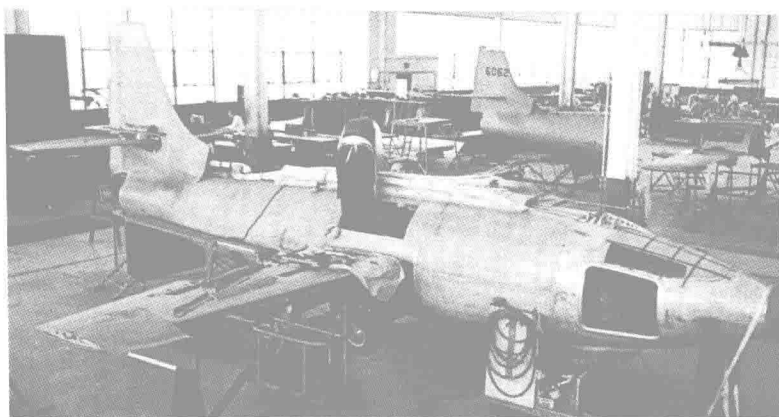


图 1-10 第二架 X-1 (序列号 46-063), 在惠特菲尔德工厂进行最后总装 (它的背后可看到 46-062 号机的尾翼、机翼和机翼中段)

① 1lbf = 4.45N。

在他与科奇尔初次会面及后来在贝尔飞机公司与下属的初步设计会议上，伍兹要求 MX-524——这是该新声速研究平台的官方称呼——采用涡轮喷气发动机。尽管这一方案与科奇尔的想法存在根本差异，但伍兹个人认为这是风险最小的办法。然而，他的工程小组与科奇尔一样，也得出结论，要达到飞机的性能目标，火箭发动机才是最现实的选择。伍兹改变了主意，同意飞机以火箭发动机为动力。



图 1-11 将机翼从一架 X-1 飞机换到另一架飞机（虽然不经常这样做，但仍是一项简单的事情。图中可以看到在惠特菲尔德的贝尔飞机公司试验机库的第二架 X-1（序列号 46-063））



图 1-12 X-1 系列飞机包括 46-063 号机，问世时都没有做任何宣传（该机在空军服役很短一段时间后，其余大部分时间都在 NACA/NASA 度过）

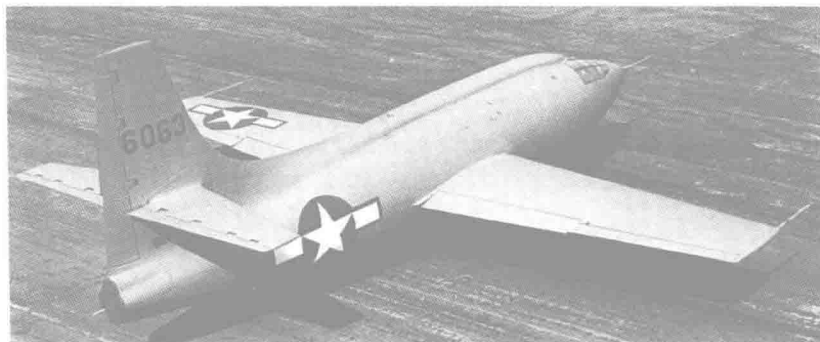


图 1-13 3 架第一代 X-1 都没有任何鼓包和突起（形状做得像一颗 0.50in 口径的子弹，这样做的唯一目的是为了获得超声速性能）

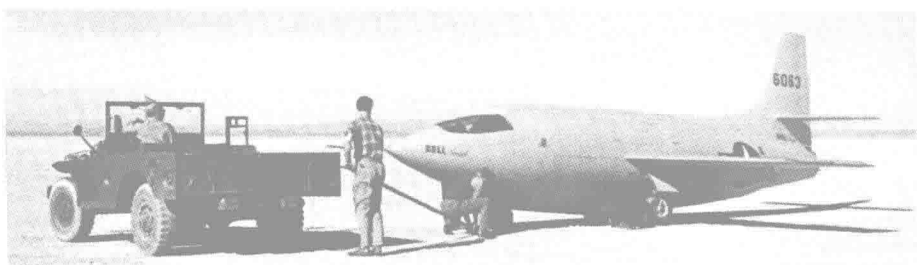


图 1-14 第二架 X-1 (序列号 46-063) 首先到达穆罗克空军基地 (是第一架装相对厚度为 10% 的机翼的 X-1 飞机, 1946 年 10 月 7 日空运到加利福尼亚州)

到 1944 年 12 月, 空军、贝尔飞机公司和 NACA 制定出了最终的设计技术指标。接着, NACA 小组又提出了对测试仪器的要求, 贝尔飞机公司的工程师也与赖特-帕特森空军基地的代表会面, 将飞机的初步布局、基本性能及稳定性参数定型。

由于 1945 年时关于超声速的数据很少, 贝尔飞机公司工程师小组必须根据估计的性能和预估的动载系数对翼型、机身构型、座舱环境、推进、起落架、风挡设计、结构完整性和机翼构型等做出重要的抉择。

X-1 的机身外形是一项关于 0.50in 口径子弹研究的产物。这项研究是由伍兹工程小组的两个成员本森·哈姆林和保罗·埃蒙斯进行的。作为两位非常有经验的工程师, 他们认为弥补数据欠缺的唯一方法是考察已知的以声速或接近声速飞行的物体。与弹道学专家讨论得出的结论是: 虽然对 0.50in 口径子弹的气动力情况知之甚少, 然而, 它在声速运动时是一种稳定的外形。

到 1945 年夏天, 新飞机在贝尔飞机公司内部称为 44 型。同时赖特-帕特森空军基地也为它定了一个自己的项目代号, 即 MX-653, 给予了高优先级, 并定为“秘密”级。

即使到了研制的这个阶段, 在 X-1 飞机应该从地面发射 (常规的) 还是从空中发射方面仍存在争议。伍兹支持地面发射, 他认为把 X-1 设计成地面发射, 可以最终将其发展成为一种点防御截击机。相反, 鲍勃·斯坦利认为, 飞机从地平面飞到试验高度会消耗大量燃油, 可能会损害飞机的性能。埃兹拉·科奇尔赞同斯坦利的意见。

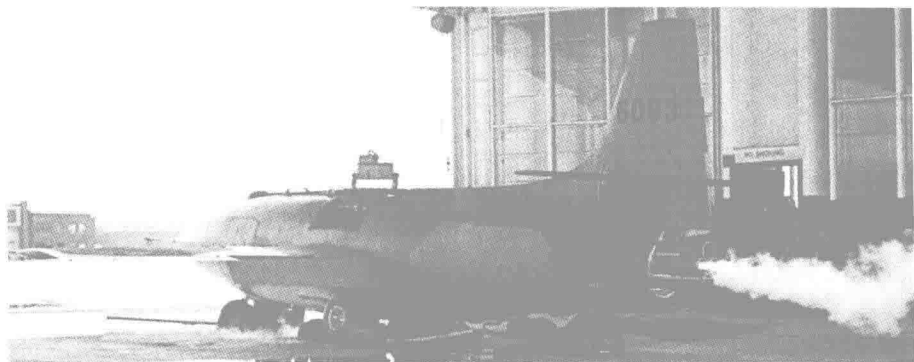


图 1-15 第二架 X-1 (序列号 46-063) 正进行装反作用动力公司 XLR11 发动机的地面试车 (像这样在飞机库里进行试验是为了减少噪声, 而且保护飞机免受潮湿气候的影响)

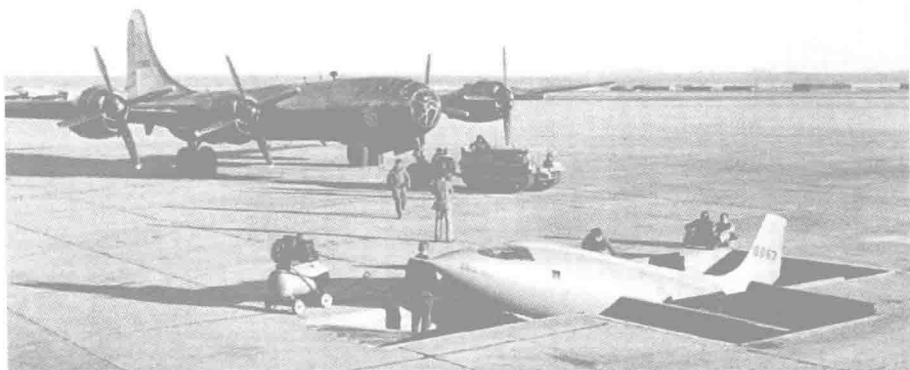


图 1-16 第一架飞机到达前不久，在穆罗克空军基地的南方基地建一个类似纽约州惠特菲尔德建的 X-1 飞机装机坑（牵引车将载机以特定的方式牵引到坑上方）

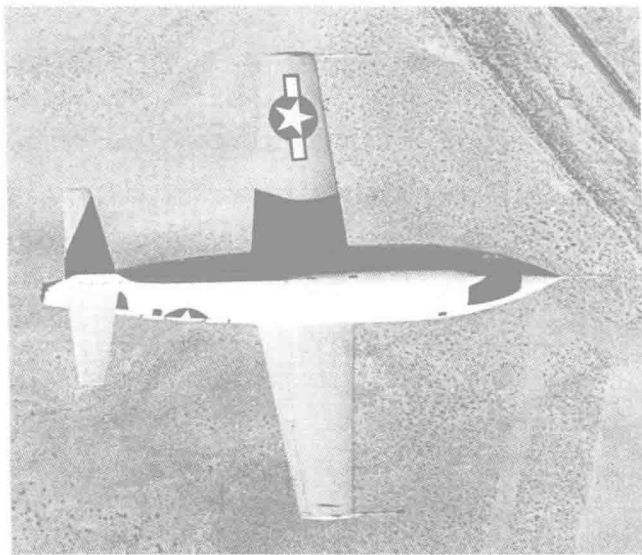


图 1-17 从编号为 45-21800 的 B-29 上发射后的 X-1（序列号 46-063。下方穆罗克空军基地周围的沙漠清晰可见，在这种正常的发射中发动机将延迟几秒点火）

事实证明伍兹的意见是不切实际的。推进装置的涡轮泵（用来将燃料和氧化剂从推进剂储箱输送到火箭发动机燃烧室）遇到大量机械问题，研制进度大大落后，已被认为不再是推进系统的可行部件了。在这一问题解决之前，只好用一个笨重而低效的气体增压系统来代替。

取消涡轮泵，就只能用氮气把燃料和氧化剂从飞机的储箱中压出。加装氮气箱使飞机重量增加不少，而且占用了宝贵的内部空间，结果大大缩短了推进装置的工作时间，这样就别无选择只能采用空中发射。

1945 年 10 月 10 日空军和 NACA 的代表视察了 X-1 全尺寸样机，结论是不需要做任何重大修改。这样，设计方案被批准投入试制。与此同时，反作用动力公司工程技术小组正在进行的 6000C4（公司内部编号）发动机的研制也重新获得支持，虽然要按计划交付首台装机发动机明显是不可能的。

第一架 X-1 (序列号 46-062) 是 1945 年下半年完成总装的, 于 12 月 27 日首次推出贝尔飞机公司位于纽约州惠特菲尔德的工厂大门。1946 年 1 月 19 日, 它由一架 B-29 (45-21800) 载机 (由哈罗德·唐和约瑟夫·坎农驾驶, 机组人员为伊冯·豪普特曼、威廉·米恩斯和赫尔曼·施奈德) 转运到佛罗里达州的派因卡斯尔基地, 并在那里开始初步测试, 以确定其稳定性极限和低速飞行特性。

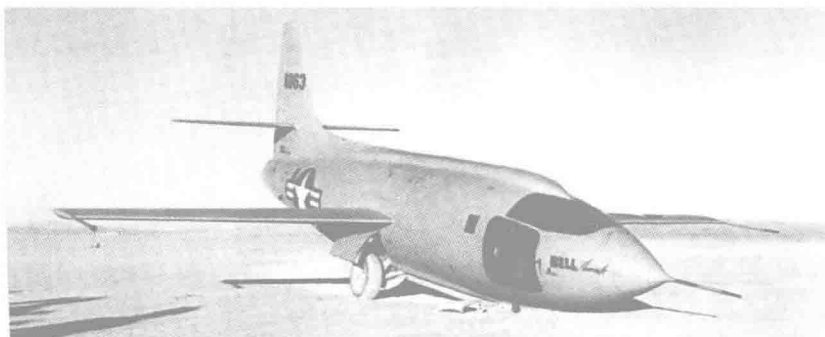


图 1-18 X-1 飞机发生这样的事故是因为低速时升降舵能力有限 (特别是飞机接近失速着地时机头下撞, 使前起落架支柱超载)

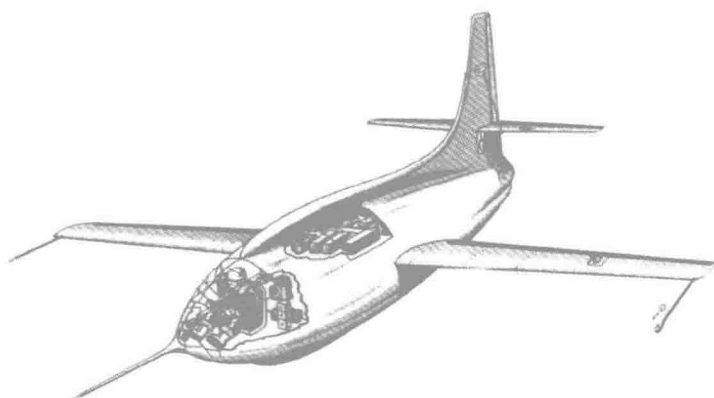


图 1-19 NACA 的 X-1 (46-063 号机) 做了重大更改, 以便安装各种传感器及相关仪表 (每次飞行后都要对收集到的数据进行分析)

1946 年 1 月 25 日, 以配重临时替代没赶上进度的推进装置, 成功地完成了第一次滑翔飞行 (对这个日子有人持不同意见, 认为应为 1 月 19 日, 但是由 NACA 的本·冈瑟发现的文件确定 1 月 25 日是正确日期)。

从佛罗里达州上空 27000ft^① 高度的投放一切顺利。在贝尔飞机公司试飞员杰克·伍拉姆斯的驾驶下, X-1 飞机完美地飞行了 4min, 证明 X-1 是一架易于驾驶、性能稳定的飞机。

① 1ft=0.3048m。