

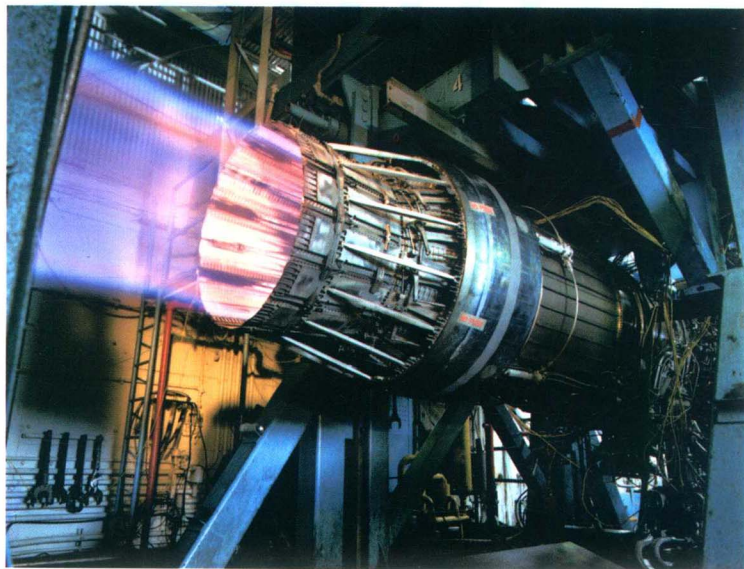
“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写



国外航空发动机试验设备概览

Test Facilities Manual of Overseas Aero Engine

刘永泉 主编



航空工业出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
航空发动机出版工程

国外航空发动机试验设备概览

刘永泉 主编

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书是介绍美国、俄罗斯、英国、法国和德国等国家航空发动机试验设备的综述性专业技术读物。概括介绍了美国、俄罗斯、英国等国家的政府机构、研究与研制机构、大学等航空发动机试验设备的情况；详细介绍了搜集到的一些典型航空发动机试验设备的技术参数和技术特点。

本书可供航空发动机行业及相关领域的设计、试验和管理人员参考，从中了解国外航空发动机试验设备的规模和技术水平。

图书在版编目 (C I P) 数据

国外航空发动机试验设备概览/刘永泉主编. --北京: 航空工业出版社, 2017. 6

航空发动机出版工程

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1216 - 6

I. ①国… II. ①刘… III. ①航空发动机—试验设备—概况—世界 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 126113 号

国外航空发动机试验设备概览

Guowai Hangkong Fadongji Shiyany Shebei 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 6 月第 1 版

2017 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 33.75

字数: 795 千字

印数: 1—1000

定价: 135.00 元

《航空发动机出版工程》编委会

主任：林左鸣

常务副主任：谭瑞松

副主任：张新国 李方勇

委员：陈元先 杨圣军 魏金钟 丁俊 庞为
王英杰 王之林 张健

《航空发动机出版工程》专家委员会

主任：刘大响

副主任：郭恩明

委员：陈浚 唐智明 周晓青 彭友梅 张皖南
张恩和 严成忠 杨士杰 李概奇 怀寿章
殷云浩 吴学仁 江和甫 江义军 马光辉
胡晓煜

编委会办公室

主任：魏金钟

副主任：陈刚 焦鹤 刘鑫

成员：王晓文 向明 潘陆原 王伟 胡晓煜
彭友梅 姜向禹 石英 龙明灵 刘宁
王少雄

总 序

自1903年12月17日人类首次实现有动力飞行以来，航空事业获得了迅猛发展，极大地促进了人类社会文明的进步，对世界各国的政治、经济和军事都产生了深远的影响。航空发动机作为飞机的“心脏”，不仅是飞机飞行的动力，也是促进航空事业发展的重要推动力，人类航空史上的每一次重要变革都与航空发动机的技术进步密不可分。飞机进入喷气时代始于涡轮喷气发动机的发明，飞机突破声障、实现马赫数2和马赫数3的飞行主要是由于加力式大推力发动机的出现；飞机实现垂直起降则仰仗于可旋转喷管发动机的研制成功；巨型宽体客机的问世更少不了大涵道比、大推力的涡扇发动机；第四代战斗机的超声速巡航和超机动性主要是依靠发动机的高推重比和矢量喷管。

经过百余年的发展，航空发动机已经发展为可靠性极高的成熟产品，正在使用的航空发动机包括涡轮喷气/涡轮风扇发动机、涡轮轴/涡轮螺旋桨发动机、冲压发动机和活塞式发动机等多种类型，不仅作为各种用途的军民用飞机、无人机和巡航导弹动力，而且利用航空发动机派生发展的燃气轮机还广泛用于地面发电、船用动力、移动电站、天然气和石油管线泵站等领域。航空发动机的发展也极大地带动了机械制造、电子、控制、材料和石油化工等相关产业的发展，带来了巨大的收益。目前，全球飞机发动机及其零部件制造业的收入已占航空制造业总收入的40%左右，年收入超过1000亿美元，到2015年将达到1220亿美元，人均年收入35万美元，仅美国从事航空发动机及零件制造的公司就有1000多家，年收入超过600亿美元。

进入21世纪，航空发动机正在进一步加速发展，将为人类航空领域带来新的更大变革。目前，传统的航空发动机正在向齿轮传动发动机、变循环发动机、多电发动机、间冷回热发动机和开式转子发动机发展，非传统的脉冲爆震发动机、超燃冲压发动机、涡轮基组合发动机，以及太阳能动力和燃料电池动力等也在不断成熟，这些发动机的发展将使未来的航空器更快、更高、更远、更经济、更可靠，并能够满足更加严格的环保要求，并将使高超声速航空器、跨大气层飞行器和可重复使用的天地往返运输成为现实。

但是，航空发动机的发展绝非易事，作为人类科学技术发展的最高端产

品之一，航空发动机被誉为“工业之花”“皇冠上的明珠”，具有技术难度大、风险高、耗资多、周期长等特点，要求在相关的工程技术领域具备雄厚的基础和丰富的实践经验积累，是一个国家工业基础、综合国力和科技水平的集中体现。美国将航空发动机技术描绘为：“它是一个技术精深得使新手难以进入的领域，它需要国家充分保护并稳定利用该领域的成果，长期的专门技能和数据的积累，以及国家大量的投资。”法国将航空发动机工业描绘为：“航空发动机工业是一个与众不同的工业，是当代尖端技术的标志。进入这个竞技场的顶级‘玩家’数量非常有限，其门槛设置得比其他航空专业更高，这意味着竞争者进入的难度更大。”目前，能够独立研制航空发动机的只有美国、英国、俄罗斯、法国和中国等少数国家。

我国航空发动机工业起步并不晚，在中华民国时期就曾试图建立航空发动机工业；中华人民共和国成立后，我国于1951年开始建立航空发动机修理厂，经过60多年几代航空人的艰苦努力，如今我国已建成比较完整的航空发动机科研、生产体系，研制生产出了6万多台航空发动机，已进入世界少数能够独立研制航空发动机的国家行列。但是，我国航空发动机在技术水平和产品研制方面与先进国家还存在很大差距，学习国外航空发动机的先进发展经验，对我国航空发动机的发展势必起到良好的借鉴作用。

中国航空工业集团公司组织出版《航空发动机出版工程》的目的是为广大读者提供一个全面了解世界航空发动机发展历史、现状和未来的平台，使读者对航空发动机的基本概念和工作原理有更科学、系统的认识，对国外航空发动机的产品发展经验、组织管理方法和技术发展路线有更深刻的理解，对航空发动机发展对国防建设和国民经济发展的重要性有更充分的重视，以唤起广大读者对航空发动机事业的关注和热爱，并积极投身到这项光荣而伟大的事业中来。期望这套丛书能够为中国航空发动机的人才培养，航空发动机的科研、生产和使用提供参考和借鉴，为中国航空发动机事业的更大发展做出贡献！



中国航空工业集团公司董事长

2013年3月

《国外航空发动机试验设备》编委会

主 编 刘永泉

副主编 贾平芳 梁春华

编写人员 刘殿春 刘红霞 孟令扬 张之兰 刘 静

王 扬 胡 杰 杨晓光 龚 博 宋志佳

李艳军 张世福 邹迎春 杨东丹 索德军

姚 博 徐秋实 杨芳菲 高家春 沈迪刚

田忠贤 周世恒 靳宝林 刘静娟

编 辑 刘红霞

前 言

航空发动机是涉及空气动力学、工程热物理、机械、电子、控制等多学科和工程领域的一个系统，工作在高温、高压、高转速的复杂环境下，加之高性能、长寿命、高可靠、质量轻、隐身、经济等要求和日益苛刻的环保性约束，是当今世界上最为复杂的多学科集成物理系统，是设计和制造难度最高的工业产品，代表了一个国家科技和工业的发展水平，被誉为“工业皇冠上的明珠”。

航空发动机是设计出来的，也是试验出来的。即使是技术最先进的国家，其技术水平也不足以通过设计分析预测和解决发动机在全包线范围内的所有问题。美国审计署审计长 1980 年向美国国会的报告中强调：“……所以，战斗机发动机的发展，过去是、现在是、将来也继续是（至少部分如此）一个设计、制造、试验、失败、修改设计、再制造，直到一台满意的发动机出现为止的摸索和反复的过程。”因而，要全面系统地考核和验证发动机，就要有足够完整且能逼真地模拟发动机实际飞行工作条件的试验设备、配套设备、系统设备和足够长的试验时间。发动机试验内容的全面性、试验时间的充分性，以及试验条件的逼真和苛刻性，对于发动机综合性能和可靠性的验证尤为重要，同时对试验设备和测试手段的依赖也很高。

航空发动机试验设备在发动机的研制过程中发挥着重要的作用。先进的试验设备不仅可以全面、有效地验证航空发动机各方面的性能，还有助于及时发现解决设计问题、缩短研制周期和降低研制成本。中国航空发动机研保条件建设的逐年增强，有力促进了发动机研制。但与国外航空发动机技术领先的国家相比，中国航空发动机试验设备，在数量上还不能完全满足多型号研制的实际需求；在配套性方面还缺少一些必需的关键部件和系统试验设备；在先进性方面，技术基础还相对薄弱。因而，研究、综述国外航空发动机试验设备及其先进技术，对中国航空发动机研究、试验人员和有关领导更好地了解国外发动机试验设备的先进技术和经验，建设具有中国特色的试验设备、试验体系和验证体系具有重要参考和借鉴意义。

目前，国内外从业于航空发动机管理、科研、试验、生产、使用、维护的单位和人员众多，而系统介绍国外航空发动机试验设备的书籍却少之又少，因而在 2000 年内部编写的《国外航空发动机试验设备图册》的基础上，扩充陆续搜集到的一些资料和信息，整理出版一本较为全面地介绍国外航空发动机试验设备的书籍，力求为从事航空发动机研究和管理的有关人员提供借鉴与参考。

本书共 3 篇 14 章，由中航工业沈阳发动机设计研究所刘永泉主编，贾平芳、梁春华、刘殿春审校。

第 1 篇为政府篇，共有 5 章，分别为：美国国家航空航天局（NASA）格伦研究中心试验设备，由刘殿春、贾平芳、王杨、梁春华、杨芳菲等编写；阿诺德工程发展中心

(AEDC) 试验设备, 由刘红霞、梁春华、姚博等编写; 俄罗斯中央航空发动机研究院 (CIAM) 试验设备, 由张之兰、高家春等编写; 英国国家燃气涡轮研究院 (NGTE) 试验设备, 由刘红霞、梁春华、胡杰、杨晓光、龚博、宋志佳、李艳军、孟令扬等编写; 德国航空航天研究院推进技术研究所航空发动机研究试验设备, 由贾平芳编写。

第2篇为工业篇, 在《航空发动机试验设备图册》(内部编写, 未公开出版) 的基础上重新编写。本篇共有6章, 分别为: 美国通用电气 (简称GE) 公司试验设备, 由孟令扬、刘红霞等编写; 美国普拉特-惠特尼 (简称普惠) 公司试验设备, 由杨东丹等编写; 俄罗斯“土星”公司试验设备, 由刘静编写; 俄罗斯彼尔姆公司试验设备, 由张之兰等编写; 英国罗尔斯-罗伊斯 (简称罗罗) 公司试验设备, 其中包括详细的艾利逊发动机公司试验设备, 由张世福、邹迎春等编写; 法国斯奈克玛 (SNECMA) 公司试验设备, 由索德军等编写。

第3篇为大学篇, 共有3章, 分别为德国亚琛科技大学喷气推进和叶轮机械研究所试验设备、德国柏林科技大学航空发动机技术研究试验设备和德国斯图加特大学航空发动机技术研究试验设备, 均由贾平芳编写。

本书在编撰过程中, 沈阳发动机研究所科技情报档案中心文献组胡纪军、樊淑艳、程紫琦、可竞一、姚红等在文字与图片处理方面提供了较大的支持, 在此深表感谢。

因美国、俄罗斯、英国、法国、德国等国家公开的航空发动机试验设备方面的资料和信息较少, 加之编者搜集到的参考资料又有限, 书中的有些内容和数据较为陈旧, 且错误和曲解之处在所难免, 敬请读者批评指正。

《国外航空发动机试验设备概览》编委会

2016年10月

目 录

第1篇 政府篇

- 第1章 NASA 格伦研究中心发动机试验设备…………… (3)
- 第2章 美国空军阿诺德工程发展中心航空发动机试验设备 …… (97)
- 第3章 俄罗斯中央航空发动机研究院试验设备 …… (126)
- 第4章 英国国家燃气涡轮研究院航空发动机试验设备 …… (160)
- 第5章 德国航空航天研究院推进技术研究所航空发动机试验设备 …… (285)

第2篇 工业篇

- 第6章 通用电气公司航空发动机分公司试验设备 …… (335)
- 第7章 美国普惠公司试验设备 …… (363)
- 第8章 俄罗斯“土星”科研生产联合体股份公司试验设备 …… (385)
- 第9章 俄罗斯航空发动机开放式股份公司试验设备 …… (392)
- 第10章 英国罗罗公司试验设备 …… (407)
- 第11章 法国斯奈克玛公司试验设备 …… (459)

第3篇 大学篇

- 第12章 德国亚琛工业大学机械系喷气推进和叶轮机械研究所试验设备 …… (485)
- 第13章 柏林科技大学航空推进技术研究所试验设备 …… (502)
- 第14章 德国斯图加特大学航空发动机技术研究试验设备 …… (514)

第 1 篇

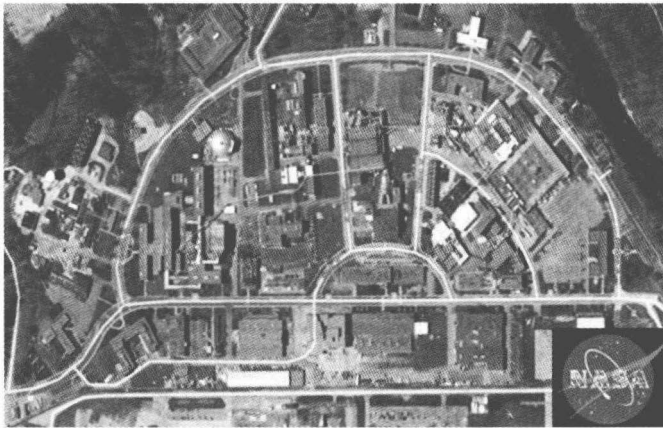
政 府 篇

第 1 章 NASA 格伦研究中心发动机试验设备

格伦研究中心 (Glenn Research Center, GRC, 旧称刘易斯 (Lewis) 研究中心) 是美国国家航空航天局 (NASA) 推进、太空动力、卫星通信等领域的主要研究中心。其主要设施都集中于克利夫兰市的刘易斯基地, 占地 3.5km^2 , 毗邻克利夫兰霍普金斯国际机场, 实景和俯瞰全景如图 1-1 所示。GRC 也是美国唯一的微重力材料实验室所在地。



(a) GRC 实景



(b) GRC 俯瞰图

图 1-1 位于俄亥俄州克利夫兰市的 NASA GRC

1939年10月,在美国第二特别委员会的建议下,美国国家航空咨询委员会(NACA,1958年改组为NASA)在俄亥俄州克利夫兰市组建了“动力装置研究中心”。1940年6月,经美国国会批准,“动力装置研究中心”改名为“飞行推进研究实验室”。1943年,美国第一台喷气发动机曾在这里进行试验。1948年,为了纪念国家航空咨询委员会航空研究室主任乔治·威廉·刘易斯,“飞行推进研究实验室”改名为“刘易斯飞行推进研究实验室”。1958年,美国国家航空航天局“刘易斯飞行推进研究实验室”又改名为“刘易斯飞行研究中心”。1999年,为了纪念具有传奇色彩的航天员约翰·格伦,“刘易斯飞行研究中心”又改名为“约翰·格伦研究中心”,后来,大概是为了平衡“格伦”和“刘易斯”二者之间的关系,“约翰·格伦研究中心”改称为“刘易斯-格伦研究中心”,由于这个名字太长,该中心大多数时候还是被人们简称为“格伦研究中心”。

NASA GRC拥有员工3200多人,拥有具有丰富经验的优秀职员,他们对新的任务目标和正在进行试验研究中不可预测的变化做出快速反应的能力。其中,推进系统实验室(PSL)的科学家和工程师分别是发动机性能、维护、使用、气弹测量、飞行瞬变状态操作和瞬变状态温度和压力畸变模拟方面的专家。

GRC的主要设施和部门包括:航空学研究设施及相关部门;航空航天技术研究设施及相关部门;太空飞行研究设施及相关部门;技术支持设施及相关部门。在所有设备中,一部分属于基础研究试验设备,主要用于一些航空航天基础技术的验证,包括叶轮机械、摩擦学、流体力学、燃烧学、空气动力学、机械系统和传热传质等发动机各项技术发展方面的试验研究;还有一部分属于发动机技术研究验证设备,这些设备不仅承担很多美国的技术预研任务,也承担国家部分产品的考核任务,GRC在美国航空航天领域具有很高的地位。

GRC有办公大楼、发动机研究厂房(ERB)等建筑150多座。专用试验设施有火箭试验设施、材料和应力试验设施等。各种超声速风洞、跨声速风洞、高超声速风洞及推进系统试验台50多个。

1.1 发动机试验台

1.1.1 推进系统实验室

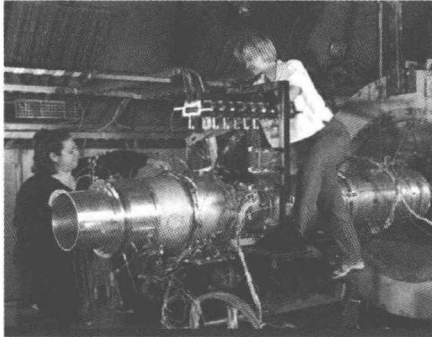
1.1.1.1 概述

推进系统实验室建于20世纪70年代初,是NASA可以提供真实飞行模拟的、唯一的连续流全尺寸发动机地面模拟试验台。它可以开展吸气式(自由射流式)推进系统真实飞行条件的模拟试验,为NASA及全世界提供航空航天动力试验研究和评估服务,是确保美国工业界技术领先和经济实力强大的重要国家资源。

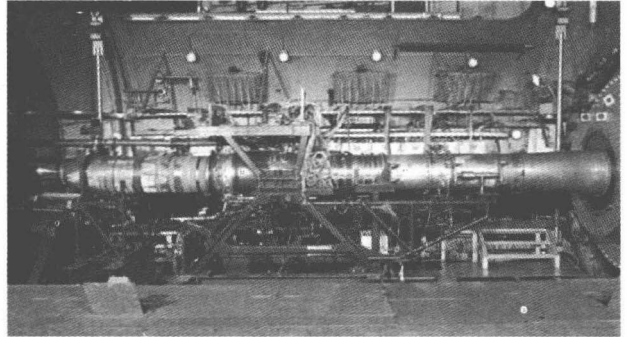
PSL的主要任务是设计、研究、制造航空航天喷气发动机和推进系统,支撑国防建设和国家安全所需关键新技术的研究。PSL是发动机高空模拟试验研究的先驱,可以开展矢量推力与反推力测量、高空红外成像、气动弹性测量、瞬态压力(又称压强)和

热变形模拟以及飞行瞬态模拟等试验研究工作。PSL 配备多种辅助专用系统, 用来探索包括液体和气体燃料、多轴推力测量和矢量喷管等未来推进系统。通过这些研究能够获得整个飞行包线内极端条件下喷气发动机和推进系统的性能和可操作性详细信息。

PSL 有进行吸气式喷气推进系统试验研究的两个大型发动机试验舱。PSL-3 试验舱主要用于军用涡轮喷气发动机的研究和先进飞机技术的全面研究。PSL-4 试验舱包括一段高温和高压进口过渡段, 能够满足航空和临近空间飞行器高速、高空推进系统研究的需要。PSL 内开展试验的情况如图 1-2 所示。



(a) F-333 发动机试验



(b) F405 发动机试验

图 1-2 PSL 内发动机试验现场

配套设施有压缩机、抽气机和加热、冷却等系统, PSL 可以精确地模拟高速、高空飞行条件下推进系统的进口温度和压力条件。

实验室的监控和测量系统可对所有测量和计算参数及测试数据进行实时显示和监控。用户友好的、定置的数据采集系统能够记录 1000 多个稳态测量通道的数据, 还有另外 126 个通道, 采样速度可达每通道 1000 ~ 200000 点/s, 能够实现随时间变化的动态数据测量。PSL 设备控制系统能够适应试验研究方案的多功能快速变化需求, 反应能力强, 完全有能力快速处理试验研究中出现的意外情况。

1.1.1.2 技术参数

PSL 各试验舱的技术参数列于表 1-1。

表 1-1 PSL 各试验舱的技术参数

参 数	指 标
试验舱尺寸/ft ^①	直径 24, 长 39
模拟高度/ft	5000 ~ 90000
模拟飞行马赫数 Ma	
PSL-3	最大 Ma 3.0
PSL-4	最大 Ma 4.0
PSL-4 (带预热的自由射流试验舱)	最大 Ma 6.0
最大进口流量/(kg/s)	
PSL-3 和 PSL-4 (55psia ^②)	217.72
PSL-4 (165psia)	172.37

表 1-1 (续)

参 数	指 标
进口最高温度/ $^{\circ}\text{F}$ ^③	
PSL-3	-60 ~ 600
PSL-4	-90 ~ 1100
最大排气流量/(kg/s)	340.19
供气能力	
180psia	在 1375 $^{\circ}\text{F}$ 时, 11.34kg/s
425psia	在 1100 $^{\circ}\text{F}$ 时, 4.54kg/s
425psi	在 450 $^{\circ}\text{F}$ 时, 33.11kg/s
465psi	在 1200 $^{\circ}\text{F}$ 时, 17.69kg/s
冷气 (流量) 45.36kg/s	55165450psia
推力测量/lbf ^④	
轴向	50000
纵向 (垂直)	15000
横向	15000
燃料系统	Jet A, JP-4, JP-5 或 JP-8 氢类燃料
供油能力/(g/min)	200

注: ①1ft (英尺) = 0.3048m。②psia 为绝对压力, 1psi = 6.895kPa。③ $^{\circ}\text{F}$ (华氏度) = $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度) $\times 1.8 + 32$ 。④1lbf (磅力) = 4.448N。

在发动机结冰试验时, PSL 试验设备的技术参数见表 1-2。

表 1-2 结冰试验时试验设备的技术参数

参 数	最 小	最 大
高度/m	1219.5	12195.12
总温/ $^{\circ}\text{C}$	-306.45	-264.85
模拟飞行马赫数	0.15	0.80
流量/(lb ^① /s)	10	330
冰水密度/(g/m ³)	0.5	9.0
运行时间	连续	—

注: ①1lb (磅) = 0.454kg。

1.1.1.3 供排气系统

(1) 主流系统

①在进口压力 379.2kPa 时, 流量可达 217.72kg/s。

②在进口压力 1137.6kPa 时, 流量可达 172.37kg/s。

③在进口压力 1137.6kPa、温度 866.5K 时, 流量可达 108.86kg/s。

④在进口压力 172.4kPa、温度 233.15K 时, 流量可达 172.37kg/s (PSL-3)。

⑤在进口压力 172.4kPa、温度 205.4K 时, 流量可达 13.61kg/s (PSL-4)。

(2) 冷却空气系统

进口压力 379.2kPa 到 1137.6kPa 时, 流量可达 45.36kg/s。

(3) 高空排气系统

①高度: 海平面标准状态到 27432m。

②质量流量: 340.19kg/s。

1.1.1.4 辅助系统

(1) 航空燃油系统: 两个 94655.89L 的油箱, 存储各种不同类型的燃料 (JET-A、JP-4、JP-5、JP-8)。

(2) 天然气系统: 供气压力 50psig^①。

(3) 气态氢系统:

在压力为 4136.85kPa 时, 流量为 0.45kg/s;

在压力为 7584.2kPa 时, 流量为 1.36kg/s;

可承受最高压力 16547.4kPa。

(4) 气态氧系统:

在压力为 8273.7kPa 时, 流量为 1.36kg/s;

在压力为 2757.9kPa 时, 流量为 4.54kg/s;

可承受最高压力 16547.4kPa。

(5) 气态氮系统: 在压力为 16547.4kPa 时, 流量为 3737.8238m³。

(6) 滑油系统: 在压力为 20684.2kPa 时, 流量为 378.62L/min。

(7) 高压滑油系统: 在压力为 41368.5kPa 时, 流量为 378.62L/min。

1.1.1.5 数据采集系统

(1) 稳态数据采集

采用 Escort[®] 稳态数据采集系统, 使用 Alpha 微处理器, 能力如下。

①一种基于 X 窗口的显示。

②工程单元转换数据的实时采集和显示, 并进行集成计算。

③性能计算。可将计算性能以滚动图、X—Y 图、曲线图、轮廓图、趋势图等不同的表格和图形格式显示。

④可选择的显示录像和监控警报。

⑤更新率为 1s。

⑥可以根据客户要求提供特定的数据。

在稳态数据采集系统中, 压力数据采集系统通过数字式温度校正技术对压力扫描仪进行温度漂移修正。该系统由试验箱外的 16 个端口和机架固定扫描仪构成, 其测量范围为 -103.42 ~ 5171.1kPa。数字温度校正允许较长周期的校准, 并且使整个系统精度维持在 ±0.05% 范围内。在试验期间, 不需要实时校准, 可保证试验效率。

⑦典型 448 端口扫描仪, 压力范围如下。

(128 ± 15) psig 压差, 参考大气压力;

① psig 为表压。