

中国空气动力研究与发展中心系列图书

俄罗斯TsAGI风洞 试验设备概览

Overview of the Russian TsAGI's
Wind Tunnel Test Facilities

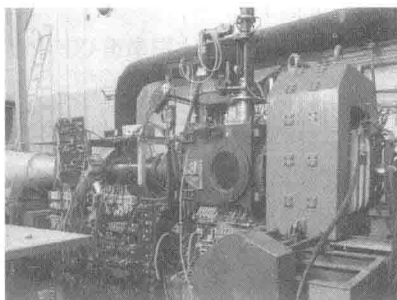
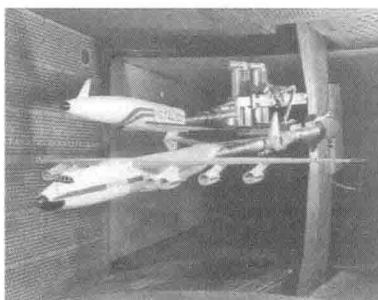
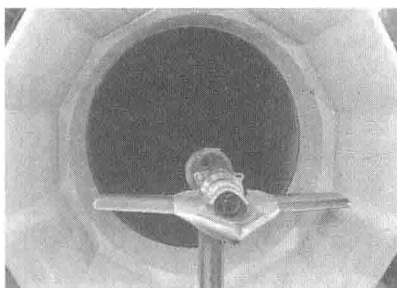
主编 战培国



国防工业出版社
National Defense Industry Press

俄罗斯 TsAGI 风洞 试验设备概览

主编 战培国



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

俄罗斯中央航空流体动力研究院 (TsAGI) 是世界著名的航空航天科研机构, 其风洞试验设备是俄罗斯国家风洞试验设备的核心战略资源。本书以风洞设备为主线, 介绍 TsAGI 的航空航天试验设备, 概述设备参数、试验能力、技术优势和开展过的典型型号试验。此外, 为帮助读者了解俄罗斯和世界主要国家航空航天机构的风洞设备情况, 在本书附录中, 简要介绍了俄罗斯中央机械制造研究院、中央航空发动机研究院和其他科研院所的风洞设备情况, 给出了俄罗斯风洞设备汇总表及世界主要国家航空航天机构的网址、简介和风洞设备简表。

本书可以作为我国航空航天试验领域科研人员了解俄罗斯风洞试验设备能力、查阅世界主要风洞试验机构设备信息的指南, 同时也可为大专院校师生学习相关知识提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

俄罗斯 TsAGI 风洞试验设备概览 / 战培国主编. —
北京: 国防工业出版社, 2018. 3
ISBN 978-7-118-11553-6
I. ①俄… II. ①战… III. ①风洞试验—试验设备—
俄罗斯 IV. ①V211.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 030223 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市天利华印刷装订有限公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11 $\frac{1}{2}$ 字数 260 千字
2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 65.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777
发行传真: (010) 88540755

发行邮购: (010) 88540776
发行业务: (010) 88540717

编委会

主 编 战培国

编写人员 罗月培 苏冯念 王 培
曾 慧 李友荣

编 审 孙宗祥 刘晓波

前 言

俄罗斯是世界一流的航空航天强国，这得益于其在航空航天领域的悠久历史积淀。俄罗斯航空研究的历史可以追溯到 19 世纪后期，例如，1880 年，创立化学元素周期表的门捷列夫发表了经典专著《流体阻力和浮空飞行》。在 20 世纪初，几乎与美国莱特兄弟同步，俄国也完成了飞机带动力飞行。在一个多世纪的发展中，俄罗斯/苏联研制的众多自成体系航空航天型号，如“米格”系列和“苏”系列战斗机，“图”系列轰炸机和运输机，“安”系列和“伊尔”系列运输机，“卡”系列和“米”系列直升机，“白杨”等各种类型系列导弹，“联盟”飞船，“暴风雪”航天飞机等，给世人留下了深刻的印记，奠定了俄罗斯航空航天世界强国的地位。在 20 世纪 20 年代到 80 年代，苏联中央航空流体动力研究院（Central Aerohydrodynamic Institute, TsAGI）为满足型号研制发展的需要，陆续建设了大量试验研究设备，主要包括风洞试验设备、结构强度试验设备、气体动力学试验设备、水动力学试验设备、飞行模拟设备等，这些试验设备为解决型号研制遇到的各种技术问题发挥了重要作用。

长期以来，由于各种因素的制约，国内有关俄罗斯航空航天试验设备的公开出版物极少。1996 年，原国防科工委空气动力学专业组曾组织编写了《俄罗斯气动试验设备汇编》（傅增学主编，内部），如今 20 多年过去了，受世界政治经济形势变化以及科学技术发展等众多因素影响，俄罗斯和世界其他国家的航空试验设备都发生了很大变化。2013 年，在俄罗斯中央航空流体动力研究院成立 95 周年之际，中央航空流体动力研究院在其网站发布了“TsAGI 95”，其中对 TsAGI 航空航天设备现状做了较详细的介绍。除此之外，互联网的普及也为我们了解更多国外有关单位的航空航天试验设备信息提供了基础。本书主要介绍 TsAGI 的风洞和航空航天试验设备，为了方便读者学习和查阅，在本书附录中梳理了俄罗斯中央机械制造研究院、中央航空发动机研究院等其他有关科研单位的风洞试验设备；同时，以世界主要国家航空航天机构在互联网上公布的风洞设备信息为主，结合最新文献资料，梳理了世界 14 个国家或地区、21 个航空航天机构的主要风洞设备。

本书共计 7 章和 5 个附录。第 1 章由战培国编写；第 2 章由罗月培、王培、曾慧、战培国编写；第 3 章由罗月培、王培、曾慧、战培国编写；第 4 章由罗月培、王培、

战培国编写；第 5 章由苏冯念、王培、战培国编写；第 6 章由苏冯念、王培、战培国编写；第 7 章由罗月培、战培国编写；附录 1 由战培国编写；附录 2 由李友荣编写；附录 3 由战培国编写；附录 4 由战培国编写；附录 5 由战培国编写。

本书在编写过程中，采用了俄罗斯中央航空流体动力研究院、中央机械制造研究院、中央航空发动机研究院官方网站的最新公开文献数据。TsAGI 风洞设备信息主要源自 www.tsagi.com 网站发布的“TsAGI 95”，编写中参考了中国空气动力研究与发展中心孙宗祥等翻译的《跨世纪的俄罗斯中央航空流体动力研究院》（2012 年）、傅增学等编写的《俄罗斯气动试验设备汇编》（1996 年）等内部文献资料。

中国空气动力研究与发展中心是我国国家大型风洞试验研究机构，始终关注和跟踪研究国外风洞试验领域的发展变化。本书的编写出版得到了中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所的大力支持，得到了国防工业出版社的热情帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2016 年 12 月

目 录

第 1 章 俄罗斯中央航空流体动力研究院概述	1
1.1 历史沿革	1
1.2 设备建设	6
1.3 发挥的作用	6
第 2 章 亚声速风洞设备	9
2.1 T-1-2 风洞	9
2.2 T-5 风洞	11
2.3 T-101 风洞	13
2.4 T-102 风洞	15
2.5 T-103 风洞	18
2.6 T-104 风洞	22
2.7 T-105 风洞	24
2.8 T-124 风洞	26
2.9 T-129 风洞	28
2.10 EU-1 结冰试验台	31
2.11 高空低速风洞	32
第 3 章 跨声速和超声速风洞设备	34
3.1 TPD-1000 风洞	34
3.2 T-106 风洞	36
3.3 T-107 风洞	38
3.4 T-109 风洞	40
3.5 T-128 风洞	42

3.6	T-131V 直连式试验台	46
3.7	GGUM 风洞	48
3.8	T-04 低温风洞	50
3.9	T-33 超声速风洞	51
3.10	T-112 跨声速风洞	51
3.11	T-114 三声速风洞	51
3.12	T-125 三声速风洞	52
3.13	T-134 低温风洞	52
 第4章 高超声速风洞设备		53
4.1	T-116 风洞	53
4.2	T-117 风洞	55
4.3	T-121 风洞	58
4.4	T-122M 风洞	60
4.5	T-131B 风洞	62
4.6	SVS-2 风洞	64
4.7	UT-1M 高超声速激波风洞	66
4.8	VAT-103 真空风洞	68
4.9	VAT-104 高温高超声速风洞	70
4.10	T-34 高超声速风洞	72
4.11	T-113 超/高超声速风洞	72
4.12	T-120 高超声速风洞	73
4.13	T-123 高超声速风洞	73
4.14	BTC 真空试验设备	73
4.15	HT-1 高超声速风洞	73
4.16	HT-2 高超声速风洞	74
4.17	YTCII 高超声速风洞	74
4.18	VAT-3 高超声速真空风洞	74
4.19	VAT-102 高超声速真空风洞	75

第 5 章 其他航空航天试验设备	76
5.1 声学试验设备	76
5.2 螺旋桨试验台	80
5.3 水动力设备	83
5.4 飞行力学设备	86
5.5 结构强度设备	93
第 6 章 数值风洞和结构强度分析系统	109
6.1 数值风洞	109
6.2 ARGON 多学科分析与飞机结构优化系统	111
6.3 ProDeCompoS 软件系统	113
第 7 章 气动弹性和风工程试验能力	116
7.1 气动弹性模型设计与加工	116
7.2 弹性模型风洞试验能力	118
7.3 风工程试验能力	120
附录 1 中央机械制造研究院风洞试验设备	123
附录 2 中央航空发动机研究院发动机试验台	136
附录 3 俄罗斯其他科研院所风洞设备	142
附录 4 俄罗斯风洞试验设备汇总表	148
附录 5 世界主要国家航空航天机构风洞设备简表	156
参考文献	173

第 1 章 俄罗斯中央航空流体动力研究院概述

1.1 历史沿革

俄罗斯/苏联有悠久的航空研究历史和文化积淀,几乎与美国莱特兄弟在 1903 年完成人类带动力首飞同步,同一时期也完成了飞机设计并取得了类似成果。19 世纪后期到 20 世纪初,俄国涌现出了许多航空探索研究的先驱和巨匠,例如,创立化学元素周期表的门捷列夫在 1880 年发表了经典专著《流体阻力和浮空飞行》;俄国航空之父、中央航空流体动力研究院创始人 H·E·茹科夫斯基在 1912 年出版了专著《浮空飞行理论基础》,并与德国著名流体力学家普朗特一起,共同奠定了螺旋桨和机翼理论基础。早期的俄国航空探索研究主要集中在莫斯科国立大学等一些高等专业学校,主要学术带头人和组织者就是 H·E·茹科夫斯基,这些院校培养和凝聚了一批俄国航空领域的杰出人才,如 A·H·图波列夫、C·A·恰普雷金等,他们设计风洞、研制各类浮空飞行器,培养和锻炼了人才,为后来俄国航空发展和成立奠定了基础。

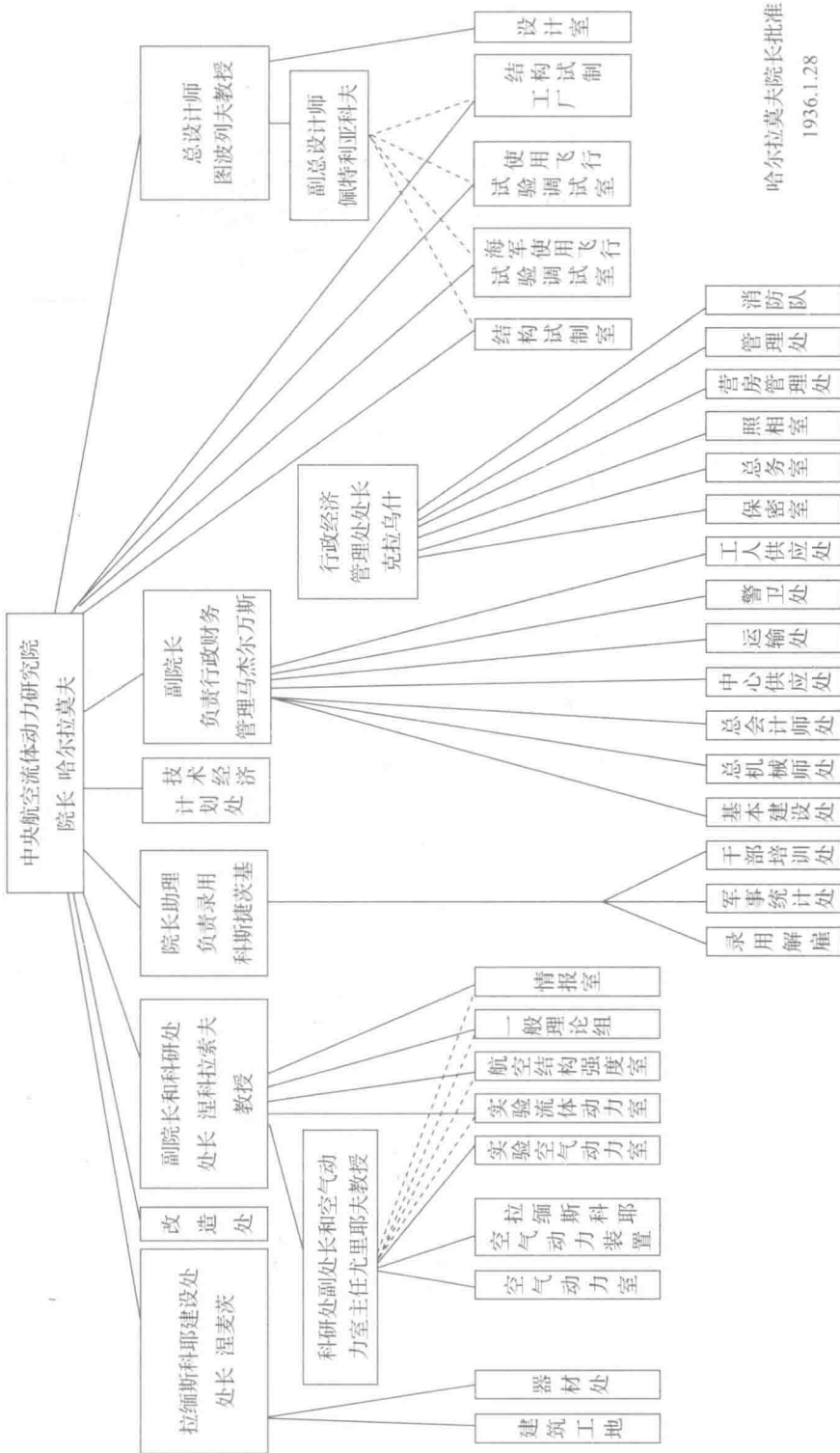
中央航空流体动力研究院(TsAGI)成立于 1918 年 12 月 1 日。20 世纪前 20 年,世界发达国家航空研究快速兴起,法国创建了埃菲尔实验室、德国建立了普朗特实验室和德国航空航天研究院、英国建立了国家物理实验研究所和皇家航空航天研究院、美国成立了国家航空咨询委员会(NACA,即现在的 NASA)。1918 年 10 月,莫斯科国立大学教授、著名的力学家 H·E·茹科夫斯基在出席国家科技部的会议中提出了成立中央航空流体动力研究院(TsAGI)的构想并获得赞同。中央航空流体动力研究院由国家科技部空气动力分部委员会主管,主要研究方向有:①基础理论;②航空科学;③风力机;④交通工具;⑤结构与设计;⑥建筑物空气/流体动力;⑦空气/流体动力测量技术。

中央航空流体动力研究院成立初期是一个集航空科研与生产试制于一体的综合机构。最初的空气动力研究主要依托莫斯科高等技术学院空气动力实验室风洞进行。1923 年,开始论证建设空气动力学、航空强度和动力学等方面对航空发展起决定性作

用的一些实验室，开始建设 T-1-2 风洞、T-5 风洞等，到 1926 年，形成了 7 个研究室，即：①基础理论研究室；②实验空气动力学研究室；③螺旋桨发动机研究室；④风力机研究室；⑤航空材料和结构强度研究室；⑥航空、水上航空和试制流体动力研究室；⑦总体室。后来还成立了飞行和航空导航、飞行设备设计、浮空飞行实验室等。除了这些航空研究室外，中央航空流体动力研究院还有航空设计和试制厂。在 20 世纪 30 年代以前，中央航空流体动力研究院建造了 AHT-3、AHT-4（“苏维埃国家”号，实现跨洲飞行）、AHT-20（“高尔基”号，当时世界最大）等飞机。

20 世纪 30 年代中期，中央航空流体动力研究院演变为单纯的航空科学研究机构，并将空气动力学、结构强度、振动理论、飞行稳定性和飞行力学确定为发展方向。1921 年茹科夫斯基去世后，C·A·恰普雷金成为中央航空流体动力研究院学术核心，他对中央航空流体动力研究院科研发展方向和人才队伍建设发挥了重要作用。在 30 年代，中央航空流体动力研究院的一些研究室被分离出来，并以其为基础成立了一些新的单位，如航空发动机制造研究院、全苏航空材料研究院、风能研究院、水动力研究院；航空设计和试制厂也被分离出来，成立了“156”号工厂。

中央航空流体动力研究院在近百年的发展进程中，其运行组织管理体系也随着航空航天发展研究的需要和国内政治经济形势变化处于不断变化中。20 世纪 30 年代以前，在中央航空流体动力研究院成立初期，科研试验工作主要分为试验研究和与型号相关的设计室，试验研究室如空气动力室、实验流体力学室、结构强度室、理论研究组、情报室等；与型号相关的设计室由总设计师图波列夫领导，如设计室、结构试制室和厂、飞行试验调试室等（图 1-1）。40 年代伟大卫国战争时期，中央航空流体动力研究院成立了几个分院，如莫斯科分院、喀山分院、新西伯利亚分院等，研究室进行了调整。50~70 年代中期，苏联航空航天进入一个高速发展时期，中央航空流体动力研究院发展也进入一个鼎盛时期，学科专业细分，建立了许多新实验室（图 1-2），以满足科研工作的需要。80~90 年代，苏联进入改革动荡时期，苏联解体，国家政治经济体制发生很大变化，中央航空流体动力研究院也受到了很大影响，其组织管理体制也处于经常变动中，截至 2017 年，中央航空流体动力研究院组织管理体系见图 1-3。据 TsAGI 网站，2008 年，中央航空流体动力研究院还成立了航空认证中心（ACC）。另外，近年来俄罗斯也有在茹科夫斯基市组建国家航空制造中心、成立国家航空研究中心“茹科夫斯基研究院”的建议和规划，但一直没有具体的实施方案。



哈尔拉莫夫院长批准
1936.1.28

图1-1 1936年中央航空流体动力研究院组织机构

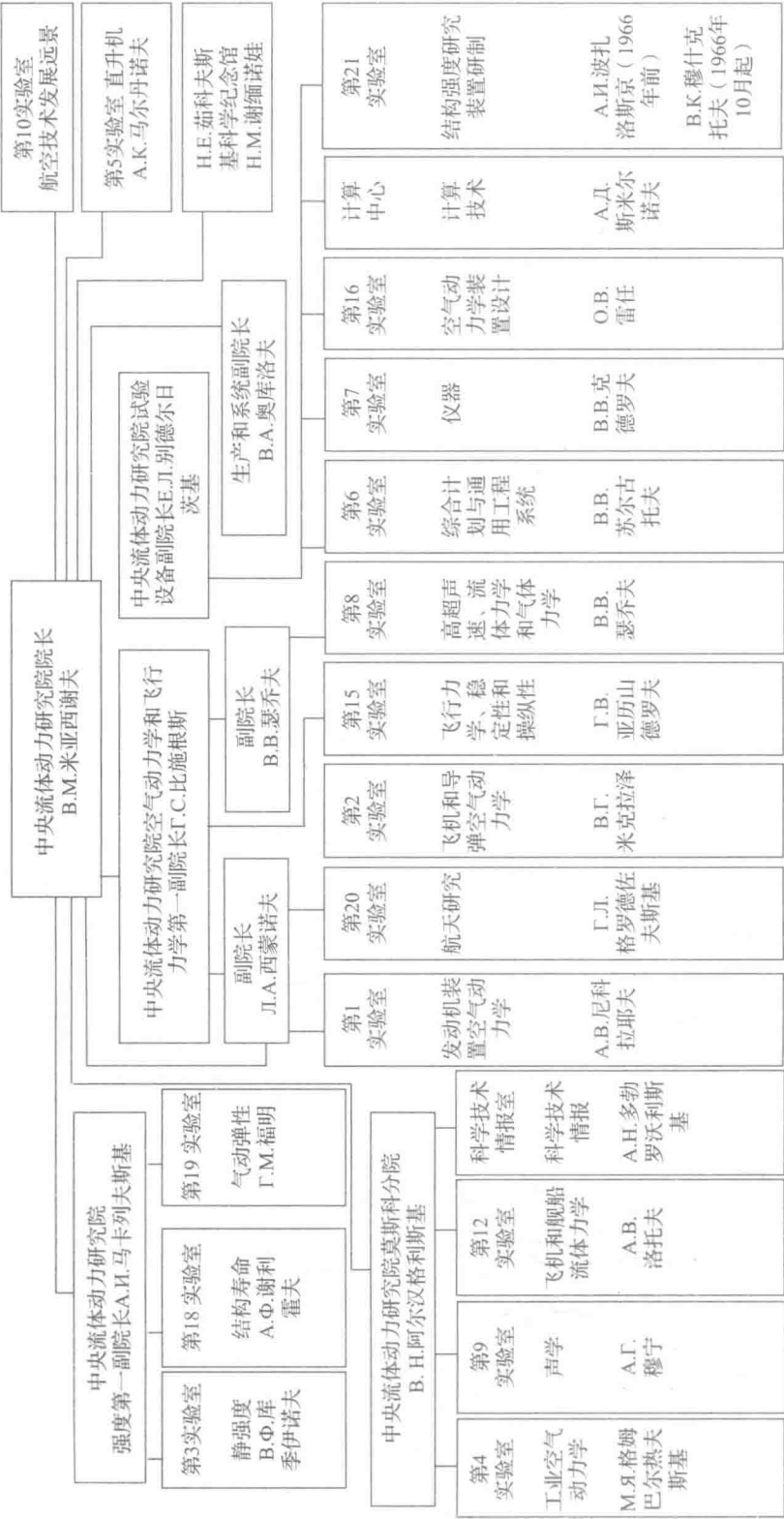
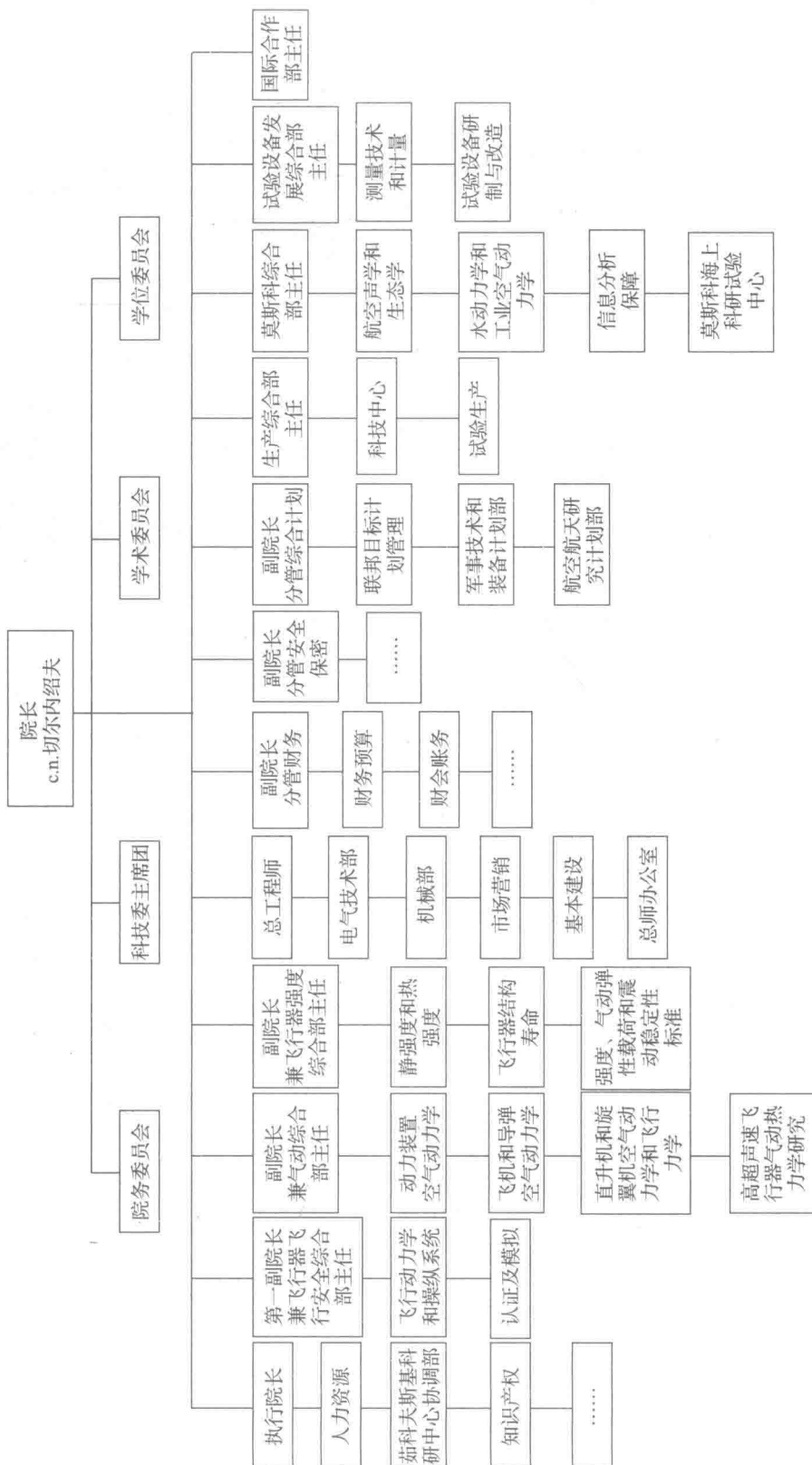


图1-2 1966年中央航空流体动力研究院组织结构



1.2 设备建设

1933 年,苏联在茹科夫斯基市规划建设新的中央航空流体动力研究院,开始了大规模试验设备和基础设施建设,到 20 世纪 60 年代,基本完成了国家大型风洞设备群建设。1933 年规划建设用于全尺寸飞机试验的 T-101 风洞和用于飞机螺旋桨试验的 T-104 风洞,并于 1939 年建成。在这一过程中为了研究 T-101 大型风洞的设计建设问题,按 1/6 缩尺比先后建设了 T-102、T-103 引导性风洞。20 世纪四五十年代,随着飞机飞行速度提高,为了研究跨、超声速空气动力学问题和飞机尾旋问题,先后建设了 T-105 尾旋风洞、T-106 连续式变压力跨声速风洞、T-107、T-108、T-109 等,完成了结构强度实验室建设;50 年代末至 60 年代,太空竞争促进了高超声速设备建设,先后发展了 T-120、T-121、T-123、T-124、BAT-102、BAT-103 等,至此,中央航空流体动力研究院大规模风洞建设基本完成,七八十年代以后只有少量风洞建设,如 T-127、T-128 等。

概括起来,中央航空流体动力研究院建设的试验设备主要包括:

- (1) 空气动力学风洞设备,主要由“T”系列亚、跨、超、高超声速风洞构成;
- (2) 飞行力学设备,包括 PS-10M 集成飞行模拟器综合设备、PSPK-102 飞行模拟器、VPS-4 研究型直升机飞行模拟器等;
- (3) 声学设备,包括 AC-2 声学无回声舱、AC-11 声学室等;
- (4) 水动力设备,包括拖曳水槽、水上浮动弹射器等;
- (5) 结构强度设备,主要包括静力实验室、振动实验室、热强度真空舱、RK-1500 混响室等。

进入 21 世纪以来,俄罗斯经济和航空航天工业逐步开始振兴,在风洞试验设备方面,根据 2015 年 3 月 TsAGI 网站消息,一座自行设计建造的结冰风洞将开始试运行。另外两座新设备也在建设过程中。一座是高超声速综合试验设备,包括共用电力系统和控制系统的三个试验气流通,一是用于全尺寸(或大尺寸)高超声速飞行器试验的大型高超声速风洞,该风洞可以进行飞行器带动力试验;二是用于解决高超声速飞行器气动热问题的激波管设备;三是用于防热系统试验的特种试验台。另一座是声学风洞,用于开展相关声学研究,满足现代飞机环境噪声等级试验研究要求。除了新建设备外,TsAGI 还计划通过设备现代化改造,提升主要风洞设备的试验能力。

1.3 发挥的作用

1939 年,斯大林指示新飞机在试飞前,必须在中央航空流体动力研究院的风洞中

进行评估,并获得飞行许可。从此,中央航空流体动力研究院与各飞机设计局的工作关系固定下来,并为军方和政府部门所接受。中央航空流体动力研究院在各飞机设计局型号设计方案、选型修改、风洞试验等方面直接参与,并对型号能否从工厂试验转入国家试验给出评估和鉴定结论。

1943年中央航空流体动力研究院出版了《航空设计师手册》,汇集了在空气动力学、飞行力学、流体力学和航空结构强度等方面的研究成果,它们对早期的低速飞机(“米格”-3、“拉”-5)设计研制发挥了作用,该手册后来随时代不断更新,并一直在使用。40年代中叶,航空进入喷气时代,中央航空流体动力研究院在后掠机翼理论、降低波阻、提高临界马赫数、小展弦比机翼等方面开展研究,对“米格”-9、“雅克”-15、“米格”-15等系列战斗机的空气动力和强度问题进行了大量试验研究,为飞机设计局在气动布局、稳定性和操控性、强度和气动弹性等方面改进设计提供了重要技术支撑。中央航空流体动力研究院通过在空气动力学、结构强度和动力学等方面的试验研究成果,与其他科研单位、各飞机设计局、军方建立了密切合作关系,对型号设计研制给出建议和修改方案,中央航空流体动力研究院的权威性得到业界肯定。

20世纪70年代,中央航空流体动力研究院提出了大推重比高机动性第四代歼击机概念,并在苏霍伊设计局的“苏”-27和米高扬设计局的“米格”-29研制中给出了具体修改建议和意见,如“苏”-27最初采用前缘可变后掠(没有增升装置)、根部小边条非平直机翼(椭圆翼),与美国F-15相比没有优势,后采纳了中央航空流体动力研究院提出的前缘偏转、翼根边条的梯形机翼概念。另外,亚声速静不稳定性、带增稳系统的电传操纵、机翼锐边条等许多创新都源自中央航空流体动力研究院的研究成果,而“米格”-29在布局上表现出与“苏”-27很大程度上的相似性,也是接受和采纳中央航空流体动力研究院研究成果的结果。

在大飞机研制方面,20世纪50年代,T-101全尺寸风洞为A·H·图波列夫设计局“图”系列(“图”-16、“图”-82、“图”-95等)大型轰炸机提供了大量风洞试验研究,中央航空流体动力研究院提出了大展弦比平直机翼布局方案,解决了动力、机翼强度和刚度问题。在“图”-16远程轰炸机基础上,中央航空流体动力研究院与图波列夫设计局一起研究苏联首架喷气客机“图”-104遇到的问题,如飞行安全、结构载荷、大迎角纵向静稳定性降低等,为以后的大飞机研究奠定了基础。中央航空流体动力研究院还分别与C·B·伊留申设计局、O·K·安东诺夫设计局合作,对“伊尔”系列运输机、“安”系列运输机进行了大量风洞试验研究,解决了采用涡轮喷气发动机和涡轮螺旋桨发动机两类动力的大飞机研制遇到的气动布局、操稳特性、起飞降

落、经济性问题。在大飞机和超声速客机研制中，T-101 全尺寸风洞，T-109、T-128 等大型风洞设备提供了可靠的试验数据，发挥了重要作用。

在直升机研究方面，20 世纪初，H·E·茹科夫斯基就开始了直升机研究，撰写了《论直升机的有效载荷》《直升机旋翼旋转平面上的风力影响的理论判断经验》等。1947 年，中央航空流体动力研究院以尾旋实验室和 T-105 立式风洞为基础组建直升机实验室，即第 5 实验室，研制了直升机试验台 HBy-1，在 T-101 和 T-105 风洞开展直升机试验研究，与卡莫夫设计局和米里设计局长期合作，对“卡”系列、“米”系列直升机研制工作作出了重要贡献。70 年代开始，中央航空流体动力研究院对直升机旋翼翼型开展研究，研制设计了专用翼型，并在 T-106 风洞中进行了试验研究。

中央航空流体动力研究院从 20 世纪 50 年代中后期开始高超声速飞行器研究，陆续建设了一批高超声速风洞、热强度实验舱等设备，为导弹类和航天飞机类高超声速飞行器提供了大量试验研究工作，与各型号设计局密切合作，在空气动力、级间分离、稳定与控制、结构强度、气动弹性和飞行力学方面，提供技术支持和研究成果。主要参与研究的项目包括“联盟”号宇宙飞船、“暴风雪”号航天飞机、水平起飞的空天飞机等。

在导弹类武器研究方面，中央航空流体动力研究院从 20 世纪 40 年代开始研究各类带翼导弹的气动布局，与各型号设计局（“彩虹”“火炬”“革新者”等）合作，对导弹空气动力学、静动态结构强度、空间运动动力学、操稳特性开展研究，与其他科研院所一道对导弹类武器的效能进行评估，为各类近、中、远程导弹研制作出了贡献，如“彩虹”设计局的“白蛉”“星星”，设计局的“X”系列导弹等。

水动力学研究在中央航空流体动力研究院成立之初就占有重要位置，并建有水动力实验室，主要研究的问题有两类：一是水面和水中的物体运动，如武器装备中的水上飞机、舰船、水中兵器等；二是研究水管和开放水槽中的水流，如国民经济建设中的水电站、航道运输问题。1930 年建成了大型水槽，开展了水上飞机试验研究，形成了水上飞机强度设计标准，研究成果收录在《航空设计师手册》的第 2 卷《水上飞机的水动力学》中，在水上航空等方面发挥了重要作用。40 年代以来，开展了一系列水动力基础（超空泡、水翼理论）和应用研究，如超高速超空泡“风雪”鱼雷、潜射导弹、地效飞行器和气垫船、水陆两用飞机、航天器回收和飞机水上迫降等。