

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2026.02.008

风洞建设与中国早期航空科技发展(1911—1949)

李国峰*

内蒙古科技大学 理学院, 内蒙古 包头 014010

摘要: 风洞是航空科技自主发展的基石。1933年至1949年间,中国在极端困难的条件下建设了十余座风洞,此举旨在扭转其早期航空科技因风洞长期缺位而形成的“链条型依赖”困境——即陷于对国外飞机成品与技术链条的模仿与追随,而无力进行自主设计的被动局面。这些风洞的建设与应用,标志着中国航空工业开启了一场深刻的“去依附”探索,其发展路径呈现出从追求终端产品的“技术链条”完整性,到谋求构建内生于本土的“生态型自主”创新体系的战略性转向。尽管战时风洞因规模、数量与环境的局限,未能在飞机研制中发挥普遍作用,但以驱研-1为代表、经由风洞试验的自主设计案例,已证明其催生本土创新、摆脱外国设计窠臼的潜力。这段未竟的转型表明,后发国家的技术自立,其核心在于实现从静态的“链条型依赖”到能够自我维持、自我演进的“生态型自主”的根本性跃迁。

关键词: 风洞;航空工程;技术史;现代化;科技政策

中图分类号: E919;K265

文献标志码: A

文章编号: 2097-1486(2026)02-0184-08

The construction of wind tunnels and the development of early aviation technology in China (1911—1949)

LI Guofeng*

School of Science, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

Abstract: This paper examines the construction of wind tunnels and the development of early aviation technology in China, analyzes the adverse consequences of their long-term absence, compares the development paths before and after their construction, and explores the historical motivations behind their establishment as well as the profound impact of their application. Wind tunnels are the cornerstone of independent development in aviation technology. Between 1933 and 1949, China constructed over ten wind tunnels under extremely difficult conditions. This endeavor aimed to reverse the predicament of “chain-type dependence” that plagued its early aviation sector due to the chronic lack of wind tunnels—a situation that trapped China in imitating and following foreign aircraft and their technological chains, leaving it incapable of autonomous design. This initiative marked a strategic shift toward “ecosystemic autonomy,” representing a transition from imitating foreign aircraft to establishing a self-sustaining, indigenous innovation system. Although the scale, quantity, and wartime environment of these wind tunnels limited their widespread role in aircraft development, the wind tunnel-enabled indigenous design case represented by the XP-1 demonstrated its potential to catalyze local innovation and break away from the confines of foreign design paradigms. This unfinished transition underscores that for latecomer nations, achieving technological self-reliance requires a fundamental leap from a static model of “chain-type dependence” to a dynamic, self-evolving framework of “ecosystemic autonomy.”

Keywords: wind tunnel; aviation engineering; technology history; modernization; science and technology policy

* 通信作者

收稿日期: 2025-11-19; 修回日期: 2026-01-18

风洞(Wind Tunnel)作为航空研究的核心实验设施,是衡量一个国家航空科技水平的重要标志。关于中国早期的风洞建设,现有研究多聚焦于个案考证与发展历程的描述性梳理,或将风洞视为航空学科发展的自然组成部分^[1-6]。然而,一个值得深入探讨的现象是,中国的风洞建设相较于飞机制造滞后了二十余年,导致其在1911至1949年间的航空科技发展呈现出某种“逆向”轨迹。目前,学界对这一“反常”现象尚缺乏系统性的理论解析。

更为关键的是,对于风洞长期缺位如何塑造中国早期航空科技的独特路径,以及其在后来从“被忽视”转向“被重视”的深层动因,仍缺少从“科技与社会”互动视角出发的系统探讨。本文正是基于这一研究缝隙,试图论证风洞问题不仅是技术史的内部议题,更是理解后发国家在科技追赶过程中“路径依赖”与“范式转型”的典型案列。

1 风洞缺位与早期航空科技的仿制路径依赖

1903年威尔伯·莱特(Wilbur Wright, 1867—1912)和奥维尔·莱特(Orville Wright, 1871—1948)的飞机试飞成功,人类进入以飞机为核心标志的航空科技时代。中国有识之士很快扣住时代脉搏。1911年李宝焯(1886—1912)和刘佐成(1883—1943)就在北京南苑仿制过法国桑麻(Sommer)式飞机,中国由此成为世界上较早发展航空科技的少数国家之一。不过由于历史的局限,国人起初对航空科技的认识较为朴素,专注于前台的飞机,经历较长时期才认识到风洞的价值,以致中国航空科技尽管起步较早,但在之后的二十余年内进展缓慢,与世界通常发展路径迥异。

在世界范围内,风洞发明在前,飞机居后。风洞由英国人韦纳姆(Francis Herbert Wenham, 1824—1908)在1871年发明。它是一个两端开口的木箱,人工气流从一个端口进入,流过待测模型,在另一端口排出。研究者可据此探究飞行器与空气的相对运动。莱特兄弟借助他们自己制作的直流式风洞试验了200多个机翼模型,从中优选合适翼型,成功设计出飞机。1908年,德国人普朗特(Ludwig Prandtl, 1875—1953)将直流式风洞首尾相接,形成环形封闭回路,建造成回流式风洞,影响深远。之后,风洞技术迅速发展,欧美强国竞相建造洞体直径更大、风速更快的风洞。美国1931年建成洞体直径9.1 m×18 m的巨型风洞,可以使用真实飞机进行测试,而

不再局限于模型。整个20世纪30年代,风洞技术日渐成熟,加之空气动力学理论的突破性进展,航空科技迅猛发展。

而在中国,风洞建设长期滞后。基于飞机显然的军事价值,主要注意力在相当长时期内聚焦于飞机制造,航空教育与科研并未受到重视,对飞机背后至关重要的风洞未予及时关注。

冯如(1884—1912)最早主张“航空救国”^[7],他曾说造不成飞机“毋宁死”^[8]。孙中山(1866—1925)也认为“飞机一物,自是大利于行军”^[9]。在他的指示下,1922年,广东飞机制造厂建成,大元帅府航空局局长杨仙逸(1892—1923)兼任厂长,周宝衡为工务科长,但是这个厂的生产能力有限,每年只能生产飞机2—3架^[10]。此外,北洋政府在北京南苑、福建马尾、保定等地,晋系军阀阎锡山(1883—1960)在太原,皖系军阀卢永祥(1867—1933)在上海,奉系在哈尔滨等地试制过飞机,但生产规模都不大,少则仅有一架,多则不过寥寥数架,且都是仿制外国飞机,并不曾借助风洞试验进行自主设计。至1931年,中国航空科技的主要着力点,仍然是撇开风洞的、单纯的飞机制造业。同年4月20—25日,南京国民政府召开全国航空会议,收到飞机的相关提案达32个^[11]。换言之,中国航空科技在最初二十余年内,并无坚实的科研基础,其标志就是没有风洞。

以上状况的成因,并非中国人对风洞奥妙与重要性全无了解,而在于未能及时重视。中国本土培养的航空人才,专门出国考察学习航空而见过风洞实物的,似以南苑航空学校的蒋逵(1893—1984)等六人为最早。他们于1920年春在英国“斐克斯”飞机制造厂(Vickers Aeroplane Works)考察过风洞^[12]。但似乎仅至于此,目前未发现当时国内有何具体后续行动的史料。中国何时、在什么情况下开始关注到风洞问题,学术界一般将研究节点放在一·二八事变后,“航空救国”呼声震撼全国之际。认为中国建造风洞的背景是“国民政府痛定思痛,开始积极加强空防,推进空军建设,并开展航空教育与科研”^[11]。此观点固然不错,却忽略了之前的曲折、复杂的演变过程,看不到中国早期认识风洞问题的全过程。

其实,中国早期航空在无风洞条件下、基于仿制的小规模制造模式,早已引起有识之士极大忧虑。1928年6月15日,《空军》杂志主编钱昌祚(1901—1988)发表《中国自造飞机之先决问题》一文,一针见血地指出,兴办航空而不建风洞,二十年来“几成舍本逐末”并首次公开呼吁建造风洞^[13]。然而,他的

意见,在当时没有引起多大反响,不论是大学,还是政府当局,都未予积极回应。

究其原因,缘于对航空学术的重要性缺乏认识。例如,罗家伦(1897—1969)早期对航空工程的态度颇具代表性。1929年,他任清华大学校长时,拒绝了空气动力学大师冯·卡门(Theodore von Kármán, 1881—1963)发展航空工程科学的建议^[14]。直至全面抗战爆发半年之后,罗才觉悟,愧叹如果二十年前就重视航空学科,恐怕航空工程人才就“不至于像现在这样缺乏”^[15]。

不仅部分学术精英漠视航空学术,更为严重的是,最高科学研究机构亦不够重视,彼时中央研究院将天文学研究作为优先事项。冯·卡门“殊感缓急倒置”,建议将研究重点转向事关国防的航空^[16]。

中国有关方面对发展航空科技不积极,特别是对风洞不够重视,产生严重负面影响。通过中日两国的对比,颇能说明问题。仅就航空科技层面而言,两国几乎同时起步,但因风洞建设的早晚不同而走上截然不同的发展道路。1927年,日本利用冯·卡门访日机会,请其帮助设计风洞。次年,日本第一座风洞建成,成为其现代化航空工业的起点。冯·卡门曾在其回忆录评价过风洞对日本航空发展的巨大促进作用,说“日本以抄袭别国设计闻名”,但在第二次世界大战时的零式战斗机性能优良,“表明日本人已经不再生搬硬套地抄袭,能够吸取精华为己所用”^[17]。

1931年的“九一八”事变和次年“一·二八”事变时,日本侵略者利用空军优势对中国狂轰滥炸,给中国军民造成巨大伤亡。特别是“一·二八”事变期间,敌我双方空中力量过于悬殊,成为我方战事失利的重要原因。在此危难形势下,学界对航空教育与学术,尤其是风洞的认识,陡然巨变。1932年6月13日,《中国自造飞机之先决问题》再次刊载于《飞报》^[18],越来越多的学者撰文呼吁发展航空科技,建造风洞也成为科技界的共识。如竺可桢(1890—1974)在次年发表的《飞机救国和科学研究》疾呼,要飞机救国,“非建造风洞不可”^[19]。国民政府亦在教育界人士的建议下,将航空学术提上日程。1933年9月29日,武汉大学法学教授周览(1889—1971)致电国防设计委员会秘书长钱昌照(1899—1988),申请在该校“设航空讲座”,后者随即于10月2日指令航空署技术处处长钱昌祚“代为计划”,钱昌祚则13日列出包括风洞建设在内的详细意见^[20]。钱昌祚发出倡议后多年,建设风洞终于成为政府决策。

建造风洞共识的形成,反映了国人对早期单纯专注于飞机制造业,导致航空科技发展缓慢、受制于人状况的强烈不满,以及提高本国航空科技水平、壮大航空业和保家卫国的深切期盼,中国建设风洞的内在动力即源于此。同时,日本侵华所带来的外部战争威胁起到了进一步的催化作用,使得中国航空科技发展缺乏风洞的弊端暴露出来。

2 风洞建设

当国人意识到应摆脱依赖外国飞机而开展航空科研以自主研制时,不得不先解决风洞的有无问题。先是航空署、国防设计委员会和教育部等谋划,清华大学、中央大学和北洋工学院等单位具体实施,后有一些单位自行建造。

1933年10月13日,钱昌祚在“代为计划”中提出,“航空工程为当务之急”。但为“安全”计,同时基于“航空重心在京杭一带”的现实,并考虑到资金使用效率,他建议在远离华北而又靠近京畿的中央、交通、浙江三所大学中选择其一,添设航空学系,并概算此项开办费约需10万元,其中为空气动力学实验室配备小风洞,连房屋仪器约需5万元^[20]。10月23日,清华大学校长梅贻琦(1889—1962)在致国防设计委员会副秘书长钱昌照函中提出一份“清华大学工学院增设航空讲座办法草案”,其中建立航空工程实验室,包括风洞等设备需要3万元^[20]。11月4日,国防设计委员会经审查后认可钱昌祚方案,将清华的风洞等设备费由申请的3万元调整为5万元^[20]。

1934年4月3日,航空署在杭州召开技术会议审议促进航空技术发展方案^[21]。航空学校工厂技工李立德提出“设立大规模风洞实验室及仪器试验室”的议案获得通过,被归入航空研究所计划内办理^[22]。8月,国防设计委员会在庐山牯岭会议上作出决议,至少两所国立大学应从速设立航空工程学系^[20]。10月8日,国防设计委员会、航空署改组而来的航空委员会、教育部在南京会商,指定中央大学设立航空工程学系,武汉大学及交通大学筹备设立航空工程学系,对风洞等所需设备给予费用补助^[23]。1935年9月16日,北洋大学亦向教育部申请设立航空工程学系,其中风洞设备费需9千元^[24]。

付出巨大努力,风洞建设成绩显著。最先建造风洞的是清华大学。1933年,在美国获航空工程硕士学位后归国的王士倬(1905—1991)设计成0.25 m模型风洞。1935年,他参考美国加州工业大学风洞,设计出一座1.5 m风洞^[25],次年4月开始运

行^[26]。1935年,北洋大学和中央大学分别自德国和意大利购买一座风洞。但北洋大学的风洞只有发动机到货,日本占领天津后遗失^[2]。中央大学的风洞在1935年安装到位,南京沦陷前,除洞体埋南京,主要设备被拆运重庆^[3]。1944年,用层板重造洞体^[27],在抗战前夕完成,抗战胜利后运回南京安装^[28]。

以上风洞均为小型风洞,对航空科研作用有限。为提高航空科研能力,中国迫切需要建设大型风洞。1936年,航空委员会决定在南昌建设4.57 m大型风洞^[29]。清华大学负责设计工作,于当年7月完成。次年3月,风洞开始建造,至1938年夏,风洞主体完工,但即将安装内部设施之际,遭到日军飞机轰炸,风洞洞体被击中两处^[30]。这个大型风洞未及开始

工作即被迫放弃。

清华大学迁昆明后,航空研究所按照南昌风洞式样缩小尺寸,重新设计了一座1.5 m风洞,制造工程在1939年春完工^[31]。洞体和导流板都采用2 cm厚钢板,发动机系风洞3南迁时拆卸而来的70马力(1马力=0.735千瓦)发动机,试验房为一瓦棚。

在困难条件下,通过购买和自制,1933年至1949年,包括重建、未完全建成及模型在内,共建设风洞15座(表1),其中用于教学8座、科研6座、教学兼科研2座。分属清华大学、中央大学、西南联合大学、北洋工学院、航空研究院、航空机械学校、浙江大学等七个单位。这些风洞为当时中国自主发展航空科技提供了可能性。

表1 1933—1949年中国建造的风洞^[32]

Table 1 Chinese Wind Tunnels Constructed (1933—1949)^[32]

| 序号 | 时间 | 所属单位 | 获得方式 | 试验段尺寸/m、构型 | 用途 | 备注 |
|----|-------|---------|-------|---------------|-------|------------|
| 1 | 1933 | 清华航空研究所 | 自制 | 0.25 | 模型 | |
| 2 | 1935 | 北洋工学院 | 购自德国 | 不详 | 教学 | 未建成 |
| 3 | 1936 | 清华航空研究所 | 自制 | 1.5、回流式 | 科研 | |
| 4 | 1936 | 中央大学 | 购自意大利 | 1.2、回流式 | 教学 | 1937年设备迁重庆 |
| 5 | 1937前 | 中央大学 | 自制 | 0.3、回流式 | 教学 | 1937年迁重庆 |
| 6 | 1937 | 清华航空研究所 | 自制 | 4.57、回流式 | 科研 | 主体完工 |
| 7 | 1938 | 航空机械学校 | 清华制 | 0.3 | 教学 | |
| 8 | 1938 | 西南联合大学 | 清华制 | 0.9、直流式 | 教学 | 缺发动机 |
| 9 | 1938 | 清华航空研究所 | 自制 | 烟风洞 | 科研 | |
| 10 | 1940 | 清华航空研究所 | 自制 | 1.5、回流式 | 科研 | 1941年拆迁再建 |
| 11 | 1942 | 航空研究院 | 自制 | 1.5×2.13、回流式 | 科研 | 运行不稳定 |
| 12 | 1945前 | 航空研究院 | 自制 | 小型、回流式 | 展示 | |
| 13 | 1945 | 中央大学 | 自制洞体 | 0.9×1.5椭圆、直流式 | 教学 | 由风洞4改建 |
| 14 | 1948 | 清华大学 | 自制 | 0.76×1椭圆、回流式 | 教学、科研 | |
| 15 | 1949 | 浙江大学 | 自制 | 0.9、回流式 | 教学、科研 | 参考风洞3 |

中国早期风洞的轨迹清晰地表明,在战时中国,航空科研基础设施的建设始终挣扎于理想与现实之间。一方面,决策者已认识到自主科研的战略价值;另一方面,薄弱的工业基础与严峻的战争环境,又使得这些设施难以形成稳定、持续的科研能力。这种“建起来”却“难用好”的窘境,正是当时中国技术“去依附”过程艰难而曲折的缩影。

风洞建设的历程,不仅是设施的从无到有,更是一场在烽火连天中对航空科研自主权的艰难求索。其建设轨迹清晰地揭示了战时中国航空救国物质建设的深化:焦点从购置与仿制飞机的终端产品,前移至构建自主设计所必需的科研基座。这一转向,使得“航空救国”的内涵超越了初期的激情呐喊,深入

到艰苦卓绝的科研实践层面。

在此过程中,大型风洞的筹建尤具象征意义。其中最为宏大的南昌4.57 m风洞,其设计本身即是当时国际前沿技术与中国现实条件相结合的尝试。针对国内钢材匮乏的困境,创造性地引入薄壳理论,采用水泥钢筋构建洞体;为平衡电力短缺与科研需求,精准选定了动力配置。这座被冯·卡门寄予厚望的设施,其技术构思展现了中国工程界追赶世界先进水平的潜力。然而,其尚未建成即毁于战火的命运,也成为战时科研环境极端恶劣的悲壮注脚,昭示着宏观战略与微观现实之间的深刻矛盾。

最终,昆明1.5 m风洞成为战时条件下持续运行并直接服务于飞机研制的核心设施。尽管其规模

有限,测试能力受到制约,但它标志着中国航空技术发展模式的某种根本性转变的开端:即从依赖外部技术输入的“仿制闭环”,转向基于本土实验数据的“自主设计”探索。驱研-1等机型的设计,尽管最终未能列装,却正是在此基础上诞生的、具有原创精神的产物。它们证明,风洞这一物质基础的存在,为打破长期的技术依附、激发内生性创新能力提供了最初的支点。

3 风洞对航空科技的促进

航空时代开启后,其相关科技发展长期围绕飞机设计推进,风洞是最为基础而且必要的实验设施。气动外形是飞机设计的核心,因其对飞行性能有决定性影响。正因如此,气动外形往往需要经过成百上千乃至上万次的风洞试验才能确定。借助风洞,可对设计的飞机模型进行空气动力学验证,从而掌握飞机设计的主动权;若无风洞,则必须进行实机飞行验证,不仅成本高昂,风险常难以承受,为求稳妥,往往沿用别国已有的设计,较为被动。因此,就技术层面而言,一个国家的飞机设计选择哪条技术路径,取决于有无风洞。中国建设风洞,促进了早期航空科技的转型,使飞机设计开始摆脱依赖他国,转向自主设计。

中国早期的飞机设计可分为两类情况。一是利用外国已有的理论或实践成果设计飞机,二是聘请外国人设计飞机,对外依赖的具体方式略有区别,但本质相同。

第一类当中,马尾海军船政局飞机工程处设计的水上飞机和广东飞机修理厂的“羊城”号系列飞机是典型代表。海军船政局飞机工程处的巴玉藻(1892—1929)、王助(1893—1965)等人^[33-34]曾留学美国麻省理工学院航空工程系专门学习飞机设计制造。他们从1918年开始,至1931年制成飞机十多架^[35]。广东飞机修理厂的三任厂长卢维缚、梅农安和林福元(1890—1962)亦曾留美学习航空工程,从1936年开始制造“羊城”号系列飞机,总计60多架,但这些飞机的设计,均非原创,先后参考过阿芙罗616(Avro 616)、道格拉斯O-2MC(Douglas O-2MC)、沃特O2U-1D(Chance Vought O2U-1D)等多个外国机型^[36]。

第二类代表机型有乐士文号、舒德勒型(Schoettler)及韶关飞机制造厂的复兴式等。乐士文一号由广东飞机修理厂于1923年制造。杨仙逸在孙中山指示下,聘请英国人盖·考瓦尔(Guy Colwell)和美

国人阿瑟·瓦尔德(Arthur Wild)担任技术专家,分别负责设计与制造工作^[37]。据今人考证,乐士文部分参考詹尼(Jenny)飞机加以创新设计,兼有英国阿佛罗-504(Avro-504)、德国福克-Dr-1(Fokker Dr. 1)、美国托马斯-摩斯S·4C(Thomas-Morse S·4C)等机型部分特点^[38]。舒德勒型飞机由德国人舒德勒(Ferdinand Leopold Schoettler)在1922年至1926年间设计制造。他先后受聘于军阀卢永祥、阎锡山。1923年,舒德勒先是在上海为卢永祥制造了一架飞机^[39],构型与德国阿维亚蒂克(Aviatik)类似。1925年,舒德勒帮助阎锡山制造数架飞机^[40]。1926年,舒德勒又设计制造了S4型飞机^[41]。韶关飞机制造厂的复兴式,系由该厂所聘美国人戴查理(Charles Henry Day)任技正、俄裔美籍工程师萨克程高(Constantine Lvovich Zakharchenko, 1900—1987)为总工程师所设计制造^[42]。

上述两类情况的共同特点是飞机设计未曾进行风洞试验,严重依赖国外风洞研究所取得的翼型设计成果,不具备独立自主设计能力。设计水平难以比肩当时世界先进水平。其本质在于航空技术属于被动跟随型发展模式,严重依赖已有的理论及实践经验,而非风洞试验与空气动力学理论良性互动的主动科研型。

中国建设风洞并应用于新机型的研制,促使上述航空科技发展模式发生很大变化。据相关档案记载,航空委员会第一飞机制造厂的新复兴丙、驱研-0和驱研-1等几款新机在研发过程中,曾使用过昆明1.5 m风洞^[43],最具代表性的是驱研-1(XP-1)。

1939年韶关飞机制造厂搬迁昆明,改名空军第一飞机制造厂。驱研-1由萨克程高领导的技术小组于1942年开始设计。1943年萨氏合同期满6个月后回国,后续工作由工务处处长雷兆鸿组织完成^[44]。驱研-1的翼型布局为倒海鸥式前掠翼,该设计优点是低速性好,可用升力较大,气动效率更高,前机身和中翼为金属骨架,后机身和外翼为木质^[44]。驱研-1的构型及气动布局已经摆脱当时外国飞机的外形设计的窠臼,体现出强烈的创新性。可惜1943年秋试飞时坠毁,但其试飞为世界此类飞机的首次^[45]。

风洞的应用,弥补了之前中国航空科技发展的关键缺环,当时的飞机研制据此进入标准的全流程模式,即初步设计——风洞试验检验——修改设计的模式,提高了飞机设计能力。相关工作还引起美国国务院和军方注意,认为中国“空气动力学方面风

洞的实验设备,规模虽小,与美国各大研究所,实不上下”^[43]。

4 局限与启示:未完成的范式转型

受客观条件限制与具体措施失误的影响,中国早期风洞在建设地点、规模、数量及使用方面均存在不足,制约了其效益的发挥。上述飞机设计的全流程模式局限于较小范围内,未能成为当时的主流。

首先,由于飞机制造厂和大学航空工程系等航空工业、教育资源分布的限制,风洞都相应被建在了地理位置靠近沿海的地区。在战时环境下,这些事关国防的战略性科学研究装备,常面临日军的威胁,或未能建成,或建成后由于缺乏安全稳定运行的环境而有效工作时间不长。位于昆明的西南联大清华航空研究所5英尺(1英尺=0.3048 m)风洞是唯一参与过飞机设计的一座,1940年夏开始运行,次年秋,因昆明频繁遭日机轰炸,风洞被拆卸转移至郊区白龙潭重新安装,其间耽搁半年^[46]。至于航空研究院的风洞,因为测量精度不高,几乎无法使用^[1]。

其次,能够正常运行风洞的规模太小。20世纪20年代末30年代初,世界风洞建设步入大型化时期。依托大型风洞,可以用全尺寸的实体飞机代替模型进行空气动力学试验,近乎完全模拟飞机在空中的实际飞行情况,数据可靠性大大优于模型测试,更加直观、高效。南昌4.57 m风洞测试段的尺度,虽然不足以开展全尺寸飞机的空气动力学测试,但能够容纳飞机螺旋桨并进行相关实验,对改装外国飞机的相关研究很有意义,可惜功败垂成。清华和昆明的1.5 m风洞的测试段口径太小,测试模型最大只能做到真飞机的十二分之一。利用小型风洞,设计一款新机型,相关试验花时较长,显然不能满足战时急迫的需求。

再次,风洞的类型也比较单一,使用存在很大局限。对航空科技而言,除了研究型风洞外,还需要生产型风洞,当时的航空强国更加重视后者。冯·卡门1937年来华时,就向中国航空界指出,风洞的工作内容以应用试验为主^[47]。中国当时的风洞主要服务于大学航空工程系的日常教学和清华航空研究所自己的航空科学研究,属于教学—研究型风洞,缺乏配套于飞机制造厂专用的生产型风洞。清华风洞主要进行了一些基础理论研究^[48-50],尚未来得及开展应用研究,即落入日军之手。南昌风洞建设时的定位是为大型飞机制造上做配套的,有潜力成为一座生产型风洞,但同样毁于日军之手。昆明风洞太小

了,作为一座承担飞机研制任务的风洞,实际勉为其难。因此,尽管建设了几座风洞,但是由于生产型风洞的缺乏,中国当时的设计飞机借助于风洞试验的并不普遍。

综上所述,战时风洞在安全、规模与应用上暴露的种种局限,其本质并不仅仅是战时资源匮乏的技术性难题,更深层次地揭示了中国航空科技在从“仿制”迈向“自主”过程中所遭遇的结构性困境。这场艰难的“范式转型”之所以是“未完成”的,关键在于它未能突破“链条型依赖”的窠臼。

具体而言,当时的努力集中于补上“风洞”这一单一的、关键的技术节点,期望以此打通自主设计的链条。然而,一个能够自我维持、自我演进的航空科技体系,其根基在于一个充满活力的“创新生态”。这个生态不仅需要以风洞为核心的科研硬件设施,更需要与之匹配的持续经费投入、稳定的材料、精密制造等工业基础、与飞机制造厂紧密连接的应用牵引机制,以及能保障长期研究的和平环境。

民国时期的探索恰恰表明,在缺乏这种协同生态的支撑下,即便拥有了风洞这一先进工具,其研发活动也必然是孤立和脆弱的。它无法将工具优势转化为持续的、体系化的创新能力,最终使得“自主设计”只能停留在个别、偶然的案例上,而无法成为一种可复制、可迭代的制度化流程。因此,这段历史的终极启示在于:后发国家的技术追赶,其最终目标不应仅仅是构建一条完整的、却仍是静态的“技术链条”,而必须是培育一个能够自适应、自生长的“创新生态”。从“链条型依赖”到“生态型自主”的跃迁,才是实现科技根本自立的核心标志。

5 结语

中国早期航空科技对风洞的长期忽视,导致了其独特的发展路径。这段历史表明,后发国家在技术追赶中,极易陷入一种“链条型依赖”的困境。本文以此概念指代那种专注于模仿或引入围绕飞机的终端产品技术链,却忽视了支撑其持续创新的基础科研生态体系的发展模式。在这种模式下,航空发展虽起步较早,却因风洞等核心实验设施的缺位,被牢牢锁定在仿制与外围加工的环节,无法形成自主迭代的能力。

1933年至1949年,特别是抗战期间的风洞建设,是一场在民族危亡背景下,旨在突破“链条型依赖”的悲壮突围。它标志着中国航空发展路径的一次关键性内在转向,即从对外部技术成品的依赖,转

向对内部科研能力构建的自觉追求。然而,这场转型是一次“未完成的转型”。风洞的建设与应用,因其战时应急的底色、薄弱的工业基础与动荡的外部环境,始终未能从根本上扭转战局,也未能促成飞机设计的普遍革新。

其根本原因在于,当时的努力集中于补上“风洞”这一技术链条上的关键节点,却未能同步培育一个能够使其发挥效能的“生态型自主”体系。本文提出,“生态型自主”意味着构建一个覆盖基础研究、工程应用、产业配套与人才培养,且各部分能形成良性循环的内生性创新生态系统。民国时期的探索恰恰证明,在缺乏协同生态支撑的情况下,即便拥有了先进的工具,其研发活动也必然是孤立和脆弱的,无法将工具优势转化为持续、体系化的创新能力。

风洞的长期缺失使中国早期航空科技陷入一种“仿制闭环”:由于缺乏自主实验能力,只能依赖并复制国外成熟的飞机设计;而长期的仿制实践,又反过来抑制了对空气动力学等基础科研的投入。这一结构性困境,正是中国航空发展路径“逆向”于世界主流并进展迟缓的深层原因。风洞的建设,则在物质层面为打破此种困境提供了关键可能性。如何完成由“链条型依赖”向“生态型自主”的跃迁,不仅是理解中国早期航空科技命运的关键,也是摆在当今所有追求科技自立自强国家面前的核心议题。本研究提出的这一概念体系,或可为理解更广泛的后发国家技术追赶现象,提供新的理论视角。

参考文献:

- [1] 罗德伟. 我在风洞馆工作的回忆[J]. 中国科技史料, 1983, 4(2): 20-21.
- [2] 中国空气动力学发展史编辑委员会. 建国前中国空气动力学的发展[J]. 中国科技史料, 1987, 8(2): 3-20.
- [3] 姜长英. 中国航空史[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 金富军. 华敦德与清华大学航空研究[J]. 中国科技史杂志, 2006, 27(3): 229-237. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1441.2006.03.005.
- [5] 金富军, 王向田. 抗战前清华航空研究考察[J]. 力学与实践, 2009, 31(5): 92-96.
- [6] 朱克勤. 冯卡门与清华大学早期的航空工程学科[J]. 力学与实践, 2013, 35(5): 107-109.
- [7] 黄汉纲. 谁是第一个提出“航空救国”主张的中国人[J]. 航空史研究, 1996(01): 43-45.
- [8] 恩平县地方志编纂委员会. 恩平县志[M]. 北京: 方志出版社, 2004: 732.
- [9] 广东省社会科学院历史研究室, 中国社会科学院近代史研究所中华民国史研究室, 中山大学历史系孙中山研究室. 孙中山全集第一卷[M]. 北京: 中华书局, 2011: 539.
- [10] 中国航空工业史编修办公室. 中国近代航空工业史(1909—1949)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 32.
- [11] 决议案件[J]. 飞行杂志, 1931(11): 54-67.
- [12] 蒋逵. 蒋逵自述[M]//航空工业史料. 第一辑. 北京: 航空工业部航空工业史编辑办公室, 1984: 50-67.
- [13] 莘觉. 中国自造飞机之先决问题[J]. 空军, 1928(21): 4-11.
- [14] 刘超. 学府与国府, 清华大学与国民党的冲突与合作[M]. 天津: 天津人民出版社, 2015: 286.
- [15] 罗家伦. 抗战的国力与文化的整个性[J]. 新民族, 1938, 1(7): 2-10.
- [16] 钱昌祚. 房卡门博士谈话录[J]. 航空机械, 1937, 2(3): 3-6.
- [17] von Kármán T, Edson L. 冯卡门: 航空与航天时代的科学奇才[M]. 曹开成, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
- [18] 觉. 中国自造飞机之先决问题[J]. 飞报, 1932(160): 2-7.
- [19] 竺可桢. 飞机救国和科学研究[J]. 科学画报, 1933, 1(9): 321-322.
- [20] 龙锋. 20世纪30年代初国防设计委员会资助大学发展航空教育函电选[J]. 民国档案, 2016(3): 3-28.
- [21] 航空技术会议纪事[J]. 航空杂志, 1934, 4(5): 75-78.
- [22] 航空技术会议纪事(续)[J]. 航空杂志, 1934, 4(6): 113-124.
- [23] 荣正通, 姜玉平. 交通大学航空工程教育的创建与早期发展(1931—1945年)[J]. 中国科技史杂志, 2020, 41(01): 22-33.
- [24] 国立北洋大学呈教育部呈字第一零八号[A]//国立北洋大学. 中央大学交通大学武汉大学北洋工学院增设航空工程系有关文书, 1935年8月. 南京: 第二历史档案馆, 5-2158.
- [25] 师元光. 中国航空事业先驱王士倬[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007: 46.
- [26] 张捷迁. 回忆清华开创的航空研究[J]. 中国科技史料, 1983, 4(02): 10-19.
- [27] 国立中央大学卅四届学生自治会. 国立中央大学概况[M]. 重庆: 国立中央大学学生自治会, 1944: 88.
- [28] 航空系自行设计装成飞机模型试验风洞最大风速每小时百里[J]. 国立中央大学校刊, 1948(54): 3.
- [29] 张捷迁. 国立清华大学十五英尺口径风洞[J]. 航空机械, 1940, 4(9): 1-9.
- [30] 张捷迁, 盛健. 怀念美籍讲座教授华敦德博士对清华的贡献[J]. 航空史研究, 1998(04): 35.
- [31] 张昕聪. 清华大学航空研究所之五呎风洞[J]. 新工

- 程, 1940(2): 22-25.
- [32] 李国峰. 抗日战争时期风洞技术之研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020: 120. DOI:10.27230/d.cnki.gnmsu.2020.001298.
- [33] 巴钟奇, 王钟英. 马尾飞机处往事[M]//林樱尧. 马尾首创中国航空业. 福州: 福建省音像出版社, 2006: 3-45.
- [34] 杭依特石林. 中国航空事业的奠基人: 巴玉藻[M]//林樱尧. 马尾首创中国航空业. 福州, 福建省音像出版社, 2006: 131-143.
- [35] 陈道章. 中国航空发源地: 福州马尾[M]//林樱尧. 马尾首创中国航空业. 福州: 福建省音像出版社, 2006: 69-81.
- [36] 魏刚, 陈应明, 张维. 中国飞机全书[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012: 266.
- [37] Aibert G P. 有关乐士文一号飞机史实的回顾[M]//傅昊旻, 译. 航空工业史料, 第十辑. 北京: 中国航空工业史编辑办公室, 1984: 94-99.
- [38] 陈应明. 乐士文1号飞机的考证[M]//航空工业史料, 第四辑. 北京: 中国航空工业史编辑办公室, 1984: 197-209.
- [39] 冯启镠. 中国制造飞机之过去与现在[J]. 航空, 1924, 5(2): 4-6.
- [40] 钱昌祚. 三十年来中国之航空工程[M]//三十来之中国工程. 南京: 中国工程师学会, 1946: 1-6.
- [41] Andersson L. A History of Chinese Aviation - Encyclopedia of Aircraft and Aviation in China Until 1949[M]. Taipei: AHS of ROC, 2008: 242.
- [42] 中国飞机外篇(之七): 韶关飞机厂/空军第一飞机制造厂复兴式(Fu-shing AP-1, AP-2)[DB/OL].[2026-1-18]. <http://cwlam2000.epizy.com/cafx07.htm?i=1>.
- [43] 空气动力学方面的研究工作[A]//国立清华大学航空研究所. 国立清华大学航空研究所工作报告, 1945年10月. 南京: 第二历史档案馆, 5-6748.
- [44] 张骞. 战时的空军第一飞机制造厂[M]//云南文史资料选辑. 成都: 四川科学技术出版社, 1995: 245.
- [45] 吕志强. 云南科技对抗战的贡献[M]//云南文史资料选辑, 第五十辑. 昆明: 云南人民出版社, 1997: 422-440.
- [46] 北京大学, 清华大学, 南开大学, 等. 国立西南联合大学史料[M]. 昆明: 云南教育出版社, 1998: 672.
- [47] 钱昌祚. 房卡门博士谈话录[J]. 航空机械月刊, 1939, 3(1): 3-19.
- [48] Feng K L. Aerofoil Calibration Tests in the Tsing Hua Five-Foot Wind Tunnel[J]. Tsing Hua Science Reports, A, 1937, 4(1): 41-47.
- [49] Wattendorf L. Factors influencing the energy ratio of return flow wind tunnels[M]//Proceedings of the Fifth International Congress for Applied Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 1939: 9.
- [50] Wattendorf F L. The First Chinese Wind Tunnel[J]. Aircraft Engineering & Aerospace Technology, 1938(10): 317-318.



李国峰,男,副教授,理学博士,毕业于内蒙古师范大学科学技术史研究院。目前主要从事近现代科技史研究;主持完成省部级项目2项,发表论文10余篇,获得国家发明专利4项,参与出版著作3部。Email:lgfnkd@163.com

(责任编辑:彭 鹏)