

# 缩比模型研制与试飞技术

本报通讯员 张甲奇 贺雨

在航空试验科学里，缩比模型是一门高精尖的学科技术。缩比模型是将真实飞行器外形按照合适的系数进行几何缩放，并遵循严格的相似准则关系而生产出的一种特定试验对象，而缩比模型飞行试验则是利用缩比模型在真实大气环境中飞行来预先研究真实飞行器的动态飞行特性。

## 缩比模型自由飞技术的发展

当前，缩比模型飞行试验已发展为当代航空新技术必不可少的研究手段之一。它的可信度高、综合性强、使用限制少以及低成本的特点使其在航空飞机理论预测、风洞实验和全尺寸飞机飞行试验之间起到关键性作用。其科研价值和实用意义已被国内外业界所广泛认可，在促创新、提质量、缩周期、降成本等方面效益突出，正在驱动整个飞机研发模式的变革，是未来飞行器设计研发中关键技术的一项重要验证途径。

起初，缩比模型飞行试验主要用来预先研究飞机大迎角失速和尾旋特性，以降低新机失速和尾旋试飞的风险，使其充当新机危险试飞科目的“排雷兵”。飞机失速和尾旋是一种极其危险的状态，一旦意外进入失速或尾旋，如果不能及时改出，飞机将会快速坠毁，会严重危及到飞机安全。缩比模型飞行试验则通过缩比模型在真实大气环境下进行飞行试验，获得大量的、可靠的试飞数据，试飞工程师则通过对试飞数据的统计和分析，科学地计算出飞机失速和尾旋临界值，以避免飞机进入到失速和尾旋状态；并能够给出飞机有效改出失速和尾旋方法，若飞机意外的进入失速或尾旋，可以快速帮助飞机改出失速或尾旋状态。

美国NASA兰利研究中心和德莱顿研究中心先后通过缩比模型飞行试验完成了F-15、F-16、F-18、B-1、X-31飞机等的失速和尾旋试验，取得

了飞机失速/尾旋特性方面的大量数据和成果，为美国的航空航天发展提供了重要的技术支持。

航空工业试飞中心（中国飞行试验研究院）作为我国唯一的飞行试验鉴定机构，自20世纪60年代初就开展缩比模型飞行试验技术研究工作。先后为我国首架运10、教8、教9、ARJ21、AG600、C919等开展了缩比模型飞行试验，完成了国内几乎所有军/民用飞机的失速和尾旋试飞研究，为我国航空技术的发展提供了重要的技术支持。

缩比模型飞行试验通常采用无动力投放的方式，模型通过挂架挂载在母机机腹下方，母机按照预设爬升剖面到达试验空域后投放模型，模型投放后地面操纵人员按照试飞动作要求完成试飞科目。试飞科目完成后，通过降落伞回收模型。

模型回收后，试飞工程师对试飞数据进行处理、统计和分析，并通过相似准则关系换算得到真实飞机的动态特性。与无动力投放飞行试验不同，



F-15飞机缩比模型失速尾旋试飞。

带动力缩比模型飞行试验和真实飞机一样能够在跑道上起飞/着陆，并在空中的飞行时间更长。因此，带动力缩比模型飞行试验单次能够完成更多试飞动作，效率更高，综合模拟能力也更强。

试飞中心在开展无动力投放飞行试验的同时，也完成了教6飞机带动

力缩比模型飞行试验，“海鸥”300带动力缩比模型飞行试验，并在国内预先构建了带动力无人机验证平台，开展了无人机飞控系统研究、地面控制站研究和远距链路传输研究等，为国内无人机技术发展贡献了力量。



X-48 BWB布局飞行验证。



X-56气动弹性多用验证平台。



AG600飞机模型挂架。

## 利用缩比模型试验开展前沿技术研究

在航空业界，谁掌握了缩比模型飞行试验技术，谁就掌握了航空技术预先研究的先机。

近年来，国内外航空研究机构通过缩比模型飞行试验进行了大量前沿技术研究，美国通过X-36缩比模型

飞行试验进行了无尾布局隐身与敏捷性演示验证研究，X-48进行了新型BWB气动布局的飞行试验研究，X-56进行了气动弹性主动控制方法研究，F-22进行了双机编队飞行试验研究等关键技术研究，为美国先进航空技术

发展立下汗马功劳。

在国内，试飞中心利用其先进的缩比模型飞行试验技术也积极开展前沿技术研究。先后进行了大迎角推力矢量控制试飞、先进控制律演示验证试飞、等离子体流动主动控制演示验证试飞等先进技术试飞研究，为我国航空技术的创新发展提供技术支撑。同



AG600飞机缩比模型。



“海鸥”300飞机缩比模型失速尾旋试验。

时也实现了航空工业试飞中心缩比模型飞行试验专业在飞行控制技术、机载测试技术和试飞技术的显著提升。

飞行控制技术是当今航空领域的核心技术，也是缩比模型飞行试验的关键技术之一。试飞中心长期致力于缩比模型飞行试验专业的飞控技术发展，实现了从人工遥控飞行到自主程控飞行的质变，显著提高了试飞数据质量和效率，攻克了一系列“老大难”试飞科目，转弯失速试飞便是其中一个。

飞机的转弯失速试飞都需要首先建立起稳定的30°滚转坡度，而缩比模型飞行试验依靠操纵手远程控制来建立稳定的30度坡度是不能实现。为此，试飞中心的试飞工程师们创新性地提出了“飞控辅助的转弯失速试飞”方法，设计一套控制逻辑和控制律，利用飞行控制系统自主建立起模型30°滚转坡度，控制精度高、稳定性好，以此高质量地完成了我国AG600大型水陆两栖飞机缩比模型转弯失速试飞试验，

获得了模型自由飞专业在转弯失速试飞科目方面的巨大突破。

众所周知，螺旋桨滑流对飞机的失速特性有重要影响。因此，螺旋桨飞机进行了缩比模型失速和尾旋试验，必须进行了螺旋桨动力相似模拟，以获得真实螺旋桨滑流。AG600飞机具有四发螺旋桨，四发螺旋桨转速控制的稳定性和一致性，是保证螺旋桨动力相似模拟的关键。对此，试飞中心试飞工程师在缩比模型上研制了一套螺旋桨转速控制系统，由飞行控制系统实时调控四个螺旋桨转速，能够实时保证四发螺旋桨转速稳定和一致，获得了AG600飞机真实螺旋桨滑流作用下的失速特性。

还有当下流行的3D打印技术，3D打印是制造业中的一个热点方向，受到世界很多国家制造领域特别是航空制造领域的普遍重视。3D打印产品通常具有精度高、重量轻、生产成本低，更换便利等优势。试飞中心在3D打印领域主动出击，首次在AG600飞机和我国大型客机C919飞机缩比模型上应用了3D打印产品。包括机翼天线罩、螺旋桨整流罩、起落架、操纵舵面、翼尖小翼等部件，极大地缩短了研制周期，降低了制造成本，必将促进未来3D打印技术在缩比模型飞行试验中的广泛应用。

未来随着数字化技术和工程技术的深度融合，在整个航空设备研发过程中将大量使用缩比模型验证来简化、减少和辅助常规的物理试验，使得整个飞机产品验证过程向研发早期转移，以促进技术创新、缩减研制周期和降低试飞成本。模型飞行技术也必然将发展成为一门综合性、多学科的试飞技术，航空工业试飞中心将继续在这一领域对标世界一流，走在国内专业领域排头，为筑航空强国梦贡献力量。

## 机坪管制移交：从空管塔台到机场管制室的变革

6月21日，首都机场运行控制中心机坪管制正式启用，首都机场航空器机坪管制职责由华北空管局正式移交至首都机场。对这个去年旅客总吞吐量超过9500万人次、排名世界第二的机场来说，航空器机坪管制移交机场管理机构，将促进机场运行提质增效；对旅客来说，则将减少他们在飞机上等待的时间。

航空器机坪运行管制移交，就是将机坪区的管理职责由目前的空管部门移交给机场管理部门。移交后，空管主要负责航空器起飞、着陆、脱离跑道和放行许可；机场机坪管制负责航空器推出、开车、滑行、拖拽工作。首都机场有三条跑道，东区主要负责东跑道航班的起降及滑行等。从6月21日起，首都机场东区机坪管制运行将通过试运行、陪伴运行和独立运行“三步走”阶段性实施。在独立运行前，华北空管局与首都机场密切配合，主动承担，派出多名管制员，支援开展正常指挥和陪伴指导工作，协助机场管理机构建立自身机坪管制能力，确保移交工作安全顺利进行。

实施航空器机坪管制移交可减少机坪上飞机滑行与特种车辆的冲突，更加安全；减少飞机在机坪上滑行的时间，缩短旅客等待起飞和等待下机时间；提高廊桥使用率，更多安排近机位，旅客更方便上下机。

目前，杭州、厦门、海口、郑州、深圳、海口等机场实施或者部分实施了独立机坪管制，机坪管制移交工作取得了一定进展。从上述机场的实施情况来看，独立机坪管制对于减少航空器滑行冲突、缩短航空器地面滑行等待时间、提高廊桥使用率、改善航班放行正常率等发挥了重要作用。（陆二佳）

## 中国内地航空公司已订购50架A350

空客公司透露，中国内地航空公司订购的空客350飞机已达50架，其中中国航10架，东航和南航分别为20架，即将开始交付。

A350-900飞机航程达15000千米，是航空公司开辟远程及超远程航线的首选机型。对中国航空公司来说，这一机型可以轻松覆盖澳洲、欧洲和北美市场。

截至目前，A350客机共接获847架订单，已交付17架客户174架。到今年年底，A350可以达到每月10架的生产能力。（何晓）

## 南航772机队：为南航进军世界航空公司前列增光添彩

5月20日，中国南方航空最后一架波音777-21B客机，也是中国大陆航空公司引进的第一架波音777客机（隶属新疆分公司，南航代码77A），执飞完最后一个航班CZ6902（PEK-URC），结束了它22年的服役生涯，至此，南航最早引进的一批波音777-200型客机，也是中国大陆最早的一批波音777客机（B-2051、B-2052、B-2053、B-2054）全部退出运营。大陆运营波音777-200型（非ER型）的航司仅剩国航一家，国航表示，空客A350-900交付后这些老旧机型也将退出。

南航客运的波音777机队变成了由清一色年轻豪华的波音777-300ER组成的机队。南航的波音777-21B退出，也代表了一个时代的结束。南航772机队在中国民航整个777机队的史册上都有举足轻重的地位，6月12日，波音777客机也迎来了首飞24周年纪念日。

### 772机队承载着南航飞向国际的梦想

772机队是整个南航777机队的鼻祖，南航从成立到现在，客运部分总共引进了10架波音777-200型客机，其中6架ER型，4架普通型，它们的引进日期和相关配置如下：

1995年12月28日，南航开始引进自购的首批波音777客机，这次引进在中国民航历史上有重要的里程碑意义，南航作为

进了6架波音777-200ER，用于开拓更广阔的洲际航线。波音777-200ER采用了改进的GE90-90/94B发动机，整体气动效率做了优化，经济性和舒适性显著提升，也为南航进军世界航空公司前列增光添彩。

服役期间，波音777-200ER（南航内部代码77B，后文中ER均用77B代替）相比起777-200开创的先河更多。波音777-200ER先后开通飞往阿姆斯特丹、洛杉矶、布里斯班、悉尼、墨尔本、迪拜、巴黎等欧美澳航线，也在特殊任务期间临危受命，纵横捭阖。下面来回顾那些重要的瞬间：

（1）南航77B交付之初在全舱配备客舱娱乐系统，比国内第二运营者海航波音767-300ER早了5年多，在机载WIFI几乎没有配备的那些年，客舱娱乐系统为长途旅行的旅客提供了最好的休闲途径。

（2）2000年1月1日8时48分，实时由77B执飞的CZ327航班成功飞越计算机“千年虫”发作的高危时段，安全飞抵美国洛杉矶机场。2001年7月15日，南航北极航线验证飞行圆满成功，成为世界首家用双发飞机成功飞越北极的航空公司。

（3）2005年1月29日，南航77B成功首航台北，成为56年来从大陆起飞并首降落在中国台湾地区的中国大陆航空公司。2006年1月25日，南航再度续写两岸亲情之旅，执行两岸春节包机。

（4）最能名垂青史的，也是它最引以为豪的，可能就是它身上那8个大字：跨太平洋远程飞行。1997年4月18日，第2架注册编号为B-2056的77B加入。1997年7月20日晚，由时任南航总飞行师杨元元驾驶，77B从旧白云国际机场腾空而起，执飞广州（CAN）-洛杉矶（LAX），这是全球首次采用双发客机跨越太平洋飞行（此前这类航线多有3发以上的客机执飞），自此B-2056同后来加入南航的B-2057/58/62/70一起，将世界上第一条由双发客机执行的不停航跨太平洋直飞航线安全运营到由2012年的空客A380接班。

除了以上辉煌业绩，77B在撤侨、执行特殊任务上也同样出色：2000年6月18日，2008年4月2~4日，南航波音777机队执

行两班马拉博救援包机任务顺利完成外交部赋予的所罗门撤侨专机任务；2006年4月25日，再次圆满完成所罗门撤侨包机任务。2008年11月29日~12月2日，南航广州飞行部波音777机队执行三班曼谷撤侨救援包机任务等等。

然而，市场的残酷促使该机队早早结束商业运营。本世纪初，全球最大推力的民用涡扇发动机GE90-115B助力波音777-300ER（代码77W）问世，它的载客量更多，在远程洲际航线的舒适度更高、耗油率和环保性更好，最重要的是航程和77B相当，丝毫没有因为载客量大而牺牲了航程，再加上后来波音家族的787的问世，77B在同时满足舒适性和经济性的条件下就不从心了。77B布局为F24/J53/Y207，总载客284人（F头等、J公务、Y经济，W明珠经济），Y舱是3-4-3布局，而后来交付的波音777-300ER布局为F4/J34/W44/Y227，总共309座，Y舱是3-3-3布局，无论是经济性还是舒适性77B几乎没有什么优势，在种种因素作用下，2013~2014年，6架77B依次退出运营，结束了不足20年的辉煌历程。他们没有像其他波音家族的前辈767-300ER那样，再找到合适的商家，直接被送到了飞机“坟场”。

### 波音777-200成为新疆航运的利器

波音777-200（南航内部代码77A，后文以此代替）的服役年超过了20年，它的光辉历程可以从它调配到南航新疆分公司说起。

新疆地广，铁路运转周期长，航空成了人们快速进出最好的交通方式。2002年10月11日，新疆航空公司加入中国南方航空集团公司，南航新疆分公司正式成立。2003年2月，南航新疆分公司伊尔-86飞机全部退役，为了解决日益增长的客流问题，同年7月，南航调配两架77A客机进驻新疆，原因在于77A采用了J14/W30/Y316的布局，360座的超大容量非常适合在旺季执飞北京、广州、成都等航线，而77B的布局更适合飞南航国内国际的商务航线。此后每年春运、暑运等运输高峰期，南航都不定期调拨77A执飞新疆航线缓解新疆客流压力。

2012年，出于对援疆工作的长期服务及市场需求考虑，南航将4架波音777-200机型全部交由新疆分公司执管。使该机队作为新疆远程航线的主力机型，承担起南航在乌鲁木齐至北京、广州、上海涉及援疆工作的干线运输任务。波音777-200机型的加入为新疆市场直接增加座位数达1440个，其载运量堪比12架737-700型客机，继新疆分公司在继组



建了全国最大波音757-200机队、南航最大波音737-700机队以及疆内最大E190支线机队后，又组建一支规模化远程运输机队。2013年9月开始，南航陆续给77A进行了客舱升级。77A机队在疆运营期间，灵活排班，最大程度地发挥出波音大型宽体机的运力优势。从正式执管到最终退役的6年里，77A安全飞行突破4400余万公里，承运近560万旅客，出色完成了多项重大保障任务。77A退役之后，南航计划调配波音787-8客机到新疆分公司，接替77A的运输重任。现有的南航波音787-8客机仅有228个座位，提供的座位数远小于77A，南航目前宣布将对大部分客机进行客舱改造，至于分配到新疆分公司的波音788如何改造还是一个未知数。

### 南航777机队的航线现状

时至今日，南航772机队已经完全退出，中国南方航空公司（客运）则重新建立起由10架波音777-300ER组成的年轻的777机队，接任部分波音777-200ER（77B）执飞的航点，波音777-300ER有更宽敞的客舱与布局，共可提供309个座位，经济舱采用777系列最受欢迎的3-3-3布局，总体则采用F4/J34/W44/Y227的完美三舱布局，非常适合国内的商务航线以及超远程的洲际航线。

目前，南航777机队的国际航点集中在北美地区（纽约肯尼迪、洛杉矶、旧金山等）的目的地，国内航点则主要集中在北京、上海、广州，用于执飞沪广、京广等国内最重要的商务航线。至于77A的更迭，完全地交给了即将调配到新疆分公司的波音787客机。唯一有所差异的是，曾经77B执飞的澳洲航点（如布里斯班、墨尔本、悉尼）和部分欧洲航点（如阿姆斯特丹、法兰克福等）现在大部分情况下换成了南航的空客A330-323和空客A330-223执飞（悉尼旺季也曾调用空客A380执飞），如巴黎、伦敦等热点城市，更多情况下则由波音787执飞。（善翔）