

打造世界级的航空制动系统综合试验能力中心



本报记者 袁新立 通讯员 刘建军

航空机轮及刹车系统作为飞机机载设备的重要组成部分，其作用不仅是支撑飞机、滑跑和承受冲击载荷，更重要的是充分利用地面提供的结合力，安全、可靠、快速地实现着陆制动以及在跑道积水、积雪、冻冰的特殊情况下实现良好控制，其性能好坏直接影响到飞机起降安全、速度和持续战斗能力，进而影响飞机的整机性能。

飞机起降过程持续时间只有短短的几十秒，而机轮及刹车系统的工作环境极其复杂，容易受到各种因素的影响，这些都会导致刹车性能变差甚至无法正常工作。所以，如何将影响飞机刹车性能的问题在地面进行充分验证和解决，使飞机机轮及刹车系统达到最理想的装机条件和工况状态，就要依靠先进的系统检测试验手段来保证。

60年铸就国内一流

作为我国航空机轮、刹车系统、刹车材料、刹车附件研制领域的领军企业，航空工业西安航空制动科技有限公司（以下简称：航空工业制动）在该领域有着完整的研发、制造、试验、检测能力。尤其是在试验与检测方面，航空工业制动拥有国内规模最大、试验能力最强、试验工位最多的航空机轮刹车专业试验中心，为机轮刹车产品的研发鉴定、质量一致性检查及合格交付提供了有力保障。

从1958年利用苏联提供的图纸建造第一台机械惯性动力试验台、1978年引进英国威克斯公司的大型电惯量动力试验台，到2016年自主设计建造的多轮系电惯量综合动力试验台竣工使用，航空工业制动的机轮及刹车系

统试验检测能力经过了近60年的发展，已经建成了多套单头、双头以及多轮系综合动力试验平台，拥有近十个惯性试验工位。制动力在机轮及刹车系统检测和试验手段上的不断创新，补充和完善了我国航空机轮和刹车系统的研发、检测、试验条件，具备了一套完整的机轮及刹车系统单试、联试、鉴定试验的手段和体系。航空工业制动的机轮及刹车系统试验中心拥有英国民用航空适航署CAA适航认证和中国CAAC适航认证；也是国家商检局批准的我国进、出口航空机轮、刹车装置、附件及材料等商检测试中心，整体试验能力在国内乃至亚洲首屈一指。

在地面惯性试验台上进行刹车模拟试验，是目前国内外常用的机轮刹车系统功能与性能试验方法。这类试验的主要原理是利用电动机带动鼓轮及飞轮旋转模拟飞机着陆时机轮应具有的结合力和速度，通过加载系统使机轮与鼓轮接触，利用液压系统向机轮施加刹车压力，使机轮产生刹车力矩，通过轮胎与鼓轮之间的结合力来模拟飞机着陆滑跑过程中轮胎与跑道的结合情况，通过机轮制动鼓轮而验证其吸收能量和制动能力，完成飞机着陆刹车动态过程的模拟验证。

航空工业制动按苏联图纸建造的第一套惯性动力试验台，是靠改变飞轮的配比来实现能量变化的，所能达到的组合有100种，这在当时是很先进的。并且在试验过程中考虑到风阻等因素，从安全角度考虑，采取适当加配能量的方法进行试验，也就是说在高能量状态下机轮如果能满足刹车要求，在低能量状态下肯定也能满足。比如说机轮的实际刹车能量是30兆焦，在配置的时候考虑到风阻等因素，配

置的值就会大于这个数。但这种试验台能量调节是分级的，有些级与级的差异还比较大，就使一些试验条件与要求偏差大，致使试验结果偏差大。1978年从英国引进的电惯量模拟试验台则是采用电动机做功调节刹车过程中鼓轮自身机械能量的过大或不足，实现了无级调节。比如说试验要求刹车速度为280千米/时的刹车能量为22兆焦，但鼓轮的机械惯量在这个速度下是28兆焦，这个时候试验台惯量调节系统控制电动机做功，来吸收超出部分的刹车能量；反之，如果鼓轮自身能量小了，电动机在试验过程中补偿一部分能量，以确保试验过程中能量调节的准确性，实现无级调节。

目前，航空工业制动拥有多套电惯量模拟试验台，可以根据不同的需求完成所有的刹车性能试验，包括动力矩试验、静力矩试验、结构力矩试验、中止起飞试验等。此外，航空工业制动具有完成机轮径向-侧向联合载荷试验、机轮疲劳滚转试验、机轮爆破压力试验和按国军标、TSO、CTSO标准进行航空轮胎试验的能力。

多轮系试验平台“打通最后一公里”

随着技术的进步和发展，飞机朝着大吨位、高速度发展的趋势日益明显和强烈，这类大型飞机常常采用多起落架、多机轮配置，同时对安全性验证提出了更高的要求。在这样的发展趋势下，要想更好地满足装备研制需要，并为拓展民机市场打下基础，就要求航空工业制动必须具备多轮系飞机机轮及刹车系统试验能力。

在航空工业制动看来，拥有多轮系刹车系统试验能力，不但是航空制动专业发展的必然，更是试验能力建设的一个大跨越。在现代的飞机上，一副起落架拥有两套机轮或者多套机轮是很常见的。一方面，多数飞机使用液压刹车，一套刹车机轮对应一个液压控制通道，刹车过程中液压通道之间有干扰，有的在加压、有的在减压，这种相互干扰的影响，虽然可以通过仿真分析完成，但全方位的验证更为真实；另一方面，多套机轮在刹车过程中可能会存在不平衡因素，比如两套机轮刹车力矩输出存在差异，可能会导致刹车时一边刹车力矩大，一边刹车力矩小的情况。在这种状态下，虽然两个刹车盘在之前的单个测试中都是合格的，但是当它们在一个起落架上同时工作的时候表现出来的特性却是不一致的。一架飞机上刹车机轮数量多时，这种现象会更加突出。

刹车力矩作为航向力施加到起落架上，对起落架必然产生一些影响。起落架缓冲支柱在不同的载荷影响下有不同的特性，这些特性又进一步影响机轮与地面的载荷，进而影响刹车过程中地面结合力矩与刹车力矩的平衡。

不但同一起落架的不同机轮之间会出现上述情况，飞机的起落架与起落架之间也会出现这种情况。比如飞机左右两侧的起落架，同样的刹车压力下，也可能出现两侧刹车力矩不一致的情况，进而导致偏航。飞机轮胎在使用中可能出现漏气或爆胎，会引起起落架、机轮之间载荷分配的变化，各机轮之间刹车能量分配的变化，对刹车系统控制、飞机操控提出了更高的要求，在以往的刹车系统设计和验证中，这种故障模式只能通过仿真去分析和验证，无法进行真实模拟。

在这些情况下，只针对单个机轮进行测试已经无法满足飞机发展和安全性的要求，必须采用多轮系试验台进行相关试验。早在2000年前后，航空工业制动就着眼于未来飞机发展的需求，提出了建设多轮系试验平台的设想。“十二五”期间，为了更好地满足装备研制需求，多轮系试验平台正式开工建设，前后经历了7年的研制攻关和建设，最终于2016年9月全部建成并投入使用。这种试验台的建成投入使用，能够综合测试起落架系统在滑行、起飞、着陆刹车的不同阶段的组合特性，更加真实地模拟多起落架、多机轮、多液压通道、多控制通道综合使用时的功能和性能，通过一定试验数据的积累，在大数据分析研究和验证应用下，我国的起落架系统集成验证能力将得到大幅度提升，对刹车控制系统设计、机轮设计、起落架设计提供反馈，使各个方面相得益彰，更加完善。

作为目前世界上唯一采用电惯量模拟原理建设的多轮系综合动力试验平台，它能真实地模拟飞机多支柱起落架与多轮系刹车机轮、多通道刹车控制系统起飞滑行及着陆刹车全过程的集成试验，能全面验证大型飞机起降系统的综合性能，能够实现起落架、机轮、刹车系统集成的匹配性、协调性、安全性和可靠性测试，为提高起落架系统研制水平创造了条件，从根本上改变了以往只能在飞机上进行验证的模式，达到了事半功倍的效果。多轮系试验平台的建成及投入使用，使我国航空工业真正具备了刹车系统的全系统集成试验能力，包括起落架系统与刹车系统的结合试验都能完成。

过去，飞机首飞前刹车系统的地

面调试，通常要经过上百次滑行试验才能得到比较满意的结果。其间如有反复，就会影响首飞节点。“之前在某个型号上，由于我们缺乏这种系统试验能力，尽管飞机机轮、刹车系统以及起落架等单个部件的厂内试验都是合格的，但是装机后滑行试验时却出现了问题，导致飞机无法按时首飞。多轮系试验台的投入使用，使我们具备了这个能力，可以将这些试验在地面台架上完成，将所有问题在试验室内，不但保证了装机后的安全性和可靠性，也大大降低了飞机试飞风险和成本。”在航空工业首席技术专家田广来看来，随着试验手段的完善，上述遗憾不会再出现。

因此，多轮系刹车系统试验平台的建设和投入使用就显得尤为重要，它真正具备了系统级的地面测试能力，打通了机轮刹车的“最后一公里”。

“国外没有同类试验系统，所以在一些大型民机项目上，此类试验是采用飞机来完成，实际情形是，试验中飞机加速滑行，到达一定速度后刹车制动，并由安装在机轮的摄像头记录下整个试验过程。采用这样的试验模式，试验测试会受到许多限制，也很难进行重复试验，试验人员无法直接观测试验过程，并且要有用于专门试验的机场和飞机来完成，试验成本非常高昂。”航空工业制动机轮及刹车系统试验中心负责人崔洪波告诉记者。

让中国航空制动系统检测试验手段领跑世界

多轮系试验平台的建成与成功运行，标志着航空工业制动在机轮及刹车系统试验与验证方面实现了大飞机多支柱起落架、多机轮、多通道机轮



工作中的6轮系制动试验台。

NASA加速研究飞机电推进兆瓦级组件技术

航空工业发展研究中心 孙友师

要想在商用飞机上实现电推进，必不可少的是轻型、兆瓦级驱动系统，这种系统要比汽车上的功率更大，比舰船上的重量更轻，同时还要具有较高的效率，因为在兆瓦等级，百分之几的电力损失将意味着有数千瓦的废能需要排散。

针对商用飞机的电推进系统需求，NASA已经开始研究兆瓦级的电动机和电力变换装置。这些系统将支持近期和中期可在单通道客机上的部分涡扇电推进和混合电推进系统的研发。目前这些项目已经完成了硬件试验。电驱动系统包括三个主要元素：电源、配电系统和消耗电力的载荷。NASA关注的重点包括发电机（电源）、电动机（载荷）以及电力变换装置和用于配送更高功率电力的线缆系统（属于配电系统的一部分）。其中，电力变换装置又包括将交流变直流的整流器和直流变交流的逆变器。

高功率密度电动机研究

伊利诺斯州立大学和俄亥俄州立大学分别获得了一份NASA研究协议（NRA），开发功率密度达到13千瓦/千克的电机，其目标效率大于93%（GE近日公布的1兆瓦新型演示电机效率达到98%）。NASA格林研究中心正在开发另外一种电动机，功率密度为16千瓦/千克，效率大于98%。这种功率密度已经远远超过了美国能源部为车辆电动机设定的2020年达到1.6千瓦/千克的目标。

正在开发的电动机包括三种：永磁电动机（伊利诺斯州立大学）、感应

电动机（俄亥俄州立大学）和绕线电动机（格林研究中心）。

伊利诺斯州立大学正在开发1兆瓦的永磁同步电机（永磁电机可用在电动汽车上，顾名思义，其转子采用永磁体而非电磁线圈）。这种电机采用外部转子，碳纤维壳体和永磁体，转速18000转/分。伊利诺斯州立大学已经完成了将空气冷却电机集成到罗罗自由工场“电动可变发动机”上的转子全速试验和设计工作。这是一种并联混合电推进系统，其中由电池为电动机供电驱动风扇辅助地滑油、起飞和空转下降，以减少燃油消耗。研究的电动机功率范围为1~2.6兆瓦。

永磁电动机作为发电机用在涡轮电推进飞机上将面临挑战：如果出现紧急情况时如何让其停止。NASA格林研究中心工程师拉尔夫·詹森（Ralph Jansen）称，感应电动机和绕线电动机可以通过关断电磁场来让其停止。感应电动机功率密度比不上永磁电动机，但是其对电力电子器件的要求较低。

俄亥俄州立大学正在开发一种2.7兆瓦的环形感应电动机。该电动机为直径1米的环状，转速为2700转/分，外部转子由定子线圈产生的磁场驱动旋转。该电动机使用了带状导体缠绕定子。位于有源区外侧的导体带部分采用液体直接冷却，这样可以让定子通过大电流，提高电动机功率密度。俄亥俄州立大学正在制造300千瓦、1兆瓦和1.7兆瓦的电动机样机，用以验证冷却、制造和性能。该大学同时设计了10兆瓦的环形电动机，并将其集成到一个涡扇发动机上。该电动机转速提高到5000转/分，这样可以提高功率密度，但是会增加结构设计的复

杂性，并且当转子和定子缝隙中的空气速度接近1马赫数时会增加游隙损失。

NASA格林研究中心的1.4兆瓦绕线同步电动机追求更高的功率密度和效率，采用了自冷却超导转子和无槽定子。这在提高了功率密度和效率的同时无须因外部冷却而增加重量。在发电模式下，绕线电动机可以通过为磁场线圈断电来停止，而无须从驱动轴上分离。高温超导体用于转子线圈可以提供超过永磁和常规导体的磁场强度。用于冷却超导体的冷却装置集成到转子中。这种电动机直径0.4米，转速6800转/分，保持转子表面速度与其他两种电动机相比相对较低。詹森称，这使得这种电动机在某些飞机构型中可以采用直接驱动的方式。

高功率密度电力变换装置研究

NASA分别授予GE公司和伊利

诺斯州立大学研究协议，开发电力变换装置，计划目标功率密度为19千瓦/千克，目标效率为99%。波音获得第三份研究协议，开发低温变换器，目标功率密度为26千瓦/千克，目标效率为99.3%。这些目标与能源部为汽车电力电子设定的2020目标14.1千瓦/千克在同一量级。

对于电力应当采用直流还是交流来配送目前还存在争议。詹森说：“我们仍然需要对这两者进行比较。如果电源是电池，则很明显应该用直流。但是如果电源来自涡轮风扇发动机，则直流和交流都适用。这就需要弄明白哪种方式是最好的，需要仔细考虑电动机用直流还是交流。”

同时需要确定的还有配电的电压。

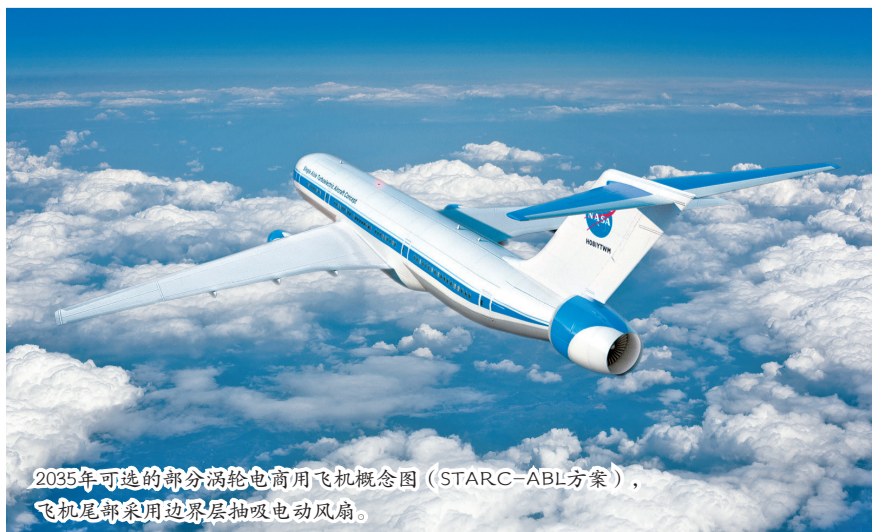
增加电压可以减小电流，使电线更细更轻，但是增加了短路的风险。在高空低压下，与海平面相比，产生电弧的电压更低。目前飞机上采用的最高

电压为540伏（±270伏），但是在单通道飞机配送兆瓦级的电力需要更高的电压。

NASA近期在研究1000~3000伏范围，尽管对于部分涡扇电和混合电推进构型而言这已经足够，但NASA仍计划研究5000~10000伏范围电压用于N3-X大型商用飞机概念的完全涡扇电构型。詹森表示：“这与舰船电力系统相当，但是舰船是在海平面运行。”根据NASA测算，采用2000伏直流配送1兆瓦电力到约50米的距离，相比于540伏，电线重量可以从900千克减轻至200千克。

NASA目前聚焦于直流变交流的逆变器，并假定输入电压为1000伏和2400伏直流。詹森表示：“在变换器领域两种新材料的应用已经取得了实实在在的进步，这两种材料是碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）。现在你可以购买商用集成电力开关用在变换器里，改善其性能和重量。SiC和GaN开关可以在更高的频率下工作，损失小，效率高。”

GE公司制造了1兆瓦的逆变器，使用SiC开关技术将2400伏直流变换为三相交流。该装置用GE公司的1.7kW金属氧化物半导体场效应管电力组件。伊利诺斯大学制造了200千瓦“飞行电容器”装置，用基于GaN的场效应管开关，并可以放大到1兆瓦的系统。汇流条电压为1000伏直流。这些逆变器都采用液体冷却。同时，波音正在研制低温冷却的1兆瓦逆变器，目标是实现更高功率密度和效率。该装置用了商用货架硅半导体。该项目目前处在第二阶段，正在进行液氮冷却的200千瓦逆变器制造，用于风



2025年可选的部分涡轮电商用飞机概念图（STARC-ABL方案），飞机尾部采用边缘层抽吸电动风扇。