

大型民机起落架的发展 趋势与关键技术

Development Trend and Key Technologies of Landing Gear of Large Civil Aircraft

第一飞机设计研究院总师办 冯 军

大型民机起落架的设计上会更多地应用信息技术、微电子、微机电、新材料、新动力等技术。更加突出综合化、信息化和智能化。在起落架结构设计上,将广泛应用高强度钢、钛合金以及大型金属锻件结构等以降低结构重量和成本,提高结构效率。

目前大型民机朝着超大型和超高效两个方向发展,代表机型是空客公司正在研制的超大型宽体飞机 A380 和波音公司正在研制的波音 787。虽然这两种飞机的设计代表了航空发展的两种不同预期及理念,采用的技术侧重不一样,但是在起落架的设计上采用的技术却是一致的,那就是都采用了小车式多轮起落架来分散轮胎对跑道的压力要求;采用高强度钢、优质钛合金材料用以获取长寿命低重量系数的起落架结构;采用电传方式控制的起落架,甚至采用全电刹车系统以获取更高的系统可靠性和更轻的重量以及更简便的维修;这些技术都是对已有大型民机起落架技术的继承和发展。

大型民机起落架的特点 及发展趋势

比较一下波音公司的波音 747、777、787 以及空客公司的 A340、A380 的起落架的技术特点,可以从中间追寻起落架技术的发展趋势。

波音 747 于 1970 年初投入航线使用,是载客最多(达 500 人)的大型宽机身客机,它的最新型号是波音 747-400 型飞机,该型于 1985 年开始设计,1988 年出厂,最大起飞重量 395t。它的起落架由五支柱、液压收放。两轮前起落架向前收起,主起落架为 4 个四轮小车式,两个并列在机身下靠机翼前缘处,向前收入机身;另两个装在机翼下面,向内侧收起。起落架支柱、轮轴及车架结构采用 300M 钢整体锻件,全部 18 个轮胎均为同一型号的内胎机轮,尺寸 $46 \times 16 \text{ inch}$ ($1168.4 \times 406.4 \text{ mm}$),主轮胎压 $14.1 \times 10^5 \text{ Pa}$,前轮胎压 $13.11 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。在波音 747-400 上主轮采用碳刹车片代替钢刹车片以及使用新的宽机轮使起落架减重 816kg,并装有防滑装置,它的收放控制系统、前轮转弯系统完全采用机械操纵,液压作动。

波音 777 是波音公司研制的世界上最大的双发喷气宽体客机,1995 年 5 月 17 日首架交付用户美国联合

航空。波音 777 在大小和航程上介于 767-300 和 747-400 之间,波音 777 采用三级客舱布局时可搭载 301 至 368 名乘客,最大起飞重量 299t,完全可以替换波音 747 的早期型号,其耗油量减少 1/3,维护费用降低 40%。其主起落架共有 12 个机轮,这种结构既有效地分散了路面载荷又使飞机不超过三个起落架支柱。在跑道和滑行道上时,重量分布更均匀,避免了在机身中心下面安装一个辅助的 2 轮起落架。其 3 轴车架式主起落架后轴转向操纵能提供一个较小的转弯半径,以减少大角度转弯所需的推力,并能减小轮胎摩擦,当前轮转向操纵角超过 13° 时,它就自动开启。777 的主起落架是迄今为止民用飞机使用过的最大起落架,它的主支柱是 300M 钢整体锻件,采用双支撑侧撑杆传递侧向载荷,它的车架梁采用钛合金模锻件,模锻件投影面积 12258 cm^2 ,重量达 3175kg。主轮胎规格 H49 \times 19-22,前轮胎规格 44 \times 18-18。采用碳刹车,波音 777



波音 747 的 4 个四轮小车式起落架

的自动刹车装置类似于其它波音飞机,着陆滑跑很平稳,刹车很灵活;起落架收放操纵方式仍然是机械钢索传动控制。

波音 787 系列飞机是 200 到 300 座级的飞机,航程可达 6500 ~ 16000km,最大起飞重量 218t。波音 787 起落架为可收放前三点式。主轮为 4 轮小车式,前轮为双轮式。在起落架的研制上,波音采用了承包商的开发方式,一改过去起落架的结构设计由波音公司自己负责的方式。法国道蒂公司被波音公司选为波音 787 起落架的部件供应商,负责整个起落架项目的管理及主和前起落架结构的设计、开发、试验、制造和一体化。同样它的主支柱外筒是 300M 钢锻件,而缓冲支柱的活塞杆是钛合金的整体锻件,波音 787 采用航空子午线轮胎,起落架收放液压系统已经采用高压系统供压。

空客公司的大型民机有 A330、A340、A380 及正在研制的 A350 飞机,其飞机吨位和客座数和波音的同类飞机基本相当,在起落架结构的设计上也类似。所不同的是空客系列的飞机在起落架控制系统方面更早的采用了电传操纵技术和起落架电子综合控制技术。这类起落架的收放系统的控制采用计算机控制收放逻辑,控制液电阀和各种作动筒收

放起落架及舱门的顺序,并采用接近式感应开关来探测起落架和舱门是否到位。起落架液压系统的压力在 A380 飞机上采用高压(34.5MPa)液压系统供压,有效地减小了起落架收放作动筒的尺寸,减轻了重量。正常刹车系统采用双冗余电传刹车数字防滑,兼有自动刹车功能,采用柔和的飞机匀减速率刹车控制以提高乘客的舒适性。自动刹车系统有智能化的状态判别逻辑,驾驶员的操纵动作非常简单。前轮转弯为电传操纵伺服控制系统,其手轮操纵控制、方向舵脚蹬与前轮操纵的联动控制和差动刹车功能均由一个控制器实现综合控制,可按需实现与方向舵的联动与断开、左右驾驶员转弯指令的叠加,不同状态下机轮最大转角的自动限制,前轮伺服系统的仿真监控等功能,确保飞机的正确航向和着陆安全。

由于起落架控制系统中采用了大量电子设备和机电设备,使得故障检测变得容易,故障隔离可以达到 LRU 级,且产品可靠性指标很高,因此维护工作变得便捷,大大减少了工作量。广泛采用感应式接近传感器用于检测起落架的位置,提高了传感器寿命。此外,通过控制计算机方便地实现了与航空电子系统的信息传输与信息共享。

通过以上比较可以看到大型民机起落架具有的鲜明技术特点:

(1) 起落架布局复杂。起飞重量在 300t 以上的大型民机,如波音 747、A340、A380 飞机,主起落架采

用多轮多支柱式布局形式,其中波音 747、A380 都有 4 个主起落架,A340 有 3 个主起落架。A380 有 2 个机身起落架是 6 轮三轴小车式起落架,2 个机翼起落架为 4 轮二轴小车式起落架,共 20 个机轮;而波音 747 和 A340 的 4 个主起落架都是 4 轮二轴小车式起落架。这种多轮多支柱布局可以将地面载荷以分散形式传递到机体结构,并降低了对跑道强度的要求。这种多支柱起落架的缓冲系统是相互连通的,以一定的控制形式调节各个起落架的载荷大小;

(2) 起落架的结构尺寸很大,每个起落架的承载大,起落架主要承力构件采用大型整体锻件进行制造。对于比波音 747、A340 飞机吨位小一些的飞机,象波音 777、767、A300、A330 等飞机基本采用普通三点式起落架布局,主起落架为单支柱小车式多轮起落架。由于大型民机的起落架基本采用机翼下安装形式,相对于大型军用运输机的机身起落架,尺寸要大很多。例如波音 777 的主起落架主支柱的长度达到 3m 以上,是现役飞机中最大的起落架,每个主起落架承载能力在 200t 以上;

(3) 与机体同寿,是国外民机对起落架的普遍要求,这使得起落架的寿命在 4 万 ~ 6 万次起落,如波音 767 的起落架寿命为 5 万次起落。波音 737 已达到 7.5 万次以上。起落架结构采用高强度钢整体锻件,提高了起落架寿命。大型民机起落架主体材料已经用 300M 钢整体锻件制造工艺取代了拼焊结构。

由于钛合金比强度高,结构重量轻,目前它在起落架上的应用已经从次承力结构、小零件扩展到主要承力构件上。据报道,在 A380 的主起落架中钛合金的用量占到主起落架总重的 30%。

起落架控制系统在操纵方式上已逐渐摒弃了钢索滑轮等机械操纵器件,使用电传操纵,且与其他系统

实现交联,广泛采用感应式接近传感器用于检测起落架的位置。电传刹车技术和自动刹车技术已经发展成熟,正逐步向全电刹车方向过渡。

综上所述,大型民机起落架的设计上会更多地应用信息技术、微电子、微机电、新材料、新动力等技术。更加突出综合化、信息化和智能化。在起落架结构设计上,将广泛应用高强度钢、钛合金以及大型金属锻件结构等以降低结构重量和成本,提高结构效率。A380、波音787等新机体寿命将达到7.5万~9万飞行小时,起落架的起落寿命将随之进一步增加。在起落架控制系统设计方面,将进一步向计算机控制、综合显示控制及全电操纵方向发展。所有的技术进步都朝着减重、提高可靠性、降低维护维修成本方向努力。

我国与国际先进水平的差距

国内民机起落架在寿命指标、结构设计、材料制造技术以及适航验证等方面与国外先进民机具有较大差距,尤其在多支柱起落架设计方面处于无设计规范可依、无型号经验可循、无原准设计可用的局面。主要体现在以下几个方面:

(1) 起落架设计寿命: 现在国外

先进民机起落架(除超大型民机外)设计使用寿命一般是4万~7.5万次起落,目前我国民用起落架中新舟60飞机的起落架可以达到2万起落寿命,和国外先进起落架6万起落以上寿命有较大的差距。而国产运输机起落架寿命都较低,如运8W为1.1万~1.5万次起落,虽然新支线飞机ARJ21-700的设计指标达到6万次起落,但起落架应用的是国外材料体系,在国外进行生产,没有应用我国的材料和生产工艺。因此,这方面与国外具有较大差距。

(2) 起落架结构设计能力: 对于大吨位起落架的设计尤其是多支柱起落架的设计国内没有任何经验。国外大型民机起落架(如A380、A340-600、波音747、波音777等)只有一些著名起落架公司(如Goodrich、Messier-Dowty等)才能设计、生产,这些起落架的尺寸和吨位都较大。而国内目前只能设计生产吨位较小的军机和运输机起落架。在大型车架式起落架结构设计上也没有太多型号经验。

(3) 起落架控制系统设计: 与国外先进水平相比,国内起落架控制系统的集成度低,起落架电传转弯、刹车控制、收放系统集成控制的设计水

平较低,同时起落架控制系统附件可靠性水平较低,寿命较短,难以满足民用飞机的使用要求。尽管国内在军机上已经应用了电传刹车技术,但对于多轮刹车的控制研究目前还是空白,而且对自动刹车系统的研究才刚刚起步。国内电传转弯系统中目前采用的还是电磁阀控制,控制精度较差。

(4) 材料制造方面: 国外民机起落架主结构的材料已采用300M钢以及钛合金材料,而我国目前只有少数机种起落架采用了300M钢,国产民机起落架还未采用这种材料,在主要承力构件上还没有采用钛合金材料。国内已初步具备了大规格300M钢及钛合金棒料熔炼能力,具备这种规格锻件的加工能力,但其工艺稳定性及制造水平还有待于进一步提高。

(5) 适航验证方面: 在民机的适航方面运-7200A、新舟60、运-12等小飞机取得了起落架的适航认证,在ARJ21项目中也正在开展工作,但同国外相比我们在对适航条款的理解、验证方法以及适航取证经验上仍有很大的差距,对于大型民机起落架的起落架适航认证工作就更没有经验。

我国发展大型民机起落架必须解决的关键技术

通过前面的分析,我国在起落架领域与国外大型民机起落架方面的差距主要体现在起落架设计技术以及起落架材料制造工艺方面,缺乏大型民机起落架设计与试验验证的完整技术体系和经验。在起落架设计中,缺乏多支柱起落架的设计规范、大型车架式起落架设计经验不足、细节结构设计不合理、设计要求不当、材料性能较低、整体锻件加工能力不足、制造精度达不到要求。这些因素都是制约大型民机起落架设



波音777的主起落架

计质量提高的关键技术。

1 大型民机起落架总体布置技术研究

由于飞机的吨位大,基于机场跑道强度的约束,大型民机都采用车架式多轮起落架的结构形式,如果是超大型飞机,则必须采用多轮多支柱起落架的布置形式。而由于多支柱起落架载荷是个超静定问题,它牵扯到前后两对主起落架缓冲刚度匹配问题,现有设计规范和方法都没有对这方面问题进行规定,造成在多支柱起落架布置、地面载荷确定、多支柱起落架缓冲功量分配的设计方法上具有不确定性。因此需要研究多支柱起落架设计理论,综合考虑因为飞机重心、多个起落架支撑所带来的设计上的问题。另外对于单个承载200t左右的起落架,不仅要考虑起落架支柱、侧撑杆、锁定机构等起落架结构的布置方式,还必须综合考虑地面载荷尽可能分散地传递到机体结构上,以使得机体结构能够以最小结构重量来承受地面载荷。

2 长寿车车架式起落架结构设计研究

大型民机承受的各个方向地面载荷都很大,并且在机场一次起降所滑行的距离平均在12km左右,它的起落架都采用4轮车架式结构甚至6轮车架式结构形式。由于要求的起落次数高、载荷大,滑行距离长等特点,对于起落架结构的长寿命设计技术要求很高。国内目前缺乏大型车架式起落架的结构设计以及起落架关键部位的典型结构抗疲劳细节设计方法,研究大型民机车车架式起落架合理的承载结构形式、车架式起落架收放及锁定机构、典型结构的疲劳特性以及抗疲劳设计方法是保证大型民机起落架长寿命关键措施之一。

3 大型民机起落架材料及制造技术研究

大型民机起落架主体材料已



经广泛采用300M钢整体锻件、钛合金整体锻件制造技术。300M钢的抗拉强度高,达到1860MPa以上;它的横向塑性高,断裂韧性高;且与同强度低合金超高强度钢如4340、40CrMnSiMoVA等钢种相比,300M钢的抗疲劳性能明显优于4340、40CrMnSiMoVA和30CrMnSiNi2A等钢种,特别是在介质中的裂纹扩展速率显著降低。这些特点使得300M钢现已成为大型飞机起落架的主导应用材料。另外钛合金的应用也已经从次承力结构、小零件扩展到主要承力构件上。由于大型民机起落架结构尺寸都很大,所以其要求的原材料尺寸规格都很大,基本上 $\Phi 300\text{mm}$ 钛合金棒材及 $\Phi 450\text{mm}$ 300M钢棒材是大型起落架的最低材料要求。研制合格的大规格原材料是应用此项技术的基础。目前国内能够生产的规格还达不到大型起落架的设计要求。其次整体锻件的设计与制造技术也是合格起落架制造的基础,扩大模锻件的生产制造能力是实现大型民机起落架材料应用提高的关键。

4 大型民机起落架控制技术研究

先进民机起落架的控制系统已经完全放弃了钢索滑轮等机械操

器件,采用以电传控制技术为主的控制系统,包括前轮转弯操纵、自动刹车控制和起落架收放系统,都采用了余度设计的电传控制。目前国内电传转弯系统中采用的还是电磁阀控制,控制精度较差,起落架收放控制也还是传统的触点式开关控制,感应式接近传感器只有在ARJ21-700上得到应用,自动刹车技术还没有得到工程应用。国内起落架控制系统的集成度低,附件可靠性水平较低,研究起落架系统的综合电传控制技术、提高系统的集成度、发展民机自动刹车技术是实现大型民机起落架系统集成化与智能化的有效途径。

结束语

对于大型民机起落架这种涉及多学科多领域综合技术的项目,国家应该有一个长期的研究发展规划,开展以工程应用为目标的预先研究。通过有计划分阶段的研究工作,掌握大型民机起落架的关键技术。特别要强调注意安排设计、制造、试验一体的工程化研究,紧紧围绕工程应用这一目的,先突破在工程应用中起落架技术上的难点,完善补充我国大型民机起落架设计制造及验证技术体系中缺少的技术。(责编 侧卫)