

波音787飞机总装配线及其特点

Boeing 787 Final Assembly Line and Its Characteristics

北京航空航天大学 范玉青



范玉青

教授、博导、享受国家特殊津贴。1963年毕业于北京航空航天大学飞机制造专业，毕业后留校任教。1981年11月-1984年2月作为访问学者在英国学习。长期从事飞机制造和数字化技术应用的教学和研究工作，培养了百余名硕士、博士和博士后，其中10名是外国留学生。出版了《现代飞机制造技术》、《大型飞机数字化制造工程》等书籍。

波音 737 机型的总装配线是连续移动式装配线，在飞机装配中可以算是最高水平了。而波音 787 是脉动式总装配线，看起来后退了，其实不然，它是模块式的总装配。

为了顺利地运送波音 787 飞机的大部件，以保证总装配工作的顺利进行。波音对多种波音 787 部件运输方案进行了研究，包括使用世界上最大的飞机 An-225 来运输的方案，但此飞机内舱的高度不够。最后不得不对波音 747-400 进行改装，以满足波音 787 部件的运输要求。改装后的波音 747-400 为波音 747-400LCF (Large Cargo Freighter) 大型货机，通常被称为波音 747LCF，波音公司正式命名它为波音 747 梦幻运输机 (Boeing 747 Dreamlifter)。它是利用波音 747-400 客机进行改装的，

在外形上类似空客 A300-600ST (大白鲸)，机身有很大的隆起部分，加高了波音 747-400 的机舱高度，使货舱空间大幅度增大，以此适合运载波音 787 的大部件。747-400LCF 大型货机改装项目，共改装 3 架。这 3 架波音 747LCF 是由 4 架原波音 747-400 型客机改装而来，这 4 架的改装素材是波音公司分别从中华航空 2 架、中国国际航空 1 架及马来西亚航空 1 架接收而来的旧机身。改装后的波音 747-400LCF 梦幻运输机也称作超大型运输机 LCL (Large Cargo Load)，当用 LCL 把部件运送到美国

的查尔斯顿时,还要对刚运来的部件进行升温才能进入总装配。这是因为波音 787 部件从空中运来时,部件仅有 4.5℃。

波音 787 生产集成中心 PIC (Production Integration Center) 始终监控着 LCL 在空中运输的大部件的状况。此中心还监控着来自全世界的各种各样的零部件的交付状态。它一天 24h 密切关注着与 LCL 飞行有关的天气、地震,以及少数几个新闻频道,以确保波音 787 的零部件能顺利地运到总装配目的地。同时监控着各供应商的进度、制造工艺和质量。生产集成中心 PIC 在总装车间的 4 楼, PIC 可以俯瞰整个总装线,可以说它是一个实际运作中心。

复合材料的魅力及特殊性

众所周知,波音 787 机体有 50% 是复合材料制造,其中 45% 是碳纤维复合材料,5% 是玻璃纤维复合材料。它具有 20% 的省油能力,其中 3% 是应用复材的贡献,8% 是新发动机的贡献,其他是气动设计,系统整体设计,以及各分系统的优化设计的贡献。由复材组成的结构,如长桁、加强肋和框等比用铝合金结构轻 20%~30%,约 4500kg,它们比金属结构耐腐蚀和耐疲劳。

复合材料典型的组成是高强度的碳纤维埋设在环氧树脂基体中。因为机身翼全由复合材料覆盖,这样引起制造技术的重大改变。为此,波音的工程师和供应商管理人员组成的团队,共花了两年时间在全球范围内寻找和考核能承担波音 787 复材部件的一级供应商。这有两方面的原因:一是全新的技术,需要大量的复材技术人员;二是需要特种工艺设备,如自动复材铺带机以及洁净的环境,这些投资巨大。

波音 787 飞机的基本原材料是中间状态的碳纤维,它是用来制造机身机翼,具有重量轻、超强度的



图1 碳纤维并排成碳纤维布状

核心材料。在美国华盛顿州的东丽 (Toray) 复材工厂,首先把碳纤维束做成平布状的材料,即把数百根碳纤维并排成碳纤维布状,如图 1 所示。

数百根碳纤维并排成碳纤维布状后,在它的两面各铺一层浸渍了环氧树脂的纸,然后加温加压,使树脂渗透到碳纤维布中,成为碳纤维预浸料。再把这平面碳纤维预浸料切割成符合用户使用规范的条状料,并立即把它以 0℃ 冷冻起来,使混合的环氧树脂的化学反应停止,否则会很快硬化。

部件制造与装配

波音 747 飞机在机身装配时共钻了 100 万个孔,而波音 787 客机仅需钻不到 1 万个孔。

为了安装系统,钻孔切边机在复材机身段的一侧进行钻孔,如图 2 所示,并且切割出机身段的门、窗的开口,以及对机身段的端边进行切削加工。

长桁埋设在复材机身段的蒙皮中,在固化炉中与蒙皮一起加温固化。成型后的机身段放置在一个专用的工装上,工作人员可以转动它并进行检验工作。这一专用工装共用了 80 个夹紧件,相当于长桁的数量,

如图 3 所示。

三菱重工 (MHI; Mitsubishi Heavy Industries) 负责制造机翼。机翼装配首先是把前后梁定位在机翼的型架中,再把前后缘分别装配到前后梁,接着把机翼的内部结构或翼肋安装连接到前后缘上,然后把上蒙皮复材壁板安装到翼肋上,最后装配下蒙皮复材壁板。

一般金属机身段需要 1500 块铝合金板料,4 万 ~5 万个连接件。波音 787 机身是一件复材筒体结构,其



图2 在机身段一侧进行钻孔



图3 专用工装

连接件数量减少了80%。

意大利的阿里尼亚公司和美国的Spirit公司利用脉动式超声仪检测复材裂纹,机身筒体可在夹具上旋转360°,如图4所示,这样方便检测蒙皮和长桁的内部裂纹。

波音787总装配线

由于波音787客机机体大都是复材结构,波音发明了新的工艺装备、系统,并构建了新的总装配生产线,如图5所示。由于波音787客机的机体都是复材构件,所以完全改变了飞机的装配方法。传统的工装基本上都不用了。这些传统工装一般

都是固定式结构,它们都有很笨重的水泥底座,各种装备用螺栓连接。取消后,工作流畅,提高了工作效率。取而代之的是轻便的工装,考虑到人机工程,把装配件移动到工作所在地。新的总装配生产线分成5个工作区:零号工作区、一号工作区、二号工作区、三号工作区和四号工作区。在图5中,一个机位就是一个工作区。

安装到机翼上,使机翼成为一个完整的部件进入下一阶段装配。并且对机翼的运动部件做一些测试工作。尾椎与水平尾翼也预装配在一起,如图6所示。其他部件也是类似情况。

主要部件都停放在零号工作区,部件上已安装好各类系统,如隔热毯、金属管路、电缆和各种电器设备等。中机身共长25m,是波音787最大部件,由日本和意大利分别制造部

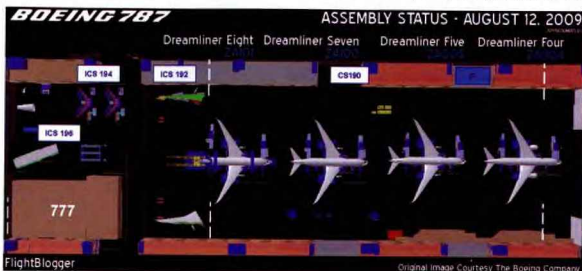


图5 波音787总装配生产线

1 零号工作区

为了方便波音787大部件的运输,厂房的大门高18m、宽24m。装配生产线一开始是预装配区,称作零号工作区,在这里把翼梢小翼(翼尖)安装到机翼上。所有机翼的运动部件,如襟、副翼和移动式前缘等也都

段,在美国南加州的查尔斯顿进行对接装配。

2 一号工作区

波音787装配线是基于“最大限度地并行工作”概念设计的,即所有装配工作尽可能地同时展开。

波音787的六大部件包括:前机身,中机身,后机身,左、右机翼和尾段。在这里对接总装配,如图7所示。先定位中机身,然后前机身、后机身和左、右机翼可同时向中机身进行安装。垂尾和水平安定面也在这里安装,不需要大而笨的传统工装和脚手架。

由于电缆、空气管路和液压管道都在各大部件上安装好了,这样就消除了为安装这些系统所需的大量工装。但是仅有一件大工装是用来安装垂尾和水平尾翼的。

在一号工作区,巨大的机身筒体被对接装配在一起,在高处架子上的数字化程序设备发出激光束来帮助机身段的彼此对准。图8中圈内为两位技术人员在计算机前操作激



图4 旋转夹具



图6 尾椎与水平尾翼预装配



图7 波音787的六大部件对接总装

光定位系统,激光跟踪仪在柱子的上端。对接后利用轨道式自动钻孔机打孔,用手工装连接件,利用类似于埋头铆钉连接它们。但不是用的传统铆接方法,它是分两件的连接件(类似螺钉螺帽似的),所以他们发明了一些新的工具,特别用在复合材料与钛合金件的连接上。

蓝色的工装夹具支撑着巨大的机翼,并把它提交到装配过程的位点上。它是由工装的轮子移动机翼到需要装配并升起的位置上,与中机身机翼段的突出部分对接连接。

波音在一号工作区得出一个经验,即使飞机的位置尽量低,以避免工作人员上下的劳顿。

3 二号工作区

当所有大部件对接装配后,所有工装和飞机一样在轨道上移动到二号工作区。到了二号工作区飞机的位置升高162.5cm。这样提高了飞机的位置,以便安装起落架、发动机等。但前起落架在前机身上是预先安装好的,这里仅安装主起落架。还有地

板、绝缘毯、次结构件的安装以及系统安装的收尾工作。因交付来的部件中,所有管路、电缆、液压系统和环控系统等都是安装好的,所以这里仅是连接它们的一些收尾工作。这阶段飞机首次以自己的起落架“站立起来”。这阶段要做很多清理工作,因为机翼就是飞机的燃油油箱,把机翼彻底清理,使它没有因装配工作留下的杂质和灰尘。

在这一工作区,厂房地板下装有排水系统和巨大的带有泵和管道的水箱。地面下一共挖掘了3个标准奥运会用游泳池大小的水池,位于装配工作区域的下方。其中装了很多设备系统(包括储水池,里面盛有飞机所要求的液压系统所用的油料)。所以在这个装配阶段

就可以对机翼的运动翼面进行试验。还埋设了电缆和空调系统及飞机上用的60Hz和400Hz的电力。地面上开了很多孔、槽并装有很多设施,在地面上看不到非常杂乱的电缆和管路,都是为了装配飞机方便。

4 三号工作区

当波音787在二号工作区的飞行测试结束后,飞机就“脉动”式地移动到三号工作区,这里的主要工作是内饰,如铺设隔热毯子、货物区铺内衬、过道、洗手间和装载箱等,辅助动力装置APU的安装以及动力装置的初步试验也在这里。其中部分工作在四号工作区继续完成。

5 四号工作区

在这一工作区要进行各种各样的测试工作,如测试液压系统,检查它们是否漏油,还有空气检查、水管检查和水试验等,以确保各系统按照所设计的要求工作。然后进入航空电子试验、飞行控制试验及起落架收放测试。由于波音787客机是智能飞机,在测试中会面时很多有趣的挑战。

6 波音787喷漆

当波音787飞机在第四工作区检查完毕后,飞机就被送往喷漆车间进行喷漆。

波音787总装配线的特点

1 模块化装配

波音在总装波音787飞机时,它



图8 前机身与中机身对接

接收到的是完整的机翼、机身等部件,相当于“成品”,即在其部件内不仅结构完整,而且相关的管路、电缆、黑匣子、绝缘毯、地板和座椅轨道等都已安装好,是典型的模块化装配。

2 脉动式装配线

由于波音 787 客机是大部件模块式装配,波音 787 生产线就不需要连续移动。与波音 737 连续生产线相比,它是脉动式(pulsed)的装配线。生产线每脉动一次,则完成一定装配工作。这一脉动式生产线由 4 个离散的工作区组成,并以特定的顺序完成装配工作。当装配好的飞机由四号工作区移动到喷漆车间时,总装生产线就脉动一次。波音 787 总装生产线的右侧,是装配支持人员的办公室区域,左侧安放有待安装的各种物件,如座椅、洗手间和厨房用具等。

3 数字化装配

在整个飞机装配工作过程中,不仅进行了全机装配过程的数字化模拟仿真。而且,质量检验人员一直监控着全部工作,每一个作业(或工作指令)都要进行验证和签字。过去,机械师和检验人员都用图章和纸质文件来保存检验信息。这一次不同了,他们配备有“电子版”,所有工作指令、规定、图章和纸质文件都已电子化了。各车间人员的“电子版”上都运行一个车间管理套件,称作 Velocity (Web-based enterprise process management and execution suite)。它跟踪着所有工作进程,一旦飞机下线,大量的工程和生产数据就“电子化”地流动到下游所需要的地方。

波音公司专门建立了“波音虚拟实验室”。设计人员可以在实验室戴上三维眼镜,来操作和控制实际飞机的装配过程,进行估价是否在装配中有影响可达性的情况,以及将来飞机进入航线后的可维护性问题。如在机翼上卸下壁板是否方便并保证

安全。安装座椅、洗手间等其他笨重设备时,依据历史数据专门开发一个人机工程检查表。因波音 787 项目中有人的模型功能,如图 9 所示。所以可做很多人机工程的数字仿真,找出不安全和不方便的地方。

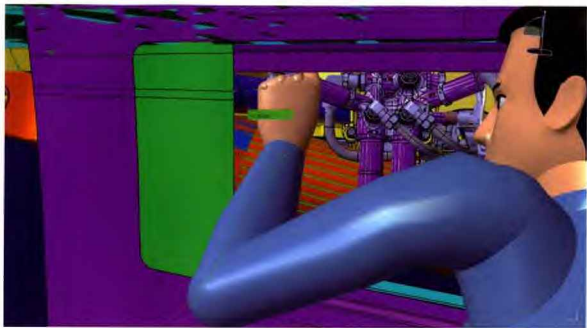


图9 数字化人的模型

过去喷漆是依据设计的精确数据,人工在飞机上画出很多点,表示出需要喷漆的区域,这样工作量大而复杂。现在是用计算机辅助表面标记系统 LAEMS (Laser-Aided Exterior Marking System),即用激光投影,由计算机程序控制把激光束投射到飞机表面上,当激光投射到飞机表面上时,就可以描绘出需要喷漆的区域。使工作人员可以很明确该喷漆的区域范围。每一架飞机对喷漆的要求是不一样的。波音有一个专门的图案数据库,保存着数千架客户飞机的喷漆图案,并且可以随时把新机的图案加入进去。每一架飞机共有几百 kg 的漆要喷到飞机上。

4 精益制造

波音 787 总装配项目是按精益生产原则进行的。总装配成功的关键是:使零部件、工艺装备、材料和人员都精确到达生产线所需要的使用地点。实际上,精益制造的关键主要集中在与供应链的通信上,对于效率低下的工作人员提出警告,及时发现问题,解决问题。

可视化指示也是精益生产的一部分,在沿着总装配线的每一个工作区域中,贴了很多图表,它们跟踪着每架飞机的装配状态,巨大的牌子醒目地显示着生产线各功能组进展情况。

在生产车间,每一个工作人员

除配有“电子版”外,还有一个称作外部物件碎片 FOD (Foreign Object Debris) 口袋,所有不属于飞机的零碎都要放到 FOD 口袋,并有专门人员检查,这是安全和质量的重要保障。另外还有工具责任系统以避免小工具遗留在飞机上。像这样的小发明公司在研制波音 787 过程中共有百余项。

结束语

波音公司在研制波音 787 客机中,不但飞机本身(如材料和结构)有很多大胆的创新,而且其制造和装配技术也有很大的突破,不拘泥于原有的成绩。比如,波音 737 机型的总装配线是连续移动式装配线,在飞机装配中可以算是最高水平了。而波音 787 是脉动式总装配线,看起来是后退了,其实不然,它是模块式的总装配。总装配工作简单了,在某种意义上,它的总体方案是更先进了,事实证明也是正确的。这是我国研制大型飞机中值得借鉴的。

(责编 小斌)