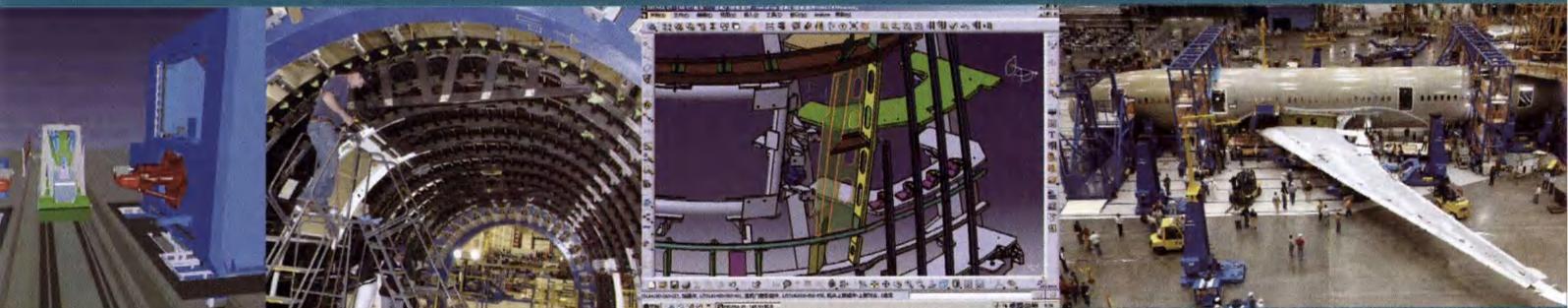


大飞机系列论坛

# 大飞机 数字化装配技术

Digital Assembly Technology  
for Large Commercial Jet

装配是飞机制造的关键环节，是一项复杂的系统工程，数字化技术的应用，不但能使飞机总装周期大大缩短，而且能够提高装配质量、降低制造成本。数字化装配是我国大飞机研制必须突破的关键技术之一。



# 波音787飞机装配技术及其 装配过程

## Assembly Technology and Process of Boeing 787 Jet

北京航空航天大学机械工程与自动化学院 于 勇 陶 剑 范玉青



于 勇

博士,目前在北京航空航天大学机械工程与自动化学院飞行器制造工程系博士后流动站从事科研工作。长期以来与工厂企业和设计院所合作,并一直追踪国外航空公司,特别是美国波音和欧洲空客等公司先进的数字化、信息化技术应用,主要关注产品数据管理、飞机构型管理以及飞机并行产品数字化定义等相关技术的研究。

波音公司基于全球协同环境 GCE 研制的 787 “绿色”环保客机,虽然尚未试飞,但它的一系列全新的

波音公司基于全球协同环境 GCE 研制的 787 “绿色”环保客机,虽然尚未试飞,但它的一系列全新的飞机装配理念、方法和技术,就已经引起航空制造业界的极大关注。

飞机装配理念、方法和技术,就已经引起航空制造业界的极大关注。这些大型飞机装配的新技术,如全球协同研制的理念和方法、基于模型定义(MBD)的装配技术、利用室内 GPS 系统的飞机对接总装过程以及复材机体的装配连接技术的应用等更是业内关注的焦点。

### 787 客机结构及其全球协同 研制模式

由于复合材料结构有着许多众所周知的优点,波音公司在对复材结构做了大量成功研究试验的基础上,决定 787 机体主要结构大规模地采用复合材料,由 777 飞机复材用量占整机材料用量的 12% 一步跨越到现在的 50%,即机身和机翼外壳几乎都由碳纤维增强复合材料制成,仅少

数机体部位应用铝合金或其他材料。这种机身由复材组成的 787 客机,是波音公司全新研制的机型,与之前的机型相比,它的维修成本可节省 30%,飞行的舒适性也有很大提高,所以得到很多航空公司的欢迎。因此,国际上各航空公司都期待着这一“绿色”客机能给空中旅行带来革命性的变化。与此同时,787 客机的出现也使这种飞机的制造和装配技术发生了根本性变革。

在过去,波音标准的研制方法是先在公司内设计好飞机(Design the Plane In-House),然后把飞机的零部件或一整段机体的图纸送到它们的制造伙伴工厂去生产。而这次在研制 787 客机中,波音彻底地改变了研制方法,也改变了研制流程。它利用 Dassault 的 PLM 套件创建了

全球协同平台,与合作伙伴协同研制 787 客机。最重要的是,全世界大约 6000 余名工程师联合起来共同设计和工程化 787 客机。波音 787 机体分段及分工情况:意大利的阿里尼亚航空制造公司,负责制造机身 48 段;日本的富士重工、川崎重工和三菱重工等公司,负责制造机翼 12 段、主起舱 45、中央翼盒 11 段和机身 13 段;北美的古得里奇公司负责制造发动机短舱和反向装置;美国的 Spirit 公司负责制造机身 43 段,沃特公司负责制造机身 47 段;全球航空公司负责机尾 47 段和 48 段对接装配等工作。最后,由波音公司利用超大型运输机 LCA 把世界各地制造的十几个大部件运到波音进行对接总装、试飞和最后的交付工作。

### 基于模型定义 (MBD) 的 装配技术

波音公司在研制装配 787 客机的过程中,采用了全新的基于模型定义 (Model Based Definition, MBD) 的技术。美国机械工程师协会于 1997 年在波音公司的协助下开始有关 MBD 标准的研究和制定工作,并于 2003 年成为美国国家标准。随后 CAD 软件公司把此标准设计到软件中,使波音公司才有可能在 2004 年开始的 787 客机设计中,全面采用基于模型定义的新技术。该技术将三维制造信息 PMI (3D Product Manufacturing Information) 与三维设计信息共同定义到产品的三维数字化模型中,使 CAD 和 CAM (加工、装配、测量、检验) 等实现真正的高度集成,数字化技术的应用有了新的跨越式发展,可不再使用二维图纸,将工程技术人员从百年来的二维文化中解放出来。同时使数字化技术在飞机装配中的应用有了革命性的进展。在此过程中,其主导思想不只是简单地将二维图纸的信息反映到三维数据中,而是充分利用三

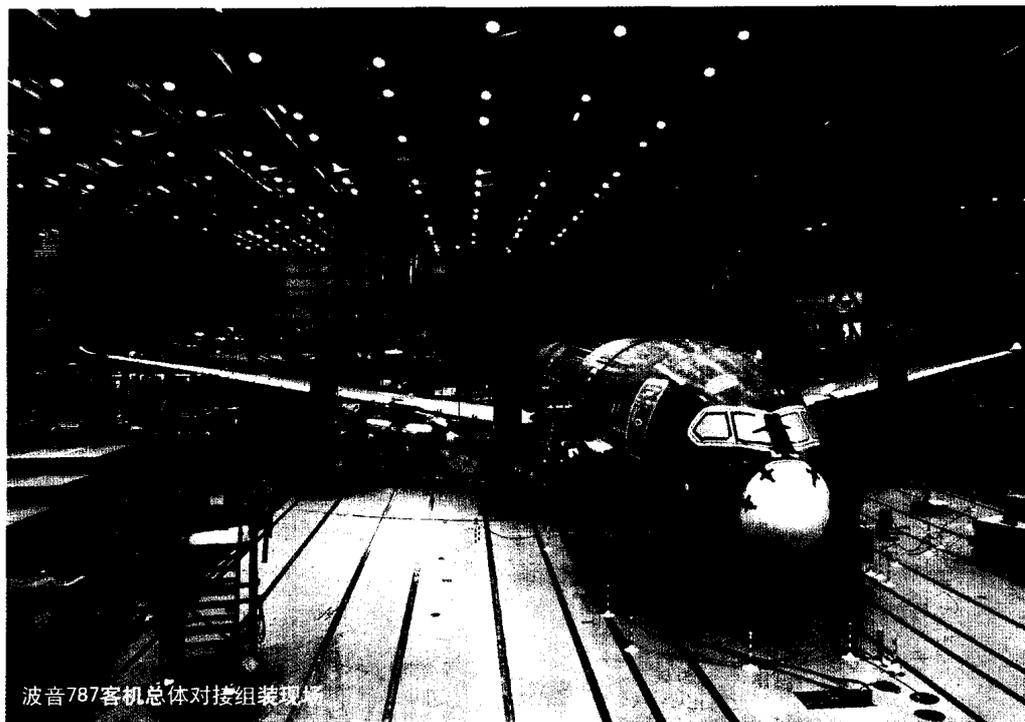
维模型所具备的表现力,去探索便于用户理解且更具效率的设计信息表达方式。其中,最为艰难的是“要从二维图纸文化这种现有概念中跳出来,从零开始研究新的信息表达方式”。同时,波音公司进一步把 MBD 技术深入应用到 787 数字化装配的各个方面。

### 数字化协调方法 ——阵列式装配 (DA) 技术

由于现代大型飞机的结构尺寸大、刚性差、定位精度要求严,同时还

的设计还在不断的变化之中。所以需要新的装配工艺及其工装设计和制造方法——基于数字化协调的阵列式装配方法来解决这个问题。

数字化阵列式装配是一个术语,用来描述实际的设计零部件在预先定义的界面上,能精确地装配在一起,而不需要实物标准样件或其他复杂的测量和调整技术,其实质上是数字化协调方法的具体体现。也就是通常说的,为了制造和装配的设计 (DFMA),这样大幅度地减少了工装的设计和制造工作。



有制造成本低、装配速率高的要求。这就造成飞机装配工艺及其工装的设计和制造难度大,装配协调困难。使得传统的装配工艺及其工装难以胜任,需要用新的方法和技术来支持部件之间的精确装配关系。在这种条件下,基于产品的三维数字化定义和精确 CNC 加工技术的数字化协调方法,即阵列式装配 (Determinate Assembly, DA) 技术应运而生。一般来说,装配工装大于产品本身,工装的设计与产品设计、工装制造和装配的速率密切相关,而且飞机产品

空客 A340-600 的壁板制造单元就是典型实例。这一壁板制造单元用来把铝合金的长桁定位和连接到机加的壁板上,这是一个很大的装配件,高几米、长 30 多米。传统的方法是采用夹具来定位长桁和壁板,设计了长桁各细部的定位件,现场用激光跟踪仪来安装。这样现场就需要用激光跟踪仪来确定超过 2000 个定位点,这是件极其费工费时、劳动量也极大的困难工作。空客公司采用的数字化阵列式装配方法很好地解决了这个问题,不仅能将长桁和壁板

快速而准确地装配到一起,还有利于并行协同研制工作的展开。随后,空客公司还把这一先进技术应用到了大型客机 A380 机翼的主要工装设计和制造中。

在 20 世纪 90 年代中期,波音公司在新的大型飞机 747 的制造中,开展了机身装配改进团队(Fuselage Assembly Improvement Team, FAIT)项目,也将先进的阵列式装配方法应用于机身的装配中。

其原理是:由于飞机机身是在飞机坐标系中进行数字化定义的,机身壁板的定位点也在飞机坐标系中定义。在壁板的装配型架上有用数字化方法安装的定位点的定位器,在机身装配工装上的壁板定位器用激光跟踪仪确定它们在飞机坐标系中的位置,这样就保证了多块机身壁板在机身坐标系里是相互协调的,可以使壁板能装配到机身的准确位置上。

波音公司在研制 787 客机中进一步应用基于数字化协调的阵列式装配技术于部件装配和全机的对接总装中,如部件装配中应用了 DA 孔(通称协调孔)的定位方法,也是基于上述定位原理的数字化协调方法。

### 室内 GPS 系统在 787 客机总装中的应用

激光跟踪仪在我国飞机装配工装的制造和安装中已广泛使用,但我们对室内 GPS 系统(也称作局域 GPS 精密测量系统)在飞机装配中的应用还比较陌生。室内 GPS 系统是数字化装配技术最重要的技术手段之一。

室内 GPS 系统与激光跟踪仪相比较,主要优势体现在如下几点:

首先,在室内 GPS 系统中进行测量不会因为掉光而影响工作进程,这是由室内 GPS 系统的原理决定的。它是由发射器以水平 270°、垂

直 60° 的覆盖范围从 3 个方向无线发射信号,传感器和接收器只要在这个信号的覆盖范围内,就能接收到光信号,并无线传播到中央控制电脑。在这个过程中,传感器只要能同时接收到 2 个发射器发射出的信号就能测出点的三维坐标值。如果能同时接收到 3 ~ 4 个发射器发射出的信号就是增加了自由度和精度。由此可见,在测量时即使有人走过,挡住了一个发射器发射的信号,也不会影响这一点坐标的测量。即使所有的发射器信号被遮挡也没有关系,只要增加测量杆的长度就可以正常测量。

其次,室内 GPS 系统能够满足多用户同时使用。在一个装配车间内,常常需要同时监控被测部件的几个关键点和面的位置关系。这种情况下,我们只需要在车间的墙壁和天花板上固定一定数量的发射器,一般建议在 30m × 30m 的空间内放置 6 个发射器,信号就会全部覆盖这个范围,被测部件的关键点和面的位置就都会被监控。我们可以在不同的被测部件上放置不同的传感器和接收器,那样它们的位置就会被实时监控。也可以用几个测量杆组件,由不同的工作人员同时测量部件的各个关键点和面的位置关系,互不干扰。也就是说,系统建立起来后,只要增加传感器和接收器就可以增加用户了。中央电脑可以同时处理这些数据并传递给不同的终端用户(比如掌上电脑),给用户的工作带来很大方便。

第三,当整个系统进行一次固定装配标定后,就可以无限次数的使用。所有进入这个区域的待测物都可以马上测量,无需建立坐标系。唯一要做的工作就是打开发射器的电源开关,待它预热 5min 之后,就可以马上开始测量工作。

第四,室内 GPS 系统最为突出的特点是可以进行大尺度的测量。在 10m 的测量空间中精度能达到

0.1mm,这大大高于激光跟踪仪,而且测量范围可以无限增加,只要增加发射器即可。可以实现自动装配测量,实时监控移动物体的运动曲线,比如飞机机翼与机身的自动对接过程。

第五,室内 GPS 系统可以对系统自身进行监控。如果有发射器出现位移或出现问题的情况,系统会自动报警,这样就可以在最短的时间内发现系统的问题。局域 GPS 精密测量系统不受温度影响,它的工作范围为 -10 ~ 50℃。

基于上述原因,波音在研制 787 客机的总装过程中采用了集成的室内 GPS 系统环境进行装配。

### 复材结构的数字化钻孔和连接技术

在复材部件的装配中,一般采用机械连接或胶接的方法将复合材料构件或复合材料构件与金属零件装配在一起形成部件。由于复合材料构件的特殊性,它的连接方法与金属零件的装配方法也有所不同。

787 客机的结构材料有 50% 是复合材料,机身的大部段壳体基本上都是复合材料的。考虑到复材机体结构的特殊性,钻孔时材料层间容易劈裂,而且又不适宜敲打,所以它们的连接不能用一般的铆接技术来实现;另一方面,考虑到 787 客机的生产批量大,有数量巨大的孔需要钻制,所以波音和合作伙伴研制了专用的自动化钻孔铆接设备和相关的工艺技术,以此来确保 787 客机的装配连接质量和速率,同时保持低的成本。

### 部件制造与装配过程

以 787 客机的机头 41 段部件为例,说明其制造和装配的过程。

#### 1 机头 41 段部件的制造

首先,构建复材部件壁板(包括长桁)的成型模具(型胎),这型胎是

组合式的,便于装拆。其上有长桁内槽,先把预制好的复材长桁放到内槽里,然后进行缠绕操作。再进入固化炉成型,成型后再进行切边钻孔等机械加工,最后喷漆。

## 2 机头 41 段部件的装配

以上的制造过程仅完成了此部件的复材壳体制造工作,里面还需安装机身隔框等其他组件。

部件装配不仅要完成结构的安装工作,而且要把此部件内的所有仪表、电缆和管路等航电设备也都安装好,充分体现了飞机产品模块化设计和装配的思想。波音最后仅需进行十几个大部件的对接总装配工作,保证 3 天之内能总装出一架 787 客机。

## 全机对接总装配过程

由于 787 客机的结构和材料与一般的大型客机不同,所以其装配方法也有重大的变革。通常复杂而笨重的装配型架(激光跟踪仪和厂房内的巨大起重机)不见了,取而代之的是轻巧的型架式起重运输系统(Jig-Crane-Style Materials Handling System)和厂房天花板上装有的一排排的室内 GPS 系统,用来定位飞机部件装配型架。波音 787 的总装配和机身对接系统,具有一套自动化的机身段定位系统和 2 套自动化装配系统。其装配过程大致如下:首先定位中央翼盒 11 段,把 43 段、46 段和主起落架舱 45 段与中央翼盒对接装配,并把 44 段装上,形成中机身段;然后把中机身段运到总装厂内。此时,前机身(41 段)和后机身(47 和 48 段)再与中机身对接,同时左、右机翼(12 段)与中机身对接,最后安装尾段(水平尾翼和立尾等)。

在波音 787 客机的装配系统中,共有 14 个定位器安装在型架式运输机构上。它们可独立地运动和互锁,并且稳定地定位在车间地板上。有 2 个主要子装配部件工装:前后机身

定位装置和左右机翼定位装置。为了搬运,进一步分成左、右次装配部件工装。此装配系统利用集成的室内 GPS 系统提供实时的定位测量数据。当飞机部件运到车间后,为了减少装配的装备和定位步骤,设计了从飞机部件搬运车下伸出的准直和定位系统。

在装配过程中,14 个定位系统的组件被移动到各自的支架移动车附近位置,并按预定方案举起和移动飞机部件,一旦装配工装被刚性地连接到一起,测量系统就会定位飞机部件,这些数据信息被输入到系统的应用软件中。依据这些数据,系统计算出飞机各部件(前后机身、左右机翼等)需要移动的距离,以确保飞机相邻部件的准确对接装配。这一精确的定位过程保证飞机能够平滑地装配,利用这一先进的全数字化的装配装备的突出优点,787 的机翼对接装配到机身上仅用了几小时,而不是通常所需的几天。由此可知,在波音 787 对接总装配过程中所采用的装配系统的优点在于使装配厂房内空间利用率高、方便到达,总体上是柔性的。同时为了减少出错和装配周期,具有自动化定位机构。

## 结束语

787 客机机体基本上是全复材结构,各大部件分布在世界各地制造,要保证快速、准确和及时地完成全机总装配工作,无论是装配技术本身,还是装配所需物料和过程的管理,都是具有很大难度和十分复杂的挑战性工作。波音采用基于模型定义的数字化协调装配技术贯穿于全机装配过程,值得我们进行深入研究,以便推动和加速我国大型飞机的研制工作。

本文有参考文献 7 篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。 (责编 玉龙)

# Fladder®

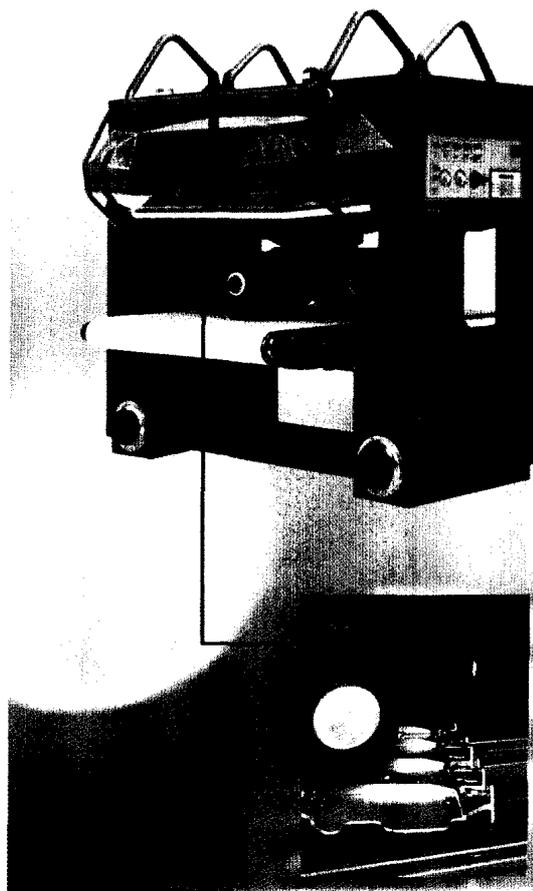
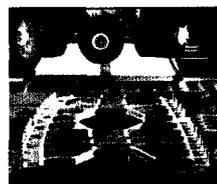
丹麦原装进口,卓越品质

## 用于飞机制造业

大平面金属表面研磨、拉毛,铣加工成形件去毛刺。

### 典型客户:

- Airbus
- Boeing



## 杭州祥生砂光机制造有限公司

地址: 浙江杭州市余杭区瓶窑镇彭安路53号  
电话: 0571-88524900 88524367  
传真: 0571-88524278  
邮编: 311115  
网址: <http://www.xs-sander.com>  
E-mail: [sander@vip.163.com](mailto:sander@vip.163.com)  
[info@xs-sander.com](mailto:info@xs-sander.com)