

飞机机身自动对接技术研究

Study on Aircraft Fuselage Automatic Joining Technology

中航工业沈飞民用飞机有限责任公司 金庆勉 金加奇

[摘要] 介绍了飞机机身对接方式、采用的对接基准和对接测量方法,并以某飞机机身对接为实例,详细介绍了某型号机身自动化对接平台的建立流程、装配协调方法及激光跟踪仪和激光准直仪相结合的测量方法。

关键词: 对接平台 数字化 激光跟踪仪 激光准直仪

[ABSTRACT] The article introduces the process of connecting and joining aircraft fuselages, the joining datum that has been adopted, and the method used for measuring joined fuselages. In this article, we take joining fuselage as a real example, provide a detailed introduction about the process of establishing automatic joining platform of fuselages, the process of assembly coordination, and the measuring method which adopts both laser tracker and laser alignment.

Keywords: Joining platform Digitization Laser tracker Laser alignment

飞机总装对接是飞机装配制造过程中的重要环节,前期飞机零部件的制造、装配都是为这个阶段的装配积累基础。在飞机总装对接过程中,对接方式的选择、对接基准的确定、对接测量方法的应用是其关键技术。

1 对接方式的选择

飞机总装的对接方式,从自动化程度上分为手工对接、半自动对接和全自动对接3种方式。

1.1 手工对接

手工对接是通过厂房天车或地面吊车吊起参与对接的飞机部件,将位于机体外表面的定位接头放置在型架上的定位交点上对部件进行支撑,通过人工找正、调整及对合,从而实现对接。手工对接通常采用千斤顶加辅助托架等方式,通过光学水平仪和经纬仪等测量工具来找正各个飞机部件之间的关系,然后实现对接。

1.2 半自动对接

半自动对接通常采用3个坐标方向可以手动或自动调整的伺服电机调整机构替代固定式型架或千斤顶的支撑形式,通过HMI人机交互系统驱动伺服电机控

制系统并借助激光准直仪等测量系统并辅助以人工判断来完成飞机装配的对接工作,每次对接的相关数据通过终端的计算机进行存储,以便后续进行数据分析。

1.3 自动对接

与手工对接和半自动对接方式不同,自动对接是利用计算机控制技术、激光测量技术、信息处理与反馈技术等使飞机部件实现非人工干涉的自动对接,20世纪80年代后随着计算机技术的发展,自动对接在国外飞机制造行业逐渐被大量采用。

(1) 支点式联调对接。所谓支点式联调对接就是大量采用数控定位器,形成一个点状网络系统,与飞机部件上的支撑接头一对一连接,通过联合调整(手工或自动)使飞机部件进入正确坐标位置。空中客车公司的各型号飞机采用的就是这种技术。(2) 托架式调整对接。波音787飞机率先采用了托架式调整对接技术,这种技术的关键点在于放弃了将支点式联调对接技术中的部分定位器直接与机体表面的支撑接头连接,而是通过一个连在机体外表面带保形的固定托架将机体托起,参与对接。这种方式使飞机部件对接更不容易变形。

2 对接基准的确定

飞机对接,基准非常重要,它是保证飞机对接部件准确到位的基础。由于设计理念的不同和制造厂商有不同的基准选取方法,如原麦道飞机选择的是机身内部基准定位法,空客飞机普遍采用机身截面或非机身基准定位的方法,波音飞机不同的机型有不同的基准方法。

(1) 机身内部基准定位。机身内部基准通常选取在特定基准长桁上或地板座椅滑轨上(例如庞巴迪Q400飞机),因为它们贯通机身前后的直线零件。这种对接是把精度控制在机身内部,而把误差积累推移到机身外部,同时,这种方法的精度往往取决于特定基准长桁或地板座椅滑轨自身的制造精度和装配精度。

(2) 机身段截面基准定位。此方法是指将定位基准选取在部件的对接截面,边对接边调整,最终将部件对合在一起。这种方式特别适用于自动对接。

(3) 机身表面基准定位。是指在工程设计时就于在机体表面特定几何元素上标定基准点,或预留测量孔

(面),零件制造和部件装配时始终保持这些特定基准的准确度,直到总装对接。

(4)非机上基准定位。随着现代飞机制造和安装精度的提高,工程师们试图将飞机总装基准从飞机机体上转移到支撑飞机的承载物体上,如承载接头、VGA 小车、托架、地面、升降机等。基准的外延使得飞机总装对接有更大的自由度。波音、空客都应用了这种方法。

3 对接测量方法的选用

飞机总装对接中,除了利用飞机机体上的用以判断是否安装正确的几何要素外,更多的是利用一些测量工具来进行准确度验证。早期,人们主要使用常规光学工具(准直仪、水平仪、经纬仪等)来辅助飞机的装配测量;后来,应用了激光准直仪;再后来,计算机辅助电子经纬仪、激光跟踪仪、激光雷达、iGPS 的出现使得飞机总装对接的测量手段呈现多样化的特点。

(1)常规光学工具测量法。是使用工业准直仪、水平仪、经纬仪等常规光学仪器辅助检测,飞机对接过程中对目标体相对于基准变化,通过人的目光来判断目标体的偏差方向,通过仪器上的刻度来读取偏差值,通过计算给出目标体所应该调整的范围。这种方法人为因素较多,国外大多数飞机制造商已经不再采用,但在我国一些军机、个别民机生产中还继续使用着。

(2)激光准直仪测量法。是指利用激光准直仪发出一束激光,穿过若干专用目标,建立一束基准直线,通过人工调整直线上的目标,使该束直线在规定范围内聚合,在数显表上读出需要的数字时即认为调整到位。这种方法经常应用在机身内部基准定位的环境中。

(3)激光跟踪仪测量法。20 世纪 90 年代,世界上出现了激光跟踪仪,本来是给汽车制造装备的设备立刻得到航空制造工程师们的青睐,并在包括中国在内的飞机制造业内大量采用。

该方法利用激光束不变形的特性,应用测角原理,通过靶镜在空间快速定位目标体的 6 个自由度,准确调整飞机机体的姿态和位置,实现精确测量和快速定位。

(4)激光雷达测量法。是使用 2 个或更多的激光雷达,通过编程测量校准工具球,激光雷达可以自动从一个校准工具球移动到另一个校准工具球,连续地监视和报告所有的相关位置,程序可以自动循环重复,可以为总装对接调整提供精确的数据,这样就不再需要多台激光跟踪仪和多个靶镜。这样的定位取点比起依靠手动操作的激光跟踪仪更快。

(5)iGPS 测量法。iGPS 是室内局域定位系统,其原理类似于 GPS(全球定位系统),在飞机制造业内得到了应用,波音首先在波音 787 中使用了 iGPS 测量法。

该方法是利用室内多处的传感器和接收器接受发射器的光信号,无线反馈回中央控制电脑,进行精度迭代计算,同时通过自动对接控制系统向执行动作部分发出动作指令,动作执行机构很快地根据计算出的数据驱动移动元件调整飞机部件到正确位置。

该方法执行过程中不会像激光跟踪仪那样怕掉光,且可以同时满足室内多个用户使用而不相互干扰。当 iGPS 系统固定装配标定一次后,就可以无限制使用了,所有进入该覆盖系统区域内的物体都可以借助传感器立即进行跟踪测量,无须独立建立坐标系。所以,当飞机各个部件同时进入系统区域时,该系统可以同时处理每个部件的运动动作,而不需要相互等待^[1]。

4 应用实例

本应用实例显示了一种民用飞机半自动化的对接方式。用于对接的飞机机身连接由前、中、后机身组成,机身对接纵向应用两处连接框,相关技术参数见表 1。

表1 机身连接的相关技术参数

名称	技术参数 /mm
蒙皮之间间隙	1.8~4.3
蒙皮端面平面度	0~0.127
滑轨对接间隙	1.8~3.3
滑轨对接阶差	0~0.127

4.1 对接方案

根据此飞机机身的结构特点及高精度对接的要求,确定使用以中机身为准、多部件并行协调技术及数控定位技术来实现机身的高精度对接。以机身的内部滑轨作为对接基准,对接过程基于激光跟踪仪和激光准直仪进行协调、测量。

4.2 自动对接工装的设计

4.2.1 中机身工装结构设计

中机身作为机身连接的基准,其定位工装是固定不动的;中机身下壁板的 8 个外部接头通过定位销定位于中机身工装上,根据基准重合的原则采用 X428.5 站位作为定位基准(中机身的下壁板补铆型架、桶段总装型架、桶段补铆型架及中机身运输型架均采用 X428.5 站位作为基准),外部接头与外部接头定位器完全贴合;为了避免干涉,其他站位的外部接头与外部接头定位器之间留有 5mm 间隙(图 1)^[2]。

4.2.2 前、后机身工装结构设计

为实现以中机身为准的机身连接,前、后机身的外部接头定位器在 X、Y 和 Z 方向可以移动,其中 X 向

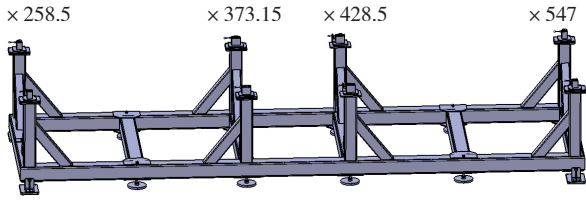


图1 中机身工装结构
Fig.1 Tooling structure of MID barrel

的移动距离为 500mm (从人机工程学角度来说,此距离既能保证有足够空间进行蒙皮铣切,又能保证工人方便地在机身之间跨越),Y和Z方向可进行 $\pm 10\text{mm}$ 的移动。前机身和后机身在各个方向的移动采用自动控制系统,分 2 个独立的系统:前机身工装电气控制系统和后机身工装电气控制系统,2 个系统的配置相同。

(1) 前、后机身工装机械部分结构设计。为了保证工装传动系统的精度,将传动系统的误差降到最低,实现高精度的连接,对元部件的选择及框架焊接的工艺流程进行分析,选用精密级滚珠丝杆,采用双螺母机构消除丝杆传动间隙保证控制精度;线性滑轨采用四方等载荷滚动直线导轨副,采用双滑块提高基础稳定性,直至对导轨上滑块的密封形式都做出特殊要求;导向部分采用精密光杠加一对封闭滑动座,导向性能才能与精密滚珠丝杆相符合,达到精度要求;框架的焊接采用专用工装夹具,焊接变形量小,焊接前打坡口,焊接完成后采取有效手段进行焊后去应力处理,保证该工装的框架长期使用不变形。通过以上技术措施,最终实现了工装的高精度传动^[3-4]。前、后机身工装如图 2、图 3 所示。

(2) 前、后机身工装 PLC 控制系统。PLC 控制系统是机身数字化对接的关键,PLC 具有高可靠性,抗干扰能力强,适应各种复杂工况和模块化的特点。还可对 PLC 和上位机进行通信开发,上位机可对整个 PLC 控制系统进行实时监控。前、后机身定位工装的电气控制系

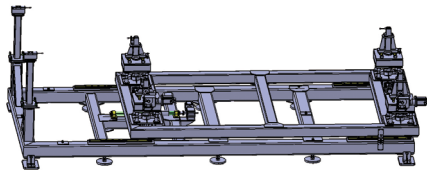


图2 前机身工装结构
Fig.2 Tooling structure of FWD barrel

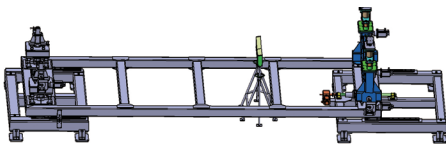


图3 后机身工装结构
Fig.3 Tooling structure of AFT barrel

统如图 4 所示,该系统包括如下 5 大部分:PLC 控制主站 1 台、控制分站 2 台、PC 操作台 1 台,HMI 操作站 1 台和手持操作器 1 台。

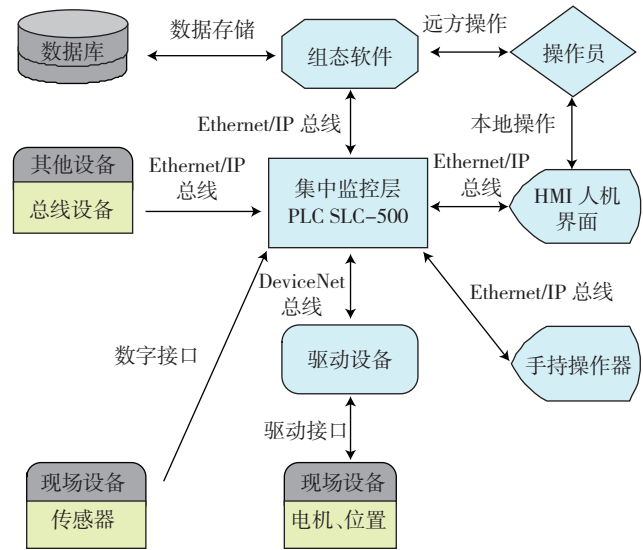


图4 系统控制顺序结构图
Fig.4 Structure diagram of system control order

4.3 测量方法的选取

4.3.1 激光跟踪仪测量系统

在飞机总装数字化对接中,数字化测量系统伴随整个对接过程,基于数字量的装配协调方法,按照设计技术要求,将大部件支撑、调姿、定位并连接成更高级装配配件或整机。图 5 显示了基于激光跟踪仪测量系统机身自动对接过程的数据流。

4.3.2 激光准直仪测量系统

激光准直仪应用到飞机机身的对接装配中,与激光跟踪仪配合,主要用来检测机身对接装配质量。因其激光束方向性好,单色性也好,它在空间中可近似看成是平行光,并且能被远距离的光敏元件所接收和测量。因此,激光准直仪测量通常以激光束作为准直测量的基准,主要对设备或机构预定特征的直线度以及位置偏移量进行测量。

根据机身结构特点,使用激光准直仪调整,如图 6 所示,基于后部靶标点调整激光发射光线,确保激光束穿过后部靶标点,这样就能确保激光发射光线与中机身外侧滑轨的理论位置相同;然后,在中机身的滑轨上安装定位器(左右滑轨各 6 个),在每个定位器上贴有纸片,激光设备发出的激光束可以平行于滑轨打到定位器纸片上,激光射到纸片上的位置(用笔将正确位置画到纸片上)即为滑轨的正确位置,同时将每一侧中机身外侧滑轨上的 2 个已在纸上描出点的定位器移到前(后)机

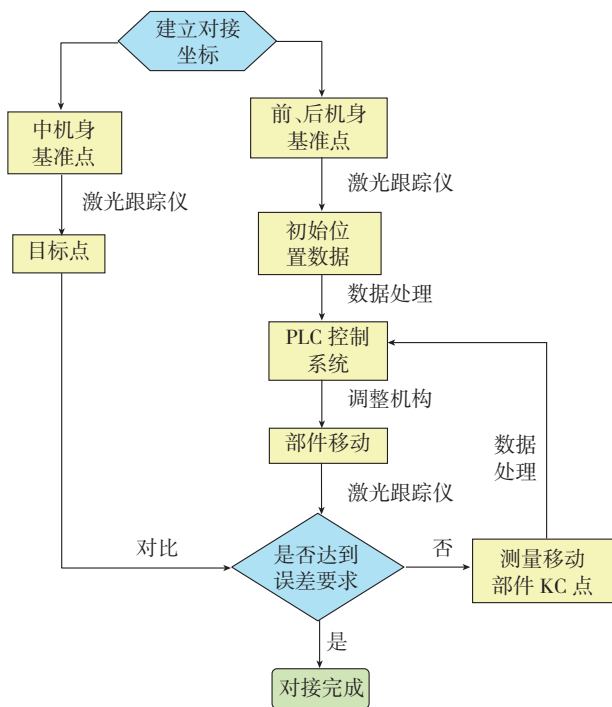


图5 基于激光跟踪仪测量系统机身对接过程数据流

Fig.5 Fuselage joining process data chart based on laser tracker measuring system

身外侧滑轨的前后端,调整到激光束与定位器上纸片已描出的点重合,实现前(后)机身的准确定位。

4.4 对接完成的判定

由于在实际工作过程中存在机构调整误差及测量误差等,移动件一般与理论位置存在偏差。因此,飞机机身自动对接完成需要一定的标准来判定这个偏差是否在容差范围内,如果偏差在容差范围内,即完成对接过程。否则,需要重新进行测量和调整,直到满足容差要求。

利用对应重合点间的距离作为对接装配质量的判断依据,记对应点为 P_i 和 P'_i ,由于不同的范数都是一种距离标识,本项目将对对应点向量的二范数作为对接间隙的判定依据,则有:

$$S = \sqrt{\sum (P_i - P'_i)^2} \quad (1)$$

根据对接整体误差要求(0.25~3.43mm),采用中机身与前机身对应的4个测量基准点进行判断,若4点对应距离的平方和根在要求范围内,即认为对接满足要求。

表2列出了对接过程中部件实际数据、理论数据及

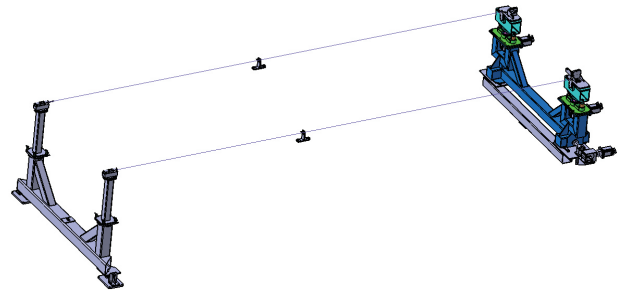


图6 激光准直仪调整示意图

Fig.6 Sketch map of laser alignment adjustment

其对比情况,按照公式(1),前机身对应4个基准点间的距离平方和根为: $S=0.3500\text{mm}$,在对接误差要求范围内,符合对接装配精度要求。

通过飞机机身自动对接技术研究和应用,掌握了自动对接工装技术和以激光跟踪仪为核心的数字化测量技术等关键技术,实现飞机机身的数字化对接,在机身对接过程中掌握的关键技术和积累大量的工作经验可以应用到国产的其他机型中,如为C919国产大型客机的总装对接工装奠定了良好的基础。

5 结束语

目前国内各机型飞机总装采用的自动对接技术尽管比传统的手动连接方式在精度和效率上都有了显著的提高,但仍有较大的改善空间。在将来的工作中,为了进一步提高生产效率,必须引入自动化对接生产线,自动化对接生产线主要是通过工艺集成管理系统、激光测量系统、控制系统,协调驱动三坐标数控定位器实现机身姿态调整和连接。

表2 实际数据与理论数据的对比

mm

测量基准点	理论数据			实际数据			偏差		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
P_1	1308.1	1040.13	2641.6	1308.0636	1040.3078	2641.6	0.0364	0.1778	0
P_2	1308.1	-1040.13	2641.6	1308.2082	-1040.003	2641.6	0.1082	0.127	0
P_3	5753.1	1040.13	2641.6	5753.1	1040.1329	2641.6	0	0.029	0
P_4	4711.7	-1040.13	2641.6	4711.624	-1040.3586	2641.654	-0.076	-0.2286	0.054

参考文献

- [1] 王建华. 飞机总装对接技术. 航空制造技术, 2010(2):32-35.
- [2] 陈立德. 工装设计. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
- [3] 鲁熙达. CATIA V5 机械设计教程. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 张松青. CATIA V5 三维机械设计. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.

(责编 亿霖)