

*Deformation Analyze and Control Technology
for Thin-walled Structure Assembly*

薄壁件装配变形 及控制技术

■ 张开富 程晖 刘平 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

薄壁件装配变形及 控制技术

张开富 程晖 刘平 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书紧扣“薄壁件”、“变形”,针对薄壁件刚性小、挠度大、重量轻、强度高等特点,从薄壁件铆接工艺流程出发,结合理论与数值分析,阐述了薄壁件铆接变形的来源、变形机理、扩散传递与快速高效的误差补偿措施。全书共分6章,系统介绍了薄壁件铆接工艺流程分析与建模方法、薄壁件定位误差分析与补偿方法、薄壁件铆接变形分析与工艺优化方法、薄壁件变形误差传递建模、铆接点位误差实时补偿方法。其研究范围涵盖定位、调姿、制孔、连接、实时误差补偿等整个薄壁件装配过程,为读者打开了一扇深入了解薄壁件装配变形及控制技术的大门。

本书可供航空宇航制造工程、机械、汽车工程及其相关专业师生阅读,也可用作科研及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

薄壁件装配变形及控制技术/张开富,程晖,刘平
著. —北京:国防工业出版社,2015. 8

ISBN 978-7-118-09057-4

I. ①薄… II. ①张… ②程… ③刘… III. ①
薄壁件—装配(机械)—研究 IV. ①TH136

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 202016 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 13 字数 239 千字

2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

航空工业作为工业之花,不仅是国家的战略性产业,其制造水平也是国家技术、经济,国防实力和工业化水平的重要标志。鉴于发展我国航空工业发展的迫切要求,党中央、国务院做出重大战略决策,于2006年将大型飞机确定为《国家中长期科学技术发展规划纲要(2006—2020年)》的16个重大专项之一。之后,国务院印发的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》将航空装备工程列为“十二五”20项重大工程之一,并具体提出了2015年、2020年的航空装备产业的发展目标及重大行动,我国航空工业进入快速发展时期。目前大型客机C919已经进入研制的关键阶段。按照工业和信息化部制定的《民用航空工业中长期发展规划(2013—2020年)》中将ARJ涡扇支线飞机、“新舟”涡桨支线飞机实现产业化、C919大型客机完成研制、生产和交付作为该规划实现的重要标志,其大尺寸、短周期、高精度、长寿命等特点对飞机制造质量和效率提出了更高的要求,飞机壁板是构成飞机外形的重要组成,其装配效率与质量直接影响整机的生产进度与装配质量。

飞机壁板主要由蒙皮、长桁等铆接或螺接而成。铝、钛合金薄壁件具有刚性小、挠度大、重量轻、强度高等特点,被广泛应用于航空、航天和汽车制造,飞机机翼大型壁板就是薄壁件的典型应用之一。目前我国发展的重点型号如大型飞机、新支线客机等与现有飞机型号结构有较大区别,其特点之一是结构板件化程度大幅度提高,机翼和机身大量采用结构相似的各种壁板件。如果采用传统的刚性工装结构,研制过程中需制造大量结构、尺寸相似的工装,不但需要大量的生产用地,还将导致生产准备周期长,生产成本高,难以满足新型号研制周期越来越短的需求。新型号的研制工作对飞机的技术性能和制造水平要求越来越高,这就决定了飞机生产过程中必须采用更先进的装配工艺和连接方法,如自动钻铆技术的应用,长寿命连接工艺的广泛应用等。铆接由于工艺过程简单,连接强度稳定可靠,检查和排除故障容易,能够适应于结构复杂的各种金属和非金属材料之间的连接等优良特性,已经成为飞机薄壁件装配的主要连接方式。我国目前采用的装配工艺和方法比较落后,基本采用普通手工铆接,机铆系数仅有20%左右(国外先进飞机的机铆系数已达85%),难以满足新材料和结构的高效率、高精度的装配要求。新机研制从质量、周期、成本等多方面对

装配技术提出了更高的要求,迫切需要大尺寸高精度的自动钻铆系统。自动钻铆系统,其全部过程均自动化完成,极大地提高了壁板的铆接效率,也对铆接过程误差分析与误差补偿有了更高的要求。针对薄壁件连接领域的书籍较少的现状,笔者在参考国内外关于薄壁件连接相关书籍及最新动向的基础上,结合长期在薄壁件装配连接领域的研究工作的经历和成果,总结、归纳并编写了这本关于薄壁件铆接变形与误差补偿的书籍。

本书通过分析薄壁件铆接装配的工艺过程,详细阐述了薄壁件定位误差分析与补偿方法,薄壁件铆接变形分析与工艺优化,薄壁件变形误差传递建模和铆接点位误差实时补偿等内容。全书共分6章。第1章首先对薄壁件及数字化装配在薄壁件的运用进行了概述;第2章分析薄壁件铆接工艺流程,建立了铆接误差模型;第3章阐述薄壁件定位误差分析与补偿方法,并针对定位误差提出了优化方法;第4章研究了薄壁件铆接变形分析和工艺优化;第5章结合前述研究,在分析薄壁件定位误差与变形误差的基础上,针对数字化装配环境下装配环境,实现薄壁件误差传递建模;第6章结合数字化装配工艺,提出铆接点位误差实时补偿方法。整个结构遵循“工艺分析→定位误差分析→变形分析→变形误差扩散传递建模→实时补偿”的思路,从工艺出发,经过应用基础研究,最后回归工程实践,形成闭环结构。

全书共分6章,第1章由张开富、齐振超编写;第2章由程晖、李健编写;第3章由刘平、程晖、牟伟强编写;第4章由刘平、李鹏编写;第5章由程晖、刘平、张开富编写;第6章由程晖、刘平、段元欣编写。全书由张开富负责内容的筹划与综合。

本书可供航空宇航制造工程、机械、汽车工程等专业的高年级本科生和研究生阅读,也可作为科研及工程技术人员的参考。

本书在编写过程中得到了西北工业大学教务处、机电学院航空宇航制造工程系有关领导和同事的关心和帮助,在此致以谢意。

限于笔者的水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2014年5月9日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 薄壁件	1
1.2 数字化装配在薄壁件装配中的应用	3
1.2.1 数字化定位	3
1.2.2 自动精密制孔	5
1.2.3 长寿命可靠连接	7
1.3 本书的研究重点与意义	10
参考文献	10
第 2 章 薄壁件自动钻铆工艺分析及误差建模	12
2.1 基本概念	12
2.2 大型壁板自动钻铆工艺流程分析	13
2.3 大型壁板自动钻铆误差建模	17
2.3.1 大型壁板自动钻铆特征子模型	18
2.3.2 大型壁板自动钻铆位移子模型	20
2.3.3 大型壁板自动钻铆误差传递子模型	22
参考文献	24
第 3 章 薄壁件定位误差分析与补偿方法	25
3.1 大型壁板自动钻铆定位误差分析	25
3.1.1 S-S 分层流程下壁板钻铆定位方法分析及定位误差 模型	26
3.1.2 定位误差分析中的 KCP 表示方法	27
3.1.3 预装配阶段基准定位误差分析	30
3.1.4 钻铆阶段多基准定位误差分析	34
3.2 考虑托架自重变形的薄壁件定位误差补偿	38
3.2.1 托架空间多姿态变形分析	38

3.2.2	托架弯曲变形分析技术研究	47
3.2.3	薄壁件定位误差补偿方法	50
3.3	薄壁件夹持变形分析与方案优化	51
3.3.1	薄壁件铆接装夹力学分析	52
3.3.2	重力与夹紧力作用下薄壁件误差分析	53
3.3.3	薄壁件铆接装配方案优化方法	56
3.4	面向钻铆误差控制的壁板装夹布局优化	69
3.4.1	大型壁板自动钻铆装夹布局模型	70
3.4.2	基于遗传蚁群算法的夹持布局优化	72
	参考文献	78
第4章	薄壁件铆接变形分析与工艺优化	79
4.1	铆接变形原理及分析方法	79
4.1.1	铆接变形原理	79
4.1.2	铆接所造成的变形	81
4.1.3	研究金属塑性变形方法	83
4.2	铆接变形及有限元分析	85
4.2.1	压铆过程的物理模型	85
4.2.2	压铆过程阶段划分	86
4.2.3	压铆过程的受力分析	87
4.2.4	压铆过程数值分析	88
4.3	单钉铆接变形分析	91
4.3.1	铆钉变形分析	91
4.3.2	铆接孔变形分析	95
4.4	多钉铆接工件变形分析	98
4.4.1	多钉铆接的工件变形模型	98
4.4.2	多钉铆接下工件的钉传载荷分析	99
4.5	薄壁件铆接工艺优化方法	102
4.5.1	薄壁件铆接顺序规划方法	102
4.5.2	薄壁件铆接区域间的路径规划	106
	参考文献	112
第5章	薄壁件变形误差与定位误差的扩散传递建模	114
5.1	S-S 流程下变形误差溯源	114

5.2	制孔力影响下的壁板变形误差分析	116
5.3	力平衡约束下的受迫连接变形误差分析	120
5.3.1	螺接受迫变形误差分析	120
5.3.2	铆接受迫变形误差分析	121
5.4	基于刚度矩阵推导的夹持回弹变形误差分析	122
5.4.1	夹持误差分析	123
5.4.2	回弹误差分析	124
5.5	定位误差与变形误差扩散传递分析流程	125
5.6	传递误差分析	127
5.6.1	误差传递过程分析	127
5.6.2	误差传递矩阵解析	128
5.7	扩散误差分析	130
5.7.1	误差扩散过程分析	130
5.7.2	误差扩散矩阵解析	131
	参考文献	135

第6章 铆接点位误差实时补偿方法

6.1	壁板模型的理论曲面归一化处理	136
6.1.1	装配约束下理论点正交投影	137
6.1.2	基于六阶偏微分方程的分段蒙皮表面拼接	140
6.1.3	全局坐标系下的理论点定义	145
6.1.4	实例分析	145
6.2	壁板曲面的间接测量和精准拟合	147
6.2.1	以修正量为基础的定位点间接测量	148
6.2.2	壁板曲面的精准拟合	154
6.2.3	实例分析	158
6.3	基于曲面匹配的理论定位点优选策略	160
6.3.1	以质心和角点为基础的粗匹配	161
6.3.2	以复合度为判断依据的精匹配	162
6.3.3	偏差最小化引导的理论定位点优选	166
6.3.4	实例分析	167
6.4	壁板施铆点的法向调平技术	170
6.4.1	依托曲线插值的施铆点获取	171
6.4.2	壁板施铆点的钻铆顺序多目标优化	173

6.4.3	法向引导的托架快速调平	179
6.4.4	实例分析	181
6.5	壁板施铆点法向定位仿真与验证	184
6.5.1	五坐标数控钻铆系统几何模型的建立	185
6.5.2	五坐标数控钻铆系统运动模型	190
6.5.3	NC 代码的生成	192
6.5.4	基于 CAA 的 NC 驱动仿真	195
6.5.5	仿真结果分析	197
	参考文献	199

第 1 章 绪 论

1.1 薄 壁 件

薄壁件是指由各种薄板及加强筋构成的轻量化结构,其外形直径与厚度比通常为 50~200,而壁厚较小,重量较轻,在航空、航天、船舶、能源等制造加工业有着广泛的应用(图 1-1)。

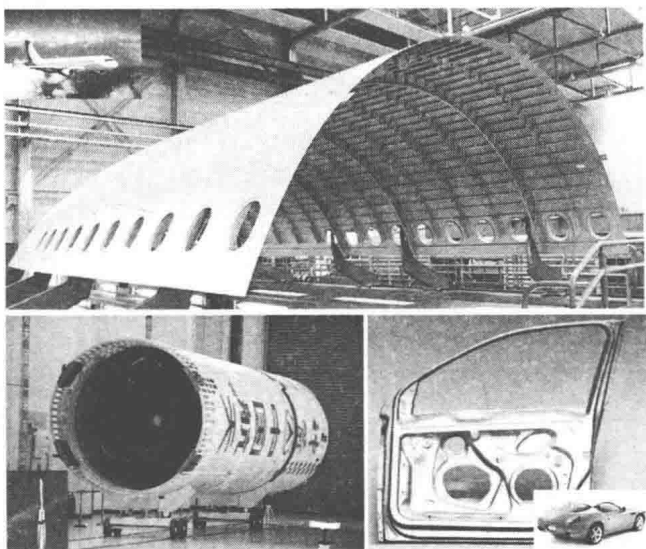


图 1-1 各制造加工业的薄壁件

尤其是航空领域,因为高强度、低重量的要求,飞机各类结构件普遍采用由薄型板件和加强构件组成的结构。板件有蒙皮、腹板、隔板、地板等,加强构件有桁条和梁、肋、框的缘条等。这些部件由于刚度小,例如机翼和机身壁板,如图 1-2 所示,该类结构主要由蒙皮、长桁等铆接或螺接装配而成,多为铝、钛合金件,具有尺寸大、薄壁且变厚度、装配精度高等特点,在加工和装配过程中容易产生变形,从而直接影响飞机的装配精度和产品质量。

随着军事、科技等多方面的飞速发展,要求航空、航天、汽车等产品达到更高的装配精度,继而对薄壁件装配变形控制提出了进一步的要求。以大型飞机为

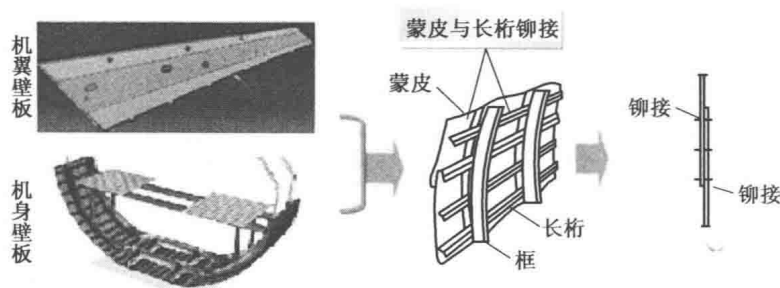


图 1-2 机翼和机身壁板类产品结构特点

例,要求达到的精度如下:外形准确度 0.5mm,连接件位置度偏差 $\leq \pm 0.50\text{mm}$,紧固件齐平度为 $0 \sim 0.05\text{mm}$,紧固件孔、窝的表面粗糙度 $Ra \leq 1.6\mu\text{m}$,其他指标如图 1-3 所示。

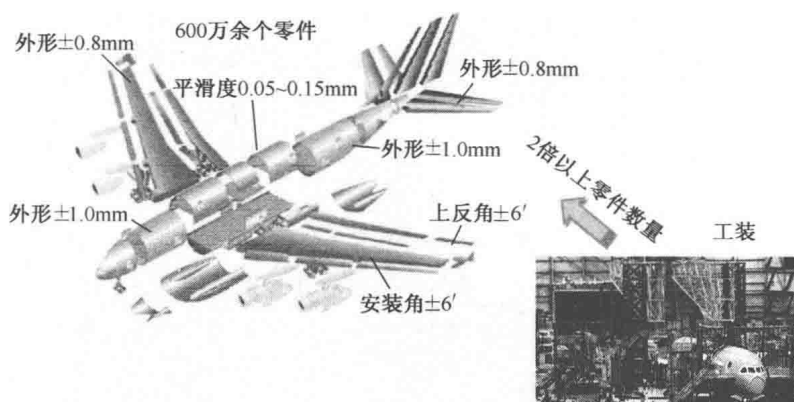


图 1-3 大型飞机装配精度要求

由于我国飞机零件制造水平的局限,以及国外对我国的技术封锁,使得我国薄壁件装配精度、装配效率以及良品率方面,与国外先进水平都存在较大的差异,其研究难点表现在以下三点:

(1) 壁板变形机理复杂。大型飞机的壁板长度超过 10m,厚度不均匀 ($2 \sim 12\text{mm}$),同一块壁板曲率变化大、壁板曲面种类多(单曲、双曲),在装配过程中易受重力、制孔力、连接力等装配作用力,与自身尺寸误差耦合作用产生复杂的装配变形。

(2) 壁板变形传递规律复杂。壁板装配过程包括定位、夹紧、钻孔、连接多个步骤,每一个阶段壁板受力情况均不相同,壁板变形沿着工艺流程传递、累积,造成壁板装配过程难以进行、装配精度难以得到保证。

(3) 壁板变形难以补偿。壁板装配过程是铆钉/螺钉的连接过程,壁板变形造成壁板上成百上千的连接点位都偏离了理想位置,目前工程中采用实际测量

反馈误差数值补偿的方法,效率低且对于装配过程中的变形难以实时补偿,此外,连接点位法向的误差直接影响壁板连接质量以及壁板服役寿命。

因此,薄壁件装配变形分析与控制技术是跨力学、数学、材料、飞机制造等多学科的复杂问题,并且与装配工艺密不可分,不同的装配工艺下,变形分析过程、侧重点、变形控制策略都会不同。近年来,数字化装配技术在航空、航天等领域内的应用,使得薄壁件在装配中的变形衍生机理、传递方式、变形控制与补偿策略等的研究工作成为当前科研和生产中亟需解决的重要课题。

1.2 数字化装配在薄壁件装配中的应用

自从 20 世纪 80 年代以来,随着 CAD/CAM 技术、计算机信息技术、自动化技术和网络技术的发展,数字化技术逐步应用到薄壁件装配中,成为提升产品可靠性、疲劳寿命、安全性、可维修性的有效途径。其发展趋势是自动化、柔性化、模块化,以满足薄壁件装配中对装配效率和装配精度的要求。薄壁件装配主要涉及定位、制孔、连接等工艺过程^[5],也是容易产生装配变形的关键过程,因此下面分别对薄壁件数字化定位、制孔、连接等进行介绍。

1.2.1 数字化定位

国外在飞机装配中采用的先进定位技术,如表 1-1 所列。

表 1-1 先进定位技术在飞机装配中的应用

定位技术	应用级别	应用对象	说 明
数字化定位技术	部件对接	机身、机翼交点对接定位	
特征定位技术	组、部件装配	骨架零件定位	
		蒙皮或壁板与机加长桁之间的定位	
柔性定位技术	组、部件装配	蒙皮或壁板定位	修切定位
			组合装配定位
			在骨架上的定位
		机翼翼梁装配定位	
		具有较高协调要求的骨架零件定位	
	部件对接	机身、机翼等部件定位	

1. 数字化定位技术

数字化定位技术是指针对飞机产品的结构特点、定位要求,借助数字化测量设备或系统进行飞机零部件的定位。它是数字化测量技术在飞机装配中的一种

应用形式。目前国际上已经使用的数字化定位系统主要有激光跟踪仪(图 1-4)、IGPS 定位系统(图 1-5)、照相测量定位系统、激光准直定位系统等。

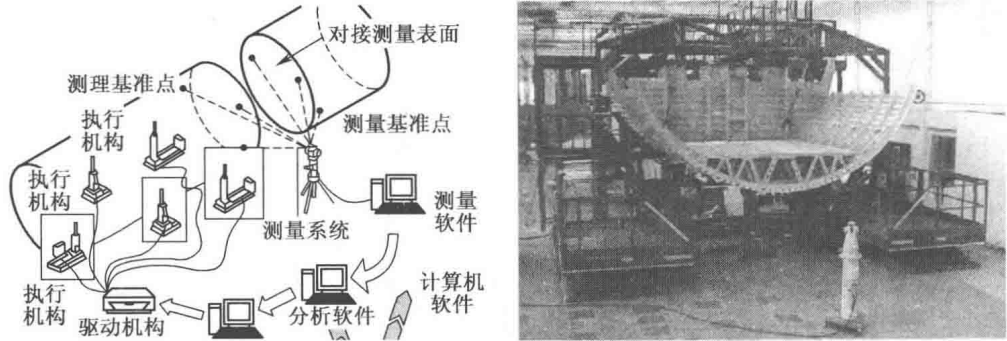


图 1-4 单台激光跟踪仪进行部件装配

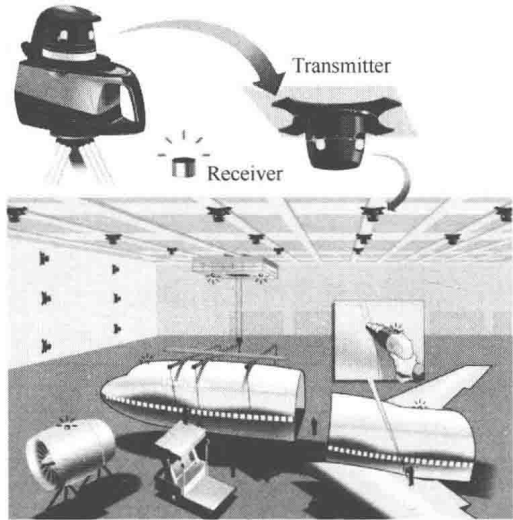


图 1-5 IGPS 在飞机中装配中的应用

2. 特征定位技术

作为面向制造和装配设计理念的一部分,特征定位技术利用数字化定义、数控加工的具有配合关系的配合面、装配孔或工艺凸台、工艺孔等设计或工艺特征,实现零件之间的相互定位,保证装配的一致性和高装配质量。特征定位包括配合面定位(自定位)和孔系定位。孔系定位技术在波音 747、波音 757、波音 767、波音 787、A430-600、A380 等飞机的装配中已经得到广泛的应用,主要用于骨架以及壁板、长桁的装配定位。

3. 柔性定位技术

柔性定位技术是指通过采用柔性工装满足不同产品的定位需要(图 1-6)。柔性装配工装基于产品数字量尺寸协调体系,具有模块化、可重组、自动化的特

点。柔性装配工装在国外飞机制造中的典型应用有壁板柔性装配工装、翼梁柔性装配工装、水平安定面升降舵柔性装配工装、机身柔性装配工装、总装柔性对接工装系统等。

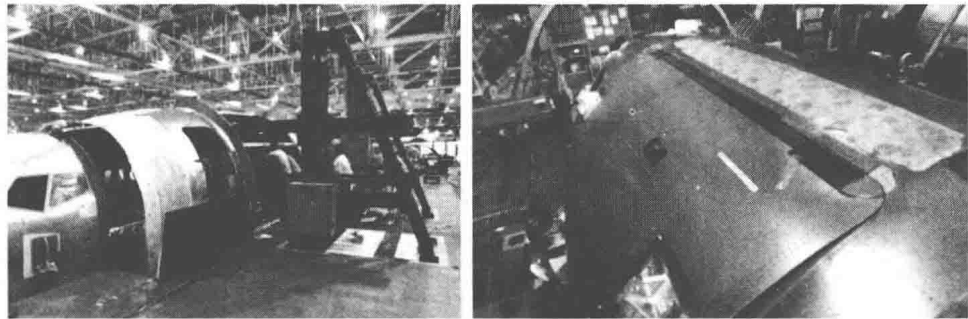


图 1-6 波音 737 机身壁板柔性装配定位

1.2.2 自动精密制孔

国外飞行器结构所应用的柔性自动化制孔技术现状及其发展包括自动制孔机床系统、柔性导轨自动制孔系统、机器人自动制孔系统、柔性制孔系统等几个方面。

自动制孔机床系统对批量生产的大型构件可以实现高速、高质量、低成本的自动柔性制孔。BROTJE 公司的 iGantry 龙门自动制孔机床系统(图 1-7)由集成式工件托架定位装置、龙门高速钻铆机、智能铆钉自动选择系统和控制系统组成。通用夹紧装置将工件夹持在一个固定位置进行紧固操作,高速龙门紧固系统通过 12 根控制轴实现上部和下部工装紧固头定位,使其垂直于工件外部模线,该系统能够达到每分钟 18 个铆钉装配,且对工件形状尺寸没有严格要求。EI 公司在 A380 第一阶段机翼壁板装配所用为轻便式 CNC 自动制孔设备 GRAWDE(Gear Rib Automated Wing Drilling Equipment)和 HAWDE(Horizontal Automated Wing Drilling Equipment)。GRAWDE 的特点是能从可拆卸的底座分离,并可安装到装配工装的不同位置进行制孔。HAWDE 是一种卧式自动化机

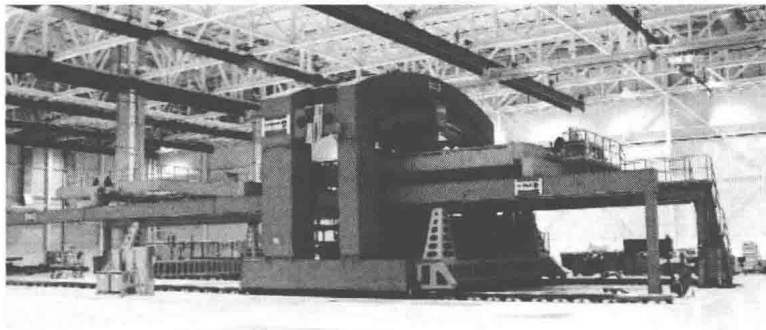


图 1-7 iGantry 自动制孔机床系统

翼制孔系统,其独特性在于可以沿装配工装升降,并在不同位置上运行。最有特色的是该系统可以自动动态校正刀具轴,精度可以达到 $\pm 150\mu\text{m}$ 。

机器人自动制孔系统(图 1-8)具有占用空间小、自动化程度高等特点,在国外已经得到了广泛的研究和应用。机器人自动制孔系统主要由工业机器人、机器人导轨、制孔末端执行器、测量系统、工件等组成。美国 Electroimpact 公司与英国空客公司联合设计了一套机器人自动钻削系统 ONCE (ONe-sided Cell end Effector),用于波音 F/A-18E/F“超级大黄蜂”后缘襟翼的钻孔、测孔,波音 787 可移动式后缘钻孔,波音 737 副翼钻孔,洛克希德·马丁公司的 F-35 飞机碳纤维环氧复合材料机翼上壁板制孔用的钻孔系统。该系统带有便携、灵活、低成本且重量轻的机器人,它使用激光定位系统、电磁马达和压力脚进行精密钻孔,加快了装配过程,并形成紧配合,产生的表面光滑,间隙小,满足了 F-35 飞机气动和耐久性的要求。由于具有上述优势,F-16、F-22、F-2 和 T-50 项目都对该系统进行评估并准备用于相应的装配作业。

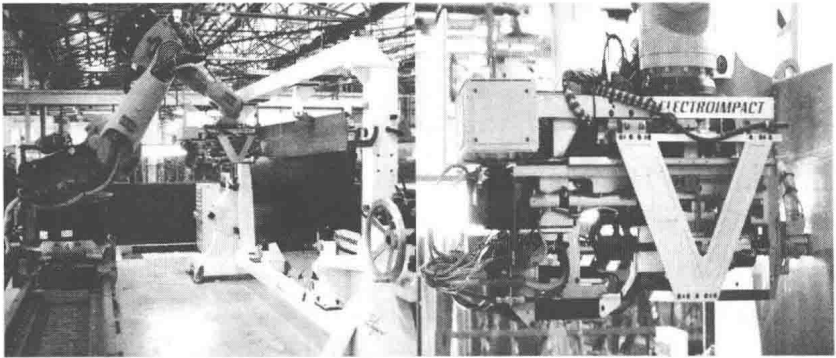


图 1-8 机器人自动制孔系统

柔性导轨自动制孔系统(图 1-9)由可弯曲导轨系统和主轴头组成,可弯曲,可以适应不同曲率半径表面。具有低成本、高柔性、占用空间小等特点。可用于机身周向对接、机翼蒙皮与梁、肋连接制孔。

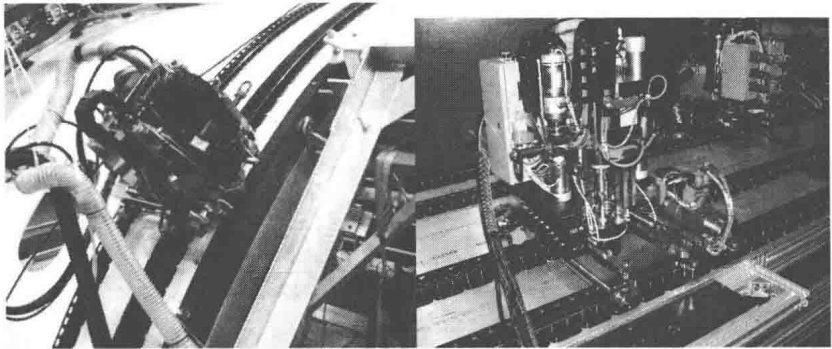


图 1-9 柔性导轨自动制孔系统

1.2.3 长寿命可靠连接

国外对长寿命可靠连接技术的研究与应用,主要从自动钻铆技术、电磁铆接技术、机器人钻铆技术等角度展开,在航空装配领域取得了大量的研究成果并形成了系统应用。

自动钻铆技术自从 20 世纪 50 年代开始起步,经历了手动、半自动化、全自动化等阶段,在其发展过程中,相继应用了各学科的技术,如自动控制、传感器、计算机仿真、计算机远程控制和远程通信以及机器人等领域中的新技术和新工艺,因此,其逐渐向多任务集成、智能化、网络化方向发展^[12]。

美国 GEMCOR 公司(通用电气机械公司)是自动钻铆机的最早制造厂商,自第二次世界大战之后,该公司就开始发展自动钻铆技术,它是向世界各国飞机制造行业提供自动钻铆机的主要厂商之一。经过半个多世纪的发展,产品型号繁多。公司生产的自动钻铆机主要型号有 G200、G300、G400、G900、G666、G39A、G4013、G4026、G5013,如图 1-10 所示。其中 G200、G400 型是较早的型号,G300 为比较通用的型号,而 G900 型的功能比较齐全。具有无头铆钉钻铆功能的型号有 G900、G666、G39A、G4013、G4026、G5013。近几年无头铆钉的工作原理有所发展,机床采用 GEMCOR 专利的 SQUEEZE/SQUEEZ 双挤铆方式,先预挤铆,再进行挤铆,不仅能保证上下铆头同步成形上下镦头,而且铆接质量大大提高。各种型号机床可通过改变下顶头形状和尺寸来适应各种结构的要求。GEMCOR 生产的数控托架(也称自动定位系统)有 G63、G79、86、G91、G93、G95、G2000,如图 1-11 所示。

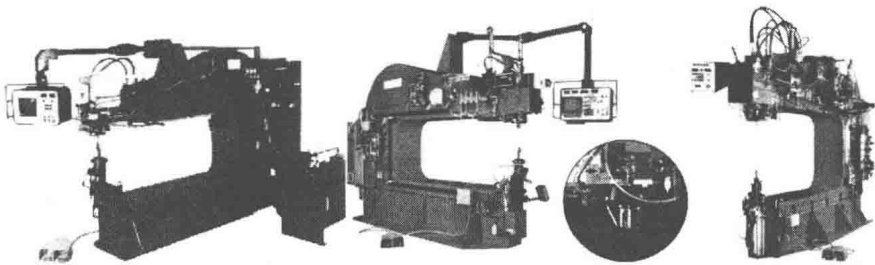


图 1-10 G200BHX、G300BDH、G900BCHV 型自动钻铆机

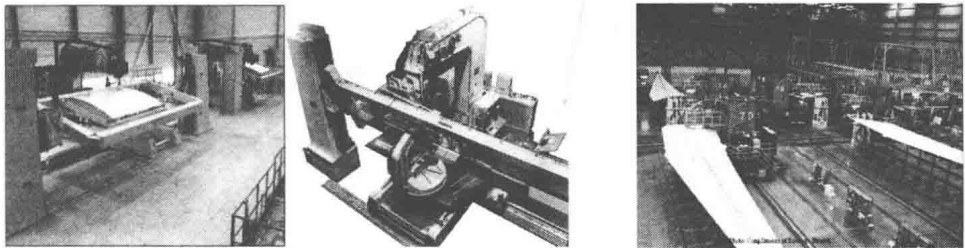


图 1-11 GEMCOR 带托架的自动钻铆系统

Electroimpact(EI)公司是一家 1986 年成立的迅速发展的研制开发高自动化龙门卧式铆接装配系统的有潜力的公司。EI 公司生产的自动钻铆系统有 E4000、E4100、E4380、E5000 等型号,如图 1-12 所示,其均为龙门卧式结构,根据铆接对象的不同组建不同的自动装配单元。E4000 用于组建空客 A320 E4000 的机翼壁板装配系统,E4100 则用在空客 A340 E4100 机翼壁板装配系统和空客柔性高速钻铆系统,其适用于空客 A330/340、A319/320/321 和 A300 机翼壁板的装配。E4380 为空客 A380 E4380 机翼壁板装配系统的主要部分,E5000 为装配波音的 C17 的翼梁而定制。EI 公司采用电磁铆接,其特点为电磁力大,速度快,更适合大铆钉、大型机翼壁板的铆接。由于采用卧式主轴结构,铆接时工件不动,故铆接质量高。EI 公司直接在 CATIA V5 平台上开发的脱机编程系统可实现数字化铆接。

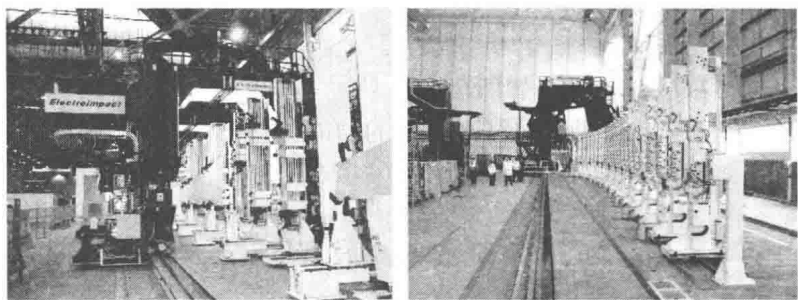


图 1-12 Electroimpact 自动钻铆系统

德国在发展自动钻铆技术方面,凭借其雄厚的资金、技术力量,一方面大量引进先进的自动钻铆系统和柔性装配系统,另一方面自己也积极研制开发高自动化的铆接装配系统。德国的自动钻铆技术虽然起步比较晚,但已比较先进,脱机编程系统已应用成熟,可与 CATIA V5 进行数据交换,实现装配过程的动态仿真,仿真结果可以直接用于自动钻铆系统,实现数字化铆接,如图 1-13 所示为 BRÖTJE 自动钻铆仿真系统。

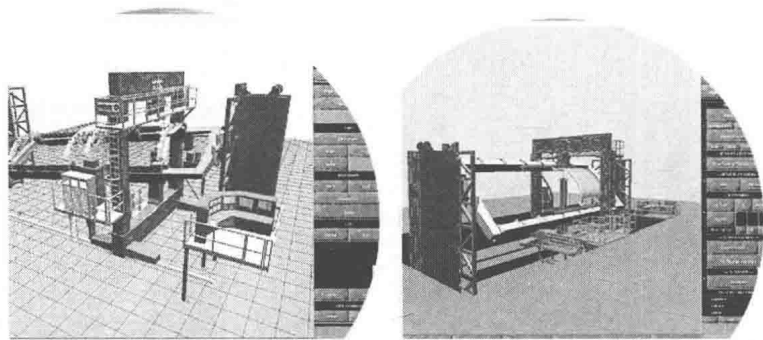


图 1-13 BRÖTJE 自动钻铆仿真系统