



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

民机飞行控制技术系列

主编 林忠钦

民用飞机自动化 装配系统与装备

Civil Aircraft Automatic
Assembly System and Equipments

张平 罗水均 等编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

民机先进制造工艺技术系列

主 编 林忠钦

民用飞机自动化 装配系统与装备

Civil Aircraft Automatic
Assembly System and Equipments

张 平 罗水均 等编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书阐述了民用飞机自动化装配系统与各种装备系统、装备的基本工作原理与关键技术,涵盖民用飞机装配协调体系、数字化工艺设计和公差设计、柔性装配工装设计、自动化制孔仿真与离线编程、自动钻铆工艺技术、柔性装配生产线规划等内容,并重点讲述了部分系统的应用要点和应用实例。

本书可供高等学校、科研院所以及相关行业从事自动化装配的研究生、科技工作者与工程技术人员使用,也可供从事飞行器设计与制造的相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

民用飞机自动化装配系统与装备/张平等编著. —上海:

上海交通大学出版社,2016

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-16440-7

I. ①民… II. ①张… III. ①民用飞机—装配(机械)

IV. ①V262.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 312043 号

民用飞机自动化装配系统与装备

编 著:张 平 罗水均 等

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:郑益慧

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:229千字

版 次:2016年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-16440-7/V

定 价:80.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:12.25

印 次:2016年12月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-68180638

大飞机出版工程

丛书编委会

总主编

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司董事长）

马德秀（上海交通大学原党委书记、教授）

编委（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘洪（上海交通大学航空航天学院副院长、教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

沈元康（中国民用航空局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学原副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

金兴明（上海市政府副秘书长、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅山（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

民机先进制造工艺技术系列

编 委 会

主 编

林忠钦（上海交通大学常务副校长、中国工程院院士）

副主编

姜丽萍（中国商飞上海飞机制造有限公司总工程师、研究员）

编 委（按姓氏笔画排序）

习俊通（上海交通大学机械与动力学院副院长、教授）

万 敏（北京航空航天大学飞行器制造工程系主任、教授）

毛荫风（中国商飞上海飞机制造有限公司原总工程师、研究员）

孙宝德（上海交通大学材料科学与工程学院院长、教授）

刘卫平（中国商飞上海飞机制造有限公司副总工程师、研究员）

汪 海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

陈 洁（中国商飞上海飞机制造有限公司总冶金师、研究员）

来新民（上海交通大学机械与动力工程学院机械系主任、教授）

陈 磊（中国商飞上海飞机制造有限公司副总工程师、航研所所长、研究员）

张 平（成飞民机公司副总经理、技术中心主任、研究员）

张卫红（西北工业大学副校长、教授）

赵万生（上海交通大学密歇根学院副院长、教授）

倪 军（美国密歇根大学机械工程系教授、上海交通大学密歇根学院院长、教授）

黄卫东（西北工业大学凝固技术国家重点实验室主任、教授）

黄 翔（南京航空航天大学航空宇航制造工程系主任、教授）

武高辉（哈尔滨工业大学金属基复合材料与工程研究所所长、教授）

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和运用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008年5月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教1时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理50多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》),由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》)等国外最新科技的结晶;国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作;也有《民机设计1000问》《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助,体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果,具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性,既可作为实际工作指导用书,亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养,有益于航空工业的发展,有益于大飞机的成功研制。同时,希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空,并投身于中国航空事业做出一点贡献。

纪涌芳

2009年12月15日

序

制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。《中国制造 2025》提出,坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展,加快从制造大国转向制造强国。航空装备,作为重点发展的十大领域之一,目前正处于产业深化变革期;加快大型飞机研制,是航空装备发展的重中之重,也是我国民机制造技术追赶腾飞的机会和挑战。

民机制造涉及新材料成形、精密特征加工、复杂结构装配等工艺,先进制造技术是保证民机安全性、经济性、舒适性、环保性的关键。我国从运-7、新支线 ARJ21-700 到正在研制的 C919、宽体飞机,开展了大量的工艺试验和技术攻关,正在探索一条符合我国民机产业发展的技术路线,逐步建立起满足适航要求的技术平台和工艺规范。伴随着 ARJ21 和 C919 的研制,正在加强铝锂合金成形加工、复合材料整体机身制造、智能自动化柔性装配等技术方面的投入,以期在宽体飞机等后续型号的有序可控生产奠定基础。但与航空技术先进国家相比,我们仍有较大差距。

民机制造技术的提升,有赖于国内五十多年民机制造的宝贵经验和重要成果的总结,也将得益于鉴国外的优秀出版物和数据资料引进。因此有必要编著一套以“民机先进制造工艺技术”为主题的丛书,服务于在研大型飞机以及后续型号的开发,同时促进我国制造业技术的发展和紧缺人才的培养。

本系列图书筹备于 2012 年,启动于 2013 年,为了保证本系列图书的品质,先后召开三次编委会会议和图书撰写会议,进行了丛书框架的顶层设计、提纲样章的评审。在编写过程中,力求突出以下几个特点:①注重时效性,内容上侧重在目前民机

研制过程中关键工艺;②注重前沿性,特别是与国外先进技术差距大的方面;③关注设计,注重民机结构与制造问题的系统解决;④强调复合材料制造工艺,体现民机先进材料发展的趋势。

该系列丛书内容涵盖航空复合材料结构制造技术、构件先进成形技术、自动化装配技术、热表特种工艺技术、材料和工艺检测技术等面向民机制造领域前沿的关键性技术方向,力求达到结构的系统性,内容的相对完整性,并适当结合工程应用。丛书反映了学科的近期和未来的可能发展,注意包含相对成熟的内容。

本系列图书由中国商飞上海飞机制造有限公司、中航工业成飞民机公司、沈阳飞机设计研究所、北京航空制造工程研究所、中国飞机强度研究所、沈阳铸造研究所、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、上海交通大学、西安交通大学、清华大学、哈尔滨工业大学和南昌航空航天大学等单位的航空制造工艺专家担任编委及主要撰写专家。他们都有很高的学术造诣,丰富的实践经验,在形成系列图书的指导思想、确定丛书的覆盖范围和内容、审定编写大纲、确保整套丛书质量中,发挥了不可替代的作用。在图书编著中,他们融入了自己长期科研、实践中获得的经验、发现和创新,构成了本系列图书最大的特色。

本系列图书得到2016年国家出版基金的资助,充分体现了国家对“大飞机工程”的高度重视,希望该套图书的出版能够真正服务到国产大飞机的制造中去。我衷心感谢每一位参与本系列图书的编著人员,以及所有直接或间接参与本系列图书审校工作的专家学者,还有上海交通大学出版社的“大飞机出版工程”项目组,正是在所有工作人员共同努力下,这套图书终于完整地呈现在读者的面前。我衷心希望本系列图书能切实有利于我国民机制造工艺技术的提升,切实有利于民机制造行业人才的培养。



2016年3月25日

前 言

进入 21 世纪,航空运输业呈现快速增长的态势,拉动了航空制造业尤其是民用飞机产业的快速发展。根据波音、空客、中航工业对民机市场的预测,亚太航线将会主导大型客机市场,对客机最大的需求来自于美国、中国和英国的航空公司,其中,中国航空客货运输的增长速度均高于同期全世界航空运输的平均发展速度,到 2023 年,中国民航客机机队规模将达到 2000 多架。纵观美国和欧洲航空工业的发展,都是在政府的大力扶持下逐步成长起来的,目前波音和空客两大航空巨头几乎垄断了世界航空市场,我国大力发展大飞机项目,正是要打破这一格局。只有拥有自己的关键技术,不断掌握先进技术并实现产业化,不断提高效率和产品质量,降低制造和运营成本,才能立足于市场并发展壮大。

大型民用飞机项目已列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,国家工信部发布的《2013—2020 民用航空中长期发展战略规划》中指出:大力推进科学技术进步,强化和完善科研体系,突破重大工程技术,强化技术基础,全面推进数字化技术应用,民用飞机产业化实现重大跨越,到 2020 年,民用飞机产业年营业收入超过 1000 亿元。由此将带动飞机制造上下游产业链快速发展。但目前我国的民用飞机设计制造水平离国际先进水平尚有不少差距,尤其是飞机装配柔性化、自动化水平差距较大

装配是飞机研制过程的关键环节,飞机装配工作量约占整个飞机制造工作量的 1/3 左右,其装配连接方式以铆接为主。近十余年来,国外飞机装配技术发展迅速,以波音 B787、空客 A380、A350 等为代表的新一代民机纷纷采用数字化装配系统进行机体结构的自动化、柔性装配。我国飞机装配目前还主要依赖于手工装配,大量采用成套的专用装配型架,成本高,装配效率低,在当前民机需求日益旺盛的市场环境下,装配已成为飞机研制和批生产的瓶颈。因此,迫切需要研制自动化的钻铆装备和柔性装配系统。

民用飞机自动化装配系统与装备涉及技术复杂,基本涵盖了数字化设计制

造技术、信息化技术、自动控制技术、精确制造技术、数字化检测技术、系统集成技术等,国内技术基础薄弱,加之国外关键技术封锁,导致国内在自动化装配系统与装备研究应用进展缓慢,将直接影响民用飞机的产业化规模。

自2000年以来,中航成飞民用飞机有限责任公司(以下简称成飞民机)通过多年的民机研制,积累了一定的经验和技術基础,尤其是自动钻铆系统、柔性装配系统、自动制孔系统的研究应用方面,在大飞机重大专项的支持下,通过资源整合及与国内高等学校、科研院所和行业企业合作,近年来相继承担了国家民用飞机科研专项、四川省科技计划项目等研究项目,通过产学研合作研究,取得了关键技术突破,自动钻铆技术成功应用于大飞机研制。国内航空企业和高校瞄准大飞机重大科研专项,在机器人自动化制孔系统、自动化装配生产系统等研究应用方面,也取得了不少成果。

本书是航空企业和高等学校多年研究工作的系统总结和提炼,内容涵盖了基本原理和工具方法,图文并茂地阐述了自动化装配系统与装备的用途、性能指标、工作原理,及其关键制造技术在飞机研制中的实际应用。本书基于民用飞机自动化装配工艺装备研发实践编著,既有理论方法,又有实际应用案例,内容丰富。第1章绪论,由成飞民机陈勇撰写;第2章民用飞机数字化装配工艺规划,由北京航空航天大学梅中义撰写;第3章民用飞机柔性装配工装系统,由成飞民机杨启兵撰写;第4章机器人自动化制孔系统,由南京航空航天大学王珉撰写;第5章自动钻铆系统,由成飞民机李少波撰写;第6章民用飞机自动化装配生产线,由上海飞机制造公司组织撰写。全书由成飞民机罗水均统稿、修改,由成飞民机张平审定,由成飞民机王焰提供编著指导。

最后,感谢上海交通大学出版社对本书出版给予的大力支持。

由于作者水平有限,书中的遗漏和错误之处恳请读者批评与指正。

编著者

2016年10月

目 录

- 1 绪论 1
 - 1.1 民用飞机的装配 1
 - 1.1.1 飞机装配概述 1
 - 1.1.2 飞机装配的一般过程 4
 - 1.1.3 飞机装配工艺装备 6
 - 1.1.4 飞机装配的发展趋势 9
 - 1.2 民用飞机自动化装配系统与装备 16
 - 1.2.1 民用飞机自动化装配的概念 16
 - 1.2.2 民用飞机自动化装配的装备 17
 - 1.2.3 民用飞机自动化装配系统 21
 - 参考文献 23

- 2 民用飞机数字化装配工艺规划 24
 - 2.1 飞机装配协调体系 24
 - 2.1.1 传统实物标工协调技术 24
 - 2.1.2 飞机主几何的发展 26
 - 2.1.3 数字化协调体系 26
 - 2.2 飞机装配数字化工艺设计 29
 - 2.2.1 飞机数字化工艺设计流程 29
 - 2.2.2 基于MBD的数字化装配工艺设计及应用流程 31
 - 2.2.3 基于DELMIA的飞机装配工艺设计 39
 - 2.3 飞机装配数字化公差设计 40
 - 2.3.1 尺寸链原理 40
 - 2.3.2 飞机装配容差分析 42
 - 2.3.3 基于特征的MBD容差建模 43

- 2.3.4 基于 DELMIA 的面向装配的容差分析技术 47
- 2.4 数字化飞机装配工艺仿真和优化 51
 - 2.4.1 数字化装配仿真 51
 - 2.4.2 基于 DELMIA DPM 的数字化装配工艺设计和仿真 53
- 参考文献 56
- 3 民用飞机柔性装配工装系统 58**
 - 3.1 概述 58
 - 3.2 壁板类柔性装配工装设计 58
 - 3.2.1 壁板类柔性装配工装工作原理 58
 - 3.2.2 壁板类柔性装配工装技术规格的确定 58
 - 3.2.3 壁板类柔性装配工装系统组成 59
 - 3.3 大部件对接柔性装配工装设计 64
 - 3.3.1 工艺需求的确定 64
 - 3.3.2 柔性装配工装总体设计 65
 - 参考文献 79
- 4 机器人自动化制孔系统 80**
 - 4.1 概述 80
 - 4.2 自动化制孔系统原理 82
 - 4.2.1 工业机械臂制孔系统组成和原理 82
 - 4.2.2 柔性轨道制孔系统组成和原理 83
 - 4.2.3 自主移动式制孔系统制孔系统组成和原理 84
 - 4.3 自动化制孔末端执行器设计 88
 - 4.3.1 末端执行器设计概述 88
 - 4.3.2 制孔单元 89
 - 4.3.3 压紧单元 90
 - 4.3.4 法向检测单元 93
 - 4.4 机器人制孔仿真与离线编程 96
 - 4.4.1 机器人离线编程系统的概述 96
 - 4.4.2 机器人离线编程系统的组成 97
 - 4.4.3 精度补偿 100
 - 4.5 应用要点和应用实例 101
 - 4.5.1 基于工业机械臂的自动化制孔系统应用分析 104
 - 4.5.2 基于柔性轨道的自动化制孔系统应用分析 105

4.5.3 自主移动式自动化制孔系统 105

4.5.4 立柱式制孔系统 107

4.5.5 小结 107

参考文献 109

5 自动钻铆系统 110

5.1 概述 110

5.1.1 自动钻铆机及其技术概念 110

5.1.2 自动钻铆机及其技术经历的发展阶段 110

5.2 自动钻铆技术的基本原理 114

5.2.1 飞机铆接装配的典型工艺流程 114

5.2.2 自动钻铆机的加工原理 115

5.3 自动钻铆系统的组成 116

5.3.1 自动钻铆机 117

5.3.2 托架 119

5.3.3 辅助装置或设施 121

5.4 自动钻铆机(系统)技术的发展及其趋势 126

5.4.1 主机的技术发展 126

5.4.2 托架的技术发展 132

5.4.3 机器支撑(安装)平台和配置方式的发展 133

5.4.4 应用发展趋势 135

5.5 自动钻铆系统的应用工艺技术 136

5.5.1 自动钻铆工艺设计 136

5.5.2 自动钻铆系统的程编技术 138

5.5.3 自动钻铆系统的能效分析 140

5.5.4 自动钻铆系统的典型应用 142

5.5.5 自动钻铆系统的拓展应用 148

参考文献 149

6 民用飞机自动化装配生产线 150

6.1 民用飞机柔性装配生产线规划 150

6.1.1 民用飞机柔性生产线介绍 150

6.1.2 飞机柔性生产线规划 151

6.2 民用飞机自动化装配生产线系统 153

6.2.1 国外民用飞机生产线 153

- 6.2.2 飞机柔性生产线内容 155
- 6.3 波音 B737 装配生产线介绍 156
 - 6.3.1 波音 B737 生产线简介 156
 - 6.3.2 波音 B737 生产线特点 156
 - 6.3.3 波音 B737 移动生产线规划实施 157
 - 6.3.4 波音 B737 移动生产线系统 158
- 6.4 C919 装配生产线介绍 161
 - 6.4.1 C919 装配生产线规划 161
 - 6.4.2 C919 部装数字化车间建设 162
 - 6.4.3 C919 总装移动生产线建设 166
- 参考文献 170

索引 172

1 绪 论

1.1 民用飞机的装配

1.1.1 飞机装配概述

飞机研制的全过程,经历了概念设计、总体设计、详细设计、工艺技术准备、生产准备、装配、试飞、交付等多个阶段。

飞机装配是整个民用飞机研制过程中的一个重要环节,包括了组件装配、段件装配、部件装配和总装等过程^[1]。

组件装配是零件与零件的安装连接,如框组件、梁组件、壁板组件,如图 1-1 所示。

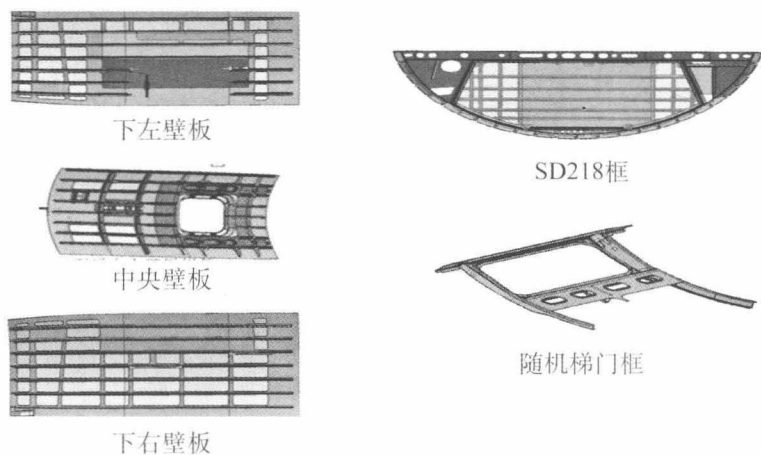


图 1-1 组件

段件装配主要是组件及零件的定位连接安装,以机体结构安装为主;如机头驾驶舱骨架装配、机头上部装配、机头下部装配,如图 1-2 所示。