

飞机装配工艺学

(修订本)

王云渤 张关康 冯宗律 胡凌云
陈唤民 郭忠信 王人骅

编



国防工业出版社

飞机装配工艺学

(修订本)

王云渤 张关康 冯宗律 胡凌云 编
陈唤民 郭忠信 王人骅

国防工业出版社

内 容 简 介

本书的主要内容包括：飞机装配过程和装配方法；飞机装配准确度；飞机装配中的连接技术；各类型结构的装配；飞机的总装配和机场工作；装配型架的设计与制造；保证互换与协调的方法等。

本书是为航空院校飞行器制造专业学生学习《飞机装配工艺学》课程编写的，可作为飞机设计专业的参考书，也可供从事飞机设计和飞机装配的技术人员参考。

飞机装配工艺学（修订本）

王云渤 张关康 冯宗律 胡凌云编

陈唤民 郭忠信 王人骅

责任编辑：蒋 怡

*

国防工业出版社出版

（北京市海淀区紫竹院南路23号）

（邮政编码：100044）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张20¹/₄ 462千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷 印数：0,001—1,100册

ISBN 7-118-00702-1/V·58 定价：4.00元

原版序言

飞机制造过程可划分为毛坯制造、零件加工、装配安装和试验四个阶段。

飞机的装配过程是：将大量的飞机零件，按一定组合和顺序，逐步装配成组合件、板件、段件和部件，最后将各部件对接成整架飞机的机体。在装配时，要准确地确定零件或装配件之间的相互位置，用一定的连接方法（铆接、螺接、胶接或焊接等）进行连接。

在装配过程中，或在装配以后，还要进行安装工作，即将各专业厂提供的发动机、各种仪表、设备和附件等安装在飞机上，用各种导管、电缆、拉杆等连接成系统。

飞机的装配和安装工作在飞机制造中占有重要的地位。在一般的机械制造中，装配和安装工作的劳动量占产品制造总劳动量的20%左右。而在飞机制造中，装配和安装工作的劳动量占飞机制造总劳动量的(50~60)%。首先是因为飞机构造复杂，零件和连接件的数量大。例如，一架歼击机就有将近二万个零件，有将近二十万个铆钉和螺栓连接件；一架大型飞机有大约十万个零件，二百多万个铆钉和螺栓连接件。其次，因为装配和安装工作的机械化和自动化程度比较低，手工劳动量占很大比重，劳动生产率低。飞机的装配和安装不仅劳动量大，而且质量要求高、技术难度大。因此，提高飞机装配和安装的技术水平，在飞机制造中具有重要意义。

飞机装配工艺学主要研究：如何合理地划分装配单元和制定装配路线，装配时工件的定位方法，保证装配准确度理论和方法，装配中所采用的各种连接技术，各种结构的装配方法和过程，装配型架（夹具）的构造与制造技术，保证工艺装备之间协调的原理和方法等。

本书主要讲述飞机的装配问题，但对飞机的总装配和安装工作以及飞机的地面试验和空中试飞检验也作了简要的概述。

本书首先论述了飞机装配的一些基本问题，包括装配单元的划分原则，装配时的定位方法，装配工艺过程，保证装配准确度和产品互换性的方法等。

连接技术在飞机装配工艺中占有重要地位。

目前，飞机装配中所采用的连接方法，仍以机械连接为主，大量采用铆接，并使用一部分螺栓连接。因铆接适用范围广，质量比较稳定，便于排除故障，费用低，故仍得到广泛应用。铆接的机械化和自动化的程度也在不断提高，有的甚至达到60%以上。为提高铆接的疲劳寿命和密封性能，在飞机制造中发展了干涉配合的连接技术。故本书对铆接及铆接结构装配作了较详细的论述。

为了提高飞机结构的抗疲劳性能和减轻结构重量，胶接应用的比重在不断增加，在有些飞机上（如B-58、L-1011、三叉戟等）胶接应用的比重较大。本书对胶接和胶接结构装配的一些基本问题进行了论述。

目前，飞机结构上所用的材料主要是硬铝合金，因其焊接性能不好，只能采用点焊。点焊的生产率虽比铆接高，但焊点的疲劳强度比铆接还低。而且，单纯用点焊，硬

铝合金的防腐蚀问题不好解决。因此，在飞机制造中发展了胶接和点焊的复合连接技术，这种连接方法在有些飞机上应用较多。熔化焊在飞机的结构上应用较少，钎焊的应用则更少。

飞机装配的另一个重要特点是，在装配中使用了許多复杂的装配型架(夹具)。在一般机械制造中，由于绝大部分零件是刚度大的机械加工件，机械制造的准确度主要取决于零件制造的准确度。在装配时，零件之间定位主要靠它们之间的配合表面，一般不需要用装配夹具。而在飞机制造中，由于大部分飞机结构零件是板金件，这些零件形状复杂、尺寸大、刚度小，很容易产生变形。飞机制造的准确度在很大程度上决定于装配的准确度。在装配时，必须使用复杂的装配型架来保证装配的准确度。而制造这些装配型架，又需要使用许多所谓标准工艺装备，以保证装配型架之间以及和零件工艺装备之间的协调。因此，装配型架的设计、制造，以及保证装配型架之间协调的方法，是飞机制造中所特有的技术问题。

本书是在北京航空学院飞行器制造教研室装配教学组历次编写的讲义基础上重新编写的。在这次编写过程中，还参考了有关书刊和资料，主要参考书目录见本书后面参考资料目录。

本书系集体编写，第一、五章由张关康编写；第二章由冯宗律编写；第三章由胡凌云编写；第四、六章由郭忠信编写；第八章由王人骅编写；序言、第七、九、十章由王云渤编写。本书由王云渤主编，书中的插图绝大部分是由门长华同志描的。

本书在编写过程中，有关院校和飞机工厂的许多同志提供了宝贵意见，有的提供了资料，在此表示感谢。

限于我们的水平，错误很难避免，请读者提出批评和指正。

编 者

修订版序言

本书是飞机装配工艺学 1984 年 6 月第一版的修订版。

这次修订的主要原则是加强理论性，增加新技术内容，精简部分具体内容。

根据上述原则，对原版第一章重新进行了编写，增加了飞机装配准确度和复合材料结构制造两章，对其余各章精简了部分具体内容。并对参考书目重新作了调整。

修订版的第一、七章由张关康编写；第三章由冯宗律编写；第四章由胡凌云编写；第五章由陈唤民编写；第六、八章由郭忠信编写；第十章由王人骅编写；第二、九、十一、十二章由王云渤编写。由航空航天工业部教材编审组副研究员刘述尧负责审校。第五章插图是由梅冰清描的，其余仍是门长华描的。

限于我们的水平，错误很难避免，请读者提出批评和指正。

编者

目 录

第一章 飞机装配过程和装配

方法

- 第一节 飞机结构的分解..... 1
- 第二节 装配基准..... 5
- 第三节 装配定位..... 8
- 第四节 装配工艺过程设计..... 19

第二章 飞机装配准确度

- 第一节 基本概念..... 35
- 第二节 各种装配方法的装配准确度分析..... 45
- 第三节 装配误差中各环节的误差..... 49
- 第四节 提高装配准确度的补偿方法..... 52

第三章 铆接和铆接结构装配

- 第一节 普通铆接..... 61
- 第二节 密封铆接..... 69
- 第三节 无头铆钉铆接..... 74
- 第四节 自动铆接..... 79
- 第五节 特种铆接..... 91
- 第六节 螺栓连接..... 96
- 第七节 组合件、板件装配..... 98
- 第八节 段件、部件装配..... 102

第四章 胶接和胶接结构装配

- 第一节 胶接接头的形成和特性..... 108
- 第二节 胶粘剂..... 113
- 第三节 胶接工艺过程..... 118
- 第四节 加温加压设备与胶接夹具..... 121
- 第五节 蜂窝夹层结构的制造..... 124
- 第六节 胶接质量无损检测..... 130
- 第七节 胶接质量控制..... 132

第五章 复合材料结构与制造

- 第一节 复合材料的界面与界面理论..... 136
- 第二节 增强材料——纤维..... 140
- 第三节 基体..... 146
- 第四节 无纬布制造..... 149
- 第五节 复合材料结构件成形工艺..... 150
- 第六节 复合材料结构件的机械加工..... 156
- 第七节 复合材料的质量控制..... 158
- 第八节 复合材料的质量检测..... 160

第六章 点焊和胶焊结构装配

- 第一节 概述..... 163
- 第二节 点焊原理..... 165
- 第三节 点焊质量的控制与检验..... 170
- 第四节 胶接点焊..... 173

第七章 飞机总装配及 机场工作

- 第一节 飞机总装配..... 179
- 第二节 机场车间工作..... 187

第八章 装配型架的设计

- 第一节 装配型架的功用及技术要求..... 189
- 第二节 装配型架设计的一般问题..... 192
- 第三节 型架骨架的构造..... 198
- 第四节 型架骨架的刚度..... 205
- 第五节 型架定位件及夹紧件..... 210
- 第六节 温度变化对型架准确度的影响..... 222
- 第七节 型架基础的设计..... 224

第八节 型架结构的简化及元件的
标准化 227

第九章 装配型架的安装

第一节 用通用测量工具安装型架 ... 234
 第二节 用标准样件安装型架 235
 第三节 用型架装配机安装型架 240
 第四节 用光学仪器安装型架 246
 第五节 用激光准直仪安装型架 254

**第十章 飞机制造中保证
互换性的方法**

第一节 飞机制造中互换性的基本
概念 259
 第二节 保证协调准确度的基本
方法 261
 第三节 模线和样板 266
 第四节 标准工艺装备 275

第五节 以模线-样板为基础的协调
系统 279

第六节 应用计算机辅助设计与制造
技术的协调系统 284

第十一章 生产工艺准备

第一节 概述 289
 第二节 新机研制阶段的生产工艺
准备 290
 第三节 生产工艺准备各项工作的
内容 291

第十二章 飞机构造工艺性

第一节 飞机构造工艺性的一般
概念 296
 第二节 提高飞机构造工艺性的主要
途径 297
 参考书目 307

第一章 飞机装配过程和装配方法

飞机装配过程就是将大量的飞机零件按图纸、技术条件进行组合、连接的过程。由于飞机结构复杂、零件及连接件数量多，大多数零件在自身重量下刚度较小，而组合成的外形又有严格的技术要求，故飞机装配除有一般机械产品装配的共同性原理外，还具有有一系列特点。

第一节 飞机结构的分解

飞机装配过程一般是由零件先装配成比较简单的组合件和板件，然后逐步地装配成比较复杂的段件和部件，最后将各部件对接成整架飞机。显然，飞机的装配过程，取决于飞机的结构。

根据飞机的结构和使用上的需要，飞机是由许多部件及可卸件组成的。图 1-1 为某歼击机的部件分解图。由于机翼和机身具有不同的功能，故有不同的结构，所以将机翼

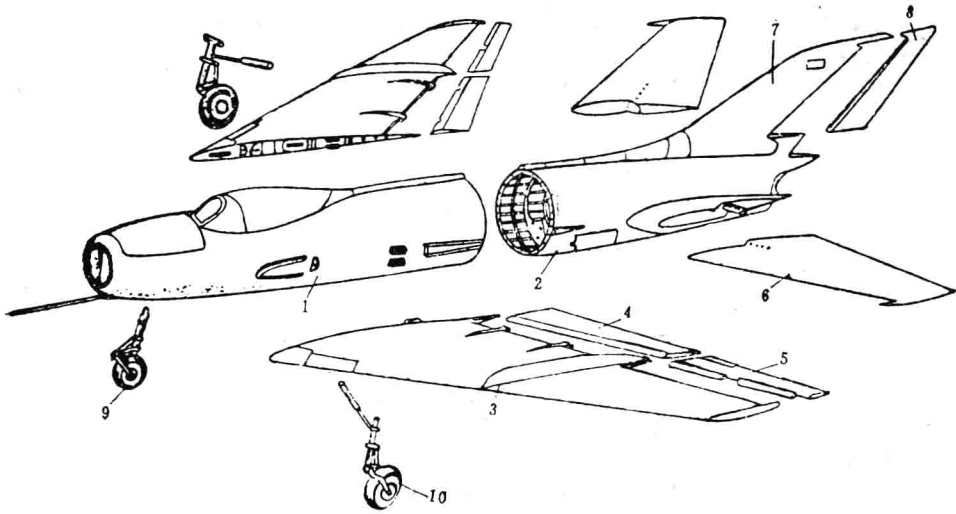


图1-1 飞机结构划分为部件

1—前机身，2—后机身，3—机翼，4—襟翼，5—副翼，6—水平尾翼，
7—垂直安定面，8—方向舵，9—前起落架，10—主起落架。

和机身设计成两个单独的部件；发动机装在机身内，为便于更换、维护和修理，将机身分为前机身和后机身；舵面相对于固定翼面要作相对运动，因此划分为单独部件。另外因使用上的需要，在某些部位需设计有可卸件，以便于维护、检查及装填用，如各种检查、装填舱口等。

飞机结构划分成许多部件和可卸件后，在部件与部件间、部件与可卸件间在结构上

形成了分离面，因这种分离面是为结构和使用需要而取的，故称为设计或使用分离面。这种分离面一般采用可卸连接，以便于在使用和维护过程中迅速拆卸和重新安装。

飞机仅划分为部件，不能满足装配过程的要求。为了生产需要，需将飞机结构进一步划分，即将部件进一步划分为段件，段件进一步划分为板件、组合件等各种装配单元，如图1-2、图1-3及图1-4所示。这种为满足生产需要而划分的分离面称工艺分离面，工艺分离面一般采用不可卸连接。

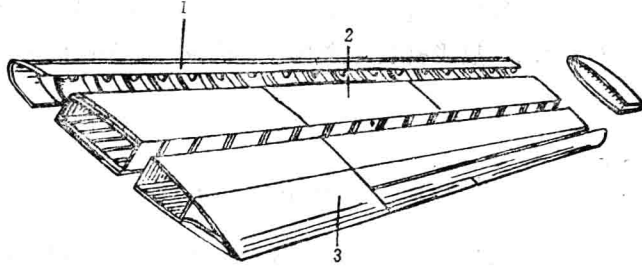


图1-2 机翼划分为段件示意图
1—前段；2—中段；3—后段。

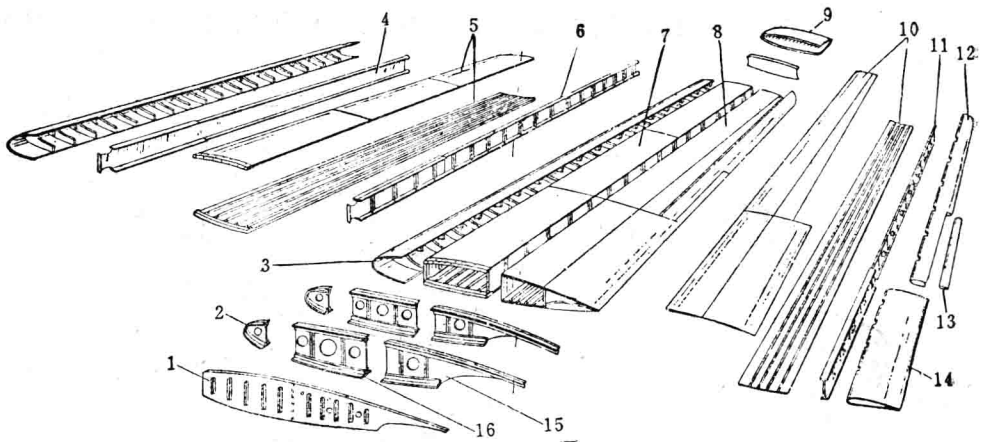


图1-3 机翼划分为段件和板件示意图
1—翼肋；2—翼肋前段；3—机翼前段；4—机翼前梁；5—机翼中段上、下板件；6—机翼后梁；7—机翼中段；8—机翼后段；9—翼尖；10—机翼后段上、下板件；11—机翼后墙；12—副翼；13—副翼调整片；14—襟翼；15—翼肋后段；16—翼肋中段。

工艺分离面的合理划分，有显著的技术经济效益。部件划分为段件后：

- (一) 增加了平行装配工作面，可缩短装配周期；
- (二) 减少了复杂的部件装配型架数量；
- (三) 由于改善了装配工作的开敞性，因而提高装配质量。

部件、段件进一步划分为板件后，具有特别重要的技术经济意义。

以铆接结构为例，结构划分为板件后：

- (一) 为提高装配工作的机械化和自动化程度创造了条件。

现国内外已设计有各种形式的自动铆接机。有的铆接机自动化程度很高，如可钻

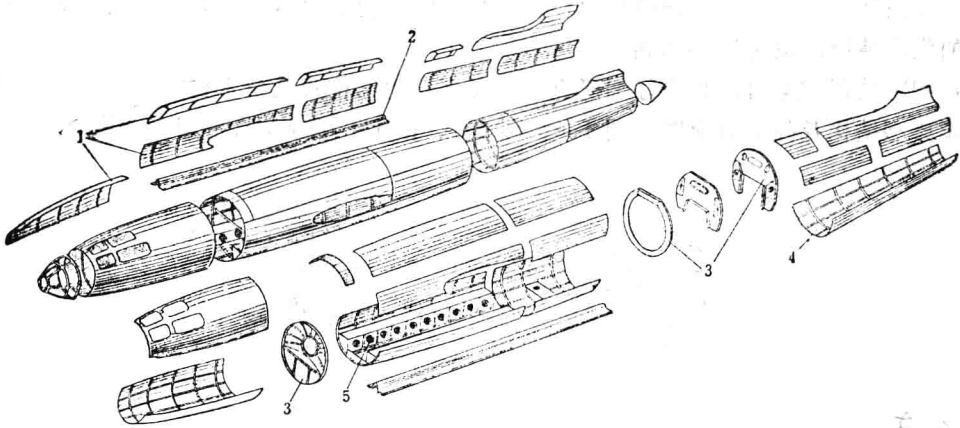


图1-4 机身各段划分为板件和组合件示意图

1—侧板件；2—中段大梁；3—隔框；4—机身后段下板件；5—机身中段下板件。

孔、铆窝、插入铆钉、铆接以及铣平埋头铆钉钉头等。若铆接机配置专用托架及计算机控制装置，可以自动调平、自动确定铆钉孔位置，进一步还可自动调整工艺参数。但现有铆接机一般只适用于板件结构，故部件板件化的程度已成为评定结构工艺性的重要指标之一。

(二) 有利于提高连接质量。

当部件划分为板件后，装配工作的开敞性好，连接工作可采用机械化设备。以铆接为例，可用压铆代替锤铆，因而改善劳动条件，提高产品质量，缩短装配周期。

因此，在结构设计中应尽量提高板件化程度。在现代飞机结构中，有些部件的板件化程度高达90%，根据统计资料，这可将劳动生产率提高1.35~3.3倍，装配周期缩短为 $2/3 \sim 3/4$ ，连接工作的机械化系数提高到80%。

从上可知，飞机结构的划分工作在飞机设计过程中应周密地进行考虑和研究，以设计出最合理的划分方案。这是一项极为重要的设计任务，因为它不仅要满足结构上和使用的要求，而且同时还要满足生产上的要求。

飞机结构的划分，其重要意义不仅表现在需要综合考虑结构、使用和生产上的要求，而且由于划分的结果，必然会涉及强度、重量和气动方面的问题。因此，在决定划分方案时，必须综合研究上述各方面的因素，分析矛盾的各个方面，以求得最合理的结构划分方案。

应当指出的是在飞机设计时，考虑工艺分离面的部位、形式和数量，必须从成批生产的要求出发。固然在新机设计阶段，还不能肯定是否投入成批生产，但在设计阶段如不考虑成批生产时对飞机划分所提出的要求，那么在试制以后，若转入成批生产，此时再增减或修改各种分离面的部位和形式，将会发生很大的困难，甚至是不可能的。

对于飞机结构上已具备的工艺分离面，在生产中是否加以利用，也就是在生产上是否按此分离面将工件分散装配，这取决于综合的技术经济分析结果。例如在机翼装配时，若结构上前、后梁处存在工艺分离面，当产量大时，可将前、后两段分别在两个装配型架上装配，然后将此两段在机翼总装型架上与机翼中段的板件及翼肋等装配成机翼。但在试造生产或小批量生产时，为减少装配型架的品种和数量，其装配工作可都在

机翼总装型架上完成，无需分段装配。换言之，即结构上固然有工艺分离面，但考虑到具体的生产情况，也可以不加利用。

在制定装配方案时，必须仔细研究飞机各部位的结构及其技术要求。图1-5为飞机各部位典型结构及技术要求图。图1-6、图1-7、图1-8分别表示机体外形要求、结构

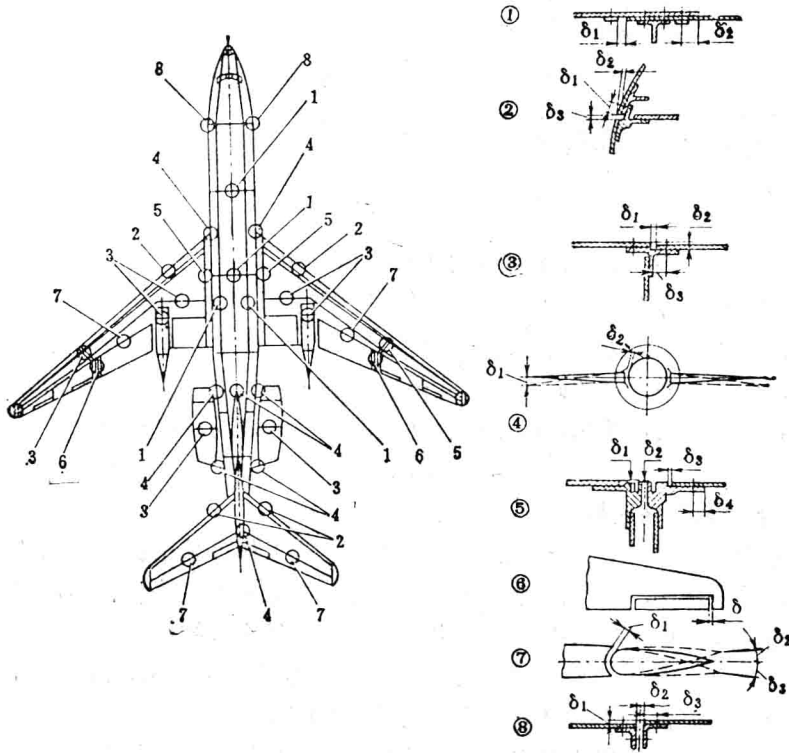


图1-5 飞机各部位典型结构及技术要求

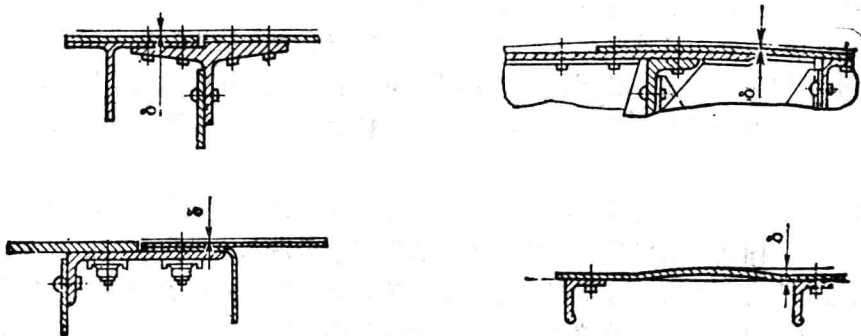


图1-6 机体外形要求

元件相对位置要求及部件相对位置要求图。显然，飞机的具体结构及技术要求直接影响装配方案的选择。为此，作为设计人员应具有丰富的工艺、生产知识，在飞机设计的各个阶段要进行工艺性审查。只有通过各方面的通力合作，才能设计出满足各方面要求的最合理的结构方案。

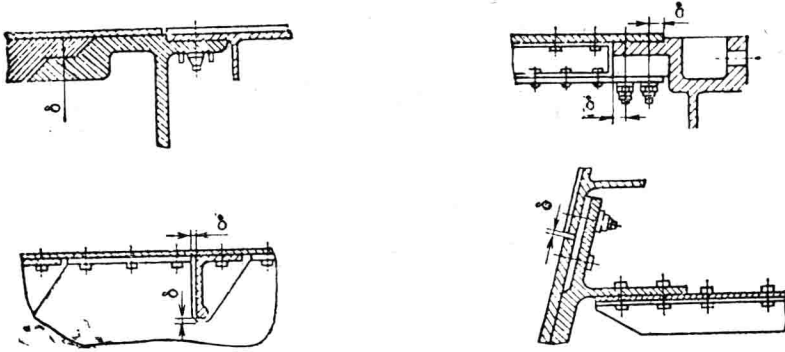


图1-7 结构元件相对位置要求



图1-8 部件相对位置要求

第二节 装配基准

飞机各部件外形准确度，关系到飞机的飞行性能。因此，在装配过程中，提高外形准确度是飞机装配中极为重要的一个问题。

在装配过程中，使用两种装配基准：以骨架外形为基准和以蒙皮外形为基准的装配，图 1-9 表示两种装配基准示意图。

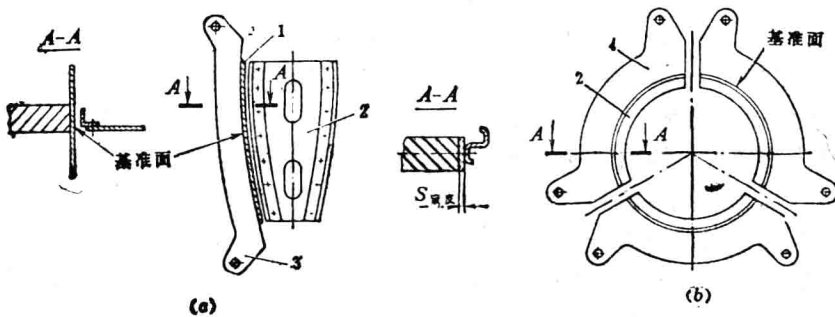


图1-9 装配基准示意图

(a) 以蒙皮外形为基准；(b) 以骨架外形为基准。

1—蒙皮；2—骨架；3—型架卡板；4—型架卡板。

以骨架外形为基准的装配示意图如图 1-10 所示。以图 1-10(a) 为例，其装配过程如下：首先将大梁和翼肋按型架定位，铺上蒙皮（或壁板），用橡皮绳或钢带紧压在骨架上，然后进行骨架与蒙皮（或壁板）的铆接。图 1-10(b) 的装配过程相同，只是橡皮绳换成卡板。图 1-10(c)、(d) 分别表示整体壁板、胶接结构以骨架外形为基准的装配过程。图中 H_1 、 D_1 为骨架外形尺寸， δ_1 、 δ_2 为蒙皮（或壁板）厚度， δ'_1 、 δ'_2 为

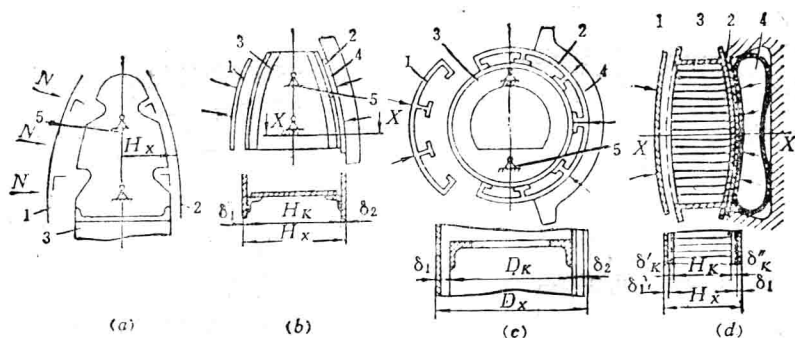


图1-10 以骨架外形为基准装配示意图

1—未安装到骨架上的蒙皮（或壁板）；2—安装到骨架上的蒙皮（或壁板）；3—骨架；
4—将蒙皮紧压到骨架上的型架元件（箭头表示压紧方向）；5—骨架定位器。

胶膜厚度， H_x 、 D_x 为装配后的外形尺寸。

这种以骨架外形为基准的装配方法，其误差积累是“由内向外”，最后的积累误差反映在部件外形上。部件外形误差由以下几项误差积累而成：

- (一) 骨架零件制造的外形误差；
- (二) 骨架的装配误差；
- (三) 蒙皮的厚度误差；
- (四) 蒙皮和骨架由于贴合不紧而产生的误差；
- (五) 装配连接的变形误差。

可见，为提高外形准确度，必须提高零件制造准确度、骨架装配准确度，在装配时必须将蒙皮（或壁板）紧贴在骨架上。但在外形要求较严的产品上，采取上述措施仍难满足要求。为此，在结构设计和装配基准上，出现了以蒙皮外形为基准的装配方法。

以蒙皮外形为基准的装配示意图如图 1-11 所示。图 1-11(a) 的装配过程如下：隔框（或骨架）按型架定位，通过撑杆将蒙皮（或壁板）紧贴在型架卡板上，通过补偿件将骨架与壁板连接在一起。图 1-11(b) 为整体壁板结构以蒙皮外形为基准的装配过程：将上、下壁板通过撑杆紧贴在型架卡板上，然后将上、下壁板连接在一起。图 1-11(c) 为自动发泡充填结构以蒙皮外形为基准的装配示意图。图中 H_F 为型架卡板的蒙皮外形尺寸， H_x 为装配后的外形尺寸。

这类结构装配的误差积累是“由外向内”的，积累的误差通过补偿结构来消除。部件外形准确度主要取决于装配型架的制造准确度，减少了零件制造误差、骨架装配误差对外形的影响。部件外形误差由以下几项误差积累而成：

- (一) 装配型架卡板的外形误差；
- (二) 蒙皮（或壁板）和卡板外形之间由于贴合不紧而产生的误差；
- (三) 装配连接的变形误差。

显然，采用什么基准进行装配取决于部件的结构。

图 1-12 是机翼中段以骨架外形为基准的装配示意图。首先按型架定位器及卡板定位大梁 1、2 及加强翼肋 3、4，进行梁与肋间的连接工作；按大梁上的角片及型架卡板定位普通翼肋，进行梁与普通翼肋间的连接工作；按定位器定位悬挂接头 8，并与梁

进行连接；根据大梁与翼肋组装后的骨架外形铺上长桁与蒙皮；关闭卡板，将蒙皮紧贴在骨架上，进行蒙皮与骨架间的连接工作。

图 1-13 是机翼中段以蒙皮外形为基准的装配示意图。首先将蒙皮与长桁组合成壁板，在中段型架上将壁板紧贴在卡板的 A 面上，此时按型架固定大梁及翼肋，由于大梁与翼肋无弦向分离面，装配时必然在梁与壁板间、翼肋与壁板间产生间隙，此时用结构补偿件补偿。

图 1-14 为机翼结构。由于前、中、后翼肋和前、后梁都有弦向分离面，就有可能预先分成壁板来装配，如上翼面可分解成三个壁板，下翼面也可分解成三个壁板。其装配过程如下：首先在机翼中段型架内将中段上、下壁板紧贴在卡板上，选择合适的垫片，将上、下半梁装配起来。再在机翼总装型架内将前、后段上、下壁板紧贴在卡板上，与机翼中段组合并铆接，这个装配过程就体现了以蒙皮外形为基准的装配方法。

近年来，由于飞机速度不断提高，一般采用厚蒙皮或整体壁板结构，这类零件和结构由于刚度较大，难以在装配型架内通过外力进行校形，这时在结构上和工艺上要采取其他措施，以确保外形准确度的要求。

图 1-15 为歼击机机翼梁架。梁架装配完后，在专用精加工台上进行外形加工。从梁架装配方法来看，其误差积累方向是“由内向外”的，但从精加工后的梁架外形看，其积累的误差通过精加工而消除了。

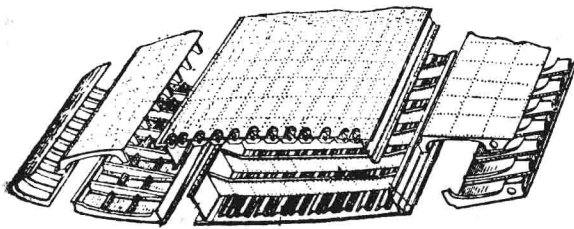


图1-14 有弦向分离面的壁板化机翼结构

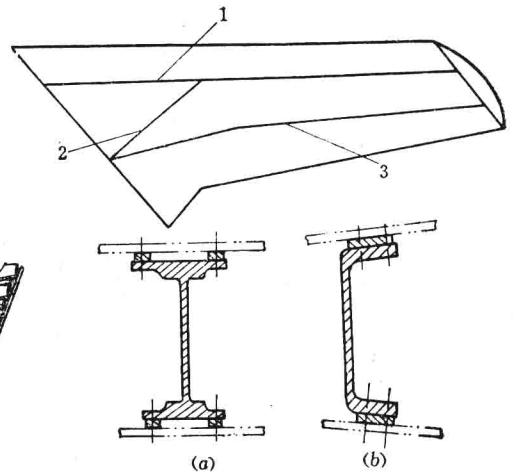


图1-15 机翼翼梁布置示意图
(a) 主梁剖面；(b) 前梁剖面。
1—前梁；2—主梁；3—后梁。

在确定装配基准时，要仔细研究部件结构，合理使用各种补偿结构，以达到装配后的准确外形。

第三节 装配定位

在装配过程中，要确定零件、组合件、板件、段件之间的相对位置，这就是装配定位。在装配工作中，对定位要求是：

(一) 保证定位符合图纸和技术条件所规定的准确度要求；

(二) 定位和固定要操作简单且可靠；

(三) 所用的工艺装备简单，制造费用少。

在飞机装配中，常用如下定位方法。

一、用基准零件定位

图1-16所示为作动筒按基准零件定位的装配过程。其中第一组件以杆1为基准零件，依次装配盖2、活塞3、垫圈4及螺帽5；第二组件是将接管嘴7装在筒体6上，再将

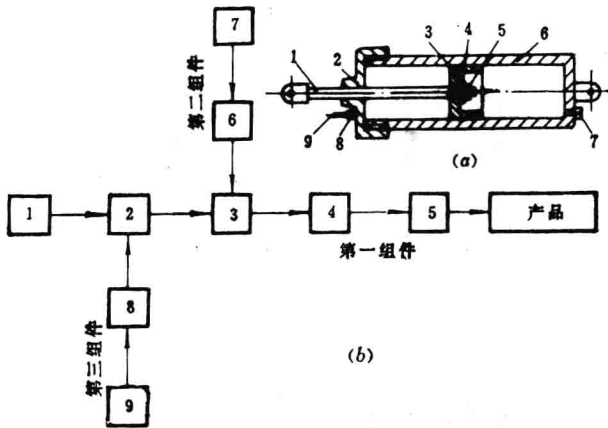


图1-16 按基准零件装配定位

(a) 作动筒简图；(b) 装配框图。

1—杆；2—盖；3—活塞；4—垫圈；5—螺帽；6—筒体；

7、8—接管嘴；9—软管。

该组件装在第一组件的基准零件活塞3上；第三组件是将接管嘴8及软管9装在第一组件的基准零件盖2上。

在一般机械产品中，大量采用以基准零件定位的装配定位方法。用这种方法定位时，要求零件有足够的刚度，且零件有较高准确度，在装配时一般没有修配或补充加工等工作。

在飞机制造中，液压、气动附件以及具有复杂空间结构的操纵控制机构，采用这种方法装配定位。

二、用划线定位

根据飞机图纸用通用量具划线定位，这种方法适用于零件刚度较大，位置准确度要求不高的部位。图1-17所示舱口盖按划线装配定位的装配过程：首先分别在铰链1、锁扣3上根据图纸尺寸划出中心线位置并冲出中心点；将铰链1、锁扣3按图纸尺寸放在圆板2上，并用弓形夹4固定；按中心点钻孔、铆接；取下弓形夹。为提高划线定位的效率，可以通过透明胶板，用接触照相法将结构尺寸、连接件的位置及形状晒在零件上，这样不仅节省划线时间，且提高零件的定位准确度。图1-17(d)为具有圆板、铰链及锁扣位置和外形以及连接铆钉中心位置的透明胶板。图1-17(e)为通过接触照相