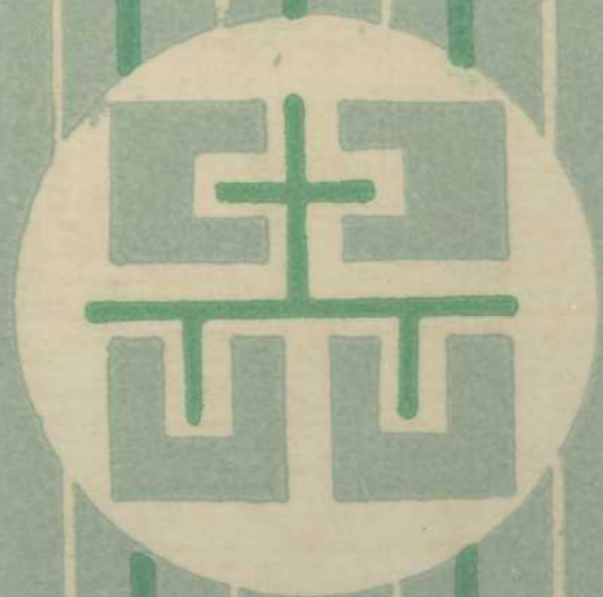


飞机制造工艺学

黄良 主编



航空工业出版社

V262
1004.1-5

号 101 字 登 录 (京)

飞机制造工艺学

黄 良 主 编



一九九五年九月廿六日

30742705

5

航空工业出版社

1993

742705

5301
74001
(京) 新登字 161 号

学 艺 工 造 制 飞

本书按该课程教学大纲编写,以结合飞机结构特点的工艺方法和工艺过程为重点,兼顾飞机制造传统工艺和计算机辅助技术,主要内容有:保证互换协调的方法、飞机各类零件(钣金成形件、整体结构机械加工件、复合材料构件)的制造工艺、典型部件的装配工艺和飞机总装配工艺,部件外形数模与计算机辅助制造、飞机构造工艺性等。本书适用于飞机(直升机)设计类专业本科学生,以及厂、所职工大学和成人教育同类专业的学员。又可作为导弹设计专业、飞行器制造工程专业的参考书,也可供从事飞行器设计和制造工艺的工程技术人员参考。



飞 机 制 造 工 艺 学

黄 良 主 编

航空工业出版社出版发行
(北京市安定门外小关东里 14 号)
— 邮政编码: 100029 —
南京航空航天大学印刷厂印刷

1993 年 7 月第 1 版

1993 年 7 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 15

印数: 1—1000

字数: 365 千字

ISBN 7-80046-576-4/G·097

定 价 7.30 元

前 言

飞机制造工艺学是针对飞机设计类专业的教学要求编写的一本专业工艺教材，比较系统、扼要地阐述了飞机制造工艺的主要内容。本教材从飞机（直升机）的结构特点出发，以工艺方法和工艺过程为重点，同时适当介绍工艺装备和工具设备的一般应用知识。对飞机制造工艺性，以初步建立工艺性的观念为重点。教材内容既包括飞机制造的传统工艺，也介绍计算机辅助制造的内容，它是一本关于飞机制造工艺的综合性教材。

本书是在以往几次编写的教材基础上重新编写的。主要在飞机制造中保证互换协调的方法、飞机零件制造工艺、飞机装配工艺等章节中，收集了反映飞机制造技术发展的部分新内容，尤其着重编写了纤维增强复合材料构件的制造工艺。参加这次编写的分工是：第一、二两章由王辉同志承担；第三、五两章由张麟同志执笔；第四、六、七章由黄良同志编写。本书由黄良同志主编。由杨彭基教授审阅了全部书稿，提出了许多宝贵意见，谨致谢意。

由于编写者的水平所限，书中的错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

1992. 5

目 录

第一章 飞机(直升机)制造工艺的特点与保证互换协调的方法	(1)
第一节 飞机制造工艺的特点	(1)
第二节 飞机制造中的互换与协调的基本概念	(2)
第三节 飞机制造中应用的“模线-样板工作法”	(8)
第四节 飞机部件外形的数学描述与数控绘图	(14)
复习思考题(作业选题)	(24)
第二章 飞机钣金零件制造工艺	(25)
第一节 概述	(25)
第二节 平板零件和毛料的制造——剪裁、铣切及冲裁	(27)
第三节 飞机型材零件制造——压弯、拉弯及滚弯	(35)
第四节 飞机回转体零件及中小型器皿型零件的 制造——旋压、胀形及拉深	(43)
第五节 框肋类零件的制造——弹性模成形	(49)
第六节 飞机蒙皮零件的制造——滚弯和拉形	(54)
第七节 飞机复杂壳形零件的制造——落锤成形	(58)
第八节 飞机钣金工艺中一些新工艺的应用	(61)
第九节 零件分类、编码与成组工艺及其在飞机制造领域中的应用	(66)
复习思考题(作业选题)	(69)
第三章 飞机整体结构机械加工件的制造工艺	(70)
第一节 概述	(70)
第二节 整体壁板的制造	(70)
第三节 梁、框类整体零件的制造	(80)
第四节 大型骨架零件的制造	(83)
第五节 挤压型材和桁条零件的机械加工	(84)
复习思考题(作业选题)	(87)
第四章 飞机装配工艺	(88)
第一节 飞机装配的基本问题	(88)
第二节 飞机装配中的连接工艺	(103)
第三节 飞机部件装配	(135)
第四节 飞机总装配	(151)
复习思考题(作业选题)	(155)

第五章 飞机部件的计算机辅助制造与飞机设计制造“一体化”	(157)
第一节 部件外形数模的建立和外形计算	(157)
第二节 工艺装备的数控加工	(165)
第三节 数控检测技术的应用	(169)
第四节 飞机设计制造“一体化”概念及其形成	(172)
第五节 中心计算机数学模型系统的应用	(173)
第六节 交互式计算机图象仪系统在飞机设计、制造中的应用	(175)
第七节 “一体化”的发展与飞机制造系统工程	(179)
第八节 “一体化”技术实施的主要内容	(182)
第九节 “一体化”的技术经济效果	(183)
复习思考题(作业选题)	(185)
第六章 工艺装备的协调	(186)
第一节 概述	(186)
第二节 工艺装备的制造依据	(190)
第三节 工艺装备的协调方法	(199)
复习思考题(作业选题)	(212)
第七章 飞机构造的工艺性问题	(213)
第一节 飞机构造工艺性的一些基本概念	(213)
第二节 飞机设计各阶段的构造工艺性问题	(215)
第三节 对飞机结构的工艺要求	(216)
复习思考题(作业选题)	(232)
主要参考文献	(233)

(70)	工艺装备的制造依据	章三第
(70)	工艺装备的协调方法	章二第
(80)	飞机构造的工艺性问题	章三第
(88)	飞机构造的工艺性问题	章四第
(84)	飞机构造的工艺性问题	章五第
(78)	(复习思考题)	复习思考题
(88)	飞机构造的工艺性问题	章四第
(88)	飞机构造的工艺性问题	章一第
(103)	飞机构造的工艺性问题	章二第
(138)	飞机构造的工艺性问题	章三第
(151)	飞机构造的工艺性问题	章四第
(152)	(复习思考题)	复习思考题

第一章 飞机（直升机）制造工艺的特点

与保证互换协调的方法

第一节 飞机制造工艺的特点

飞机制造工艺是机械制造学科的一个领域，是研究飞机生产的工艺原理、各工艺过程的相互联系及其发展规律的科学。

新机种的诞生，包括一系列的设计、制造和试验的综合工作，需要完成复杂的生产准备工作。新机的生产准备可分为设计、工艺和组织三方面，三者之间既有科学的分工又有相互间的密切联系。即使当一种试验飞机被鉴定合格，证明符合设计要求，可以投入“0”批试制和成批生产以后，根据实际使用情况，设计、制造和试验工作三者之间仍有着紧密联系。

将原材料及半成品转变为成品——飞机的一切劳动过程统称为生产过程。生产过程包括工艺过程及其辅助过程，如生产准备、设备维修、厂内运输、统计核算等等。

工艺过程是生产过程的主体，是将原材料制造成飞机的过程，即指直接改变所加工零件的尺寸形状或材料性能，将零件装配成组合件、部件和飞机的过程。

飞机的制造过程和一般机器制造过程相同，可以划分为毛坯制造、零件加工、装配和试验四个阶段。飞机制造所用的毛坯和半成品，如锻件、铸件、板料、型材等种类繁多，根据现代化生产的协作原则，主要由外厂供应。飞机装配、安装所需要的大量标准件，以及发动机、特种设备、仪表等等成品也是由专门工厂组织生产。即使这样，由于飞机构造复杂，制造劳动量大，为满足国民经济的发展需要和国防战备要求，往往还有由几个工厂分工协作生产同一型号飞机的情况。应该注意到飞机的整个制造过程和国家的工业化体系有着密切的联系。而飞机制造的水平，生产组织的基本形式也不可能脱离国家整个工业体系当前的发展水平而孤立发展，但是飞机制造工艺过程也有它本身的特点。其特点是与飞机产品的使用要求、飞机产品设计结构特点紧密不可分的。

一、飞机产品使用要求的特点？

1. 质量要求高 任何产品的质量决定于其多方面性能的综合。飞机的质量指标主要有飞机的飞行战术性能、强度和可靠性、使用寿命以及互换性等。要满足使用要求而且质量稳定可靠。

2. 结构不断改进 由于使用要求，飞机构造经常修改、改型。要求飞机从研制到投产的周期短，而且要适应设计更改频繁、结构不断变化和改进的要求。

3. 要适应产量大小的变化 尤其是军用飞机，研制时批量小，战时要求迅速扩大产量，这是在设计、工艺过程设计中都必须考虑的问题。

4. 要努力降低材料、劳动力的耗费 飞机成本很高，耗费巨大，在确保产品质量，完成数量任务的同时必须努力降低耗费。

二、飞机产品结构的特点

它不同于一般机械产品，归纳起来主要有：

1. 构造复杂，零件多 一辆载重汽车包括发动机在内大约有三千多个零件，而一架飞机仅壳体上的零件就有一万五千至十万件不等，其中还不包括几百万件的螺钉、铆钉等标准件。如某型轰炸机仅重要附件就有八千一百种，以及三百二十五台电子电气装置、二千四百米液压管路和长一百公里左右的导线。因此，要求有广泛的协作体系，许多零件、附件、成件、仪表设备都要有专厂供应。
2. 外形复杂，尺寸大 飞机的骨架和蒙皮大多具有不规则的曲面形状，根据机型的不同，如大型运输机 C-5A 飞机翼展长达 68m，机身全长 75m，因此决定了零件、组合件、部件的尺寸也较大。如波音 747 机翼上一块整体壁板即长达 34m。
3. 精度要求高、刚度小 如 L-1011 飞机的复杂曲面蒙皮壁板，最大尺寸 2.5m×12m，成形误差要求小于 0.3mm。而机体绝大多数零件刚度均很小，一些零件在自重状态都会引起变形。由于气动力性能要求，大部分机体构件的外形准确度，一般都在 10^{-1} 级精度范围内。

三、飞机制造工艺特点

针对上述特点，飞机制造工艺的特点是：

1. 要采用新的保证互换协调的方法 仅采用一般机器制造业的公差配合制度，不能保证各零件、部件间的相互协调与互换要求，而要采用飞机工业中一套特有的保证产品的互换协调的方法——模线样板工作法或模线样板标准样件工作法。
2. 生产准备工作量大 由于零件品种数量多、外形复杂，成形需要模具工装，而由于零件刚度小，装配时又需要大量夹具、型架，以及必要的标准工艺装备，使飞机生产准备工作量很大，而要求周期尽量短。
3. 批量小，手工劳动量大 由于飞机型号、结构改动频繁，要求生产方式要具有很大的机动性。飞机生产中必须尽量简化工艺装备构造，提高其通用化程度，采用通用化的工装设备等等。即使如此，往往还需要大量采用手工劳动。生产的“机动性”要求和“机械化”、“自动化”之间的矛盾是摆在我们面前需要解决的任务。
4. 零件加工方法多样，装配劳动量比重大 飞机机体构件选用的材料种类繁多，相应的加工工艺也多种多样。而且为适应飞机结构的发展，要求不断引进新技术、新材料和新工艺。由于飞机构件的刚度小，装配工作的劳动量约占飞机制造总劳动量的 50%~60%。

第二节 飞机制造中的互换与协调的基本概念

一、互换性的基本概念

一般互换零件（构件、部件）的特性是能与另一相同零件（构件、部件）互相代替，而代替的零件（构件、部件）能够像被代替的零件一样准确地完成本身的特定任务。

飞机工业中的互换要求一般指：

互换

1. 使用互换 飞机在使用中局部损坏, 要求更换某部分是常有的, 互换的部件(段件)应具有相同的(在公差范围之内)连接面尺寸和形状, 相同的对接螺栓孔和管道孔的位置, 一致的气动力特性、重量和重心, 而敷设在其中的操纵系统应当具有相同的技术特性。例如, 机翼、尾翼、舵面和直升机的旋翼等都要求使用互换。

2. 生产互换 在生产过程中, 为了减少装配时修配工作量, 便于组织流水生产, 缩短装配周期, 在成批生产中, 零件、构件等不经修配和补充加工就可以装配, 装配以后且能满足技术性能要求, 则该零件或构件就具有生产互换性。在大批和大量生产中主要是采用互换方法组织均衡、有节奏的生产。在飞机的成批生产中也希望尽可能采用这种方式生产, 但由于实际工作中很难达到或是经济上极不合理。因此, 在飞机生产中实际并不要求完全互换, 而是局部互换。互换性项目要求愈多, 对生产部门要求也愈高。

3. 厂际互换 当同一型号飞机或其部件由几个工厂同时制造时, 各厂生产的某些部件也应该是能够互换的。这就需要采取必要的技术措施和相应的技术文件来保证。

二、飞机生产中的协调问题

协调与互换是两个不同的概念。互换是指成批或大量生产中, 同一产品中任取其一, 其几何形状及物理机械性能在一定的误差范围内, 并在装配和安装过程中, 不需要任何修配和补充加工就能在装配以后完全满足设计所规定的技术要求。而协调是指两个相互配合的工件之间或工件与工装之间的对应尺寸和形状的一致性。因此, 具有互换性的零件(或组合件、段部件)其配合一定是协调的, 反之, 协调的零件(或组合件、段部件)不一定具有互换性。

模具
协调

模具之间、型架之间

1. 飞机的制造准确度和协调准确度

(1) 制造准确度 飞机零件、组合件或段部件的制造准确度是指实际工件和设计图纸上所确定的理想的几何尺寸和形状相近似的程度, 近似程度愈高, 则制造准确度愈高。

(2) 协调准确度 飞机零件、组合件或段部件的协调准确度是指两个相配合的零件、组合件或段部件之间配合的实际尺寸和形状相近似的程度。

例如, 机身前段和机身后段相接处, 图纸上规定为同一个名义直径 D 。在机身前段及后段分别制造时, 所得到的实际尺寸为 D_1 及 D_2 , 则 $(D_1 - D)$ 和 $(D_2 - D)$ 之数值分别为机身前段及后段的制造误差, 误差的统计特征数值分别说明各自的制造准确度。而 $(D_1 - D_2)$ 为机身前后两段之间的协调准确度。是一种配合关系。

在飞机生产中, 一般情况下, 对协调准确度的要求比对制造准确度的要求更高。

制造准确度只与各个部分的本身制造过程有关, 它取决于飞机各部分单独制造过程中的生产误差。而飞机各个部分相配合的表面或尺寸的协调准确度, 则取决于有关的两个部分单独制造过程中产生误差的综合数值, 也就是说与两个相配合部分制造过程之间的相互联系有关。下面我们就来仔细分析一下两个相配合零件制造过程的相互联系, 即协调原理。

2. 协调原理

任何产品或零件的制造, 其几何形状和尺寸的形成, 一般都是根据图纸所确定的理论形状和尺寸, 在生产中通过一定的量具、工艺装备或机床而获得的。在这一过程中, 首先需要根据标准的尺度量具制造出生产中使用的各种测量工具或仪器, 然后利用这些量具制造各种工夹模具, 最后通过工装模具或机床加工出零件所需的几何形状或尺寸, 其中包含

尺寸传递的过程。

两个相互配合的零件同名尺寸取得协调，它们的尺寸传递过程之间一般存在一定的联系。图 1-1 所示为三种不同原则取得尺寸协调的协调过程。

如图 1-1 所示，两个相配合的零件 A 和 B 之间同名尺寸 L ，在尺寸传递过程中存在着一定的联系，即都是从总的原始标准尺寸开始。原始标准尺寸作为尺寸传递过程的公共环节，当采取一系列组织技术措施后，不仅原始标准尺寸可作为尺寸传递的公共环节，而且在以后的尺寸传递过程中亦可存在公共环节。

在生产过程中如欲提高两个配合零件之间的协调准确度，除了努力提高零件制造准确度（这往往受到限制）以外，减少制造环节或致力增加两个零件尺寸传递过程中的公共环节以缩短尺寸 L 的协调过程都是重要的。

图 1-1 (a) 所示之协调过程，称之为零件按独立制造的原则形成的协调过程。图 1-1 (b) 所示之协调过程，称之为零件按相互联系制造的原则形成的协调过程。图 1-1 (c) 所示为按补偿原则制造所形成的协调过程。图中 S 为标准尺寸， M 为测量工具尺寸， J 为夹具尺寸， L_A 、 L_B 分别为零件 A 及零件 B 的尺寸。

3. 各种协调原则的特点及其应用

a) 零件按独立制造的原则进行协调

配合零件按独立制造的原则进行协调时，形成协调准确度的尺寸传递环节远远多于每个零件单独制造的环节。因此，所取得的协调准确度实际上要低于各个零件本身的制造准确度。

前已述及，飞机生产中，对协调准确度比制造准确度往往提出更高的要求。假定采用这一原则，那么为了保证互换性所必须达到的协调准确度，就必须对零件制造准确度提出更高的要求。例如图 1-2 所示为飞机检查口盖的协调。这是一个蒙皮上的非圆形口盖，采用独立制造的原则制造，只要恰当规定盖与孔的允许误差范围，可以很容易地保证盖与孔的协调。

（在一般机器制造业和仪表制造业中，普遍采用独立制造原则）零件之间的互换与协调由国家颁布的公差与配合制度来保证。这种方法具有一系列的优点。首先是能够平行地制造各种工艺装备，可以扩大工作面，从而可以缩短生产

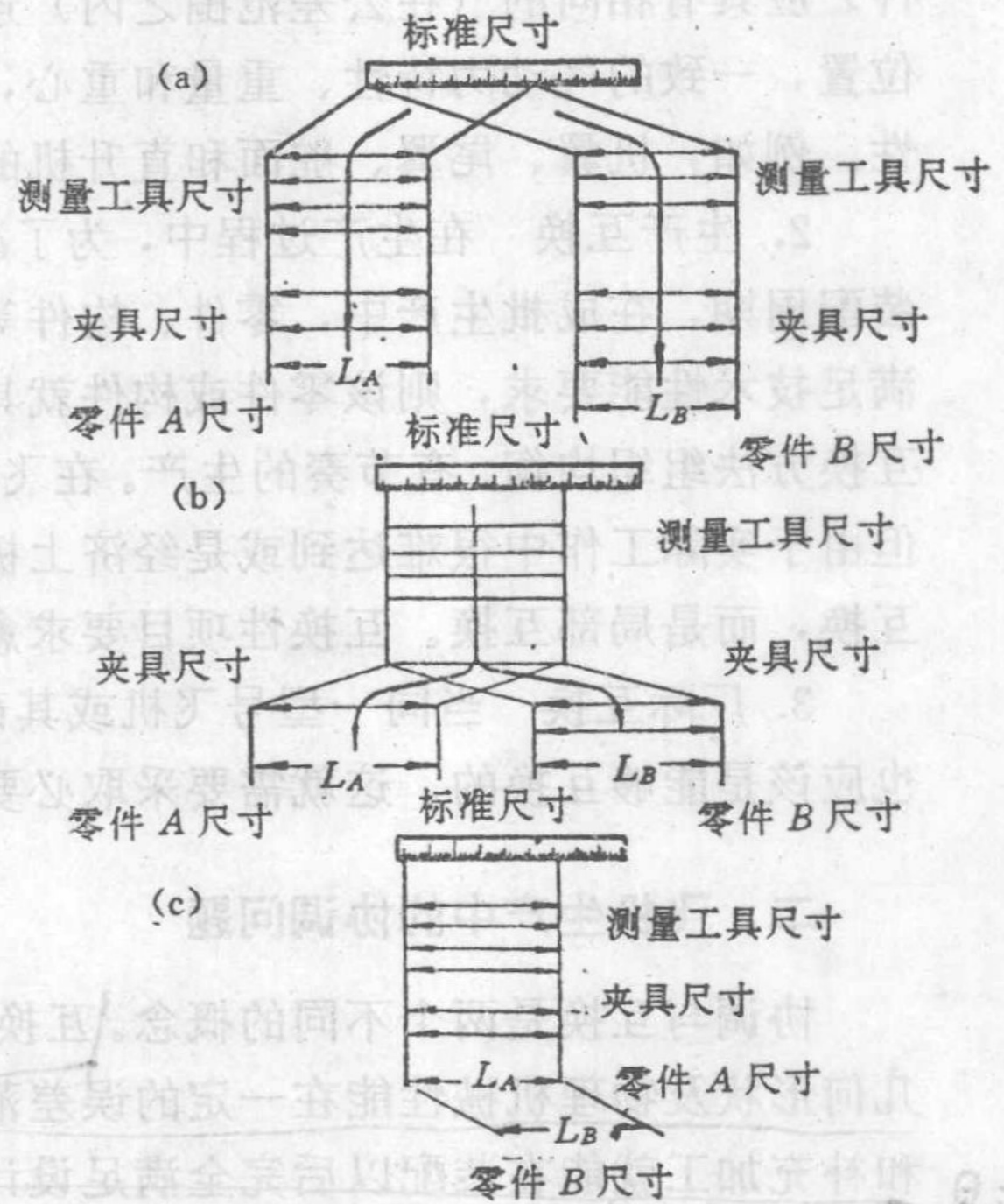


图 1-1 尺寸协调过程示意图

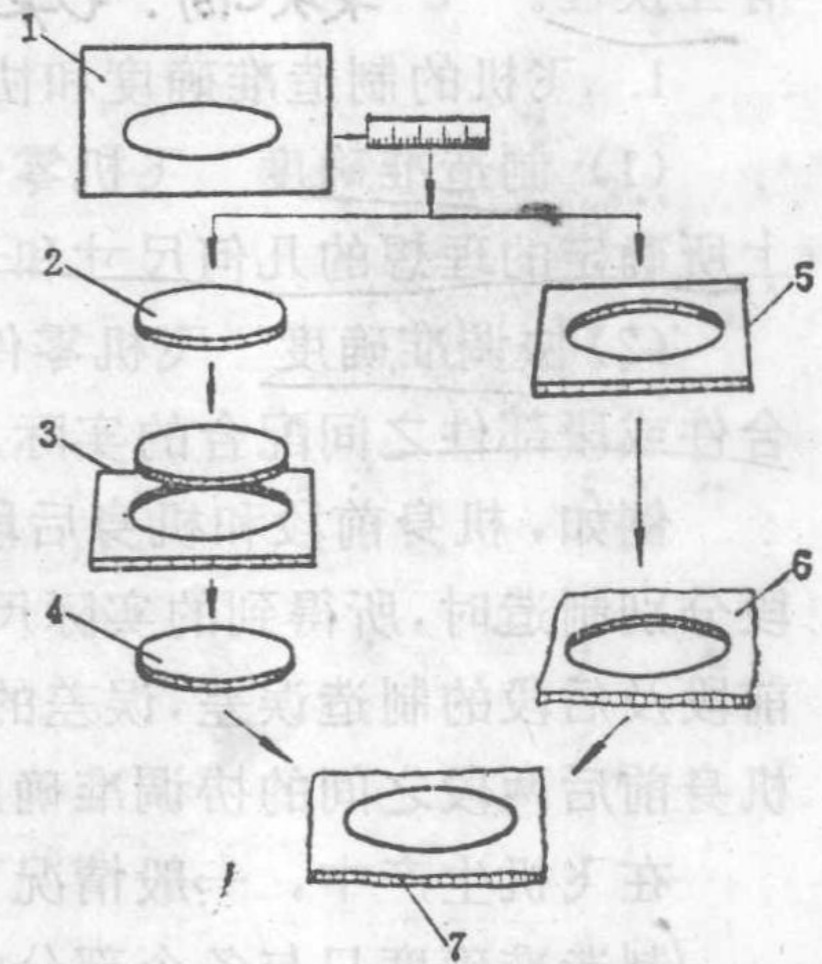


图 1-2 按独立制造的协调原则检查口盖

- 1—设计图纸与尺寸； 2—口盖样板；
- 3—口盖冲模； 4—口盖；
- 5—蒙皮开口样板； 6—蒙皮；
- 7—口盖与蒙皮。

周期。其次不受限制地进行复制和协作。

对飞机制造来说，缩短生产准备周期及广泛开展复制也具有特别的意义。因此，也很希望采用这一原则。

在一般机械制造中，所采用的各种通用量具，一般均为测量尺寸的量具。而制造任何一个工件时，需要加工的是连续的表面，也就是说需要从尺寸过渡到形状的过程。在一般机械制造中，对于简单形状的表面（平面、圆柱面、圆锥面、球面等）可以通过专门的金属切削机床，按图纸的尺寸准确地加工出工件的几何形状，以实现由尺寸到形状的过渡。

但是，在飞机生产中，由于飞机产品的特点，即尺寸大、刚度小、几何形状复杂，尤其是对于复杂形状表面（机翼或双曲面机身等的表面）的加工，这种由尺寸确定零件表面，然后在生产过程中再根据实际需要，将零件表面形状准确地传递给模具、夹具等的这一过程要复杂得多。

过去，在飞机制造过程中，独立制造的原则采用得较少，仅用于那些形状比较简单的零件，例如起落架、操纵系统上的零件。近十几年来，由于计算机和数控绘图、数控加工在飞机设计与制造中的广泛应用，独立制造的原则将日益广泛地用于飞机机体构件的制造。

b) 零件按相互联系制造的原则进行协调

由于飞机的结构复杂，零件品种多、生产批量小，既有大量外形协调问题又有大量接头协调问题，所以在许多情况下，采用独立制造的原则进行协调，即以较高的制造准确度来保证较低的协调准确度要求，往往在技术上无此必要，经济上也极不合理，甚至是难以实现的。

由图 1-1 (b) 可以看出，当零件按相互联系制造的原则进行协调时，零件之间的协调准确度只取决于各零件尺寸传递过程中单独进行的那些环节，尺寸传递中那些公共环节的准确度，并不影响零件之间的协调准确度。

因此，采用不同的协调原则，即使是相同的零件制造准确度，却能得到不同的协调准确度。一般说，在尺寸传递过程中，公共环节数量愈多，协调准确度也愈高。尤其要注意的是：应该努力把生产过程中制造准确度不高的工序，作为尺寸传递的公共环节，就能够大大的提高零件之间的协调准确度。

图 1-3 中所示是一个蒙皮上的平面的非圆形口盖，其中：由于口盖的非圆形形状，在口盖的制造过程中必然存在着：度量、描点、锉修等工序，这是一个精度较低的环节。按独立制造原则，手工难于保证协调准确度，而采用相互联系制造原则较容易保证协调准确度。

从上例可以看出，所谓相互联系制造原则的协调方法，就是指那些与装配协调有关的尺寸和几何形状以全尺寸的实物模拟量作为其原始协调依据，沿协调路线用一定的工艺装备一环扣一环地传递这些模拟量，使它们最后在产品上体现出来。

按相互联系制造的原则进行协调，对飞机制造具有特别重要的意义。采用这种协调方法能以较低的制造准确度来达到较高的协调准确度要求。所以它是飞机工厂传统的协调方

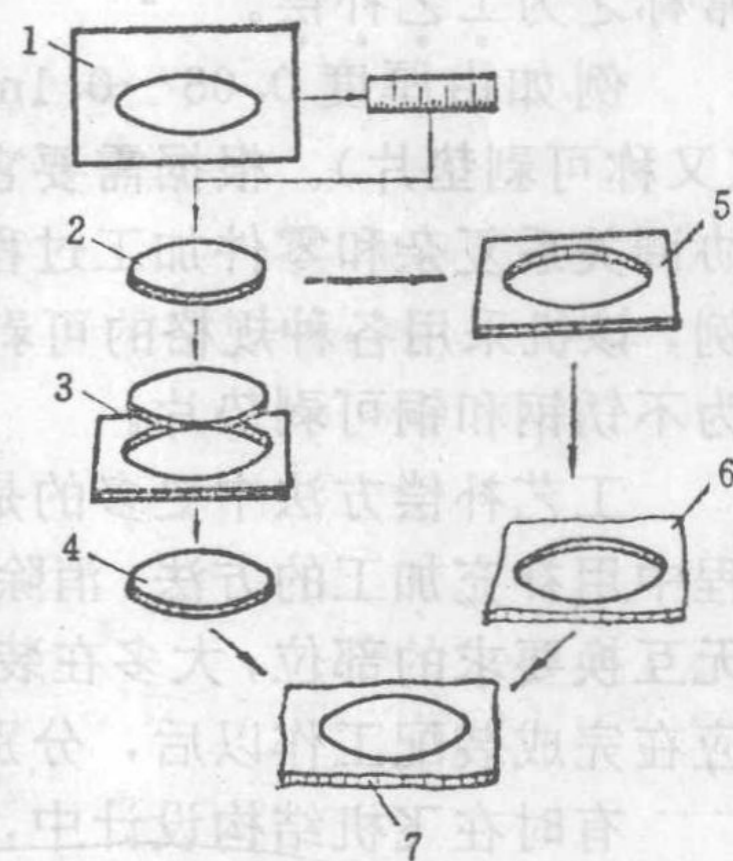


图 1-3 按相互联系制造的原则制造非圆口盖和蒙皮的协调过程

法，在今日飞机工业中仍占有相当重要的地位。当采用独立制造的协调原则，不能使飞机各部分达到足够的协调准确度，或经济上不合算时，则采用相互联系制造的原则，以保证飞机构件的互换性。但它在组织生产等方面存在着严重的缺点，这在以后的章节中再详细讨论。

c) 按补偿原则进行协调

从图 1-1 (c) 中可以看出：采用补偿原则进行协调时，协调准确度仅决定于将零件 A 的尺寸传递给零件 B 时这一个环节的准确度。因此，采用这种协调原则，在一般情况下，能够达到更高的协调准确度。

我们仍然以图 1-3 所示的检查舱口盖为例，当采用补偿原则进行协调时，可以采用前述的方法，首先制造口盖，然后按制造好的口盖的实际形状加工蒙皮上的开口，采用这种方法可以保证很高的协调准确度。

上述按补偿原则进行修配的办法虽能保证零件之间很好的协调，但零件之间却不能互换，而且增加了装配时的工作量，在成批生产中应尽量少采用。只有在采用前面所述两种协调原则在技术上和经济上都不合理时，而且对零件无互换要求或在飞机的单件试制时才有较多的应用。

4. 工艺补偿与设计补偿

飞机生产过程中，由于零件数量大、几何形状复杂和精度要求高，生产中常常会发生不协调现象。

在这里，要强调指出的是：保证产品之间很好的协调，并达到互换要求，决不仅仅是制造部门的事，设计者具有丰富的产品设计知识，综合的考虑以及对实际情况的掌握，往往能达到事半功倍的效果。

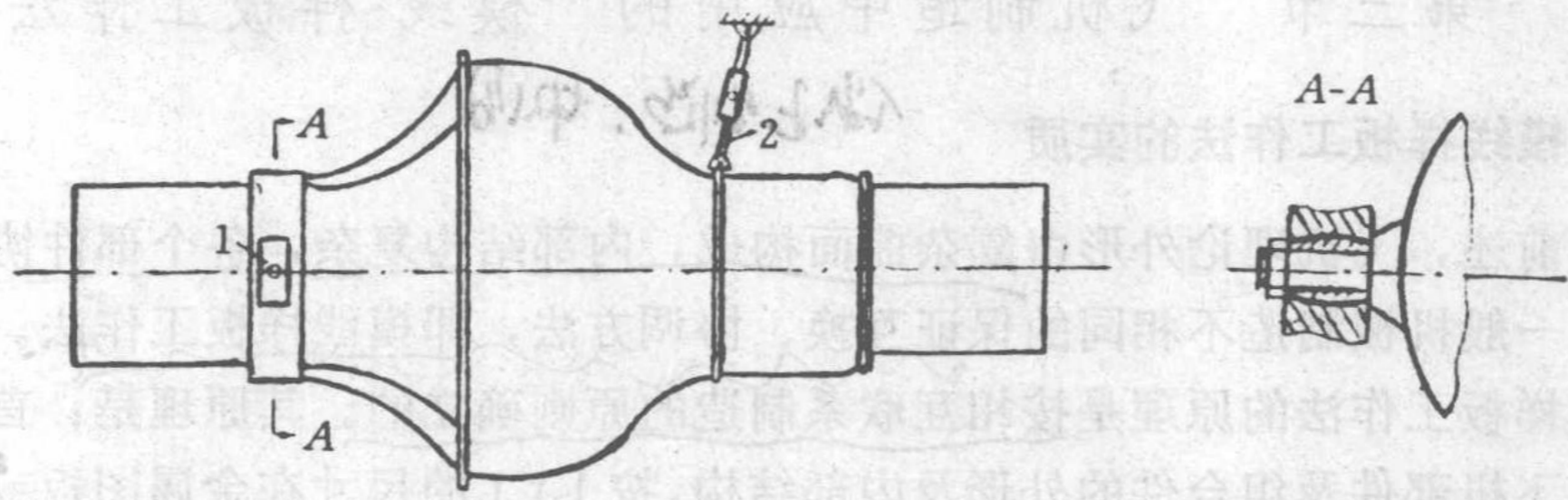
由于“补偿”协调的原则是一个零件按尺寸制造，而另一个相配零件则按第一个零件实际尺寸去“配”。那么在生产中，例如一块刚度很大的蒙皮与另一个刚度也较大的框、肋零件相配，并用铆钉连接，当二者形状尺寸不协调时产生间隙，在生产上允许加“垫”，以满足装配要求。这种方法，设计中有规定，而在工艺过程中根据实际情况采取的补偿措施，常称之为工艺补偿。

例如由厚度 0.05~0.1mm 金属箔（带）用胶粘剂粘合而成的“工艺厚度补偿垫片”（又称可剥垫片）。根据需要它可以任意撕剥成一定的形状和不等的厚度。它用于补偿由于协调关系复杂和零件加工过程中的累积误差，而出现在装配连接处的间隙。以波音 707 为例，该机采用各种规格的可剥垫片，其额定面积达 6.68m²，其中铝可剥垫片占 95%，其余为不锈钢和铜可剥垫片。

工艺补偿方法中更多的是在工件上某些配合部位（如接头孔等）预留余量，在装配过程中用补充加工的方法，消除制造过程中积累的误差，从而达到技术要求规定的准确度。对无互换要求的部位，大多在装配过程中利用相互修配的方法；对要求互换的构件或部件，则应在完成装配工作以后，分别单独地在专用设备上进行“精加工”。

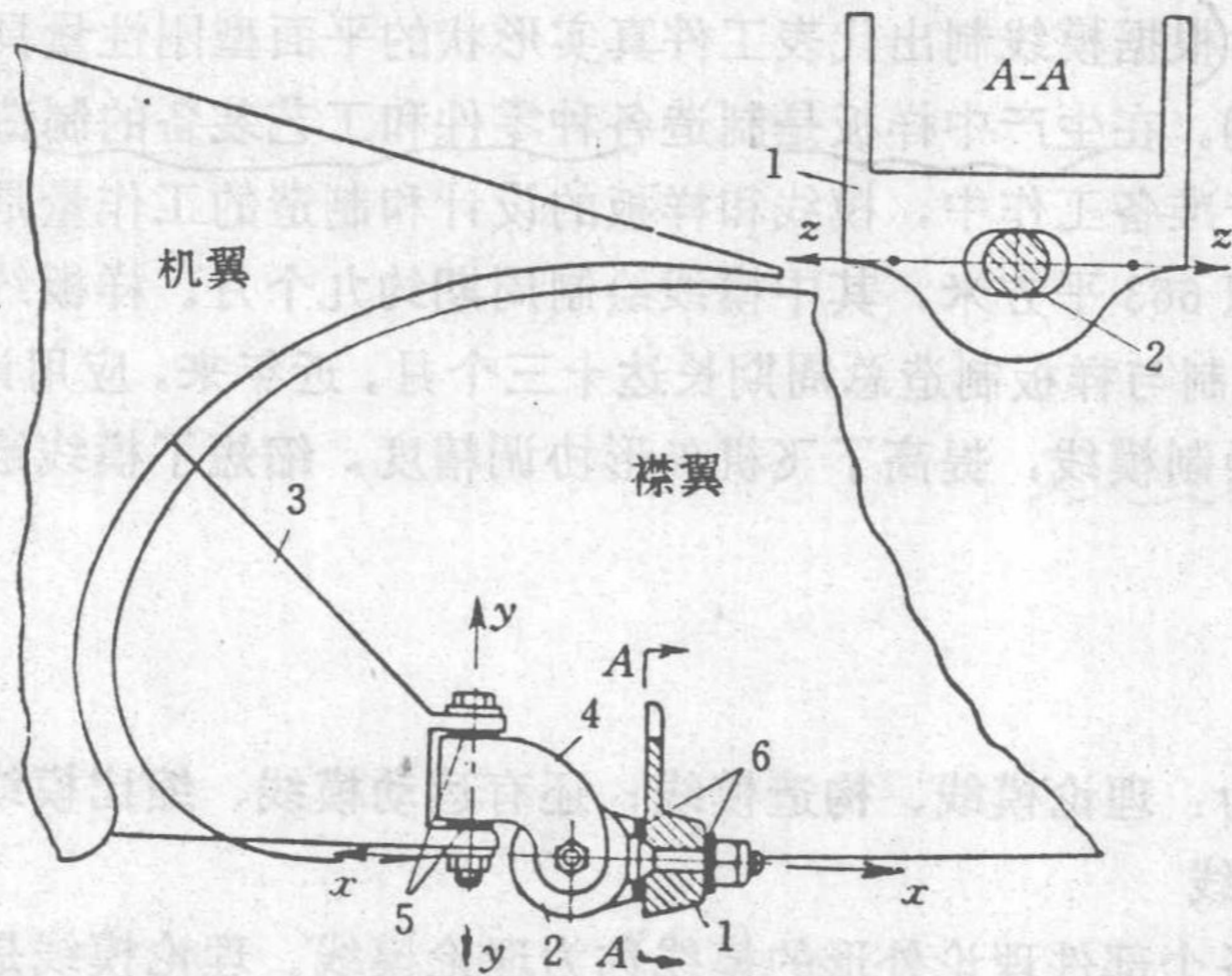
有时在飞机结构设计中，考虑到保证互换协调的要求，在不影响设计使用要求前提下，从结构设计上采取相应措施，保证两个相配合零件中的一个可以在一定范围内调节相配合尺寸，满足协调要求，这在一般工业产品及飞机结构中都应用得很多，如图 1-4 所示，称之为设计补偿。在飞机设计过程中，有一些补偿件的设计是设计员必须考虑到的，没有它飞机就不能正常工作。如直升机上传动系统的万向接头与轴向补偿器；而另一些是为了简化装配与安装工作，在适当的部位采用补偿件。但无论是主动采取设计补偿，或是允许在生产过程中在允许范围内进行工艺补偿，往往都能大大简化协调工艺装备，保证产品质量。当然这些补偿可能增加一些飞机结构重量，这就需要设计者有较丰富的知识，作全面衡量，作

出周密的设计。

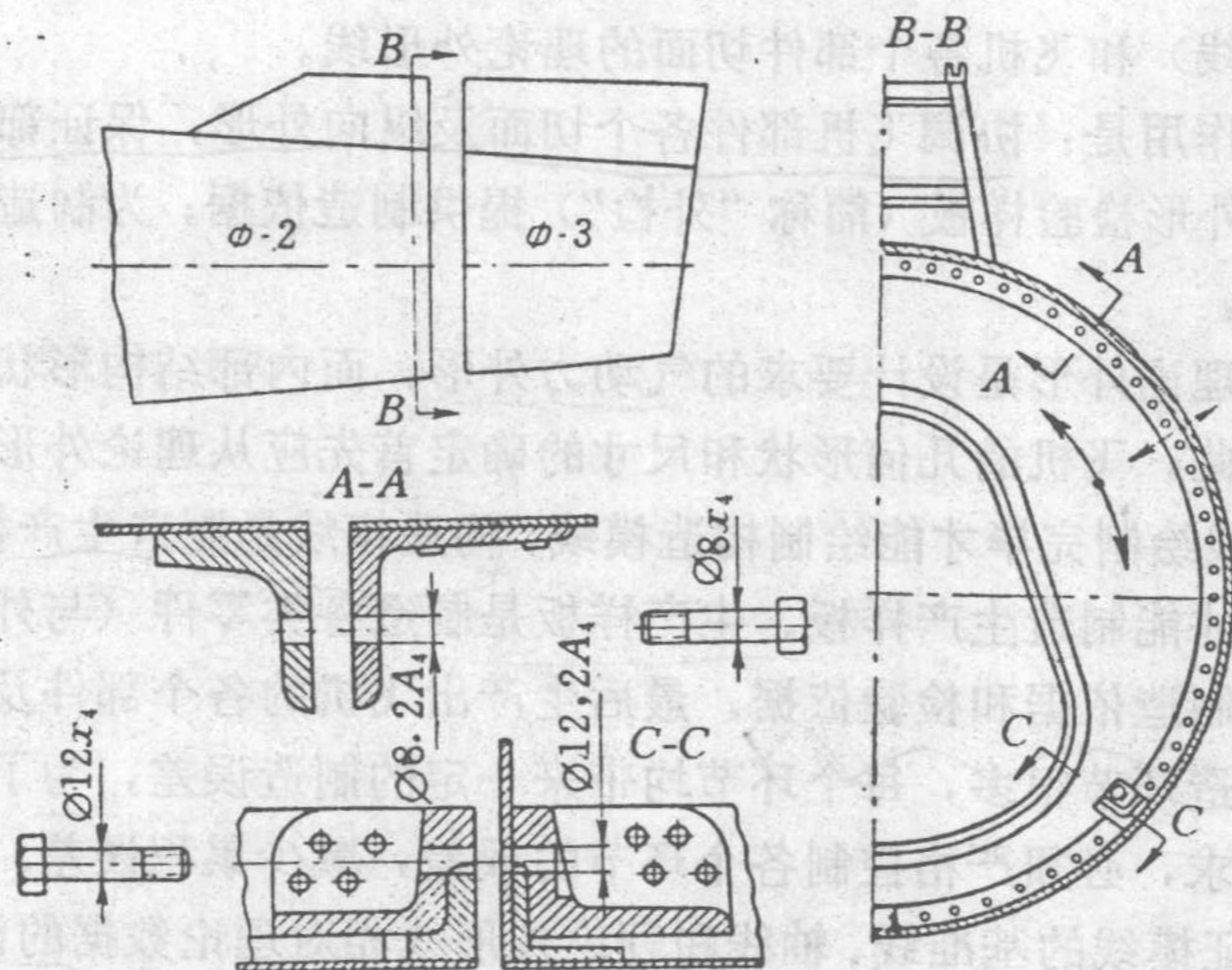


(a) 机身与发动机连接示意图

1—主接头 (球面衬套); 2—辅助接头 (有可调螺杆)



(b) 机翼与襟翼连接示意图



(c) 前后机身对接接头的补偿方式

图 1-4 设计补偿示例

第三节 飞机制造中应用的“模线-样板工作法”

一、模线样板工作法的实质

保证制造. 实用

根据前述, 飞机理论外形由复杂曲面构成, 内部结构复杂, 各个部件协调要求高, 因此采用与一般机械制造不相同的保证互换、协调方法, 即模线样板工作法。

模线样板工作法的原理是按相互联系制造的原则确立的。其原理是: 首先根据飞机设计图纸将飞机部件及组合件的外形及内部结构, 按 1:1 的尺寸在金属图板或聚酯薄膜上画出, 称之为模线)在生产中, 模线即作为飞机外形及内部结构形状的原始依据。由于飞机外形复杂, 这一过程的绘制准确度虽经很大努力还是很低的, 人们即将它作为协调过程的公共环节。然后根据模线制出代表工件真实形状的平面型刚性量具, 这种不带刻度的刚性量具称之为样板。在生产中样板是制造各种零件和工艺装备的制造依据和检验依据。

在实际生产准备工作中, 模线和样板的设计和制造的工作量是很大的。例如某型歼击机模线图板面积 663 平方米, 其中模线绘制周期约九个月。样板约两万块, 制造周期为七个月, 仅模线绘制与样板制造总周期长达十三个月。近年来, 应用计算机辅助外形设计, 应用数控绘图机绘制模线, 提高了飞机外形协调精度, 缩短了模线绘制周期, 减少了手工绘制模线工作量。

二、模线

模线可分为: 理论模线、构造模线; 还有运动模线、缩比模线和立体模线。

1. 理论模线

控制飞机各个部件理论外形的模线称为理论模线。理论模线是画在喷有面漆或经过打磨的聚酯薄膜上的 1:1 的飞机理论图。理论模线绘制内容有飞机部件的设计基准(飞机的各种轴线、基准线)和飞机各个部件切面的理论外形线。

理论模线的作用是: 协调飞机部件各个切面及纵向外形, 保证部件纵、横向外形都光滑流线; 为制造外形检验样板(简称“外检”)提供制造依据; 为制造装配夹具用的夹具样板提供制造依据。

由于飞机的理论外形是设计要求的气动力外形, 而内部结构形状和尺寸都是以理论外形为基准的, 因此, 飞机的几何形状和尺寸的确定首先应从理论外形开始, 即首先绘制理论模线。理论模线绘制完毕才能绘制构造模线, 构造模线是制造生产样板的依据。因此, 只有绘制构造模线才能制造生产样板。生产样板是制造各类零件(与外形有关的零件)和装配用工艺装备的制造依据和检验依据。最后生产出飞机的各个部件及整架飞机。由此可以看出, 飞机的制造环节很多, 每个环节均带来一定的制造误差, 为了保证飞机最后的理论外形的准确度要求, 必须严格控制各个环节的误差, 减少累积误差。为此, 在理论模线绘制过程中, 要保证模线的基准线、轴线和理论外形线相对理论数据的误差不超过 $\pm 0.1\text{mm}$ 。线条粗细为 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 之间, 纵横切面交点误差应在 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 以内, 同一条曲线不允许重复绘制, 对称的外形仅绘制一半。生产上需要重复的线条和对称的外形都是通过样板移形和样板加工来实现的。

理论模线一般按部件分别绘制。图 1-5 所示为直母线部件(机翼)的综合切面模线和平

面模线的示意图。这类部件外形的共同点是：各翼肋切面在同一百分比弦长上的外形点联线呈一条直线，故根据基准切面翼型及对应的百分模线可求取中间切面翼型，亦可用解析法、几何作图法求取中间切面翼型。见图 1-6。

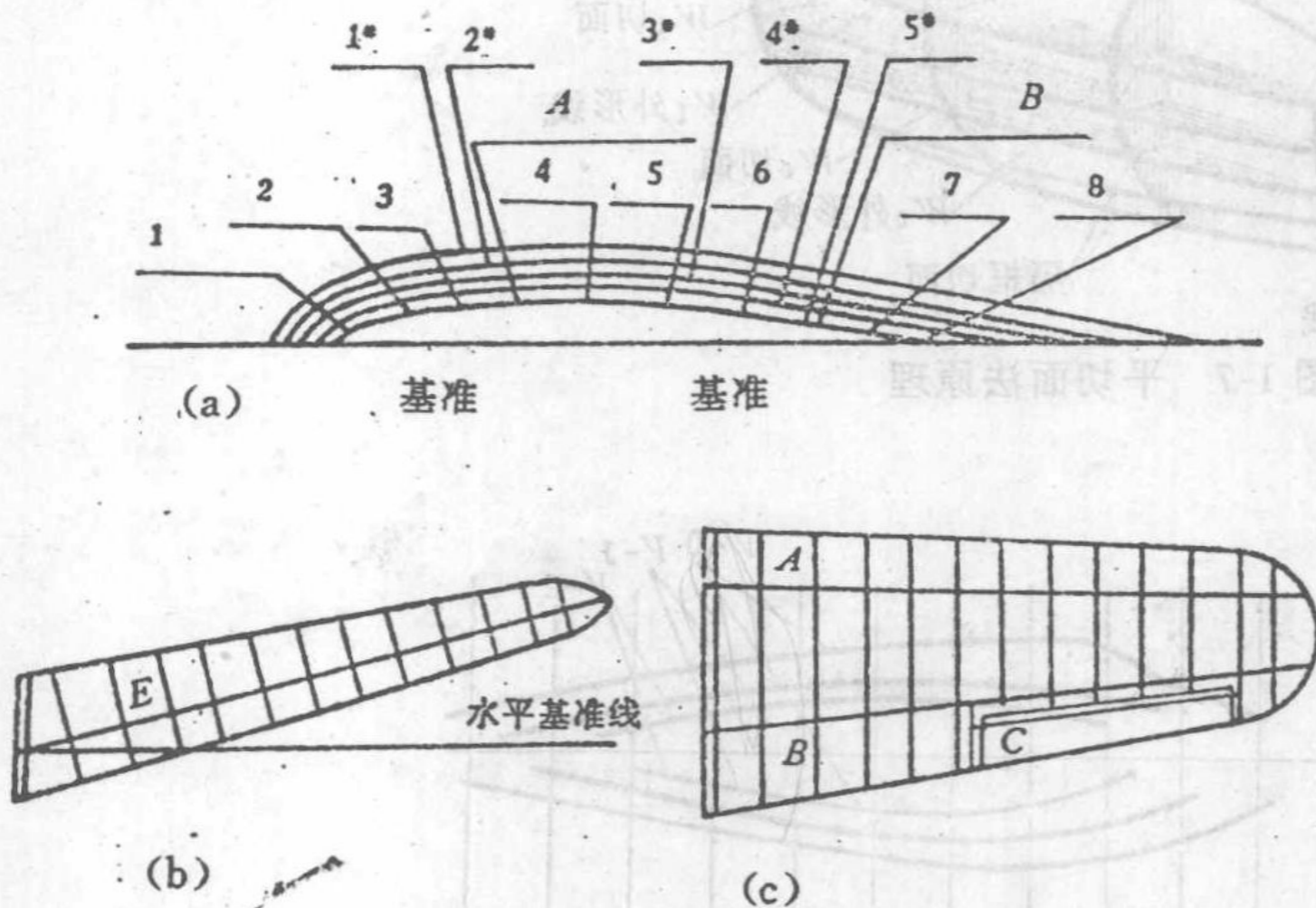


图 1-5 机翼理论模线示意图

- (a) 机翼综合切面模线
- (b) 机翼梁切面模线
- (c) 机翼平面模线

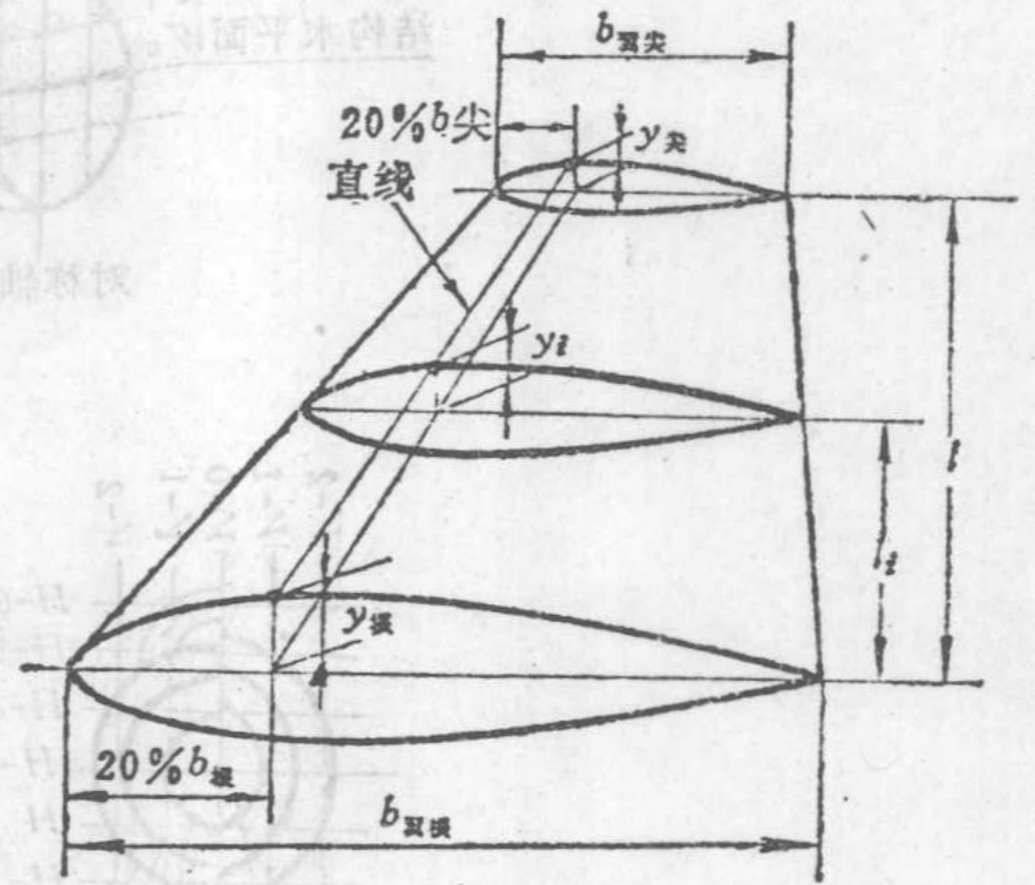


图 1-6 求中间翼肋剖面数据的解析法

- l — 翼展全长；
- l_i — 某中间肋到翼根距离

理论模线又可分为综合切面模线与平面模线。综合切面模线是将部件横切面外形按同一基准绘制在同一个平面上称之为综合切面。而平面模线则是主要绘制部件的纵向外形曲线。

综合切面模线与平面模线的作用是控制部件的理论外形，对部件的纵横切面进行交点协调，保证部件外形光滑流线，同时为绘制构造模线提供外形依据。

在模线绘制过程中，应根据飞机外形特点和协调要求，注意节省模线图板面积及模线绘制工作量。例如机翼大梁、纵向为直线的长桁等，这类模线没有必要绘制。

双曲面外形部件（如机身、发动机短舱等）的理论模线绘制方法有：平切面法；射线法；圆弧作图法和二次曲线法等。

平切面法是根据投影几何原理绘制的，它是选用平行于三个互相垂直的坐标面的一系列平面来分割部件，但是用这种方法绘制理论模线所选取的切面轴线与部件的结构轴线往往不相重合，不能有效控制飞机部件理论外形。因此，平切面法实际应用很少。

射线法是沿部件结构轴线选取射线，因此，它能有效的控制部件的理论外形。圆弧作图法在绘制飞机部件理论模线时常常被采用，例如强-五型及初教-六型机的机身部件就是采用四圆弧作图法来绘制理论模线的。

图 1-7 所示为平切面法原理图。图 1-8 为平切面法理论模线的示意图。图 1-9 为射线法理论模线示意图。

理论模线绘制是一个复杂的、反复协调的过程。它要完整的、精确的控制部件的理论外形，保证部件理论外形的纵、横向的交点协调、流线光滑。直到部件的纵、横向外形都

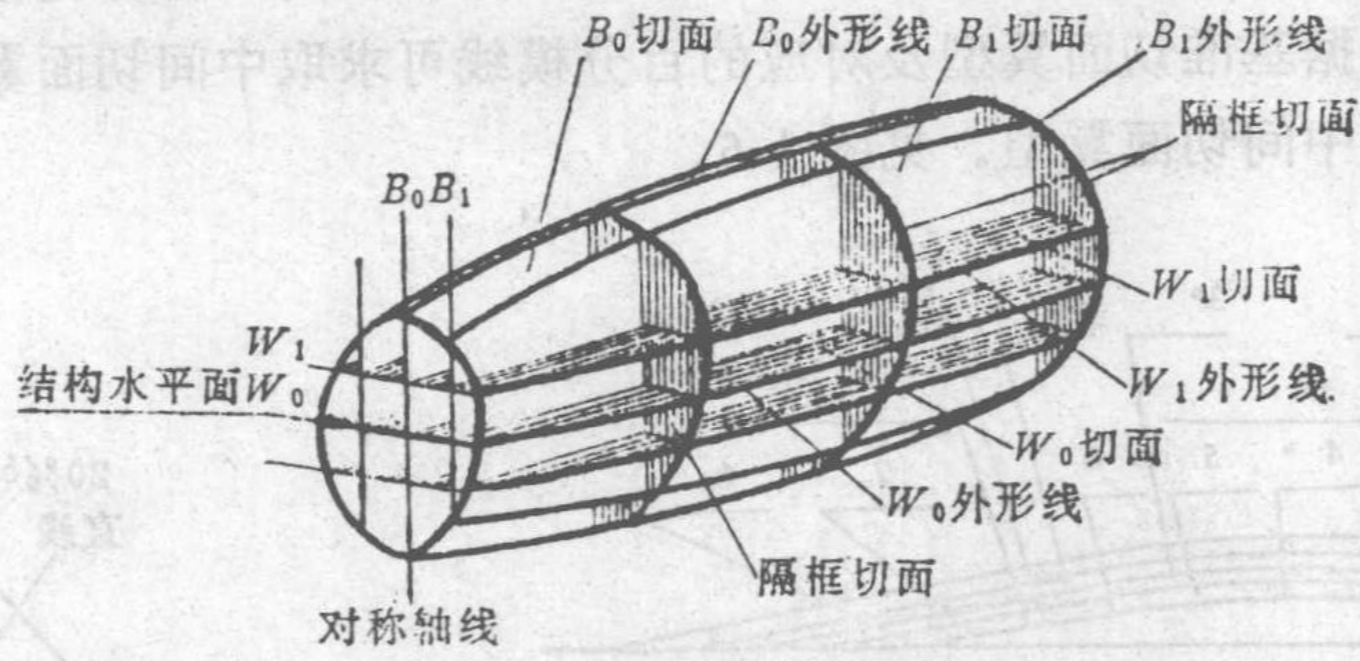
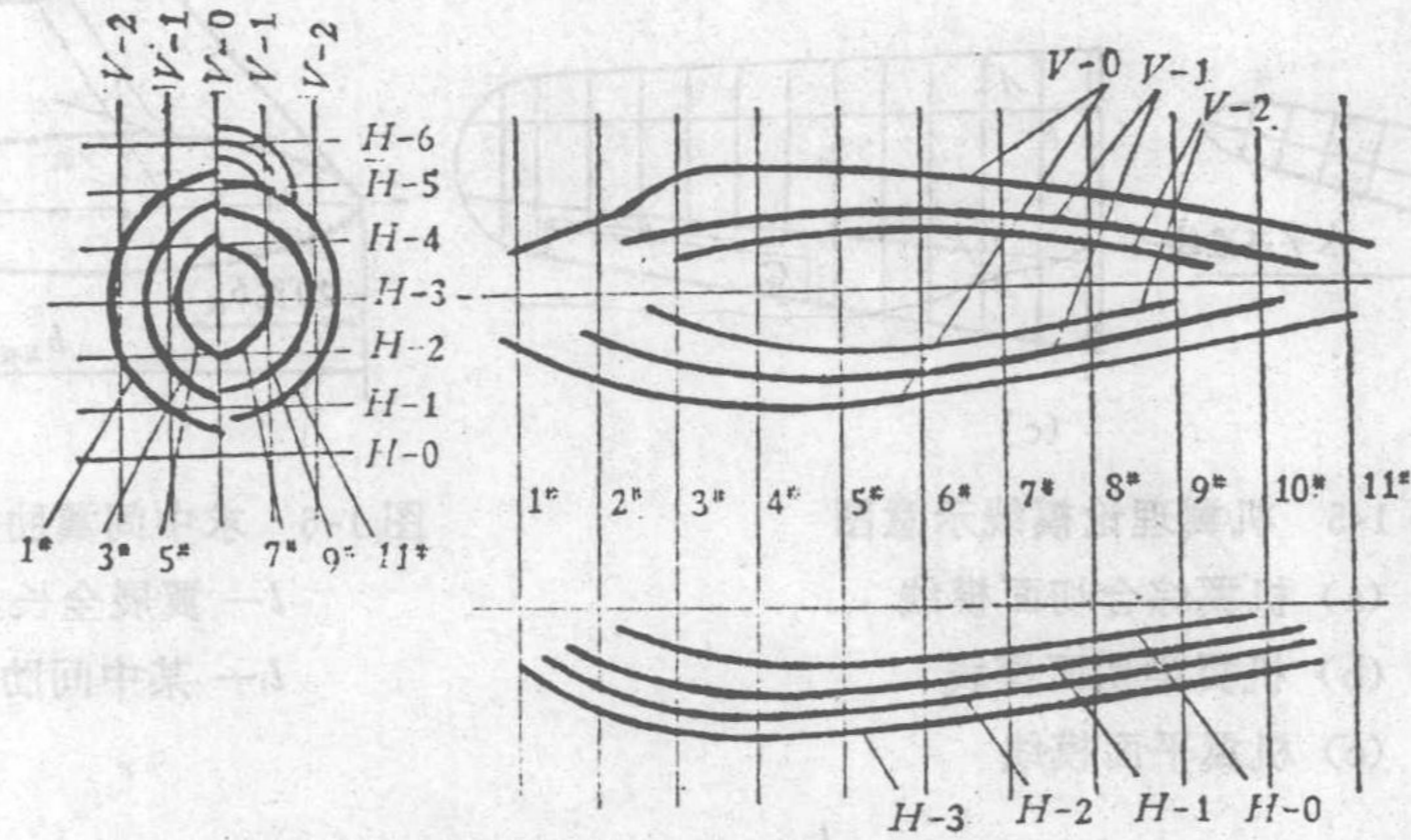


图 1-7 平切面法原理



$H-0, H-1, H-2 \dots$ 为一组水平切面;
 $V-0, V-1, V-2 \dots$ 为一组垂直切面;
 $1^*, 2^*, 3^*, \dots$ 为一组横切面(框切面)

图 1-8 平切面法理论模线示意图

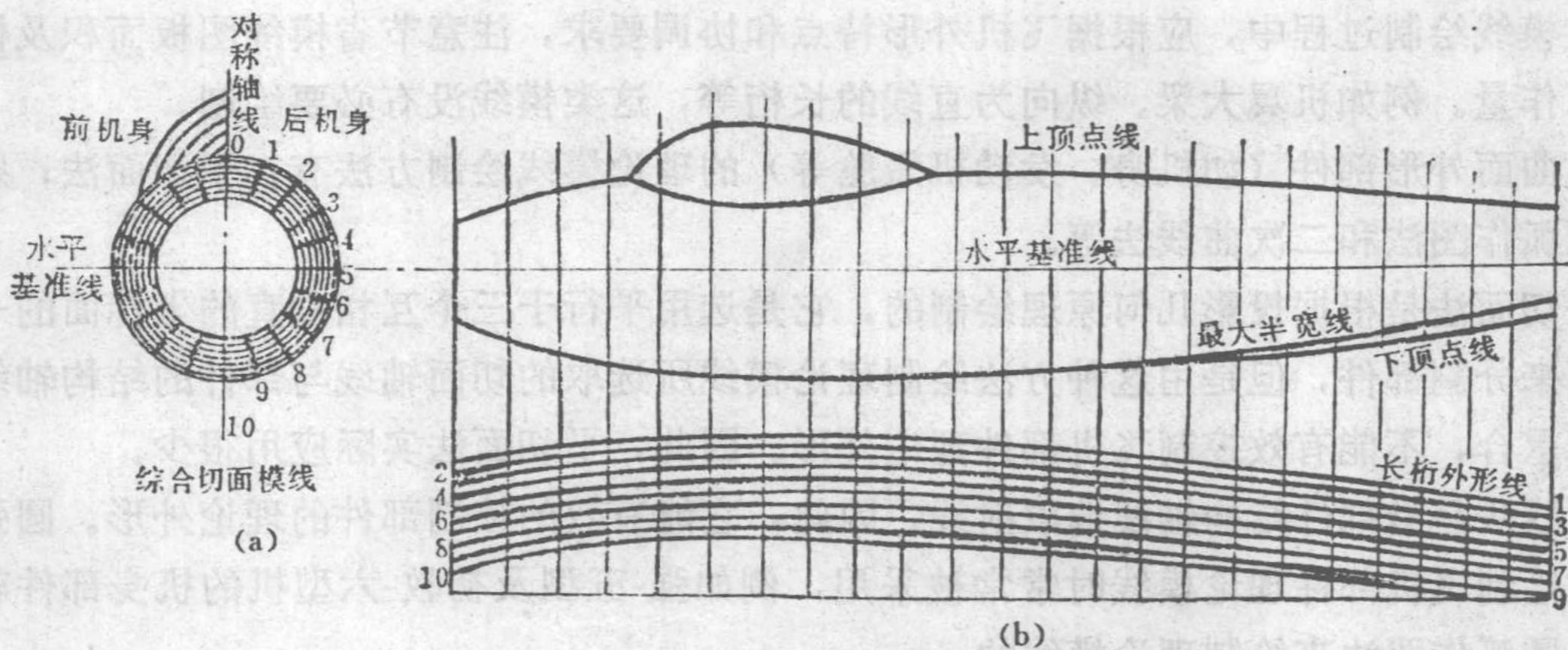


图 1-9 射线法理论模线示意图

(a) 综合切面模线 (b) 机身平面模线

是光滑流线，相应的交点尺寸控制在严格公差之内。

部件外形的光滑流线通常是用目测法，即用眼观察曲线的光滑性。当纵向曲线比较平坦，难以正确判断曲线是否光滑时，可应用纵向尺寸按比例压缩，横向尺寸不变，绘出纵向曲线，这样可以容易发现平时不易发现的不光滑的部位。

理论模线绘制的质量好坏直接影响飞机产品质量，为了确保飞机产品质量，对模线采取严格的绘制公差，通常在 0.1~0.2mm 之间选取。由此可见，理论模线绘制是一个劳动量很大、质量要求很高和反复协调的过程。

随着对飞机外形准确度要求的日益提高，用手工绘制理论模线的方法已不能满足生产发展需要。人们力求用数学解析方法来描述飞机复杂外形，以往由于计算公式复杂，计算量很大，难以实现，仅使用到二次曲线法。随着电子计算机的广泛采用，相应出现描述飞机外形曲线和曲面的“三次样条”、“B 样条”、“孔斯 (Coons) 曲面”等数学方法。借助电子计算机来处理数据和数值运算，大大简化了飞机外形协调工作。

数控绘图机提高了模线绘制精度和绘制速度，使同一条曲线不能重复绘制的规定失去意义，借助数控绘图机对相同曲线可以任意重复绘制，因绘图机有较高的重复精度。

2. 构造模线

构造模线是飞机部件某个切面 1:1 的结构装配图。构造模线绘制在带有部件某个切面的外形检验样板上 (简称外检)，如图 1-10 所示。构造模线也可绘制在不加工出部件切面外形的金属图板上，称为检验图板。通常沿框、肋切面的结构，均绘制“外检”，非结构切面上的一些结构，均绘制在检验图板上。

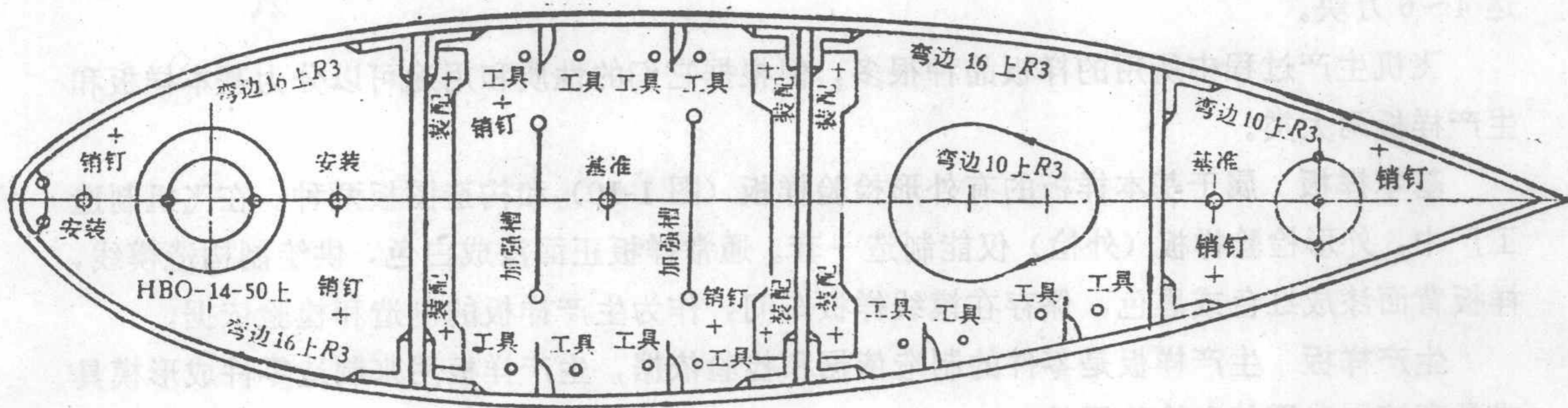


图 1-10 外形检验样板示例

构造模线绘制内容有：设计基准线及该切面上全部零件的位置和几何形状。

构造模线的作用是：协调绘制切面上全部零件的尺寸和形状、为该切面零件的生产样板提供制造依据，以保证有关该切面的成套工艺装备之间的协调，其协调原理和路线如图 1-11 所示。

飞机部件的构造模线与一般设计员所画的结构图纸不同，构造模线是按 1:1 的尺寸准确画出的，因此构造模线上面是不标注任何尺寸，并且零件的形

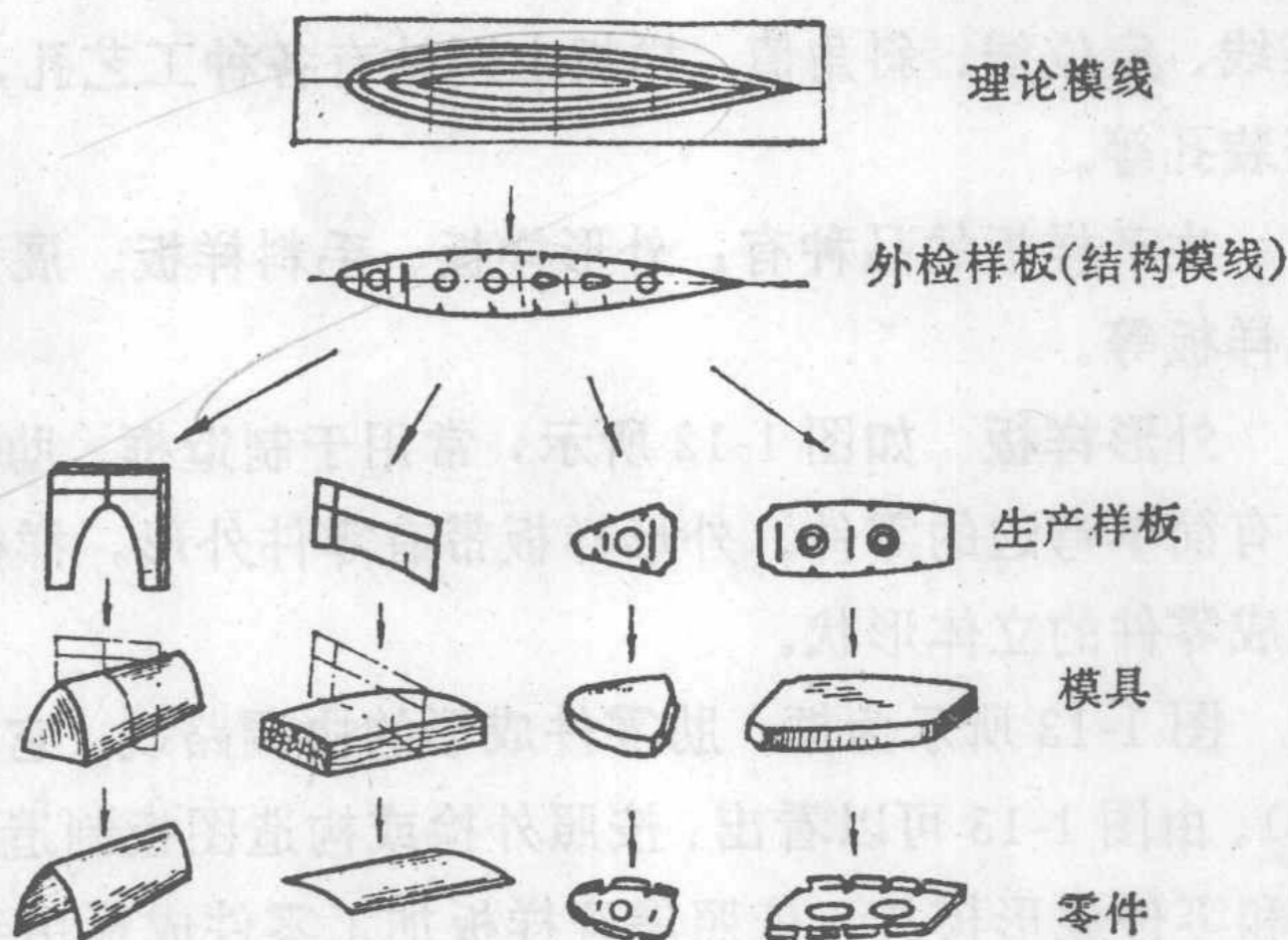


图 1-11 飞机零件之间协调原理和协调路线