

飞机制造技术丛

飞机制造
互换协调技术

FEIJI ZHIZAO
HUHUAN XIETIAO
JISHU

程宝藻 崔赞斌 编著

航空工业出版社

飞机制造技术丛书

飞机制造互换协调技术

程宝堃 崔赞斌 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本分册系统地介绍了飞机制造互换协调技术的基本概念、基础理论、各类工艺方法的应用、互换协调技术的发展、互换协调工艺方案的论证，还总结了生产中经常发生的一些疑难问题。

本分册可供航空、航天等部门的工厂、设计所、研究所的工程技术人员参考，也可作为航空院校飞机设计和制造专业的教学参考书。

飞机制造技术丛书

飞机制造互换协调技术

程宝蓁 崔赞斌 编著

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张6¹/₄ 160千字

1990年5月第一版 1990年5月 第一次印刷 印数： 001—625册

ISBN 7-118-00212-7/V19 定价：5.10元

中国航空学会
《飞机制造技术丛书》编委会

主 编：罗时大

副 主 编：马业广

编 委：董 孝 程宝冀 杨彭基 屠德彰 陆颂善 唐荣锡
郭兴中 戴世然 黄道宏 董德馨 孙肇卿 武厚忠

责任编辑：余发棟

秘 书 组：梁国志 张士霖 杨奇光

前 言

《飞机制造技术丛书》编委会是由中国航空学会组成的。委员们都是飞机制造技术专业的学者和专家，他们毕生致力于飞机的生产、科研、教学、管理工作，有丰富的实践经验。在此基础上，组织、指导、编写了这套《丛书》。

《丛书》的编写目的是：既要总结我国三十多年来飞机制造的经验，又要有选择地吸取国外先进的飞机制造的新技术，为积累资料、总结经验、培育人才、发展新技术打下基础，探索出一套具有中国特色的飞机制造技术的基本经验，可以说，这是一项重要的基础工程建设，有着重大的现实意义。

《丛书》共有17个分册。《飞机制造互换协调技术》是其中一个分册。在飞机制造中，互换协调技术方案设计是否正确，对新机的质量、周期、工作量、成本都有决定性的影响，所以本分册所论述的技术内容是很重要的。

过去对互换协调技术问题，大多凭生产经验从技术方法上去探索解决办法。当然，也总结了不少成功的经验和失败的教训，然而事倍功半，具有不同程度的盲目性。七十年代初期总结和发展了计量分析协调路线和工艺过程的准确度理论和方法之后，迅速在生产中得到了应用，使它不断发展和完善。它应与新技术方法的研究和互换协调问题的定性分析研究相辅相成，互相促进。现时，有必要进一步在航空、航天等工业中普及应用和提高有关互换协调技术的理论、经验和方法，使它们能更好地为我国社会主义“四化”建设服务。本分册编著的主要目的就在于此。

本分册由程宝薰担任主编。共分五章，其中第四章“保证互换协调的工艺方法”为本分册内容的主体，由崔赞斌和程宝薰合编。第一章“概论”介绍有关的基本概念和互换协调技术的概

貌。第二章“系统误差的分析与控制”和第三章“随机误差的特性及其积累过程”的内容为飞机制造互换协调技术的理论基础。第五章“飞机制造互换协调工艺方案的设计与分析”的内容介绍了计量分析问题的原则和方法。由于我国飞机制造业中的经济性研究赶不上现代工业管理的要求，缺乏系统、全面而可靠的技术经济数据，所以它属于概念性和探索性的内容。编入本分册既是飞机制造技术发展所希望纳入的，也可促进对这方面工作的发展。这几章由程宝堃编著，崔赞斌审校。

编著中吸收了许多同志提供的素材；最后经罗时大同志仔细校阅，提出了宝贵的意见，编者在此深表感谢。

为改正书中存在的缺点和错误，热切希望读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 概论	1
一、有关互换协调的基本概念	1
二、基本的互换协调方法及其综合应用	8
三、互换协调质量控制系统及有关的工艺容差标准	11
四、互换协调技术的发展及其对飞机制造技术的影响	18
第二章 系统误差的分析与控制	19
一、温差影响的分析与控制	19
二、工艺装备和工艺过程中变形的估计与控制	31
第三章 随机误差的特性及其积累过程	45
一、误差尺寸链——尺寸误差积累的数学模型	45
二、随机误差的分布特性及典型理论分布律	53
三、累积误差（闭环误差）的计算公式及其应用示例	82
四、交点环节误差计算公式及其应用示例	91
第四章 保证互换协调的工艺方法	102
一、设计协调路线的原则	102
二、模线样板基准孔工作法	110
三、模线样板标准样件工作法	127
四、计算机辅助飞机设计与制造（CAD/CAM）的一体化协调方法	152
五、各类协调方法的综合应用	168
第五章 飞机制造互换协调工艺方案的设计与分析	173
一、互换协调工艺方案设计的依据	173
二、设计、分析论证和决策	175
附录	179
附录一、 χ^2 分布表	179
附录二、标准正态分布表	180
附录三、机械加工工序的工艺容差和工序误差的数字特征	183
参考资料	185

第一章 概 论

一、有关互换协调的基本概念

飞机制造互换协调技术是飞机制造技术的一个组成部分，也是飞机制造质量控制的一个分支。它研究如何使批量生产的零、组件能顺利地进行装配，探索合理制定技术条件和有效保证互换协调要求的途径。

1. 飞机制造互换协调的含义和特点

飞机批量生产要求其结构零、组、部件具有一定的互换性和严格的协调性。互换性是产品相互配合部分的结构属性，它指同名零、组、部件在几何尺寸、形位参数和物理、机械性能各方面都能相互取代而具有的一致性。协调性指有协调关系（配合、对应关系等）的几何尺寸和形位参数都能兼容而具有的一致性。例如相邻部件结合交点的协调、相配合零件的协调、零件外形同装配夹具定位件工作面协调、零件工艺装备同装配工艺装备的对应工作面协调等等。具有互换性的零、组、部件，它们相互间必定是协调的。但协调性既可通过互换性方法取得，也可通过非互换性方法（如修配）取得。所以，相互协调的零、组、部件不一定具有互换性。

由于飞机结构零件众多，型面复杂，尺寸大而刚度低，装配阶段划分多，装配时容易变形等特点，除了对一般零、组件的几何尺寸和形位参数有互换性和协调性要求之外，还对部件气动力外形和相对位置、部件对接分离面有互换协调要求；对零、组、部件的结构强度、重量和重心位置等有互换性要求。

经验证明，单纯靠采用公差配合制度和各种传统的通用量具很难保证上述飞机制造的互换协调要求。现代飞机制造中广泛采

用的互换协调方法有：模线样板基准孔工作法、标准样件工作法和计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）的“一体化”协调方法（采用几何信息数值控制的协调系统）。

2. 互换性的分类

在飞机制造中，对零、组、部件提出的互换性要求有以下两类：

（1）使用互换

飞机在使用中，如果某一零、组、部件损坏，可以随意取一个备件将它更换，而不需进行挑选或补充加工就能保证使用要求，具有这种性质的互换性称为使用互换。使用互换的项目（如各种舱门、翼尖、舵面、起落架、外翼、尾翼等）及其技术条件由使用部门提出。

（2）生产互换

在生产过程中，飞机零、组、部件以及各种机构在装配时无需经过挑选和补充加工就能保证装配要求，具有这种性质的互换性称为生产互换。在批生产条件下，零、组、部件应具有一定的生产互换性。生产互换的技术条件由工艺部门根据产品结构的复杂程度和其制造工艺的特点以及经济上的合理性等来制定。

使用互换和生产互换的技术条件，从产品质量要求及其制造工艺方法的现实性和经济性来考虑，都有完全互换（绝对互换）和不完全互换之分。不完全互换性视其达到替换或装配目的的方法又可分为条件互换性（给定危率或强装技术条件）、组配（分组选配）互换性、调整互换性（借助可调补偿件）和修配互换性（事先留有一定的加工余量，在替换或装配时进行修配，修配后无互换性）等。

产品互换项目包括厂内互换的和厂际互换的。厂内互换是使用部门根据产品使用维护要求，对易损件进行更换的项目。厂际互换包括生产同类产品的主制厂与复制厂的产品互换和飞机厂与辅机厂、发动机厂的产品互换。

3. 飞机制造的准确度要求

为了保证飞机的性能和互换协调要求，机体制造应满足一系

列准确度要求，包括：部件气动力外形准确度要求、部件相对位置的准确度要求、部件内部组合件和零件位置的准确度要求、零件或装配件之间的配合准确度要求等。

(1) 部件气动外形准确度要求

部件表面的实际外形相对理论外形（常常以部件的检验设备的工作外缘来代替）存在误差。这些误差按其表现形式可划分为实际外缘相对理论外缘（不包括各切面之间的相对扭转和相对平移）的偏差、外形波纹度和表面平滑度（蒙皮对缝间隙和阶差，紧固件钉头对气动力外缘的凸凹量等）。航空工业部标准HB/Z23-80《飞机气动力外缘公差》对各类飞机的这类准确度要求制定了统一的公差标准。表1-1所列为其气动力外缘型值公差。

表1-1 气动力外缘型值公差 (mm)

部件	区域	公差	大型飞机		小型飞机	
			一类	二类	一类	二类
机身类	I区	基本	± 1.5	± 2.0	$+0.5$ -0.8	± 2.0
		局部	$\pm 2.5(15\%)$	$\pm 3.0(15\%)$	$+0.5(20\%)$ -1.2	$\pm 2.5(20\%)$
	II区	基本	± 2.0	± 3.0	$+0.5$ -1.2	± 2.5
		局部	$\pm 3.0(15\%)$	$\pm 4.0(15\%)$	$+0.5(20\%)$ -1.7	$\pm 3.0(20\%)$
翼面类	I区	基本	± 1.0	± 1.5	$+0.4$ -0.6	± 1.5
		局部	$\pm 2.0(15\%)$	$\pm 2.0(15\%)$	$+0.4(20\%)$ -1.0	$\pm 2.5(20\%)$
	II区	基本	± 2.0	± 2.0	$+0.5$ -0.8	± 2.0
		局部	$\pm 2.5(15\%)$	$\pm 3.0(15\%)$	$+0.5(20\%)$ -1.2	$\pm 3.0(20\%)$

表1-1内局部公差项中的百分率指允许误差出现在基本公差范围之外并在局部公差范围之内的最大概率。

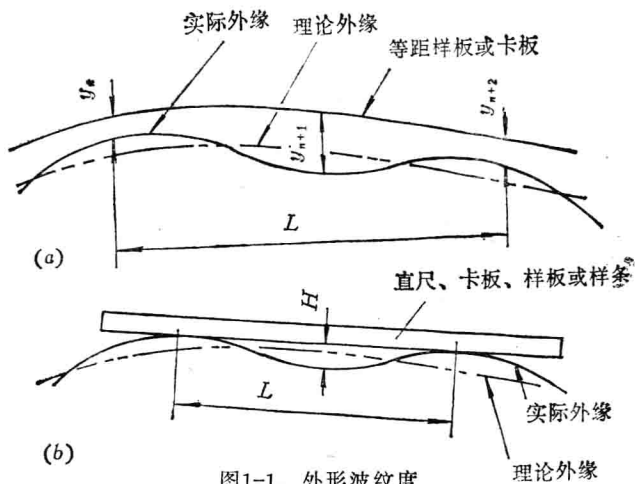


图1-1 外形波纹度

(a) 用等距样板或卡板检查时；(b) 用直尺、卡板、样板或样条检查时。
波深 H (mm)

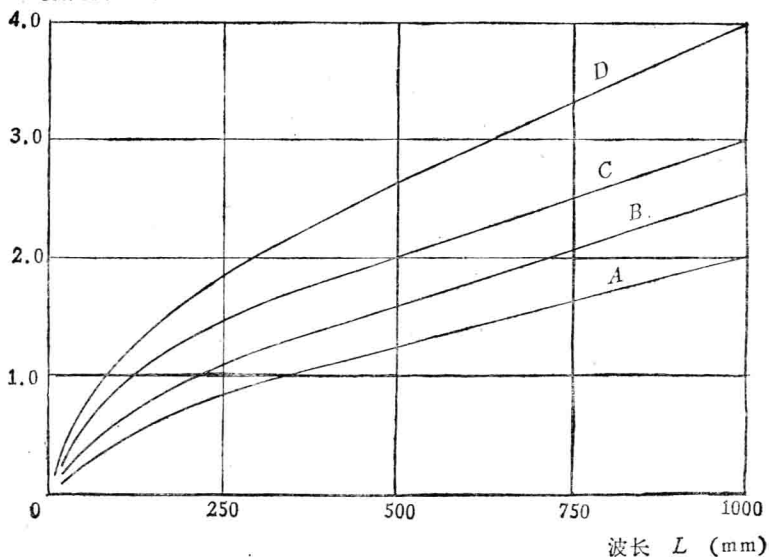


图1-2 波纹度公差曲线

A—大型飞机一、二类及小型飞机的翼面类部件外形波纹度的基本公差；B—大型飞机一、二类及小型飞机的翼面类部件外形波纹度的局部公差（10%），或小型飞机一类的机身类部件外形波纹度的基本公差，或小型飞机二类的机翼类部件外形波纹度的基本公差；C—小型飞机一类的机身类部件外形波纹度的局部公差（10%）；D—大型飞机一、二类及小型飞机二类的机身类部件外形波纹度的局部公差（10%）。

图1-1所示为外形波纹度的定义, $\Delta_\lambda = H/L$ 。用等距样板或卡板检查波深 H 时,

$$H = y_{n+1} - \frac{y_n + y_{n+2}}{2}$$

用直尺检查波深时, $H = y_{n+1}$

(2) 部件相对位置的准确度要求

飞机各部件相对位置的准确度要求,一般由飞机水平测量公差提出,其中包括一系列线性化了的尺寸公差和对称性公差。为了给一系列形位参数制定统一的公差标准,航空工业部标准HB/Z103-86《飞机水平测量公差》把角度公差单位定为分值,用千分率为单位给对称尺寸的相对偏差率制定公差。表1-2所列为机翼、

表1-2 机翼、尾翼水平测量公差(分)

部件名称	水平测量项目		大型飞机		中型飞机		小型飞机			
			I	II	I	II	I	II	III	
机翼	安装根部	公差 δ_ϕ	4	6	5	7	4	6	10	
		对称性公差 $\delta_{\phi左右}$	4	6	5	7	4	6	10	
	角 ϕ 尖部	公差 δ_ϕ	8	12	10	15	10	15	20	
		对称性公差 $\delta_{\phi左右}$	8	12	10	15	10	15	20	
	上(下)	公差 δ_ψ	3	5	3	5	10	12	15	
		反角 ψ	对称性公差 $\delta_{\psi左右}$	2	4	3	5	8	12	15
平	安装根部	公差 δ_ϕ	5	8	6	10	6	10	15	
		对称性公差 $\delta_{\phi左右}$	5	8	6	10	6	10	15	
	角 ϕ 尖部	公差 δ_ϕ	8	12	10	15	10	15	20	
		对称性公差 $\delta_{\phi左右}$	8	12	10	15	10	15	20	
尾	上(下)	公差 δ_ψ	4	6	4	6	10	15	20	
	反角 ψ	对称性公差 $\delta_{\psi左右}$	4	6	4	6	10	15	20	
垂尾	安装角 ϕ	根部	公差 δ_ϕ	/	/	/	/	7	10	15
		尖部	公差 δ_ϕ	/	/	/	/	10	15	20
	倾斜角 γ	公差 δ_γ	/	/	/	/	10	15	20	

尾翼水平测量公差。

在有全机数学模型并用水准仪扫描法逐点测量全部水平测量点的高度值，分别给定高度公差时，各项形位误差综合起来，不便采用统一的公差标准。美国波音飞机公司生产的喷气式旅客机系列就是这样制定准确度要求的。

(3) 部件内部组合件和零件位置的准确度要求

如大梁、框、肋和长桁的轴线实际装配位置相对理论轴线位置均有一定的准确度要求。它们的位置准确度不仅对部件外形、接头位置和结构强度有影响，而且对装配协调常常有明显的直接影响。因此，一般规定梁轴线位置误差和直线度误差不超过 $\pm 0.5 \sim \pm 1.0 \text{ mm}$ ，普通肋轴线的位置误差和肋的平面度误差不超过 $\pm 1 \sim \pm 2 \text{ mm}$ 。长桁位置误差不超过 $\pm 2 \text{ mm}$ 等。

(4) 零件或装配件间的配合准确度要求

(i) 各种不可卸连接对零件间配合间隙的要求见表1-3。

表1-3 连接方法对配合间隙的要求

连 接 方 法	在一定压力下零件间的允许间隙 (mm)	备 注
铆 接	0	铆钉处
	0.2~0.5	其余区域
胶 接	0.01~0.2	
钎 接	0.04~0.2	
接触点焊、滚焊	<0.1~0.15	
熔 焊 (对 焊)	0.5~1.0	

(ii) 叉耳接头的螺栓连接配合要求如下：

(a) 孔与螺栓的配合一般为IT8~IT9级精度，H8~H9/h7~f7~f8~f9的间隙配合。个别采用H7/h6~g6的配合（如直升机上的抗振交点）。

(b) 三对或多对叉耳接头的动翼面和舱门，其转动轴线的同轴度一般要求不超过0.4~0.6mm；结构有设计补偿或结构的装

配变形很小时，同轴度应不超过0.25mm。

(c) 叉耳宽度方向上的间隙，在尺寸有公称间隙时一般允许0.2~1.0mm；当无公称间隙时，采用H9~H11/f9~h11的间隙配合。间隙在装配时允许加垫消除或不加垫保留，视交点受力情况而定。

(iii) 围框式对接接头的技术要求如下：

(a) 为了补偿温度误差和装配变形，孔与螺栓的配合常采用带公称间隙的间隙配合。孔和螺栓直径的精度一般为IT9~IT13级。公称间隙0.2~0.8mm，视结合面尺寸大小等因素而定。也有不给公称间隙的，采用H9/f7~f9的配合，主要用于外廓尺寸较小，接头受力严重的部位。

(b) 对接面之间的间隙。对于装配后不进行对接面精加工的情况，允许在对接时于对接面之间的间隙中加一定厚度的斜垫片。对于装配后进行精加工的对接面，允许局部存在0.1~0.2mm的间隙。

4. 解决互换协调问题的基本原则

飞机制造中的互换协调问题涉及产品设计、工艺准备和生产过程等方面。合理解决互换协调问题应在保证产品质量的前提下综合考虑各方面的因素，针对具体问题找出其主要因素，“对症下药”。在现实条件下尽可能获得最好的技术经济效益。

(1) 在飞机结构设计中，除了保证结构强度和重量分配的要求外，在结构形式的选择、补偿件的应用、几何尺寸和形位参数的公差分配与控制等方面，都应赋予结构易于保证互换协调的优良工艺性。

(2) 在生产工艺准备工作中，按产品结构特点及其技术要求、生产任务和生产条件（产量、批量、周期、设备、技术力量等）设计与其相适应的保证互换协调的工艺路线和协调方法。

(3) 在生产过程中，要严格控制影响互换协调的工艺因素。

以上原则过去主要凭经验掌握，虽然解决了不少问题，但也常出现一些矛盾和不合理的现象。

经验证明, 采用先进的、经济效益高的互换协调方法、路线和应用尺寸链原理计算分析产品结构中的公差分配(控制)和制造工艺路线中的工艺容差分配(控制), 是合理解决互换协调问题的有效途径。其一般过程如图1-3所示。

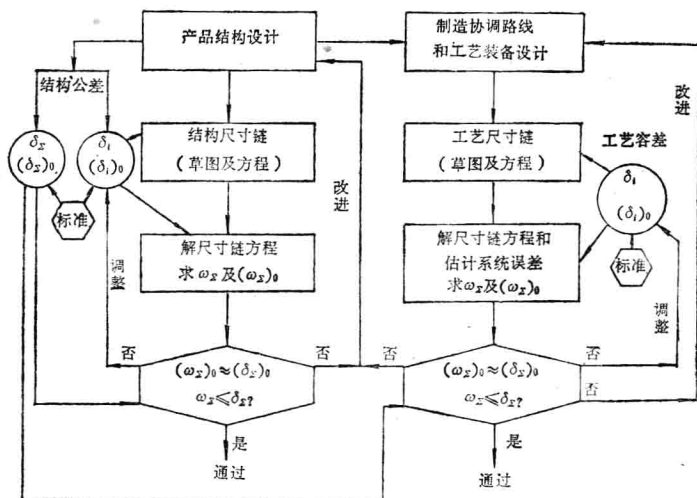


图1-3 计算分析互换协调问题的一般过程

二、基本的互换协调方法及其综合应用

飞机制造中基本的互换协调方法主要有模线样板工作法、标准样件工作法和计算机辅助设计与制造的“一体化”(CAD/CAM)方法等, 如图1-4所示。

模线样板工作法(图1-5)是在二十世纪三十年代飞机发展到全金属薄壁结构, 产品图纸不能准确而全面地把它表达出来的情况下, 引进船舶制造中的放样技术而发展起来的。

标准样件工作法(图1-6)是在四十年代初, 为了适应结构复杂的小型高速飞机的大批生产, 以立体的标准工艺装备(标准样件和模型等)为协调依据而发展起来的。

五十年代电子计算机和数控技术开始用于飞机设计和制造以

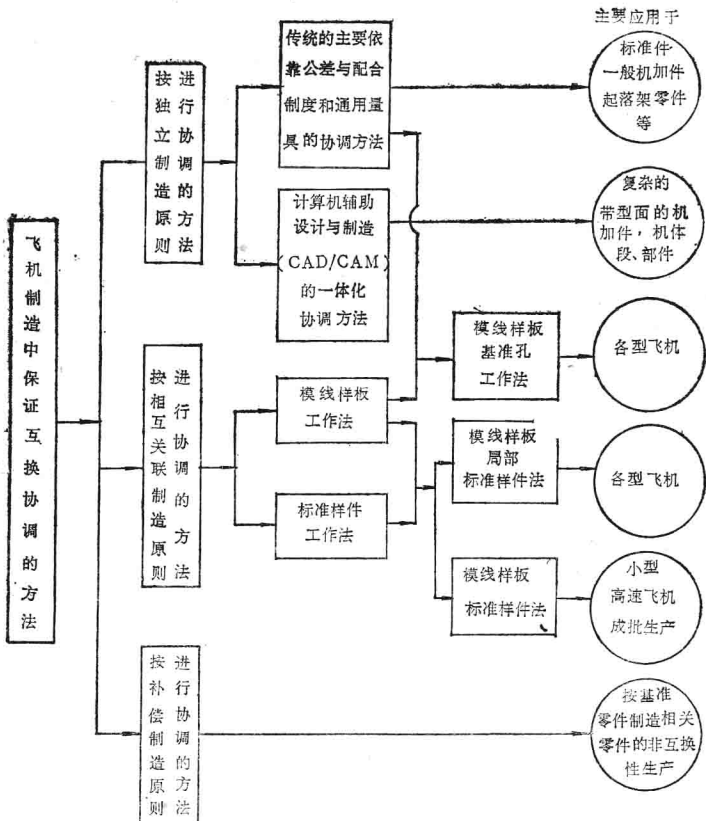


图1-4 飞机制造中保证互换协调的方法

后，建立了飞机各部分外形的数学模型、几何数据库、计算程序和操作程序，并使用各种数控机床和数控绘图机，改变了仅按产品图纸与使用通用量具和常规机床设备分别制造零件而后装配的传统独立制造法，以数值信息的处理和传递法取代了传统的模拟量传递法，逐渐形成一种计算机辅助设计与制造的“一体化”技术（图1-7）。“一体化”协调系统中也有模线和样板，但它们仅作为解析法的目视检验手段，而不再是原始协调依据。

当前，各种协调方法均有发展，各有优缺点，各有其适用条件，常常综合应用互相渗透。如模线样板法与基准孔系统相结合，

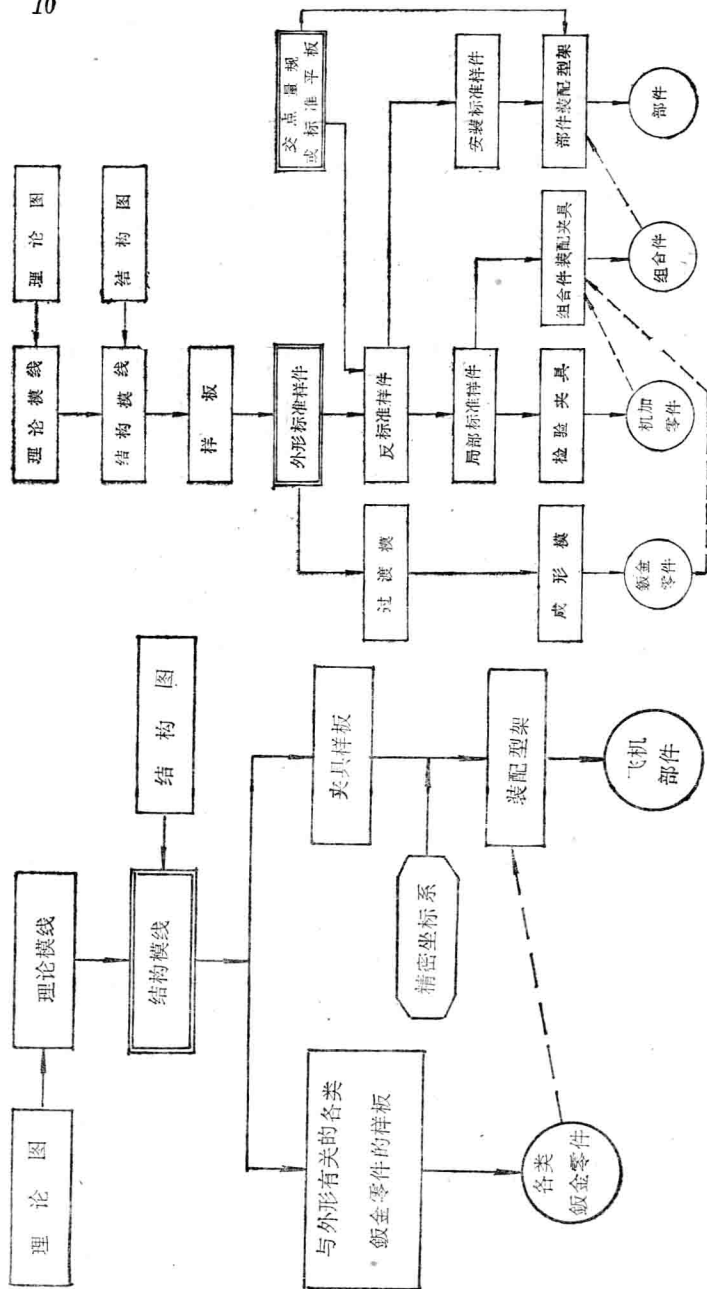


图1-6 标准样件工作法简图

图1-5 模线样板工作法简图