

飞机工艺装备

结构计算

李正平 编著
周 震



表 C-10(续)

尺 寸		断 面 几 何 特 征						理论重量 <i>kgf/m</i>
D	δ	A E	A Y	A Z	J E	I Y	I Z	
<i>mm</i>		<i>mm²</i>			$1 \times 10^4 mm^4$			
133	4.0	1621	859.9	859.9	675.1	337.5	337.5	12.73
	5.0	2011	1066.8	1066.8	824.8	412.4	412.4	15.78
146	5.0	2214.8	1175.0	1175.0	1102.2	551.1	551.1	17.39
	6.0	2638.9	1400.0	1400.0	1295.5	647.7	647.7	20.72
159	5.0	2419.0	1283.3	1283.3	1435.8	717.9	717.9	18.99
	6.0	2884.0	1530.0	1530.0	1690.4	845.2	845.2	22.64
168	5.0	2560.4	1358.3	1358.3	1702.3	851.1	851.1	20.10
	6.0	3053.6	1620.0	1620.0	2006.2	1003.1	1003.1	23.97
219	7.0	4662	2473.2	2473.2	5244.1	2622.0	2622.0	36.36
	8.0	5303.0	2813.3	2813.3	5910.9	2955.4	2955.4	41.63

内 容 简 介

本书是为航空工业部举办的专业学习班而编写的教材，书中公式、数据齐全，材料较新。

内容共分三大部分，第一到六章为第一部分，主要以工艺装备杆系结构为例，系统地介绍了有限单元法的基本原理，程序的编制方法以及计算分析实例；第七到九章为第二部分，主要介绍弹性力学的有限单元法；附录A—C为第三部分，是第一、二部分的基础，并提供了常用断面几何特征值。

此书系统性强，可供从事工艺装备结构设计的人员和有关人员参考。

飞 机 工 艺 装 备 结 构 计 算

李正平 周 震编著

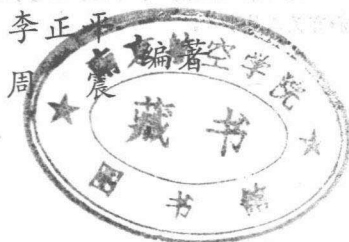
*

国营峨眉机械厂 出版

国营灌县印刷厂 印刷

1983年5月第一次印刷

飞机工艺装备结构计算



国营峨眉机械厂技术情报室

479073

前 言

自1978年起,在成都电讯工程学院周震副教授的指导下,我们在飞机工艺装备结构设计中,采用有限单元法进行计算分析,编制了专用程序,经过试验测量分析,证实了这种方法在飞机工艺装备结构设计中的可行性。继而进一步地扩大了应用范围:在某新机研制中,配合工艺装备设计进行大量的数值计算分析,编制典型框架设计图表在设计中推广使用等等,在生产实践中得到了考验,取得了一些成果。本书就是在此基础上,较系统地总结了这项工作,为从事航空工艺装备设计的专业人员介绍这一方法而编写的。

有限单元法是一种比较新颖和有效的数值方法,目前已广泛地应用于各个工程领域。在国外,已有不少通用的、有价值的计算程序配置在相应的计算机上,能提供用户使用,近几年来,国内也有相应的发展。我们结合目前各飞机工厂现有计算机配置的实际情况而编制的程序,能解决工艺装备中大量出现的杆系结构计算问题,具有适用性强,易于掌握、应用的特点。

在飞机制造中开展计算机辅助技术,已受到普遍重视,在工艺装备结构分析与设计中,采用计算机辅助技术无疑地将会全面提高工艺装备设计质量与缩短设计周期。设计人员将借助计算机这个强有力的工具,对复杂的结构进行方案研究论证,以确定最佳方案。

全书共分三个部份:第1~6章为第一部份,主要是以工

艺装备杆系结构为例，系统地介绍了有限单元法的基本原理，程序的编制方法以及计算分析实例。第7~9章为第二部份，主要介绍弹性力学问题的有限单元法的一般方法，对于解决工艺装备中三维块体、板壳结构的计算以及使用有关程序提供了一个基础。附录A~C为第三部份，附录A是第一部份内容的基础，附录B是第二部份内容的基础，附录C提供了常用断面几何特征值，可供准备计算数据时查阅使用。

本书第1、2、4、6、9以及附录A、B、C由工装设计工程师李正平同志编写，周震副教授担任了3、5、7、8章的编写并审校了全书。在编写过程中得到了有关院校、所以及工厂领导的热情支持，在此一并表示感谢。

本书将作为航空工业部举办的专业学习班的教材。写作时间极为仓促，加上作者水平有限，经验不足，书中难免有错误和不妥之处，恳请给予批评指正。

1983年3月于成都

目 录

前言

第一章 飞机工艺装备结构分析 (1)

- 1.1 引言 (1)
- 1.2 工艺装备结构分类 (2)
- 1.3 工艺装备用材料 (7)
- 1.4 理想化模型 (8)
- 1.5 对称结构分析 (17)

第二章 有限单元法的概念 (19)

- 2.1 引言 (19)
- 2.2 有限单元法的基本原理 (21)
- 2.3 有限单元法分析过程概述 (27)
- 2.4 有限单元法与计算程序 (30)

第三章 线性代数方程组求解 (31)

- 3.1 高斯消去法 (31)
- 3.2 对称矩阵的三角分解法 (41)
- 3.3 程序的实现 (46)

第四章 杆系结构分析的矩阵方法 (50)

- 4.1 引言 (50)

4. 2	单元结点力与结点位移	(51)
4. 3	单元刚度矩阵	(58)
4. 4	坐标转换	(66)
4. 5	等效结点荷载的计算	(75)
4. 6	结构总体刚度矩阵	(79)
4. 7	结点位移、应力的计算	(89)

第五章 杆系结构计算程序的编制 (97)

5. 1	程序框图	(97)
5. 2	数据的输入	(100)
5. 3	对角元地址数组赋值	(101)
5. 4	单元刚度矩阵	(104)
5. 5	总体刚度矩阵及荷载矩阵的组建	(106)
5. 6	约束处理	(111)
5. 7	刚度计算程序实例	(113)
5. 8	大型复杂杆系结构程序设计	(135)

第六章 杆系结构工艺装备计算分析实例 (144)

6. 1	引 言	(144)
6. 2	结构纵梁的计算与试验测量分析	(145)
6. 3	转动框架刚度计算	(151)
6. 4	立式框架刚度计算	(157)
6. 5	量规构架的刚度计算	(166)
6. 6	飞机拆胎器计算	(170)
6. 7	综合应用	(176)

第七章 计算单元刚度矩阵和等效荷载的一般方法.....(181)

7. 1 引 言.....(181)

7. 2 拉格朗日插值函数.....(183)

7. 3 自然坐标.....(187)

7. 4 位移模式、形函数及其矩阵.....(193)

7. 5 应变一位移关系矩阵 (几何矩阵)(197)

7. 6 弹性矩阵及应力矩阵.....(199)

7. 7 单元刚度矩阵.....(200)

7. 8 单元荷载及变温荷载.....(202)

7. 9 对于平面三角形单元的进一步讨论.....(205)

第八章 等参数单元.....(209)

8. 1 等参数单元的一般计算公式.....(209)

8. 2 高斯求积法简介.....(221)

第九章 板壳问题的有限单元法.....(228)

9. 1 引 言.....(228)

9. 2 矩形薄板单元.....(229)

9. 3 三角形薄板单元.....(237)

9. 4 板壳问题的有限单元法.....(243)

9. 5 板壳样件骨架计算实例.....(245)

附录A 矩 阵.....(248)

A. 1 矩阵的定义与类型.....(248)

A. 2 矩阵的运算.....(251)

A. 3	逆矩阵	(260)
A. 4	矩阵的导数与积分	(262)
附录 B	弹性力学简介	(265)
B. 1	应力	(265)
B. 2	位移及形变 几何方程	(267)
B. 3	物理方程 弹性矩阵	(269)
B. 4	虚功及虚功方程	(272)
B. 5	两种平面问题	(274)
B. 6	薄板的弯曲问题	(280)
附录 C	常用断面的几何特征值	(288)
C. 1	计算公式	(288)
C. 2	常用断面的几何特征值	(291)

第一章 飞机工艺装备结构分析

1.1 引言

飞机工艺装备是飞机零件生产、产品装配与检验等必不可少的设备，它在飞机生产过程中占有很重要的地位。工艺装备结构的一个重要质量指标是结构要有足够的刚性（或强度）与稳定性（合称为不变形性），以满足产品制造与安装的精度要求，保证产品装配协调与互换。除此之外，工艺装备还要求使用方便，可达性好，易修复以及制造周期短、成本低等等。

由于工艺装备结构本身的复杂性，各厂在设计中又有大量的可以沿用的仿制资料，因此，在以往设计中，采用了传统的对比方法，借凭经验进行极为粗略的近似计算，致使结构设计存在一些不合理现象。如有些工艺装备构架愈来愈粗笨，给制造与使用带来了很大的困难。这些问题，曾引起一些设计人员的重视，并作了改进的尝试，可是，因为缺乏对结构的正确分析判断，缺少现代化的计算工具，以致在改进尝试中又出现了刚性不足而引起整台设备的报废现象。随着我国航空工业的迅速发展，工艺装备设计也将适应这个形势而进入一个新的阶段，对于自行研制设计的工艺装备也将提出更高的要求：有计算分析，有合理的结构设计方案。同时，随着电子计算机的日益普及，给工艺装备设计提供了强有力的计算工具，使设计人员有可能去探索先进的、新颖的结构，提高工艺装备设计的水平。

本章将就工艺装备结构的分类、材料以及理想化力学计算模型的建立等问题作一简要介绍，以便为下面各章作准备。

1.2 工艺装备结构分类

1.2.1 飞机工艺装备分为两大类

一类是生产工艺装备，直接用于制造和检验零件、组合件、部件和产品的总装配，主要包括各种生产样板、模具、夹具或型架等；另一类是标准工艺装备，用于制造和检验生产工艺装备，保证生产工艺装备之间尺寸和形状的相互协调。

标准工艺装备是以1:1的真实尺寸体现产品某些部件尺寸和形状的刚性量规，是制造和检验生产工艺装备的尺寸依据。标准工艺装备包括有：样板、零件或组合件标准样件，安装标准样件，反标准样件，表面标准样件，标准平板以及标准量规等等。图1-1示出了部份标准工艺装备的结构实例。

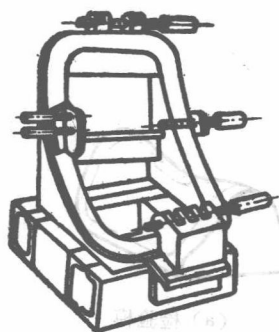
生产工艺装备中有一类是用于产品加工或装配的，如各种模具、机床夹具、焊接夹具、装配型架和地面设备等等；另一类是用于产品的调试与检验的，如试验设备，检验样板、检验模和检验夹具等等。图1-2示出了部份生产工艺装备结构实例。

1.2.2 按结构分析时采用不同单元分类

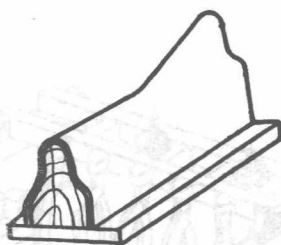
飞机成批生产中，需要采用大量的工艺装备，每台工艺装备都是由若干个部份组成的，如装配型架一般由型架骨架、定位元件以及夹紧元件等三部份组成。在对工艺装备结构进行设计时，往往对其中某一个组成部份需要加以计算分析。当然，



(a) 标准样件



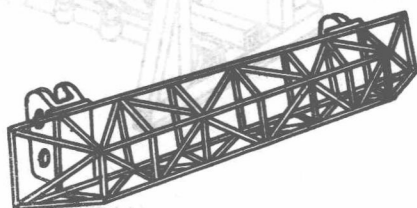
(b) 反标准样件



(c) 表面标准样件



(d) 标准平板



(e) 标准量规

图 1-1 部份标准工艺装备结构实例

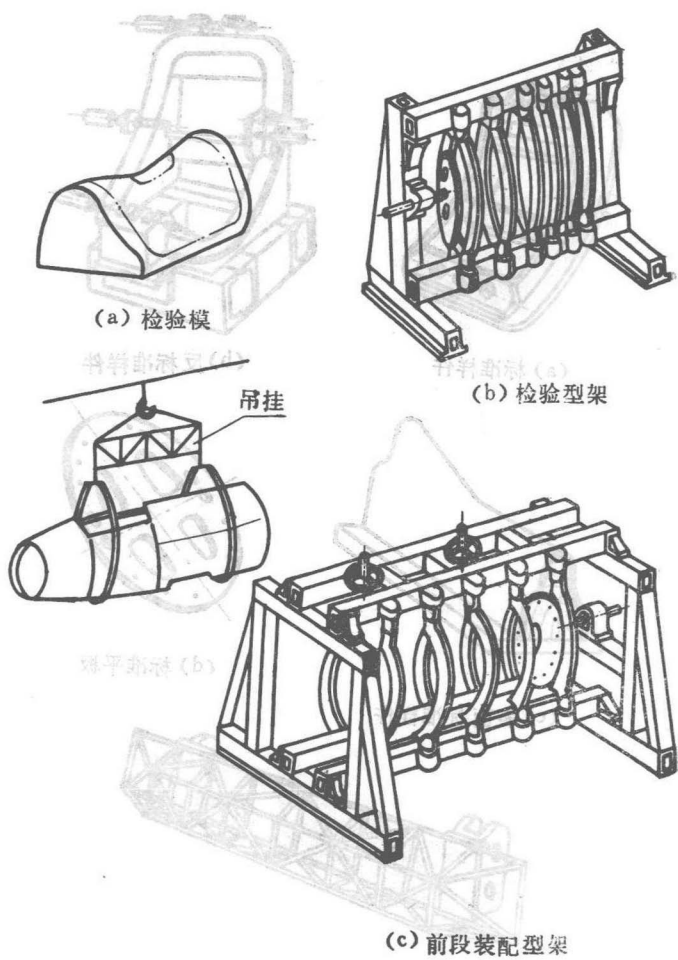


图 1-2 部份生产工艺装备结构实例

有时也需要对整台工艺装备加以计算分析。为便于叙述，在本书中，我们从结构分析时采用不同单元的角度出发，将工艺装备结构分成以下几类：

(1) 杆系结构：工艺装备中常用的各类工作量规，标准量规、标准样件骨架，装配型架的骨架，飞机吊挂等都属于这一类。杆系结构由比其横截面尺寸大得多的杆件螺接或焊接组成。图1-1(e)所示的标准量规，是采用钢管焊接组合而成的某机型机身与机翼结合交点孔的标准量规。

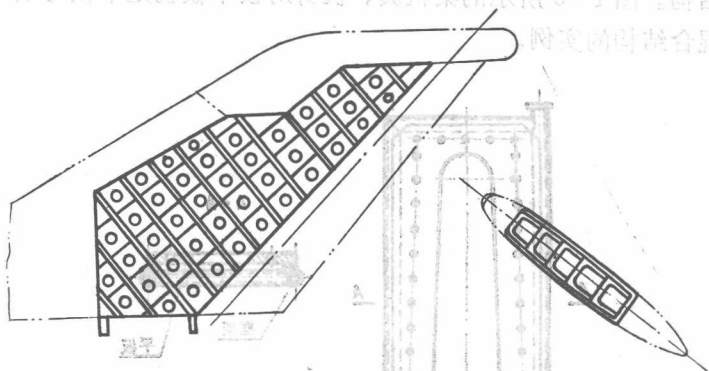


图 1-3 垂直安定面标准样件骨架

(2) 板壳结构：工艺装备中各类标准平板，工作模板，薄板量规，薄板样件骨架等都属于这一类。这类结构中板的厚度尺寸远小于其它两个方向（长度和宽度）的尺寸，图1-1(d)所示的标准平板是采用铝合金材料制成的某机型机身对合标准平板，图1-3所示为某机型垂直安定面标准样件骨架结构。

(3) 块体结构：工艺装备中各类零件模胎，铸件标准样件以及铸造定位元件等都属于这一类。块体结构可以看成由若干

个实体块组成，其各个块体的三个方向尺寸，大约为同一数量级，图1-4所示为某机型一个零件落锤模。

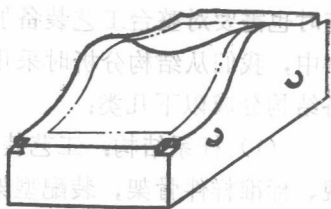


图 1-4 零件落锤模

(4) 混合结构：工艺装备中有些结构不能看成单一的结构体系，如由平板与杆系结构组成或平板与块体结构组成，在这里我们称它为混合结构。图1-5所示的某机翼、机身对接平板就是平板与杆系混合结构的实例。

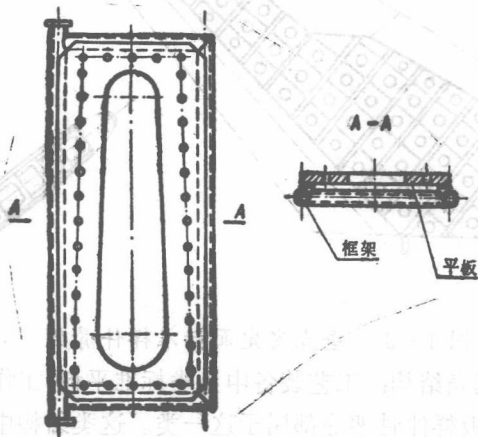


图 1-5 机翼、机身对接平板

1.3 工艺装备用材料

1.3.1 工艺装备用材料的选用原则

工艺装备选用材料首先应保证工艺装备的制造与使用性能,同时应考虑节约材料的费用以降低制造成本,简化材料的供应以保证缩短飞机制造的生产准备周期。值得提出的是,对工艺装备用材料加以限用,减少规格品种,做好计划储存是一个很重要的环节。

1.3.2 工艺装备常用材料

一般包括黑色金属、有色金属与非金属材料三大部份。常用黑色金属有普通碳素钢、结构钢、工具钢、碳素钢铸件、灰铸铁件以及球墨铸铁件等等;常用有色金属有黄铜、青铜、铝合金、铅锌合金以及铸铝合金等等;常用非金属材料有木材、橡胶、各类塑料等等。工艺装备常用的材料品种有:热轧普通槽钢 (GB 707—65), 热轧等边角钢 (YB 166—65), 热轧不等边角钢 (YB 167—65), 无缝钢管 (YB 231—70), 轧制薄钢板 (GB 708—65), 热轧厚钢板 (GB 709—65), 热轧圆钢和方钢 (GB 702—72) 以及铝及铝合金管 (GB 610—66) 等等。

近年来,在工艺装备设计与制造中,塑料工艺装备的应用百分比有明显的提高,这是因为采用塑料工艺装备具有制造工时少、成本低、抗蚀性能好以及易修复等优点,尤其适用于型面比较复杂的各类工艺装备,图 1-6 所示为采用钢骨架的塑料表面标准样件。