

光学工具法安装技术

郑叔芳 蒋有年 编著

国防工业出版社

40.6

内 容 简 介

由光学工具组成光学坐标系, 进行空间测量、定位和安装是近年来发展的一项先进技术, 广泛用于航空、航天、造船、交通、机械、核能、高能物理、建筑、采矿、石油等部门。本书系统论述了光学工具法的原理、安装工艺和准确度分析方法, 供有关工程技术人员使用, 并可作为高等学校教材及教学参考书。

光学工具法安装技术

郑叔芳 蒋有年 编著

责任编辑 蒋怡

*

国防工业出版社出版

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17³/₄ 402千字

1988年4月第一版 1988年4月第一次印刷 印数: 0,001—1,450册

ISBN7-118-00147-3/TH8 定价: 3.65元

序

光学工具法安装技术在我国航空工业中的应用已有二十年的历史。六十年代后期逐步推广到其他工业部门。二十年来，积累了丰富的实际工作经验，改进和发展了光学工具和方法，进行了大量的试验和理论研究。本书全面地系统地总结了这些工作，并有所发展。

第三章提出了定位系统的概念，比较深刻地阐明了定位过程的实质。第四、五章系统地总结了用光学工具建立坐标系、进行空间定位安装的经验。第六章论述了光学工具法安装技术的定量规律，标志着这一技术已发展到较高的水平。

本书主要内容已编入航空工业部部标《光学工具安装型架》，两者结合使用，对实际生产工作具有指导意义，将为进一步推广和提高光学工具法安装技术作出贡献。

陸頌芳

一九八四·六

前 言

空间六个自由度定位是工业生产中的一项基本任务，光学工具法安装技术是空间定位的一种先进技术。

二十余年来，我国航空工业和其他工业部门在光学工具法安装技术方面进行了大量的实践和理论工作。本书的目的，是从理论上总结、提高和发展光学工具法安装技术，使其得到更广泛更有效的应用和推广。

本书的详细提纲，承蒙我国光学工具法安装技术的创导者陆颂善总工程师以及杨彭基教授、程宝堃教授审阅指导，陆颂善总工程师为本书写了序言，易志斌总工程师审阅了全书，航空工业部各主机厂有关同志对本书热情支持并提出许多宝贵意见。我们谨向上述同志以及为本书的出版付出了辛劳的所有同志致以深切的感谢。

作 者

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 光学工具法安装工作的内容	1
一、光学工具法安装的概念和示例	1
二、综合应用的安装方法	4
§ 1.2 光学工具法安装方案	5
一、主要技术经济指标	5
二、影响安装方案的因素	6
三、安装方案的综合性	7
§ 1.3 光学工具法安装技术发展简况	10
第二章 光学工具	12
§ 2.1 点、线、面的构成	12
一、点的构成	12
二、线的构成	12
三、面的构成	13
§ 2.2 常用光学工具及其附件	13
一、水准仪	13
二、经纬仪	17
三、工具经纬仪	20
四、测微准直望远镜及其主要附件	22
§ 2.3 常用光学测角工具	27
一、光学直角器	27
二、骑式水准器	28
三、光学象限仪	28
§ 2.4 常用光学测长工具	29
一、长杆千分尺(内径千分尺)	29
二、光学工具尺带	30
三、其他测长工具	30
§ 2.5 常用仪器支架	32
一、仪器活动支架	33
二、接杆式支架	33
三、高支架	34
四、长杆千分尺托架	34
§ 2.6 水准器	35
一、水准器的用途	35
二、水准器的结构原理	35
三、水准器的分类	36
四、水准器的国家标准	37
五、水准器的灵敏度及其影响因素	39
第三章 定位原理	43
§ 3.1 工件的自由度	43
一、六个自由度定位	43
二、少于六个自由度的定位	43

三、多于六个自由度的定位	44
§ 3.2 定位系统	45
一、定位系统的组成和概念	45
二、定位系统中尺寸的静态传递过程及其数学模型	48
三、定位系统中尺寸的动态传递过程及其数学模型	50
§ 3.3 测量	51
一、测量的要素	51
二、工件按测量基准分布的分类	51
三、测量基准的结构形式	52
四、测量基准数量的选择	53
五、测量基准位置的选择	54
六、影响测量准确度的因素	56
§ 3.4 调整支撑	57
一、调整支撑点的选择	57
二、调整的干扰	57
三、调整中自由度的分离	61
四、影响调整效率的因素	61
第四章 光学坐标系	62
§ 4.1 光学坐标系的组成和种类	62
一、光学坐标系的组成	6
二、光学坐标系的种类	65
三、光学坐标系和重力坐标系的关系	72
§ 4.2 光学坐标系的设计	74
一、以重力方向为基准的原则	74
二、基准视线的设计原则	74
三、最小误差原则	77
四、光学坐标系设计的其他原则	78
§ 4.3 光学坐标系的建立	79
一、建立光学坐标系的准备工作	79
二、建立光学坐标系	80
三、建立光学坐标系的基本操作	86
四、光学工具安装图	88
第五章 安装方法	90
§ 5.1 光学工具法安装的分类	90
一、按坐标系分类	90
二、按转接工具分类	90
三、按调整支承方式分类	91
§ 5.2 光学坐标法	91
§ 5.3 光学坐标-工具轴法	93
一、光学坐标-工具轴法的坐标系	93
二、光学坐标-工具轴法的安装方法	96
§ 5.4 光学坐标-安装机法	96

一、光学坐标-机械安装机安装方法	97
二、光学坐标-激光自动准直安装机安装方法	97
§ 5.5 光学坐标-工具坞安装方法	107
一、光学仪器-坐标工具安装法	107
二、光学坐标-机械化工具坞安装法	113
§ 5.6 光学坐标-机械坐标法	119
一、光学坐标-机械坐标的构成	119
二、光学坐标-机械坐标法的安装方法	120
§ 5.7 光学测量转接工具	120
一、光学测量转接工具的分类和形式	120
二、通用光学测量工具	122
三、专用转接测量工具	128
四、对转接测量工具的要求	132
§ 5.8 光学测量基准	133
一、光学测量基准的概念	133
二、光学测量基准的形式	134
三、对光学测量基准的要求	135
四、光学测量基准的选择	135
§ 5.9 调整支承	135
一、调整支承的种类	136
二、调整元件的设计要求	136
三、调整支承的典型结构、特点及应用范围	137
§ 5.10 光学工具安装法对被安装机械的结构要求	140
一、大分散小集中	140
二、可分离自由度	140
三、对被安装机械的其他要求	142
§ 5.11 光学工具法安装典型工艺过程	142
一、光学工具法安装时基准元件的选择	142
二、元件的安装方法	142
§ 5.12 光学工具法安装实例	143
一、飞机机身中段总装型架的安装	143
二、飞机前机身精加工型架的安装	147
三、飞机尾梁总装型架的安装	148
四、飞机机身总装型架的安装	150
五、十米雷达抛物面天线面板的装配	150
六、火箭发动机六分力试车台架的安装	158
七、同步辐射装置的安装	161
八、汽车车体的测量与检修	162
九、机床运动准确度的检测与调整	163
第六章 安装准确度	164
§ 6.1 基本概念和方法	164
一、随机变量及其规律	164

二、常用的分布	165
三、统计分布	168
四、误差和公差	169
五、精度和准确度	171
六、制造误差和检验误差	171
七、误差的综合	173
八、试验数据处理	175
§ 6.2 光学工具法安装的基本误差环节	185
一、光学仪器误差	185
二、瞄准误差	192
三、附件误差	196
四、转接误差	201
五、测长误差	204
六、测角误差	207
七、重力坐标误差	209
八、温度误差	210
九、基础稳定性	213
十、应力误差	214
§ 6.3 常用的误差环节组合	215
一、光学工具互换误差	216
二、光学视线误差	219
三、水平光学平面误差	227
四、垂直光学平面误差	229
五、测距误差	234
§ 6.4 误差的综合	238
一、潜望镜轴承孔的安装误差	238
二、建立矩形光学站的误差	240
三、板件型架内型板安装误差	248
四、机身中段总装型架安装误差	249
第七章 光学工具法安装技术的发展	254
§ 7.1 激光技术的应用	254
一、激光准直	254
二、激光测长	259
§ 7.2 调整支承自动化	261
一、激光自动准直系统	261
二、自动调平系统	264
§ 7.3 光学纤维的应用	267
一、光学纤维的传光和传象原理	267
二、光学纤维在光学工具法安装中的应用	268
附一 快干水泥	268
附二 易熔合金	269
参考文献	270

第一章 概 论

§ 1.1 光学工具法安装工作的内容

一、光学工具法安装的概念和示例

光学工具法安装是在光学坐标系中，将被装配工件定位在所要求的位置上，并连接成装配件。其主要内容是：

1. 定位；
2. 连接。

定位包括测量和调整。测量的目的是检查工件的相对位置是否符合图纸和技术条件的要求。如符合，则定位已完成。如不符合，则需进行调整，再测量，再调整，……直至符合要求。

用光学工具法进行安装时，测量工作在光学坐标系中进行。光学坐标系由准直望远镜、水准仪、工具经纬仪等光学仪器的视轴

及其扫描平面构成。在光学坐标系中，通过长杆千分尺、工具轴、光学尺、定距量规等测长工具确定工件相对光学坐标轴和坐标面的位置，从而，确定工件的相对位置。

定位中的测量，实质上是一种尺寸传递过程，即将图纸中的装配尺寸传递到装配件上。

在光学工具法安装中，尺寸传递主要采用按数字量传递的方法。在光学坐标系中通过光学工具直接将图纸尺寸传递到装配件上。在光学工具法安装中，辅助应用按模拟量传递尺寸的方法。先将图纸尺寸传递到1:1的标准工艺装备上，再由标准工艺装备传递到装配件上。

光学坐标系的结构及其所用光学工具，根据不同的安装对象和客观条件，可以灵活地进行设计和选用。

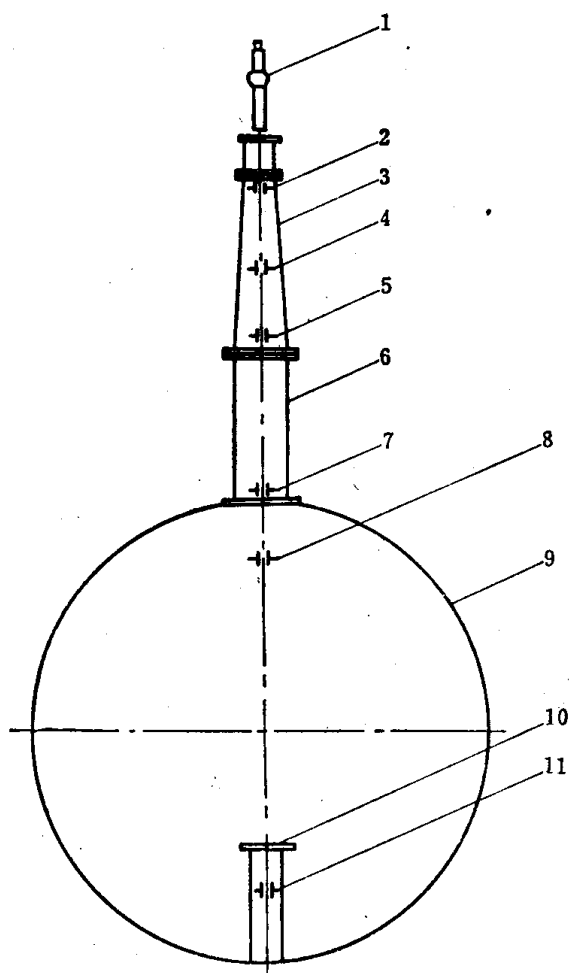


图1.1 潜望镜的安装

1—准直望远镜；2—轴承孔（1）；3—上套柱；4—轴承孔（2）；5—轴承孔（3）；6—下套柱；7—轴承孔（4）；8—轴承孔（5）；9—内压舱；10—液压机座；11—轴承孔（6）。

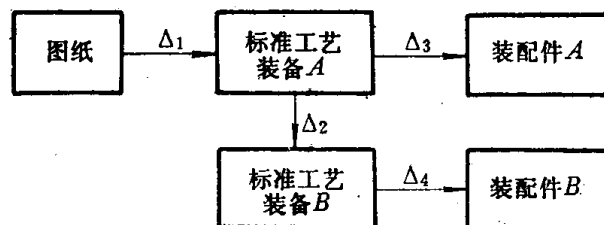


图1.2 按标准工艺装备安装时尺寸的传递过程

例如图 1.1 所示的潜艇望远镜, 安装时要求保证上套柱的三个轴承孔、下套柱的一个轴承孔、内压舱轴套和液压机座轴承孔在一条轴线上, 同轴度要求 $\pm 0.05\text{mm}$ 。旧的安装方法是采用一种标准工艺装备, 称为假轴。在假轴上按 1:1 尺寸制有六个轴承。安装时, 先将假轴定位在一定位置上, 再按假轴上的轴承确定相对应的轴承座的位置。

按标准工艺装备安装的主要优点是有较高的协调准确度和互换性。其尺寸传递过程如图 1.2 所示。

装配件 A 的制造误差为

$$\Delta_A = \Delta_1 + \Delta_3 \quad (1-1)$$

式中 Δ_1 ——按图纸制造标准工艺装备 A 的误差;

Δ_3 ——按标准工艺装备 A 制造装配件 A 的误差。

装配件 B 的制造误差为

$$\Delta_B = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_4 \quad (1-2)$$

式中 Δ_2 ——按标准工艺装备 A 制造标准工艺装备 B 的误差;

Δ_4 ——按标准工艺装备 B 制造装配件 B 的误差。

装配件 A 与装配件 B 之间的协调误差为

$$\Delta_{A-B} = \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \quad (1-3)$$

由于 Δ_1 较大, Δ_2 、 Δ_3 、 Δ_4 较小, 因此装配件 A 和装配件 B 的制造准确度虽然较低, 但其协调准确度却较高。这是由于 Δ_1 是公共环, 不影响协调准确度。当装配件 A 和 B 成批生产时, 其互换性也较好。

按标准工艺装备安装的主要缺点是, 需要制造专用的标准工艺装备, 影响生产周期和成本。当工件尺寸较大、产量较小时, 问题尤为突出。不但生产周期和成本显著增加, 而且标准工艺装备尺寸和重量增大, 使用不便, 自重变形也大。

用光学工具法安装时 (图 1.1), 先按上套柱的轴承孔 (1) 和 (3) 调整准直望远镜的位置, 使其视轴通过轴承孔 (1) 和 (3) 的中心, 建立一条光学坐标轴线。以此轴线为基准, 可以检查轴承孔 (2) 的位置 (在上套柱加工时已形成), 确定轴承孔 (4)、(5)、(6) 的位置。

又例如, 机身中段总装型架 (见第五章图 5.56、图 5.57), 其主要定位件包括 13 框平板、41 框平板、中央翼平板、登机舱门定位器、起落架定位器、托车等, 分布在较大的空间中, 分散地安放在车间地坪上。安装这样大型的分散式结构的型架, 使用标准工艺装备和机械坐标都有困难。标准工艺装备的尺寸和重量都很大, 成本高, 周期长, 变形很难控制。分散式结构要求在现场进行安装, 而机械坐标无法在现场使用。

用光学工具法安装机身中段总装型架是较合理的方案。

用光学工具法进行安装时, 首先要建立光学坐标系。安装机身中段总装型架的光学坐标系如图 5.57 所示。在同一水平面中建立五个光学站 1、2、3、4、5。由准直望远镜、球体目标和零距直角头建立两条互相垂直的视线 A-A 和 B-B。通过光学站 5 建立一条与视线 A-A 平行的视线 C-C。再以地球重力方向为基准, 通过水准仪扫描水平光学平面, 用经纬仪扫描铅垂光学平面, 与视线 A-A、B-B、C-C 一起构成空间光学坐标系。

在这个光学坐标系中，通过长杆千分尺、测量尺、工具轴、插孔光学目标等工具，确定各定位件相对光学坐标的位置，从而确定各定位件的相对位置。例如 41 框 平板的安装，在光学站 4 上架设一直角头，测量平板与视线 A-A 的垂直度，用准直望远镜测量平板上基准孔与视线 A-A 和 C-C 的同心度，平板沿 X 轴方向的距离，用长杆千分尺进行测量。

用光学工具法安装时，尺寸的传递过程如图 1.3 所示。装配件 A 的制造误差为

$$\Delta_A = \Delta_1 + \Delta_2 \tag{1-4}$$

式中 Δ_1 ——按图纸建立光学坐标系的误差；
 Δ_2 ——在光学坐标系中安装装配件 A 的误差。

装配件 B 的制造误差为

$$\Delta_B = \Delta_3 + \Delta_4 \tag{1-5}$$

式中 Δ_3 ——按图纸建立光学坐标系的误差；
 Δ_4 ——在光学坐标系中安装装配件 B 的误差。

装配件 A 与装配件 B 之间的协调误差为

$$\Delta_{A-B} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \tag{1-6}$$

将式 (1-4)~(1-6) 与式 (1-1)~(1-3) 相比，由于式 (1-1)~(1-3) 中的制造误差 Δ_i 较大，用光学工具法安装有较高的制造准确度。但由于光学工具法安装时影响误差的环节较多，其协调准确度一般较低，有时难以满足要求。图 5.56 所示的机身中段总装型架中的起落架定位器，有较高的协调准确度要求，直接用光学工具进行安装不能保证协调要求。为了保证协调准确度，应在光学工具法中综合使用按标准工艺装备安装的方法。

光学工具本身只能测量，不能调整。在没有专用调整工具的情况下，一般用 拉丝、顶丝等临时构成调整装置，用手工逐个进行自由度的调整。由于六个自由度的相互干

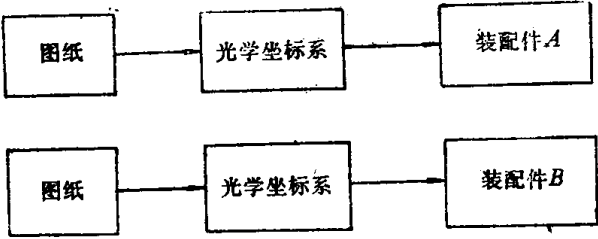


图 1.3 用光学工具法安装时尺寸的传递过程

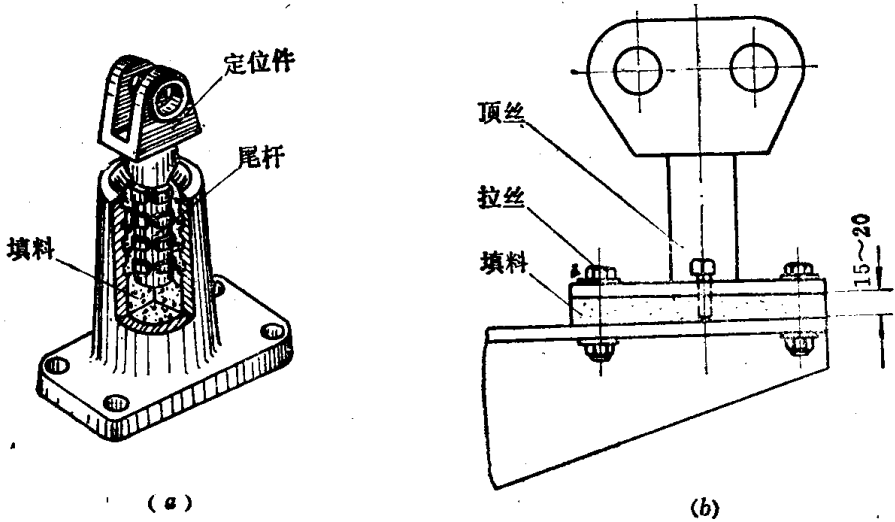


图 1.4 带补偿的连接方法

扰,效率低,周期长。因此,调整问题是光学工具法安装中的一项主要技术关键。近年来发展了各种高效率的调整工具设备。

安装过程中的连接方法对安装工作的质量和效率也有重要影响。连接方法除了保证本身的技术要求外,还要求不影响在定位时形成的相对位置尺寸。由于连接力和连接后内应力重新分布的作用,连接对相对位置尺寸的影响有时会很大。

为了尽量减小连接对定位的影响,并提高效率,常采用各种有补偿功能的连接方法,如图 1.4 所示。图 1.4(a)中,杯座事先已装好。定位件在光学坐标系中安装好后,在定位件尾杆与杯座之间注入填料。填料固化后,将定位件和杯座连接在一起。图 1.4(b)中,定位时用顶丝和拉丝调整定位件的位置,符合要求时,在空隙中注入填料。这比使用金属垫片的效率高,对尺寸的影响也小。以上两种结构,均需注意填料固化收缩或膨胀对工件位置的影响。

二、综合应用的安装方法

由于生产中安装工作的多样性和复杂性,光学工具法难以适应各种情况和各种要求。此时,可综合使用各种安装方法,主要有以下两种。

1. 按标准工艺装备安装

标准工艺装备是按图纸 1:1 制造的实物标准。标准工艺装备主要由三个部分组成:

1) 工作表面

工作表面是安装时的定位依据。定位时,被定位工件表面与标准工艺装备工作表面相贴合,即可确定工件的相对位置。此时,工件相对位置尺寸由标准工艺装备上的实际模拟尺寸传递到被安装工件上。

工作表面有平面、曲面、接头孔等,根据安装需要设计制造。工作表面一般用金属材料制成,也可用塑料制造。

2) 基准

基准用以确定标准工艺装备在光学坐标系中的位置,还用作标准工艺装备制造时的工艺基准。对安装准确度有重要影响,要求有较高的准确度、刚度和稳定性。

基准的结构型式有基准孔、基准球、标高板、基准叉耳等。

3) 骨架

骨架将工作表面、基准连成整体,要求有较高的刚度和稳定性,并尽量减轻重量。其结构型式有金属铸造、金属焊接构架、玻璃钢(填充泡沫塑料)等。

在飞机制造中,标准工艺装备的种类很多,有量规(带有接头或交点)、模胎(制有曲面外形)、标准样件(制有接头和曲面外形)等。实物标准也可以是装配件本身,称为标准实样。

按标准工艺装备安装时,装配尺寸表现为一种模拟量,含在标准工艺装备之中,在安装时以某种方式传递到装配件上。

按标准工艺装备安装有较高的协调准确度和互换性,但要求制造专用的标准工艺装备,人力、物资和时间的消耗均较大。当装配件尺寸大、产量小时,这一缺点尤为突出。

2. 在机械坐标系中安装

最初使用的机械坐标系由平台、角尺、方箱、高度游标尺等通用钳工工具组成。平台表面调成水平，构成坐标面 XY ，需要时可划出 X 轴线和 Y 轴线。角尺和方箱的垂直边构成 Z 轴。测长使用各种游标卡尺。这种坐标系的特点是通用、灵活，在机械制造中有广泛的应用。但手工操作比重大，生产率低，对操作者的技术水平要求高。

在飞机制造工业中，发展了一种专用的机械坐标系——划线钻孔台和型架装配机。划线钻孔台是一块铸铁平台，其两侧装有两根纵标尺，标尺上精镗有间距 $50 \pm 0.01\text{mm}$ 的定位孔。纵标尺上放有可移动的横标尺，横标尺上也镗有间距 $50 \pm 0.01\text{mm}$ 的定位孔。纵标尺和横标尺构成了平面的机械坐标系。型架装配机则由纵标尺、竖标尺、横标尺等三组标尺组成。标尺上镗有间距 $200 \pm 0.01\text{mm}$ 的定位孔，三组标尺互相垂直，并可相对移动，构成三维的机械坐标系。

划线钻孔台和型架装配机的操作机械化程度高，以孔为基准代替以线为基准，因而具有较高的生产率和准确度。安装准确度可达 $\pm 0.15\text{mm}/9\text{m}$ 。但型架装配机造价较高，定位范围有限（长 9m ，高 2m ，宽 1.5m 左右），且是固定设备，不能在现场使用，机动性差。

§ 1.2 光学工具法安装方案

一、主要技术经济指标

评价装配安装方案的主要技术经济指标是：

1. 质量

- 1) 几何尺寸准确度。这是最主要的技术指标。
- 2) 尺寸稳定性，指在安装过程中形成的几何尺寸不随各种因素如温度、内应力、地基下沉等而变化的性能。
- 3) 可检修性。装配尺寸不可能永久地、绝对地稳定不变，因此在使用中必须定期进行检修。在安装过程中建立的尺寸应该有可能而且方便地进行检查和恢复。有时可设立专门的测量基准供检修用，如监视地基下沉的测量点、检查平面水平用的水准器等。

2. 安装周期

安装周期 T 取决于：

- 1) 安装工作量，以工时数 t 表示。 t 决定于被安装工件的结构和生产率。
- 2) 工作面大小，以同时能进行工作的人数 n 表示。

显然

$$T = t/n \quad (1-7)$$

3. 成本

成本 C 包括两个部分：

- 1) 可变费用 A ，与产量有关

$$A = aN \quad (1-8)$$

式中 a ——单件可变费用；

N ——年产量。

可变费用包括基本生产工人工资、材料费、设备使用费、通用工具费、通用设备折旧费等。

2) 不变费用 B ，与产量无关。

不变费用包括专用设备和工具的制造费、保管维修费等。

年总成本为

$$C = aN + B \quad (1-9)$$

单件成本为

$$C_T = a + B/N \quad (1-10)$$

单件成本与年产量的关系如图 1.5 所示。年产量为 1 时，单件成本

$$C_T = a + B$$

年产量 N 趋近 ∞ 时

$$C_T = a$$

使用专用设备和工具，可以提高生产率，降低消耗，使可变费用 a 降低，但不变费用 B 随之增加，如

图中虚线所示。虚线与原成本曲线（实线）交于 N_c 处。只有当年产量较大，当 $N > N_c$

时，增加专用工具设备才能取得经济效益。当产量较小，特别是单件生产时，从经济效益出发，应少用专用工具设备。

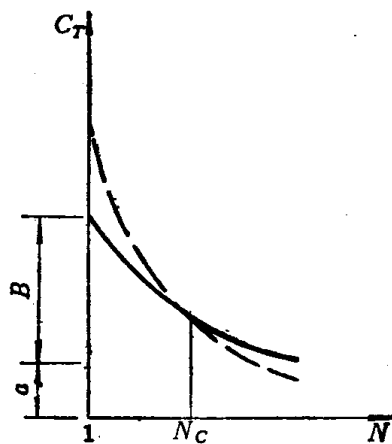


图1.5 单件成本与年产量

二、影响安装方案的因素

制订安装方案，必须考虑两方面的情况：一方面是技术经济指标，即主观要求；另一方面是客观条件。我们的任务是将主客观统一起来，从客观条件出发，达到最佳的技术经济指标。

制订安装方案应考虑的主要因素有：

1. 质量要求

任何安装方案必须首先能满足质量要求。没有质量，其他经济指标便从根本上失去意义。

2. 装配件的结构特点

1) 装配尺寸的空间分布范围。它决定了尺寸传递依据——坐标系或标准工艺装备的尺寸，对安装工作有重大影响。

2) 工件的重量和大小，对调整支撑方法有重要影响。

3) 工件的工艺刚度。

4) 装配件划分为次装配件的可能性。次装配件尺寸较小，可以采用与装配件不同的安装方案。

5) 连接方式，如有无补偿件和调整件，对调整效率有影响。

3. 年产量

年产量对成本有重大影响。由式 (1-10) 可知，为了降低成本，当产量较小时，主

要应从减少不变费用入手；当产量较大时，主要应从减少可变费用入手。年产量是在制订安装方案选用专用工具设备时所必须考虑的主要因素之一。

4. 工厂现有设备条件和传统习惯

安装方案是在工厂现有设备条件基础上付诸实施的，但也不能完全受现有条件的拘束。安装方案应是在工厂现有条件下经过努力能够实现的。

传统习惯的影响不容忽视。当两种方案无明显优劣时，传统习惯便起决定性作用。

对待条件和习惯要有发展观点，否则将影响新技术的使用。条件和习惯都是由人创造和形成的，也可由人来改变和发展。

对于一项具体的安装任务，客观因素是多种多样、错综复杂的。在制订方案前，必须对客观因素进行周密细致的调查研究，这是关系方案成败的关键。

三、安装方案的综合性

装配件结构和要求的复杂性、安装方法的多样性、客观因素的复杂性，决定了安装方案的综合性。这种综合性表现在许多方面。

1. 坐标系组成的综合性

坐标系可由光学工具和机械坐标综合组成，称为光学-机械坐标系。光学-机械坐标系的具体结构也是灵活多样的。

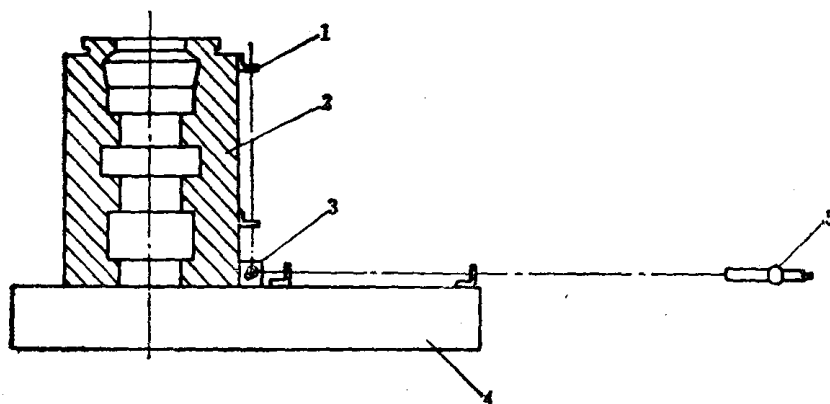


图1.6 准直望远镜和平台组成坐标系

1—光学目标；2—汽缸；3—五棱镜；4—平台；5—准直望远镜。

图1.6所示的汽缸，需检查其端面 and 侧平面的垂直度。如用平台和角尺组成的机械坐标系进行测量，由于汽缸尺寸较大，测量精度不能满足要求。如只用光学坐标系进行测量，则需调整汽缸的位置，使其端面平行于光学坐标面。由于汽缸重量和尺寸均较大，调整支撑费时。图1.6所示的测量方法，综合应用了光学坐标系和机械坐标系。光学坐标为准直望远镜5的视线，机械坐标为平台的平面，两者通过两个光学目标，调整准直望远镜的位置，使其视线平行于平台平面。再用五棱镜3，建立一条与平台平面垂直的视线。

测量时，汽缸借其端面放在平台上。通过光学目标1测量汽缸侧平面与垂直视线的平行度，即可确定汽缸端面与侧平面的垂直度。

2. 工件自由度的综合定位

工件的六个自由度，可以分为两组，分别由光学坐标系和机械坐标系定位。

机身板件型架的安装（图1.7），主要任务是确定内型板的相对位置。内型板通过角片装在型架的上下梁上。角片平面确定了内型板的三个自由度，即内型板的平面位置。内型板在此平面中还有三个自由度。

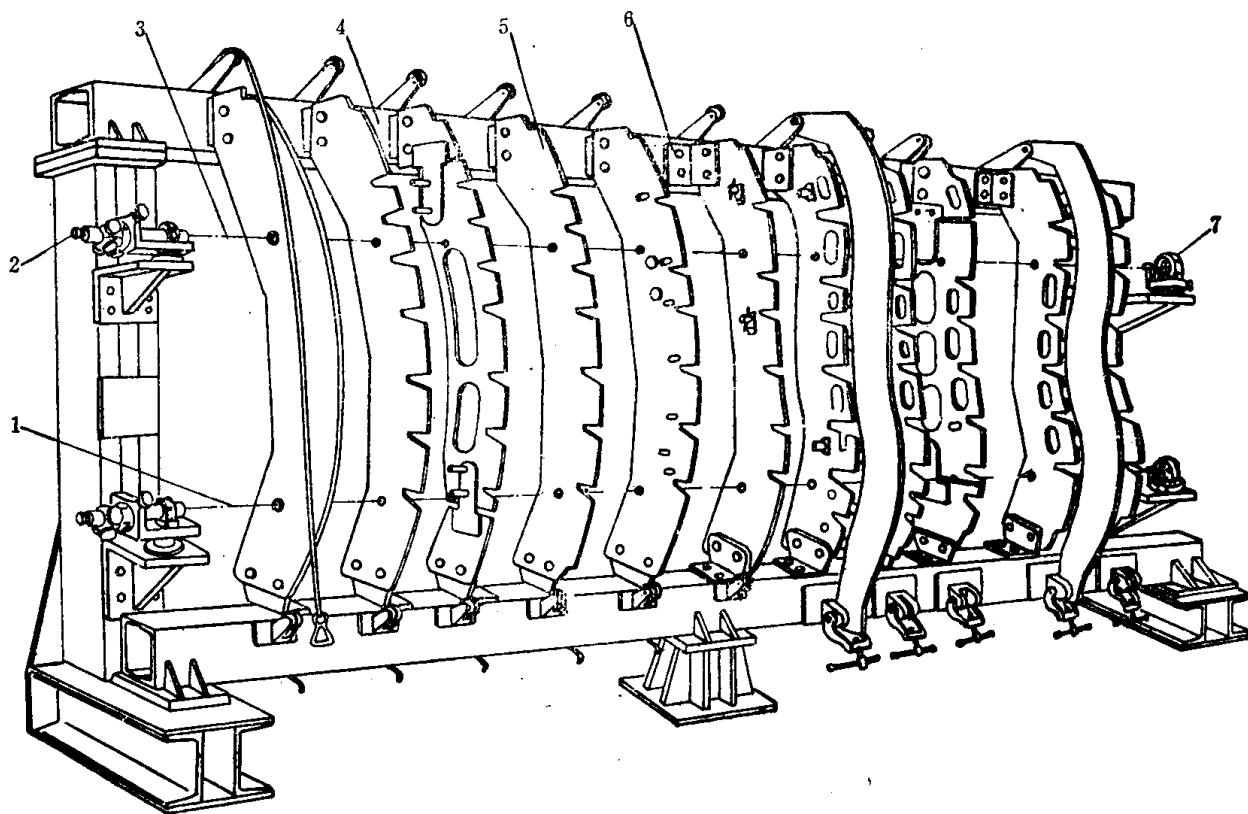


图1.7 机身板件型架的安装

1—辅助视线；2—准直望远镜；3—主视线；4—骨架；5—内型板；6—角片；7—球体目标。

安装时，先在型架装配机中安装角片，确定内型板平面的位置。然后再按准直望远镜构成的主视线和辅助视线，确定内型板在此平面中的位置。这个安装方案，系通过机械坐标系和光学坐标系分别控制内型板的三个自由度。

综合安装方案充分发挥了光学坐标系和机械坐标系各自的特长。准确度要求较高的内型板的外形位置，用光学坐标系安装。此时只定位三个自由度，故调整方便，光学工具法效率低的矛盾不突出。准确度要求较低的内型板平面位置，则用效率高但准确度稍低的机械坐标系——型架装配机来定位。

3. 尺寸传递过程的综合性

按模拟量传递尺寸和按数字量传递尺寸各有特长：前者有较高的协调准确度，但需要专用标准工艺装备；后者设备通用灵活，制造准确度高，但协调准确度较低。可以从具体情况出发，综合应用两种方法来传递尺寸。

如某型运输飞机机身段件下部的舱门交点定位器，用来定位舱门的六个交点。为了保证舱门与机身的协调，要求舱门交点定位器与舱门装配夹具中相应的交点定位器之间，有较高的协调准确度。单纯按数字量用光学工具传递尺寸，难以满足协调准确度要求。

单纯按模拟量用标准工艺装备传递尺寸，由于机身尺寸大，生产批量小，不仅质量难以保证，而且也不经济。

一种合理的方案是综合应用光学工具和标准工艺装备，按数字量和模拟量综合传递尺寸。为此设计制造了一种局部的标准工艺装备——舱门交点量规。一对舱门交点量规由正、反量规组成，分别制有交点，正量规相当于机身，反量规相当于舱门，两者协调加工，反量规按正量规配制。量规上还制有基准，用以确定量规本身在光学坐标系中的位置。安装机身段件型架时，先在光学坐标系中定位舱门交点量规，再通过舱门交点量规定位舱门交点定位器。安装舱门装配夹具时，方法也类似。其尺寸传递过程如图 1.8 所示。

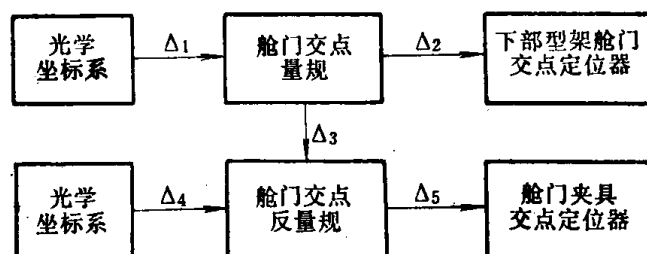


图1.8 舱门交点定位器安装的尺寸传递过程

机身段件型架舱门交点定位器的位置误差为

$$\Delta_A = \Delta_1 + \Delta_2$$

式中 Δ_1 ——在光学坐标系中定位舱门交点量规的误差；

Δ_2 ——按舱门交点量规定位舱门交点定位器的误差。

舱门夹具中交点定位器的位置误差为

$$\Delta_B = \Delta_4 + \Delta_5$$

式中 Δ_4 ——在光学坐标系中定位舱门交点反量规的误差；

Δ_5 ——按舱门交点反量规定位舱门夹具交点定位器的误差。

而两者的协调误差为

$$\Delta_{A-B} = \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_5$$

式中 Δ_3 ——按舱门交点正量规制造舱门交点反量规的误差。

可见，对于要求较高的协调误差 Δ_{A-B} ，其有关尺寸全部按模拟量传递，发挥按模拟量传递协调准确度高的长处；而对要求较低的定位器位置尺寸，由光学工具（ Δ_1 、 Δ_4 ）和标准工艺装备（ Δ_2 、 Δ_5 ）综合传递尺寸，准确度仍可满足要求，却省去了大型的机身段件标准样件，代之以尺寸小、结构简单的交点量规，发扬了光学工具法的长处。

4. 分散装配中的综合应用

装配工作有集中装配和分散装配两种方式。分散装配时，将装配件划分为组件、次组件，零件先装成次组件、组件，再总装成装配件。在组件装配和总装配时，可以根据各自的特点，采用不同的安装方法。

组件尺寸小，所装零件数量多，可以采用效率高、工作范围小的机械坐标系。总装配时，定位尺寸大，参加装配的组件数量少，需在现场进行安装，则可采用工作范围大而效率低的光学坐标系。这种方案可使两种方法扬其所长，避其所短。