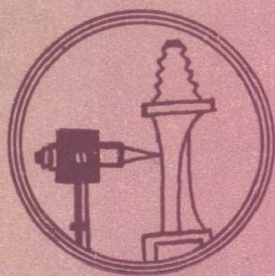


23

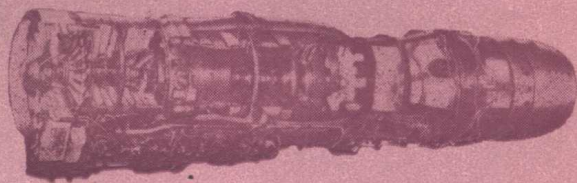
机械制造
实用新技术丛书



粟 枯 主 编

叶片测量技术

常书易 编著



国防工业出版社

机械制造实用新技术丛书之二十三

叶片测量技术

栗 栝 主编

常书易 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

叶片是机械制造业中复杂的零件之一。由于叶片的造形复杂，空间角度和尺寸繁多，技术要求严格，因此检测工作十分重要。近些年来随着生产和科学技术的发展，出现了一些新的检测仪器，但是采用平台技术测量仍是不可缺少的。

本书简要介绍了叶型的基本测量方法，此外还以标准叶片测量为例，着重介绍了在平台测量中坐标旋转计算法的应用。这种方法也可以用于其他零件和工夹量具等复杂型面的测量。

本书可供从事机械制造有关专业的工人、技术人员阅读。

叶片测量技术

机械制造实用新技术丛书之二十三

栗 枯 主编 常书易 编著

责任编辑 宋桂珍

*

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

*

850×1168 1/32 印张 1 5/8 39千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷 印数：0,001—6,200册

统一书号：15034·2843 定价：0.37元

344433

作者的话

现代航空发动机制造是机械制造业的一个重要方面，具有机械制造的基本特点。它又是技术集约性的工业，集中应用了很多新的技术和新的工艺，其中多数对于机械制造行业具有普遍推广的价值。七十年代末，我国从英国引进了斯贝 MK202 发动机及其制造技术，同时又有选择地引进了一些先进的机床设备。这项技术在一定程度上比较完整地反映了近代航空发动机制造的先进水平，通过生产实践也证明了这一点。

为了交流的方便，也为了能有更多的人有机会了解这些制造技术，我们整理编写了这套资料，命名为《机械制造实用新技术丛书》。所以这样命名，是因为我们在编写中遵照了下述原则：

1. 实用性。尽量避免一般性的理论叙述，力求使读者能较快的在实践中运用；
2. 先进性。我们只选择了那些更新颖更有意义的资料；
3. 揉合了我们在斯贝发动机试制工作中的实践经验，还综合了不少有价值的参考资料。

作者期望本套丛书对机械工业，特别是航空发动机制造行业的人们有所帮助，这将是对我们最大的鼓舞。

由于我们视界较窄，水平有限，错误缺点难免存在，欢迎读者批评指正。

本丛书由栗枯同志主编。参加审校工作的主要有：唐宏霞、钟礼治、胡贤惠、谭杰巍、王克强、姜仁忠等同志。

在本丛书编写和出版的过程中，王德荣、黄家豪、郑宝湖、郭治国、姚静梅等同志提供了许多宝贵意见，并参加了审校。还得到了国防科工委、航空工业部有关领导和同志们的大力支持及热情帮助，他们是魏祖治、陈少中、任家耕和贾克琴、张汉生等

同志。

叶片是机械制造业中复杂的零件之一。由于叶片的特殊造形，空间角度和尺寸多，技术要求严格，因而检测也十分重要。叶片测量技术是光学、机械、电器及平台万能方法的综合。本书简要介绍叶型测量及标准叶片的测量计算方法。

本书由常书易编著，王克强、胡贤惠审校，粟祜终审定稿。

对本书编写、出版过程中给予大力支持和帮助的同志们，在此表示衷心感谢。

作者于西安
国营红旗机械厂

目 录

一、概述	1
二、叶型测量	2
(一) 接触测量	2
(二) 非接触测量	11
三、标准叶片测量	15
(一) 电感量仪的校准	15
(二) 叶片测量夹具	18
(三) 双向组合正弦台	20
(四) 测量及计算	21

一、概 述

叶片在航空、航海、陆用动力装置等上都起着十分重要的作用。

各种航空燃气涡轮喷气发动机，都由压气机提供高压空气满足发动机的推力需要，同时也提供飞机和发动机本身其他装置所需的压缩空气；涡轮将来自燃烧室的燃气流能量转变为扭矩，用以带动压气机和附件。发动机的特征参数如压气机增压比、涡轮转速等，都与叶片的形状和位置密切相关。

航空发动机上的叶片种类繁多，数量很大，如斯贝发动机就有几十种叶片，单台数量达几千片之多。按照发动机的结构，叶片分压气机叶片和涡轮叶片；按照工作条件分高压叶片和低压叶片；按照工作状态，又分转子叶片（又称工作叶片）和静子叶片（又称整流和导向叶片）。

叶片的数量决定了叶片毛坯的数量。随着工业生产的不断发展，毛坯精度提高，严格的质量控制要求提供无余量和小余量（均匀余量）的精锻或精铸的叶片毛料。新的加工工艺使叶片的检测范围大大增加。

叶片一般分叶身、叶根和叶冠三部分。叶身部分主要是叶型，有的叶片还带有阻尼台。叶根是指安装位置靠近发动机旋转轴线的一端，它的结构形式主要有燕尾形榫齿、枞树形榫齿、圆柱销形或具有定位孔的根块等。叶片的另一端是叶冠，一般为板形，无冠时称叶尖。导向叶片的两端称内、外安装板（边）。

叶片毛料需要检测叶型、截面厚度、叶身弯曲、截面扭转、进气边缘位置、进气与排气边弦长、根块余量。带有阻尼台的还需确定阻尼台的位置及余量，若精锻后已成为最终尺寸，则按成品验收。对于涡轮叶片，需要检测叶型、喉道尺寸及内、外安装板的余量等。

终检叶片需要检测叶型形状、叶型厚度、截面扭转、叶身弯曲、进气边缘位置、排气边缘位置、叶片全长、榫头、叶型与榫头或安装边的相互位置等。

从六十年代起，投影检测技术逐步应用于航空工业，而这种技术应用最多的产品就是叶片外轮廓尺寸的检验。它适合于叶型、榫齿、封严齿的测量。精度高、效率高、操作方便、经济效益好。

目前，国外已大量使用电感量仪检测叶片及其毛料。这是一种多尺寸的快速检验装置，一次可完成叶片全部尺寸的测量，从而更进一步提高工作效率，适应现代生产发展的需要。

电感量仪的测量是一种比较测量，需要标准件为仪器定标。由于叶片造形复杂，空间角度和尺寸多，制造精度要求高，按设计要求全面检测十分困难，因此它不是某一台专用仪器或某一种固定测量方法能够完成的。本书除介绍叶型的基本测量方法外，还根据我们在实践中摸索的一些经验，以标准叶片测量为例，介绍平台测量计算法，这种方法同样适用于其他零件和工艺装备，对于解决复杂型面的测量具有一定的参考价值。

鉴于本书所述的测量工具为一般技术测量所用工具，对其测量误差在有关计量学的书籍上已有论述，本书未作讨论，并且在计算当中也不予考虑。

二、叶型测量

叶型的测量比较繁杂，测量方法很多，下面介绍接触测量和非接触测量两种方法。

(一) 接触测量

接触测量适合测量叶型较厚、测力变形很小的叶片。其测量方法有以下几种。

1. 型面坐标点法

在设计图上, 叶片型面通常都是按如图 11-1 所示形式给出的。即在叶身高度的某一截面内, 在指定坐标系中的两个方向上给出轮廓迹线上各点的坐标值。

图纸给定的坐标原点一般不能直接测得, 如图 11-2 所示, 需要引进辅助定位来体现。将叶片装在专用夹具上, 放置一个标准钢球, 用橡皮泥把标准钢球固定在叶片或夹具上。按叶片可测部位确定 a' 、 b 和 h 。

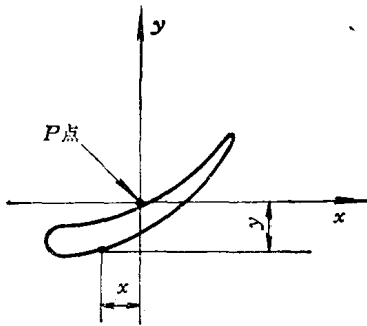


图11-1 理论叶型坐标

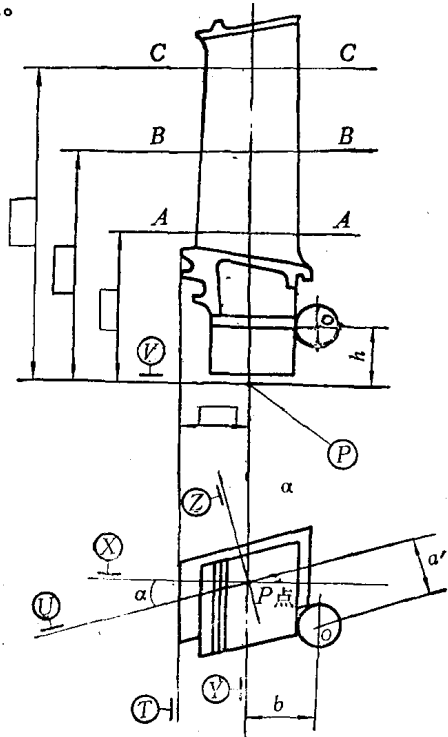


图11-2 P点与辅助定位点的位置

如图 11-3 所示, 球心 O 与 u 轴的距离为 a' , 对 y 轴的距离为 b 。坐标系 P_{xy} 逆时针旋转 α 角后为坐标系 P_{uz} 。这样球心对定位原点 P 在 P_{xy} 坐标系中的坐标用可测值表示。

因为 $PA = a'$, $PB = b$

所以 $OP_x = b$

$$OP_y = a = \frac{a'}{\cos \alpha} - b \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

球心在叶身高度方向与 P 点的距离为 h (见图 11-2)。

将已完成装夹、定位的叶片放到改型的大型工具显微镜上测量,如图 11-4 所示。去掉普通的大型工具显微镜的目镜和物镜,自制一个百分表安装架,安装架与原物镜一样旋入物镜套筒内。表架固定后,表架轴在轴套里能自由旋转。圆周上以 5° 为间隔刻有度数指示线。刻度的零位线与仪器工作台一个运动方向相一致。百分表装夹在安装轴套内。特制的锥形尖测头与原来的普通百分表测杆连通。测头的前后位置可以调整。表的上下位置在表架上也可以调整,测量者按照叶片的

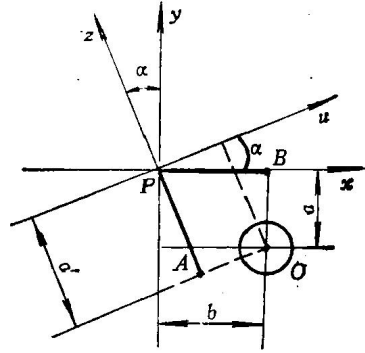


图11-3 球心坐标位置

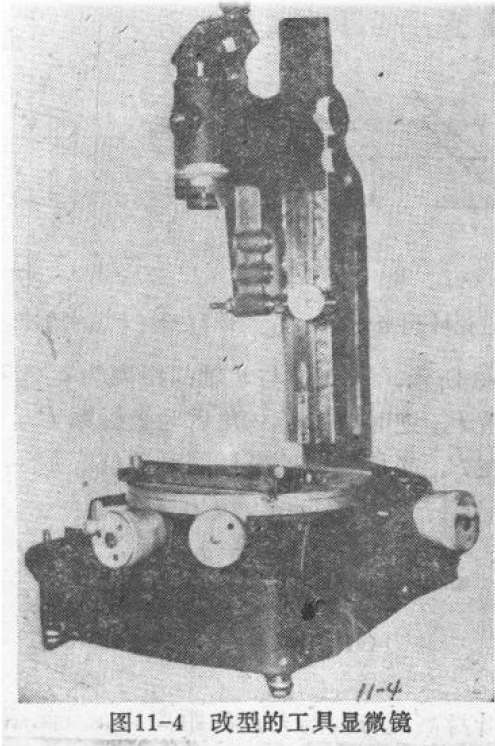


图11-4 改型的工具显微镜

大小以及测头沿立柱升降范围,需要在校准测头位置前做好选择。

测头的前后位置必须校准,也就是调整测头,使之在一定的测力作用下通过表架的旋转轴线,以保证零件的测量厚度。

校准是选用一标准圆棒进行的。其原理如图 11-5 所示。

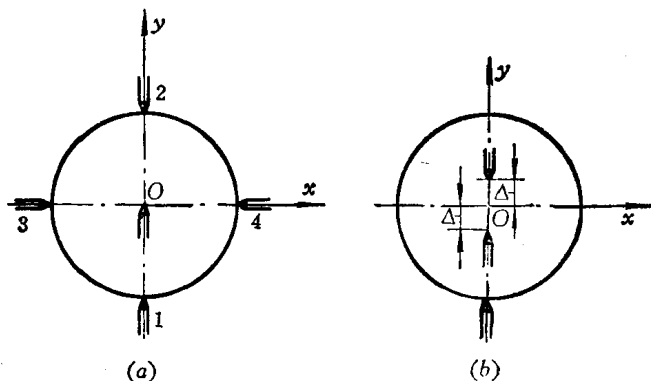


图11-5 测头位置校准原理图

(a) 正确位置; (b) 偏置。

当测头位置与安装架旋转中心重合时,测量垂直放置在仪器工作台上的标准圆棒直径,测值等于圆棒的实际直径。这时测头的接触位置如图 11-5 中的 1 和 2 或 3 和 4 的位置。

当测头位置偏离旋转中心 Δ 值时,测得圆棒直径将小于实际直径二倍 Δ 值。如果接触测头超过旋转中心偏置 Δ 值时,测得圆棒直径将大于实际直径二倍 Δ 值(图未示出)。测头偏置时,前后移动测头,直到位置正确后,将测头固紧。

此外,仪器的其他系统保持不变。

利用改型的大型工具显微镜测叶型时,首先使给定叶型的坐标轴与仪器坐标轴相一致,一般称为在仪器上找正。找正后测出定位钢球球心在仪器上的读数值,依此计算叶片型面的坐标原点在仪器上的读数值。然后根据图纸给定的 x 值,按叶片型面各部位不同的曲率旋转表架改变测量方向,力求在型面各点的法向上控制测力(给予校准时相同的测力),测量各点的 y 值。

在完成了一个截面的测量之后，可用量块和 h 值控制截面位置，完成其他截面的测量。

由于该仪器采用尖点触头，可直接测量设计图要求的坐标点位置，直观、方便。需要指出的是，按《形位公差》标准规定，线轮廓度误差值与点的坐标误差值不等，只在特殊情况下才相等。

当测头沿着型面各点切线的法线方向测量时，由于叶型本身不平坦，尤其在进气、排气边缘部位，其曲率与中间部位差别很大，测头方向在不断地改变。又由于在不同的测量方向上给予相同的测力（调整百分表到固定的示值），而读数值全是在 y 轴方向读出，因此就存在着测力误差。曲率变化愈大，其测量误差愈大，如图 11-6 所示。

$$F_y = F \cdot \cos \alpha$$

因为 $\cos \alpha \leq 1$

所以 $F_y \leq F$

当 α 角随着测量方向的改变而不断地改变时， F_y 不断地随之变化， y 值的测量为不等精度测量。 α 角愈大，测量分力 F_y 变化愈大。

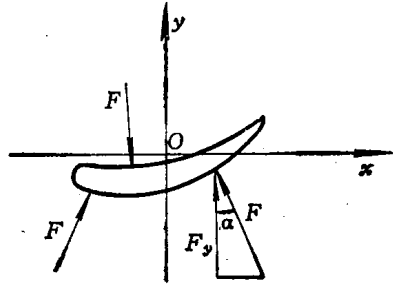


图11-6 测力分解图

由于测力变化将引起测量误差，因此必须控制测力。由上式可知，分力 F_y 与校准时测力 F 成正比， F 值愈小， F_y 值变化愈小，其测量误差也愈小。

实践证明，用改装的大型工具显微镜测量叶片叶型已成为叶型测量的一种切实可行的好方法。对于叶型曲率变化较大的部位，可按 5° 的圆周刻度进行大致的误差修正。对于叶型比较平滑的叶片用这种仪器测量更为适合。

2. 型面包络线法

叶型测量也可借助于三坐标测量机。

一般测量机的测头都是球形的。无论是有电子计算机或无电子计算机的测量机，其数字显示的数值均为测量头的球心坐标，

不能直接给出型面接触点的坐标，如图 11-7 所示。

用三坐标测量机测叶型时，测量机传感器的测头在指定的叶片截面上环绕一周，测出各点的 x 、 y 值后，需要进行数据处理。

数据处理方法一般有两种：

(1) 作图法

首先选择放大倍数，按图纸给定的坐标值作出理论叶型线，然后以测量机测得各点为圆心位置，以测头半径大小为半径作圆，再作出一系列圆的内包络线，这条

线即为实测叶型线。实际叶型线与理论叶型线之间的最大距离，就是放大后的叶型误差，按比例缩小后就得到实际叶型误差。

(2) 编程计算法

按图纸给定的坐标点值和测量机测头半径值编程计算测量球头中心的理论坐标，将实测值与计算结果比较得出误差，这与型面坐标点法相似。

3. 光学跟踪投影法

利用通用的光学跟踪投影仪和专用的光学跟踪投影仪，都可以对叶片的型面进行测量。

光学跟踪投影仪有两种基本形式，一种是与标准分划板式比较，称之为分划板式光跟仪；另一种是与标准放大图型线比较，称之为影屏式光跟仪。其跟踪方式都相同。

图 11-8 是由影屏式和分划板式组合而成的双面跟踪仪。其测量头 8 直接与被测叶型接触。与测头 8 刚性连接的同步运动装置的模拟测头 9 置于投影仪物镜前的投影光路上。工件能沿 x 方向运动，以适应检查不同截面上的型面，分划板与工件在 y 方向

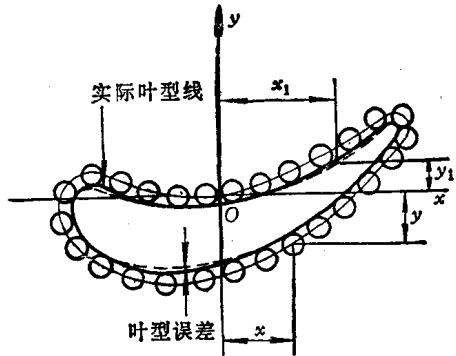


图11-7 包络叶型图

x_1 、 y_1 —图纸给定的坐标；
 x 、 y —测量机球心坐标。

能同步运动，以便检查整个轮廓型面。模拟测头 9 与接触测头 8 在 z 方向同步运动，以便检查型面上各点的误差。经放大后呈现在影屏上的影象是来自模拟测头和刻有理论叶型的标准分划板。

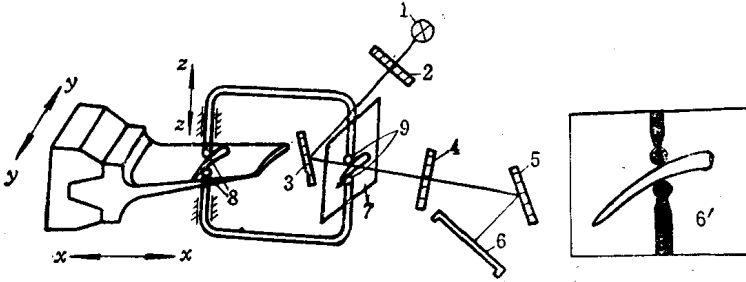


图11-8 双面光跟测量原理示意图

1—光源；2—聚光镜；3—反射镜；4—物镜；5—反射镜；
6—影屏；7—分划板；8—接触测头；9—模拟测头；6'—影象。

分划板上的型线与被测工件的理论型线大小一致，它与模拟测头放在同一焦平面内（事实上由于模拟测头与分划板之间存在着相对运动，需要保持适当的间隙）投影放大作为检验标准。

影屏式光学跟踪投影仪是按一定的放大倍数绘制的放大图作为检验标准的。测量时，将被测工件的标准放大图放置在影屏上，测头跟踪被测工件的影象与标准放大图迹线比较，从而得出误差值。

分划板式光学跟踪投影仪一般在影屏上只能看到跟踪测头和局部测量位置。图 11-8 所示的双面跟踪仪在影屏上则能看到标准型线的全形。其光路系统和普通投影仪完全相同。光源 1 发出的光线，经聚光镜 2 到反射镜 3，透过物镜前的分划板 7 到物镜 4，再经反射镜 5 到影屏 6，6' 为影象的形式。

测量叶型时，将装夹定位好的叶片放在仪器工作台上，调整叶片、分划板（或放大图）的正确位置，使测量头沿着要测的截面移动，从影屏上观测跟踪测头与标准型线各个位置上的误差。

采用光学跟踪投影法检测叶型不同于点位法，它可以测出叶片的全形误差，精度和效率高，仪器使用方便。但必须具备跟踪装

置、标准叶型放大图或标准叶型分划板。

4. 仿形划线投影法

利用仿形划线装置和通用投影仪也可以实现叶型测量。英国罗耳斯·罗伊斯公司设计制造了几种不同结构的仿形划线装置。图11-9为其中一种形式的示意图。仿形划针沿着需要测量的叶片截面移动，由同步运动的仿形划针在玻璃板上以1:1的比例描绘出

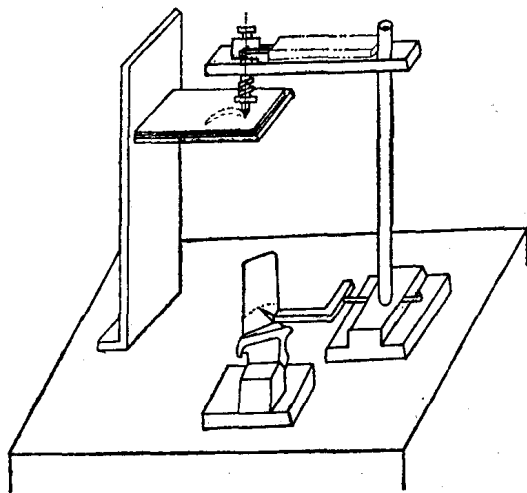


图11-9 仿形划线装置

实际叶型线。玻璃板上涂有一层颜色，只有被划针划破后的迹线可透射光线。

仿形划线以后，将玻璃板放到投影仪物镜前投影放大，在影屏上便可得到实际叶型线。这样，实测叶型与标准叶型比较，可以得到叶型误差。

上述测量方法很直观，适合测量叶型精度要求不高的叶片。

5. 轮廓记录法

轮廓记录仪适合测量叶片的叶型，又称为叶片绘图仪。

图11-10所示为轮廓记录仪的轮廓图。仪器由测量主体部分和记录器两部分组成。主体部分包括基座1，调节装置2，行程控制手柄3，立柱4，升降手轮5，测杆6，测头7，工作台8，操作控

制板 9 和电器线路部分(在基座底下)。记录器主要由记录纸运行控制板 11, 放大倍数选择控制板 12, 记录笔 13 和记录纸 14 构成。

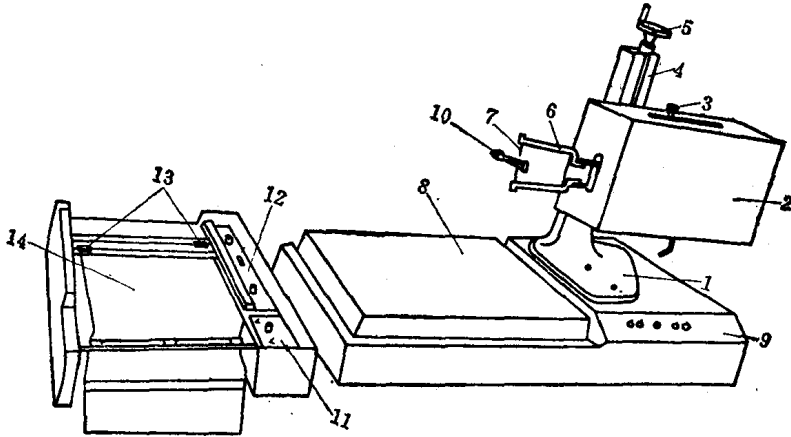


图11-10 轮廓记录仪

1—基座；2—调节装置；3—行程控制手柄；4—立柱；5—升降手轮；
6—测杆；7—测头；8—工作台；9—操作控制板；10—叶片；11—记录纸运行控制板；12—放大倍数选择控制板；13—记录笔；14—记录纸。

轮廓记录仪的基本原理是：测头接触被测工件表面，当沿着欲测截面跟踪时，触头相对零点的机械位移变成电信号，经电路放大后记录笔在坐标图表上描绘出放大的实际轮廓图形。

记录器有纵横两个方向放大倍数选择。有 5 倍、10 倍、20 倍、25 倍、50 倍共五种放大倍数。用描绘出来的叶型与设计叶型理论值比较判定形状误差。

使用仪器时，先接通电源，仪器主体需要预热两小时，记录仪预热 5 分钟，在预热时间内禁止调整。预热后调整校准放大

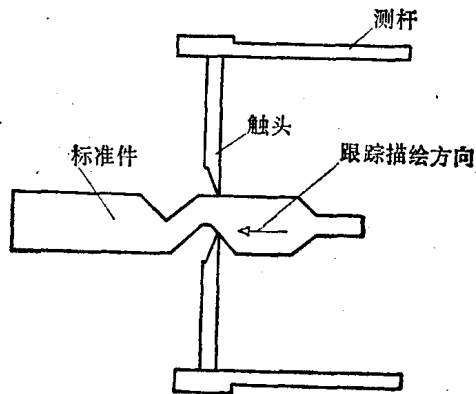


图11-11 校准标准件

倍数。仪器带有校准标准件（如图 11-11 所示）和标准放大图。跟踪描绘方向为测杆外伸方向。测杆缩退时，触头脱离被测工件。

轮廓记录仪是接触测量和绘制实际放大图二者的结合，双笔描绘出叶片截面的全形。

用轮廓记录法测量叶型，测量精度一般可以满足叶型的设计要求。

（二）非接触测量

叶型的非接触测量目前还只限于投影法。由于叶片不受测力，不变形，因此适合测量多种叶片，其中包括小而薄的铝叶片。

1. 断面投影法

断面投影也称散射投影，采用这种投影方法的仪器系基于漫反射和光切面的原理制造而成，其基本光路如图 11-12 所示。

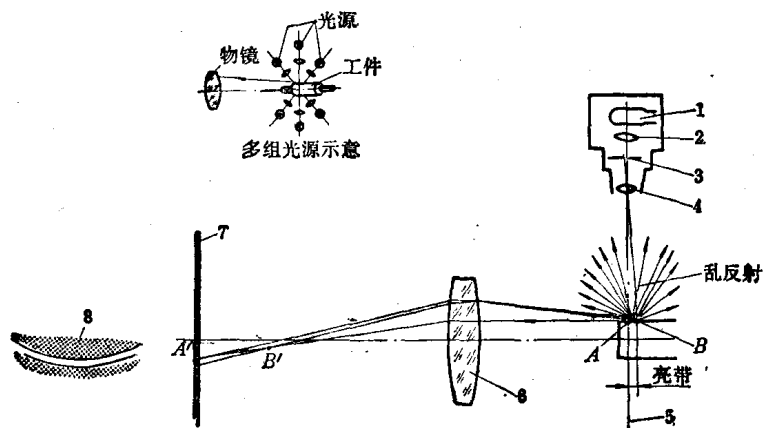


图11-12 漫反射投影光路

- 1—光源；2—聚光镜；3—狭缝；4—物镜；5—测定的断面；
6—物镜；7—影屏；8—影象。

光源 1 发出的光线，经聚光镜 2 聚焦后平行照射到狭缝 3 上，穿过狭缝 3 经物镜 4 成象于物体表面形成漫反射，测定的断面 5（光切面）在物镜 4 的光轴上。从物体表面 A 点反射的光最强，经物镜 6 后成象于影屏 7 上。如果在被测物体周围放置多组光源，那么被测工件的全部轮廓将被照亮，经反射投影后在影屏上便可