

水浸聚焦超声波 探伤原理

SHUIJIN JUJIAO CHAOSHENGBO
TANSHANG YUANLI

15.28

水浸聚焦超声波探伤原理

张志永 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

水浸聚焦超声波探伤技术是在水浸法探伤基础上发展起来的比较新的无损探伤技术。本书比较系统地介绍了这一技术的原理及设计计算方法。主要内容有：几何超声学，聚焦声场，工件界面对聚焦声束的影响，聚焦探头测定以及如何用焦柱测定缺陷尺寸等。

本书可供国防、电力、机械、冶金、石化以及压力容器监察等部门的无损探伤人员、科研人员和大专院校有关专业师生参考。对于制作接触式聚焦探头的有关技术人员也有参考价值。

水浸聚焦超声波探伤原理

张志永 编著

*

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

*

787×1092¹/₃₂ 印张 3⁵/₈ 77千字

1985年10月第一版 1985年10月第一次印刷 印数：0,001—1,680册

统一书号：15034·2929 定价：0.70元



前 言

随着科学技术的进步，各个工业领域（特别是宇航、原子能）对无损探伤的要求越来越高。人们不但要求在制造过程中发现缺陷、控制产品质量，而且还要求对一些已经投入使用的重大设备进行定期监测，以便及时检查出在运行过程中出现的新缺陷，并以精度高的测量技术监视新产生的或在制造过程中业已存在的那些缺陷的变化情况，及时作出有关设备安全性的科学判断。这种要求，在很大程度上可以归结为以好的重现性并准确地测量缺陷尺寸这一课题。目前广泛使用的传统超声波探伤方法满足不了这个要求。例如当量法用于估计缺陷的最小尺寸还是可以的，但实际上人们感兴趣的缺陷最大尺寸往往比当量法给出的当量尺寸大得多，甚至大许多倍。有时，给出最小尺寸几乎是无意义的。

为了较准确地测定缺陷尺寸，人们从多种途径进行了研究。到目前为止，已经在实际中应用的、比较成功、比较实用的方法是在水浸探伤基础上发展起来的水浸聚焦超声波探伤法。采用这个方法，就能以预定的测量精度测定缺陷的最大尺寸。此外，它还有重现性好，信噪比高，对缺陷是否倾斜不敏感，探伤中人为因素减少了等一系列优点。本书比较系统地介绍了目前已经应用于实际的、采用C扫描定量缺陷尺寸的水浸聚焦超声波探伤技术的原理及设计计算方法。由于在水浸聚焦探伤技术中，探头的设计、制作与使用之间的联系比传统超声波探伤法更为紧密。因此，书中论及的内容，

是制作水浸聚焦探头时必须了解的。此外，由于所介绍的设计理论对接触式聚焦探头也适用，所以本书对于制作、设计接触式聚焦探头也有参考价值。

我已经做了较大努力，尽量压缩该书的字数，让它成为一本小册子。但是对于该技术所涉及的一些重要理论、公式，还是写得比较详细些，目的在于尽量避免读者在阅读时再去参阅他可能并不熟悉的光学及其他学科的书籍。

在本书出版之际，谨对水电部西安热工研究所领导和我在法国进修时的导师丹尼尔·德瓦戴尔(Daniel Devadder)先生及在本书编写过程中给过我帮助的郭本禹、肖耐园同志，以及审阅了全稿的李家伟同志致以衷心谢意。

张志永

目 录

第一章 几何超声学的几个定律和公式	1
一、声线和声束	1
二、笛卡儿 (Descartes) 定律	2
三、有关球面界面反射的计算公式	3
四、有关球面界面折射的计算公式	8
第二章 均匀各向同性介质中的聚焦声场	15
一、聚焦探头的结构以及从几何声学角度计算的焦距	15
二、焦平面上焦点附近的声压分布	21
第三章 各种界面对聚焦声束的影响	40
一、几种水-工件界面对聚焦声束的影响	41
二、平面反射镜和柱面反射镜对聚焦声束的影响	65
三、工件表面回波的干扰	74
四、透镜与聚焦声束	75
五、根据对工件中焦柱的要求确定所需探头参数及 安放位置的几个例子	75
第四章 测定聚焦探头的参数	82
一、测定聚焦探头的频率	82
二、测定聚焦探头在水中的各参数	83
三、测定工件中的焦柱	88
第五章 用焦柱测定工件中缺陷尺寸	90
一、一个基本的实验结果	90
二、两个假设以及由此而推论出的探伤方法	91
三、实验验证	94
四、对以聚焦 C 扫描方式测定缺陷尺寸方法的评价	106
参考文献	110

第一章 几何超声学的几个定律和公式

在光学中，有几何光学之说。光是电磁波，因此研究光学现象采用了波动理论，但这往往特别繁杂。事实上，对于某些光学现象，非波动理论也给出了与实验结果相一致的结论。几何光学就是研究光学现象的非波动理论。在几何光学中，常常需要暂时忘掉光是一种波动，而从一些基本原理出发，引入光线等概念。对于许多光学现象来说，几何光学给出的结果已经相当满意，而且常常是比较简单、直观、实用。

超声波也是一种波动现象。在研究超声波时，也可以应用研究光学的方法，引入声线的概念，形成几何超声学。几何超声学中的许多公式都是从几何光学引用过来的。由于几何光学是经过许多专家充分研究过的一门学科，这样引用所获得的益处是可想而知的。在引用中需要注意的是光的波长比超声波短，因此，某些近似条件对两者而言是不同的。

本章叙述在水浸聚焦超声波探伤技术中经常引用的几个几何超声学定律。这些定律在后文中全部都要用到。

一、声线和声束

在一定的应用范围内，可以认为超声波是直线传播的。所谓声线就是声波传播时所通过的直线。所谓声束，就是从同一声源发出的一组声线。

二、笛卡儿 (Descartes) 定律

这个定律可以由费马 (Fermat) 原理证明 (请参见有关光学书籍)。这里仅给出该定律的内容。参见图 1-1, 图中 S 为两种不同介质的界面。 S 面上方为第一介质, S 面下方为第二介质。

1. 折射声线(包括纵波、横波)与反射声线均在入射平面内(入射声线与界面法线所在的平面称为入射平面);

2. 入射角等于反射角, 即 $i_1 = i'_1$;

3. 入射角、反射角和折射角的关系为:

$$\frac{\sin i_1}{c_{L_1}} = \frac{\sin i'_1}{c_{L_1}} = \frac{\sin i_2}{c_{L_2}} = \frac{\sin i'_2}{c_{T_2}}$$

上式也可以改写为下面的形式

$$n_{L_1} \sin i_1 = n_{L_1} \sin i'_1 = n_{L_2} \sin i_2 = n_{T_2} \sin i'_2 \quad (1-1)$$

式中 c_{L_1} , c_{L_2} , c_{T_2} ——分别是入射纵波、折射纵波、折射横波速度;

i_1 , i'_1 , i_2 , i'_2 ——分别是入射角、反射角、纵波折射角、横波折射角;

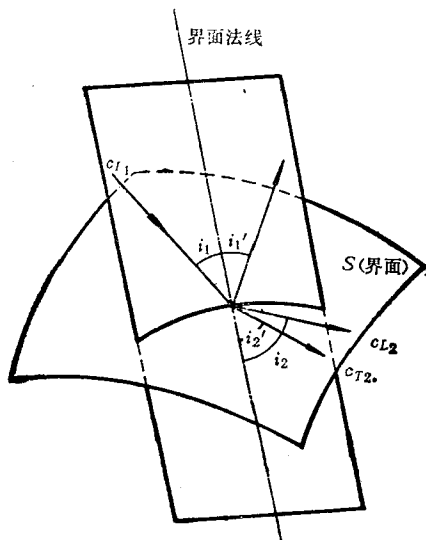


图1-1 声线的反射与折射

n_{L_1} , n_{L_2} , n_{T_2} ——分别叫做第一介质折声率, 第二介质纵波折声率, 第二介质横波折声率。

$$n_{L_1} = c_*/c_{L_1}, \quad n_{L_2} = c_*/c_{L_2}, \quad n_{T_2} = c_*/c_{T_2}.$$

c_* 为水中声速。

入射声线所在的介质称为第一介质, 折射声线所在的介质称为第二介质。

折声率的概念是水浸聚焦超声波探伤中常使用的一个概念, 它是从光学中的折光率概念引用过来的。

三、有关球面界面反射的计算公式

(一) 在球面反射镜轴线上入射声线与轴线交点(物点)和反射声线与轴线交点(象点)之间的一般关系

在图 1-2 中, $\overline{AT}$ 为反射镜轴线, $\overline{AI}$ 是入射声线, $\overline{IT'}$ 是反射声线, $\overline{CI}$ 是球面反射镜半径, $\overline{IT}$ 垂直于 $\overline{CI}$ 。为了区分 A 、 A' 、 S 是在 C 点的左边还是右边, 我们规定: 当 A 、 A' 、 S 在 C 点左边时, 线段 $\overline{CA'}$, $\overline{CA}$, $\overline{CS}$ 为正, 否则为负。由图 1-2 所示的几何关系可知:

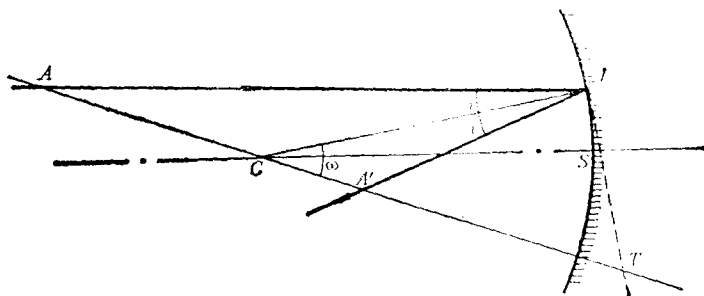


图1-2 声线在球面界面上的反射

$$\frac{\sin i}{\sin \omega} = -\frac{\overline{CA'}}{\overline{A'I}}$$

$$\frac{\sin i}{\sin \omega} = \frac{\overline{CA}}{\overline{AI}}$$

所以,

$$-\frac{\overline{CA'}}{\overline{CA}} = \frac{\overline{A'I}}{\overline{AI}}, \quad \frac{\overline{CA'}^2}{\overline{CA}^2} = \frac{\overline{A'I}^2}{\overline{AI}^2}$$

又因为

$$\overline{A'I}^2 = \overline{CI}^2 + \overline{CA'}^2 + 2\overline{CI} \overline{CA'} \cos \omega$$

$$\overline{AI}^2 = \overline{CI}^2 + \overline{CA}^2 + 2\overline{CI} \overline{CA} \cos \omega$$

所以

$$\frac{\overline{CA'}^2}{\overline{CA}^2} = \frac{\overline{CI}^2 + \overline{CA'}^2 + 2\overline{CI} \overline{CA'} \cos \omega}{\overline{CI}^2 + \overline{CA}^2 + 2\overline{CI} \overline{CA} \cos \omega}$$

将上式展开后可知:

$$\frac{1}{\overline{CA}} + \frac{1}{\overline{CA'}} = \frac{2 \cos \omega}{\overline{CS}} \quad (1-2)$$

式 (1-2) 表明, 当 ω 给定时, 轴线上一点 A 和 A' 是一一对应的。而当 ω 变化时 (即入射角 i 变化时), 同一 A 点所对应的 A' 点是不相同的。但当 ω 很小时, 可以近似地认为所有经 A 点射向反射面的声线 (ω 不同), 经反射后都相交于 A' 点。这是因为, 当 ω 很小时, $\cos \omega \approx 1 - \omega^2/2$, 于是式 (1-2) 可改写为,

$$\overline{CA'} \approx -\overline{CA} / (1 - 2\overline{CA}/\overline{CS} + \overline{CA} \cdot \omega^2/\overline{CS})$$

$$= \frac{-1}{\frac{1}{\overline{CA}} - \frac{2}{\overline{CS}} + \frac{\omega^2}{\overline{CS}}} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可看出, 如果 $\omega^2/\overline{CS}$ 这一项与 $(1/\overline{CA} - 2/\overline{CS})$ 这一项相比可以忽略的话, 那么各个 A' 点就与 ω 无关了。计算证明, 当 ω 小于 18° 时, 忽略 $\omega^2/\overline{CS}$ 这一项所造成的 $\overline{CA'}$ 的相对误差不大于 15%。由式 (1-3) 还可以看出, $(1/\overline{CA} - 2/\overline{CS})$ 这一项越大, 忽略 $\omega^2/\overline{CS}$ 这一项所造成的误差越小, 而当 $\overline{CA}/\overline{CS} = 1/2$ 时, 不能忽略 $\omega^2/\overline{CS}$ 这一项。

(二) 适用于反射镜的高斯近似

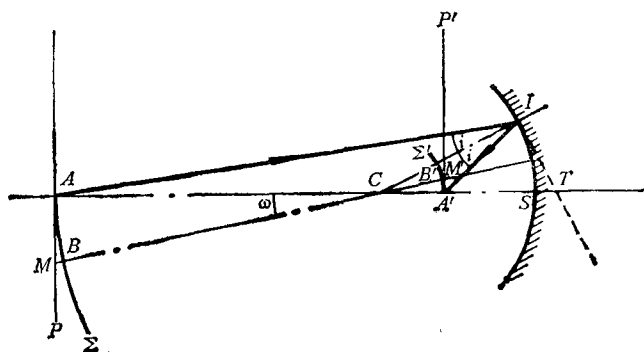


图1-3 适用于反射镜的高斯近似

参见图 1-3。由前面的叙述可知, 当 ω 很小时, 轴线上一点物点 A 必有其象点 A' 与之对应, 其位置关系由式 (1-2) 给定。所以, 对于轴线 $\overline{CM}$ 上距 C 点距离为 $\overline{CA}$ 的一点 B 必有其象点 B' 点与之对应。因此, B 、 B' 点分别是在以 $\overline{CA}$ 、 $\overline{CA'}$ 为半径的圆上 (见图 1-3)。当 ω 很小时, 下式成立:

$$\begin{aligned}\overline{BM} &= \overline{CM} - \overline{CB} = \overline{CA} / \cos \omega - \overline{CA} = \overline{CA} \left(\frac{1 - \cos \omega}{\cos \omega} \right) \\ &\approx \overline{CA} \frac{\omega^2}{2}\end{aligned}$$

这意味着, 当 ω 很小时 ($\overline{BM}$ 近似于零), 垂直于轴线且通过 A 点的平面 (物平面) 上任一点 (物点), 在垂直于轴线且通过 A' 点的平面 (象平面) 上都有一个与之对应的点 (象点)。

(三) 以反射镜顶点 (轴线与反射镜交点) 为原点计算时象点与物点之间的位置关系

在实用中, 常常需要以反射镜顶点为原点计算物点、象点的位置。由图 1-4 可知,

$$\frac{\overline{AI}}{\overline{A'I}} = -\frac{\overline{CA}}{\overline{CA'}}$$

式中, 线段 $\overline{CA}$ 、 $\overline{CA'}$ 是有正负号的量, 线段在 C 点左边时

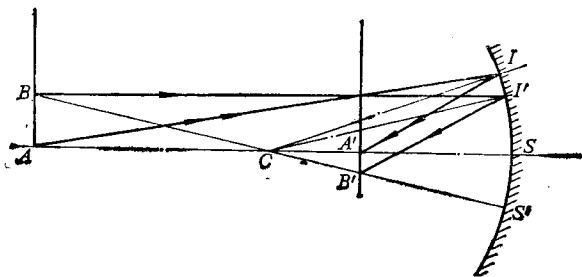


图1-4 以顶点为原点计算物象位置

为正, 在 C 点右边时为负。当 I 点及 I' 点非常靠近 S 点时, 可以认为 $\overline{SA} \approx \overline{AI}$, $\overline{SA'} \approx \overline{A'I}$, 因此, 上式可改写为:

$$-\frac{1}{SA'} + \frac{1}{SA} = -\frac{2}{SC} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 即为以顶点 S 为起点计算时, 象距与物距之间的关系式。通常设 $A'B'/AB = \gamma$ 。 γ 叫做线性放大率。在计算焦柱直径 (这一概念在后文中将叙述) 时要用到线性放大率的概念。

(四) 球面反射镜的焦点和焦平面

在高斯近似条件下, ω 很小, 因此可以认为 $\cos \omega \approx 1$ 。所以式 (1-2) 又可以写成下面的形式,

$$\frac{1}{CA} + \frac{1}{CA'} = -\frac{2}{SC} \quad (1-5)$$

当 CA 趋于无穷大时 (即入射声线与轴线平行时), 上式第一项等于零, 所以

$$\overline{CA'} = \frac{SC}{2} = \frac{R}{2}$$

这时的 $\overline{SA'}$ 称为反射镜的焦距, 见图 1-5。由图 1-6 可知, 平行于 $\overline{CS'}$ 轴的平行声线将会聚于焦点 F_1 ($CF_1 = \overline{CS'}/2$)。

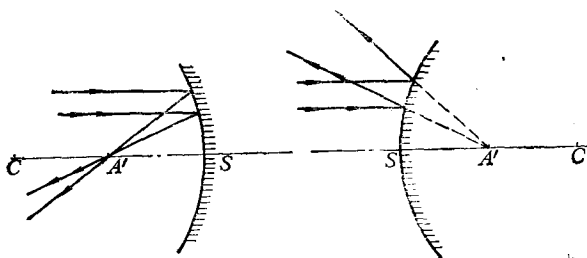


图1-5 球面反射镜的焦点

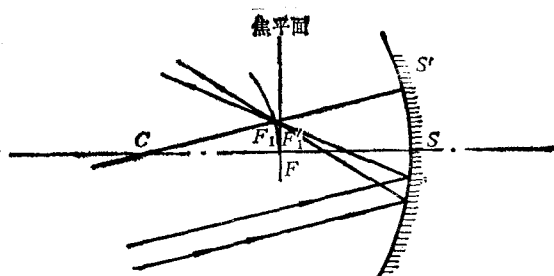


图1-6 球面反射镜的焦平面

F_1 位于以 $\overline{CF}$ 为半径、 C 为原点的圆上。在高斯近似的条件下，可以认为 F_1 与处在垂直于 $\overline{CS}$ 轴且通过焦点 F 的平面上的点 F_1' 相重合。 F_1' 、 F 所在的平面就称为焦平面。也就是说，凡是平行于反射镜半径的平行声线都聚焦在焦平面上。

如果以 $f = R/2$ 表示焦距，式 (1-4) 则可写成，

$$\frac{1}{SA} + \frac{1}{SA'} = \frac{1}{f} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 即为给出球面反射镜焦点、物点、象点之间位置关系的公式。线段 R ， f 为有符号的量，当其在 S 点左边时为正，在右边时为负。

四、有关球面界面折射的计算公式

(一) 基本公式

两种折声系数不同的介质交界处形成球面时，这个界面叫球面折声面。由图 1-7 中 $\triangle IA_1C$ 及 $\triangle IA_2C$ 可知， $\overline{CA_1}/\sin i_1 = \overline{IA_1}/\sin \omega$ ， $\overline{CA_2}/\sin i_2 = \overline{IA_2}/\sin \omega$ 。因此， $\overline{CA_2} \sin i_1 / (\overline{CA_1} \sin i_2) = \overline{IA_2} / \overline{IA_1}$ 。又由式 (1-1) 知， $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ ，

$n_1 = c_*/c_1$, $n_2 = c_*/c_2$, c_* 是水中声速, c_1 、 c_2 分别是第一介质、第二介质声速, n_1 、 n_2 分别为第一、第二介质折声率, A_2 为折射声线与 $\overline{CS}$ 轴的交点。 i_1 是入射角, i_2 是折射角。因此可得:

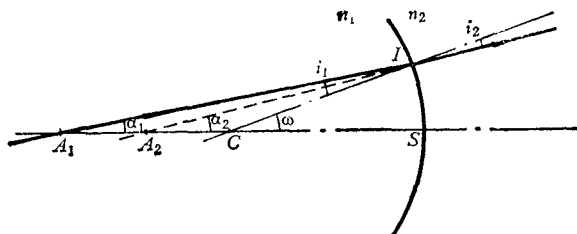


图1-7 球面折声面

$$n_1 \frac{\overline{CA_1}}{\overline{IA_1}} = n_2 \frac{\overline{CA_2}}{\overline{IA_2}} \quad (1-7)$$

式中, 线段 $\overline{CA_1}$ 、 $\overline{CA_2}$ 是有符号的量, 当其在 C 点右边时为负, 在左边时为正。式 (1-7) 表明, 当 A_1 及 ω 固定不变时, A_2 的位置由式 (1-7) 决定。而当 ω 变化时, A_2 点的位置也变化。但当 ω 很小时, 可以近似地认为 $\overline{IA_1} \approx \overline{SA_1}$, $\overline{IA_2} \approx \overline{SA_2}$, 即可以认为 A_1 、 A_2 点的位置关系与 ω 无关。于是式 (1-7) 可改写为:

$$n_1 \frac{\overline{CA_1}}{\overline{SA_1}} = n_2 \frac{\overline{CA_2}}{\overline{SA_2}} \quad (1-8)$$

式中, 线段 $\overline{SA_1}$ 、 $\overline{SA_2}$ 也是有符号的量, 当其在 S 点左边时为正, 在右边时为负。

(二) 球面折声面的焦点

参见图 1-7。当 i_1 , i_2 , α_1 , α_2 , ω 均比较小时, 可以认

为 $\sin i_1 \approx i_1$, $\sin i_2 \approx i_2$ 。因此有 $n_1 i_1 \approx n_2 i_2$, 而 $i_1 = \omega - \alpha_1$, $i_2 = \omega - \alpha_2$; 所以 $n_1(\omega - \alpha_1) = n_2(\omega - \alpha_2)$ 。又因为 $\omega \approx \overline{SI}/\overline{SC}$, $\alpha_1 \approx \overline{SI}/\overline{SA_1}$, $\alpha_2 \approx \overline{SI}/\overline{SA_2}$, 所以下式成立:

$$n_1 \left(\frac{1}{\overline{SC}} - \frac{1}{\overline{SA_1}} \right) = n_2 \left(\frac{1}{\overline{SC}} - \frac{1}{\overline{SA_2}} \right) \quad (1-9)$$

又因为 $\overline{SC} = R$, 式 (1-9) 又可写为:

$$\frac{n_1}{\overline{SA_1}} - \frac{n_2}{\overline{SA_2}} = \frac{n_1 - n_2}{R} \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 可知, 当 A_1 点在无穷远时, $n_1/\overline{SA_1}$ 等于零, 则

$$\overline{SA_2} = f_2 = \overline{SF_2} = -\frac{n_2}{n_1 - n_2} R \quad (1-11)$$

当 A_2 点在无穷远时,

$$\overline{SA_1} = f_1 = \overline{SF_1} = \frac{n_1}{n_1 - n_2} R \quad (1-12)$$

$\overline{SF_1}$, $\overline{SF_2}$ 就称为折声面的焦距(参见图 1-8)。 $\overline{SF_1}$, $\overline{SF_2}$, R 也是有符号的量, 当其在 S 点右边时为负, 在 S 点左边时为正。各种折声面的焦点如图 1-9 所示。

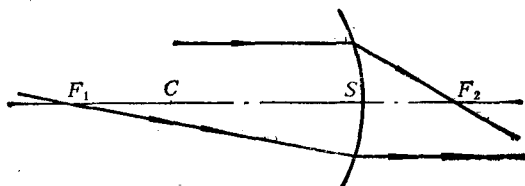


图1-8 球面折声面的焦点

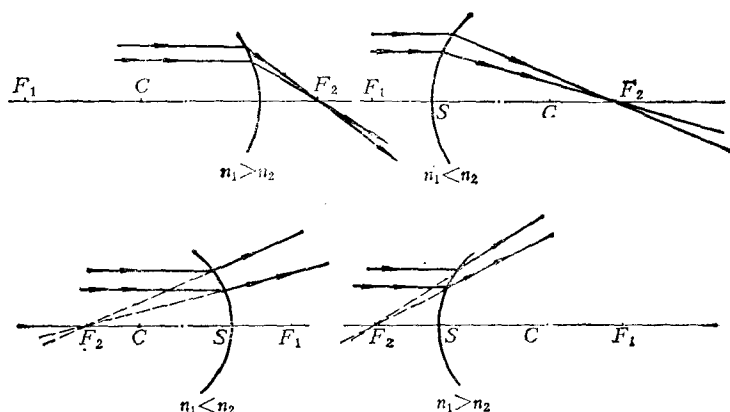


图1-9 几种球面折声面的焦点

(三) 球面折声面的焦平面

设图 1-10 中的 $\overline{P'A_2}$ 、 $\overline{PA_1}$ 分别在垂直于轴线 $\overline{A_2S}$ 的两个平面内，由式 (1-8) 可知，轴线上一点 A_1 必对应一象点 A_2 。当轴线 $\overline{A_2S}$ 绕原点 C 旋转一小角度 ω 后， A_1 点移到了 B_1 点， A_2 点移到了 B_2 点，而 P' 、 P 分别是 $\overline{S'C}$ 轴与分别过 A_2 、 A_1 且与轴线 $\overline{SA_1}$ 垂直的两平面的交点。若 ω 很小，则可认为 P 与 B_1 重合， P' 与 B_2 重合。我们称通过 A_2 点且垂直于轴线的平面叫象平面。把通过 A_1 点且垂直于轴线的

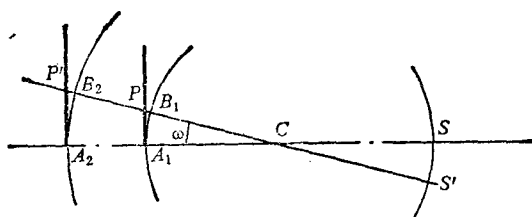


图1-10 球面折声面的物平面和象平面