

电子线路法声成像

〔美〕 H. F. 哈默思 著

姬树森 郑德连 译

国防工业出版社

电子线路法声成像

电子学和电子物理学进展补篇11

〔美〕 H. F. 哈默思 著

姬树森 郑德连 译

国防工业出版社

内 容 简 介

声成像在水下观察与医学诊断中有许多重要的应用,潜在应用的前景也十分诱人。根据作者的观点把声成像方法归纳为透 镜 法、回波法、全息法和电子线路法四种。本书侧重叙述电子线路法声成像,详细讨论了在水听器阵之后用电子线路实现线性反变换从而成像的理论、方法、实际设备和存在的问题,还就多路复用、减小旁瓣及利用电子线路可产生的特殊效应、合成孔径处理等提高像质或改进设备性能的可能方法作了阐述。

本书可供从事声学成像方面研究工作的科技人员、大专院校有关专业的师生参考。自然,对希望在科学研究或工程实践中使用声成像设备的读者,想要了解声成像的发展和应用前景,本书亦将提供有益的帮助。

ACOUSTIC IMAGING WITH ELECTRONIC CIRCUITS
Advances in Electronics and Electron Physics Supplement 11
HENNING F. HARMUTH
ACADEMIC PRESS 1979

*

电子线路法声成像 电子学和电子物理学进展补篇11

〔美〕 H. F. 哈默恩 著

姬树森 郑德连 译

*

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

*

850×1168¹/₃₂ 印张7³/₄ 193千字

1983年10月第一版 1983年10月第一次印刷 印数: 0,001— 3,500册

统一书号: 15034·2540 定价: 1.15元

译 序

声成像有许多重要的和潜在的应用，但是最有把握的是用于水下观察与医学诊断。在军用方面，有探测潜艇、搜索“蛙人”、在航道上寻找水雷和障碍物、给沉船和落水物体定位、潜艇冰下助航等。人们也逐渐认识到，就是在水下观察的应用中，从长远看来，民用方面的需要也将日渐增多。深海采矿工艺在发展，离岸石油钻探也不断向远海延伸，维修钻架与管线或打捞作业常常因水浑浊得不能透光而非得求助于声波不可。在医学诊断中，声波不会有象X射线那样的辐射伤害是众所周知的，在某些场合下声像所能提供的关于人体的细节要比X射线像多。超声显微镜在组织切片检查和集成电子学工艺的应用上更有它的独到之处。

追溯声成像约五十年的发展历史，无论是透镜成像、回波成像还是全息成像，都是沿袭电磁波成像的思路，只是电子线路法声成像才突破了对光学或电磁学的模仿而独具特色。自然，基于声光相互作用的那类成像应该说也是自成一格的声成像方法。

限制声成像发展的因素是多方面的：声波的信息传输率比电磁波小得多、迄今为止人们对自然界中声成像的实例也认识得不够、还得等待电子工艺有更为长足的进展等等。用电子线路的声成像装置现在还嫌太大，因而在实用上还不满意。但是人们有理由乐观，只要看一看三十多年来，象第一台电子计算机那样的庞然大物，已经缩小到袖珍可携的程度，就会相信声成像装置在体积上的缩小也完全是可能的。此外，为了使声成像的研究成果得到发展与推向应用，还必须以实用的任务去促进实验研究向工程使用方面发展。

本书是近几年内陆续出版的为数甚少的几本声成像方面的专

IV

著之一。作者 H. F. 哈默思博士在美国华盛顿 D. C. 的天主教大学电工系任教，近年来著述颇丰。本书写成于1979年。全书共分九章，除第一章导论外，主要内容叙述用电子线路实现反变换从而成像的理论、方法及装置，其中以傅立叶变换方法最为重要与详细，用来实现它的模拟电路和数字电路都作了介绍。第五章叙述了实际设备及湖上试验结果。自第六章起就多路复用、减小旁瓣、距离选通、合成孔径处理、扩谱照射等改进图像质量、提高装置性能的若干问题作了讨论。此外，书中也不乏实验装置的制造、安装调试与湖上试验等方面工程上的细节。

凡对声成像的研究与应用有兴趣的读者，学习过大专水平的物理学、电子学等有关课程的便可阅读本书。书中的数学推导明白易懂，也无须具有光学或声学的专门知识。

由于水平限制，译文中疏误难免，希读者不吝指正。

本书部分章节经黄燮昌同志校阅，谨致谢忱。

译 者

前 言

一九七九年初，我们出版了 Henning F. 哈默思 (Harmuth) 的专著《序列论：基础与应用》，作为电子学和电子物理进展的补篇 9。在比较短的时期以后，我们能提供另一本专著作为这套丛书的又一补篇，这显示出他的多方面的才华。

声成像是一个较新的题目，哈默思博士的这一著作限于在声成像中应用电子线路的问题，但是丰富的书目允许问题较广泛的学生作更深入的开掘。由前一专著所引起的兴趣使得本书最能得到热情的接纳。

L. 马顿 (Marton)

C. 马顿 (Marton)

原 序

自然界中应用声波传输信息要比应用电磁波少得多。我们的耳朵敏感的频率到16千赫左右，这意味着我们每秒能接收 32000 个声波的样点。另一方面，每秒25帧625行的标准的电视图像送到我们眼睛的样点是每秒 $625^2 \times 25 = 9,765,625$ 个。如果不是黑白而是彩色图像，这个数目还要大。这表明我们眼睛接收信息的速率至少高出耳朵为二到三个数量级。

接收声波得需要大尺寸的传感器阵似乎为自然界对声波和电磁波的开发程度的不同作出了解释。声波的传感器阵典型地由双耳组成，而人的眼睛中光波传感器阵包含有一亿多个传感器。

由于缺乏自然界所提供的实例，用声波而不是光波成像的科学的、实用的发展无疑受到了妨碍。当最终认识到声波成像的可能性与潜力之后，它是沿着以前电磁波所探索过的道路发展的。声透镜以光透镜为依据，声呐仿效了雷达，声全息是光全息的产物。

电子线路法声成像打破了这种传统的格局。这种方法的发明和发展在光学或“电磁学”中是没有任何例子的。说实在的，倘使电子线路的响应时间能缩小一个约为 10^{-8} 的因子，这个方法才能用于光成像中。

从最初的理论概念到第一台实验装置的过渡是非常快的，不到五年时间。这与我们的电子工艺高度发展的状况有很大关系。同样重要的是对水下实时的、可靠的声成像的潜力很快有了认识。美国海军前潜艇官员 A. 塞赛尔斯基 (Cecelsky) 在海军研究所内开始了第一个发展计划，他的继任 M. A. 布列查德 (Blizard) 继续给予强有力地支持，直至建成第一个装置。成功的试验工作

VI

也要归功于 J. F. 鲍伦 (Ballon)、R. D. 缪图卡 (Mutulka)、D. D. 皮津格 (Pizinger) 和分派到海军研究所的所有美国海军官员。在奥斯汀 (Austin) 附近的特拉维斯湖 (Lake Travis) 试验站的试验中, 奥斯汀的得克萨斯 (Texas) 大学应用研究实验室的 C. 麦金内 (McKinney) 有过很大的帮助, 作者对他深表感谢。

目 录●

第一章 导论	1
1.1 声波成像	1
1.2 声透镜与电子处理	4
1.3 应用概况	15
第二章 用线性变换成像	18
2.1 介质中的变换与用抽头延时电路的反变换	18
2.2 用傅立叶变换方法的反变换	28
2.3 采样存储电路法反变换	35
第三章 用模拟电路完成傅立叶变换与波束形成	43
3.1 16个输入端的快速傅立叶变换电路	43
3.2 32个和64个输入端的快速傅立叶变换	51
3.3 $2^k 3^m 5^n$...个采样的快速傅立叶变换电路	80
3.4 用傅立叶变换电路的被动波束形成	85
3.5 傅立叶反变换	87
3.6 用傅立叶反变换电路的主动波束形成	95
第四章 球面波前聚焦	100
4.1 理论基础	100
4.2 衍射图案的计算机绘图	113
4.3 聚焦电路	118
第五章 实际设备	131
5.1 阵的设计原理	131
5.2 线路结构	140
5.3 噪声抑制用的时间滤波器	144
5.4 像的显示与试验结果	149

● 标明参考文献的方式是：作者的姓名，出版年分。若列入同一作者同一年分的不止一篇时，再接用小写的拉丁字母。

X

第六章 多路复用和减小旁瓣	155
6.1 多路复用水听器阵与处理器	155
6.2 以减小旁瓣来增加动态范围	162
6.3 减小旁瓣的电路	166
第七章 用数字电路成像	172
7.1 数字延时电路	172
7.2 用于傅立叶变换的数字电路	173
7.3 实际电路的关键——同步解调器	175
第八章 电子线路可产生的特殊效应	181
8.1 距离选通像和三维像	181
8.2 都卜勒像	184
8.3 远透镜效应	185
8.4 伪彩色像	186
8.5 扩谱的声照射	189
第九章 合成孔径处理	191
9.1 用正弦波传输功率与信息	191
9.2 合成孔径理论导引	194
9.3 一维和二维的合成孔径	205
9.4 像对比度与脉冲压缩	216
9.5 分辨力	221
参考文献	233

第一章 导 论

1.1 声波成像

通常，有四种已知的用电磁波或声波来产生像的方法。最古老的一种方法是用透镜，电磁波与声波都可以用它。从历史上说，第二种方法是用于雷达与声呐的回波原理。在合成孔径雷达与声呐中，所得到的像的分辨力给人以深刻的印象。第三种方法是全息，它在理论上是盖伯（Gabor）提出来的（1949，1951），而在激光可资应用时才得以实现〔科利尔（Collier）等人，1971；考克（Kock），1973〕。第四种方法是用二维空间电滤波器，它是近几年在理论上和实验上发展起来的〔哈默思（Harmuth），1976；哈默思等人，1974〕。最先用这个方法获得动像的是得克萨斯（Texas）大学应用研究实验室的狄尔克斯（Dierks），地点在得克萨斯的奥斯汀（Austin）附近的特拉维斯湖试验站（Lake Travis Test Station）。

参见图1.1.1(a)，可以明了用电磁波或声波产生一幅像所要完成的过程。三个波前从物平面上P1，P2和P3三点向接收平面传播，在接收平面的每一点都接收三个波前的和。成像的过

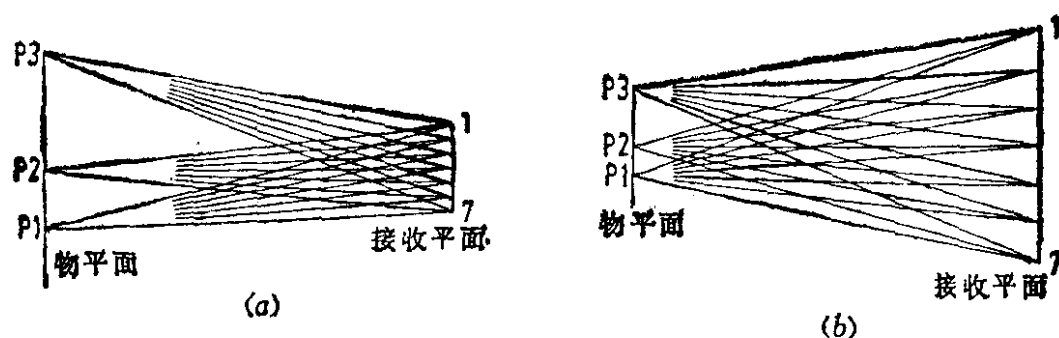


图1.1.1 物平面内P1，P2和P3三点产生的波前为接收平面内许多点所接收

(a) 接收平面小于物平面（望远镜），(b) 接收平面大于物平面（显微镜）。

程意指将这个和分解成各个分量，重新分别获得来自 P_1 , P_2 和 P_3 波的幅度。从数学上来说，起源于物平面的各个波前的线性变换在接收平面内产生它们的和，其反变换则重新产生原来的波前，我们称之为物平面的像。产生像的各种方法主要的差别是它们反变换的方法不同。

在图1.1.1(a)中，接收平面小于物平面，而图1.1.1(b)中却正好相反。如果接收平面较小，我们称作望远镜，反之，接收平面大于物平面，则称作显微镜。

图1.1.1中的物平面无须作进一步的解释，但是什么样的具体结构可以表示一接收平面还不明显。图1.1.2表明用透镜充当接收“平面”。图1.1.1中接收平面上1~7各点现在是透镜表面上1~7各点。假定 P_1 , P_2 和 P_3 在无穷远处，这样来自它们的波前到达透镜上是平面的而不是球面的，在1~7各点上是相加在一起的，但在透镜的焦平面内被分开成三个像点。

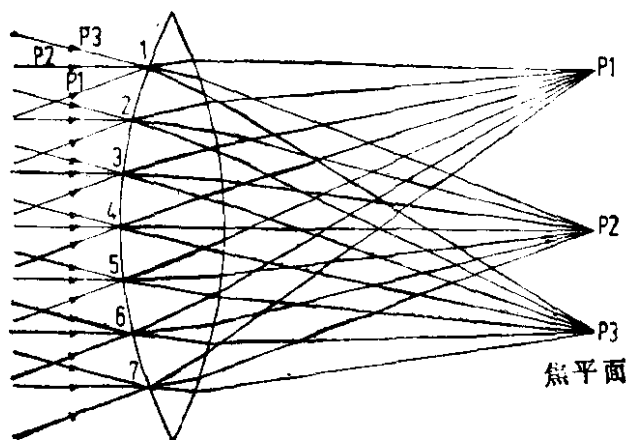


图1.1.2 透镜成像的原理

我们已经把接收平面这一术语用于透镜的表面，即使它是一个曲面。后面我们会看到物平面与接收平面两者都可能是曲面，非必要时，对这种概念就不再加以说明。

如果波前的传播速度在透镜中比透镜外要慢，那么图1.1.2中的凸透镜将产生一个像。如果透镜是玻璃制的，而且周围是空气，对电磁波来说一般是这样。而声波在液体中传播比气体中快，

在固体中更快，所以空气中声透镜一般是凹的而不是凸的。但是在声成像的最重要的介质——水中，声透镜可以是凹的，也可以是凸的，这取决于透镜材料的声速。

图 1.1.1 中的接收平面和图 1.1.2 中的透镜只画了七个接收点，而所推导的理论适合于大量而又有限的点数。与大多数光学成像方面的理论著作成对照，那里的点数则假定为多得不可胜数，以便使用微积分方法。这种方法在光学中是有效的，纵然一个透镜只包含有限数目的玻璃分子、眼睛包含有限数目的感光锥体、照相胶片包含有限数目的感光分子。这个有限数目是如此之大，在数学上加以理想化是足够精确的。在采用电子线路的声成像中就不再如此了。在这种情况下，接收平面由一个水听器阵所组成，水听器的数目与不可数的无穷大迥然不同。

还没有满意地制得全息法的声像[●]，但是已经得到了声呐像。声呐像不同于我们通常概念中的像，后者是以我们的眼睛成像的经验为根据的。图 1.1.3 表明这两类像之间的区别。声呐原理产生回波平面的像，而通常的视觉像，诸如照片或电视画面，指的

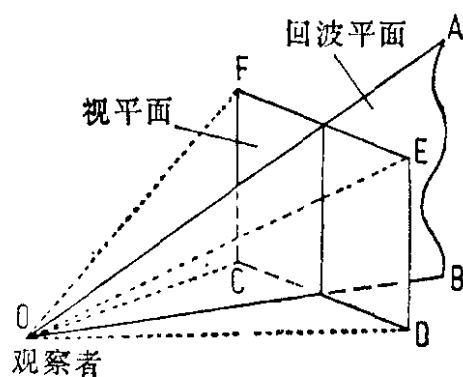


图1.1.3 声呐原理成像的回波平面OAB与眼睛和透镜成像的视平面CDEF

- 采用一个气体-液体或晶体-气体的界面的声全息成像仅在理论上做了工作，但实际上实现它却证明是困难的〔鲍廷 (Boutin) 和米勒 (Muller), 1967; 法勒 (Farrah) 等人, 1970; 弗里兹勒 (Fritzler) 等人, 1969; 戈兹 (Goetz), 1970; 希尔班德 (Hildebrand) 和布伦登 (Brenden), 1972; 柯佩尔 (Korpel) 和德斯马斯 (Desmares), 1969; 柯佩尔和惠特曼 (Whitman), 1969; 马伦 (Marom) 等人, 1971; 梅塞勒 (Metherel) 等人, 1969; 米勒和谢耳丹 (Sheridan), 1966; 柯佩尔和基廷 (Keating), 1969; 米勒等人, 1969; 米勒, 1971〕。重点移到用电子线路来实现其原理，这种形式的全息法在电气工程中早已熟知，称为同步解调〔布思 (Booth) 和萨顿 (Sutton), 1971; 索恩 (Thorn) 等人, 1974〕。

是与回波平面相垂直的视平面的像。已经成功地得到了医学诊断用的声呐像〔冯雷姆 (VonRamm) 和瑟斯顿 (Thurstone), 1975; 基斯罗 (Kisslo) 和冯雷姆, 1975〕。

1.2 声透镜与电子处理

图 1.1.2 所示为一个光学或声学透镜, 它接收来自无穷远处点 P_1 , P_2 和 P_3 的三个平面波前, 透镜将这些波前会聚在焦平面内的 P_1 , P_2 和 P_3 三个点。从无穷远处的起点到焦平面内的像点波前的任一部分, 传播时间是相同的, 无论波前入射在透镜表面的什么部位上。来自无穷远处 P_1 点的波前到达透镜表面上点 1 比到达其他点 2, 3, ..., 7 需要更多的时间, 然而, 从透镜表面到焦平面内 P_1 点的传播时间, 对入射于透镜的点 1 上的这段波前来说是最短的, 而对入射于 2, 3, ..., 7 点的各段则渐增变大。透镜及透镜和焦平面间的空间起的作用象很多延时线。对透镜表面上的每一点和每一个入射角都有一条延时线, 图 1.1.2 中透镜里的粗线表示从透镜表面的七个点中每一个出发的三条“延时线”。

现在改用电子线路来表现透镜的作用, 为了仍然切合实际, 我们用声波而不用光波来解释。图 1.1.2 中透镜表面上七个点在图 1.2.1 中用七个微音器来代替, 使声振荡变换成电振荡。现在假定得到的七个电磁波通过所示的延时电路传播, 其相速与到达微音器之前的声波波前传播相速一样, 电路的其他部分产生的延时可以忽略不计。波, 开始是声波、然后是电磁波, 从无穷远处 P_1 到最上面一个求和放大器的输出端, 无论是由哪一个微音器接收到声波的, 其行进时间总是相同的。

图 1.2.1 中虚线与各个声波传播线相垂直, 很容易看出如何利用这些线来决定延时线路的电长度。这些线路所产生的延时正比于它们所画出来的长度。

图 1.2.1 表明, 用了七个微音器仅能分辨 P_1 , P_2 和 P_3 三个

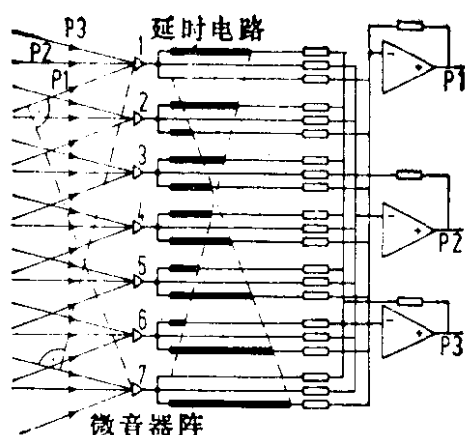


图1.2.1● 用微音器、电延时线路及求和放大器对图1.1.2的声透镜作电等效

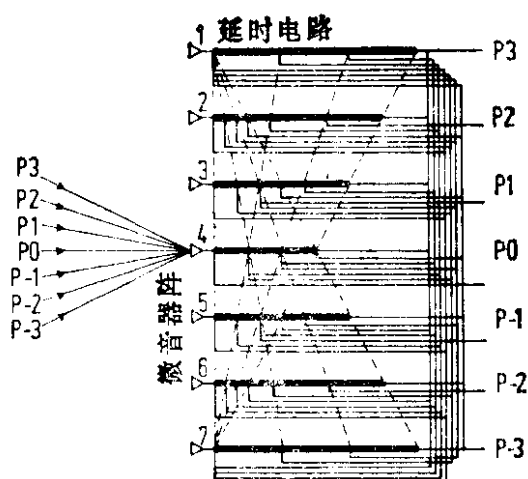


图1.2.2 图1.2.1的改进电路，能分辨七点

点。图 1.2.2 所示，有办法能做到用七个微音器的阵分辨出七点而没有模糊。仍旧象图 1.2.1 中那样用七个微音器，但是用带有抽头的延时线与微音器相连接取代了数量众多的延时线路，决定抽头位置的是跟 $P-3, \dots, P3$ 各点到微音器阵的传播线相垂直的那些线。在图 1.2.2 中省略了图 1.2.1 中的电阻与求和放大器。

图 1.1.2 中用透镜产生的像是镜面像，因为焦平面上 $P1, P2$ 和 $P3$ 与无穷远处点的顺序相反。对图 1.2.1 也同样如此。在图 1.2.2 中没有这样的翻转。很显然，图 1.2.1 中的 $P1$ 和 $P3$ 或者图 1.2.2 中的 $P-3$ 到 $P3$ 输出端的位置可按需要来选择。这种可能性不仅可以避免侧翻转，而且提供了一种方法，消除宽视角的简单透镜中的某些失真。

图 1.1.2 的成像过程仅对其一维作了解释，但是可以绕透镜表面上点 4 到焦平面上 $P2$ 的连线旋转透镜切面而推广到常用的二维。这样做意味着使用极坐标。选择极坐标在技术上是依据的，用极坐标计算和研磨透镜比用直角坐标容易。而图像通常都要求是矩形的，例如，现在的照片与电视屏幕都是矩形而不是圆

形，故采用直角坐标更为合适。

电子电路由一维到二维的扩展也可以在极坐标中进行，但在技术上却是直角坐标有利。假定图 1.2.2 中的电路安装在一块印制电路板上，不带微音器，但是有图 1.2.2 中略去的电阻与求和放大器。实现向二维过渡的方法是垂直地叠装七块印制板而水平地叠装另外七块，如图 1.2.3 所示。板子的输入端是图 1.2.2 中的 1~7 各端点，输出端为 P-3 到 P3 各点，但带有求和电阻和放大器。图 1.2.3 的垂直叠装的板子的输出端（xz 平面重建）与水平叠装的板子（yz 平面重建）的输入端相连接，如四条虚线所示，其他连线没有画出来，以免使图模糊不清。

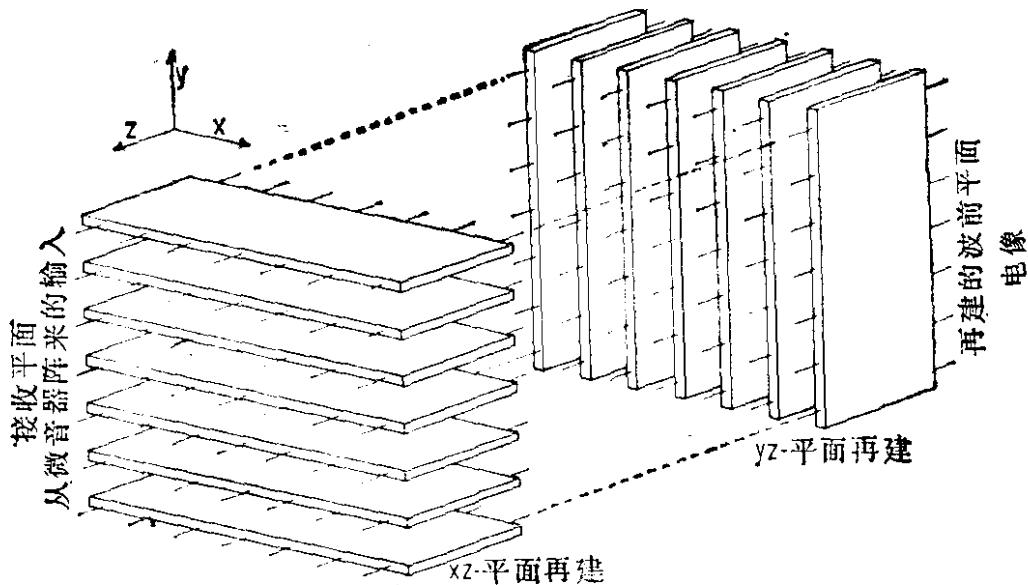


图1.2.3 在直角坐标中产生像的二维空间处理器或滤波器（接收平面的输入端 7×7 个电压同时而且线性地变换为再建波前平面的输出端上 7×7 个电压）

一个 7×7 个微音器方阵与图 1.2.3 中垂直叠装的印制板输入端相连接，微音器将接收到的声波波前变换为一个二维的电压组或电压阵，而图 1.2.3 的处理器将这组电压变换成另一组电压，就是电像。接下来的任务是将电像变换为可见的光学像。任何电光转换器都可以做到这一点。已知最好的转换器是电视显像管，但是也可以用发光二极管阵。

让我们对用极坐标来实现图 1.2.3 中的处理器稍作考虑。图 1.2.4 所示的是按图 1.2.2 把印制板作直角坐标安排。这个例子中假设的微音器阵有 $8 \times 16 = 128$ 个微音器而不是图 1.2.3 中的 $7 \times 7 = 49$ 个。微音器也需按极坐标而不是按直角坐标来安装。图 1.2.4 的实际实现看起来比图 1.2.3 复杂得多，但并非如此。两个释例仅仅表明了如何将印制电路板与微音器、印制板相互间

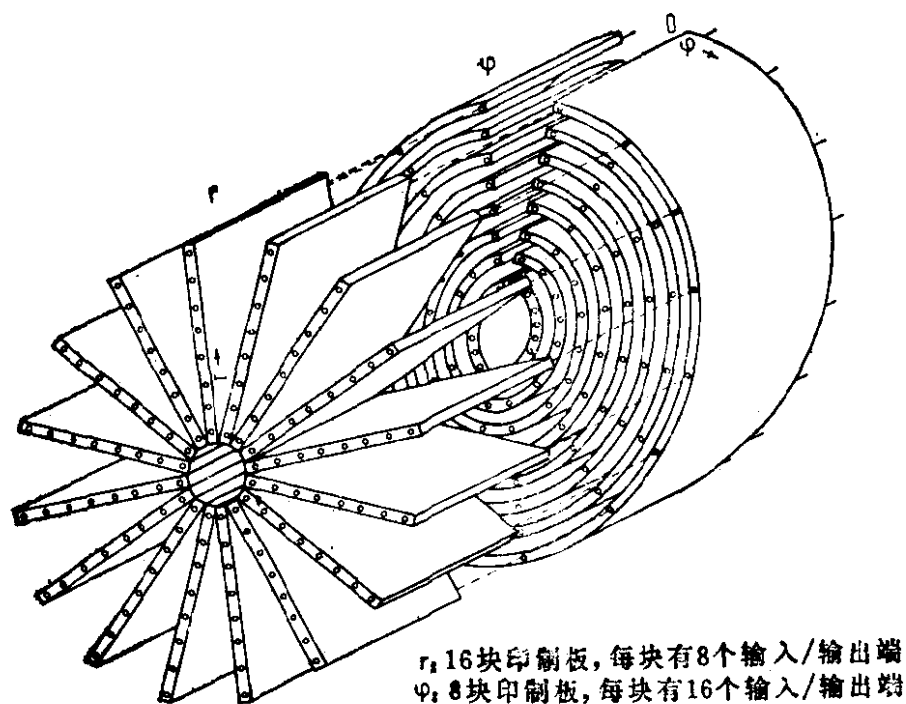


图1.2.4 在极坐标中完成二维空间变换的电路原理
标有 ρ 的板子, 包含有图1.2.2的电路, 但有 8 个而不是 7 个输入、
输出端, 标有 ϕ 的板子容有同样的电路, 但端点数为 16。

以及与电光转换器进行连接。印制板都能以普通的方法制造并安装在常用的印制板吊架上, 只是在板子之间要按图 1.2.3 和 1.2.4 连线。两种坐标的微音器阵的机械结构和电光显示的机械结构都不相同。图 1.2.5 表明微音器数量大体相等的极坐标阵 ($8 \times 16 = 128$ 个微音器) 和直角坐标阵 ($10 \times 10 = 100$ 个微音器) 的安排。电光转换器的构成应相类似。发光二极管显示, 必须象图 1.2.5 中微音器那样安装二极管。如在电视中所用的, 阴极射线管常按直角坐标进行扫描, 但在雷达显示器中也采用极坐标扫描。