

积与三个变量的乘积成正比；二是神经网络法，使用已有的膀胱模型进行训练，得到一个具体的膀胱容积函数模型，然后通过此函数模型对新的膀胱进行测量。

2.5.1 已有的膀胱容积算法

(1) 立体几何法

随着膀胱容积的增加，膀胱的高度和深度也会随之增加，将超声阵列探头紧贴腹部，测量膀胱的最大深度和最大高度。如图 2-4 所示，D 表示膀胱最大深度，H 表示最大高度。膀胱容积的表达式为：

$$V = 7.1 \times D \times H - 23 \quad (2-1)$$

其中，V 表示膀胱容积。

此方法优化了先前使用三个变量计算膀胱容积的方法，并且很好地测量了大于 100ml 的膀胱容积^[30]。

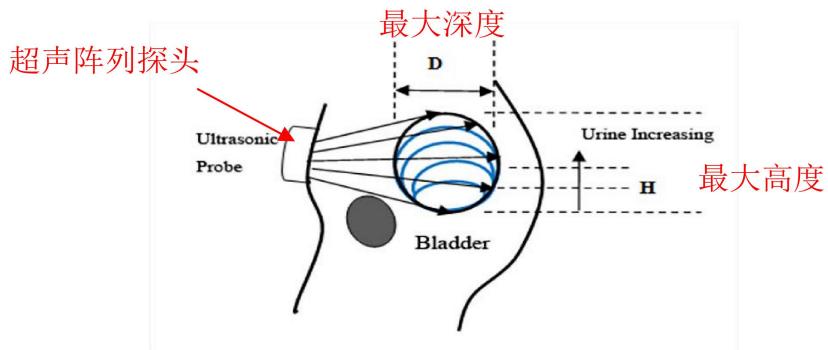


图 2-4 膀胱容积测量示意图^[30]

这种容积算法使用超声阵列探头的作用是增强计算精度，但是每个阵元探头都需要自己的发射电路和接收电路，直接导致系统出现设备体积巨大、电路结构复杂和功耗较大等问题。

(2) 神经网络法

将膀胱模拟成一个球体，使用机械探针进行扫描，每扫描一次就可以获得一帧图像，扫描结束之后可以获得 12 帧，如图 2-5 (a) 所示，每帧可以得到三个有用的属性：左半轴的长度为 L，右半轴的长度为 R 和扫描方向。图 2-5 (b) 展示的是 12 次扫描的方向，12 帧的交点就是膀胱中心位置。使用神经网络算法进行膀胱容积的测量，

这里考虑十二帧模型，使用的神经网络模型是多层感知模型，如图 2-6 所示。输入层和最后一层由实际的物理意义决定，输入层指的是每帧图像左半轴和右半轴的长度，最后一层指的是膀胱的容积。我们只需要设置激活函数和权系数的初始值，取 N 组数据作为训练集，神经网络算法中的反向传播算法会对权系数进行优化，膀胱容积的测量值将无限接近于真实值^[25]。

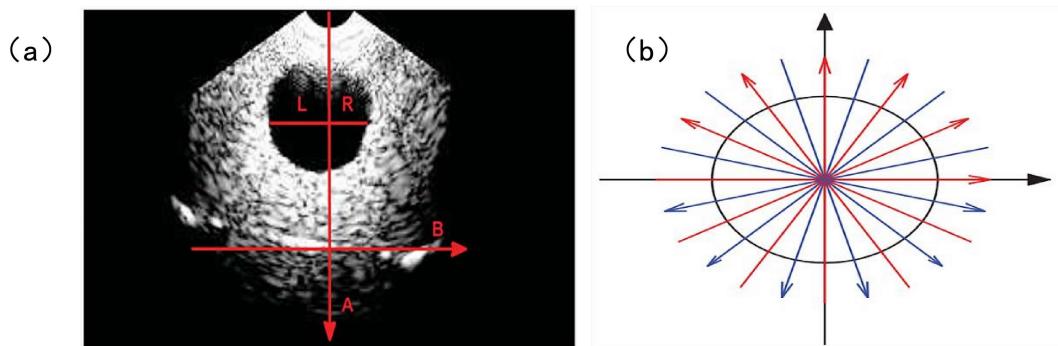


图 2-5 (a) 一帧扫描图像 (b) 12 帧的扫描方向^[25]

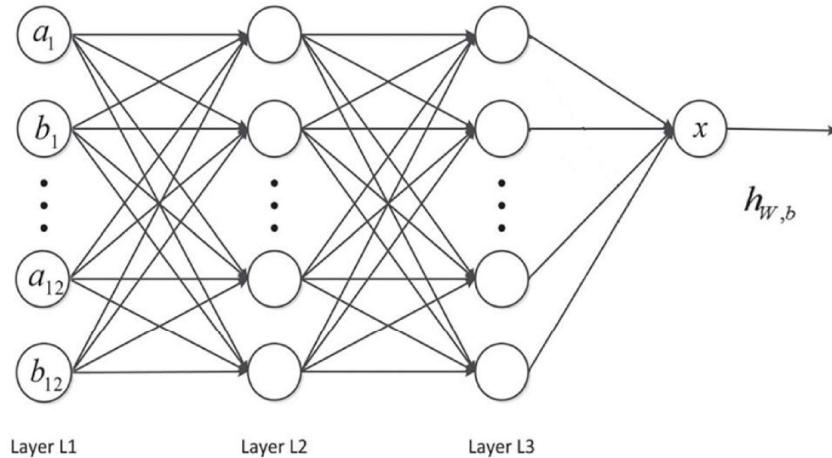


图 2-6 12 帧数据的多层感知模型^[25]

这种方法不用考虑机械探针扫描位置对计算结果的影响，但是可供训练的数据集有限，数据集数量较少会导致通过训练得到的模型没有代表性，得到的膀胱容积测量值和真实值相比误差较大。

2.5.2 “三点定位” 算法

针对以上两种算法存在的问题，本文提出了一种“三点定位”算法计算膀胱容积：超声波可以穿过膀胱壁，膀胱壁也可以反射超声波，在估计膀胱容积的时候，将膀胱模拟成一个球体，超声探头位于膀胱的正上方位置，向膀胱的三个方向发射超声波信号；接收每个方向上的超声波信号经过该方向两侧膀胱壁反射的两次回波信号；根据每个方向上的两次回波信号的时间差确定该方向上膀胱的深度；根据三个方向上膀胱的深度确定膀胱的容积。“三点定位”算法示意图，如图 2-7 所示。

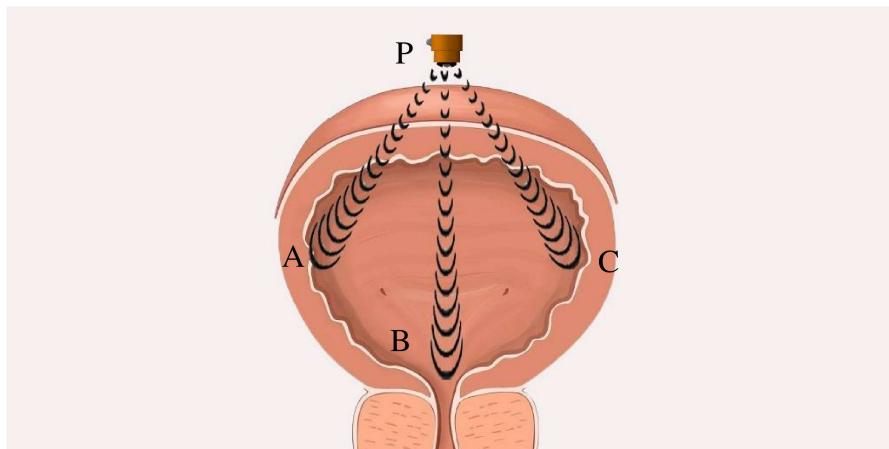


图 2-7 “三点定位” 算法示意图

首先，确定各个方向上的膀胱深度。第 i 个方向上两次反射信号从被发射到接收所经历的时间分别为 Δt_{1i} 和 Δt_{2i} ，该方向上两次反射信号的时间差 Δt_i 为：

$$\Delta t_i = |\Delta t_{1i} - \Delta t_{2i}| \quad (2-2)$$

超声波在膀胱液体中的传播速度为 S ，则该方向上膀胱的深度 h_i 为：

$$h_i = S \times \frac{1}{2} \Delta t_i \quad (2-3)$$

其中， $i \geq 1$ 。

在得到每个方向上的膀胱深度之后，将“三点定位”算法示意图简化为如图 2-9 所示，超声探头相当于一个顶点，三条声束就相当于三条棱，反射点就相当于三个顶点，那么在膀胱内的超声波传播路线就可以看作一个四面体模型，膀胱的容积可以用此四面体的外接球体积代替，四面体的模型如图 2-8 所示。

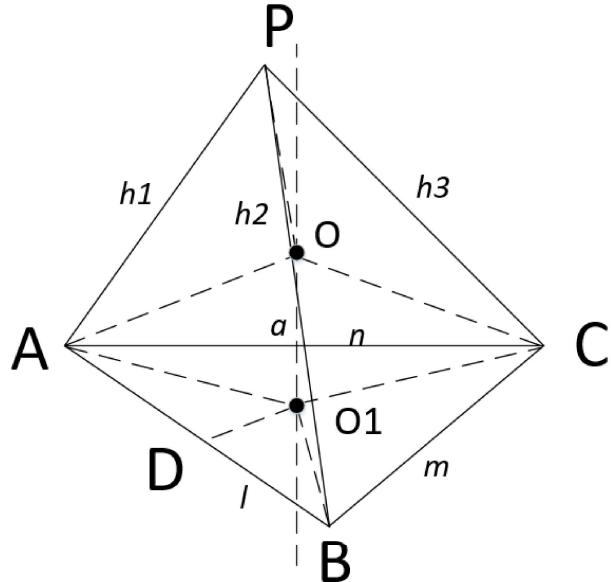


图 2-8 四面体模型

在此四面体模型中，设当从膀胱壁上点 P 向膀胱的三个方向发射超声波信号时，三个方向中各方向与膀胱壁的另一个交点分别为 A 、 B 以及 C ；确定三个方向上膀胱的深度分别为 h_1 、 h_2 及 h_3 ，即 $PA=h_1$ 、 $PB=h_2$ 及 $PC=h_3$ ，这三个方向 PA 、 PB 及 PC 相互之间的夹角分别为 α 、 β 及 γ 。

设 $AB=l$ ， $BC=m$ ， $AC=n$ ，根据余弦定理，可得

$$l^2 = h_1^2 + h_2^2 - 2h_1h_2 \cos \alpha \quad (2-4)$$

$$m^2 = h_2^2 + h_3^2 - 2h_2h_3 \cos \beta \quad (2-5)$$

$$n^2 = h_3^2 + h_1^2 - 2h_3h_1 \cos \gamma \quad (2-6)$$

在底面三角形 ABC 中，两条垂直平分线的交点就是外接圆圆心 O_1 ，过 O_1 作 $O_1D \perp AB$ ，且交 AB 于 D ，膀胱相当于四面体 $PABC$ 的外接球，那么外接球的球心 O 到四个点 P 、 A 、 B 及 C 的距离相等，过点 O_1 作一条直线 $a \perp \triangle ABC$ ，那么点 O 在直线 a 上，并且 $OA=OB=OC$ ；

为四面体 PABC 建立空间坐标系，设 A 坐标为 (0,0,0) , B 坐标为 (1,0,0) , 设 $\angle BAC = \theta$, 则 C 点坐标为 $(n \cos \theta, n \sin \theta, 0)$, 设 P 点坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 根据方程：

$$\begin{cases} x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 = h1^2 \\ (x_p - l)^2 + y_p^2 + z_p^2 = h2^2 \\ (x_p - n \cos \theta)^2 + (y_p - n \sin \theta)^2 + z_p^2 = h3^2 \end{cases} \quad (2-7)$$

解得 P 点坐标 (x_p, y_p, z_p) ;

设三角形 ABC 外接圆半径为 r, 那么

$$r = \frac{m}{2 \sin \theta} \quad (2-8)$$

外接圆圆心 O₁ 坐标为 $(\frac{l}{2}, \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}, 0)$, 设球心 O 坐标为 $(\frac{l}{2}, \sqrt{r^2 - \frac{l^2}{4}}, q)$;

根据 OP=OA=OB=OC=R, 由 $OP^2 = R^2$ 可得:

$$q = \frac{1}{2z_p} (h1^2 - lx_p - y_p \sqrt{4r^2 - l^2}) \quad (2-9)$$

根据 $R^2 = r^2 + q^2$ 得到膀胱球体半径 R, 则膀胱容积为

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (2-10)$$

2.6 希尔伯特解调包络提取算法

本文提出“三点定位”算法测量膀胱容积，其中最重要的步骤就是得到超声信号在膀胱中的传播距离。每个方向上的超声信号都会遇到上下两层膀胱壁，会产生两次回波信号，根据每个方向上的两次回波信号的时间差确定该方向上膀胱的深度。本文从超声回波信号中提取的有用信息是两个回波信号的峰值，所以我们可以提取超声信号的信号包络，这样不仅降低了提取回波信号峰值的难度，还加快了 FPGA 的运行速度。

信号包络提取法是一种成熟的信号处理技术，已经应用于多种领域。目前，常用的信号包络提取法主要包括极值法、检波法以及希尔伯特解调法。