

## 第五章 心理物理学

### 关键词

心理物理学 心理物理法 感觉阈限 阈上感觉 绝对阈限 差别阈限 感受性 操作定义 最小可觉差 最小变化法 不肯定间距 主观相等点 标准刺激 常误 习惯误差 期望误差 练习误差 疲劳误差 阶梯法 恒定刺激法 直线内插法 75%差别阈限 平均差误法 平均差误 动作误差 时间误差 顺序量表 等距量表 比例量表 等级排列法 对偶比较法 等距法 差别阈限法 分段法 数量的估计法 心理物理函数 韦伯分数和韦伯定律 费希纳定律 艾克玛定律 史蒂文斯定律 直接测量 间接测量 数量估计 数量生产 绝对数量估计 情境效应 刺激序列效应 刺激全距 信号检测理论 击中 漏报 虚惊 正确拒斥 ROC 曲线 信号 噪音 似然比 决策标准 支付矩阵  $d'$   $C$

### 课程讲义

#### 第一节 传统心理物理学

心理物理学的先驱是 G. T. Fechner (1801-1887)。Fechner 通过对感觉强度与刺激强度之间的数量关系的长期研究，发展出了测量感觉的基本方法。1860 年，他发表了《心理物理学纲要》一书，为心理物理学研究方法的发展奠定了基础。

#### 一、感觉阈限的测量

1. 概念：感觉阈限 (sensory threshold)，又称阈限，是传统心理物理学的核心概念。阈限可以分为两种：一为绝对阈限 (absolute threshold)，通常简称为 RL (德语 Reiz Limen)，指刚好能够引起心理感受的刺激大小；二为差别阈限 (difference threshold)，通常简称为 DL (德语 Differenz Limen)，指刚好能引起差异感受的刺激变化量。

2. 操作定义 (operational definition)：绝对阈限是指有 50% 的实验次数能引起反应的刺激值；差别阈限则可定义为有 50% 的实验次数能引起差别感觉的两个刺激强度之差。

正是基于上述操作定义，费希纳设计了三种测量感觉阈限的方法——最小变化法、恒定刺激法和平均差误法，后来被统称为传统心理物理法。

#### (一) 最小变化法

特点：最小变化法 (minimal-change method) 又称极限法 (limit method)、序列探索法 (method of serial exploration)、最小可觉差法 (或最小差异法) (method of least difference) 等，是测量阈限的直接方法。特点是将刺激按递增或递减系列的方式，以间隔相等的小步变化，寻求从一种反应到另一种反应的瞬时转换点或阈限的位置。

## 1. 基本的实验过程

### (1) 绝对阈限的测定

刺激系列分为递增和递减两种。递增系列的起点安排在被试基本觉察不到的物理刺激强度范围内，随机选择；递减系列的起点安排在被试基本觉察到的物理刺激强度范围内，随机选择。在实验时，每个刺激系列都从起点处沿递增或递减方向，依次呈现给被试，要求被试报告表示是否感觉到刺激，若被试感觉“说不准”，则要求其进行猜测。主试以“有”“无”或“+”“-”记录被试的反应。对于递增系列，到被试第一次报告“有”，便停止实验；对于递减系列，到被试第一次报告“无”，停止。

绝对阈限计算：(1) 计算每个刺激系列的阈限，被试者反应转折点处所对应的两个刺激强度的中点就是这个系列的阈限；(2) 求出所有系列阈限的均值，便是最后求得的绝对阈限值。

### (2) 差别阈限的测定

每次要呈现两个刺激，让被试比较，一个是强度大小不变的标准刺激，另一个是强度按递增或递减顺序排列的比较刺激。标准刺激在每次比较时都出现，比较刺激按递增或递减系列与标准刺激匹配呈现，直到被试的反应发生转折。将被试的报告分为三类反应，(1) 比较刺激大于标准刺激，记为“+”；(2) 比较刺激等于标准刺激时，记为“=”；(3) 比较刺激小于标准刺激，记为“-”。当被试在比较时表示怀疑，可记作“?”。

差别阈限的计算：(1) 在递减系列中最后一次“+”到非“+”（即“=”或“-”或“?”）之间的中点为差别阈限的上限，用  $L_u$  表示；第一次非“-”到“-”之间的中点为差别阈限的下限，用  $L_l$  表示。(2) 在递增系列中最后依次“-”到非“-”之间的中点为  $L_l$ ；第一次非“+”到“+”之间的中点为  $L_u$ 。(3) 在上限与下限之间的距离为不肯定间距  $I_u$ 。(4) 不肯定间距的中点是主观相等点。在理论上主观相等点（或主观等点）(point of subjective equality, 简称 PSE) 应与标准刺激 (S) 相等，但实际上两者有一定的差距，这个差距称为常误 (constant error, 简称 CE)。(5) 取不肯定间距的一半或者取上差别阈 (DL<sub>u</sub>=L<sub>u</sub>-S<sub>t</sub>) 和下差别阈 (DL<sub>l</sub>=S<sub>t</sub>-L<sub>l</sub>) 之和的一半为差别阈限。以上阐述可用公式表示为：

$$DL_u = L_u - S_t$$

$$DL_l = S_t - L_l$$

$$PSE = (L_u + L_l) / 2$$

$$CE = S_t - PSE$$

$$DL = (L_u - S_t) + (S_t - L_l) / 2 = DL_u + DL_l / 2 = L_u - L_l / 2$$

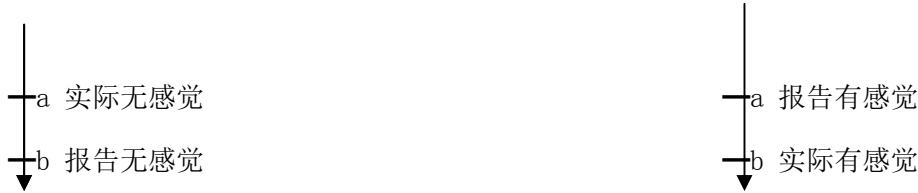
## 2. 误差控制

最小变化法测定绝对阈限产生的误差主要有四种：习惯误差和期望误差、练习误差和疲劳误差。

(1) 习惯误差：是指由于被试在长序列中有继续作同一种判断的倾向所引起的误差。由于习惯误差的存在，递增系列中，阈值就会偏高，而在递减系列中，阈值就会偏低。

(2) 期望误差：是指由于被试在长的序列中给予相反判断（期望转折点的尽快到来）的倾向所导致的误差。由于期望误差的存在，递增系列中，阈值就会偏低，而在递减系列中，阈值就会偏高。

习惯误差（期望误差的情形恰好相反）



递减系列，阈限值变小 ( $T_1$ )

递增系列，阈限值变大 ( $T_2$ )

如  $T_2$  显著大于  $T_1$  时，则认为被试存在习惯误差。

解决方法：为了让习惯误差和期望误差尽可能相互抵消，要交替使用递增和递减系列，也即最小变化法的递增和递减序列要做到数量一致。

(3) 练习误差：是由于实验的多次重复，被试逐渐熟悉了实验情景，对实验产生了兴趣和学习效果，而导致反应速度加快和准确性逐步提高的一种系统误差。

(4) 疲劳误差：与练习误差相反，由于实验多次重复，随着实验进程而发展的疲倦或厌烦情绪的影响，而导致被试反应速度减慢和准确性逐步降低的一种系统误差，称之为疲劳误差。随着时间的进展，练习可能使阈限降低，而疲劳可能使阈限升高。

---

前一般实验 ( $T_1$ )

后一半实验 ( $T_2$ )

如  $T_2$  显著小于  $T_1$  时，则认为被试存在练习误差。

练习误差（疲劳误差的情形恰好相反）

解决方法：为了平衡练习和疲劳的影响，要求最小变化法的递增和递减系列按照 ABBA 法安排，交替进行。具体做法是：如以“↑”代表递增，以“↓”代表递减，并以四次为一轮，就可以按照“↓↑↑↓”或“↑↓↓↑”排列。这样，即使整个实验过程中存在练习效

应或疲劳效应，也会平均作用在递增或递减系列上，不至于产生额外的干扰。

### 3. 注意事项

最小变化法测定差别阈限的注意要点和测量绝对阈限时的既有相同点也有不同点：

相同点：（1）递增递减系列要保持数量一致，以抵消习惯误差和期望误差；（2）每一系列的起始位置要随机变化，以防止被试形成预测；（3）递增递减系列交替排列，以平衡练习误差和疲劳误差。

不同点：由于测定差别阈限时有了标准刺激的存在，那么标准刺激和比较刺激每次呈现的相对关系（时间先后关系或空间位置关系）也可能构成干扰因素。为了控制标准刺激出现位置和时机的影响，通常采用的办法是多层次 ABBA 控制法。多层次 ABBA 法的基本思想和简单的 ABBA 法是完全一致的，表 5-1 列举了多层次 ABBA 法的具体控制形式。

表 5-1 ABBA 法的控制形式

比较刺激系列呈现顺序	↑	↓	↓	↑
标准刺激呈现位置	左右	右左	右左	左右
相继呈现的先后顺序	前后	后前	前后	后前

### 4. 缺点

对于有一定后作用的刺激，不宜采用此方法。如递减法不宜用于测定味觉和嗅觉阈限，因为嗅觉适应快，味觉的后作用不易被消除。

### 5. 最小变化法的变式——阶梯法

最小变化法是按一定的梯级增加或减少刺激强度来测定阈限的，并且渐增和渐减系列是完全分开的。阶梯法和最小变化法不同的地方就在于它把增加和减少刺激强度的程序连续进行。当被试报告感觉不到开始呈现的刺激时，主试就按一定梯级来增加刺激强度；而当增加到被试感觉到了时，又按一定的梯级来减少刺激强度。实验按这样的顺序继续下去，直至达到一个先定的标准或先定的实验次数为止。

#### （二）恒定刺激法

恒定刺激法（或固定刺激法）(method of constant stimulus) 又叫正误法 (true-false method)、次数法 (frequency method)，它是心理物理学中最准确、应用最广的方法。具体作法如下：

(1) 主试从预备实验中选出少数刺激，一般是 5 到 7 个，这几个刺激值在整个测定过程中是固定不变的。(所选定的刺激的最大强度要大到它被感觉的概率达到 95%左右，刺激的最小强度要小到它被感觉的概率只在 5%左右)

(2) 选定的每种刺激要向被试呈现多次，一般每种刺激呈现 50 到 200 次，且每个刺激呈现的次数应相等。

(3) 刺激呈现的次序事先经随机安排，不让被试知道。用以测量绝对阈限时，则无需标准值；如用以确定差别阈限或等值时，则需包括一个标准值。

(4) 此法在统计结果时必须求出各个刺激变量引起某种反应（有、无或大、小）的次数。

### 1. 绝对阈限的计算

只有两类回答：+，-，阈限为 50%次刚好有感觉的那个刺激。

现以两点阈的恒定刺激法实验数据来演绎绝对阈限的计算步骤。如表 5-2 所示，5 个等距的刺激 8、9、10、11、12 毫米，每个呈现 200 次，要求被试报告是“两点”还是“一点”。

表 5-2 用恒定刺激法测定两点阈的实验记录

刺激（毫米）	8	9	10	11	12
报告“两点”的次数	2	10	58	132	186
报告“两点”的百分数	1%	5%	29%	66%	93%

（采自 Woodworth 和 Schlosberg, 1954）

通常使用直线内插法来求绝对阈限。直线内插法（linear interpolation）是将刺激作为横坐标，以正确判断的百分数作为纵坐标，画出曲线。然后再从纵轴的 50%处画出与横轴平行的直线，与曲线相交于点 a，从点 a 向横轴画垂线，垂线与横轴相交处就是两点阈，其值等于 10.57 毫米（见图 5-1）。

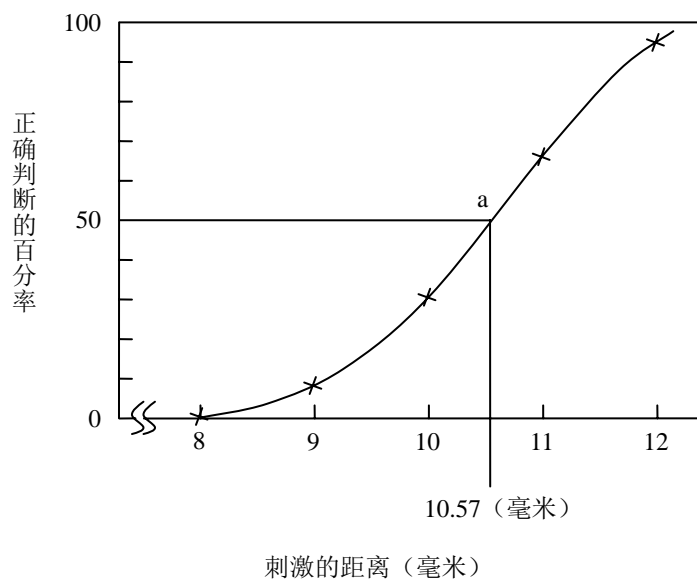


图 5-1 直线内插法求两点阈

(采自 Woodworth 和 Schlosberg, 1954)

## 2. 差别阈限的计算

现以重量辨别为例来演绎差别阈限的计算步骤。表 5-3 列出了重量辨别恒定刺激法实验数据。以 200 克为标准刺激，以从 185 到 215 克间隔为 5 克的 7 个重量作为比较刺激，要求被试做“重”、“相等”、“轻”三类反应。

表 5-3 用恒定刺激法测定重量差别阈限的结果

比较刺激 (克)	比较的结果 (次数的%)			
	① “+”	② “=”	③ “-”	④ “+” + “=”
185	5	4	91	9
190	12	18	70	30
195	15	25	60	40
200	30	42	28	72
205	55	35	10	90
210	70	18	12	88
215	85	9	6	94

(采自赫葆源、张厚粲和陈舒永, 1983)

同样，也使用直线内插法求解差别阈限值。根据表 5-3 中的①、②、③三个纵列的数据画出三条曲线，用直线内插法求得 50% 的次数被判断比标准刺激重的重量为 204.5 克和

50%的次数被判断比标准刺激轻的重量为 196.6 克（见图 5-2），这两个数值分别为上限和下限（即  $L_u=204.5$  克， $L_l=196.6$  克）。根据上限和下限，就可计算如下：

$$\text{上差别阈：} DL_u=204.5-200=4.5 \text{ 克}$$

$$\text{下差别阈：} DL_l=200-196.6=3.4 \text{ 克}$$

$$\text{差别阈限：} DL=(DL_u+DL_l)/2=(4.5+3.4)/2=3.95$$

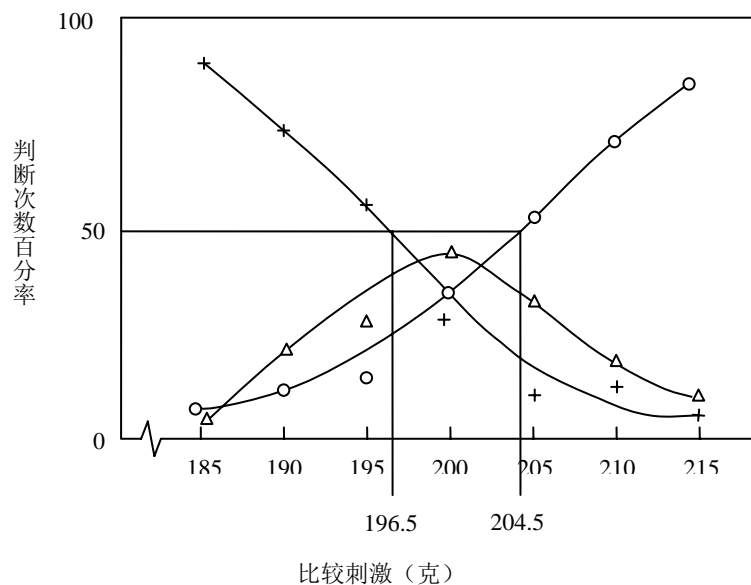


图 5-2 用直线内插法求解差别阈限值

（采自赫葆源、张厚粲和陈舒永，1983）

不过，上述实验中，被试的反应为三类反应，当只要求被试进行两类反应时，上述计算方法则会遇到问题：“大于”标准刺激和“小于”标准刺激的两条直线将相交于 50%处，上限和下限值相等。此时，则要选取 75%处，即与标准刺激完全能辨别（100%处）和与标准刺激不能辨别（50%）的中点作直线内插，求得上限和下限。这种差别阈限和前面提到的操作定义不相符合，因此常将这种阈限称为 75%差别阈限。

总结起来恒定刺激法测差别阈限主要有以下两类：

(1) 两类回答时 (+, -) 相等地带的上限 ( $L_u$ ): 75%次 > 标准刺激

相等地带的下限 ( $L_l$ ): 25%次 > 标准刺激

差别阈限 ( $DL$ ) =  $(L_u - L_l) / 2$  ——75%的差别阈限

主观相等点: 50%次 > 标准刺激

(2) 三类回答时 (+, =, -) (态度会影响相等地带的大小, 故一般不采用)

相等地带的上限 ( $L_u$ ): 50%次 > 标准刺激

相等地带的下限 ( $L_l$ ): 50%次 < 标准刺激

$$\text{差别阈限 (DL)} = (L_u - L_l) / 2$$

### 3. 误差控制

在用恒定刺激法来测量差别阈限时, 标准刺激和比较刺激是继时呈现的, 这就可能产生时间误差。解决办法: 标准刺激在前在后各半。

#### (三) 平均差误法

平均差误法 (或均误法) (method of average error) 又称调整法 (method of adjustment)、再造法 (method of reproduction)、均等法 (method of equation), 是最古老且基本的心理物理学方法之一。

##### 1. 实验程序

典型实验程序是实验者规定以某一刺激为标准刺激, 然后要求被试调节另一个比较刺激, 使后者在感觉上与标准刺激相等。(比较刺激也可以由实验者调节, 由被试判断) 如用平均差误法求绝对阈限, 则此时的标准刺激假设为零。例如对于 1000Hz 纯音的听觉绝对阈限的测量是这样的: 每次试验都出现某个响度的 1000Hz 纯音刺激, 被试要将之调节到刚好听不到; 而主试则记录每次调节的结果。

##### 2. 阈限计算

平均差误法的绝对阈限就是被试每次调节结果的算术平均数。而差别阈限计算略微复杂一些, 客观上一般不可能使比较刺激与标准刺激完全一样, 于是每一次比较就都会得到一个误差, 把多次比较的误差平均起来就可得到平均误差 (average error, 用符号 AE 表示)。因为平均误差与差别阈限成正比, 所以可以用平均误差来表示差别感受性。平均差误有两种计算方法:

(1) 把每次的调整结果 ( $X$ ) 与主观相等点 (用  $M$  或  $PSE$  表示) 的差的绝对值加以平均, 作为差别阈限的估计, 这个差别阈限的估计值用符号  $AE_m$  表示:

$$AE_m = \sum |X - PSE| / N$$

(2) 把每次调整结果 ( $X$ ) 与标准刺激 ( $S_t$ ) 的差的绝对值加以平均作为差别阈限的估计, 用符号  $AE_{st}$  表示:

$$AE_{st} = \sum |X - S_t| / N$$

还可用标准差、四分位差表示差别阈限。多次调节结果的标准差表示差别阈限:



标准差小——数据集中，表明被试对于相距很近的两个刺激感觉是相等的，则被试辨别力强

标准差大——数据分散，表明被试对于相距甚远的两个刺激感觉是相等的，则被试辨别力差

注：标准差——表示一组数据的离散程度！

### 3. 误差控制

在平均差误差法实验中，一般要由被试自己操纵实验仪器来调整比较刺激，使其与标准刺激相等。这就要产生动作误差，亦即因被试所采用的方式不同而产生误差。若标准刺激和比较刺激是相继呈现的，又易产生时间误差。

解决方法：动作误差：从左从右调整各半，由大由小调整各半；时间误差：标准刺激在前在后各半。

#### （四）三种古典心理物理学方法的比较

最小变化法的实验程序和计算过程都具体地说明了感觉阈限的含义，但它会因其渐增和渐减的刺激系列而产生习惯误差与期望误差、练习误差与疲劳误差。

恒定刺激法的实验结果可以应用各种数学方法加以处理，因而便于与其它测定感受性的方法进行比较。在应用三类反应的实验程序时，被试的态度会对差别阈限值有较大影响。

平均差误差法的特点是求等值，它的实验程序容易引起被试的兴趣，但对不能连续变化的刺激则不能用平均差误差法来测其差别阈限。

## 二、阈上感觉的测量

阈上感觉的量化是由心理物理量表（Psychophysical scaling）来完成的。从心理量表是否等距和有无绝对零点来分，可以将心理量表分为顺序量表、等距量表和比例量表。

### （一）顺序量表的建立

顺序量表（ordinal scale）既不等距，也无绝对零点，它只要求将事物按某一标准排出一个次序。建立顺序量表的主要方法有等级排列法和配对比较法。

#### 1. 等级排列法（rank-order method）

它是一种制作顺序量表的直接方法。

（1）基本方法：把许多刺激同时呈现，让许多被试者按照一定标准，把这些刺激排成一个顺序，然后把许多人对同一刺激评定的等级加以平均。这样，就能求出每一刺激的各自平均等级，最后，把各刺激按平均等级排出的顺序就是一列顺序量表。

（2）例子：书上 p240-242 上我们可以清楚的看到等级排列法制作顺序量表的具体过程。

(3) 注意事项: (1) 由于最终的顺序排列取决于所有被试的平均等级, 因而要求被试的抽样具有代表性。如被试的性别、年龄、文化程度等都可能影响最终的评定结果。(2) 由于每一个被试只进行一次排序, 所以此法对被试的利用率不高, 且难以排除被试在唯一一次排序中的各种随机误差。

## 2. 对偶比较法 (method of paired comparison)

(1) 基本方法: 把所有要比较的刺激配成对, 然后一对一对地呈现, 让被试者依据刺激的某一特性进行比较, 并做出判断: 这种特性在两个刺激中的哪一个上表现得更为突出。配对数目 =  $n(n-1) / 2$  ( $n$  为待比较的样本数目)。

(2) 可能出现的误差及控制:

如果各对样品同时呈现, 要消除空间误差。——若第一轮以 AB 形式呈现, 则第二轮以 BA 形式呈现。即左右颠倒;

如果各对样品继时呈现, 要消除时间误差。——若第一轮以先 A 后 B 次序相继呈现, 则第二轮以先 B 后 A 次序相继呈现。因此, 在对偶比较法中需要进行两轮比较。如果有  $n$  个样品需要比较, 可以配成  $n(n-1)/2$  对, 而在实际比较时则需进行  $n(n-1)$  次比较, 每个刺激比较的总次数为  $2(n-1)$ 。

(3) 注意点:

第一, 用这种方法得到的顺序量表, 仅是针对一个被试的心理物理量表, 尚不能直接推广到更大的人群。

第二, 这一量表模型要求对偶比较是可传递的 (transitive)。

## (二) 等距量表的建立

等距量表不仅要求体现事物属性的大小顺序关系, 还要有一个固定的测量单位。直接建立等距量表的方法有感觉等距法和差别阈限法两种:

### 1. 感觉等距法 (equal sense distance method)

感觉等距法是通过将一个感觉分成主观上相等距离来制作, 是制作等距量表最直接的方法。它要求被试将某种感觉上的一段心理量分成两个或两个以上的等分。最简单的是二分法。

(1) 同时的 (simultaneous) 解决方案: 可用平均误差法同时分出几个等分来, 例如史蒂文斯和沃尔克曼 (Stevens 和 Volkman, 1944) 的实验。

(2) 渐进的 (progressive) 解决方案: 一次只要求被试选择一个刺激来等分一个感觉距离。然后在两个更小的感觉距离上进行等分。例如  $r_1$  和  $r_2$  是两个不同响度的声音, 且  $r_1 > r_2$ 。

被试的任务是：1. 找出  $r_3$ ，使其响度正好在  $r_1$  和  $r_5$  之间。2. 再找出  $r_4$ ，使其响度正好在  $r_3$  和  $r_5$  之间。3. 再找出  $r_2$ ，使其响度正好在  $r_1$  和  $r_3$  之间。这样利用三次二分法把  $r_1$  和  $r_5$  之间在响度上分成四分。这样就得到了按等距变化的一系列刺激。把一系列的刺激作为横坐标，把响度单位作为纵坐标画出一条曲线，这就是响度的等距量表。同时解决方案和渐进解决方案的图解见图 5-3。

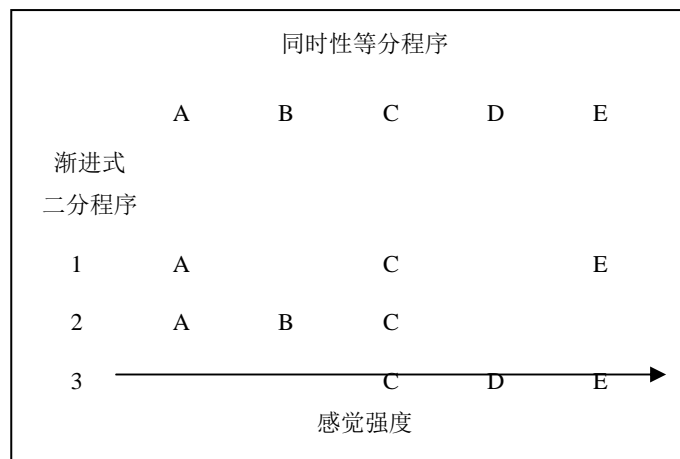


图 5-3 用同时或渐进方法制作等距量表

(采自 Gescheider, 1997)

## 2. 差别阈限法 (differential threshold method)

是制作等距量表的一种间接方法，通过在不同强度的基础上测量差别阈限来实现。即用任何一种传统心理物理法测出感觉的绝对阈限，并以此为量表的起点；然后以绝对阈限为标准刺激，确定第一个差别阈限；再以绝对阈限加上第一个差别阈限的刺激强度为基准，再测量第二个差别阈限……。这样测得许多最小可觉差以后，以刺激强度为横坐标，以绝对阈限上的最小可觉差数为纵坐标，画出的心理物理关系图就是等距量表。

### (三) 比例量表的建立

比例量表 (ratio scale) 既有真正的零点，也有等距单位，可以进行加、减、乘、除四则运算。制作方法有分段法和数量的估计法。

#### 1. 分段法 (fraction method)

又称感觉比例法，是通过把一个感觉量加倍或减半或取任何其他比例来建立心理量表的，是制作感觉比例量表的一种最直接的方法。

具体作法：呈现一个固定的阈上刺激作为标准，让被试者调整比较刺激，使它所引起的感觉为标准刺激的一定比例，例如，2 倍、1/2 倍等。每个实验只选定一种比例进行比较，

同一个标准刺激比较若干次后，再换另一个标准刺激进行比较。

## 2. 数量估计法 (method of magnitude estimation)

也是制作比例量表的一种直接方法。具体步骤是主试者先呈现一个标准刺激，并赋予一个主观值，如 10，然后让被试者以这个主观值为标准，将其他比较刺激的主观强度用数据表示。然后计算出每组被试者对每个比较刺激量估计的几何平均数或中数，再以刺激值为横坐标，感觉值为纵坐标，即可制成感觉比例量表。贝克和杜德克 (Baker 和 Dudek, 1957) 的实验可进一步说明数量估计法。

## 第二节 心理物理函数

心理物理函数是描述对刺激的心理感受和刺激的物理属性之间关系的函数。

### 一、韦伯定律

#### (一) 韦伯分数和韦伯定律

1834 年，德国生理学家韦伯 (Weber, E. H.) 通过研究人对重量的感觉发现：刺激的差别阈限是刺激本身强度的一个线性函数。

1. 韦伯分数 (Weber's fraction): 对于任何同一类的刺激，产生一个最小可觉差 (jnd) 所需增加的刺激量，总是等于当前刺激量与一个固定分数的乘积，这个固定分数被称作韦伯分数。

2. 韦伯定律 (Weber's law): 刺激强度水平与其差别阈限的大小之间存在固定的数学关系： $\Delta \Phi / \Phi = C$  其中  $\Delta \Phi$  和  $\Phi$  分别代表差别阈限的大小和刺激的强度水平， $C$  代表韦伯分数。

韦伯定律的一个重要作用在于，它使得比较不同感觉道及不同条件下的感受性成为可能，但它只适用于刺激的中等强度。

#### (二) 韦伯定律的修正

1. 数学形式： $\Delta \Phi / (\Phi + a) = C$  或者  $\Delta \Phi = C(\Phi + a)$  ( $a$  通常是一个数值很小的常数)。实验研究表明：只要  $a$  的取值合适，韦伯定律的这一修正公式对实验数据往往拟合得十分良好，在所有刺激强度水平上都能对实验结果做出预测。图 5-4 反映的是一个假想实验：当以  $\Delta \Phi / \Phi$  为因变量时，最低刺激强度下的因变量值偏大；而将因变量换成  $\Delta \Phi / (\Phi + a)$  后，这一现象消失。

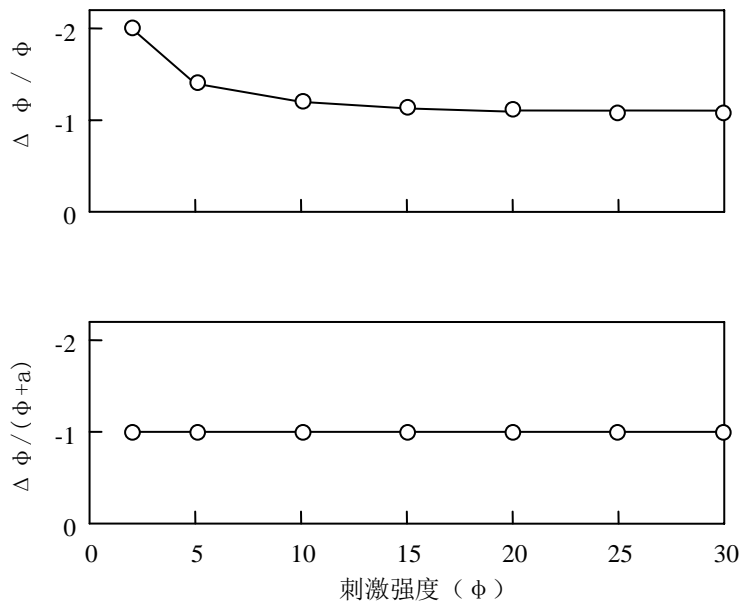


图 5-4 当  $\Delta \Phi / \Phi$  分别作为  $\Phi$  和  $\Delta \Phi / (\Phi + a)$  的函数时，所产生的假想结果

(采自 Gescheider, 1997)

2. 参数  $a$  的具体意义：可能的一种解释是：参数  $a$  代表了当刺激强度  $\Phi$  为零时，感觉系统的背景噪音强度。由于感觉噪音是在任何时候都和外界刺激同时存在的噪音背景，因此真正决定差别阈限  $\Delta \Phi$  的并不是单纯的刺激强度水平  $\Phi$ ，而是  $\Phi$  与同时存在的感觉噪音强度  $a$  的和： $\Phi + a$ ——这就是韦伯定律修正公式的内在涵义。

## 二、费希纳定律 (Fechner's law)

也称为对数定律，它预测心理量和物理量之间呈对数关系，心理量的增长慢于物理量的增长。

### (一) 费希纳定律的推导

按照韦伯定律预测，设绝对阈限的值为  $a$ ，对应心理量表的零点，韦伯分数  $\Delta \Phi / \Phi = C$ ；那么：心理量表的 1 就对应了  $a(1+C)$ ，心理量表的 2 就对应了  $a(1+C)^2$ ，……，心理量表的  $n$  就对应了  $a(1+C)^n$ 。这就意味着心理量值恰好就是物理量值除以  $a$  之后，并取以  $(1+C)$  为底的对数： $\psi = \log_{(1+C)}(\Phi/a)$ 。经过对数换底公式的变化，可以得到更简洁的形式： $\psi = K \lg \Phi$  其中  $\psi$  是心理感觉的量值， $\Phi$  是物理刺激高出绝对阈限以上的单位数量， $K$  是固定的系数。这就是费希纳定律，即感觉强度的变化和刺激强度的对数变化成正比。将表 5-10 的数据按照“心理量—物理量对数”关系作图，可以看出费希纳定律所描述的感觉强度和物理刺激对数之间的线性关系，见图 5-5。

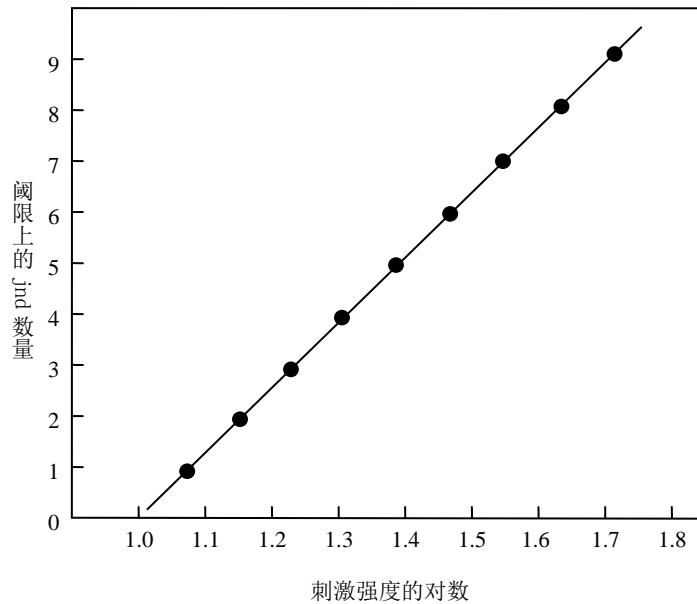


图 5-5 阈限上的 jnd 数量在刺激强度的对数坐标上的图像

(采自 Gescheider, 1997)

## (二) 费希纳定律的改进

艾克玛 (Ekman, 1956, 1959) 提出最小可觉差的主观大小, 不是像费希纳假设的那样是一个常数, 它随感觉量成比例增长。据此提出了著名的艾克玛定律, 用公式可以表示为:  $\Delta \psi = b \psi$  ( $\Delta \psi$  是在感觉量  $\psi$  水平的最小可觉差的主观大小). 假定感觉量  $\psi$  随刺激强度  $\Phi$  的增长而增长, 艾克玛定律意味着最小可觉差的主观大小增长。它以费希纳定律为基础, 却能够通过算术变换推出幂定律: 假设最小可觉差和感觉量是成比例的,  $\delta \psi / \psi = b$ , 整合的方程是:  $\delta \psi / b \psi = \delta \Phi / c \Phi$ ; 产生方程:  $\log \psi = (c/b) \log \Phi + \text{常数}$ , 这就是幂定律的对数形式了。艾克玛定律就还可能被更准确地描述为  $\Delta \psi = 0.03 \psi$

## (三) 费希纳定律的成立条件

1. 假定韦伯定律对所有类型和强度的刺激都是正确的;
2. 假定所有最小可觉差在心理上都是相等的。

## 三、史蒂文斯定律 (Stevens' law)

也被称为幂定律 (the power law), 认为心理量和物理量之间的共变关系是一个幂函数关系。

### (一) 对最小可觉差的重新理解

神经量子理论 (neural quantum theory) 假设反应刺激变化过程的神经结构在机能上被分为各个单元或量子。即被试者只有在此增量大到足以兴奋一个附加的神经量子单位时, 才能察觉到刺激增量。图 5-6 表明两种连续体: (1) 刺激连续体 (stimulus continuum) (任

意度标)。(2) 神经单元阶梯式的感觉连续体 (sensory continuum)。在刺激连续体上,  $S_t$  是标准刺激值; a、b、c 是肯定能够兴奋附加量子的刺激增量;  $\Delta \Phi$  只能部分兴奋神经量子所需要的刺激增量。

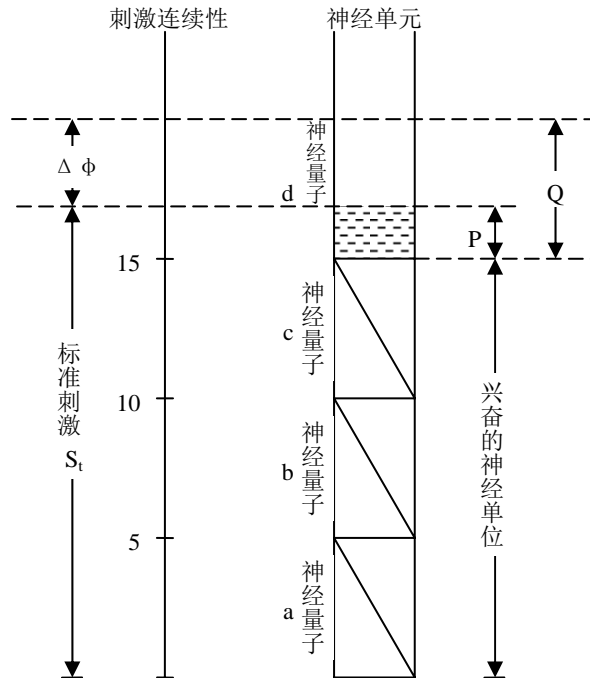


图 5-6 神经量子模型基本概念图示

(采自马谋超, 1978)

史蒂文斯指出, 如果满足下面四个条件, 便能够得到理想的梯形曲线:

- (1) 必须仔细地控制刺激, 避免噪音干扰。
- (2) 被试者在整个实验过程中必须保持恒定的判断标准, 最好由动机高度明确、训练有素的实验者充当被试者。
- (3) 如果神经量子的大小在实验期间改变了, 那么曲线将变为拱形。
- (4) 从标准刺激向比较刺激的转换必须迅速。

## (二) 幂定律的提出

$S = bI^a$  ( $S$  是感觉量;  $b$  是由量表单位决定的常数;  $a$  是感觉道和刺激强度决定的幂指数)

幂函数的指数值决定着按此公式所画曲线的形状。指数大于 1 时, 则为正加速曲线; 小于 1 时, 便为负加速曲线。

## (二) 幂定律的发展

修正的幂函数:  $S = b(I - I_0)^a$  这样, 幂定律便可适用于全部可知觉的刺激范围。史蒂文

斯还用等感觉匹配法 (equal-sensation functions obtained by matches) 证明了不同感觉通道的感觉量是可以匹配的。其原理是设有两个感觉道的主观值分别为:

$$S_1 = I_1^m \quad S_2 = I_2^n$$

如果主观值  $S_1$  和  $S_2$  相等, 则最后的相等感觉函数将有以下形式:

$$I_1^m = I_2^n \lg \quad I_1 = n/m \lg I_2$$

这样, 在双对数坐标中相等感觉函数将是直线, 而其斜率将由二个指数决定。

### 第三节 感觉的直接测量

#### 一、感觉的直接测量法

感觉的间接测量是指借助于某一中介变量或中介反应来测量感觉。比如恒定刺激法、最小变化法、调整法。而直接测量感觉就意味着对心理感受直接按其强度赋予数值, 而不必通过如最小可觉差的个数等中介变量或有无刺激出现等中介反应。主要有数量估计、数量生产和绝对数量估计。

##### (一) 数量估计

开始于理查德逊和罗丝 (Richardson 和 Ross, 1930) 的研究, 在数量估计中, 要求被试参照某个刺激所对应的数值, 直接用数字估计由其他强度刺激产生的感觉量值。

形式 (史蒂文斯): 一是给被试呈现一标准刺激, 并告诉他们这一刺激对应的感觉是某个确定值, 如 10。然后被试要根据标准刺激的数值, 给由其他刺激产生的感觉赋值。一般来说, 使用大约 10 到 20 个刺激且每个刺激以随机顺序呈现给被试 2 到 3 次。通过每个被试对每个刺激的反应来计算中数或几何平均数, 然后通过计算所有观察者的中数或几何平均数把数据结合在一起。二是没有标准刺激的初始赋值, 所有刺激都随机呈现给被试。他们要对第一个呈现的刺激随意指定一个数值来代表它所产生的感觉量, 并据此对接下来的所有刺激一一赋值。

##### (二) 数量生产 (Magnitude Production)

是数量估计法的反向程序, 也是直接测量感觉的一种方法。给被试一个用数字表示的感觉量值, 要求他们调整刺激产生相应的感觉量。数量生产法配合对同一感觉的数量估计法测量, 可以作为抵消任一种方法固有系统误差 (指回归效应: 被试避免作出极端反应、尽量向中间反应值靠拢的倾向) 的方式 (Stevens, 1958)。

#### 二、直接数量估计法的应用

##### (一) 情绪研究中的应用

##### (二) 社会舆论的测定



## 第四节 信号检测论

### 一、信号检测论引入的原由

- (一) 信号检测论本身的发展
- (二) 心理学的发展需要有新兴理论的加入

### 二、信号检测论的基本思想

#### (一) 信号和噪音

信号 (signal) 和噪音 (noise) 是信号检测论中**最基本**的两个概念。信号可以理解为刺激 (stimuli); 噪音就是信号所伴随的背景, 对信号检测起干扰作用的所有背景都是噪音。

主试呈现的刺激, 有时只呈现“噪音”刺激 (以 N 表示); 有时信号刺激和噪音刺激同时呈现 (以 SN 表示), 让被试对信号刺激做出反应: (1) 仅仅是噪音背景; (2) 在噪音背景上叠加了信号。

信号伴随噪音, 和单独出现噪音这两种情况下, 分别可以在心理感受量值上形成两个分布 (distribution): 信号加噪音 (SN) 分布 (信号分布) 和噪音 (N) 分布, 如图 5-9 所示:

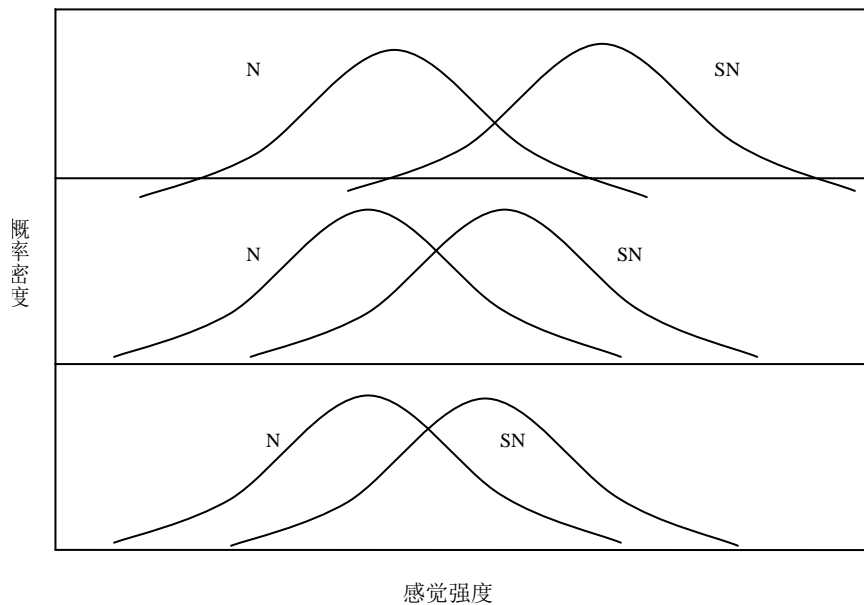


图 5-9 三种不同信号强度下, 噪音和信号+噪音的理论分布 (摘自 Gescheide, 1997)

信号分布和噪音分布间的距离也可以作为心理物理学实验中对被试感受性的衡量指标, 这被称为辨别力指标 ( $d'$ )。

#### (二) 决策标准

将上述信号和噪音两个感觉分布视为无数次感觉过程累计, 这样观察者的每一次感觉过

程都会产生一定的感觉量值  $x$ 。这个  $x$  必定落在噪音分布和信号分布所覆盖的范围内。问题集中在信号分布和噪音分布重叠的中间感受区域上：这一区间的  $x$  值即可能对应信号，也可能对应于噪音（见图 5-10）。

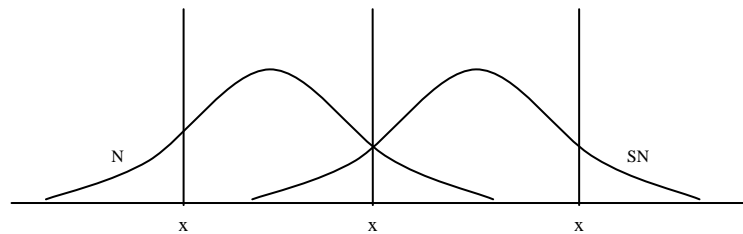


图 5-10 感觉量值的位置

对于此区间内任意一个  $x$ ，它来自信号分布或噪音分布的可能性，可以用其在两个分布中对应的纵线高度（ $0$ ）来衡量。 $x$  对应的两个分布上的纵线高度之比被称作似然比（likelihood ratio），它被记为  $l(x)$ ： $L(X) = 0(SN)/0(N)$

图 5-11 反应了在一个固定的信号分布和噪音分布下，似然比  $l(x)$  是如何随着  $x$  值的变化而变化的。

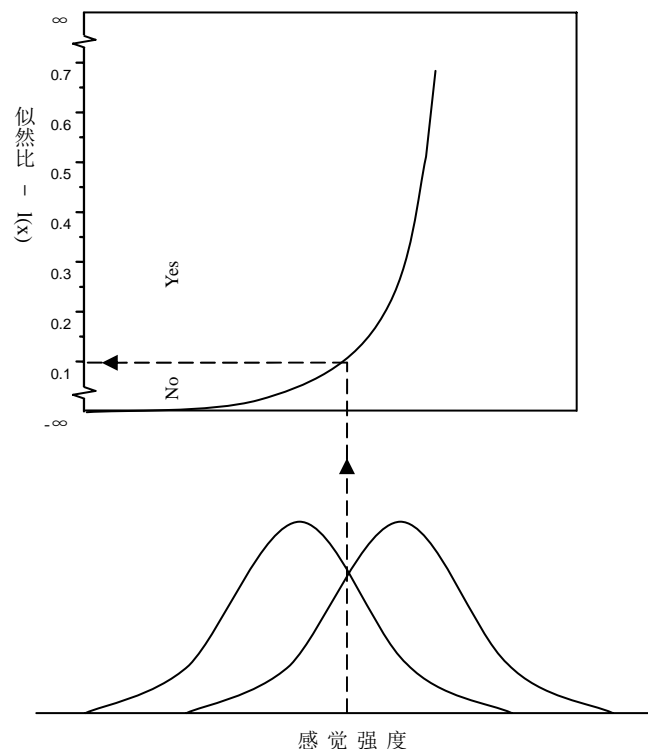


图 5-11 似然比在感觉强度上的函数

（采自 Gescheide, 1997）

信号检测论假设，观察者选择某一个似然比的值作为产生“信号”、“噪音”两种判断反应的分界点，或称**决策标准**（ $\beta$ ）。观察者的决策规则（decision rule）就是比较当前观察

得到的  $x$  所对应的似然比  $l(x)$ ，与观察者自定的决策标准  $\beta$  的大小。如果  $l(x)$  大于等于  $\beta$ ，观察者就选择进行“信号”反应；如果  $l(x)$  小于  $\beta$ ，观察者就选择进行“噪音”反应。

影响因素：(1) 信号出现的先定概率；(2) 利益得失的权衡：信号检测的四种反应（击中、虚报、漏报和正确拒斥）所对应的利益得失排列在一张表上，就构成所谓的“支付矩阵”（Payoff Matrix）。信号检测论可以给出在给定信号强度和敏感性水平下能得到的最大收益的  $\beta$  值（ $\beta_{OPT}$ ）。 $\beta_{OPT}$  主要影响因素为信号概率（probability of signal）和支付矩阵。

其计算公式为：
$$\beta = \frac{P(N)}{P(S)} \times \frac{V(CR) + C(FA)}{V(H) + C(M)}$$
（ $P(N)$  和  $P(S)$  分别是噪音概率， $V$  代表

由正确反应得到的价值， $C$  代表错误反应得到的代价（负值）。当  $V(CR) + C(FA) = V(H) + C(M)$  时，最大收益将从最小错误而得到。此时  $\beta_{OPT}$  随信号概率  $P(S)$  的变化而变化（ $P(S) + P(N) = 1$ ），当  $P(S)$  上升时，放宽反应标准，即降低  $\beta$  是有利的反应策略；当  $P(S)$  降低时，严格的反应标准使提高  $\beta$  更有利。但当从正确反应中得到的收益与错误反应付出的代价不等时， $\beta_{OPT}$  将发生相应的变化。

总之，反应偏向（ $\beta$ ）不再是对被试感觉状态的绝对分界，而是被试主观决策反应的判断标准，是随  $SN$  和  $N$  两种先定概率和判定结果的奖惩办法而变动的。

### 三、信号检测论的两种独立指标

(1) 辨别力指标  $d'$ ，是观察者对刺激的感受性的度量；(2) 判断标准，是观察者反应偏向的度量，常用似然比标准  $\beta$  或报告标准  $C$  来进行衡量。

#### (一) 反应偏向

反应偏向可由二种方法计算：一种是似然比值，另一种是报告标准。

##### 1. 似然比 $\beta$

数学定义：区分“信号”与“噪音”反应的心理感受水平  $X_c$  所对应的信号分布纵轴与噪音分布纵轴之比。

将被试在实验中的反应划分为 4 种：击中、虚报、漏报和正确拒斥，表 5-5 对这四种反应的区分作了具体说明：

表 5-5 信号检测论实验中观察者的 4 种反应

刺 激	反 应	
	有信号	无信号
信号+噪音	击中 (Hit)	漏报 (Miss)

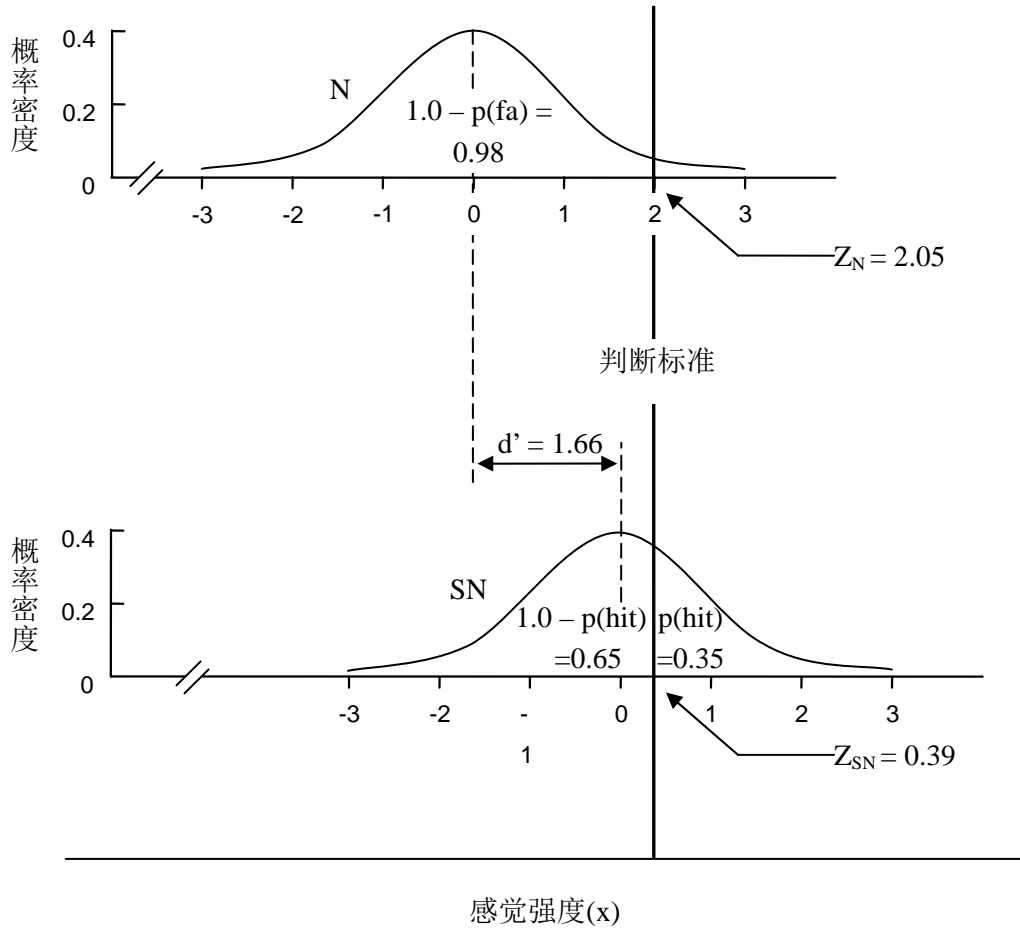


图 5-12 判断标准的变化

(采自 Gescheide, 1997)

如图 5-12 所示：当  $X_c$  右移， $\beta$  值上升， $P(\text{Hit})$  和  $P(\text{FA})$  均下降，表明检测者的反应标准变得严格；当  $X_c$  左移， $\beta$  值变低， $P(\text{Hit})$  和  $P(\text{FA})$  均上升，表明检测者的反应标准变得宽松。还可看到： $P(\text{Hit}) + P(\text{Miss}) = 1$       $P(\text{FA}) + P(\text{CR}) = 1$

那么，可以通过 4 种反应概率的 PZO 转换得到  $X_c$  分别对应于信号分布和噪音分布上的纵轴长度  $0(\text{SN})$  和  $0(\text{N})$ 。而以上两者的比值就是  $\beta$  值了。

## 2. 报告标准 C (report criterion)

信号检测论中用以表示反应偏向的另一个指标，又称判断标准。在数学上，反应标准

的另一种表示方法是感受经验强度，用符号  $C$  表示。 $C$  是横轴上的判定标准位置。在数学上，

$C$  的单位要转换成刺激强度单位，它的计算公式是：
$$C = \frac{(I_2 - I_1)}{d'} \times Z_1 + I_1$$

$I_2$ ：为高强度刺激     $I_1$ ：为低强度刺激     $Z_1$ ：为低强度刺激时的正确拒斥概率的  $Z$

## (二) 辨别力指标

敏感性可以表现为内部噪音分布  $f_N(X)$  与信号加噪音分布  $f_{SN}(X)$  之间的分离程度。两者的分离程度越大，敏感性越高；分离程度越小，敏感性越低。图 5-13 给出了反应偏向 ( $\beta$ ) 相同的情况下，两种敏感性情况。

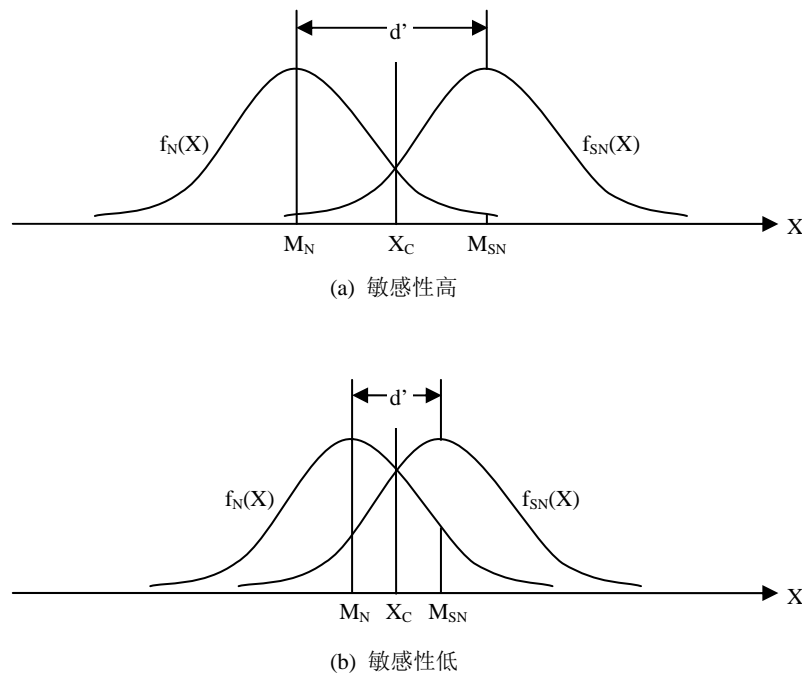


图 5-13 反应偏向 ( $\beta$ ) 相同时两种敏感性 ( $d'$ ) 的情况 (采自 Clark 和 Yang, 1974)

内部噪音分布  $f_N(X)$  与信号分布  $f_{SN}(X)$  的分离程度既受信号的物理性质影响，也受被试者 (测验者) 特性的影响。因此， $f_N(X)$  与  $f_{SN}(X)$  之间的距离就可作为敏感性的指标，称为辨别力  $d'$ ：

$$d' = \frac{(M_{SN} - M_N)}{\sigma_M}$$

即辨别力 ( $d'$ ) 等于两个分布的均数之差除之  $N$  分布的标准差。当  $N$  分布与  $SN$  分布

均为常态分布时，其变异数类同，则有：
$$d' = \frac{M_{SN}}{\sigma} - \frac{M_N}{\sigma} = Z_{SN} - Z_N = Z_{击中} - Z_{虚惊}$$

$d'$  越大，表示敏感性越高， $d'$  越小，表示敏感性越低。

四、接受者操作特性曲线 (receiver operating characteristic curve, 简称 ROC 曲线)

又称为感受性曲线 (sensitivity curve)。原因在于曲线上各点反映着相同的感受性，都是对同一信号刺激的反应，只不过是几种不同的判定标准下所得的结果而已。它以虚惊概率为横轴，击中概率为纵轴所组成的坐标图，和被试在特定刺激条件下由于采用不同的判断标准得出的不同结果画出的曲线。

### (一) ROC 曲线的绘制

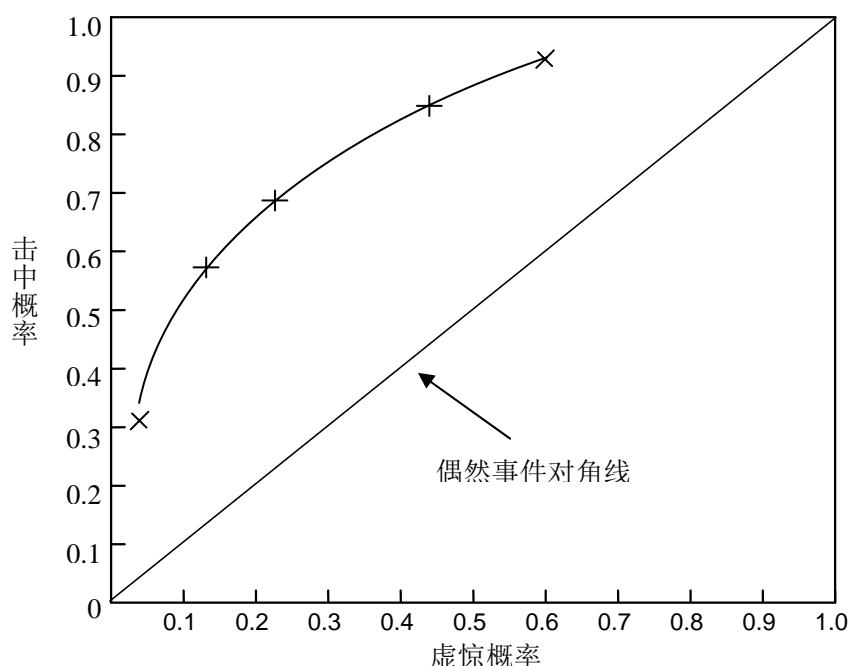


图 5-14 ROC 曲线 (采自杨治良, 1998)

从图 5-14 可见, ROC 曲线具有以下属性: (1)  $\beta$  值的改变独立于  $d'$  的变化, 考察  $\beta$  值变化对  $P(y/SN)$  和  $P(y/N)$  的影响时发现: 当  $\beta$  接近 0 时, 击中概率几乎为 0, 即信号全当成噪音接受; 当  $\beta$  接近无穷大时, 虚惊概率几乎为 0, 即噪音全当成信号接受; 而当  $\beta$  从接近 0 向无穷大渐变的过程中, 将形成一条完整地 ROC 曲线, 曲线在某一处达到最佳的标准  $\beta_{OPT}$ 。(2) ROC 曲线的曲率反应敏感性指标  $d'$ : 在图 5-14 中有一条对角线, 代表  $P(y/SN)=P(y/N)$ , 即被试者的辨别力  $d'$  为 0, ROC 曲线离这条线愈远, 表示被试者辨别力愈强,  $d'$  的值当然就愈大。此外, 若将 ROC 曲线的坐标轴变为 Z 分数坐标, 我们将看到 ROC 曲线从曲线形态变为直线形态。

### (二) 方差齐性假设的检验

ROC 曲线的坐标分别为击中率和虚惊率, 由于信号和噪音分布都符合正态, 因此若将坐标转换为 Z 分数, 那么 ROC 曲线将会是直线形态。这是因为随着决策标准的变化, 判定标准

C 在一个分布上的位移量，总是和另一个分布上的位移量成固定比例，而这个比例其实就反映了信号和噪音分布的标准差之比。然而，实验事实证明，这个假设通常都是不能成立的。更确切地说，信号分布往往呈现低阔峰分布形态，而噪音分布则呈现高峡峰分布形态。信号分布的方差大于噪音分布的方差，这使得 Z 分数坐标上的 ROC 曲线斜率通常小于 1。

### 思考题

1. 怎样理解感觉阈限与差别阈限的概念？
2. 测量感觉阈限与差别阈限的三种方法的实验程序是怎么样的？实验结果如何处理？
3. 什么叫做 75%的差别阈限？它有什么缺点？
4. 传统心理物理实验方法测量感受性时会产生哪些方面的误差？请分析可能影响获得可靠的因素及可采取的措施。
5. 对偶比较法与等级排列法的实验程序是怎样的？
6. 什么是 Weber 定律？什么叫 Fechner 定律？
7. 分析信号检测论的两个独立指标  $d'$  和  $\beta$ 。
8. 据下面击中和虚报的几对数据计算  $d'$  值：(0.90, 0.10), (0.90, 0.25), (0.90, 0.50), (0.90, 0.90)
9. 什么叫做等感受性曲线？

### 推荐阅读

1. 关于感觉阈限的测量和阈上感觉的测量以及信号检测论的论述：  
朱滢. 实验心理学：北京：北京大学出版社，2000. 7： p59-123
2. 关于费希纳定律和史蒂文斯定律的论述：  
坎特威茨等. 实验心理学：掌握心理学的研究. 郭秀艳等译. 上海：华东师范大学出版社, 2000: p208-211
3. 关于心理物理学详尽的介绍，包括基础理论与最新进展（可在我校图书馆获取）：  
Gescheider, George A. Psychophysics: the fundamentals. Mahwah, N. J. : L. Erlbaum Associates, 1997