

汉字部件与英文字母相容性的数学模型^{1)*}

——一种群体模板相容性的数学表达

庄建程 刘艳芳 张 侃

(中国科学院心理研究所, 北京, 100012)

摘 要 该文运用相容性研究中的维度重叠模型以及 Fork-Join网络模型, 得出群体模板的相容性定义与 S-R相容性的元素匹配之间的关系式, 详细讨论了汉字编码输入法研究中的学习遍数、反应时与汉字部件-英文字母相容性的关系, 理论模拟与实验结果所显示的趋势符合。

关键词 S-R相容性, 群体模板, 维度重叠模型, Fork-Join网络模型。

分类号: B842

1 引 言

S-R相容性自 1953 年 Fitts 的研究^[1]之后, 一直是心理学的一个重要概念和研究对象。S-R(刺激-反应)相容性指的是, 当一定的刺激和反应匹配会产生较好的结果时, 这样的 S-R匹配就具有了相容性。众多的实验研究了影响 S-R相容性的因素, 并有各种理论假设解释这些研究结果。其中, 1990 年 Simmon 提出的注意假设认为, 人有自动向刺激源方向作出反应的倾向, 当刺激位置与反应位置相匹配时, 反应时短; 当刺激位置与反应位置不一致时, 人必须先抑制不符合反应要求的这种倾向, 然后才作出正确反应, 因而反应时长; 此倾向不同于朝向反射, 指的是刺激源本身吸引了人的注意, 有诱发朝向刺激源自动反应的倾向^[2]。Wallace 1971 年提出的编码假设则认为, 当人接受一个刺激后将它编码为一列空间坐标, 并与反应的空间坐标相比较, 如果刺激和反应有相同的空间编码方式, 反应就快^[3]。1990 年 Umiltà 等人设计的实验支持了编码假设^[4], 并总结了解释空间相容性的以上两种假设。Verfallie 认为注意仍然是影响刺激的指向和反应的输出的一个因素^[5]。

1990 年和 1995 年 Kornblum 根据前人的研究成果提出一个维度重叠模型 (Dimension Overlap Model) 用于解释 S-R相容性的产生机制^[6], 并用行为实验检验了它^[7]。1995 年 Eimer 的 ERP 研究也支持这个理论^[8]。维度重叠理论认为在刺激编码完成后, 刺激表象 S_j 将自动激活大脑中与它相匹配的反应表象 R_j , 这是一个自动化的过程; 另一条通路并行地产生正确的反应编码 R_k ; 当 R_j 与 R_k 一致时, 即维度重合, 将自动执行 R_j , 不一致时, 将重新提取 R_k 执行, 此时要花费更多的资源和时间, 并增加了不相容反应的错误率(参见图

1) 本文初稿收到日期: 1997-03-07, 修改稿收到日期: 1997-11-25。

* 本工作获得国家自然科学基金和攀登计划的资助。

1)。Fitts、Kornblum 等人都认为,维度的重叠有两种水平,一种是集合水平(set-level),例如各种空间相容性中的匹配;另一种是元素水平(element-level),如群体模板(population stereotype,指一定人群中由于习惯风俗而产生的特定的反应模式与刺激模式之间的匹配)所产生的相容性正是单个刺激元素和反应元素之间的匹配,属于元素水平。

2 汉字编码输入法易学性的相容性实验研究

最近一个有关汉字编码输入法易学性的研究表明,群体模板产生的相容性直接影响以汉字特征元为刺激的输入操作的易学性。作者以抽样人群中选择某一特定汉字特征元与英文键盘键元对应关系的几率为相容性系数。举一例粗略地说明:假如有 50% 的人选择“K”作为汉字部件“口”的对应英文字母,则口-K 的对应关系的相容性系数为 0.5;另有 20% 的人选择“O”作为汉字部件“口”的对应英文字母,则口-O 的对应关系的相容性系数为 0.2,等等。作者问卷调查了动态组字频率最大的 140 个汉字部件和 26 个英文字母的匹配性,得到相容性系数 V_c ,其后实验室中的研究表明:汉字部件和英文字母的对应关系,随着它们之间的相容性系数的增加,所需学习遍数将减少,学习后的错误率降低,反应时缩短。这个实验得到的线性回归方程如下:

$$\begin{aligned} \text{Times} &= 6.60 - 11.95V_c \\ \text{Rt[s]} &= 1.133 - 0.429V_c \end{aligned} \quad (1)$$

其中,Times 为被试达到一定正确率(95%)的学习遍数,Rt 为学习后的反应时, V_c 为相容性系数^[9]。

深入思考此实验的结果会发现有两个问题需要回答:问题一,反映群体的 V_c (例如 50% 或 20%)如何能反映具体的 S(刺激)与 R(反应)元素匹配的程度(如汉字部件“口”与英文字母“K 或 O”形似或音似的程度)?问题二,反映群体选择几率的 V_c 如何与反映个体的学习遍数 Times、反应时 Rt 相联系的?

一个容易提出的解释是:某选择几率为 V_c (假如 50%)的刺激-反应(如口-K),有 V_c (50%)的人学习遍数为 T_1 ,其余人(剩下选择口-O 等其它刺激-反应对)的学习遍数为 T_2 , (显然 $T_1 < T_2$),则平均学习遍数为 $T = T_1V_c + T_2(1 - V_c) = T_2 - (T_2 - T_1)V_c = A - BV_c$, $A = T_2$, $B = T_2 - T_1$,显然 $A > B$,与实验结果的 $A < B$ 不一致,说明这种假设并不能解释实验得出的学习遍数关系式,具体的分析将在后面讨论中给出。

3 实验中相容性系数与元素匹配的关系

我们运用排队网络模型(Queueing Network Models,一类由输入任务分解的成分有先后次序地在串并联网络中进行加工的模型)中的 Fork-Join 网络^[10-12]来解释以上的实验结果。首先要解释的是群体模板中对某一 S-R 对应关系的选择几率(相容性系数)与元素匹配之间的关系。

Fork-Join 网络模型是这样的,假设刺激任务在网络入口处(Fork 点)被分解成总数为 N 的各成分(component,如汉字部件“口”的音、形、义等),分别由并行的 N 个节点来处理,每一个节点处理一个成分,等全部的 N 个成分处理完毕,再在网络出口处(Join 点)形成一个反应输出。在我们的模型中认为每一个结点处理对应刺激成分的过程应满足

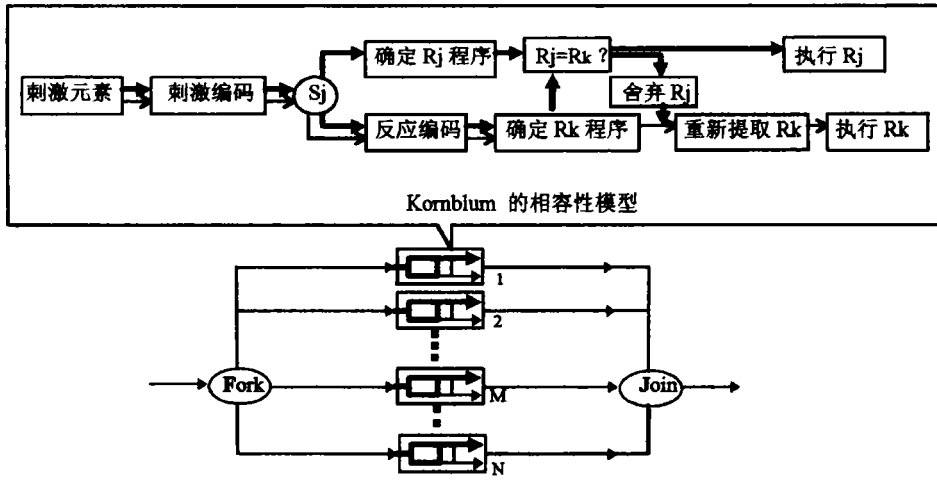


图1 本模型的Fork-Join网络图

Kornblum的维度重叠模型(参见图1)。

当在 M 个结点上, M 个成分是 S-R 相匹配时, 则可定义 $m = M / N$ 。这就是 S-R 的相容性程度。在这 M 个结点上的处理过程与其它 $N-M$ 个结点比较起来, 自动化程度较高, 则处理时间 t_M 远小于 t_{N-M} 。所以一个任务的反应时取决于不相容结点。在不发生匹配的 $N-M$ 个结点上, 处理时间 t_k 是有一定分布的(例如根据排队论网络模型, 累积分布可为 $1 - e^{-\eta t}$, 当 $t < T$ 时, η 为常量)。设在某个时刻 T , 在每个结点上其处理时间分布几率都为 p , (p 为常量, 首先为了数学模型的简单性; 其次, 相同时间分布的过程完全有可能是不同的处理过程; 再次, 如果 p 在不同结点上不同, 增加自由度, 只会增加模拟的容易程度; 下面 α 等系数为常量基本同理), 则此 $N-M$ 个结点, 在时刻 T 全部完成处理的可能性为 $p^{N-M} = (p^N)^{1-m} = P^{1-m}$ ($0 < p < 1, P = p^N$)。这也是全部反应在时刻 T 完成的几率。我们知道: 对同一刺激“口”, 在同样时刻, 如果完成反应“K”的几率大于完成“O”的, 则意味着在同样人数中, 在此时刻完成(或称为选择)反应“K”的人数将多于完成“O”的人数。因此可以假设: 被试选择不同反应(不同 M)的几率 V_c 与在选择时刻完成这个反应的几率 P^{1-m} 成线性正比例关系,

$$V_c = \alpha P^{1-m} - \delta, (\alpha, \delta > 0 \text{ 为常系数}), \tag{2}$$

δ 是阈值, 当对一刺激进行反应的几率 P^{1-m} 小于数值 δ / α 时, V_c 为 0, 以此避免零点发散。

则

$$m = 1 - \log_p \left(\frac{V_c + \delta}{\alpha} \right) \tag{3}$$

4 对学习遍数与相容性关系的解释

根据 Schneider 等人的研究, 学习过程在相容性任务中的作用主要是与学习过程和自动化过程的提高相联系的^[13-15]。在我们这个 Fork-Join 网络模型中, 不匹配的 $N-M$ 个成分, 也将变为可以发生匹配的成分对, 即完全非自动化的结点数比率 $1-m$ 随着学习过程减

少。可假设 $1-m$ 每次以 β 的速率减少, 则学习遍数

$$T = \frac{1-m}{\beta} = \log_p \left(\frac{V_c + \delta}{\alpha} \right) / \beta,$$

$$T \cong \frac{\ln \alpha - \ln \delta}{-\beta \ln P} - \frac{1}{-\beta \delta \ln P} \cdot V_c, \quad (4)$$

其中运用了公式 (3) 和 $\ln(1 + V_c / \delta) \approx V_c / \delta$ 的近似。这个近似在 $\delta \gg V_c$ 时是很好的近似。由实验得到的公式 (1) 中的 $\text{Times} = 6.60 - 11.95V_c$, 可计算出

$$\alpha = \delta \cdot 1.73^{1/\delta} \text{ 与 } P^\beta = 0.92, \quad (5)$$

与理论要求的 $1 > P > 0$, $\beta > 0$ 和 $\alpha > 0$ 一致。

另外由公式 (1) 中的 $\text{Times} \geq 1$, 可得 $0.47 \geq V_c \geq 0$ 时有关 Times 的公式成立。 $V_c = 0$ 时, $\ln(1 + V_c / \delta) = 0 = V_c / \delta$, 公式 (4) 采用的近似没有误差。而当 $V_c = 0.47$ 时, 如果 $\delta = 1$, $\ln(1 + V_c / \delta) = 0.39$, $V_c / \delta = 0.47$, 误差率为 $(0.47 - 0.39) / 0.39 = 20.5\%$; 如果 $\delta = 2$, $\ln(1 + V_c / \delta) = 0.21$, $V_c / \delta = 0.23$, 误差率为 $(0.23 - 0.21) / 0.21 = 9.5\%$; 选择更大的 δ , 误差率会更小, 而且公式 (2) 等在 V_c 允许范围内也能成立。(这是假设最后的正确率均达 100%, 因要求的正确率 95% 约等于 100%; 更精确的计算结果为 $T = \frac{0.95 - m}{\beta} = \frac{\ln \alpha - \ln \delta + 0.05 \ln P}{-\beta \ln P} - \frac{1}{-\beta \delta \ln P} \cdot V_c$, 没有质的区别。) 这样可以

说, 至少当可调参数 $\delta = 2$ 时, 公式 (4) 的误差率在 0 到 9.5% 之间。

定性地说, 本模型认为当 S-R 相容性高时, 需要学习的非自动化过程的结点数就少, 学习就越快, 学习遍数就越少。

5 对反应时与相容性关系的解释

假设在不发生匹配的 $N-M$ 个结点上的处理时间为以 p 为几率密度的平均分布, 则总的处理时间应反比于在每一时刻处理完毕的几率分布, 即 $t_1 = \frac{\lambda}{p^{N-M}} = \frac{\alpha \lambda}{V_c + \delta}$ (λ 为常数), 推导中运用了公式 (2)。加上网络其它部分的系统时间 t_2 , $t = t_2 + \frac{\alpha \lambda}{V_c + \delta}$ 。运用近似 $\frac{1}{1 + V_c / \delta} \approx 1 - V_c / \delta$, 得到

$$t \cong t_2 + \frac{\alpha \lambda}{\delta} - \frac{\alpha \lambda}{\delta^2} \cdot V_c, \quad (6)$$

当 $\alpha \lambda = 0.429 \delta^2$ 和 $t_2 = 1.133 - 0.429 \delta$ (s) 时, 则与实验结果公式 [1] 中的 $Rt[s] = 1.133 - 0.429V_c$ 相符。根据公式 (5) 中的 $\alpha = \delta \cdot 1.73^{1/\delta}$, 可进一步得到

$$\lambda = 0.429 \delta \cdot 1.73^{-1/\delta} \text{ 及 } t_2 = 1.133 - 0.429 \delta \text{ (s)}. \quad (7)$$

由公式 (7) 中的 $t_2 = 1.133 - 0.429 \delta$ (s) > 0 , 可以看出 $0 < \delta < 2.64$ 。考察公式 (6) 中

运用的近似,当 $V_c = 0$ 时, $\frac{1}{1 + V_c / \delta} = 1 = 1 - V_c / \delta$, 没有误差。而当 $V_c = 0.445$, 即实验中高相容组的相容性系数时^[9], 如果 $\delta = 1$, $\frac{1}{1 + V_c / \delta} = 0.692$, $1 - V_c / \delta = 0.555$, 误差率为 $(0.692 - 0.555) / 0.692 = 19.8\%$; 如果 $\delta = 2$, $\frac{1}{1 + V_c / \delta} = 0.818$, $1 - V_c / \delta = 0.777$, 误差率为 $(0.818 - 0.777) / 0.818 = 5\%$; 同样, 当 δ 参数在 $0 < \delta < 2.64$ 范围内被定为更大值时, 公式 (6) 的误差率会更小。由此看出, 当确定 $\delta = 2$ 时, 公式 (6) 的误差率在 0 到 5% 之间。

简而言之, 我们的模型认为当 S-R 相容性高时, 形成反应的非自动化过程的结点数就少, 相反地, 参与的自动化过程的结点数就多, 反应时就越短。

6 讨 论

由本模型预言: 对人群中所有人, 不管他们在同样刺激前选择了怎样的反应(如口-K或口-O), 高相容性的刺激-反应对(口-K)都会有较少的学习遍数、较短的反应时。这是与实验中观察到的结果完全一致的, 而与前面第二节末尾提出的假设与解释: 百分比为 V_c (如 50%) 内的人与另外 $(100\% - V_c)$ 的人会有不同的学习遍数、反应时, 是不符合的。

这个数学模型在以下问题上有待进一步发展: 首先, 可以引入非线性递增的学习规则, 详细计算学习遍数; 其次, 可运用随机过程中的排队网络结点处理时间的几率函数, 进行更精确的计算; 第三, 在其它有关 S-R 相容性实验中运用本模型进行研究。在非群体模板的相容性研究时, 可直观地运用维度匹配的系数 m , 而非 V_c 。这样可以验证(诸如学习在 S-R 相容性问题中的作用等)更精细的实验研究结果。

7 结 论

本文运用维度重叠模型和 Fork-Join 模型发展出来的数学模型, 解释了汉字输入过程易学性与汉字部件-英文字母相容性的关系, 揭示了宏观选择的相容性系数 V_c 与个体的刺激-反应匹配系数 m 之间的关系, 其模型和思想可以推广到其它群体模板相容性的研究。

参 考 文 献

- 1 Fitts P M, Seeger C M. S-R compatibility: spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 1953, 46:193—210
- 2 Simmon, J R. The effects of an unrelated directional cue on human information processing. In: Proctor R W, Reeve T G. eds. *Stimulus-Response Compatibility—An integrated perspective*, Amsterdam: North-Holland, 1990, 33—86
- 3 Wallace, R J. S-R compatibility and the idea of a response code. *Journal of Experimental psychology*, 1971, 88:354—360
- 4 Umilta C, Nicoletti R. Spatial S-R compatibility. In: Proctor R W, Reeve T G. eds. *Stimulus-Response*

- Compatibility—An integrated perspective, Amsterdam: North-Holland, 1990: 89—116
- 5 Verfaellie M, Bowers D, Heliman K M. Attention factors in the occurrence of stimulus-response compatibility effects. *Neuropsychologia*, 1988, 26:435—444
 - 6 Kornblum S, Hasbroucq T, Osman A. Dimensional overlap: Cognitive basis for stimulus-response compatibility—A model and taxonomy. *Psychological Review*, 1990, 97: 253—270
 - 7 Kornblum S, Lee J-W. Stimulus-Response Compatibility with relevant and irrelevant stimulus dimensions that do and do not overlap with the response. *Journal of Experimental Psychology*, 1995, 4:855—875
 - 8 Eimer M. Stimulus-Response Compatibility and Automatic Response Activation: Evidence From Psychophysiological Studies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1995, 4:837—854
 - 9 刘艳芳,张侃. S-R相容性的度量 and 运用. *心理学报*, 1996, 29: 91—97
 - 10 Liu Y. Queueing Network Modeling of Elementary Mental Processes. *Psychological Review*, 1996, 103:116—136.
 - 11 Baccelli F, Makowski E. Synchronization in queueing systems. In: Takagi H. ed. *Stochastic analysis of computer and communication systems*, Amsterdam: North-Holland, 1990: 401—450
 - 12 Nelson R, Tantawi A N. Approximate analysis of fork / join synchronization in parallel queues. *IEEE Transactions on Computers*, 1988, 37:739—743
 - 13 Schneider W, Dumais S T, Shiffrin R M. Automatic and control processing and attention. In: Parasuraman R, Davies D R. eds. *Varieties of attention*, Orlando, FL: Academic Press, 1984: 1—27
 - 14 Schneider W, Fisk D. Automatic category search and its transfer. *Journal of Experimental psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 1984, 10:1—15
 - 15 Shiffrin R, Schneider W. Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychological Review*, 1977, 84:127—190

A MATHEMATICAL MODEL OF COMPATIBILITY BETWEEN CHINESE PARTS AND ENGLISH LETTERS —A MATHEMATICAL DESCRIPTION OF POPULATION STEREOTYPE COMPATIBILITY

Zhuang Jiancheng Liu Yanfang Zhang Kan

(Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

The dimension overlap model and the Fork-Join network model were applied in this compatibility study, and the mathematical relation between population stereotype compatibility and S-R compatibility was derived. The learning times and the reaction time in the Chinese code inputting were connected with the compatibility between Chinese parts and English letters. The theoretical simulation fits with the experimental results.

Key words S-R compatibility, population stereotype compatibility, dimension overlap model, Fork-Join network model.