

认知加工速度研究中常用的实验和统计方法

罗 婷 焦书兰

中国科学院心理研究所 (北京 100101)

摘 要 认知加工速度理论是解释年龄与认知老年化现象的理论之一,也是近年来心理学研究中的热点之一。该文从理论要点、实验设计、指标选择和统计分析手段四个方面对认知加工速度的研究进行了回顾。在阐述理论要点的基础上,介绍了常用的实验指标和选择指标的标准,以及一些常用的统计分析手段。作者认为除了深入理解理论之外,谨慎地设计实验方案、选择适当的实验指标,以及采用恰当的统计手段都是研究得以顺利进行的必要保障。

关键词 加工速度,中介因子,系统相关分析,结构方程模型。

分类号 B842.1

当前,世界人口正在趋于老龄化,很多国家都将面对老龄化社会的种种问题,各种老年化问题都成为人们关注的焦点。因此认知老年化的研究也就日益成为心理学研究中的一个热点。各类研究所关心的不仅是年龄增长在认知任务中引起的各种特征现象,更重要的是年龄与认知能力之间的相互关系,以及年龄影响认知能力的内在机制。

1 理论概述

在目前已有的研究结果中,众多的研究者从不同的角度提出了各种理论对年龄与认知能力的关系进行了解释,其中包括: Birren 在 1965 年就提出的有关速度是独立的认知影响因素的设想^[1]; Craik 和 Byrd 于 1982 年提出的加工资源(processing resource)理论^[2]; Cerella 在 1985 年提出的信息加工速率(information processing rate)理论^[3]; Hasher 和 Zacks 于 1988 年提出的抑制机制(inhibition)理论^[4]; 以及 Myerson 于 1990 年提出的信息损失模型(information lose model)^[5], 以及 Salthouse 于 1985 年提出的加工速度理论(processing speed theory)^[6]。

加工速度理论是力图解释年龄对认知能力的影响机制的理论之一。该理论认为: 加工速度(processing speed) 是许多认知操作得以实现的一个重要因素, 在众多的认知任务中都起着非常重要的作用。而成人的加工速度本身会随着年龄的增长而减缓, 从而影响人们在认知任务中的表现。因此加工速度是年龄与认知能力之间的一个中介因子, 许多认知任务中的年龄差异在很大程度上都是由加工速度的改变引起的。

加工速度是一个抽象概念, 一般认为它具体体现在三个层次上: 首先是感觉运动速度(sensorimotor speed), 其次是知觉速度(perceptual speed), 第三是认知速度(recognition speed)。显然, 第一个层次是最为基础的, 类似于基本的神经传导速度, 反映了对刺激迅速作出简单反应的能力。第二个层次则反映了对刺激迅速作出简单的知觉判断等反应的能力,

收稿日期: 2001 05 29

例如：判断两串数字是否相同。第三个层次涉及到高级的认知活动，例如：回忆、联想等。由于这些高级认知活动的速度和成绩大多都受到经验、策略等多方面因素的影响，所以加工速度在这一层次上的作用比较难于把握。

作为年龄与认知能力之间的中介因子，加工速度通过两种不同的机制对认知能力产生影响：时限机制（limited time mechanism）和同步机制（simultaneity mechanism）^[6]。

时限机制是指在一段给定的时间中，当需要进行一系列的认知操作时，较快的加工速度能保证所有的认知操作都及时、有效地完成；而较慢的加工速度则不能。这是由于加工速度较慢时，前期的认知操作就占用了大量的时间，而使后期的认知操作受到时间的限制，难以按时或有效地完成。时限机制主要是在有外在或其它原因产生的时间限制时起作用。尤其是在一些相对简单的认知任务中，其它因素（如策略）的作用相对较小，时限机制的作用就更为突出。此外，在一些较为复杂，但其完成的质量依赖于一段时间内所进行的操作数量的认知任务（例如：联想、复述）中，时限机制也起着不可忽略的作用。如果复杂认知任务的实现是基于简单认知操作的结果的，那么较慢的加工速度会导致相等时间内得到的简单操作结果较少，从而延缓复杂认知任务的完成时间，或者降低复杂认知任务完成的质量。

同步机制则主要解释了加工速度是如何影响认知操作的质量的。当几项认知任务并行进行时，先完成的认知任务所得到的结果，可能需要等待稍后完成的任务结束后再进行加工。这时，较慢的加工速度会增加等待的时间，从而使先期得到的结果的可用性降低，包括这些结果的数量和质量上的损失。值得注意的是，这里所强调的是由于加工速度缓慢使操作时间延长的作用，而不是结果在记忆储存中的干扰或消退作用。实际上，很多研究都证明记忆的干扰和消退在各个年龄阶段中几乎保持相同的水平^[7]。因此很多认知任务中的年龄差异都是由于不同的加工速度通过同步机制导致的，而非记忆的干扰和消退的增加导致的。

同步机制的作用主要反映在工作记忆（working memory）中，因为工作记忆被认为是由即时可用的信息组成的。用于工作记忆任务中的测量成绩可以很好地体现出同步机制的作用。

事实上，同步机制的概念很早就有人提及了，只是提法有所不同而已。最早的有关论述是在1927年，Lemmon提出：智力取决于神经连接（connection）的数量和建立连接的速度。神经连接不可能始终保持最高兴奋度，当最后建立的连接兴奋时，最先建立的连接可能已经失去兴奋了。所以建立连接的速度直接影响到能同时保持兴奋的连接的数量。能迅速建立连接的，就能在同一时间内使更多的连接保持兴奋，因而具有更高的认知能力。与此相似的理论还有Travis和Hunter在1928年提出的智力定义。他们认为，智力较高的人能在同样短暂的时间内通过更多的选择或判断来了解事物的含义和联系。这些人能更快地激活作出判断的反应模式（reaction pattern），从而在同一时间内激活并保持更多的反应模式同时进行操作。这些论述都直接或间接地提到了神经活动中的速度因素，并认为这种速度因素是决定智力和认知能力的重要因素。并且他们都从神经生理基础的角度阐述了速度在同步操作当中的作用机制，与加工速度的同步机制是相吻合的。

2 不同实验设计的比较

在各种对于年龄差异的研究中，常用的实验设计可分为横向比较（cross-sectional）和纵向跟踪（longitudinal）两种方式，在加工速度的研究中亦是如此。

横向比较是在不同年龄层上进行抽样,对不同被试的成绩做跨年龄比较,实际上是组间设计。而纵向跟踪则是对同一批被试在不同的时间点上进行重复的抽样比较,属于组内设计。显然,不同的实验设计具有不同的优劣之处。横向比较既然是抽取不同年龄段的被试,其比较结果中就不可避免地掺杂了不同年龄段被试之间的群体差异。这种差异可能是由教育、时代背景等各种因素导致的。因此横向比较的差异来源可以概括为:年龄差异+群体差异。而纵向跟踪由于采用同一批被试,自然就避免了群体差异的出现。但是,另一方面,由于采用重复测量方式,又不可避免地出现了练习效应。此外,在对老年被试的跟踪过程中,往往会出现被试丢失的情况。而且被丢失的被试大多是由于疾病或逝世的原因退出实验的,极可能这些被试认知老化比较显著。这些被试的丢失就会导致抽样的偏差,使所得到的数据都处于认知老化较慢的一段。所以纵向跟踪的差异来源可以概括为:年龄差异+练习效应+抽样偏差。

比较两种实验设计方式,我们认为跟踪研究对于年龄差异的分析更为准确一些。首先,对于研究与年龄相关的变化而言,跟踪研究是直接地体现个体年龄变化的方法。其次,练习效应与抽样偏差是在实验过程中加以控制甚至避免的,而年龄组间的群体差异则很难分析其原因并加以控制。即使是使用相关的统计方法也难以准确度量并完全排除。但是,在实际的研究中,由于时间等多种条件的限制,采用横向比较的研究居多,而少量的纵向跟踪研究中,跟踪时间都比较短,不足以体现年龄变化的影响^[8]。因此,目前对于认知老年化的认识主要还是来自于横向比较的结果。

当然,更为全面的方法是采用混合设计,即对不同年龄组的被试进行跟踪研究。这样既可以分析年龄组之间的差异,也可以考察由年龄增长直接导致的变化。例如 Schaie(1989)使用混合设计对知觉速度年龄变化进行了深入的研究^[8]。研究对不同年龄组的被试进行了长达 7 年的跟踪,从横向和纵向进行了综合的分析。结果发现,在横向比较中,由于负的同层人效应(cohort effect)的作用,知觉速度的年龄变化被低估了。因此在纵向跟踪研究中所得到的年龄差异往往大于横向比较中得到的年龄差异。但是在纵向跟踪研究中,需要谨慎地采用适当的测量指标和抽样数量。因为不同的测量指标对年龄变化的敏感性不同,有的指标难以在较短的跟踪时间内或者较小的样本内体现出显著的年龄差异。

3 具体实验指标的选择

加工速度是一个抽象的概念,而在实验中我们只能采用可操作的概念作为度量指标,因此在研究中必须将加工速度这一概念操作化。结合加工速度在不同层次上的体现,研究者们大都采用反映感觉运动速度、知觉速度和认知速度的指标来进行研究。在选择测量指标的时候,必须考虑到三个方面的要求^[9]:

(1) 任务应该相对简单,以保证能直接反映加工速度的作用,同时尽量减少其它方面(如策略)的影响。

(2) 任务不能仅仅反映神经反应的速度,必须体现其是参与认知功能的一种能力。

(3) 具有普遍性,尽量排除由于特定任务要求产生的差异,突出对大多数认知功能的影响。

由于认知速度的测量指标(例如:联想、推理)容易受到其它因素(如:经验、策略)

的影响,而感觉运动速度过于简单,难以体现加工速度在认知操作过程中的普遍作用,所以以知觉速度作为加工速度的指标是最为常用的方法。

在以前的研究中,常用的测量项目包括:

- (1) 数字符号替换 (Digit Symbol Substitution Test);
- (2) 字母比较 (Letter Comparison)、数字比较 (Digit Comparison)、模式比较 (Pattern Comparison);
- (3) 数字抄写 (Digit Copying);
- (4) 画线 (Boxes);
- (5) 图形匹配 (Identical Pictures);
- (6) 划除 A (Finding A);
- (7) 其它一些工作记忆的测试指标。

数字符号替换 (DSST) 速度是最为常用的知觉速度的测量指标。它给被试呈现一系列数字与符号的对应关系,然后让被试参照这一对应系列,在测试部分的单个数字下填出相应的符号。测试以 90 秒钟为限,考察被试正确替换符号的个数。这一测试也可以用计算机呈现来进行,要求被试参照实验者提供的对应关系来判断计算机呈现的一对数字与符号是否符合所提供的对应关系。计算机呈现测试中则以被试的反应时作为记录指标。这一测试的一种变式是数字—数字 (Digit—Digit) 替换测试,同样使用计算机呈现,所用的材料是数字与数字的对应关系。这一类替换测试都具有较高的重测信度,例如 Salthouse 在 1994 年以 240 名 19 到 82 岁的被试为样本,得到的数字符号反应时测试的即时重测信度是 0.93,数字数字反应时重测信度为 0.61^[10],1995 年 Salthouse 等人以 131 名 17 到 79 岁的被试为样本的重测信度分别是 0.89 (数字符号反应时) 和 0.69 (数字数字反应时)^[11]。

常用的字母比较、数字比较和模式比较都是考察比较反应速度的纸笔测试,要求被试比较两个字母或数字或模式是否完全相同。所谓模式是指一个方框内由 3、6 或 9 条线段所构成的图案。测试以一定时间(一般为 30 秒或 45 秒)内被试正确完成比较的个数为考察指标。1994 年和 1995 年 Salthouse 等人得到的重测信度中,字母比较重测信度为 0.58 和 0.60,模式比较重测信度为 0.73 和 0.78^[10,11]。

数字抄写 (Digit Copying) 与画线 (Boxes) 测试中,被试只需要简单地抄写一系列数字,或者在不同的方位上画线。这两个测试反映的是最简单的认知操作的速度,更少受到其它因素的影响因此也更为稳定,具有很高的重测信度。1994 年和 1995 年 Salthouse 等人得到的两项测试的重测信度均为 0.86 和 0.93^[10,11]。

图形匹配 (Identical Pictures) 要求被试在四个备选图形中选出与刺激图形相同的一个。以被试在一定时间内正确完成的选择个数为考察指标。

划除 A (Finding A) 要求被试在一系列单词中划除含有字母 A 的单词,同样也是以一定时间内被试正确划除的单词数为考察指标。

除此之外,其它一些常用于加工速度研究的测试包括:计算速度(考察被试在一定时间内正确完成的加法或者其它计算的次数)、推理速度(考察被试在一定时间内正确完成瑞文推理测试的个数)等。值得注意的是,研究中采用与语音有关的测量指标时,应该考虑发音

速度对该指标的影响作用,必要时应该使用发音速度作为控制指标。

从十多年来各方面的研究结果来看,这些实验指标的测试成绩都与年龄成负相关关系,都可以作为加工速度研究中的相应指标。在必要时,也可以通过一定的统计方法将它们进行整合,得出一个综合的加工速度指标。常用的一种整合方法是将几个相关的指标的平均标准分(即 Z 分数平均分)作为指标。另一种方法则是以回归系数作为权数,将几个相关指标的加权值作为新的综合指标。

4 统计分析方法

在对加工速度的研究中,研究者们采用了各种统计分析手段对实验数据进行分析,除了方差分析、相关分析、回归分析等传统的统计手段之外,还包括统相关分析、结构方程建模、路径分析等综合性手段。

系统相关分析(Systematic Relations Analyses)常常用于考察各个年龄段被试在不同实验条件下的平均成绩之间的相关情况。研究者以一组被试在不同条件下的成绩作为横坐标,另一组被试的成绩作为纵坐标,分析两者之间的相关,可以得到一个回归方程。1965 年 Brinley 首先将这种方法用于在速度和正确率指标上的相关关系^[12],而在以后的研究中,这一方法更多地被用于速度指标的分析。系统相关分析之所以常用是因为它被认为能够区分公共因子(general factor)与特殊因子(specific factor)的影响。研究者们认为通过系统相关分析得到的相关系数能够反映同一样本中公共因子在所用的几项指标中的作用。因此采用这一相关系数得到的某一指标的预测值就是公共因子作用下的理想值,而预测值与实际值的差异则是该项指标的特殊因子影响的成分。Madden 等人曾在 1992 年根据从一些指标中得到的相关系数用年轻被试的成绩来预测老年被试的成绩^[13]。Salthouse 与 Kersten 在 1993 年也用同样的方法做了类似的预测^[14]李德明等也在非语词认知速度的年龄变化研究中证实了这种函数关系的存在^[15,16]。这些研究都得到同样的结果:所用的速度指标中的公共因子能够解释大部分的变异。当然,对于不同的指标,公共因子的解释能力是不同的,它取决于该指标对公共因子的依赖程度。然而,由于这一方法是以组成绩(而非单个被试的原始成绩)作为分析对象,忽略了数据中的个体差异信息,不可避免地蕴含了大量的误差,所以只适合用于说明整体趋势。

为了了解某一指标对公共因子的依赖程度,研究者们大多采用统计控制的手段进行分析。统计控制的基本原理是通过寻求效标变量受年龄影响的部分与控制变量之间的公共部分来考察控制因素在效标变量随年龄的变化中的影响大小(见图 1)。图中的三个圆圈分别表示控制变量(controlled variable)与效标变量(criterion variable)的所有变异,以及由年龄引起的所有变异。(b+d)部分为由年龄引起的效标变量的变异,(b+d)/(a+b+d+f)就反映了效标变量受到年龄因素影响的程度。同样的,(c+b)/(e+a+c+b)就反映了控制变量受年龄因素影响的程度。b 部分则是控制变量与效标变量共同受到年龄因素影响的部分,即公共因子随年龄变化而变化的部分。我们计算 b/(b+d)的大小就能够知道公共因子在年龄对效标变量的影响中的作用。从原理上来讲,控制变量与效标变量的地位是对称的,因此我们计算 b/(b+c)也就能够知道公共因子在年龄对控制变量的影响中的作用。但是应该注意,由于 c 不一定等于 d,公共因子在年龄对效标变量和控制变量的影响中的作用也不一定相等。也就是说,效标变量与控制变量对公共因子的依赖程度不一定是相同的。

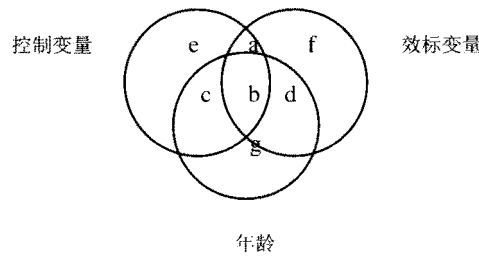


图 1 控制变量、效标变量与年龄的变异之间的关系

由于统计控制方法能够定量地反映各类指标受加工速度影响的程度,因而受到了广泛的应用。Salthouse(1993)曾采用统计控制方法对 11 种认知指标进行了分析,两两之间得到的公共因子作用在年龄变异中所占的比例小至 0.301 大到 0.999,大多数都大于 0.600^[17]。另一种验证公共因子的存在,并考察不同指标对公共因子的依赖程度的方法是建立结构方程模型(structural equation model),通过路径分析(path analyses)得到公共因子对各个指标的解释程度。建立结构方程模型又称为协方差结构分析(analyses of covariance structure),是在理论与以往实验结果的基础上假设一个反映多变量相互关系的模型^[18],见图 2。其中的变量包括一个或多个显变量(例如:年龄)、一个或多个潜变量(latent variable)(例如:加工速度)和多个指标变量(例如:认知指标)。通过参数估计和模型拟合等手段来验证并修正假设的模型,再计算各个路径上的结构系数来考察各个指标的因素负荷程度。由潜变量到某个指标的结构系数(例如:c)就是潜变量对该指标的影响程度。由显变量到潜变量的结构系数(例如:a)体现了显变量对潜变量的作用。由显变量到某一指标的直接结构系数(例如:b)则是显变量对该指标的直接影响或其它不经过潜变量的影响。

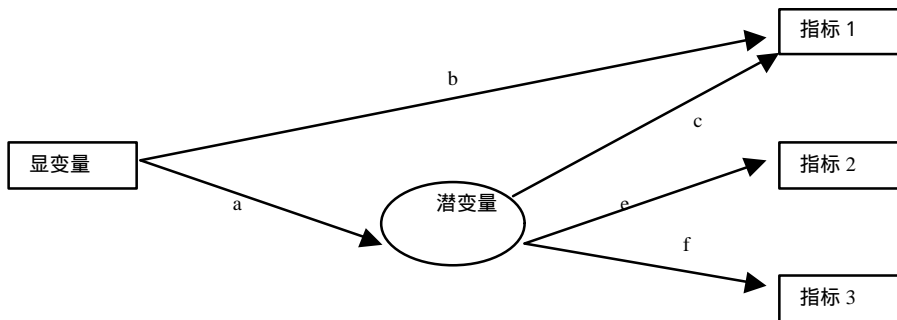


图 2 结构方程模型的路径图

由于结构方程建模将潜变量引入了路径分析,并将观测变量与潜变量结合起来进行系统的分析,因此很适合于以加工速度为年龄与认知能力的中介变量的研究。很多研究者都曾试图用结构方程模型来解释加工速度在各类认知功能中的作用。现有的研究表明:年龄与加工速度之间有较强的相关,加工速度与各类认知指标之间有中度的相关,而年龄与认知指标之间只有弱相关或者没有相关。Salthouse(1994)曾采用这一方法对记忆、推理和空间能力进行了研究,在年龄与学习时间、判断正确率、判断时间之间,得到了感觉运动速度和知觉速度两个潜变量,与年龄都有较强的相关关系;而知觉速度与认知指标之间的关系略强于

感觉运动速度；年龄与认知指标间也有相关关系^[10]。近年来我国国内的研究中也有一些采用这一方法的例子。刘昌（1998）在关于老年心算能力的研究中也使用结构方程模型肯定了加工速度和记忆能力对心算能力的影响作用*。李德明等在认知老化模型研究中采用这一方法将影响认知老化的因子划分为速度和非速度因子两类，并肯定了速度因子对非速度因子的显著正效应^[19, 20]。

5 小结

加工速度理论以加工速度作为年龄与认知能力之间的中介因子来解释认知老年化现象，提出了时限机制与同步机制两种内在的作用机制。该理论自提出以来受到了广泛的关注，被认为是能够很好地解释认知老年化的理论之一。很多研究者以此为依据进行了大量、深入的研究，认知心理学的很多实验范式也被用于此类研究中。各类认知能力的速度、正确率等指标都被用于加工速度的研究中，以证明加工速度在认知功能中的广泛作用。经验证明：尽管横向比较在以往的研究中较为常用，但纵向跟踪研究是更加准确、有效的研究方式。而不同的认知指标反映了不同层次的加工速度，反映知觉速度的指标是最为常用的实验指标。在不同的实验设计中选择适当的测量指标是确保实验能够顺利进行所应注意的。同时，适当地采用先进的统计手段能够使实验数据得到充分的利用，更深入地挖掘数据中蕴含的信息，提供研究的精确性。除了以前常用的方差分析等手段之外，结构方程建模和路径分析都是非常适合于对加工速度的研究的。

参考文献

- [1] Birren J E. Age changes in speed of behavior: Its central nature and physiological correlations. In: Welford A T, Birren ed. Behavior, aging, and the nervous system. Springfield, IL: Charles C Thomas, 1965.191-216
- [2] Craik F I M, Byrd M. Aging and cognitive deficits: The role of attentional resources. In: Craik F I M, Trehub S ed. Aging and cognitive processes. New York: Plenum, 1982.191-211
- [3] Cerella J. Information processing rate in the elderly. Psychological Bulletin, 1985, 98: 67-83
- [4] Hasher L, Zacks R T. Working memory, comprehension, and aging: A review and a new view. In: Bower G H ed. The psychology of learning and motivation. Vol 22. San Diego, CA: Academic Press, 1988. 193-225
- [5] Myerson J, Hale S, Wagstaff D, Poon L W, Smith G A. The information loss model: A mathematical theory of age-related cognitive slowing. Psychological review, 1990, 97: 175 - 187
- [6] Salthouse T A. A theory of cognitive aging. Amsterdam: North-Holland, 1985
- [7] Salthouse T A. Influence of processing-speed on adult age differences in working memory. Acta Psychologica, 1992,79: 155-170
- [8] Schaie K W. Perceptual speed in adulthood: Cross-sectional and longitudinal studies. Psychology and Aging, 1989,4: 443-453
- [9] Salthouse T A. The processing-speed theory of adult age differences in cognition. Psychological Review, 1996, 103: 403-428
- [10] Salthouse T A. Aging associations: Influence of speed on adult age differences in associative learning. Journal of experimental psychology: Learning memory and cognition, 1994,20: 1486-1503

* 刘昌. 心算老年化的认知心理机制及功能磁共振成像研究. 中国科学院心理研究所博士论文, 1998

- [11] Salthouse T A, Fristoe N M, Lineweaver T T, Coon V E. Aging of attention: Does the ability to divide decline? *Memory & Cognition*, 1995,23: 59-71
- [12] Brinley J F. Cognitive sets, speed and accuracy of performance in elderly. In: Welford A T, Birren ed. *Behavior, aging, and the nervous system* Springfield, IL: Charles C Thomas, 1965.114-149
- [13] Madden D J, Pierce T W, Allen P A. Adult age difference in attentional allocation during memory search. *Psychology and Aging*, 1992, 7: 594 – 601
- [14] Salthouse T A, Kersten A W. Decomposing adult age difference in symbol arithmetic. *Memory & Cognition*, 1993,21: 699-710
- [15] 李德明, 孙福立, 李贵芸. 非词语性认知作业速度老年衰减规律的数字描述. *心理学报*, 1994,26 (3): 216
- [16] 李德明, 刘昌, 李贵芸. 成人非字词作业速度的随龄减慢及其与汉字作业的比较. *心理学报*, 1998, 30 (1): 101
- [17] Salthouse T A. Speed mediation of adult age differences in cognition. *Developmental psychology*, 1993,29: 722 – 738
- [18] 张建平. 一种新的统计方法和研究思路——结构方程建模述评. *心理学报*, 1993, 25(1): 93 – 101
- [19] 刘昌, 李德明, 李贵芸. 心算加工老年化及其机制的研究. *心理学报*, 1999, 31 (3): 306-312
- [20] 李德明, 刘昌, 李贵芸. 认知老化模型的研究. *心理学报*, 1999, 31 (1): 98-103

STAPLE EXPERIMENTAL AND STATISTICAL METHODS IN PROCESSING SPEED RESEARCH

Luo Ting , Jiao Shulan

(Institute of Psychology, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: Processing speed theory is one of the theories trying to explain the relation between age and recognition aging, and it is one of the hotspots of later-year psychology researches. This article reviewed the researches on processing speed theory from four aspects: the theory, the experimental design, the test and the statistic method. Based on the expatiation on the theory, it introduced the criterion of test choosing, and the staple tests and statistic methods. The author believes that to do a successful research must comprehend the theory deeply, design the experiments carefully, choose proper tests and use appropriate statistic methods.

Key words: processing speed, intervening variable, systematic relations analyses, structural equation model.