

第一章 结构方程模型概述

第二语言研究中的推断统计可以帮助研究者寻找研究变量之间的差异，如 t 检验、方差分析、卡方检验等；它也可以帮助研究者寻找变量之间的关联，如相关分析、回归分析等。但上述统计手段所能解决的问题有限——当变量较多且关系复杂时，就需要使用其他统计手段进行处理，结构方程模型就是其中之一。

1.1 基本特点

结构方程模型英文为 Structural Equation Modeling，简称 SEM，是一种建立、估计和检验变量间关系的多元统计分析技术；20 世纪 70 年代由瑞典统计学家 Jöreskog 及 Sörbom 提出并逐步改进，20 世纪 90 年代得到广泛应用。SEM 是一种对理论模型进行假设检验的统计建模技术，多被应用在心理学、社会学、管理学、行为科学及语言教学等领域中。

SEM 综合了因子分析 (factor analysis)、回归分析 (regression analysis) 和路径分析 (path analysis) 等统计手段的特点，同时规避了它们的弊端。探索性因子分析能从纷繁复杂的题项中提取潜在变量（即因子），从而达到压缩题项数量，得出抽象概念的目的。但当因子数目确定，且每个因子下的题项数目也确定时，若想验证这些因子和题项之间关系，探索性因子分析就没那么有用了。多元回归分析可以检验多个自变量对一个因变量的解释程度。但当自变量之间存在较高共线性，且因变量不止一个时，多元回归分析就没那么有用了。路径分析能够同时检验多个变量之间的相互关系，但它直接使用观测变量进行检验，且假定各变量不含测量误差，这与科学研究的实际情况通常不符。相比之下，SEM 能同时处理多个因变量（包括观测变量和潜在变量）；容许自变量和因变量含有测量误差；能同时处理观测变量、潜在变量及误差项；能直接验证因子与题项之间的关系；还能直观地揭示出潜在变量之间的关系，并估计出理论模型与实际数据之间的拟合程度。

SEM 使用图形表示变量间的关系（图 1.1）：方形表示观测变量，即原始数据中的变量；椭圆形表示潜在变量（也称概念变量），它在原始数据中并不存在，要通过若干个观测变量来测得；单箭头表示解释关系（也称回归关系）；双箭头表示相关关系；带有单箭头的圆形表示误差项。

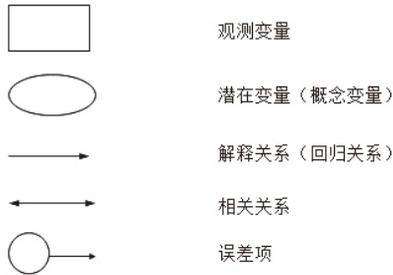


图 1.1 SEM 变量表示法

1.2 基本类型

结构方程模型有两种基本类型：测量模型（measurement model）和结构模型（structural model）。最简单的测量模型由一个潜在变量（latent variables）和它的若干个观测变量（observed variables）以及误差项（errors）构成（图 1.2）。图 1.2 中的 X 表示一个潜在变量，q1 到 q5 表示测量 X 的五个观测变量，e1 到 e5 表示这五个观测变量在测量 X 时各自存在的误差。复杂一点的测量模型通常由若干个潜在变量及其观测变量和误差项构成（图 1.3）。图 1.3 中的 X1、X2 和 X3 分别表示三个潜在变量，q1 到 q5 表示测量 X1 的五个观测变量，e1 到 e5 表示这五个观测变量的误差项。q6 到 q9 表示测量 X2 的四个观测变量，e6 到 e9 表示这四个观测变量的误差项。q10 到 q12 表示测量 X3 的三个观测变量，e10 到 e12 表示这三个观测变量的误差项。值得注意的是，一个潜在变量至少要由三个观测变量测得。此外，复杂测量模型中的潜在变量两两之间要通过双箭头连接起来，表示彼此相关。

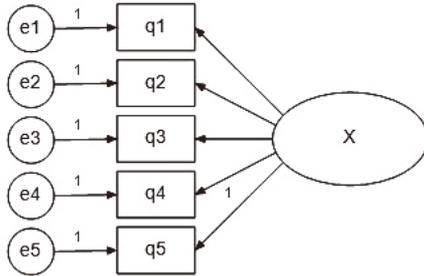


图 1.2 简单测量模型

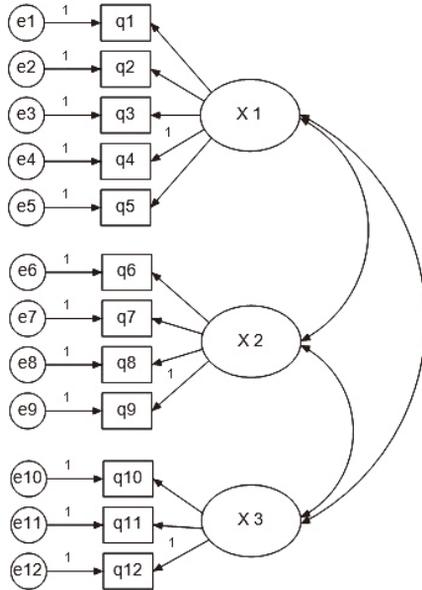


图 1.3 复杂测量模型

最简单的结构模型由一个复杂的测量模型和一个简单的测量模型构成（图 1.4）。图 1.4 左侧是一个复杂的测量模型，由 X_1 、 X_2 和 X_3 三个潜在变量构成；右侧是一个简单的测量模型，由 Y 这个潜在变量构成。在 SEM 的术语中， X_1 、 X_2 和 X_3 称为外生变量（exogenous variables），相当于自变量，是影响其他变量的变量； Y 称为内生变量（endogenous variables），相当于因变量，是受其他变量影响的变量。需要注意的是，外生变量到内生变量由单箭头连接，表

示解释（或称回归）关系。 e_y 表示内生变量 Y 的误差项。需要注意的是，在 SEM 中，如果一个观测变量或潜在变量被单箭头指向，那么它一定需要误差项。复杂一点的结构模型是在简单的结构模型基础上增加新的内生变量（图 1.5）。 Z 是新增加的内生变量，本例中它由四个观测变量测得，且它不但被 X_1 、 X_2 和 X_3 影响，同时还受 Y 的影响。此外， X_1 、 X_2 和 X_3 还通过 Y 间接影响 Z 。这时， Y 称为中介变量（mediated variables）。

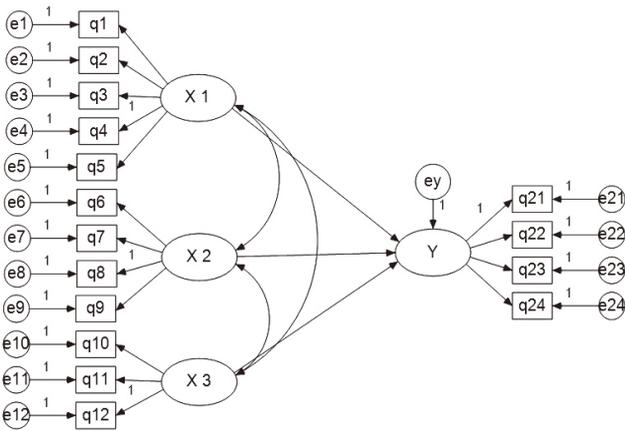


图 1.4 简单结构模型（无中介变量）

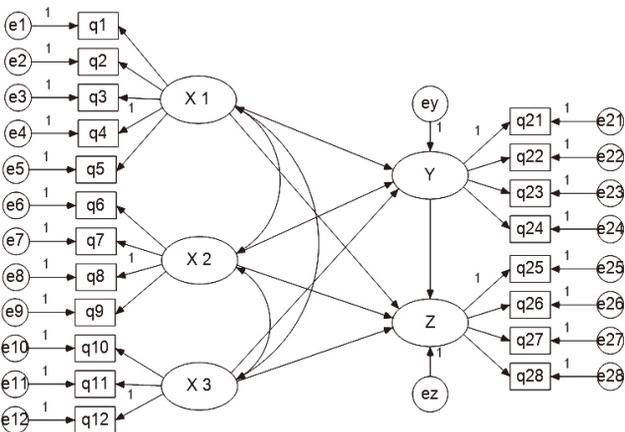


图 1.5 复杂结构模型（有中介变量）

以上图例仅是抽象概括，在实际使用中会有变化。研究者需要根据自己的研究问题和理论假设构建初始模型。在后续章节中，笔者会通过实例分别介绍各种模型的使用方法。

1.3 基本指标

与其他推断统计手段类似，SEM 也需要完成参数估计和假设检验两项主要统计任务。但与其他统计手段不同之处在于，SEM 的参数估计量更多，假设检验结果不仅仅提供显著水平，还提供拟合度 (fitness) 等其他指标。研究者需要综合考虑上述结果再作出最后的统计决断。

就参数估计数量而言，SEM 需要估计四类参数：潜在变量之间的相关关系或者解释关系；潜在变量与观测变量之间的解释关系；误差项与观测变量之间的关系；误差项之间的相关关系。也就是说，一个 SEM 中需要估计的参数个数就是模型所有单箭头和双箭头数量的总和。以图 1.2 为例，这个模型中需要估计的参数共计 10 个，因为有 10 个单箭头。再以图 1.4 为例，这个模型中需要估计的参数共计 39 个，因为有 36 个单箭头和 3 个双箭头。

就参数估计方法而言，SEM 主要使用四种方法来进行估计：最大似然法 (maximum likelihood, 简称 ML)、一般最小二乘法 (generalized least squares, 简称 GLS)、未加权最小二乘法 (unweighted least squares, 简称 ULS) 和渐进分布自由法 (asymptotic distribution free, 简称 ADF)。ADF 法适用于极度偏态的大样本，但要求样本量须为理论模型自由参数的十倍。ULS 法通常不需要符合某种统计分布的假定，它在数据不符合统计分布假定时也能获得稳定的统计结果。当数据违反多元正态分布假定时，GLS 法的估计结果更为可靠。当数据符合多元正态分布假定时，ML 法的估计结果更为可靠。但近年来研究表明，ML 也可以用于轻微非正态分布的数据估计。本书只用 ML 法作为参数估计的方法，因为它的好处是可以不考虑样本数据的分布状态和样本量的大小。此外，它也是 AMOS 软件默认的参数估计方法。

就假设检验而言，SEM 与其他统计方法相比有以下两点显著差异。第一，由于 SEM 旨在考察理论模型与数据之间的吻合程度，因此，期待 p 值大于

0.05；这样才能够得出理论模型与数据之间无显著差异的结论，即理论模型得到数据支持。第二，由于 SEM 采用卡方值作为统计量，在样本数增大时，卡方值也会变大，导致 p 值小于或等于 0.05 而迫使研究者拒绝可能已经是比较合理的理论模型。所以，除了卡方值以外，还要参考其他体现理论模型与数据吻合优劣程度的指标，常用的指标如下：

拟合优度指数 (goodness-of-fit index, 简称 GFI) 和校正拟合优度指数 (adjusted goodness-of-fit index, 简称 AGFI) 主要表示理论模型与数据的拟合程度是否完好。这两个指标的取值范围在 0 到 1 之间；一般认为大于等于 0.90 时，理论模型与数据拟合良好。

比较拟合指数 (comparative fit index, 简称 CFI) 与 GFI 和 AGFI 检验方法不同。CFI 假定理论模型是所有模型中最差的一个，因此它要考察理论模型与数据之间的差异有多大。这个指标的取值范围也在 0 到 1 之间；一般认为大于等于 0.90 时，“假想中最差的”理论模型与数据的差异最大，换句话说，理论模型得到了数据的支持。

残差均方和平方根 (root mean square residual, 简称 RMR) 和渐进残差均方和平方根 (root mean square error of approximation, 简称 RMSEA) 从残差的角度考察理论模型与数据的吻合程度。这两个指标表示理论模型无法得到数据支持的程度：即残差越大，理论模型与数据的吻合程度越差。这两个指标的取值范围也在 0 到 1 之间；一般认为，RMR 小于等于 0.10、RMSEA 小于等于 0.08 时，理论模型与数据之间的吻合程度更好。

最后还有一组指标是卡方值与自由度之比 (CMIN/DF)。之所以使用这种方法是因为卡方值容易受到样本量的影响增大，使 p 值达到显著水平，而迫使研究者拒绝本来可能已经十分合理的理论模型。因此，统计学家们将自由度考虑进来，通过比值的方法来检验理论模型与数据的拟合情况。一般认为，卡方值与自由度之比小于等于 2 时，理论模型与数据拟合良好。但也有研究者将标准放宽到 5，即当卡方值与自由度之比小于等于 5 时，就认为理论模型与数据拟合良好，可以接受。

为便于读者查阅，笔者将上述指标汇总如下 (表 1.1)。需要注意的是，表 1.1 中提供的取值范围仅供参考，不能机械地将其标准化。在 SEM 统计决断

中,要综合考虑以下指标,只要绝大多数指标都在参考范围之内,即认为该理论模型可以接受。但即便如此,我们也无法断定某个理论模型是唯一最佳模型,因为还有其他模型也可能得到同一批数据的支持。研究者在使用 SEM 作出判断之前要结合自身学科和专业知识作出合乎逻辑的取舍。

表 1.1 SEM 常用拟合指标取值参考范围一览表

指标名称	CMIN/DF	p	GFI	AGFI	CFI	RMR	RMSEA
参考范围	≤ 5	> 0.05	≥ 0.90	≥ 0.90	≥ 0.90	≤ 0.10	≤ 0.08

练习一¹

不定项选择:下列每题均有五个备选项目,其中至少有一个符合题意。

- 下列属于推断统计的是 ()。
 - 平均数
 - 标准差
 - 方差分析
 - 卡方检验
 - 结构方程模型
- 与结构方程模型密切相关的统计方法有 ()。
 - 因子分析
 - 平均数
 - 路径分析
 - 众数
 - 回归分析
- 下列有关结构方程模型表示法的叙述,正确的有 ()。
 - 方形表示潜在变量
 - 椭圆表示潜在变量

1 各章练习答案解析见随书附带的光盘。

- C. 单箭头表示解释关系
 - D. 双箭头表示解释关系
 - E. 误差项用方形表示
4. 下列有关测量模型的叙述，正确的有（ ）。
- A. 测量模型中须含有观测变量
 - B. 测量模型中不能含有误差项
 - C. 测量模型中的潜在变量须是原始数据中的变量
 - D. 一个最简单的测量模型中至少含有三个观测变量
 - E. 测量模型中的单箭头表示相关关系
5. 下列有关结构模型的叙述，正确的有（ ）。
- A. 结构模型中一定有内生变量和外生变量
 - B. 结构模型中的外生变量之间须为相关关系
 - C. 结构模型中的内生变量只能有一个
 - D. 结构模型中的内生变量须带有误差项
 - E. 结构模型中须有中介变量
6. 下列有关结构方程模型参数估计的叙述，正确的有（ ）。
- A. SEM 的参数估计个数就是模型中所有单箭头的个数
 - B. SEM 的参数估计个数就是模型中所有双箭头的个数
 - C. SEM 的参数估计个数是模型中所有单箭头和双箭头的个数之和
 - D. SEM 的参数估计方法只能用最大似然法
 - E. SEM 的参数估计方法选择与样本数据分布形态有很大关系
7. 下列有关结构方程模型统计指标的叙述，正确的有（ ）。
- A. 只有当 p 大于 0.05 时，才能说明理论模型得到了数据支持
 - B. 卡方值与自由度之比是判断理论模型是否可以被接受的最重要依据
 - C. GFI 和 AGFI 都是拟合优度指标
 - D. RMR 小于等于 0.10 时，说明理论模型与数据之间的吻合度较高
 - E. 只有所有拟合指标全部达到取值参考范围，才能断定理论模型可以接受

8. 下列有关结构方程模型与其他统计手段关系的说法, 正确的有 ()。
- A. 与 t 检验相比, SEM 更为高级
 - B. 与 SEM 相比, 方差分析显得十分粗浅
 - C. SEM 与其他统计手段一样, 都是为研究问题服务的
 - D. 从 SEM 的角度看, 路径分析其实是一种特例
 - E. 多元回归分析可以看做是 SEM 的一个特例
9. 下列有关理论模型与数据之间的关系的说法, 正确的有 ()。
- A. 只要理论模型在学理上成立, 就一定能够得到数据的支持
 - B. 只要理论模型得到了数据支持, 就一定是最佳模型
 - C. 只要理论模型得到了数据支持, 就一定是唯一模型
 - D. SEM 是验证性的, 所以要以理论模型为起点
 - E. SEM 带有探索性质, 必要时可以对理论模型进行调整
10. 下列有关结构方程模型中数据类型的说法, 正确的有 ()。
- A. SEM 计算只能使用定距数据
 - B. SEM 计算只能使用平均数
 - C. SEM 计算只能使用定序数据
 - D. SEM 计算只能使用定类数据
 - E. SEM 计算只能使用相关系数