

# 基于 PCA 的武汉市交通与经济协调发展研究

詹斌, 樊思月, 韦金汛

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 结合武汉市近 10 年经济与交通系统关键指标数据, 在分析武汉市交通与经济系统协调发展现状的同时, 通过主成分分析法(PCA)降维得到两系统的序参变量, 计算得到两系统的有序度及协调度; 运用 SPSS 软件进行相关性分析, 提取对协调度影响较大的指标, 剔除无明显相关关系的指标因素, 在此基础上进行武汉市经济与交通系统协调发展研究, 并对其未来协调发展提出针对性的建议措施。

**关键词:** 城市交通; 交通与经济协调度; 相关性; 主成分分析法(PCA)

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0013-05

目前对城市交通与经济系统协调发展的研究主要集中在系统内部因素作用及系统间协调发展模式定性分析上, 较少运用耦合协调理论定量评价系统间协调发展状况。付琳基于系统理论与协同学理论, 阐释了城市综合交通与经济协调发展的内在机制和协调机理, 构建了基于协同学的城市综合交通系统与经济系统协调度模型, 并以北京市 1998—2007 年综合交通与经济发展数据为基础进行两系统协调发展状况评价, 验证了协调度在子系统发展状况评价中的作用; 陈晓红等运用 BP 神经网络和模糊综合评判法(FCE), 在对煤电化基地协调发展现状评价的基础上, 为适应该区域未来协调发展, 提出煤电化基地应采取的措施。该文通过收集整理武汉市交通与经济系统的关键指标数据, 构建综合交通与城市经济系统协调性评价指标体系, 运用数据分析软件计算得到两系统的协调度, 分析武汉市近 10 年来交通系统和经济发展的实际情况, 并对其进一步发展方向提出对策建议。

## 1 研究方法

### 1.1 主成分分析模型

选取武汉市城市经济系统与综合交通系统内部典型性因素建立指标体系, 对原始数据进行归一化处理, 得到  $X$ :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} = (X_1, X_2, \cdots, X_p)$$

对  $X$  进行线性变换, 得到综合变量  $Y$ :

$$\begin{cases} Y_1 = \mu_{11} X_1 + \mu_{12} X_2 + \cdots + \mu_{1p} X_p \\ Y_2 = \mu_{21} X_1 + \mu_{22} X_2 + \cdots + \mu_{2p} X_p \\ Y_3 = \mu_{31} X_1 + \mu_{32} X_2 + \cdots + \mu_{3p} X_p \\ Y_4 = \mu_{41} X_1 + \mu_{42} X_2 + \cdots + \mu_{4p} X_p \end{cases}$$

式中:  $\mu_{i1}, \mu_{i2}, \cdots, \mu_{ip}$  ( $i=1, 2, \cdots, p$ ) 为  $X$  的协方差矩阵的特征值对应的特征向量;  $X_1, X_2, \cdots, X_p$  为原始数据归一化后所得到的特征向量。

记  $A = (\mu_{ij})_{p \times p} = (\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_p)$ ,  $R\mu_i = \lambda_i \mu_i$ , 其中  $R$  为相关系数矩阵,  $\lambda_i$  为矩阵对应的特征值,  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_p$ , 则:

$$\begin{cases} \mu_{1i}^2 + \mu_{2i}^2 + \cdots + \mu_{pi}^2 = 1, i=1, 2, \cdots, p \\ A^T A = E_p \\ \text{Cov}(Z_i, Z_j) = \lambda_i \delta_{ij}, \delta_{ij} = \begin{cases} 0, i \neq j \\ 1, i = j \end{cases} \end{cases}$$

通过以上计算得到的  $Z$  即为指标体系的主成分, 各主成分对总方差值的影响程度依次递减, 且特征值大于 1。根据系统主要因素及相关关系解释所选主成分即序参变量的实际意义。

### 1.2 协调度模型

将城市综合交通系统和经济系统用  $i=1, 2$  表示, 先确定各子系统的有序度。将前文选取的城市经济系统和综合交通系统的序参变量设定为  $e_i = (e_{i1}, e_{i2}, \cdots, e_{im})$ , 其中  $m \geq 2, i=1, 2, \cdots, n$ , 将  $\Omega_{j1}$ 、 $\Omega_{j2}$  定义为两系统的效益型和成本型指标集合。设定有序度为:

$$u_j(e_{ik}) = \begin{cases} (e_{ik} - EI_{ik})(EM_{ik} - EI_{ik}), k \in \Omega_{j1} \\ (EI_{ik} - e_{ik})(EM_{ik} - EI_{ik}), k \in \Omega_{j2} \end{cases}$$

子系统贡献度为:

$$u_i(e_i) = \sqrt{\prod_{k=1}^2 u_i(e_{ik})}$$

根据武汉市城市经济系统和综合交通系统所选指标数据值,将前文计算所得两系统的有序度对应年份设定为 $t_0$ ,则系统有序度为 $u_i^{t_0}(e_i)$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),且必须满足 $u_i^t(e_i) \geq u_i^{t_0}(e_i)$ 。设 $XD(t)$ 为两子系统间的协调度,其按下式计算:

$$XD(t) = \sqrt[2]{\prod_{i=1}^2 [u_i^t(e_i) - u_i^{t_0}(e_i)]}$$

当且仅当 $u_i^t(e_i) - u_i^{t_0}(e_i) > 0$ 成立时,两个系统才有真正的协调度。由此可见:1)在协调度定义中, $u_i^t(e_i) - u_i^{t_0}(e_i)$ 反映的是子系统从 $t_0$ 到 $t$ 这一时期有序度的改善程度;2) $XD(t) \in [-1,1]$ , $XD(t)$ 越大,交通和经济系统协调发展程度越高;3) $u_1^t(e_1) \geq u_1^{t_0}(e_1), u_2^t(e_2) \geq u_2^{t_0}(e_2)$ 中有一个约束条件未满足时,其对应子系统向无序化方向转变,无法得出交通系统与经济系统的协调度。

结合武汉市综合交通与经济系统协调发展现状,设定协调度等级及协调发展特征(见表1)。

表1 协调度等级及协调发展特征

协调度	协调等级	协调特征
$XD(t)=0$	不协调	交通与经济系统发展无法相互适应
$0 < XD(t) \leq 0.4$	较不协调	交通与经济系统处于相互磨合时期
$0.4 < XD(t) \leq 0.5$	一般协调	交通与经济系统在短期内可以相互适应
$0.5 < XD(t) \leq 0.8$	协调良好	交通与经济系统的协调性整体上呈现良好发展趋势
$0.8 < XD(t) < 1$	高度协调	交通与经济系统相互作用,发展状况较理想
$XD(t)=1$	极度协调	交通与经济系统间协调良好,相互促进

### 1.3 相关性分析

对协调度与各系统指标数值进行整理,得:

$$u = (u^1, u^2, \dots, u^n) \quad (n=1,2,\dots,10)$$

$$a = (a^1, a^2, \dots, a^m) \quad (m=1,2,\dots,10)$$

其相关关系如下:

$$r(u, a) = \frac{\text{cov}(u, a)}{\sqrt{D(u)D(a)}} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(a_i - \bar{a})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 (a_i - \bar{a})^2}}$$

相关系数 $r$ 的取值为 $(-1,1)$ , $r < 0$ 表示负相关, $r > 0$ 表示正相关。运用SPSS软件对 $r$ 进行 $t$ 检验,按式(1)计算其 $t$ 值,若 $|t| \geq t_{\alpha/2}$ ,表明 $r$ 具有统计学意义,反之则不具有统计学意义。

$$t = \frac{r}{\sqrt{(1-r^2)/(n-2)}} \quad (1)$$

## 2 武汉市交通与经济系统协调性分析

### 2.1 指标体系构建

选取武汉市城市经济系统与综合交通系统内部典型性因素建立交通与经济系统协调性评价指标体系(见表2)。

表2 交通与经济系统协调性评价指标体系

系统	类别	指标
城市经济系统	规模性指标	国内生产总值 $X_1$
		全社会固定资产投资 $X_2$
		全社会消费品零售总额 $X_3$
		进出口贸易 $X_4$
		地方财政收入 $X_5$
		地方财政支出 $X_6$
		金融市场交易量 $X_7$
	结构性指标	第一产业总值占GDP比例 $X_8$
		第二产业总值占GDP比例 $X_9$
		第三产业总值占GDP比例 $X_{10}$
城市综合交通系统		规模以上工业产值 $X_{11}$
		信息与高新技术产业增加值 $X_{12}$
	效益性指标	人均国内生产总值 $X_{13}$
		万元GDP能耗 $X_{14}$
		居民消费价格指数 $X_{15}$
		城镇登记失业率 $X_{16}$
	规模性指标	客运量 $Y_1$
		货运量 $Y_2$
		旅客周转量 $Y_3$
		货运周转量 $Y_4$
		公路运营里程 $Y_5$
		航空线路数 $Y_6$
		轨道交通运营里程 $Y_7$
	技术性指标	小汽车保有量 $Y_8$
		出租车保有量 $Y_9$
		公路密度 $Y_{10}$
		轨道交通密度 $Y_{11}$

### 2.2 提取序参变量

利用SPSS软件提取武汉经济系统和运输系统指标的主成分(见表3~5),计算两组分主成分得分

系数矩阵。

表 3 经济系统主成分(序参量)的确定

系统 指标	主成分(序参量) 得分系数			系统 指标	主成分(序参量) 得分系数		
	$M_1$	$M_2$	$M_3$		$M_1$	$M_2$	$M_3$
$X_1$	0.086	0.034	0.047	$X_9$	-0.042	0.371	0.109
$X_2$	0.083	0.087	-0.056	$X_{10}$	0.041	-0.393	-0.099
$X_3$	0.086	0.004	0.011	$X_{11}$	0.083	-0.015	0.091
$X_4$	0.080	0.147	-0.036	$X_{12}$	0.086	0.014	0.001
$X_5$	0.085	0.061	0.045	$X_{13}$	0.085	0.030	0.084
$X_6$	0.064	0.136	0.084	$X_{14}$	-0.085	0.026	-0.007
$X_7$	0.086	-0.033	0.002	$X_{15}$	-0.008	-0.085	0.967
$X_8$	-0.016	0.324	-0.004	$X_{16}$	-0.083	-0.030	0.071

表 4 交通系统主成分(序参量)的确定

系统 指标	主成分(序参量) 得分系数		系统 指标	主成分(序参量) 得分系数	
	$N_1$	$N_2$		$N_1$	$N_2$
$Y_1$	0.098	0.211	$Y_7$	0.100	-0.281
$Y_2$	0.105	0.016	$Y_8$	0.103	-0.177
$Y_3$	0.106	0.040	$Y_9$	0.101	0.193
$Y_4$	0.101	0.119	$Y_{10}$	0.105	-0.088
$Y_5$	0.105	-0.081	$Y_{11}$	0.100	-0.277
$Y_6$	0.043	0.774			

表 5 主成分方差贡献率

系统名称	主成分	总计	方差贡献/%	累积方差贡献/%
经济系统	$M_1$	11.611	72.571	72.571
	$M_2$	2.167	13.546	86.117
	$M_3$	1.006	6.289	92.406
交通系统	$N_1$	9.343	84.939	84.939
	$N_2$	1.113	10.120	95.060

对于经济系统,选择  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  作为系统的主成分,它们相互独立,从原始数据中提取了 92.4% 的信息。其中  $M_1$  为经济系统整体发展水平, $M_2$  为经济系统现代化水平, $M_3$  为经济发展过程中的外部阻碍。

对于交通系统,选择  $N_1$ 、 $N_2$  作为系统的主成分,它们相互独立,从原始数据中提取了 95.1% 的信息。其中  $N_1$  为交通系统整体发展水平, $N_2$  为交通系统现代化水平。

经济和交通系统序参量主成分得分分别见表 6、表 7,从中可见,经济系统和交通系统主成分分值大致呈稳定上升趋势。

表 6 武汉市经济系统主成分得分

年份	各主成分的得分		
	第一主成分 $M_1$	第二主成分 $M_2$	第三主成分 $M_3$
2008	-1.365 02	-0.532 45	1.139 29
2009	-1.138 81	-0.611 79	-2.070 31
2010	-0.755 72	-1.069 22	-0.156 22
2011	-0.628 27	-0.091 62	1.402 44
2012	-0.206 16	1.475 17	0.262 95
2013	0.019 22	1.499 11	0.042 58
2014	0.428 68	0.983 24	-0.326 82
2015	0.910 35	0.156 48	-0.775 33
2016	1.172 28	-0.640 08	-0.273 95
2017	1.563 44	-1.168 83	0.755 38

表 7 武汉市交通系统主成分得分

年份	各主成分的得分	
	第一主成分 $N_1$	第二主成分 $N_2$
2008	-1.608 22	-0.796 88
2009	-1.214 42	-0.605 28
2010	-0.731 89	-0.072 12
2011	-0.389 16	0.305 67
2012	-0.036 25	0.580 27
2013	0.185 53	0.973 69
2014	0.462 10	1.041 56
2015	0.745 44	1.321 99
2016	1.068 98	-1.327 06
2017	1.517 90	-1.421 83

2.3 协调度

根据前文计算结果,提取 3 个城市经济系统主成分、2 个综合交通系统主成分。城市经济系统的贡献度为:

$$u_i(e_i)=\sqrt{\prod_{k=1}^3u_i(e_{ik})}$$

综合交通系统的贡献度为:

$$u_i(e_i)=\sqrt{\prod_{k=1}^2u_i(e_{ik})}$$

系统的有序度按式(2)计算,计算结果见表 8。

$$u_i(e_j)=u_i(e_{j1})^{\alpha_1}\times u_i(e_{j2})^{\alpha_2}\times u_i(e_{j3})^{\alpha_3}\quad(2)$$

式中: $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  为各序参变量从原始数据提取的信息百分比。

由表 8 可知:两个系统加权后有序度均呈稳定上升趋势,城市经济系统有序度从 2008 年的 0.16 增加至 2017 年的 0.724,综合交通系统有序度从 2008 年的 0.125 增加至 2017 年的 0.792,说明武汉

表8 两系统有序度计算结果

年份	有序度	
	经济系统	综合交通系统
2008	0.160 081 266	0.125 433 615
2009	0.201 602 619	0.243 343 127
2010	0.298 063 608	0.387 507 915
2011	0.399 848 398	0.487 985 360
2012	0.552 808 239	0.587 393 693
2013	0.609 955 548	0.654 918 877
2014	0.687 625 149	0.727 935 079
2015	0.743 374 501	0.807 633 686
2016	0.739 321 292	0.723 837 867
2017	0.723 645 636	0.792 127 609

市近10年来交通和经济系统朝着有序方向发展;交通系统有序度相对更高,意味着其有序发展程度相对较优。

武汉市交通与经济系统协调度计算结果见表9。由于2016、2017年的有序度均低于上一年,即 $u_i^t(e_i) < u_i^{t-1}(e_i)$ ,这两年不存在协调度。

表9 两系统协调度计算结果

年份	加权后协调度	年份	加权后协调度
2008	0.069 969 725	2013	0.563 778 291
2009	0.190 162 104	2014	0.630 811 134
2010	0.294 835 534	2015	0.588 744 167
2011	0.425 939 177	2016	—
2012	0.488 059 220	2017	—

由表9可知:1)武汉市近10年来交通与经济系统之间协调度整体呈稳定上升趋势,二者相互影响、相互促进。2015—2017年协调度略有下降,从两系统序参变量值来看, $M_2$ 及 $N_2$ 的值都偏低,结合序参变量自身含义,表明经济和交通现代化水平有待提高,进而对综合交通系统和城市经济系统协调发展产生影响。结合武汉2015—2017年整体发展状况,协调度出现一定程度下降的原因主要是城市交通基础设施前期投入较大,而交通系统对城市经济产生效用需要一定时间的磨合与适应,交通对城市经济产生的效应未在当期得到直接体现。2)根据表1,2008—2010年,武汉市综合交通与经济系统协调度低于0.4,处于较不协调水平,综合交通系统与城市经济系统处于相互磨合时期,主要原因在于综合交通运输体系无法满足城市经济发展的需要,轨道交通运营里程及公路运营里程在综合交通系统中所占比重较大,公路运营里程由2008年的

9 961.99 km攀升至2010年的12 560.81 km,轨道交通运营里程3年内增加了2倍。2011—2012年,武汉市城市经济系统与综合交通系统协调度为0.4~0.5,处于一般协调水平,两系统在短期内可以相互适应,交通运输体系逐步满足城市经济发展需要,武汉市国内生产总值由2011年的6 756.2亿元增加到2012年的8 003.82亿元,公路运输、航空运输、水路运输平稳发展,政府不断加大城市交通基础设施建设投入,交通运输体系不断完善。2013—2015年,武汉市城市经济系统与综合交通系统协调度为0.5~0.8,处于协调良好水平,两系统整体上均呈现良好发展趋势,轨道交通线路增加至3条,运营里程由2013年的73.38 km增加到2015年的125.29 km,公路运营里程由2013年的13 717.55 km增加至2015年的15 658.7 km,综合交通系统得到进一步完善和优化,与城市经济发展的适应性明显提高。

## 2.4 相关性分析

为进一步厘清城市经济系统与综合交通系统之间的协调关系,对两系统发展协调度与指标进行相关性分析,运用SPSS软件提取对协调度影响较大的指标,消除没有明显相关性、无统计学意义的指数因子,并提出相应对策建议,促进其协调发展。两系统发展协调度与指标的相关系数见表10、表11。

表10 协调度与城市经济系统指标的相关系数

指标	相关系数	因素	相关系数
$X_1$	0.996	$X_9$	0.011
$X_2$	0.573	$X_{10}$	0.014
$X_3$	0.906	$X_{11}$	0.752
$X_4$	0.606	$X_{12}$	0.992
$X_5$	0.850	$X_{13}$	0.961
$X_6$	0.466	$X_{14}$	0.626
$X_7$	0.755	$X_{15}$	0.441
$X_8$	0.393	$X_{16}$	0.791

注: $X_9$ 、 $X_{10}$ 在5%显著性水平下未通过显著性检验;其余指标在5%显著性水平下均通过显著性检验。

表11 协调度与综合交通系统指标的相关系数

指标	相关系数	因素	相关系数
$Y_1$	0.406	$Y_7$	0.420
$Y_2$	0.838	$Y_8$	0.639
$Y_3$	0.821	$Y_9$	0.474
$Y_4$	0.581	$Y_{10}$	0.867
$Y_5$	0.874	$Y_{11}$	0.431
$Y_6$	0.002		

注: $Y_6$ 在5%显著性水平下未通过显著性检验;其余指标在5%显著性水平下均通过显著性检验。

根据相关系数计算结果,排除未通过显著性检验的指标,分别按城市经济系统、综合交通系统的相关系数绝对值降序排列如下:

$$\begin{aligned} X_1 > X_{12} > X_{13} > X_3 > X_5 > X_{16} > X_7 > X_{11} > \\ X_{14} > X_4 > X_2 > X_6 > X_{15} > X_8 \\ Y_5 > Y_{10} > Y_2 > Y_3 > Y_8 > Y_4 > Y_9 > Y_{11} > Y_7 > \\ Y_1 \end{aligned}$$

从武汉市经济系统与综合交通系统指标相关系数排序结果可看出:经济系统中,国内生产总值、信息与高新技术产业增加值与协调度的关联程度最紧密,为促进经济系统与交通系统快速协调发展,应大力发展经济,增加信息与高新技术产业投入比;相关系数较小的是第一产业占GDP比例和居民消费价格指数,说明武汉市当前经济发展中第一产业占GDP比例、居民消费水平对综合交通系统发展协调度的影响较小。综合交通系统中,对协调度影响最大的因素是公路运营里程,说明武汉市当前交通系统中公路运输方式仍占主导地位,应加大陆路运输基础设施投入,使其与其他运输方式衔接更顺畅,促使城市经济与交通发展协调水平进一步提高。

### 3 结论及建议

综上,武汉市经济系统有序度在2008—2015年呈稳定上升趋势,在2015—2017年略有波动,与综合交通系统的有序度变化趋势一致,且综合交通系统的有序度高于城市经济系统,交通系统近10年来的发展优于城市经济系统。结合武汉市近10年社会经济发展及交通基础设施建设情况,至2015年末,轨道交通运营线路仅4条,“十二五”期间各项交通基础设施建设开始发挥作用,2016年即“十三五”时期开始,武汉市大力开展交通基础设施建设,至2018年已逐步完成6条轨道交通线路建设,同时逐步完善高速公路网、铁路网;在航运方面,相比于“十二五”时期,新增了大量国际、国内航线;同时大力开展航道整治,加快汉江整治工程及九级枢纽建设,提升长江—江汉运河—汉江航道圈通航水平,提高通航能力。交通基础设施建设工程的效用未能在当期得到立刻发挥,因而对有序度计算结果造成一定影响,导致子系统有序度在近3年波动。

2016、2017年城市经济系统有序度均低于上一年,意味着这两年武汉市经济系统和交通系统的发展并非处于协调状态。其原因在于基础设施建设的投入较高,未能及时对城市经济发展起到推动作用。

为进一步发挥交通基础设施的效用,完善综合交通系统,使其与经济系统发展相互适应,提出以下对策建议:1) 提升开放型经济水平。根据武汉市综合交通系统与城市经济系统有序度计算结果,交通系统有序度始终高于城市经济系统,一方面,说明武汉市近年来综合交通运输系统发展略优于城市经济系统,在发展速度和发展效率上取得较大成效;另一方面,需加快城市经济建设步伐,牢牢把握实施“一带一路”战略和长江经济带发展战略的历史机遇,继续推行开放先导战略,推动对内对外相互促进、引进来和走出去更好结合,构建开放新格局。2) 发展水运、航空等运输方式。考虑到武汉市作为长江经济带的重要战略地位,充分发挥武汉市通江达海的天然航道区位优势,利用水路运输长距离、大运量、低成本的优势,加快武汉长江航运中心建设,推进长江、汉江航道整治,逐步构建干支衔接、功能健全的航道网络。3) 大力发展多式联运。根据综合交通系统与协调度相关性计算结果,公路运营里程指标的相关系数为-0.057 6,说明公路运输在武汉市综合交通运输体系中的重要性逐渐降低,且公路运输方式在运输价格和运输时效性上均不占突出优势,单位运输成本相对于水运和铁路运输而言较高。因此,在公路运输管理方面,应加强对运输方式配比的把控,尽量采取多种运输方式相结合的方式,依托物流大通道合理规划运输线路。

### 参考文献:

- [1] 付琳.城市综合交通系统与经济系统协调发展研究[D].北京:北京交通大学,2008.
- [2] 陈晓红,万鲁河.城市化与生态环境耦合的脆弱性与协调性作用机制研究[J].地理科学,2013,33(12).
- [3] 王文杰.武汉经济圈城际综合交通运输系统研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [4] 户佐安,安婷,薛锋,等.交通基础设施—经济—环境系统协调度评价模型研究[J].综合运输,2018,40(7).
- [5] Henderson V. The urbanization process and economic growth: the so-what question[J]. Economic Growth, 2003,88(1).
- [6] Minoo Farhadi. Transport infrastructure and long-run economic growth in OECD countries[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015,74.
- [7] 周珣,张兵,徐伟硕,等.基于DEA模型的江西省综合交通运输与经济社会发展协调性评价[J].华东交通大

(下转第22页)