

# 相空间重构文献综述可视化分析

孟力, 毕叶平

(厦门大学管理学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为探究相空间重构理论至今为止的发展历程及前景, 特以 CiteSpaceIII 可视化引文分析软件为工具, 通过文献计量学研究方法, 对来自于 Web of Science 平台的与“phase space reconstruction”相关 1 500 篇文献按时间分布、空间分布、引文及作者分布的情况进行了汇总整理, 并以图、表的形式展现。根据关键词和共现图及关键词时区图, 重点考察了相空间重构理论的研究热点及趋势。研究表明, 该理论的发文量逐年增加且势头强劲; 在工程、技术领域的应用越发广泛; 与多种算法相结合, 可提高非线性系统的分析与预测精度。

**关键词:** 相空间重构; 可视化分析; 研究热点; 研究趋势

中图分类号: F830.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 12-3167-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712030

## Visual Analysis of Literature Review of Phase Space Reconstruction

Meng Li, Bi Yeping

(School of Management of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The primary object of the paper is to reveal the development process and prospect of phase space reconstruction theory. The technique applied is referred as CiteSpace III, a visualized analysis software for citation. The research method of literature metrology was used to classify the fifteen hundred papers from the Web of Science platform related with “phase space reconstruction” into different priorities according to time distribution, spatial distribution, citation and author distribution. All results were displayed in figures and tables. *The hot spot and trend of phase space reconstruction were discussed based on the keywords co-occurrence graph and keywords time zone map. The study showed that the amount of the publications on the theory increased year by year harply, and it has been applied more widely in the field of engineering and technology. Combined with a variety of algorithms, the accuracy of the analysis and prediction of nonlinear systems can be improved.*

**Keywords:** phase space reconstruction; visualization analysis; hot spot; research trend

## 引言

“相”是指一个系统在某一时刻的状态, 而相空间(Phase Space)则是一个用以表示出某个系统

所有可能状态的几何空间, 所谓相空间重构(也叫动力系统重建), 即通过一维的时间序列反向构造出原系统的相空间结构, 是用动力学方法分析非线性时间序列的基础。Packard 等人最早提出了相空间重构的方法, Takens 用数学为之奠定了可靠的基础<sup>[1-2]</sup>。

事实上, 在对复杂系统进行分析时, 我们能够得到的系统的最终运行结果往往都是一维的时间



收稿日期: 2015-10-26 修回日期: 2016-01-29;  
基金项目: 国家自然科学基金(71272078);  
作者简介: 孟力(1961-), 男, 辽宁沈阳, 博士, 教授, 研究方向为量化投资, 算法交易; 毕叶平(1992-), 女, 吉林通化, 硕士, 研究方向为量化投资, 算法交易。

<http://www.china-simulation.com>

• 3167 •

序列, 但这一表现却是受多种因素共同作用的结果, 为了探索这些因素是如何作用于系统并最终影响系统行为的, 我们需要将隐藏在一维时间序列中的未观测到的状态变量影射到几何空间中去, 即构建出一个与原系统拓扑等价的相空间, 进而得到各因素作用下的系统的运行规律, 并加以把握和应用<sup>[3]</sup>, 最终便可以由系统的当前状态获得下一时刻的状态, 从而得到时间序列下一时刻的预测值。

相空间重构技术的提出, 使我们仅仅从系统内已知状态分量的时间序列有效识别出混沌状态成为了可能。应用该技术进行动力系统重建的关键在于确定嵌入维数  $m$  和时间延迟  $\tau$ <sup>[4]</sup>。有关嵌入维与时间延迟的选取方法, 目前主要有两种观点<sup>[5-7]</sup>: 一种观点认为两者是相互不相关的, 可以相互独立确定, 先求出时间延迟后再选择合适的嵌入维。这种思路下求时间延迟  $\tau$  比较常用的方法有自相关法、平均位移法、去偏复自相关法和互信息法等, 目的是使时间序列经过时间延迟后可以作为独立坐标使用。一个好的重构相空间是使重构后的吸引子和系统真正的吸引子尽可能做到拓扑等价, 目前寻找最小嵌入维的方法主要是 G-P 算法、集合不变量法、虚假最邻近点法和他的改进形势 Cao 方法。另一种观点认为时间延迟和嵌入维是相关的, 不能独立确认, 1996 年 Kugiumtzis<sup>[8]</sup>提出的时间窗长度是综合考虑两者的重要参数。1999 年, Kim<sup>[9]</sup>等人基于嵌入窗法思想提出了 C-C 方法, 该方法使用关联积分同时估计出时间延迟与嵌入窗。以上两种方法是该思路下同时求出两个参数的主要方法。但由于无法得到混沌时间序列关于相空间重构的先验知识, 因此上面提到的方法都具有一定的主观性。目前并没有一种适合各种混沌时间序列的通用相空间重构方法<sup>[10]</sup>, 各种新的重构方法不断被提出, 不断有新的方法从其它学科领域引入, 如神经网络技术和小波分析正在被引进相空间领域来确定  $m$  和  $\tau$ , 未来相空间重构技术的精度与置信水平无疑会不断得到提高<sup>[11-15]</sup>。

经过多年的发展, 相空间重构理论当前已经发展成为工程技术领域内处理复杂系统的有用工具。为了深入了解相空间重构的发展历程及发展趋势, 本文将以 CiteSpaceIII 文献分析软件为工具, 对相空间重构的发展历程进行梳理, 通过对其输出的数据进行分析, 总结出相空间重构理论的研究热点、现状以及发展趋势。

## 1 数据来源及研究方法

本文的数据来源于 Web of Science 平台, 在 Web of Science 数据库的主题检索中输入关键词“phase space reconstruction”, 检索年限设定为 1980 年到 2015 年, 共检索到 3370 篇文献。然后, 选择文献类型为“ARTICLE”对检索结果进行精炼, 得到 2525 篇文献。对精炼后的文献按被引频次降序排列, 选取被引频次最高的前 1500 篇文献进行文献可视化分析。检索日期为 2015 年 5 月 26 日。

本文借助于 CiteSpaceIII 分析软件, 并采用文献计量学研究方法, 首先对相关文献的时间分布做了分析; 然后从国家发文量、机构发文量、学科分布和引文及作者分布 4 个方面考察了空间分布状况; 最后通过绘制关键词共现图谱和关键词时区图谱分别考察了相空间重构领域的研究热点和研究趋势并讨论了相关问题。

## 2 发文量时间分布

年度发文量在一定程度上反映了该领域在相应年份的研究热度。绘制文献的年份分布曲线图, 可以帮助我们梳理该领域的发展历程, 评价该领域所处的阶段、现状及预测未来发展趋势。

从发文量时间分布来看(图 1 所示), 相空间重构理论文章发表始于 1986 年, 纵观发文全过程, 相空间重构的期刊发文量大致可以分为以下两个阶段:

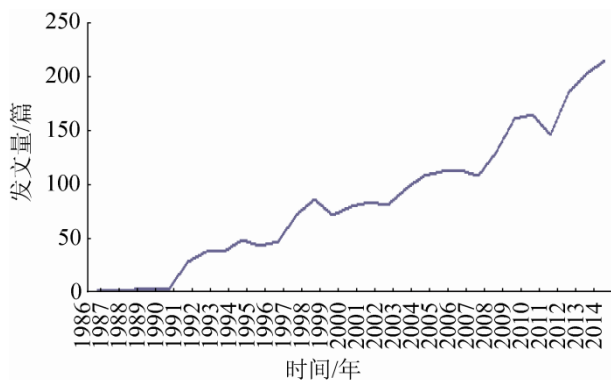


图 1 发文章时间分布  
Fig.1 Time distribution of article volume

第一阶段为 1986 ~1990 年,在这几年里,刚开始出现有关相空间重构的期刊文章;第二阶段为 1990 ~1996 年,在这六年里,虽然发文章并不多,但却有明显的上升,由此可见,人们对相空间重构理论的重视度正逐渐增加,认识也不断加深。第三阶段为 1997 年至今,发文章稳步增长且速度较快,尤其是 2007 年以后,增长速度迅速提升,截止到 2014 年,年发文章量已达到 214 篇,从整个发展趋势来看,发文章量正在逐年上升。

相空间重构是时间序列分析中的重要内容,尤其是在处理“混沌”等非线性动力系统问题时,其作用尤为显著。回顾相关理论的发展历程,自 20 世纪 80 年代初开始,混沌理论受到了广泛的关注和深入的研究, Ruelle 和 Takens 推测“奇异吸引子”反映了混沌系统运动特征,之后 Packard 等人为了弄清奇异吸引子的本质,最终提出了相空间重构理论,此后的近 20 年间,混沌理论经历了三次重大的发展,时间序列分析也因为提出了 ARCH 模型等非线性自回归理论而实现了快速的发展,作为处理此类问题的利器,相空间重构也越来越受到关注,其相关研究迅速增加。混沌非线性科学已成为各学科关注的热点。

### 3 发文章空间分布

#### 3.1 国家发文章分布

节点的中心度反映了这个点在网络中的权利地位及影响分布,中心度越高的节点越处于网络的

核心地位。通过 CiteSpaceIII 可以得到有关相空间重构研究的国家贡献的图表,表 1 是截取的发文章量排名在前十位的国家的相关信息,另外表中还列出了各个国家在网络中所占的中心度情况。

表 1 国家发文章量排名  
Tab.1 Ranking of country article volume

国家或(地区)	发文章量	中心度
美国	538	0.29
德国	159	0.41
中国	131	0.03
法国	110	0.59
英国	87	0.16
意大利	78	0.13
日本	54	0.09
加拿大	43	0.10
瑞士	39	0.02
西班牙	38	0.07

由表可知,美国的发文章贡献率最大,远高于其他国家;其次是德国、中国和法国。但从中心度来看,最具影响力的国家是法国,其中心度为 0.59,这表明网络中的其他国家都直接或间接地与它有合作关系,由此可见,尽管法国的发文章数量不是最多的,但是法国在相空间重构领域的研究贡献却是不可忽视的,其权威性也是世界公认的。从表 1 我们也可以看出,中国在这一领域的研究也取得了较多的成果,发文章量处于第三位,但是中心度指标不高,因此在研究理论时还需要更加深入,尤其应重视理论热点以及前沿领域相关问题研究。

#### 3.2 机构发文章分布

通过发文章数量可以看出某机构在这一领域的科研实力与地位,表 2 是将研究相空间重构的机构按发文章量大小排序后的结果,由表可知,从发文章频次来看,斯坦福大学(Stanford University)发文章最多,为 28 篇研究文献;其次是加州大学戴维斯分校(Univ Calif Davis),威斯康辛大学(Univ Wisconsin)和哈佛大学(Harvard University)发文章依次为 19, 19, 14。从中介中心度来看,各个研究机构的值均为 0。由此可以看出,相空间重构领

域的研究机构甚多，且较为分散，目前，国际上在这一领域尚不存在具有强大影响力的机构。

表 2 机构发文量排名

Tab.2 Ranking of organization article volume

机构名称	发文量	中心度	最早发布时间
斯坦福大学	28	0	1998
加州大学戴维斯分校	19	0	2002
威斯康辛大学	19	0	2000
哈佛大学	14	0	2001
伊利诺伊州大学	13	0	2001
西北大学	12	0	2004
伯克利大学	11	0	2011
牛津大学	11	0	2005
加州大学洛杉矶分校	11	0	2008
麻省理工学院	11	0	1992
剑桥大学	12	0	1998

### 3.3 学科分布

根据学科分布的情况，我们可以得知相空间重构理论研究在哪些领域中比较活跃，进而通过分析学科的特点深入理解和掌握相空间重构理论的内涵、适用范围以及未来可能的突破方向。

表 3 为按发文量排序并整理后的结果，从表中可以看出，物理学在这方面发表的文章是最多的，共 439 篇，其次是放射学和工程学，但是，从中心度来看，工程学的中心度最高，其次是计算机科学和生物化学与分子生物学，可见相空间重构理论当前已经发展成为工程技术领域内处理复杂系统的重要手段，事实上，相空间重构理论所擅长处理的混沌等非线性动力学问题的理论与方法普遍存在于数学、工程和运筹学等学科中，将计算机科学等学科应用到这一领域，譬如人工神经网络与支持向量机等知识，未来将会取得更多、更好的研究成果。

### 3.4 引文及作者分布

对引文及作者分布情况进行研究可以使我们对相空间重构理论的发展做出重大贡献的奠基者、开拓者以及该领域研究中的重要文献和经典之作，表 4 为通过 CiteSpaceIII 的运行而整理出来的结果。

表 3 学科分布

Tab.3 Disciplines distribution

学科名称	发文量	中心度
物理学	439	0.05
放射学	242	0.13
工程学	225	0.38
光学	191	0.00
化学	107	0.04
计算机科学	88	0.33
数学	78	0.07
地质学	67	0.00
天文学与天体物理学	66	0.00
地球科学	61	0.18
材料科学	53	0.04
生物化学与分子生物学	49	0.25

表 4 引文及作者分布

Tab.4 Citation and author distribution

文献作者	被引频次	来源期刊	年份
Takens	115	Lect Notes Math	1981
Fraser	91	Phys Rev A	1986
Kennel	84	Phys Rev A	1992
Packard	79	Phys Rev Lett	1980
Pruessmann	73	Magnet Reson Med	1999
Grassberger	69	Physica D	1983
Griswold	52	Magnet Reson Med	2002
Sodickson	50	Magnet Reson Med	1997
Sauer	48	J Stat Phys	1991
Lorenz	46	J Atmos SCI	1963
Broomhead	44	Physica D	1986
Abarbanel	44	Rev Mod Phys	1993
Smithy	42	Phys Rev Lett	1993
Farmer	42	Phys Rev Lett	1987

从来源期刊看，诸如 Neural Networks、ANN STAT、IEEE T Neural Network、Neural Network FINA 等人工神经网络类核心期刊被引频次很高，其中心度总和远大于其他任何一种期刊。这也说明了人工神经网络这种非线性映射学习模型是逼近金融时间序列非线性特征最常用的手段。

1980 年，为了从时间序列中提取更多有用的信息，Norman H.Packard、J.Doyne Farmer、James P.Grutchfield 和 Rorbert S.Shaw 提出了用时间序列重构相空间的两种方法<sup>[16]</sup>：导数重构法和坐标延迟重构法，并采用导数重构法重构了 Rossler 吸引

子, 求出了大李雅普诺夫(Lyapunov)指数。

1981 年, Takens 提出嵌入定理<sup>[17-18]</sup>: 对于无限长、无噪声的  $d$  维混沌吸引子的标量时间序列  $\{x(n)\}$ , 总可以在拓扑不变的意义上找到一个  $m$  维的嵌入相空间, 只要维数  $m \geq 2d+1$ 。Takens 定理保证了我们可以从一维混沌时间序列中重构一个与原动力系统在拓扑意义下等价的相空间, 为相空间重构奠定了数学和理论基础。后来 Sauer 等人将 Takens 定理中的充分条件推广到  $m > 2Dr$ , 其中  $Dr$  为混沌吸引子的分维数。在没有任何有关混沌时间序列的原相空间的先验信息的情况下,  $2Dr$  也是我们确定嵌入维数  $m$  的下界。值得注意的是, Takens 定理是在没有噪声影响且数据长度为无限长的理想条件下得出的, 而实际系统所产生的时间序列既存在叠加噪声, 又不能延续至无穷, 因而 Takens 定理只是给出了重构相空间的理论保证, 实际应用的结果只是一种近似。

1985 年 Grassberger 和 Procaccia<sup>[19]</sup>基于坐标延迟法, 提出了关联积分的概念和计算公式, 该方法适合从实际时间序列来计算混沌吸引子的维数, 被称作 G-P 算法。G-P 算法是一种试算法, 其主要步骤是<sup>[20-23]</sup>:

第一步: 利用时间序列  $q_{i1}, q_{i2}, \dots$ , 先设定一个较小的嵌入维数的初值  $m_0$ , 对应一个重构相空间

$$Q_i(t_j)=[q_i(t_j), q_i(t_j-\tau), \dots, q_i(t_j-(m_0-1)\tau)]$$
$$i=1,2,\dots; \quad j=1,2,\dots。$$

第二步: 计算关联维数  $D$ 。

第三步: 增加嵌入维数, 使  $m_1 > m_0$ , 返回第二步, 直到  $D$  随嵌入维数的增长而收敛到稳定值, 此时得到的  $D$  即为吸引子的关联维数。

第四步: 选取合适的嵌入维数, 一般选取  $m \geq 2D+1$ 。

目前, 与计算嵌入维数和时间延迟的其他算法相比, G-P 算法的应用十分广泛, 它的诞生, 使得相空间重构的实际应用得到了进一步的发展。

## 4 研究热点及趋势分析

### 4.1 热点可视化分析

关键词共现网络可以用来考察该领域的研究热点, 图 2 是 1500 篇文献的关键词共现图谱, 其中年轮表示相应关键词的出现频率(年轮越大出现的频率越多), 节点之间的连线表示关键词之间相互联系的程度。由图 2 可知, reconstruction(重构)的使用频率最高。由图可以看出, 除 reconstruction 外, time-series(时间序列)、systems(系统)、phase(相)、dynamics(动态)、model(模型)、strange attractors(奇异吸引子)、resolution(分辨率)、chaos (混沌)和 algorithm(算法)的频次也很高。

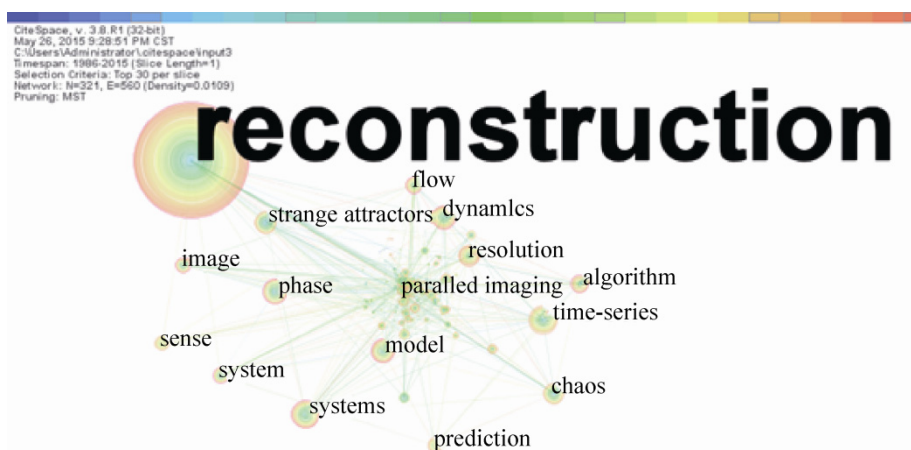


图 2 关键词共现图  
Fig.2 Co-occurrence graph of keyword

在自然界和社会中存在着大量的非线性系统, 这些系统一般都是高维的, 系统的内部结构并不清楚, 而其外部特性通常只能是某个单变量的时间序列, 在实际处理过程中, 人们往往也只能得到这些高维系统的一维信息, 因而为了弄清系统的真实面貌, 如何根据有限的数据来重构原动力系统并进行分析就成了问题的关键。目前, 混沌时间序列分析是非线性时间序列分析的最新发展, 它是在非线性科学蓬勃发展的基础上, 将非线性动力学即混沌理论和分形理论应用于非线性时间序列研究上所产生的新的分析方法。混沌时间序列分析方法的出现, 极大地扩展和加深了人们对非线性时间序列的认识与把握。而混沌时间序列的研究是以 Takens 嵌入定理为基础的, Takens 定理保证了我们可以从一维混沌时间序列中重构一个与其原动力系统在拓扑意义下等价的相空间, 从而把握混沌时间序列的性质与规律。在混沌时间序列处理中, 无论是混沌不变量的计算、混沌模型的建立和预测都是在相空间中进行, 因此相空间重构是混沌时间序列处理中非常重要的第一步, 通过相空间重构, 可以找出隐藏的演化规律, 将现有的数据纳入某种可描述的框架之下, 从而为时间序列的研究提供一种崭新的方法和思路<sup>[24-26]</sup>。通过重构相空间, 了解奇异吸引子的性质, 可以掌握更多有关混沌时间序列等非线性动力系统的信息, 根据这些信息采用神经网络提取出蕴含在其中的映射规则, 由于神经网络自身具有自适应、自学习和自组织能力, 因此通过训练可以自动调整网络的结构参数, 又因为其良好的容错性和联想记忆性, 采用空间维度上的分布存储, 时间维度上的并行处理, 能够利用输入输出的数据, 充分挖掘出系统内部所包含的信息, 今后将相空间重构的嵌入维数和时间延迟引入动态神经网络, 这些特性可以得到更大的发挥, 另外, 鉴于神经网络的性能除了受网络拓扑结构的影响, 另一重要决定性因素就是训练算法, 因为神经网络需要对网络参数进行反复调整以增强全局泛化能力, 这通常会使得计算量异常庞大, 为了提高计算处理能力, 可

以考虑引入擅长处理大规模并行计算的智能优化算法, 将其应用于神经网络的训练, 这样便可以解决计算复杂所带来的难题。值得注意的是, 每种智能优化算法都可能会存在一些缺陷, 如收敛速度慢、陷入局部最优等关键问题, 因此, 算法的选择会直接关系到结论的好坏, 为解决单一算法所带来的困扰, 可以考虑多种算法的结合。将神经网络和智能优化算法与相空间重构结合起来, 这样对混沌时间序列非线性动力系统的分析和预测将会变得更加精准与高效<sup>[27]</sup>。

## 4.2 趋势分析

采用 CiteSpaceIII 的膨胀词探测技术, 将其中的频次变化率高的词(burst term)从大量的主题词中探测出来, 进而根据词频的变动趋势来确定研究的前沿领域。图 3 所示为主要关键词的时区图谱。年轮大小示出现频次的高低, 而颜色的深浅则反映了热点程度。

如图 3 所示, 在时区图的起始端出现的是 phase, strange attractors, time-series 和 algorithm 等, 说明相空间重构最开始时的侧重点是在高维空间中把决定时间序列的动力系统的吸引子恢复出来, 以研究其动力学性质, 即通过给定的时间序列, 采用 G-P 算法等方法估计嵌入维数与时间延迟, 重构相空间, 将原序列扩展到多维的空间中去, 以便把时间序列中隐藏的信息充分地显露出来。

在时区图的中间部位有很多关键词, 如 optical homodyne tomography(光学零差断层扫描)、scanning-tunneling-microscopy(渠道扫描显微镜)、density-matrix(密度矩阵)等这说明相空间重构在这一阶段应用于工程学、光学和量子物理等多学科, 由此可以看出相空间重构理论在各个系统中的应用越来越广泛。

在时区图的末端出现了 parallel imaging、sense、digital holography、compressed sensing、networks 等词, 这说明在目前的科学研究中, 相空间重构领域的研究主要集中在传感技术、通信技术和并行成像等技术上。

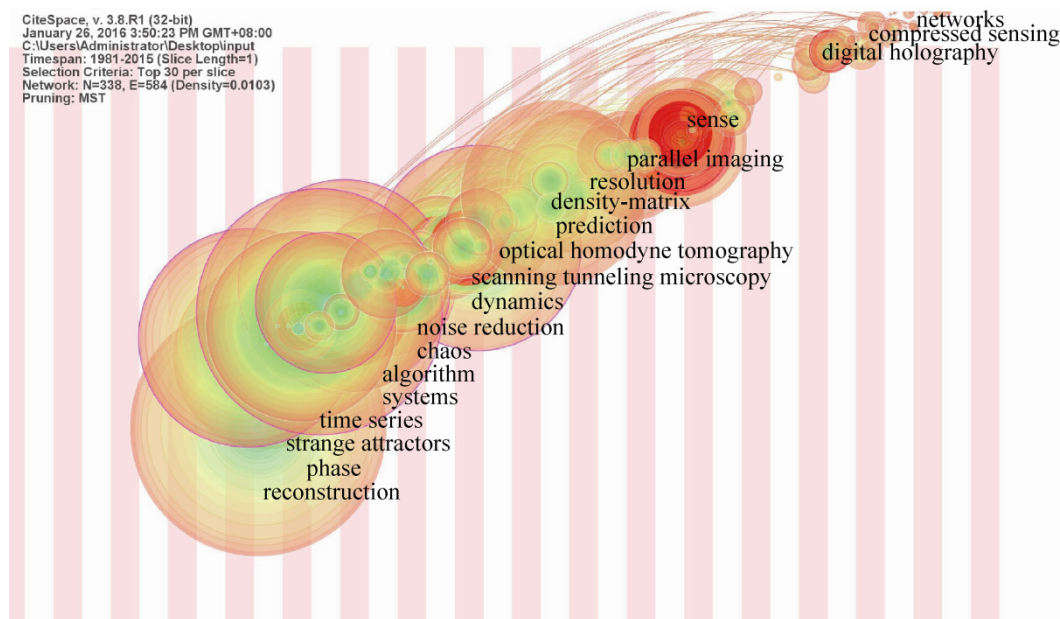


图 3 关键词时区图谱  
Fig.3 Time zone map of keyword

## 5 结论

为探究相空间重构理论的发展历程, 本文以 Web of Science 平台中的 1980-2015 年共 1500 篇相关文献为样本, 以 CiteSpaceIII 可视化引文分析软件为工具, 以文献计量学研究方法对可视化的图、表进行了分析, 分别讨论了文献的时间分布、国家中心度及机构分布、学科分布、引文及作者分布, 并绘制了关键词共现图及关键词时区图, 重点考察了研究热点及趋势。得出结论如下:

(1) 有关相空间重构文章大概是 20 世纪 80 年代出现的, 而且发文量一直处于上升的趋势, 所以, 可以初步确定, 有关相空间重构理论的研究越来越多, 该理论是值得研究的热点话题。

(2) 从空间分布来看, 美国的发文贡献率最大, 其次是德国和中国。但从中心度来看, 最具影响力的国家是法国。而且通过机构分布可以看出, 相空间重构领域研究机构甚多, 主要是各所大学, 且较为分散, 而且目前国际上尚不存在具有强大影响力的机构。

(3) 从学科分布来看, 相空间重构理论涉足于物理学、放射学、工程学、光学、化学、计算机科

学、数学以及经济管理等众多交叉学科。

(4) 从引文及作者分布来看, 相空间重构领域的主要领军人物分别为 Packard、Farmer、Takens 和 Kennel 等人。

(5) 从关键词来看, reconstruction、time-series、systems、phase、dynamics、strange attractors、chaos 和 algorithm 等出现的频次很高, 说明运用算法在时间序列等混沌动力系统中重构相空间的研究众多, 而且对奇异吸引子的研究是研究的重点之一。

(6) 从趋势分析来看, 相空间重构可以应用于任何非线性系统以获取原系统的真实信息, 其使用范围越来越广, 目前主要集中在传感技术和并行成像技术方面。

## 参考文献:

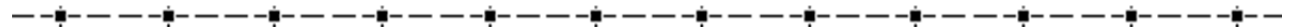
[1] 陈敏, 刘文华. 基于混沌理论的高速公路交通流预测研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(2):478-481.  
Chen Min, Liu Wenhua. Forecast Research of Traffic Flow for Freeway Based on Chaos Theory[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(2): 478-481.

[2] 张玉梅, 吴晓军, 白树林. 交通流量序列混沌特性分析及 DFPSOVF 预测模型[J]. 物理学报, 2013, 81(19): 120-128.  
Zhang Yumei, Wu Xiaojun, Bai Shulin, Chaotic

- Characteristic Analysis for Traffic Flow Series and DFPSOVF Prediction Model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 81(19): 120-128.
- [3] 王朝勇, 孙延风, 裴志利. 基于相空间重构理论的单变量金融时间序列波动预警[J]. *商业研究*, 2015, 58(2): 70-75.  
Wang Chaoyong, Sun Yanfeng, Pei Zhili. Application of Phase Space Reconstruction for Volatility Early Warning Using Univariate Financial Time Series[J]. *Commercial Research*, 2015, 58(2): 70-75.
- [4] 黄艳林, 李友荣, 肖涵, 等. 基于相空间重构与独立分量分析的局部独立投影降噪算法[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(1): 33-36.  
Huang Yanlin, Li Yourong, Xiao han, et al. Local Independent Projection De-noising Algorithm Based on Phase-space Reconstruction Technique and Independent Component Analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(1): 33-36.
- [5] 陈南祥, 魏杰. 混沌时间序列法在地下水位预测中的应用[J]. *水利与建筑工程学报*, 2011, 21(6): 1-4.  
Chen Nanxiang, Wei Jie. Application of Chaos Time Series Method in Groundwater Table Prediction[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2011, 21(6): 1-4.
- [6] 刘树勇, 朱石坚, 俞翔. 确定相空间重构嵌入维数的研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2008, 29(4): 374-381.  
Liu Shuyong, Zhu Shijian, Yu Xiang. Determinating the Embedding Dimension in Phase Space Reconstruction[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2008, 29(4): 374-381.
- [7] 胡瑜, 陈涛. 基于 C-C 算法的混沌吸引子的相空间重构技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(5): 425-430.  
Hu Yu, Chen Tao. Phase-space Reconstruction Technology of Chaotic Attractor based on C-C Method[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2012, 26(5): 425-430.
- [8] Kugiumtzis D. State Space Reconstruction Parameters in the Analysis of Chaotic Time Series—the Role of the Time Window Length[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena* (S0167-2789), 1996, 95(1): 13-28.
- [9] Kim H S, Eykholt R, Salas J D. Nonlinear Dynamics, Delay Times, and Embedding Windows[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena* (S0167-2789), 1999, 127(1): 48-60.
- [10] 向昌盛, 张林峰. 混沌时间序列预测模型参数同步优化[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 48(1): 4-7, 11.  
Xiang Changsheng, Zhang Linfeng. Simultaneous Optimization of Chaotic Time Series Prediction Model Parameters[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 48(1): 4-7, 11.
- [11] 王新迎, 韩敏. 多元混沌时间序列的多核极端学习机建模预测[J]. *物理学报*, 2015, 83(7): 137-143.  
Wang Xinying, Han Min. Multivariate Chaotic Time Series Prediction Using Multiple Kernel Extreme Learning Machine[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 83(7): 137-143.
- [12] Meng Li, Dong Lijun. Forecasting the Exchange Rate Using the Improved SAPSO Neural Network[J]. *Advanced Materials Research* (S1662-8985), 2012, 468-471: 1714-1720.
- [13] Meng Li. Forecasting the Exchange Rate Based on BP Neural Network in Combination with Simulated Annealing[J]. *Advanced Materials Research* (S1662-8985), 2013, 753(10): 2930-2934.
- [14] Meng Li, Sun Yang. Research on Automated Forex Trading System Based on BP Neural Network[J]. *Advanced Materials Research* (S1662-8985), 2013, 753(10): 3080-3084.
- [15] 孟力, 高鑫. 金融时间序列预测研究趋势可视化分析[J]. *情报科学*, 2014, 32((增 1): 79-84.  
Meng Li, Gao Xin. Visualization Analysis of the Research trend of Financial Time—series Forecasting[J]. *Information Science* December, 2014, 32(S1): 79-84.
- [16] Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, et al. Geometry from a Time Series[J]. *Physical Review Letters*(S0031-9007), 1980, 45(9): 712-716.
- [17] Ruelle D, Takens F. On the Nature of Turbulence[J]. *Communications in Mathematical Physics* (S0010-3616), 1971, 20(3): 167-192.
- [18] Takens F. Detecting Strange Attractors in Turbulence[M]. Springer Berlin Heidelberg (S0301-0449), 1981: 366-381.
- [19] Grassberger P, Procaccia I. Measuring the Strangeness of Strange Attractors[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena* (S0167-2789), 1983, 9(1): 189-208.
- [20] 董安, 潘宏侠. 柴油机振动信号的分形特征及故障诊断[J]. *噪声与振动控制*, 2014, 34(2): 144-147.  
Dong An, Pan Hongxia. Fractal Characteristics and Fault Diagnosis of Vibration Signal of Diesel Engines[J]. *Noise and Vibration Control*, 2014, 34(2): 144-147.
- [21] 付彧. 股票市场混沌特征量的提取及其分析[J]. *中外企业家*, 2015, 32(4): 99-101.  
Fu Yu. Extraction and Analysis of Chaotic



- Characteristics of Stock Market[J]. Chinese & Foreign Entrepreneurs, 2015, 32(4): 99-101.
- [22] 方仍存, 李超顺, 李静. 基于相空间重构和 QPSO-SVM 的超短期负荷预测[J]. 中国农村水利水电, 2014, 56(5): 142-145, 154.  
Fang Rengcun, Li Chaoshun, Li Jing. Ultra-short Term Load Forecasting Based on Phase Space Reconstruction and QPSO-SVM[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, 56(5): 142-145, 154.
- [23] 刘超, 刘东. 人民币对美元汇率波动的混沌性研究——基于 2005 年汇改后与汇改前数据的比较[J]. 金融理论与实践, 2014, 36(3): 12-18.  
Liu Chao, Liu Dong. Chaotic Research of the RMB Against the Dollar Exchange Rate Volatility—Based on the Comparison of Data Before and After the Exchange Rate Reform in 2005[J]. Financial Theory & Practice, 2014, 36(3): 12-18.
- [24] 张文超, 谭思超, 高璞珍. 基于 Lyapunov 指数的摇摆条件下自然循环流动不稳定性混沌预测[J]. 物理学报, 2013, 81(6): 61-68.  
Zhang Wenchao, Tan Sichao, Gao Puzhen. Chaotic Forecasting of Natural Circulation Flow Instabilities Under Rolling Motion Based on Lyapunov Exponents[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 81(6): 61-68.
- [25] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 短期风速时间序列混沌特性分析及预测[J]. 物理学报, 2015, 83(3): 246-257.  
Tian Zhongda, Li Shujiang, Wang Yanhong, et al. Chaotic Characteristics Analysis and Prediction for Short-term Wind Speed Time Series[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 83(3): 246-257.
- [26] 顾秋宇, 朱捷, 徐晶. 混沌时间序列在股票价格长期预测中的应用[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 108-111, 124.  
Gu Qiuyu, Zhu Jie, Xu Jing. Application of Chaotic Time Series Prediction of Long-term Stock Price[J]. Journal of Harbin University of Commerce(Natural Sciences Edition), 2015, 36(1): 108-111, 124.
- [27] 高鑫. 基于 RPNN-SA-PSO 混沌时间序列预测模型的程序化交易研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015: 46-57.  
Gao Xin. Programming Trading Research Based on the RPNN-SA-PSO Chaotic Time Series Prediction Model[D]. Xia Men: Xia Men University, 2015: 46-57.



(上接第 3166 页)

- [4] Wang Liuping. Control design methods with anti-windup mechanism for disturbance rejection and reference following[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control (S0142-3312), 2016, 38(6): 625-639.
- [5] 张兴华, 聂晶, 王德明. 感应电机直接转矩控制系统的变结构 Anti-windup 控制器[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(1): 77-81.  
Zhang Xinghua, Nie Jing, Wang Deming. Variable Structure Anti - windup Controller for Direct Torque Control System of Induction Motor[J]. Journal of Electric Machines and Control (S1007-449X), 2013, 17(1): 77-81.
- [6] Yongjin H, Xianlin H, Hang Y, et al. Design of controller for a target simulator based on optimal anti-windup theory[C]. Proceedings of the 25th Chinese Control Conference, Harbin, China, 2006: 1569-1572.
- [7] 牛里, 杨明, 唐思宇, 等. 基于积分状态预测的 Anti-windup PID 控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 146-151.  
Niu Li, Yang Ming, Tang Siyu, et al. Design of Anti - windup PID Controller Based on Integral State Prediction [J]. Journal of Electrotechnical Society (S1000-6753), 2014, 29(9): 146-151.
- [8] 齐亮, 贾廷纲, 侍洪波. 永磁同步电 Anti-windup 速度控制器设计[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(9): 17-20.  
Qi Liang, Jiatinggang, Shi Hongbo. Design of Anti - windup Speed Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Motor and Control Applications (S1673-6540), 2011, 38(9): 17-20.
- [9] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 35-39.  
Wang honghua. Switched Reluctance Motor Speed Control Technology. second edition[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2014: 35-39.