

我国系统科学与工程研究的演化与发展

刘海燕¹, 王宗水^{2*}, 汪寿阳^{3,4}

(1. 中国科学院大学人文学院, 北京 100190; 2. 北京信息科技大学经济管理学院, 北京 100192;
3. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190; 4. 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190)

摘要: 采用文献分析的方法, 将 1981 年~2015 年划分为七个时间段, 以系统科学与工程领域十三个重要期刊为样本, 分析我国系统科学与工程领域研究的发展历程. 结果显示: 1) 整体趋势上, 1981 年~2005 年我国系统科学与工程研究得到了快速发展, 2006 年~2015 年逐步趋于稳定; 2) 在研究内容上, 非线性系统、系统稳定性与系统优化等主要研究领域始终保持着较高的关注度, 神经网络、遗传算法与仿真等是解决系统科学问题的重要方式, 且随着时代的发展, 系统科学与工程的研究领域呈现与时俱进的特性; 3) 通过与国际研究的比较, 发现国际上更注重控制论、系统理论等理论研究, 但在大多数研究领域与国内研究具有一致性, 我国学者在系统科学与工程领域的作用显著提高.

关键词: 系统科学与工程; 科学研究; 演化与发展; 文献计量

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2017)03-0289-16

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.03.001

Evolution and development of system science and engineering research

Liu Haiyan¹, Wang Zongshui^{2*}, Wang Shouyang^{3,4}

(1. School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Economics and Management, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;
3. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Bibliometric method is used to study the development of researches on system science and engineering in China, and thirteen journals are selected as research samples and every five years as one stage from 1981 to 2015. Results show that in general, researches on system and engineering developed rapidly during 1981~2005, and stabilizes during 2006~2015. Nonlinear system, system stability, system optimization, etc., attracted more attention in the past 35 years; neural network, genetic algorithm, and simulation have been widely used to solve system science and engineering problems. Comparison of domestic and international researches in this field shows that international researches put more emphasis on cybernetics and system theory, that most of the research fields coincide with domestic research and that the international influence of Chinese scholars has significantly improved.

Key words: system science and engineering; scientific research; evolution and development; bibliometric

1 引言

系统科学与工程的研究可追溯到上个世纪二三十年代, 从贝塔朗菲提出一般系统论^[1]到强调复杂性学

收稿日期: 2016-12-07; 修订日期: 2017-03-12.

*通信作者

科的综合^[2,3],系统科学与工程在概念,基本理论,涉及学科,研究方法及应用领域等方面得到了快速的发展.而钱学森、许国志等老一辈科学家的工作为我国系统科学与工程研究奠定了基础^[4],系统科学与工程理论,方法技术与研究水平显著提升.钱学森^[5]在《论系统工程》一书中,系统的阐述了系统科学与工程的重大作用,系统科学的发展需要各行各业、各个部门的共同参与;许国志^[6]在《系统科学与工程研究》中,全面系统的阐述了系统科学与工程的基础理论、应用理论、工程应用以及与其它学科的关系;顾基发^[7]结合系统工程的特点,提出了“物理-事理-人理”的系统工程方法论,将社会学、心理学及行为科学等相关学科纳入到系统工程的研究中;王众托^[8]开拓了我国知识系统工程的研究领域,实现了知识管理与系统工程的对接;汪应洛^[9]将管理工程、系统工程和工业工程三个学科予以融合,深化了系统管理学思想.老一辈科学家的工作不仅深化了系统科学与工程研究的内涵,而且扩宽了研究的外延.

1980年中国系统工程协会的成立标志着我国系统科学与工程的研究进入了新的篇章.经过三十多年的发展,系统科学与工程的研究进一步细化、延伸,无论是研究的领域,还是研究的方法,都发生了显著的变化.尤其是近些年来,大数据、互联网+与人工智能等新兴领域的出现与发展,使系统科学与工程的研究领域进一步扩展,研究的方法更为复杂,涉及的问题更为细化.因此,通过有效的方法来梳理我国系统科学与工程研究30多年来的发展,一方面,能够了解我国系统科学与工程的研究内容、方法和问题,为未来的研究提供参考;另一方面,能够明确我国系统科学与工程研究发展的基本规律以及在国际上的地位,为国际影响力的提升提供参考的方向.

鉴于此,本文采用文献分析的方法,对系统科学与工程领域代表性期刊的分析,通过等时间段周期的划分,以定量的方式来揭示我国系统科学与工程研究的发展规律以及我国学者所做出的贡献;通过关键词网络图谱的绘制,分析比较不同阶段研究内容的变化;最后,结合时代背景指出可能的研究热点问题.

2 数据的获取与方法的选择

2.1 数据的获取

在数据的选取上,以《系统工程理论与实践》、《动力学与控制学报》、《复杂系统与复杂性科学》、《控制理论与应用》、《控制与决策》、《系统仿真学报》、《系统工程》、《系统工程学报》、《系统管理学报》、《系统科学与数学》、《信息与控制》、《应用科学学报》、《中国科学信息科学》以及《系统工程与电子技术》等系统科学与工程相关的刊物为数据源,通过中国知网(CNKI)进行检索,时间段设定为1981年~2015年,为了更好地展示不同阶段研究内容的变化,以每五年划分为一个时间段,即1981年~1985年,1986年~1990年,1991年~1995年,1996年~2000年,2001年~2005年,2006年~2010年和2011年~2015年等七个阶段.

在数据的搜集过程中,以CNKI为数据源,以上述13种刊物为条件,依次按时间段进行搜索,在数据的采集过程中去掉投稿须知,会议征稿,期刊目录和刊物介绍等非论文类条目.由于少数刊物在某一时间段发文量远远大于其他刊物,如2005年~2010年系统仿真学报发文量超过7700篇远远大于其他刊物,为了避免同一期刊对研究内容分析的干扰,在数据的获取过程中选取引用量最高的1000篇文献(近似于各期刊当期发文量均值)作为数据采集对象.同样,2010年~2015年系统仿真学报的发文量为约2800篇,亦大于其他刊物,故在数据的选取方面同样选取1000篇最高引用的文章为研究样本.通过所得数据的初步处理得到文献44076篇,每年的发表的文章量如图1所示.从图1中可以看出,1981年~2005年期间,我国系统科学与工程的研究得到了快速的发展,2006年~2015年这十年间,逐步趋于稳定,同样表明学者对系统科学与工程研究的关注度,由急剧增长到趋于平稳.

2.2 方法的选择

文献计量方法(bibliometrics)在学科发展分析、研究范式的演化等方面得到了广泛的应用,比如银行商

业模式的分析^[10]、社会网络研究范式的演化^[11]以及战略管理概念的动态发展^[12]等等,因此在方法的选择上,采用文献计量的方法,通过关键词的提取、筛选以及统计分析等方式,来分析系统科学与工程研究的发展;通过代表作者分析,梳理我国学者在系统科学及相关领域研究中的贡献。

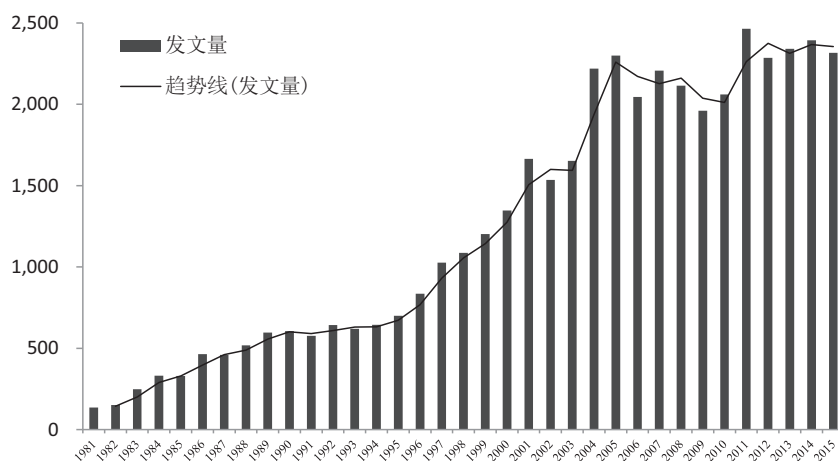


图1 2001年~2015年发文量统计

Fig. 1 Statistics of the number of published articles from 2001 to 2015

另外,采用社会网络分析方法^[13],根据关键词、作者的共现频次绘制不同关键词关系网络、作者间的合作网络,结合网络特性指标的计算,分析整体研究内容的发展以及我国学者在整个系统科学与工程研究中的作用。

3 结果分析

3.1 作者分析

经过三十多年的发展,在学者们的努力下,我国系统科学与工程研究取得了丰硕的成果.为了进一步了解学者对系统科学与工程研究的贡献,通过对作者发文量的排序,得出七个阶段较具有代表性的学者,如表1所示。

可以看出代表性学者的人均发文量随着时间的变化,整体上呈上升趋势,比如1981年~1985年排在前三位的张钟俊教授、张启人教授与王浣尘教授的发文量依次是21, 15和12,而到了2011年~2015年,排在前三位的刘思峰教授、汪寿阳教授与桂卫华教授的发文量依次为75, 60和41,后者明显高于前者,表明我国系统科学与工程研究在广大学者的共同努力下得到了快速发展.从表1中还可以发现,1981年~1995年三个时间段的代表学者的发文量,明显低于1996年~2015年三个时间段的代表作者,这与图1中1996年~2005年发文量显著增长相一致,表明该阶段是我国系统科学与工程研究至关重要的十年.另外,依次统计各个阶段发文量大于等于5的学者的数量依次为32, 109, 99, 433, 865, 913和1136,也反映出系统科学与工程研究的繁荣。

为了更加直观了解代表学者间合作网络结构的变化,本研究列举1981年~1985年与2011年~2015年两个阶段的作者合作关系网络予以比较说明,其他阶段不再详细介绍,具体如图2所示。

从图2中可以看出,合作网络中存在较多的孤立节点,主要因为再绘制合作网络关系图的过程中,避免网络结构过大删除了发文量小于5的作者,其网络可解释为系统科学领域内较具有代表性学者间的合作.在1981年~1985年和2011年~2015年两个阶段的网络图中,可以看出第一阶段形成了吴建中、王浣尘等为代表的主要合作网络;在第七阶段形成了以汪寿阳等学者为核心的主要合作网络,且由于研究领域的差

异性,在整个合作网络中还存在其他子网络,比如刘思峰,方志耕等形成的子网络,杨善林和张强等形成的子网络.另外,在网络规模上,第七阶段明显高于第一阶段,表明三十多年来,系统科学研究规模的壮大.

表1 部分代表学者及发文量统计

Table 1 List of partial scholars and number of published articles

排 序	1981~1985 作者	1981~1985 频次	1986~1990 作者	1986~1990 频次	1991~1995 作者	1991~1995 频次	1996~2000 作者	1996~2000 频次	2001~2005 作者	2001~2005 频次	2006~2010 作者	2006~2010 频次	2011~2015 作者	2011~2015 频次
1	张钟俊	21	张钟俊	27	戴冠中	29	刘永清	81	黄柯棣	51	刘思峰	81	刘思峰	75
2	张启人	15	王浣尘	25	徐南荣	24	孙优贤	70	邵惠鹤	49	张庆灵	54	汪寿阳	60
3	王浣尘	12	徐南荣	18	张嗣瀛	22	柴天佑	54	汪定伟	49	桂卫华	50	桂卫华	41
4	王恩平	10	吕勇哉	17	蒋慰孙	17	万百五	48	徐心和	43	汪寿阳	47	张 伟	39
5	韩京清	9	高为炳	16	席裕庚	16	张嗣瀛	46	张世英	39	王 伟	46	柴天佑	38
6	许可康	9	戴冠中	15	胡泽新	16	席裕庚	41	韩崇昭	37	吴 敏	43	张 强	38
7	吴健中	8	韩志刚	15	高为炳	16	汪定伟	38	孙优贤	37	王执铨	43	方志耕	36
8	刘 豹	8	黄小原	14	冯纯伯	15	戴冠中	37	王 伟	36	陈晓红	42	王 伟	35
9	熊光楞	7	陈 珽	14	邓自立	14	潘德惠	36	张嗣瀛	36	井元伟	40	党耀国	31
10	方俊鑫	7	柴天佑	13	刘晓平	14	冯纯伯	35	李 平	35	柴天佑	39	吴 敏	31
11	郭一新	7	朱广田	13	王浣尘	14	李敏强	33	于海斌	35	王耀南	33	陈庆伟	28
12	王朝珠	7	郑应平	13	张钟俊	13	徐心和	32	褚 健	34	党耀国	32	朱建军	28
13	卢桂章	7	韩京清	13	汪应洛	13	王子才	31	柴天佑	33	唐小我	32	李 军	27
14	刘裔宏	7	冯德兴	12	盛昭瀚	13	褚 健	30	王行仁	33	邱苑华	31	王 磊	26
15	陈 珽	6	万百五	12	刘裔宏	13	邵惠鹤	30	胡晓峰	32	张世英	31	阳春华	26
16	吴启光	6	王朝珠	11	刘永清	12	张世英	29	王浣尘	32	周德群	31	乔俊飞	25
17	王景才	6	于景元	11	万百五	12	寇纪淞	28	盛昭瀚	32	刘建业	30	樊治平	24
18	陈文德	6	冯纯伯	11	陈 珽	12	王浣尘	27	谢剑英	31	王春峰	30	王士同	24
19	李振裕	6	蒋慰孙	11	郑应平	11	毛宗源	27	徐泽水	31	迟国泰	29	王 勇	24
20	钟国群	5	陈森发	10	张世英	10	王树青	25	王执铨	31	汪定伟	29	陈晓红	23

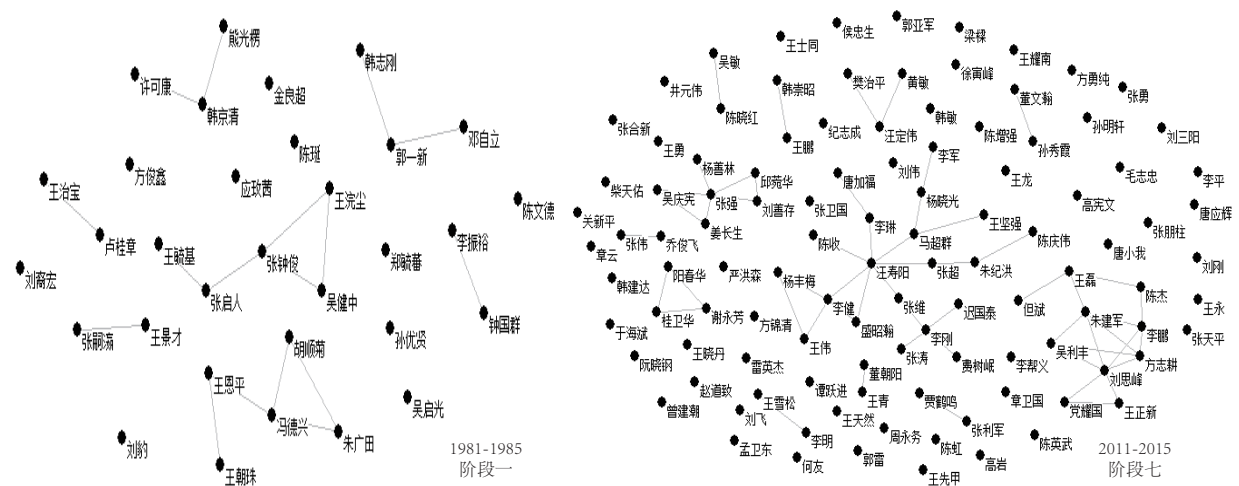


图2 部分作者合作关系网络(阶段1与阶段7)

Fig. 2 The collaboration relational networks of partial authors(the first stage and seventh stage)

3.2 研究机构分析

通过对44 076篇文献的发文机构进行统计分析并计算其出现频次的结果.在处理的过程中,首先将研究机构的名称进行一致化处理,以现有名称为准,如院系的转换,系部的转变等;然后,对同一名称的发文量进行求和,计算出最终的总的发文频次.结果显示,累计频次不小于50的研究机构113家,累计频次大于100的研究机构54家,总体上分布于信息与工程、自动化、经济与管理等主要学科,部分具有代表性的研究机构如表2所示,其中东北大学信息科学与工程学院、清华大学自动化系、天津大学管理与经济学部、中

国科学院数学与系统科学研究院和中南大学信息科学与工程学院位列前五.另外,在系统科学与工程的研究中,高等院校发挥了重要的作用.

3.3 研究内容分析

通过发文量及代表学者的初步分析,可以发现系统科学与工程研究经历了快速发展阶段,并进入了相对稳定的时期,那么为了进一步分析研究范式与研究内容的演化与发展,本文通过 Bicom 软件,提取每篇文章的关键词,并对关键词进行筛选,剔除不完整词汇、不规范词汇,以高频关键词为样本来研究不同时期的研究主题及内容,词频大于等于五的关键词的数量及累计百分比,如表 3 所示.整体上而言,高频关键词的数量逐渐增加,从阶段 1 的 275 增加到阶段 7 的 1 432,表明相关领域研究内容急剧增加;阶段 5 到阶段 7,词频大于 5 的关键词的数量都高于 1 000,且累计百分比处于 32% ~36% 之间,变化幅度较低,表明整体的研究规模趋于稳定.

表 2 部分研究机构与频次统计

Table 2 Partial research institute and frequencies classify statistics

序号	机构名称	出现频次	序号	机构名称	出现频次
1	东北大学信息科学与工程学院	889	16	中国科学技术大学自动化系	275
2	清华大学自动化系	771	17	西北工业大学自动化学院	261
3	天津大学管理与经济学部	751	18	天津大学系统工程研究所	221
4	中国科学院数学与系统科学研究院	604	19	南京理工大学自动化学院	213
5	中南大学信息科学与工程学院	543	20	上海交通大学自动化研究所	211
6	西安交通大学管理学院	527	21	西安交通大学系统工程研究所	209
7	中南大学商学院	463	22	浙江大学工业控制技术国家重点实验室	201
8	上海交通大学自动化系	432	23	北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院	191
9	北京航空航天大学经济管理学院	398	24	中国科学院上海冶金研究所	190
10	中国科学院沈阳自动化研究所	375	25	国防科技大学信息系统与管理学院	166
11	南京航空航天大学经济与管理学院	359	26	湖南大学工商管理学院	165
12	上海交通大学安泰经济与管理学院	346	27	国防科技大学机电工程与自动化学院	163
13	东北大学工商管理学院	339	28	东南大学经济管理学院	162
14	南京航空航天大学自动化学院	295	29	哈尔滨工程大学自动化学院	160
15	重庆大学经济与工商管理学院	285	30	电子科技大学经济与管理学院	156

表 3 词频大于等于 2 的关键词数量及累计百分比

Table 3 The number and cumulative percentage of keywords (words frequency ≥ 2)

阶段	1981~1985	1986~1990	1991~1995	1996~2000	2001~2005	2006~2010	2011~2015
数量	275	736	403	520	1 018	1 161	1 432
累计百分比%	19.341	30.936	26.575	31.782	35.796	33.650	32.343

为了进一步分析、比较不同阶段研究内容的变化,对关键词的频次进行了统计,部分高频关键词见表 4.在此基础上,本研究通过社会网络分析的方法,深入分析网络内部节点间关系间的强弱,探索系统科学及其相关研究的演化与发展,采用 Pajek 软件绘制了不同阶段关键词关系网络¹如图 3(a)~图 3(g).

由于 20 世纪 80 年代初期,我国系统科学处于起步阶段,所以在此阶段大于五的关键词数量最少,网络结构相对稀疏,如图 3(a)所示.其中数学模型、线性系统、传递函数、控制系统、最优控制以及极点配置等关键词不仅频次较高,而且占据了网络的核心地位,一定程度上表明此时的研究点更多地关注于数学模型以及系统科学的控制理论与方法.

在第二个阶段数学模型、线性系统、目标函数、极点配置、最优控制、状态反馈、非线性系统、控制系统以及自适应控制等成为主要的研究问题如如图 3(b)所示.其中数学模型的频次高达 102,表明在第一阶段研

¹由于关键词数量较多,为了提高社会网络可视化的效果,在绘制关键词网络的过程中,只列举部分高频词汇,阈值根据具体情况设定为 10、15 和 20,使网络的规模控制在 200 个节点以内.节点的大小表示节点在网络中中心性的大小,节点越大表明在网络中的中心度越高,线条的粗细表示节点间关系强度,线条越粗表明节点间关系越强.

通过对 2001~2005 五年系统科学主流期刊文章的关键词进行统计发现仿真、遗传算法、神经网络、建模、非线性系统、虚拟现实、模糊控制、线性矩阵不等式、稳定性和自适应控制等关键词的频次位列前十, 仿真居于首位, 表明此时其成为系统科学研究的一种主要方式. 另外, 虚拟现实较前几个阶段而言成为关注度较高的研究内容. 当然, 遗传算法、神经网络与非线性系统仍是主要的研究内容, 具有较高的关注度.

表 4 部分高频关键词

Table 4 Parts of high frequency keywords

序 号	1981~1985 关键词	1981~1985 频次	1986~1990 关键词	1986~1990 频次	1991~1995 关键词	1991~1995 频次	1996~2000 关键词	1996~2000 频次	2001~2005 关键词	2001~2005 频次	2006~2010 关键词	2006~2010 频次	2011~2015 关键词	2011~2015 频次
1	数学模型	46	数学模型	102	非线性系统	79	神经网络	231	仿真	446	遗传算法	289	遗传算法	163
2	线性系统	42	线性系统	80	神经网络	78	遗传算法	221	遗传算法	404	线性矩阵不等式	231	复杂网络	146
3	传递函数	39	目标函数	78	稳定性	69	非线性系统	136	神经网络	320	神经网络	173	仿真	144
4	控制系统	32	极点配置	70	仿真	65	稳定性	108	建模	150	仿真	165	线性矩阵不等式	140
5	最优控制	25	最优控制	63	鲁棒性	65	仿真	102	非线性系统	148	非线性系统	139	自适应控制	126
6	极点配置	24	状态反馈	59	自适应控制	64	自适应控制	101	虚拟现实	133	复杂网络	138	非线性系统	122
7	状态反馈	23	非线性系统	56	专家系统	61	模糊控制	98	模糊控制	123	支持向量机	127	神经网络	109
8	控制理论	22	控制系统	54	层次分析法	49	鲁棒控制	84	线性矩阵不等式	118	自适应控制	112	稳定性	107
9	目标函数	21	性能指标	51	预测控制	49	鲁棒性	83	稳定性	116	稳定性	103	供应链	104
10	充分必要条件	20	自适应控制	48	参数估计	43	不确定性	64	自适应控制	105	网络控制系统	102	多目标优化	100
11	微型计算机	19	离散系统	46	模糊控制	43	最优控制	59	故障诊断	100	供应链	94	滑模控制	95
12	决策分析	19	多变量	45	智能控制	42	模型	57	混沌	100	优化	92	粒子群优化	95
13	线性定常系统	18	参数估计	44	数学模型	41	变结构控制	54	鲁棒性	97	粗糙集	88	鲁棒性	93
14	多变量	18	专家系统	43	最优控制	41	优化	53	模型	89	模糊控制	85	支持向量机	91
15	多变量系统	18	控制理论	42	决策支持系统	39	层次分析法	50	优化	86	混沌	82	故障诊断	82
16	状态空间	17	多变量系统	40	建模	35	专家系统	49	复杂系统	83	时滞	81	优化	79
17	计算机模拟	17	传递函数	36	鲁棒控制	34	时滞	48	不确定性	79	建模	79	供应链协调	75
18	约束条件	16	仿真结果	36	线性系统	34	预测控制	48	供应链	78	预测	79	混沌	73
19	闭环系统	15	预测模型	35	极点配置	33	Petri网	46	系统仿真	77	最优控制	77	不确定性	72
20	离散系统	15	采样周期	34	多变量系统	32	决策支持系统	46	Petri网	74	不确定性	75	时滞	71

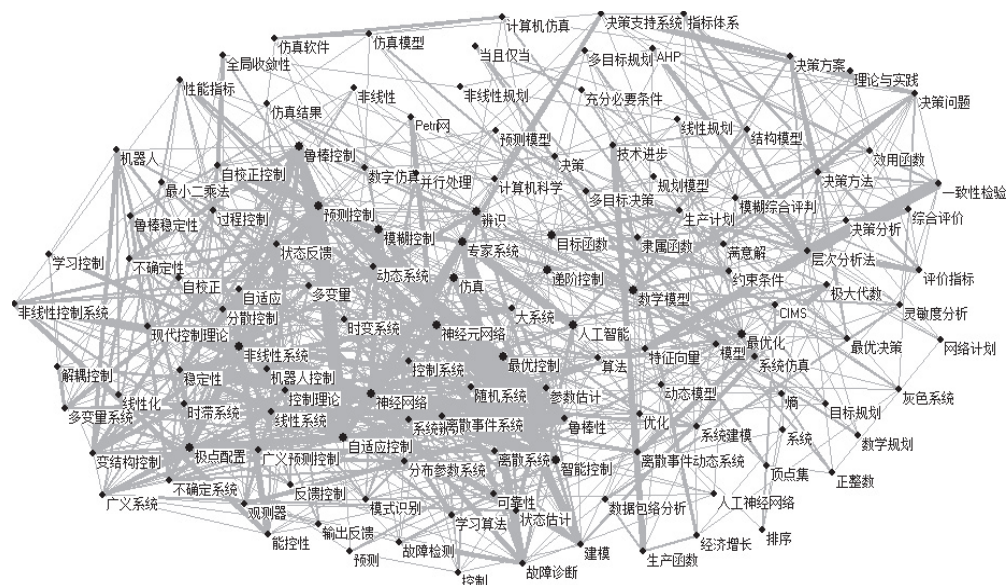


图 3(c) 阶段 3 关键词关系网络(1991~1995词频大于等于 10)

Fig. 3(c) Keywords relational network in the third stage(1991~1995 frequency ≥ 10)

在第六个阶段中如图 3(f), 遗传算法、线性矩阵不等式、神经网络、仿真、非线性系统、复杂网络、支持向量机、自适应控制、稳定性和网络控制系统位列前十, 其中复杂网络、支持向量机和网络控制系统较前几个阶段而言关注度得到了显著的提高, 尤其是复杂网络在系统科学研究中的应用得到了国内学者的广泛关注. 另外, 网络控制系统也是符合时代发展需求的研究点, 网络在系统科学与工程中的作用显而易见, 既是系统

总之, 经过 30 多年的发展, 我国系统科学及相关研究在研究内容上与时俱进, 既保持了传统系统科学研究内容的传承, 又体现了新兴问题的演化, 比如在非线性系统、系统稳定性与系统优化等主要研究问题上一一直具有较高的关注度, 神经网络、仿真与遗传算法等主要系统科学研究方法方面不断应用于解决新的系统科学问题。另外, 随着时代的发展一些新的问题需要运用系统科学的理论与方法去解决, 比如电子商务配送问题、网络系统的优化问题等。我国系统科学研究在国内学者的共同努力下与时俱进, 解决了诸多理论及实践中的难题。

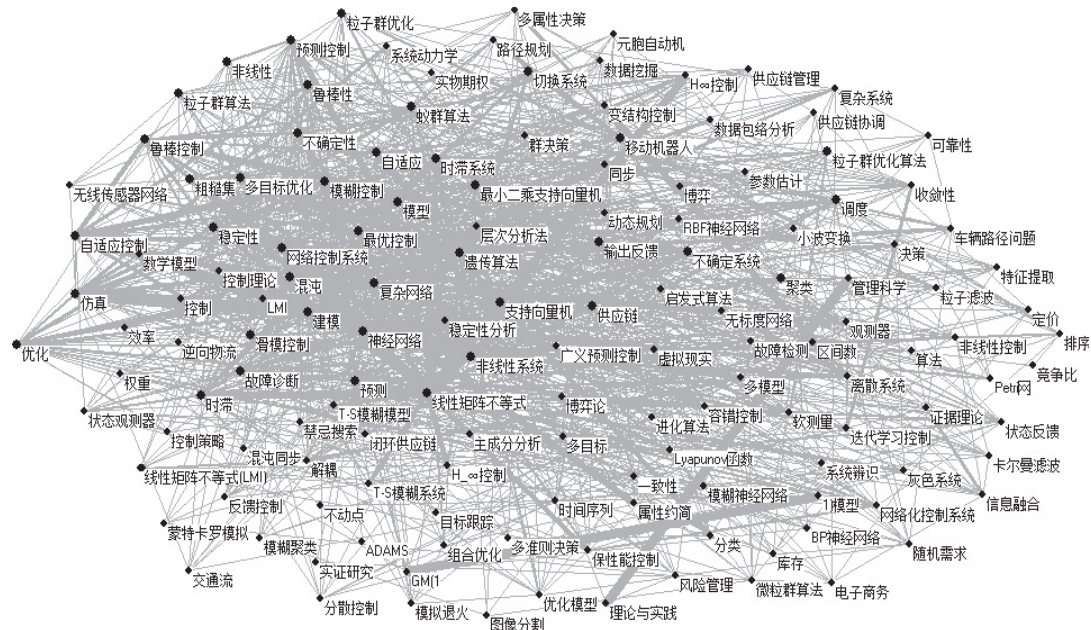


图 3(f) 阶段 6 关键词关系网络(1996 年~2000 年词频大于等于 20)

Fig. 3(f) Keywords relational network in the sixth stage (1996~2000 words frequency ≥ 20)



图 3(g) 阶段 7 关键词关系网络(1996 年~2000 年词频大于等于 20)

Fig. 3(g) Keywords relational network in the seventh stage(1996~2000 words frequency ≥ 20)

为了进一步分析关键词网络结构的整体变化, 本研究依次计算了网络的平均密度、集聚系数和平均度, 其计算公式如式(1)~式(3)所示^[11,14,15], 结果如表 5 所示。

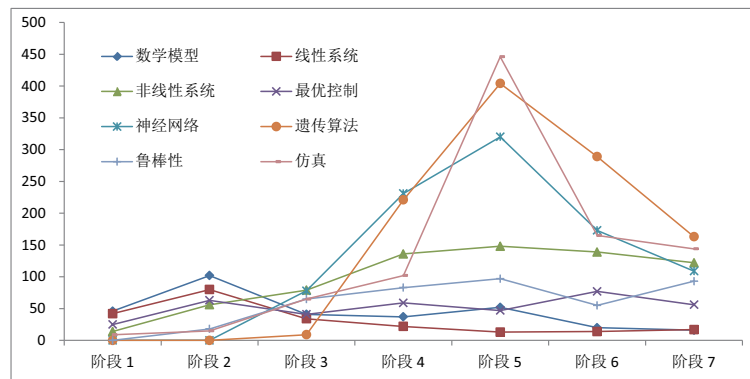


图 4 部分主要关键词词频变化趋势

Fig. 4 Changing tendency of partial major keywords frequency

表 5 关键词网络结构的特性指标

Table 5 The characteristic indicators of keywords network structure

指标阶段	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5	阶段 6	阶段 7
网络密度	0.254	0.251	0.112	0.146	0.138	0.116	0.090
集聚系数	0.472	0.452	0.303	0.332	0.334	0.306	0.271
网络平均度	27.890	51.176	29.910	31.725	34.290	34.324	29.685

$$d = 2M/N(N-1), \quad (1)$$

其中 d 表示网络平均密度, M 表示网络中的边数, N 表示网络中的节点数.

网络密度表示网络中节点连接的紧密程度, 通常会随网络规模的变大而减小.

$$CC_1 = \frac{2|E(G_1(v))|}{\deg(v)(\deg(v)-1)}, \quad (2)$$

其中 CC_1 表示只有一个邻居的结点的聚集度系数, 当将每个节点的集聚系数予以加权平均时则得到网络集聚系数, 是网络节点与邻居节点连接到相同节点的可能性, 反映了网络节点的内部一致性. $|E(G_1(v))|$ 表示具有一个邻居节点的与节点 v 相连的节点, $\deg(v)$ 表示节点 v 的度.

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{v \in V} \deg(v), \quad (3)$$

其中 $\bar{d}$ 表示网络中节点的平均度, V 表示网络所包含的所有节点的集合, 对于有向网络, 节点的度既包括入度(节点接收的链接的条数), 又包括出度(节点发出的链接条数), 本文中的网络为双向链接的有向网络.

从表 4 中可以看出, 高频关键词的平均网络密度、集聚系数整体上呈下降趋势, 表明各研究点之间的关系逐步降低, 一定程度上说明研究内容的进一步分散, 在传统研究的基础上出现了多个新的研究热点, 比如近些年发展比较迅速的电子商务、复杂网络等等, 体现出系统科学及相关研究的与时俱进. 而网络的平均度先经历了从第一阶段到第二阶段的快速增长, 到后面五个阶段逐步趋于稳定, 表明各个阶段研究内容间的关系网络在规模和结构上趋于稳定, 这与系统科学整体发展趋势基本一致.

4 国际系统科学研究的比较

4.1 数据的获取

为了进一步了解我国系统科学研究与国际上相关研究的异同, 以及国内学者在国际上的作用与地位, 在 Web of Science 数据库中, 系统科学与系统工程领域期刊作为样本, 选取 Advances in Complex Systems,

Cybernetics and Systems, Kybernetes, IEEE Systems Journal, International Journal of Systems Science, Journal of Systems Engineering and Electronics, Journal of Systems Science and Complexity, Journal of Systems Science and Systems Engineering, System, Systems Control Letters, Systems Engineering, Systems Research and Behavioral Science 和 Systemic Practice and Action Research 十三个国际刊物,一定程度上涵盖了系统科学与系统工程领域的国际知名期刊,通过与国内研究的比较,来全面分析近二十年来我国系统科学研究的发展与国际研究的异同.但由于国际期刊发文量远远小于国内刊物,所以在阶段划分上将其划分为1996年~2005年与2005年~2015年两个阶段.

通过高级检索的设定,以Web of Science数据库为数据源,以检索条件为SO = (Advances in Complex Systems) OR SO = (Cybernetics and Systems) OR SO = (Kybernetes) OR SO = (IEEE Systems Journal) OR SO = (International Journal of Systems Science) OR SO = (Journal of Systems Engineering and Electronics) OR SO = (Journal of Systems Science and Complexity) OR SO = (Journal of Systems Science and Systems Engineering) OR SO = (Systems Control Letters) OR SO = (Systems Engineering) OR SO = (Systems Research and Behavioral Science) OR SO = (Systemic Practice and Action Research),期间依次设定为(2005 OR 2004 OR 2003 OR 2002 OR 2001 OR 2000 OR 1999 OR 1998 OR 1997 OR 1996),第一个阶段初步检索得到4 685个结果,第二个阶段初步检索得到8 570条结果,经过筛选去除征稿通知、编委介绍与期刊说明等类似内容第一阶段得到4 584篇文献,第二阶段得到8 419篇文献,在数量上第二阶段明显高于第一阶段.

通过对发文量统计,其变化趋势如图5所示,可以看出,整体上两个阶段的发文量有较大的变化,第二阶段从2006年开始发文量以较快的速度增长,2008年逐步趋于稳定,在变化趋势上较中文期刊变化幅度较小,但是近五年的变化趋势基本一致且趋于稳定,保持在一定的范围内波动.

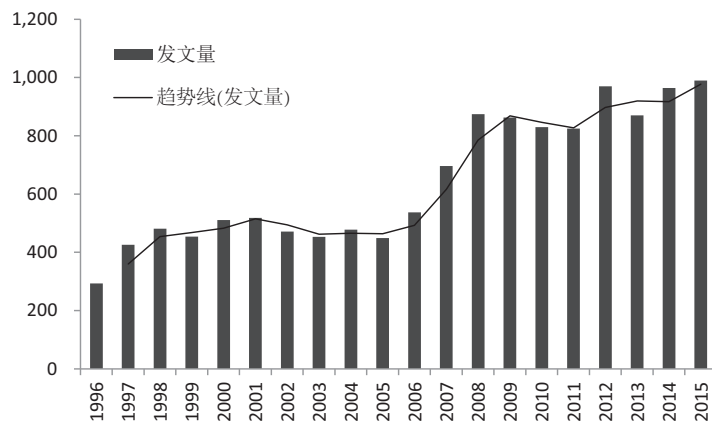


图5 1996年~2015年国际系统科学期刊年发文量变化趋势

Fig. 5 The number of published articles of international journals from 1996 to 2015

4.2 与国内研究的比较

同样,通过Bicomb软件对关键词以及作者发文量进行统计,其中部分代表性的关键词如表6所示.其中控制论(cybernetics)在两个阶段都排在第一位,而且远远高于排在第二位的稳定性(stability)和系统理论(systems theory),这与国内近20年的研究存在一定的差异,从两者的比较发现国内的相关研究更多地关注于新的方法如神经网络、遗传算法在系统科学研究中的应用,而国际相关研究更侧重于控制论、系统理论等.当然在非线性系统、稳定性、模型及仿真等方面与国内的研究趋势相一致,表明国际上的系统科学及相关研究同样关注于系统科学的研究模型、稳定性、系统的复杂性以及最优控制等问题的解决.另外,通过对关键词整体分析发现,第一阶段词频大于等于5的291个,累计百分比39.08%,第二阶段词频大于等于5的有868个,累计百分比30.42%.为了进一步分析关键词间的关系,绘制两阶段关键词网络如图6所示.

在两阶段关键词网络中控制论(cybernetics)不仅具有最高的频次,且都处于网络的核心位置,与其连接的关键词数量高,且共现频次较大,表明两阶段中国国际上系统科学及相关研究是以控制论为核心的,在不同的时间段具有高度的一致性.另外,在两阶段中,较第一阶段而言,主要高频关键词具有较强的一致性,但是一些新的热点也显现出来,如多代理系统(multi-agent systems),模糊逻辑(fuzzy logic),转换系统(switched systems)以及系统动力学(system dynamics)等相关研究的热度增强.

表 6 两阶段部分代表性关键词
Table 6 Partial representative keywords of the two stages

序 号	关键字段	阶段 1 频次	阶段 1 累计百分比%	关键字段	阶段 2 频次	阶段 2 累计百分比%
1	cybernetics	740	6.685 9	cybernetics	709	1.929 9
2	stability	68	7.300 3	systems theory	149	2.335 5
3	nonlinear systems	65	7.887 6	nonlinear systems	139	2.713 8
4	systems	62	8.447 8	stability	129	3.064 9
5	modelling	56	8.953 7	modelling	102	3.342 6
6	complexity	45	9.360 3	linear matrix inequality	99	3.612 1
7	stabilization	43	9.748 8	systems thinking	93	3.865 2
8	systems theory	43	10.137 3	LMI	92	4.115 6
9	controllability	41	10.507 8	decision making	90	4.360 6
10	nonlinear control	39	10.860 1	multi-agent systems	88	4.600 1
11	automation	39	11.212 5	adaptive control	86	4.834 2
12	robust stability	37	11.546 8	simulation	79	5.049 3
13	linear systems	37	11.881 1	action research	74	5.250 7
14	systems thinking	36	12.206 4	complexity	72	5.446 7
15	learning	34	12.513 6	switched systems	70	5.637 2
16	adaptive control	34	12.820 7	systems engineering	64	5.811 4
17	information	34	13.127 9	fuzzy logic	63	5.982 9
18	action research	33	13.426 1	optimal control	63	6.154 4
19	optimal control	33	13.724 3	system dynamics	62	6.323 2
20	research	32	14.013 4	stabilization	58	6.481 0



图 6(a) 阶段 1 关键词网络(词频大于等于 10)²

Fig. 6(a) Keywords network in the first stage (frequency ≥ 10)

²在绘图的过程中,考虑到节点的数量以及可视化效果,对关键词的词频依次做了处理,分别定为10和20,节点的大小与其中心性值相一致,即节点越大其中心性越高,在网络中的相对重要性也越高.

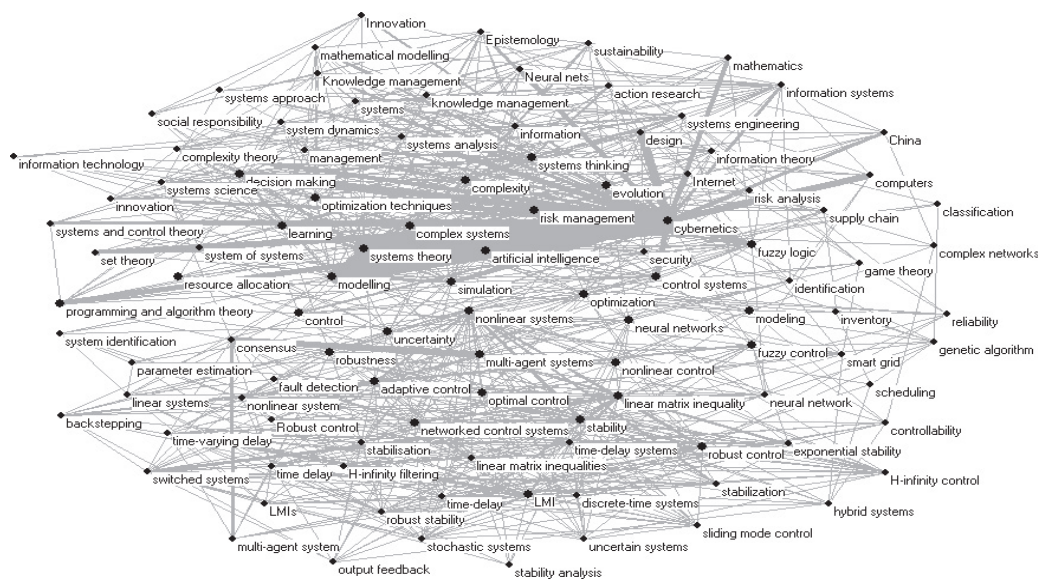


Fig. 6(b) Keywords network in the second stage (frequency ≥ 20)

通过计算两阶段网络密度、集聚系数以及平均度其结果如表 7 所示. 可以发现第二阶段关键词网络的三个指标都高于第一个阶段, 表明尽管第二个阶段的关键词的数量明显高于第一个阶段, 但是高频关键词间的关系更为密切, 网络的集聚性更强.

通过比较发现,第一阶段高频作者间的合作较少,因此网络中存在大量的孤立节点,网络结构也相对稀疏,而在第二阶段形成了明显的合作网络,孤立节点的数量明显低于第一阶段,而且在网络中中国学者具有较高的比例,表明在促进系统科学领域间的合作方面中国学者起到了重要的作用.

为了更直观展示两个阶段作者间的合作关系,在研究过程中,绘制了两阶段的作者合作关系网络,为了保证图片的可视化效果,频次阈值依次设定为 7 和 10,其中线条的粗细表示合作频次的高低,其网络结构如图 7 所示,左侧表示阶段 1 的作者合作关系网络,箭头右侧表示阶段 2 作者间合作关系网络。

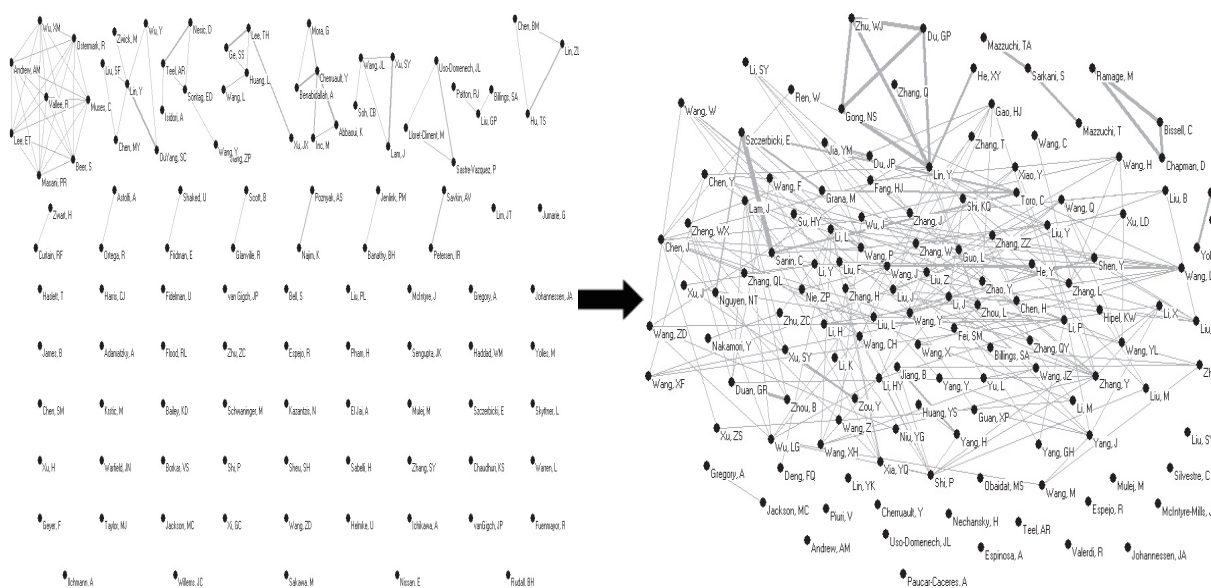


Fig. 7 Collaboration network of two stages

4.3 我国学者国际影响力的变化

在研究过程中,根据发文量对代表性学者做了初步统计分析,第一阶段发文量大于等于 5 的作者 205 人,累计百分比 21.81%,其中大陆学者 53 人,第二阶段发文量大于等于 5 的作者 580 人,累计百分比 23.60%,其中大陆学者 369 人,发文频次达到 3 064. 其中在第二阶段,中国学者的数量明显增多,表明在系统科学及相关领域国内学者的国际影响逐步增强,部分代表性学者如表 8 所示.

表 7 关键词网络结构特性指标
Table 7 The keywords network structure characteristic indicators

指标阶段	阶段 1	阶段 2
网络密度	0.123	0.165
集聚系数	0.317	0.387
网络平均度	31.016	35.383

表 8 部分代表性作者
Table 8 Parts of representative authors

序 号	阶段 1			阶段 2		
	作者	频次	累计百分比%	作者	频次	累计百分比%
1	Rudall B H	77	0.893 0	Lin Y	64	0.293 5
2	Cherruault Y	71	1.716 3	Andrew A M	57	0.554 9
3	Andrew A M	60	2.412 2	Rudall B H	54	0.802 6
4	Lin Y	34	2.806 4	Szczerbicki E	54	1.050 2
5	Flood R L	32	3.177 5	Wang L	49	1.274 9
6	Szczerbicki E	25	3.490 7	Mulej M	48	1.495 1
7	Lam J	24	3.780 6	Zhang Y	38	1.669 3
8	Lee, E T	20	4.058 9	Wang Y	35	1.829 9
9	Lee T H	20	4.290 9	Li L	29	1.962 9
10	OuYang S C	19	4.522 8	Liu SF	29	2.095 8
11	van Gigch J P	18	4.743 1	Sanin C	28	2.224 3
12	Sontag E D	18	4.951 9	Jiang B	27	2.348 1
13	Adamatzky A	17	5.160 6	Wang J	27	2.471 9
14	Ostermark R	16	5.357 8	Liu Y	26	2.591 1
15	Chen S M	16	5.543 3	Chen J	26	2.710 4
16	Savkin A V	16	5.728 9	Wang W	25	2.825 0
17	Jackson M C	15	13.127 9	Liu J	24	2.935 1
18	Lin Z L	15	13.426 1	Shi P	24	3.045 2
19	Lim J T	15	13.724 3	Zhao J	24	3.155 2
20	Billings S A	14	14.013 4	Zhang Q L	24	3.265 3

5 未来可能的研究方向

通过对国内外系统科学与研究的分析,尤其是近五年研究趋势变化,结合系统科学与工程的特点,本文认为在如下几个大的方面会成为研究的重要方向.

1)复杂系统及应用

随着上个世纪末,复杂网络研究的兴起^[2,21],学者们将复杂网络研究的理论与方法应用于解决系统科学与工程问题^[2,21],并且随着时代的发展,系统科学需要解决的问题表现出更高的复杂性.系统科学研究既要考虑到系统全局性,又要考虑到系统组成要素的多样性与差异性,且系统通常具有动态性,进一步增加了系统科学问题研究的复杂性.因此,复杂系统的思想,理论,方法及应用仍是系统科学与工程研究的一个重要方向.

2) 智能控制及管理

智能系统^[2], 智能算法^[2]等在系统科学与工程研究中具有重要的作用. 随着人工智能技术的兴起, 智能控制及管理将会得到更广泛的关注. 一方面, 智能控制的思想将会进一步应用于传统产业, 如农业、制造业、交通运输业等, 能够促进产业结构的优化; 另一方面, 在服务业、信息技术及相关新兴产业中将会得到更广泛的应用, 高效的解决其存在的系统性问题. 因此, 控制优化的新理论与方法将会进一步应用于处理多层次、多维度、强非线性及强耦合的复杂工业过程, 安全可靠、自学习与自适应的智能控制技术的探索与实践将会是关注的热点.

3) 现代物流及优化

网络消费的发展导致了物流行业的变革与发展^[2]. 现代物流及其优化关系到人们的日常消费、企业的经营绩效与城市的交通治理^[2]. 尽管新技术、新方法不断的应用于物流管理当中, 但是在标准化、规范化、系统化、信息化与集成化等方面仍有待于进一步优化, 而系统科学的理论与方法与现代物流的结合是解决这一问题的重要方式, 是理论与实践应用的重要方面.

4) 网络监控及检测

近些年来, 网络已经成为社会的重要组成要素^[2], 而网络环境下的系统安全问题将会成为一个重要的研究问题, 包括网络系统安全评估的理论与方法、网络安全问题的识别与发现和网络安全事件的影响与处理等等, 从理论、方法到技术创新与应用, 网络监控与检测的研究意义重大.

5) 大数据挖掘及处理

大数据时代的到来, 首先要解决的问题便是数据的挖掘与处理难题, 而数据量巨大, 结构复杂, 高动态性和高时效性等都加大了大数据研究及其应用的难度^[25,26]. 因此, 大数据挖掘的理论与方法、高性能的计算与存储和大数据的人机融合系统与应用, 大数据在交通, 金融与网络安全等领域的应用将会是未来几年系统科学与工程研究的一个重要领域.

6 结束语

通过文献分析的方法梳理了我国 30 多年来, 系统科学与工程研究的发展历程, 可以看出经过我国学者的共同努力, 系统科学与工程研究取得了丰硕的成果, 不仅在研究的规模上增长迅速, 而且在研究的领域、研究的质量方面得到了显著地扩展与提高, 在国际上的影响力日益增强. 系统科学与工程研究始终与时代发展相一致、与时俱进, 对我国科技发展、社会繁荣具有重要的影响. 在未来几年内复杂系统, 智能控制, 现代物流, 网络监管和大数据挖掘等领域将会得到较高的关注.

当然, 文献分析存在着一定的局限性, 主要表现为: 1) 研究的结论与样本的选择密切相关, 本研究仅选取了部分具有代表性的系统科学与工程研究的期刊, 而未被选为研究对象的期刊也会发表相关的成果, 因此, 部分学者的贡献没有被完全体现; 2) 在研究方法上, 通过关键词提取与网络图谱的绘制, 能够体现出研究内容的相对重要性及其不同领域间的联系, 但是内容的深度挖掘相对不足; 3) 研究阶段的划分的目的在于分析比较不同阶段的研究内容、主要学者及发展趋势的变化, 因此通常不存在统一的阶段划分标准.

参考文献:

- [1] Davidson M. Uncommon sense: The life and thought of Ludwig von Bertalanffy (1901~1972), father of general systems theory. *American Scientist*, 1984, 72(1): 95.
- [2] Tomović R. Systems science and world order: Selected studies. *European Journal of Operational Research*, 1984, 15(1): 132-133.
- [3] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域: 开放的复杂巨系统及其方法论// 天津: 中国系统工程学会第六次年会. 1990.
Qian X S, Yu J Y, Dai R W. A new scientific field: Open complex giant systems and methodology // Tianjin: The Sixth Annual Meeting of the Systems Engineering Society of China. 1990. (in Chinese)
- [4] 陈建新. 我国系统科学研究的发展与成就. *系统科学学报*, 1995(4): 75-79.
Chen J X. Development and achievement of the system science research of China. *Chinese Journal of Systems Science*, 1995(4):

- 75–79. (in Chinese)
- [5] 钱学森. 论系统工程. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
Qian X S. System Engineering. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007. (in Chinese)
- [6] 许国志. 系统科学与工程研究. 上海: 上海科技教育出版社, 2001.
Xu G Z. Systems Science and Engineering. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2001. (in Chinese)
- [7] 顾基发. 物理–事理–人理系统方法论: 理论与应用. 上海: 上海科技教育出版社, 2006.
Gu J F. Wuli-Shili-Renli System Approach: Theory and Application. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2006. (in Chinese)
- [8] 王众托. 知识系统工程. 北京: 科学出版社, 2016.
Wang Z T. Knowledge Syetem Engineering. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [9] 汪应洛. 系统工程. 第 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
Wang Y L. System Engineering. 4th Edition. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [10] 任小勋, 乔 晗, 何乐平, 等. 基于文献计量模型的银行商业模式研究分析. 系统工程理论与实践, 2016, 36(5): 1169–1179.
Ren X X, Qiao H, He L P, et al. A bibliometric study on bank business models. Systems Engineering: Theory & Practice, 2016, 36(5): 1169–1179. (in Chinese)
- [11] 王宗水, 赵 红, 刘 宇, 等. 社会网络研究范式的演化、发展与应用. 情报学报, 2015, 34(12): 1235–1245.
Wang Z S, Zhao H, Liu Y, et al. Evolution, development and application of social network paradigm: Evidence from CSSCI database of China. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2015, 34(12), 1235–1245. (in Chinese)
- [12] Ronda-Pupo G A, Guerras-Martin L Á. Dynamics of the evolution of the strategy concept 1962~2008: A co-word analysis. Strategic Management Journal, 2012, 33(2): 162–188.
- [13] Scott J. Social Network Analysis. London: Sage, 2012.
- [14] 郭世泽, 陆哲明. 复杂网络基础理论. 北京: 科学出版社, 2012.
Guo S Z, Lu Z M. Complex Network Theory. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [15] 汪小帆, 李 翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Wang X F, Li X, Chen G R. Complex Networks: Theory and Application. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [16] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. Nature, 1998, 393(6684): 440–442.
- [17] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999, 286(509): 509–512.
- [18] 戴 华, 林 杰. 社会系统 MAS 分布仿真中的 Agent 优化调度算法. 系统工程学报, 2015, 30(6): 844–851.
Dai H, Lin J. Algorithm for agent optimal dispatching in MAS distributed simulations of social system. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(6): 844–851. (in Chinese)
- [19] 庄新田, 张 鼎, 苑 莹, 等. 中国股市复杂网络中的分形特征. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2): 273–282.
Zhuang X T, Ding Z, Ying Y, et al. Fractal characteristic of the Chinese stock market complex network. System Engineering: Theory & Practice, 2015, 35(2): 273–282. (in Chinese)
- [20] 诸克军, 郭海湘, 高艳卉, 等. 金属矿山组合品位的智能系统优化. 系统管理学报, 2010, 19(5): 509–513.
Zhu K J, Guo H X, Gao Y H, et al. Intelligent system optimization for combinational grades in metal mine. Journal of Systems & Management, 2010, 19(5): 509–513. (in Chinese)
- [21] 崔南方, 赵 雁, 田文迪. 基于智能算法的双目标鲁棒性项目调度. 系统管理学报, 2015, 24(3): 379–388.
Cui N F, Zhao Y, Tian W D. Bi-objective robust project scheduling based on intelligent algorithms. Journal of Systems & Management, 2015, 24(3): 379–388. (in Chinese)
- [22] 何黎明. 2014 年我国物流业发展回顾与 2015 年展望. 中国流通经济, 2015(2): 50–54.
He L M. The review of the development of China’s logistics industry in 2014 and the outlook of 2015. China Business & Market, 2015(2): 50–54. (in Chinese)
- [23] 李 锐, 黄 敏, 张瑞友, 等. 考虑蓄意攻击的第四方物流弹性网络设计模型. 系统工程学报, 2016, 31(5): 657–665.
Li R, Huang M, Zhang R, et al. Model for resilient network design of fourth-party logistics with proactive attacks considered. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(5): 657–665. (in Chinese)
- [24] 杨 威, 张秋波, 兰月新, 等. 网民规模和结构对网络舆情的驱动影响. 现代情报, 2015, 35(4): 145–149.
Yang W, Zhang Q B, Lan Y X, et al. Driver affection of the network users’ size and structure to online public opinions. Journal of Modern Information, 2015, 35(4): 145–149. (in Chinese)
- [25] 孟小峰, 慈 祥. 大数据管理: 概念、技术与挑战. 计算机研究与发展, 2013, 50(1): 146–169.
Meng X F, Ci X. Big data management: Concepts, techniques and challenges. Journal of Computer Research S&S development, 2013, 50(1): 146–169. (in Chinese)