

AIGC检测 · 简洁报告单

NO:CNKIAIGC2026SJ_20260574860684

检测时间:2026-05-06 21:54:09

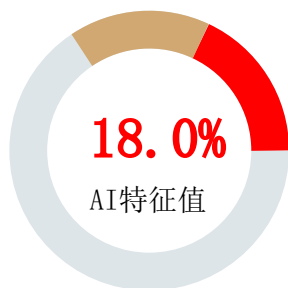
篇名: 基于牵引控制的分数阶有向复杂网络同步问题研究

作者: 陈小川

单位:

文件名:

全文检测结果



AI特征值: 18.0%
AI特征字符数: 3810
总字符数: 21170

- AI特征显著 (计入AI特征字符数)
- AI特征疑似 (未计入AI特征字符数)
- 未标识部分

AIGC片段分布图

前部20%

AI特征值: 3.6%

AI特征字符数: 762

中部60%

AI特征值: 10.8%

AI特征字符数: 2286

后部20%

AI特征值: 3.6%

AI特征字符数: 762



分段检测结果

序号	AI特征值	AI特征字符数/章节(部分)字符数	章节(部分)名称
1	18.0%	3810 / 21170	论文全文

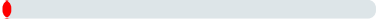







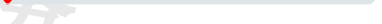
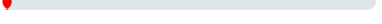
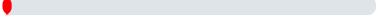



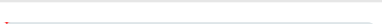



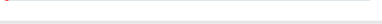
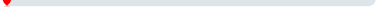
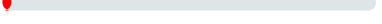
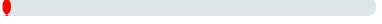
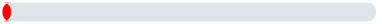






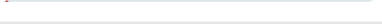

1. 论文全文

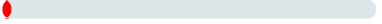



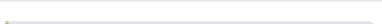




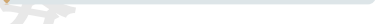
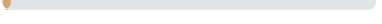
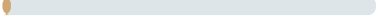




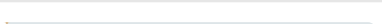



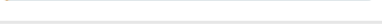
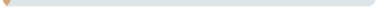
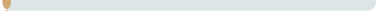
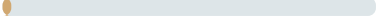
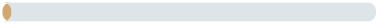







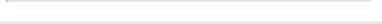

AI特征值: 18.0% AI特征字符数 / 章节(部分)字符数: 3810 / 21170

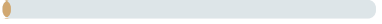



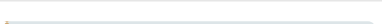




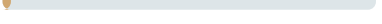
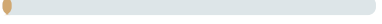




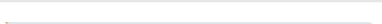



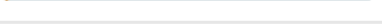
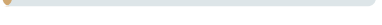
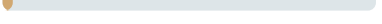
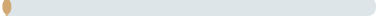
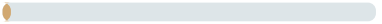







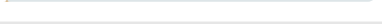

片段指标列表

序号	片段名称	字符数	
1	片段1	36	0.2%

2	片段2	161		0.8%
3	片段3	73		0.3%
4	片段4	44		0.2%
5	片段5	61		0.3%
6	片段6	29		0.1%
7	片段7	67		0.3%
8	片段8	81		0.4%
9	片段9	46		0.2%
10	片段10	49		0.2%
11	片段11	65		0.3%
12	片段12	69		0.3%
13	片段13	54		0.3%
14	片段14	49		0.2%
15	片段15	30		0.1%
16	片段16	68		0.3%
17	片段17	86		0.4%
18	片段18	45		0.2%
19	片段19	61		0.3%
20	片段20	56		0.3%
21	片段21	133		0.6%
22	片段22	56		0.3%
23	片段23	68		0.3%
24	片段24	22		0.1%
25	片段25	44		0.2%
26	片段26	135		0.6%
27	片段27	62		0.3%
28	片段28	123		0.6%
29	片段29	52		0.2%
30	片段30	53		0.3%
31	片段31	59		0.3%
32	片段32	53		0.3%
33	片段33	42		0.2%
34	片段34	54		0.3%
35	片段35	40		0.2%

36	片段36	43		0.2%
37	片段37	88		0.4%
38	片段38	35		0.2%
39	片段39	48		0.2%
40	片段40	28		0.1%
41	片段41	85		0.4%
42	片段42	110		0.5%
43	片段43	36		0.2%
44	片段44	121		0.6%
45	片段45	63		0.3%
46	片段46	70		0.3%
47	片段47	57		0.3%
48	片段48	53		0.3%
49	片段49	54		0.3%
50	片段50	33		0.2%
51	片段51	26		0.1%
52	片段52	14		0.1%
53	片段53	37		0.2%
54	片段54	43		0.2%
55	片段55	42		0.2%
56	片段56	43		0.2%
57	片段57	23		0.1%
58	片段58	23		0.1%
59	片段59	16		0.1%
60	片段60	25		0.1%
61	片段61	15		0.1%
62	片段62	25		0.1%
63	片段63	40		0.2%
64	片段64	45		0.2%
65	片段65	22		0.1%
66	片段66	60		0.3%
67	片段67	52		0.2%
68	片段68	26		0.1%
69	片段69	33		0.2%

70	片段70	45		0.2%
71	片段71	42		0.2%
72	片段72	37		0.2%
73	片段73	144		0.7%
74	片段74	46		0.2%
75	片段75	20		0.1%
76	片段76	19		0.1%
77	片段77	52		0.2%
78	片段78	29		0.1%
79	片段79	31		0.1%
80	片段80	23		0.1%
81	片段81	54		0.3%
82	片段82	58		0.3%
83	片段83	17		0.1%
84	片段84	41		0.2%
85	片段85	32		0.2%
86	片段86	20		0.1%
87	片段87	38		0.2%
88	片段88	33		0.2%
89	片段89	27		0.1%
90	片段90	28		0.1%
91	片段91	50		0.2%
92	片段92	32		0.2%
93	片段93	33		0.2%
94	片段94	28		0.1%
95	片段95	37		0.2%
96	片段96	26		0.1%
97	片段97	14		0.1%
98	片段98	25		0.1%
99	片段99	34		0.2%
100	片段100	43		0.2%
101	片段101	47		0.2%
102	片段102	63		0.3%
103	片段103	34		0.2%

104	片段104	30		0.1%
105	片段105	19		0.1%
106	片段106	27		0.1%
107	片段107	33		0.2%
108	片段108	51		0.2%
109	片段109	77		0.4%
110	片段110	64		0.3%
111	片段111	35		0.2%
112	片段112	43		0.2%
113	片段113	21		0.1%
114	片段114	63		0.3%
115	片段115	18		0.1%
116	片段116	29		0.1%
117	片段117	18		0.1%
118	片段118	38		0.2%
119	片段119	18		0.1%
120	片段120	52		0.2%
121	片段121	70		0.3%
122	片段122	28		0.1%
123	片段123	76		0.4%
124	片段124	137		0.6%
125	片段125	35		0.2%
126	片段126	23		0.1%
127	片段127	31		0.1%
128	片段128	18		0.1%
129	片段129	42		0.2%
130	片段130	42		0.2%
131	片段131	32		0.2%
132	片段132	27		0.1%
133	片段133	45		0.2%
134	片段134	24		0.1%
135	片段135	79		0.4%
136	片段136	60		0.3%
137	片段137	58		0.3%

138	片段138	76	<div><div></div></div>	0.4%
139	片段139	48	<div><div></div></div>	0.2%
140	片段140	54	<div><div></div></div>	0.3%
141	片段141	56	<div><div></div></div>	0.3%
142	片段142	99	<div><div></div></div>	0.5%
143	片段143	46	<div><div></div></div>	0.2%
144	片段144	64	<div><div></div></div>	0.3%
145	片段145	47	<div><div></div></div>	0.2%
146	片段146	49	<div><div></div></div>	0.2%
147	片段147	36	<div><div></div></div>	0.2%
148	片段148	65	<div><div></div></div>	0.3%
149	片段149	65	<div><div></div></div>	0.3%
150	片段150	44	<div><div></div></div>	0.2%

片段详情

NO. 1

片段1

字符数：36

AI特征：显著

0.2%

摘要：复杂网络同步控制在电力系统、生物网络及信息传播等领域具有重要意义。

NO. 2

片段2

字符数：161

AI特征：显著

0.8%

Abstract:Synchronization of complex networks has been widely studied due to its applications in power systems, biological networks, and information transmission.

NO. 3

片段3

字符数：73

AI特征：显著

0.3%

复杂网络通常由大量相互作用的个体（节点）通过一定的连接关系（边）构成，这类系统在互联网、电力系统、生物神经网络以及社会系统等实际场景中都可以看到。

NO. 4

片段4

字符数：44

AI特征：显著

0.2%

需要指出的是，在很多实际网络中，强连通性或存在有向生成树这样的理想条件并不一定能够满足。

NO. 5

片段5

字符数：61

AI特征：显著

0.3%

另一方面，分数阶微积分可以看作是对传统整数阶微积分的一种推广，其基本思想是将微分与积分的阶次从整数扩展到任意实数甚至复数。

NO. 6

片段6

字符数：29

AI特征：显著

0.1%

从发展过程来看，分数阶微积分的相关思想可以追溯到17世纪。

NO. 7	片段7	字符数：67	AI特征：显著	<div></div>	0.3%
在此基础上，20世纪提出的Caputo定义，使分数阶导数在工程问题中的应用变得更加方便，尤其是在处理具有明确初始条件的系统时更为合适。					
NO. 8	片段8	字符数：81	AI特征：显著	<div></div>	0.4%
进一步来看，相关研究（如付洋的工作）表明，分数阶导数中的记忆核函数通常具有幂律衰减形式，这意味着系统对历史状态的影响是一种“长记忆”，而不是简单的指数衰减[3]。					
NO. 9	片段9	字符数：46	AI特征：显著	<div></div>	0.2%
在工程应用方面，分数阶微积分已经被用于粘弹性材料、反常扩散、控制系统以及复杂网络等多个领域。					
NO. 10	片段10	字符数：49	AI特征：显著	<div></div>	0.2%
相比之下，传统的整数阶模型主要基于局部变化率，在处理具有记忆或遗传特性的系统时，往往存在一定局限。					
NO. 11	片段11	字符数：65	AI特征：显著	<div></div>	0.3%
基于以上背景，本文主要研究有向非强连通分数阶复杂网络的牵引同步控制问题，目标是在较一般拓扑条件下，建立具有一定理论依据的同步判据。					
NO. 12	片段12	字符数：69	AI特征：显著	<div></div>	0.3%
复杂网络是由大量相互作用的个体(节点)通过一定连接关系(边)构成的系统，广泛存在于互联网、电力系统、生物神经网络以及社会系统等实际场景中。					
NO. 13	片段13	字符数：54	AI特征：显著	<div></div>	0.3%
在实际应用中，许多复杂网络并不满足强连通性或包含有向生成树等理想条件，这一问题在复杂网络研究中已被广泛关注。					
NO. 14	片段14	字符数：49	AI特征：显著	<div></div>	0.2%
分数阶微积分是对经典整数阶微积分的推广，其核心在于将微分与积分的阶次从整数扩展至任意实数甚至复数。					
NO. 15	片段15	字符数：30	AI特征：显著	<div></div>	0.1%
从历史发展角度来看，分数阶微积分的思想最早可追溯至17世纪。					
NO. 16	片段16	字符数：68	AI特征：显著	<div></div>	0.3%

在此基础上，20世纪Caputo定义的引入使分数阶导数更适用于工程实际问题，尤其是在处理具有明确初始条件的物理系统时表现出良好的适用性。

NO. 17 片段17 字符数：86 AI特征：显著 0.4%

结合付洋关于分数阶微分性质及其应用的研究可以进一步看出，分数阶导数中的记忆核函数通常呈现幂律衰减特征，这使得系统对历史状态的影响呈现“长记忆”特性，而非指数衰减形式[3]。

NO. 18 片段18 字符数：45 AI特征：显著 0.2%

在工程应用方面，分数阶微积分已广泛应用于粘弹性材料、反常扩散、控制系统以及复杂网络等领域。

NO. 19 片段19 字符数：61 AI特征：显著 0.3%

整数阶模型往往基于局部变化率，难以准确反映实际系统中普遍存在的记忆与遗传特性，因而在某些复杂场景下存在建模精度不足的问题。

NO. 20 片段20 字符数：56 AI特征：显著 0.3%

基于上述背景，本文针对有向非强连通分数阶复杂网络的牵引同步控制问题开展研究，旨在建立具有严格理论保证的同步判据。

NO. 21 片段21 字符数：133 AI特征：显著 0.6%

自1998年 Duncan Watts 和 Steven Strogatz 提出小世界网络模型[4]，以及1999年 Albert-László Barabási 与 Réka Albert 提出无标度网络模型[5]以来，复杂网络逐渐成为研究实际系统结构的重要工具。

NO. 22 片段22 字符数：56 AI特征：显著 0.3%

围绕复杂网络同步问题，学者们已经提出了多种不同的控制方法，比如线性反馈控制、自适应控制、脉冲控制以及牵引控制等。

NO. 23 片段23 字符数：68 AI特征：显著 0.3%

从已有综述性工作（如任红卫、邓飞其的研究）可以看出，复杂网络理论的应用范围已经扩展到电力系统、通信网络以及多智能体系统等多个领域[6]。

NO. 24 片段24 字符数：22 AI特征：显著 0.1%

但在实际系统中，这类理想条件往往不容易满足。

NO. 25 片段25 字符数：44 AI特征：显著 0.2%

总体来看，现有大多数关于复杂网络同步的工作，仍然不同程度地依赖强连通或有向生成树等条件。

NO. 26	片段26	字符数: 135	AI特征: 显著	<div></div>	0.6%
自1998年Duncan Watts和Steven Strogatz提出小世界网络模型[4], 以及1999年Albert-László Barabási和Réka Albert提出无标度网络模型以来[5], 复杂网络因其能够刻画大量真实系统中的拓扑结构特性而受到广泛关注。					
NO. 27	片段27	字符数: 62	AI特征: 显著	<div></div>	0.3%
针对复杂网络同步问题, 国内外学者提出了多种控制方法与理论框架, 包括线性反馈控制、自适应控制、脉冲控制以及牵引控制等多种策略。					
NO. 28	片段28	字符数: 123	AI特征: 显著	<div></div>	0.6%
参考任红卫、邓飞其对复杂网络相关研究进展的综述可以发现, 复杂网络理论已广泛应用于电力系统、通信网络及多智能体系统等领域, 其研究内容也由早期的静态结构分析逐步拓展至动力学行为研究, 其中同步问题作为刻画网络整体协同行为的重要内容, 受到持续关注[6]。					
NO. 29	片段29	字符数: 52	AI特征: 显著	<div></div>	0.2%
现有大多数关于复杂网络同步的研究通常仍基于较为理想的拓扑假设, 例如网络具有强连通性或包含有向生成树结构。					
NO. 30	片段30	字符数: 53	AI特征: 显著	<div></div>	0.3%
分数阶微积分的发展可以追溯到三百多年前, 不过, 从工程应用角度来看, 其较为系统的研究主要还是集中在近几十年。					
NO. 31	片段31	字符数: 59	AI特征: 显著	<div></div>	0.3%
随着相关研究的不断推进, 分数阶系统中的同步问题也逐渐受到关注, 尤其是在复杂网络背景下, 这一问题的研究意义变得更加明显。					
NO. 32	片段32	字符数: 53	AI特征: 显著	<div></div>	0.3%
不过, 从整体来看, 现有成果在一定程度上仍依赖于较为理想的拓扑假设, 例如网络具有强连通性, 或者结构相对规则。					
NO. 33	片段33	字符数: 42	AI特征: 显著	<div></div>	0.2%
分数阶微积分的发展已有三百余年历史, 但其在工程领域中的系统性应用主要集中在近几十年。					
NO. 34	片段34	字符数: 54	AI特征: 显著	<div></div>	0.3%
随着研究的深入, 分数阶复杂系统的同步问题逐渐受到关注, 尤其是在复杂网络背景下表现出重要的理论价值与应用意义。					
NO. 35	片段35	字符数: 40	AI特征: 显著	<div></div>	0.2%
从现有研究来看, 大多数成果仍然依赖较为理想的网络结构假设, 例如强连通或规则拓扑。					

NO. 36	片段36	字符数: 43	AI特征: 显著	<div></div>	0.2%
在牵引控制问题中, 比较关键的一点在于如何选择合适的牵引节点, 以及控制参数应当如何设定。					
NO. 37	片段37	字符数: 88	AI特征: 显著	<div></div>	0.4%
近年来, 随着 Larry Page 和 Sergey Brin 提出的 PageRank 算法逐渐被引入到复杂网络分析中, 一些研究开始尝试从全局传播的角度来处理节点重要性问题。					
NO. 38	片段38	字符数: 35	AI特征: 显著	<div></div>	0.2%
在此基础上, 一些学者进一步提出了类似ControlRank的排序方法。					
NO. 39	片段39	字符数: 48	AI特征: 显著	<div></div>	0.2%
与传统中心性方法相比, 这类基于PageRank思想的改进方法能够从整体上反映节点在网络中的作用。					
NO. 40	片段40	字符数: 28	AI特征: 显著	<div></div>	0.1%
牵引控制的关键问题在于牵引节点的选择以及控制参数的设计。					
NO. 41	片段41	字符数: 85	AI特征: 显著	<div></div>	0.4%
近年来, 受PageRank算法思想的启发(由Page与Brin提出, 用于Google搜索引擎网页重要性排序)[13], 部分研究者开始将全局传播机制引入复杂网络控制问题中。					
NO. 42	片段42	字符数: 110	AI特征: 显著	<div></div>	0.5%
与传统中心性方法相比, 这类基于PageRank思想的改进方法能够更全面地反映节点在整个网络结构中的综合作用, 不仅考虑直接邻接关系, 还考虑信息在网络中的递归传播效应, 因此在牵引控制节点选择问题中表现出更好的适应性与鲁棒性。					
NO. 43	片段43	字符数: 36	AI特征: 显著	<div></div>	0.2%
本文针对有向非强连通分数阶复杂网络的牵引同步问题, 主要开展以下研究工作:					
NO. 44	片段44	字符数: 121	AI特征: 显著	<div></div>	0.6%
(1)网络分层处理方法: 将有向图分解为强连通分量(Strongly Connected Components, SCC), 并构造有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG), 在此基础上设计分层算法, 对各SCC进行分层分析。					
NO. 45	片段45	字符数: 63	AI特征: 显著	<div></div>	0.3%
(2)牵引节点选择方法: 基于ControlRank算法确定各SCC中需要施加控制的节点, 相较传统方法具有更好的适用性与有效性。					
NO. 46	片段46	字符数: 70	AI特征: 显著	<div></div>	0.3%

(3)同步条件推导：利用分数阶Lyapunov稳定性理论，推导保证网络与孤立节点系统实现同步的充分条件，并给出耦合强度及控制增益的设计方法。

NO. 47 片段47 字符数：57 AI特征：显著 0.3%

(4)数值仿真验证：通过构建4节点小规模网络模型，对所提出方法进行仿真验证，并分析分数阶阶数对系统同步性能的影响。

NO. 48 片段48 字符数：53 AI特征：显著 0.3%

本章主要介绍本文研究所需的基础理论与相关工具，包括图论基础、分数阶微积分定义以及复杂网络系统的稳定性理论。

NO. 49 片段49 字符数：54 AI特征：显著 0.3%

复杂网络通常被建模为图结构，用于刻画节点及其相互作用关系，这一方法已扩展至多层网络与时变网络框架中[13]。

NO. 50 片段50 字符数：33 AI特征：显著 0.2%

定义邻接矩阵，其中当且仅当，否则。通常假设节点自身没有连接，即。

NO. 51 片段51 字符数：26 AI特征：显著 0.1%

定义出度矩阵，其中为节点の出度（以为起点的边数）。

NO. 52 片段52 字符数：14 AI特征：显著 0.1%

有向图的拉普拉斯矩阵定义为：

NO. 53 片段53 字符数：37 AI特征：显著 0.2%

本文采用基于出度的拉普拉斯矩阵定义，即，并用于后续同步误差系统的统一表示。

NO. 54 片段54 字符数：43 AI特征：显著 0.2%

在有向图中，如果任意两个节点和之间都存在从到和从到的有向路径，则称该有向图是强连通的。

NO. 55 片段55 字符数：42 AI特征：显著 0.2%

$SCC1=\{1, 2\}$ ， $SCC2=\{3\}$ ， $SCC3=\{4\}$ ， $SCC4=\{5, 6, 7\}$ 。

NO. 56 片段56 字符数：43 AI特征：显著 0.2%

对于给定的有向图，其强连通分量（SCC）经分解后可构成一个有向无环图（DAG）。

NO. 57 片段57 字符数：23 AI特征：显著 0.1%

为描述层间与层内的耦合关系，引入如下矩阵记号：

NO. 58	片段58	字符数：23	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.1%
1. 层内邻接矩阵：记第层节点之间的邻接矩阵为：					
NO. 59	片段59	字符数：16	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.1%
表示第层内部节点之间的连接关系。					
NO. 60	片段60	字符数：25	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.1%
2. 层间邻接矩阵：对于第k层与第层($k \neq j$)，定义：					
NO. 61	片段61	字符数：15	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.1%
表示从第层指向第k层的边关系。					
NO. 62	片段62	字符数：25	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.1%
3. 层内拉普拉斯矩阵：定义第k层的拉普拉斯矩阵为：					
NO. 63	片段63	字符数：40	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.2%
其中为第k层的出度对角矩阵，其对角元素为该层节点的出度(可包含指向其他层的边)。					
NO. 64	片段64	字符数：45	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.2%
整体拉普拉斯矩阵的分块结构在适当的节点排序下，整个网络的拉普拉斯矩阵可写成分块下三角形式：					
NO. 65	片段65	字符数：22	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.1%
该结构反映了信息从低层向高层单向传递的特性。					
NO. 66	片段66	字符数：60	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.3%
本节主要介绍分数阶微积分的基本理论，包括分数阶导数的定义及其性质，以及常用的 Mittag-Leffler 函数等内容。					
NO. 67	片段67	字符数：52	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.2%
定义1：分数阶积分的定义，设函数且 $f(t) \geq 0$ ，则函数的Riemann-Liouville型 α 阶分数阶积分定义为：					
NO. 68	片段68	字符数：26	AI特征：显著	<div><div></div></div>	0.1%
定义2：对于函数，其阶 α Caputo导数定义为：					

NO. 69	片段69	字符数：33	AI特征：显著 <div><div></div></div>	0.2%
其中， $\Gamma(\cdot)$ 是Gamma函数，满足。对于向量函数，分数阶导数逐分量定义。				
NO. 70	片段70	字符数：45	AI特征：显著 <div><div></div></div>	0.2%
定义3: (Mittag-Leffler函数) 双参数Mittag-Leffler函数定义为：				
NO. 71	片段71	字符数：42	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.2%
分数阶线性系统的解可表示为。系统的稳定性取决于矩阵M的特征值是否位于某个扇形区域内。				
NO. 72	片段72	字符数：37	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.2%
考虑由N个相同分数阶系统组成的复杂网络，每个节点是一个n维分数阶混沌系统。				
NO. 73	片段73	字符数：144	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.7%
其中， α 为分数阶阶数； x_i 为节点i的状态向量； f_i 为非线性函数，描述节点的局部动力学(蔡氏电路的具体形式见第四章)； $c>0$ 为全局耦合强度； a_{ij} 为邻接矩阵元素，表示节点j到i有边； b 为内联矩阵，通常取单位矩阵，表示各状态分量均参与耦合； u_i 为控制增益；若 $u_i>0$ ，则节点i被直接控制到目标状态；否则未被控制。				
NO. 74	片段74	字符数：46	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.2%
该条件称为被动度 (passivity)或单边Lipschitz条件，它刻画了系统的耗散性。				
NO. 75	片段75	字符数：20	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.1%
以下引理将在第三章的同步条件证明中用到。				
NO. 76	片段76	字符数：19	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.1%
引理2.1:对于任意可微向量函数，有：				
NO. 77	片段77	字符数：52	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.2%
其中 P 是正定对称矩阵。该引理是构造Lyapunov函数的基础，在非线性系统稳定性分析中被广泛应用[14]。				
NO. 78	片段78	字符数：29	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.1%
引理2.2: (舒尔补引理) 给定对称分块矩阵，其中 A 和 B 为方阵。				
NO. 79	片段79	字符数：31	AI特征：疑似 <div><div></div></div>	0.1%
引理2.3: (分数阶微分方程比较原理) 考虑标量分数阶微分方程：				

NO. 80	片段80	字符数：23	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
特别地，。该结论可由分数阶系统稳定性理论得到。					
NO. 81	片段81	字符数：54	AI特征：疑似	<div></div>	0.3%
在前述图论与分数阶系统理论基础上，本章针对有向非强连通分数阶复杂网络的同步问题，提出一种实用的牵引控制策略。					
NO. 82	片段82	字符数：58	AI特征：疑似	<div></div>	0.3%
步骤1调用Matlab函数：，其中numSCC 表示得到的SCC数量，compIdx 表示每个节点所属SCC的索引。					
NO. 83	片段83	字符数：17	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
步骤2计算压缩图的邻接矩阵的元素：					
NO. 84	片段84	字符数：41	AI特征：疑似	<div></div>	0.2%
其中和分别指代网络中的具体节点，表示两个不同的强连通分量，E代表所有有向边的集合。					
NO. 85	片段85	字符数：32	AI特征：疑似	<div></div>	0.2%
步骤3初始化，定义集合。将所有入度为0即的 SCC 归入第1层。					
NO. 86	片段86	字符数：20	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
先剔除已分配集合：定义剩余分量集合为为：					
NO. 87	片段87	字符数：38	AI特征：疑似	<div></div>	0.2%
确定新起点：第层集合定义为在剩余集合中，其入边仅来源于已分层集合的所有分量：					
NO. 88	片段88	字符数：33	AI特征：疑似	<div></div>	0.2%
步骤5定义分层矩阵，其中第m列由中的SCC索引填充，其余元素补0。					
NO. 89	片段89	字符数：27	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
设网络中需要同步的节点数量为q，牵引节点集合为，满足。					
NO. 90	片段90	字符数：28	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
步骤1对于当前层中的每个强连通分量，定义其内部节点集合。					
NO. 91	片段91	字符数：50	AI特征：疑似	<div></div>	0.2%

步骤2判断SCC类型：若，标记为 SCC+(多节点强连通分量)，若，标记为 SCC-(单节点分量)。

NO. 92 片段92 字符数：32 AI特征：疑似 0.2%

步骤3对于SCC+，采用ControlRank算法确定牵引节点：

NO. 93 片段93 字符数：33 AI特征：疑似 0.2%

其中A为SCC内部的邻接矩阵，为SCC的出度矩阵，初始值是任意的。

NO. 94 片段94 字符数：28 AI特征：疑似 0.1%

步骤4对于SCC-(单节点)，直接将该节点选为牵引节点。

NO. 95 片段95 字符数：37 AI特征：疑似 0.2%

其中s(t)满足孤立节点动力学利用系统模型 (2-3)，可得误差动力学方程：

NO. 96 片段96 字符数：26 AI特征：疑似 0.1%

记，并引入拉普拉斯矩阵，则网络耦合项可写成紧凑形式：

NO. 97 片段97 字符数：14 AI特征：疑似 0.1%

其中是分块对角非线性函数，。

NO. 98 片段98 字符数：25 AI特征：疑似 0.1%

由于图是非强连通的，直接分析全局误差系统较为复杂。

NO. 99 片段99 字符数：34 AI特征：疑似 0.2%

考虑第层内的节点，假设来自更高层($<k$)的耦合项已经为零或指数衰减。

NO. 10
0 片段100 字符数：43 AI特征：疑似 0.2%

其中是第k层的内部拉普拉斯矩阵(包含层内边以及从低层指向该层的边)，是牵引控制矩阵。

NO. 10
1 片段101 字符数：47 AI特征：疑似 0.2%

定理1：（同步的充分条件）对于第k层，如果存在正定对称矩阵和常数，使得以下矩阵不等式成立：

NO. 10
2 片段102 字符数：63 AI特征：疑似 0.3%

则第层的同步误差将指数收敛到零。特别地，对于第1层(源SCC)，由于没有来自更低层的耦合输入，只需上述不等式成立即可保证同步。

NO. 10 3	片段103	字符数: 34	AI特征: 疑似	<div></div>	0.2%
根据第2.1.3节的分块拉普拉斯矩阵结构, 第k层的误差动力学可写为:					
NO. 10 4	片段104	字符数: 30	AI特征: 疑似	<div></div>	0.1%
其中, 。根据定理条件, 第层的误差已经指数衰减, 即存在常数使。					
NO. 10 5	片段105	字符数: 19	AI特征: 疑似	<div></div>	0.1%
利用引理2.1对求阶Caputo导数:					
NO. 10 6	片段106	字符数: 27	AI特征: 疑似	<div></div>	0.1%
将误差动力学代入, 并分离非线性项、层内耦合项、牵引项:					
NO. 10 7	片段107	字符数: 33	AI特征: 疑似	<div></div>	0.2%
其中。由于指数衰减, 该项可被后续的负项吸收, 不影响指数收敛的结论。					
NO. 10 8	片段108	字符数: 51	AI特征: 疑似	<div></div>	0.2%
由于指数衰减, 存在使得右端。应用引理2.5(分数阶比较原理), 可得指数收敛到零(具体地, 存在常数使)。					
NO. 10 9	片段109	字符数: 77	AI特征: 疑似	<div></div>	0.4%
对于第1层, 由于没有跨层扰动(), 直接从(5)式结合引理2.5得, 而Mittag-Leffler函数在时趋于零, 且衰减速度是指数型的(当时即为指数衰减)。					
NO. 11 0	片段110	字符数: 64	AI特征: 疑似	<div></div>	0.3%
注记: 本证明利用了分层结构中信息单向流动的特点: 低层同步后, 其对高层的耦合项成为指数衰减的强项, 不影响高层误差系统的渐近稳定性。					
NO. 11 1	片段111	字符数: 35	AI特征: 疑似	<div></div>	0.2%
通常取且时, 。这表明孤立节点SCC需要足够大的牵引增益才能被直接同步。					
NO. 11 2	片段112	字符数: 43	AI特征: 疑似	<div></div>	0.2%
实际应用中, 我们可以取简化计算。令(各状态分量均耦合), 则定理1中的矩阵不等式退化为:					
NO. 11 3	片段113	字符数: 21	AI特征: 疑似	<div></div>	0.1%
这是一个关于和的线性矩阵不等式(LMI)。					

NO. 11 4	片段114	字符数：63	AI特征：疑似	<div></div>	0.3%
其中表示最小正特征值。对于工程应用，通常先取定足够大(如10倍于)，然后根据节点度信息设置：对于被牵引节点，；对于其他节点，。					
NO. 11 5	片段115	字符数：18	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
其中是在牵引节点位置为1的对角矩阵。					
NO. 11 6	片段116	字符数：29	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
在满足同步条件的前提下，我们希望控制能量最小，以节约资源。					
NO. 11 7	片段117	字符数：18	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
约束条件为定理3.1中的矩阵不等式：					
NO. 11 8	片段118	字符数：38	AI特征：疑似	<div></div>	0.2%
由于该约束是线性的，我们可以采用遗传算法或梯度下降法在可行域内搜索使最小的。					
NO. 11 9	片段119	字符数：18	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
其中 $\gamma > 0$ 是预设的衰减率(收敛速度)。					
NO. 12 0	片段120	字符数：52	AI特征：疑似	<div></div>	0.2%
本章在前述理论分析的基础上，通过数值仿真对所提出的分层牵引控制方法进行验证，并对系统的同步性能进行分析。					
NO. 12 1	片段121	字符数：70	AI特征：疑似	<div></div>	0.3%
为了验证本文所提出的分数阶有向复杂网络牵引控制方法的有效性，本章基于三维蔡氏电路构建节点动力学模型，并结合分层牵引控制策略进行数值仿真分析。					
NO. 12 2	片段122	字符数：28	AI特征：疑似	<div></div>	0.1%
考虑由个节点构成的有向网络，其拓扑结构由邻接矩阵表示为：					
NO. 12 3	片段123	字符数：76	AI特征：疑似	<div></div>	0.4%
对该网络进行强连通分量(SCC)分解，可得： $SCC1=\{1,2,3\}$ ，由于存在路径 $1\rightarrow2\rightarrow3\rightarrow1$ ，构成强连通子图； $SCC2=\{4\}$ ，为单节点子图。					
NO. 12 4	片段124	字符数：137	AI特征：疑似	<div></div>	0.6%

如图3所示，根据DAG结构，将网络划分为：第1层：SCC1 = {1, 2, 3} 第2层：SCC2 = {4} 在牵引节点选择方面：对于SCC1，采用入度优先原则选取关键节点进行牵引控制，其控制增益设置为较大值;对于SCC2，由于其无法从其他层获得信息传播，必须直接施加牵引控制。

NO. 12 5	片段125	字符数：35	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.2%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

该配置保证了上层节点优先同步，并通过网络耦合作用驱动下层节点实现同步。

NO. 12 6	片段126	字符数：23	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.1%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

节点动力学选取为分数阶蔡氏电路系统，其形式为：

NO. 12 7	片段127	字符数：31	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.1%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

其中，为第*i*个节点的状态向量，为分数阶阶次，*a*，*b*为系统参数。

NO. 12 8	片段128	字符数：18	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.1%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

仿真中参数取值为：。系统阶次选取为。

NO. 12 9	片段129	字符数：42	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.2%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

采用 Grünwald - Letnikov 方法对分数阶系统进行离散化，其近似形式为：

NO. 13 0	片段130	字符数：42	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.2%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

图 4 给出了在无牵引控制作用下，分数阶蔡氏电路网络各节点第一维状态变量的演化曲线。

NO. 13 1	片段131	字符数：32	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.2%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

图5给出了在分层牵引控制作用下，各节点第一维状态变量的演化曲线。

NO. 13 2	片段132	字符数：27	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.1%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

图6给出了有控制与无控制情况下系统同步误差的变化情况。

NO. 13 3	片段133	字符数：45	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.2%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

为了分析分数阶阶次对系统同步性能的影响，本文选取阶次0.8，0.9和0.95进行对比仿真。

NO. 13 4	片段134	字符数：24	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.1%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

本章以一个4节点的有向非强连通网络为例进行分析。

NO. 13 5	片段135	字符数：79	AI特征：疑似	<div><div></div></div>	0.4%
-------------	-------	--------	---------	------------------------	------

本章以一个4节点有向非强连通网络为研究对象，通过强连通分量分解构建其有向无环图(DAG)结构，并在此基础上设计分层牵引控制策略，实现了对动态领导者的同步跟踪。

NO. 13
6 片段136 字符数：60 AI特征：疑似 0.3%

本文围绕复杂网络系统的同步控制问题开展研究，针对具有非线性动态特性的多智能体系统，设计了一种基于牵引控制的同步控制策略。

NO. 13
7 片段137 字符数：58 AI特征：疑似 0.3%

在理论分析方面，本文从复杂网络的拓扑结构出发，对多智能体系统进行了建模，并利用拉普拉斯矩阵来刻画节点之间的耦合关系。

NO. 13
8 片段138 字符数：76 AI特征：疑似 0.4%

在算法实现方面，考虑到传统基于中心性指标的方法在节点重要性评估上存在一定局限，本文引入了ControlRank方法，并采用其相对简化的迭代形式进行计算。

NO. 13
9 片段139 字符数：48 AI特征：疑似 0.2%

在数值仿真部分，通过构建具体的多智能体网络模型，对比分析了无控制和引入控制两种情形下的系统行为。

NO. 14
0 片段140 字符数：54 AI特征：疑似 0.3%

总体来看，本文方法在理论分析和仿真验证两个方面都取得了预期效果，对复杂网络同步控制问题的研究提供了一定参考。

NO. 14
1 片段141 字符数：56 AI特征：疑似 0.3%

在理论分析方面，基于复杂网络的拓扑结构，构建了多智能体系统的数学模型，并利用拉普拉斯矩阵描述节点之间的耦合关系。

NO. 14
2 片段142 字符数：99 AI特征：疑似 0.5%

在算法实现方面，针对传统方法在节点重要性评估中的局限性，本文引入ControlRank方法，并采用其简化迭代形式进行实现，从而在降低计算复杂度的同时，兼顾了评估精度，为控制节点的选取提供了有效依据。

NO. 14
3 片段143 字符数：46 AI特征：疑似 0.2%

在数值仿真方面，通过构建具体的多智能体网络模型，分别在无控制和有控制两种情形下进行对比实验。

NO. 14
4 片段144 字符数：64 AI特征：疑似 0.3%

综上，本文所提出的同步控制方法在理论分析与数值仿真两个方面均取得了良好的效果，为复杂网络同步控制问题的研究提供了一定的参考价值。

NO. 14 5	片段145	字符数: 47	AI特征: 疑似 <div><div></div></div>	0.2%
尽管本文在复杂网络同步控制问题上取得了一定的研究成果,但仍存在一些有待进一步研究和完善的方面:				
NO. 14 6	片段146	字符数: 49	AI特征: 疑似 <div><div></div></div>	0.2%
(1) 本文主要针对固定拓扑结构的复杂网络进行了研究,而在实际应用中,网络拓扑结构往往具有时变特性。				
NO. 14 7	片段147	字符数: 36	AI特征: 疑似 <div><div></div></div>	0.2%
(2) 本文所研究的系统模型相对理想化,未考虑外部扰动和系统不确定性因素。				
NO. 14 8	片段148	字符数: 65	AI特征: 疑似 <div><div></div></div>	0.3%
(3) 在控制方法方面,本文采用的是线性牵引控制策略,未来可以进一步探索非线性控制方法、自适应控制或分布式控制策略,以提升系统性能。				
NO. 14 9	片段149	字符数: 65	AI特征: 疑似 <div><div></div></div>	0.3%
(4) 在仿真实验方面,本文仅通过小规模网络进行了验证,后续可以考虑在大规模复杂网络中进行实验,以进一步验证方法的有效性与可扩展性。				
NO. 15 0	片段150	字符数: 44	AI特征: 疑似 <div><div></div></div>	0.2%
未来工作可在上述方向上进一步深入研究,从而不断完善复杂网络同步控制理论及其工程应用价值。				

说明:

- 1、支持中、英文内容检测;
- 2、AI特征值=AI特征字符数/总字符数;
- 3、红色代表AI特征显著部分,计入AI特征字符数;
- 4、棕色代表AI特征疑似部分,未计入AI特征字符数;
- 5、检测结果仅供参考,最终判定是否存在学术不端行为时,需结合人工复核、机构审查以及具体学术政策的综合应用进行审慎判断。



关注微信公众号