

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 10 月 8 日 (08.10.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/199114 A1

- (51) 国际专利分类号:
H04L 12/24 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/080965
- (22) 国际申请日: 2019 年 4 月 2 日 (02.04.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 深圳大学(SHENZHEN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。
- (72) 发明人: 周明洋(ZHOU, Mingyang); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。 李晓宇(LI, Xiaoyu); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。 王梓名(WANG, Ziming); 中国广东省深圳市南

山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。
邵洪泽(SHAO, Hongze); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。
廖好(LIAO, Hao); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。 陆克中(LU, Kezhong); 中国广东省深圳市南山区南海大道 3688 号, Guangdong 518060 (CN)。

(74) 代理人: 深圳市恒申知识产权事务所(普通合伙)(HENSEN INTELLECTUAL PROPERTY FIRM); 中国广东省深圳市福田区南园路 68 号上步大厦 10H, Guangdong 518000 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,

(54) Title: CONTROL METHOD, APPARATUS, ELECTRONIC DEVICE AND STORAGE MEDIUM

(54) 发明名称: 控制方法、装置、电子设备以及存储介质

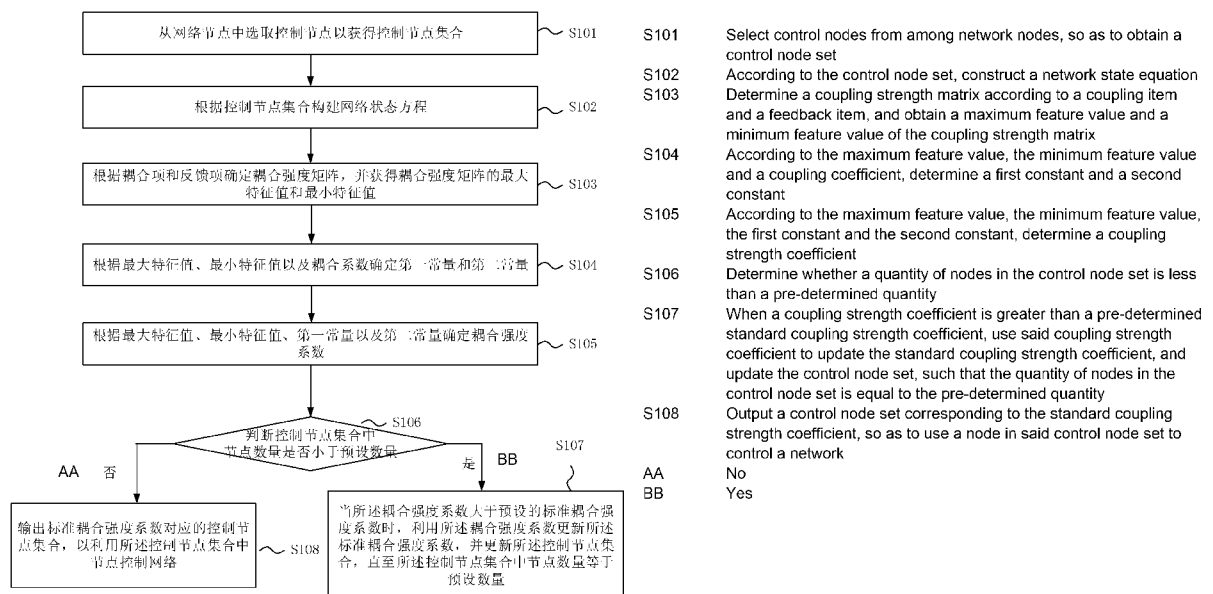


图 1

(57) Abstract: A control method, an apparatus, an electronic device and a storage medium, the method comprising: obtaining a control node set (S101); according to the control node set, constructing a network state equation (S102); according to the network state, determining a maximum feature value and a minimum feature value, so as to determine a range of coupling strength (S103, S104, S105); determining whether a quantity of nodes in the control node set is less than a pre-determined quantity (S106); if it is determined to be, then when a coupling strength coefficient is greater than a pre-determined standard coupling strength coefficient, using said coupling strength coefficient to update the standard coupling strength coefficient, and updating the control node set, such that the quantity of

JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

nodes in the control node set is equal to the pre-determined quantity (S107); if it is determined not to be, outputting a control node set corresponding to the standard coupling strength coefficient, so as to use a node in said control node set to control a network (S108). A network coupling strength coefficient obtained by the present method can more accurately reflect a coupling strength candidate operation range in a system.

(57) 摘要: 一种控制方法、装置、电子设备以及存储介质, 该方法包括: 获得控制节点集合 (S101); 根据控制节点集合构建网络状态方程 (S102); 根据网络状态确定最大特征值、最小特征值, 以确定耦合强度范围 (S103、S104、S105); 判断所述控制节点集合中节点数量是否小于预设数量 (S106); 若判断结果为是, 则当所述耦合强度系数大于预设的标准耦合强度系数时, 利用所述耦合强度系数更新所述标准耦合强度系数, 并更新所述控制节点集合, 直至所述控制节点集合中节点数量等于预设数量 (S107); 若判断结果为否, 则输出标准耦合强度系数对应的控制节点集合, 以利用所述控制节点集合中节点控制网络 (S108)。本方法所获得网络耦合强度系数能够更加准确地反应系统的耦合强度候选工作范围。

控制方法、装置、电子设备以及存储介质

技术领域

5 本发明涉及复杂网络控制技术领域，尤其涉及一种控制方法、装置、电子设备以及存储介质。

背景技术

在复杂网络中存在牵引控制现象，即有选择性的对网络中少部分节点施加
10 控制而使得整个网络达到所期望的行为。

复杂网络牵引控制首先要考虑三个关键问题。第一个是选择哪些节点进行牵引控制；第二个是选择多少个节点进行牵引控制；第三个是选择什么牵引控制器。针对第一个问题和第二问题，现有方法通常在选择完控制节点后，计算判据 $R = \lambda_1 / \lambda_N$ 值，若判据 $R > \alpha_2 / \alpha_1$ ，判断判据是否大于选择其他控制节点
15 下的判据 R ，若是，则选择数值更大的判据对应的控制节点作为最优控制节点，利用最优控制节点对网络进行牵引控制。

然而，判据 $R = \lambda_1 / \lambda_N$ 并不能精确反应控制节点的耦合强度，导致现有的控制方法对网络控制效果差的技术问题。

20 发明内容

本发明提供一种控制方法、装置、电子设备以及存储介质，以解决现有的控制方法所采用判据无法精确反应控制节点的耦合强度而导致对网络控制效果差的技术问题。

第一方面，本发明提供一种控制方法，包括：从网络节点中选取控制节点
25 以获得控制节点集合；根据控制节点集合构建网络状态方程；其中，网络状态方程包括耦合项和反馈项，耦合项包括节点耦合系数；根据耦合项和反馈项确定耦合强度矩阵，并获得耦合强度矩阵的最大特征值和最小特征值；根据最大特征值、最小特征值以及耦合系数确定第一常量和第二常量；根据最大特征值、最小特征值、第一常量以及第二常量确定耦合强度系数；判断所述控制节点集
30 合中节点数量是否小于预设数量；若判断结果为是，则当所述耦合强度系数大

于预设的标准耦合强度系数时，利用所述耦合强度系数更新所述标准耦合强度系数，并更新所述控制节点集合，直至所述控制节点集合中节点数量等于预设数量；若判断结果为否，则输出标准耦合强度系数对应的控制节点集合，以利用所述控制节点集合中节点控制网络。

- 5 在本发明提供的一种控制方法中，构建引入控制节点的网络状态方程，并根据网络状态方程获得最大和最小特征值、第一和第二常量，并根据最大特征值、最小特征值、第一常量以及第二常量确定耦合强度系数，所获得网络耦合强度系数能够更加准确地反应系统的耦合强度，选取耦合强度系数更大的控制节点集合对网络进行控制，实现更好的控制网络。

- 10 可选地，根据如下公式确定耦合强度范围：

$$\omega = \frac{\alpha_1}{\lambda_N} - \frac{\alpha_2}{\lambda_1}$$

其中， ω 表示耦合强度系数， λ_N 表示最大特征值， λ_1 表示最小特征值， α_1 表示第一常量， α_2 表示第二常量，且 $\alpha_1 < \alpha_2 < 0$ 。

- 15 在本发明提供的一种控制方法中，将第一常量与最小特征值的比值同第二常量与最大特征值的比值相减，以获得耦合强度系数，使得耦合强度系数更加精确反应耦合强度，并以此作为网络系统可控性的判据，选择耦合强度系数更大的控制节点集合对网络进行控制，以达到更好的控制效果。

可选地，所述更新所述控制节点集合，具体包括：从网络的节点中选择一个节点新增至所述控制节点集合，以更新所述控制节点集合。

- 20 在本发明提供的一种控制方法中，通过在现有的控制节点集合基础之上增加一个节点，获得更新后的控制节点集合，可以避免收敛速度过快，使优化进入局部最优。

可选地，耦合强度矩阵的具体表达式为：

$$B = -L - D$$

其中， B 表示耦合强度矩阵， L 表示网络的拉普拉斯矩阵， D 表示网络的反馈矩阵。

- 25 下面对控制装置进行介绍，其实现原理和技术效果与上述方法原理和技术效果类似，此处不再赘述。

第二方面，本发明提供一种控制装置，其特征在于，包括：获得模块，用于从网络节点中选取控制节点以获得控制节点集合；构建模块，用于根据控制

节点集合构建网络状态方程；其中，网络状态方程包括耦合项和反馈项，耦合项包括节点耦合系数；确定模块，用于根据耦合项和反馈项确定耦合强度矩阵，并获得耦合强度矩阵的最大特征值和最小特征值；确定模块还用于根据最大特征值、最小特征值以及耦合系数确定第一常量和第二常量；确定模块还用于根据最大特征值、最小特征值、第一常量以及第二常量确定耦合强度系数；判断模块，用于判断所述控制节点集合中节点数量是否小于预设数量；更新模块，用于若判断结果为是，则当所述耦合强度系数大于预设的标准耦合强度系数时，利用所述耦合强度系数更新所述标准耦合强度系数，并更新所述控制节点集合，直至所述控制节点集合中节点数量等于预设数量；输出模块，用于若判断结果为否，则输出标准耦合强度系数对应的控制节点集合，以利用所述控制节点集合中节点控制网络。

可选地，确定模块具体用于：根据如下公式确定耦合强度范围：

$$\omega = \frac{\alpha_1}{\lambda_N} - \frac{\alpha_2}{\lambda_1}$$

其中, ω 表示耦合强度系数, λ_N 表示最小特征值, λ_1 表示最大特征值, α_1 表示第一常量, α_2 表示第二常量, 且 $\alpha_1 < \alpha_2 < 0$ 。

15 可选地，更新模块具体用于：从网络的节点中选择一个节点新增至所述控制节点集合，以更新所述控制节点集合。

可选地，耦合强度矩阵的具体表达式为：

$$B = -L - D$$

其中， $\mathbf{B}$ 表示耦合强度矩阵， $\mathbf{L}$ 表示网络的拉普拉斯矩阵， $\mathbf{D}$ 表示网络的反馈矩阵。

20 第三方面，本发明提供一种电子设备，包括：至少一个处理器和存储器；
其中，存储器存储计算机执行指令；

至少一个处理器执行存储器存储的计算机执行指令，使得至少一个处理器执行第一方面以及可选方案涉及的控制方法。

第四方面，本发明提供一种计算机可读存储介质，其特征在于，计算机可
25 读存储介质中存储有计算机执行指令，当处理器执行计算机执行指令时，实现
第一方面以及可选方案涉及的控制方法。

本发明提供了一种控制方法、装置、电子设备以及存储介质，在控制方法中，从网络中选择控制节点以构成控制节点集合，并构建引入控制节点的网络

状态方程，以根据网络状态方程获得最大和最小特征值、第一和第二常量。并以此确定耦合强度系数，所获得网络耦合强度系数能够更加准确地反应系统的耦合强度。将耦合强度系数作为评判网络控制性能的判据，选取耦合强度系数更大的控制节点集合对网络进行控制，实现更好的控制网络。

5

附图说明

为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 为本发明根据一示例性实施例示出的控制方法的流程示意图；

图 2 (a) 为采用现有的控制方法得到的控制节点集合分布图；

图 2 (b) 为采用图 1 所示实施例提供的控制方法得到的控制节点集合分布图；

15 图 2 (c) 为采用其他控制方法得到的控制节点集合分布图；

图 3 (a) 描述了网络 1 在传统比率判据 R 、牵引控制点集以及不同的最大优化策略的函数；

图 3 (b) 描述了网络 2 在传统比率判据 R 、牵引控制点集以及不同的最大优化策略的函数；

20 图 3 (c) 描述了网络 3 在传统比率判据 R 、牵引控制点集以及不同的最大优化策略的函数；

图 3 (d) 描述了网络 4 在传统比率判据 R 、牵引控制点集以及不同的最大优化策略的函数；

25 图 4 (a) 表示网络 1 本发明提出判据 ω 在牵引控制点集以及不同的最大优化策略的结果；

图 4 (b) 表示网络 2 本发明提出判据 ω 在牵引控制点集以及不同的最大优化策略的结果；

图 4 (c) 表示网络 3 本发明提出判据 ω 在牵引控制点集以及不同的最大优化策略的结果；

30 图 4 (d) 表示网络 4 本发明提出判据 ω 在牵引控制点集以及不同的最大优化策略的结果；

图 5 表示在网络 1 至网络 4 中交集所占牵引控制节点并集的比例；
图 6 为本发明根据一示例性实施例示出的控制装置的结构示意图；
图 7 为本发明根据一示例性实施例示出的电子设备的结构示意图。

5 具体实施方式

为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

本发明提供一种控制方法、装置、电子设备以及存储介质，以解决现有的控制方法所采用判据无法精确反应控制节点的耦合强度而导致对网络控制效果差的技术问题。

图 1 为本发明根据一示例性实施例示出的控制方法的流程示意图。如图 1 所示，本实施例提供的控制方法包括如下步骤：

S101、从网络节点中选取控制节点以获得控制节点集合。

更具体地，对于网络系统，其由多个节点构成，从网络系统的节点中随机选取多个节点作为控制节点，并构成控制节点集合。控制节点集合中控制节点用于控制网络，以使网络达到平衡。

S102、根据控制节点集合构建网络状态方程。

更具体地，针对控制节点集合中控制节点，构建如下网络状态方程：

$$\dot{x}_{ik} = f(x_{ik}) - c \sum_{j=1}^N l_{ikj} H x_j - cd(x_{ik} - \bar{x})$$

其中， ik 表示控制节点， x_{ik} 表示控制节点 ik 状态， $\dot{x}_{ik}$ 表示控制节点 ik 状态的微分， $f(\cdot)$ 表示节点自身的非线性变化方程， c 代表节点间耦合系数， j 表示节点， $1 \leq j \leq N$ ， N 为网络节点数量， l_{ij} 代表网络拉普拉斯矩阵的系数， $H = (h_{ij})_{z \times z}$ ， h_{ij} 表示临近节点状态之间的耦合关系， x_j 表示第 j 个节点的状态， d 表示反馈系数， $\bar{x}$ 表示静止状态，并且 $\bar{x}$ 服从于 $\dot{\bar{x}} = f(\bar{x})$ 。

当 $i = j$ 时， $l_{ii} = \sum_{j, j \neq i} a_{ij}$ ，当 $i \neq j$ 时， $l_{ij} = -a_{ij}$ 。 $A = (a_{ij})_{N \times N}$ ， $E =$

$\{(i,j) | a_{ij} \neq 0\}$, 其中, A 表示网络的邻接矩阵, a_{ij} 表示两个节点间是否有边。当节点 i 和节点 j 存在边时, $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$ 。 $L = (l_{ij})_{N \times N}$, L 表示网络的拉普拉斯矩阵, 拉普拉斯矩阵斜对角线上的元素就是节点 i 的度。

针对网络中其他节点, 构建如下网络状态方程:

$$\dot{x}_i = f(x_i) - c \sum_{j=1}^N l_{ij} H x_j$$

- 5 在网络状态方程中, $c \sum_{j=1}^N l_{ikj} H x_j$ 构成耦合项, $cd(x_{ik} - \bar{x})$ 构成反馈项, 节点间耦合系数用 c 表示。

要使引入反馈后的状态方程达到稳定, 会得到非线性系统的主稳定方程 $\dot{\zeta}_i = [Df + \beta H^T] \zeta$, 其中, Df 是函数 f 的雅可比矩阵, β 是实数变量, 该方程最大李雅普诺夫指数是实数变量 β 的函数。

- 10 S103、根据耦合项和反馈项确定耦合强度矩阵, 并获得耦合强度矩阵的最大特征值和最小特征值。

更具体地, 耦合强度矩阵的具体表达式为:

$$B = -L - D$$

其中, B 表示耦合强度矩阵, L 表示网络的拉普拉斯矩阵, D 表示网络的反馈矩阵, 网络的反馈矩阵由反馈系数 d 构成, 且 D 为 $N \times N$ 维, 针对非控制节点, 反馈系数为 0。

- 15

利用线性代数方法计算 $B = -L - D$ 的特征值, 所获得的特征值为: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$, 且有 $0 > \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 。

S104、根据最大特征值、最小特征值以及耦合系数确定第一常量和第二常量。

- 20 更具体地, 根据如下不等式组获取第一常量和第二常量:

$$\alpha_1 < \alpha_2 < 0$$

$$\alpha_1 < c\lambda_N$$

$$c\lambda_1 < \alpha_2,$$

其中, α_1 表示第一常量, α_2 表示第二常量, 且 α_1 与 α_2 都是实数。

S105、根据最大特征值、最小特征值、第一常量以及第二常量确定耦合强度系数。

更具体地，根据如下公式确定耦合强度范围：

$$\omega = \frac{\alpha_1}{\lambda_N} - \frac{\alpha_2}{\lambda_1}$$

S106、判断所述控制节点集合中节点数量是否小于预设数量；若判断结果均为是，则转入 S107，若判断结果为否，则转入 S108；

更具体地，根据控制复杂度要求设置控制节点数量的上限值。

5 S107、当所述耦合强度系数大于预设的标准耦合强度系数时，利用所述耦合强度系数更新所述标准耦合强度系数，并更新所述控制节点集合，直至所述控制节点集合中节点数量等于预设数量。

更具体地，在执行实施例提供的方法前，可以随机设置标准耦合强度系数，若控制节点集合中节点数量小于预设数量时，可以继续优化控制节点集合，采用如下方式优化控制节点集合：

判断所述耦合强度系数是否大于预设的标准耦合强度系数，若判断结果为是，则利用所述耦合强度系数更新所述标准耦合强度系数，更新后的标准耦合强度系数对应的控制节点集合是目前找到最佳的控制节点集合。

15 在更新完标准耦合强度系数后，随机更新所述控制节点集合，进入下一轮循环。

S108、输出标准耦合强度系数对应的控制节点集合，以利用所述控制节点集合中节点控制网络。

更具体地，若控制节点集合中节点数量大于预设数量时，停止优化控制节点集合，并输出标准耦合强度系数对应的控制节点集合，该控制节点集合的耦合强度系数是目前寻找到的最大的耦合强度系数，利用控制节点集合中节点控制网络，可以达到最佳的控制效果。

25 在本实施例中，构建引入控制节点的网络状态方程，并根据网络状态方程获得最大和最小特征值、第一和第二常量，并根据最大特征值、最小特征值、第一常量以及第二常量确定耦合强度系数，所获得网络耦合强度系数能够更加准确地反应系统的耦合强度，选取耦合强度系数更大的控制节点集合对网络进行控制，实现更好的控制网络。

现分别采用基于图 1 所示实施例示出的控制方法以及其他两种控制方法获得控制节点集合，执行如下步骤：

S201 根据网络的邻接矩阵A 等网络拓扑结构参数，计算该模拟网络的传统

比率判据 R 以及提出的判据 ω 和 v 。其中, v 为矩阵 $[Df + \beta H^T]$ 的最大特征值, S202 分别在 R , ω 和 v 最优 (最大) 的情况下, 得到不同的牵引控制节点集。

图 2 (a) 为采用现有的控制方法得到的控制节点集合分布图。如图 2 (a) 所示, 节点 1、4 和 7 代表 R 最优情况下的牵引控制集。图 2 (b) 为采用图 1 所示实施例提供的控制方法得到的控制节点集合分布图。如图 2 (b) 所示, 节点 4、7 和 8 代表 ω 最优情况下的牵引控制集。图 2 (c) 为采用现有的其他控制方法得到的控制节点集合分布图; 如图 2(c) 所示, 节点 2、8 和 11 代表最优的牵引控制集。

10 如表 1 所示, 在两个牵引控制节点集中, 观察 R , ω 和 v 的值的变化的情况。

表 1 R , ω 和 v 的值的变化的情况表

	最优 R 值	最优 ω 值	最优 v 值
R	0.0693	0.0679	0.0595
ω	0.1232	0.1233	0.1231
v	0.0174	0.0126	-0.0307

本发明还尝试在实际系统中进行数据模拟与测试, 并取得了可观的效果。这里, 我们选择了如下四个真实网络。网络 1 为 ItalyPowerGrid、网络 2 为 PDZBase、网络 3 为 US Air 和网络 4 为 Neural。实验中我们将网络结构都看成是无权无向的。网络的结构属性包括网络规模(N)、边的数量(E)、度异质性($H = \langle k^2 \rangle / \langle k \rangle^2$)、度结合性(r)、平均聚类系数($\langle C \rangle$)、平均最短路径($\langle d \rangle$)以及稀疏度 (Sparsity), 如下表 2 所示:

表 2 网络的结构属性

	N	E	H	r	$\langle C \rangle$	$\langle d \rangle$	稀疏度
网络 1	67	93	1.158	-0.036	0.022	6.70	3.0×10^{-2}
网络 2	161	209	2.063	-0.466	0.001	5.11	1.6×10^{-2}
网络 3	332	2126	3.464	-0.208	0.625	2.74	3.9×10^{-2}
网络 4	297	2148	1.81	-0.163	0.292	2.46	4.9×10^{-2}

图 3 (a) 描述了网络 1 在传统比率判据 R 、牵引控制点集以及不同的最大优化策略的函数。图 3 (b) 描述了网络 2 在传统比率判据 R 、牵引控制点集以及不同的最大优化策略的函数。图 3 (c) 描述了网络 3 在传统比率判据 R 、牵

引控制点集以及不同的最大优化策略的函数。图 3 (d) 描述了网络 4 在传统比率判据 R 、牵引控制点集以及不同的最大优化策略的函数。如图 3 (a)、图 3 (b)、图 3 (c) 以及图 3 (d) 所示, R_{opt} 、 ω_{opt} 与 v_{opt} 分别代表 R 、 ω 和 v 最优化时, 牵引节点集在传统比率判据 R 的结果。纵坐标代表点的牵引点占有所有节点的比例。 R_{opt} 和 ω_{opt} 折线图趋势近乎一样, 这表明 ω 是能够和 R 一样, 描述牵引控制能力。但在图 3 (a)、图 3 (b) 中, ω 和 R 存在比较小的不一致, 对于这四个真实网络, ω 和 v 的最优控制节点不能到达 R 的最大值 (其中, v 为根据最优李雅普诺夫指数计算的结果, 即最优控制速度), 也就是说在实际网络中, R 、 ω 和 v 的实际应用是不同的。

图 4 (a) 表示网络 1 本发明提出判据 ω 在牵引控制点集以及不同的最大优化策略的结果, 图 4 (b) 表示网络 2 本发明提出判据 ω 在牵引控制点集以及不同的最大优化策略的结果, 图 4 (c) 表示网络 3 本发明提出判据 ω 在牵引控制点集以及不同的最大优化策略的结果, 图 4 (d) 表示网络 4 本发明提出判据 ω 在牵引控制点集以及不同的最大优化策略的结果。图 4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c) 以及图 4 (d) 验证了 ω 相对于 R 不同应用情况。在图 4 (a) 中, δ 在 0.18 附近时, $\omega_{opt} > R_{opt}$, 并达到了 R 、 ω 和 v 的最大值 (其中 v 为根据最优李雅普诺夫指数计算的结果, 即最优控制速度), 表明只优化单个客观指标是不能到达三个指标 R 、 ω 和 v 最优值的。在这种情况下, ω 相较于 R , 合理的耦合强度表示的范围更大一些。

图 5 表示在网络 1 至网络 4 中交集所占牵引控制节点并集的比例。其中, 纵坐标为两个不同标准所确定牵引点集合中, 交集所占牵引控制节点并集的比例, 其中, 空白柱形表示传统比率 R 和新提出判据 ω 的交集占牵引控制节点并集的比例, 具有斜线条的柱形表示传统比率 R 与最优控制速度的交集占牵引控制节点并集的比例, 具有黑色填充的柱形表示最优控制速度与新提出判据 ω 的交集占牵引控制节点并集的比例。很明显, 传统比率 R 和新提出判据 ω 的交集相较于其他, 比例最大。在网络 3 和网络 4 中, 甚至达到了 0.7 以上, 但在网络 1 和网络 2 中差异较大。这表明 R 和 ω 所使用的场景是不同的, 这种差异也同时造成了图 4 和图 5 的差异。

由此可见, 本发明的新判据 ω 相对于传统判据 R , 确实有一定的改善, 传统判据 R 不能精确描述耦合强度范围, 在某些情况下, 新判据 ω 所确定的耦合强度范围比传统判据 R 大。

下面对控制装置进行介绍，其实现原理和技术效果与上述方法原理和技术效果类似，此处不再赘述。

图 6 为本发明根据一示例性实施例示出的控制装置的结构示意图。如图 6 所示，本发明提供的控制装置 200，包括：获得模块 201，用于从网络节点中选取控制节点以获得控制节点集合；构建模块 202，用于根据控制节点集合构建网络状态方程；其中，网络状态方程包括耦合项和反馈项，耦合项包括节点耦合系数；确定模块 203，用于根据耦合项和反馈项确定耦合强度矩阵，并获得耦合强度矩阵的最大特征值和最小特征值；确定模块 203 还用于根据最大特征值、最小特征值以及耦合系数确定第一常量和第二常量；确定模块 203 还用于根据最大特征值、最小特征值、第一常量以及第二常量确定耦合强度系数；判断模块 204，用于判断所述控制节点集合中节点数量是否小于预设数量；更新模块 205，用于若判断结果为是，则当所述耦合强度系数大于预设的标准耦合强度系数时，利用所述耦合强度系数更新所述标准耦合强度系数，并更新所述控制节点集合，直至所述控制节点集合中节点数量等于预设数量；输出模块 206，用于若判断结果为否，则输出标准耦合强度系数对应的控制节点集合，以利用所述控制节点集合中节点控制网络。

可选地，确定模块 203 具体用于：根据如下公式确定耦合强度范围：

$$R = \frac{\alpha_1}{\lambda_N} - \frac{\alpha_2}{\lambda_1}$$

其中， R 表示耦合强度系数， λ_N 表示最大特征值， λ_1 表示最小特征值， α_1 表示第一常量， α_2 表示第二常量，且 $\alpha_1 < \alpha_2 < 0$ 。

可选地，更新模块 206 具体用于：从网络的节点中选择一个节点新增至所述控制节点集合，以更新所述控制节点集合。

可选地，耦合强度矩阵的具体表达式为：

$$A = -L - D$$

其中， A 表示耦合强度矩阵， L 表示网络的拉普拉斯矩阵， D 表示网络的反馈矩阵。

总之，本申请提供的电子设备可用于执行上述飞机提示方法，其内容和效果可参考方法部分，本申请对此不再赘述。

图 7 为本发明根据一示例性实施例示出的电子设备的结构示意图。如图 7 所示，本实施例的电子设备 300 包括：处理器 301 以及存储器 302，其中，

存储器 302，用于存储计算机执行指令；

处理器 301，用于执行存储器存储的计算机执行指令，以实现上述实施例中接收设备所执行的各个步骤。具体可以参见前述方法实施例中的相关描述。

可选的，存储器 302 既可以是独立的，也可以跟处理器 201 集成在一起。

5 当存储器 302 独立设置时，该电子设备 300 还包括总线 303，用于连接所述存储器 302 和处理器 301。

本发明实施例还提供一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质中存储有计算机执行指令，当处理器执行所述计算机执行指令时，实现如上所述的控制方法。

10 最后应说明的是：以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

权 利 要 求 书

1、一种控制方法，其特征在于，包括：

从网络节点中选取控制节点以获得控制节点集合；

5 根据所述控制节点集合构建网络状态方程；其中，所述网络状态方程包括耦合项和反馈项，所述耦合项包括节点耦合系数；

根据所述耦合项和所述反馈项确定耦合强度矩阵，并获得所述耦合强度矩阵的最大特征值和最小特征值；

根据所述最大特征值、所述最小特征值以及所述耦合系数确定第一常量和第二常量；

10 根据所述最大特征值、所述最小特征值、所述第一常量以及所述第二常量确定耦合强度系数；

判断所述控制节点集合中节点数量是否小于预设数量；

15 若判断结果为是，则当所述耦合强度系数大于预设的标准耦合强度系数时，利用所述耦合强度系数更新所述标准耦合强度系数，并更新所述控制节点集合，直至所述控制节点集合中节点数量等于预设数量；

若判断结果为否，则输出标准耦合强度系数对应的控制节点集合，以利用所述控制节点集合中节点控制网络。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，根据如下公式确定所述耦合强度范围：

$$\omega = \frac{\alpha_1}{\lambda_N} - \frac{\alpha_2}{\lambda_1}$$

20 其中， ω 表示耦合强度系数， λ_N 表示最小特征值， λ_1 表示最大特征值， α_1 表示第一常量， α_2 表示第二常量，且 $\alpha_1 < \alpha_2 < 0$ 。

3、根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述更新所述控制节点集合，具体包括：

25 从网络的节点中选择一个节点新增至所述控制节点集合，以更新所述控制节点集合。

4、根据权利要求 1 至 3 任一项所述的方法，其特征在于，所述耦合强度矩阵的具体表达式为：

$$B = -L - D$$

其中，B表示所述耦合强度矩阵，L表示网络的拉普拉斯矩阵，D 表示网络

的反馈矩阵。

5、一种控制装置，其特征在于，包括：

获得模块，用于从网络节点中选取控制节点以获得控制节点集合；

构建模块，用于根据所述控制节点集合构建网络状态方程；其中，所述网络状态方程包括耦合项和反馈项，所述耦合项包括节点耦合系数；

确定模块，用于根据所述耦合项和所述反馈项确定耦合强度矩阵，并获得所述耦合强度矩阵的最大特征值和最小特征值；

所述确定模块还用于根据所述最大特征值、所述最小特征值以及所述耦合系数确定第一常量和第二常量；

所述确定模块还用于根据所述最大特征值、所述最小特征值、所述第一常量以及所述第二常量确定耦合强度系数；

判断模块，用于判断所述控制节点集合中节点数量是否小于预设数量；

更新模块，用于若判断结果为是，则当所述耦合强度系数大于预设的标准耦合强度系数时，利用所述耦合强度系数更新所述标准耦合强度系数，并更新所述控制节点集合，直至所述控制节点集合中节点数量等于预设数量；

输出模块，用于若判断结果为否，则输出标准耦合强度系数对应的控制节点集合，以利用所述控制节点集合中节点控制网络。

6、根据权利要求5所述的装置，其特征在于，所述确定模块具体用于：

根据如下公式确定所述耦合强度范围：

$$\omega = \frac{\alpha_1}{\lambda_N} - \frac{\alpha_2}{\lambda_1}$$

其中， ω 表示耦合强度系数， λ_N 表示最小特征值， λ_1 表示最大特征值， α_1 表示第一常量， α_2 表示第二常量，且 $\alpha_1 < \alpha_2 < 0$ 。

7、根据权利要求6所述的装置，其特征在于，所述更新模块具体用于：

从网络的节点中选择一个节点新增至所述控制节点集合，以更新所述控制节点集合。

8、根据权利要求5至7任一项所述的装置，其特征在于，所述耦合强度矩阵的具体表达式为：

$$B = -L - D$$

其中，B表示所述耦合强度矩阵，L表示网络的拉普拉斯矩阵，D表示网络的反馈矩阵。

9、一种电子设备，其特征在于，包括：至少一个处理器和存储器；
其中，所述存储器存储计算机执行指令；

所述至少一个处理器执行所述存储器存储的计算机执行指令，使得所述至少一个处理器执行如权利要求 1 至 4 任一项所述的控制方法。

5 10、一种计算机可读存储介质，其特征在于，所述计算机可读存储介质中存储有计算机执行指令，当处理器执行所述计算机执行指令时，实现如权利要求 1 至 4 任一项所述的控制方法。

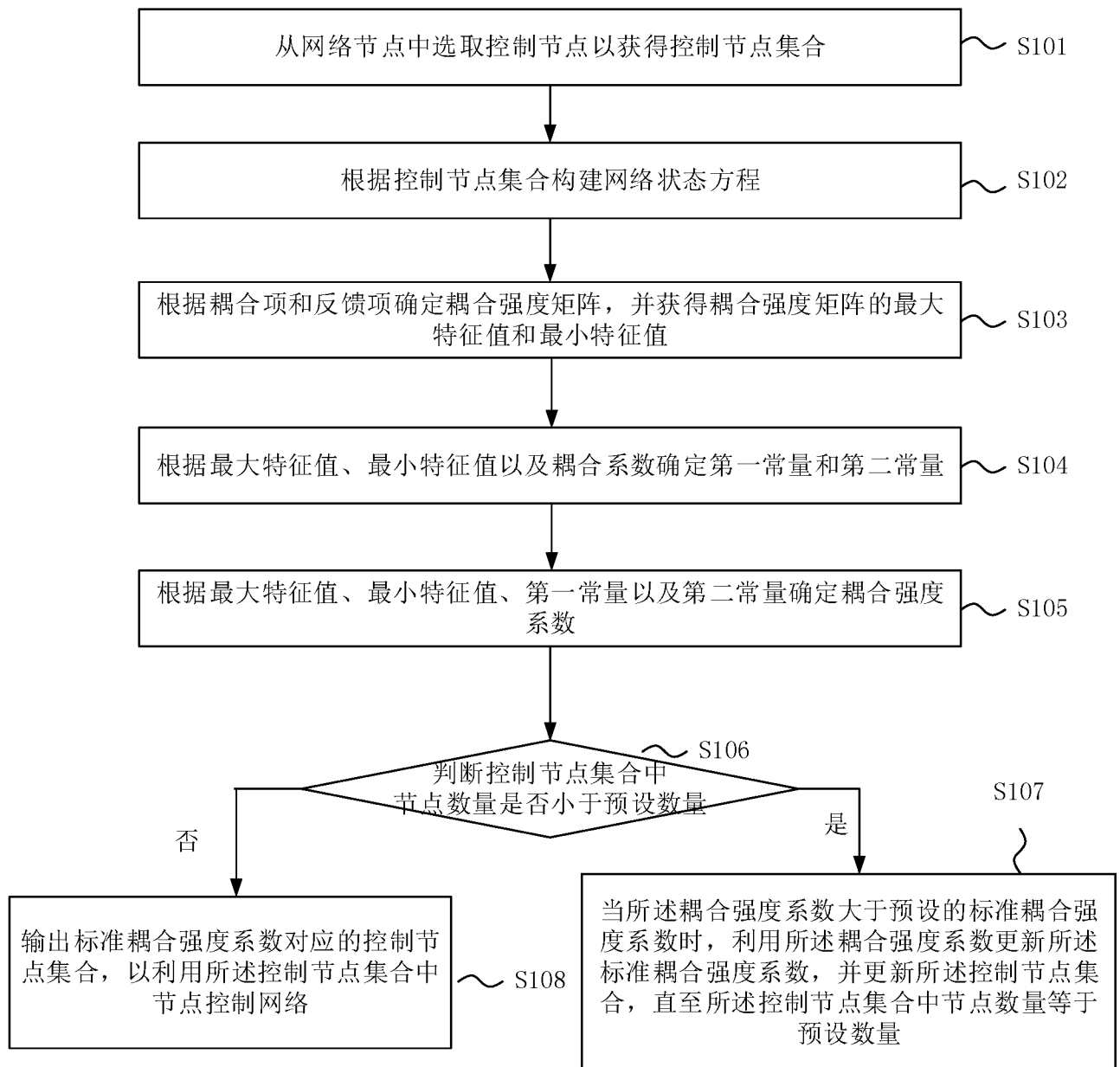


图 1

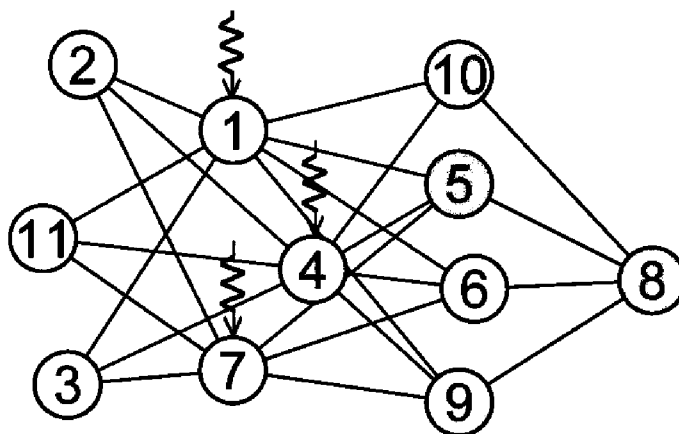


图 2 (a)

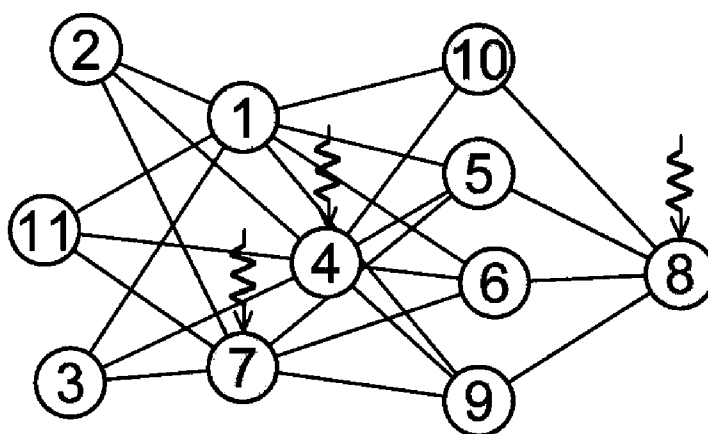


图 2 (b)

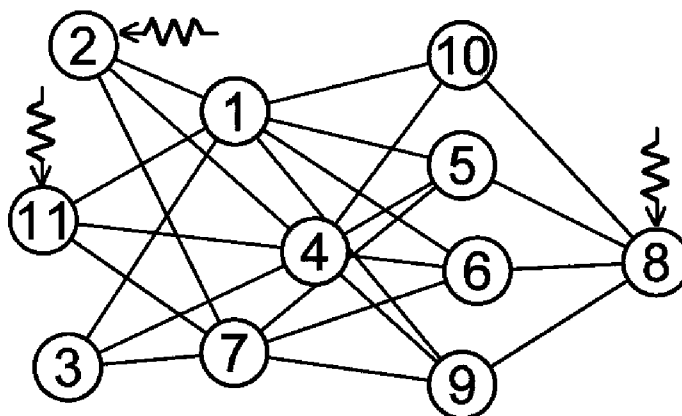


图 2 (c)

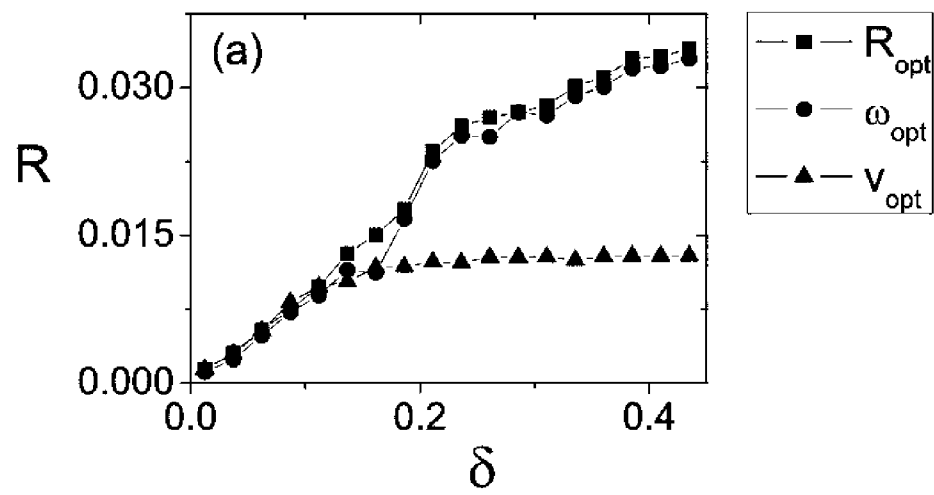


图 3 (a)

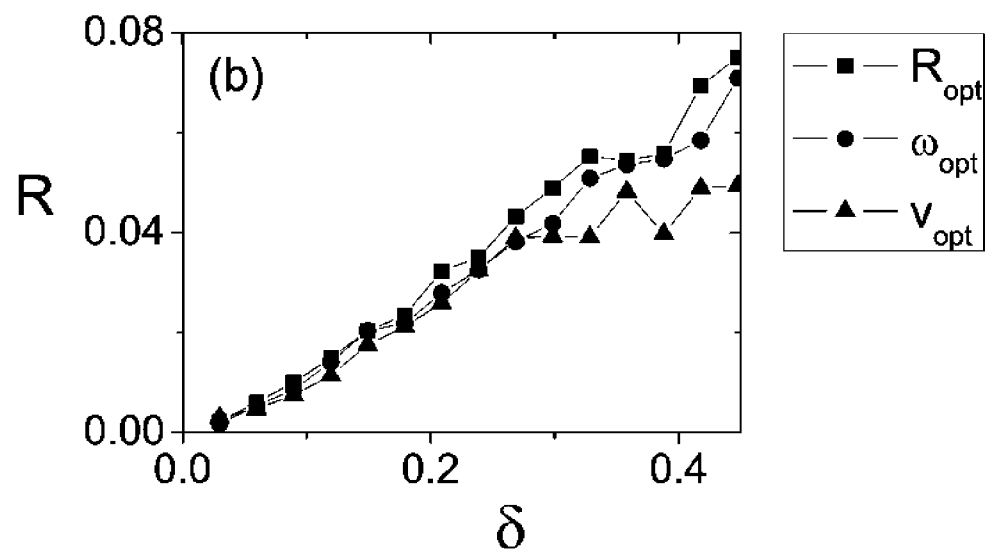


图 3 (b)

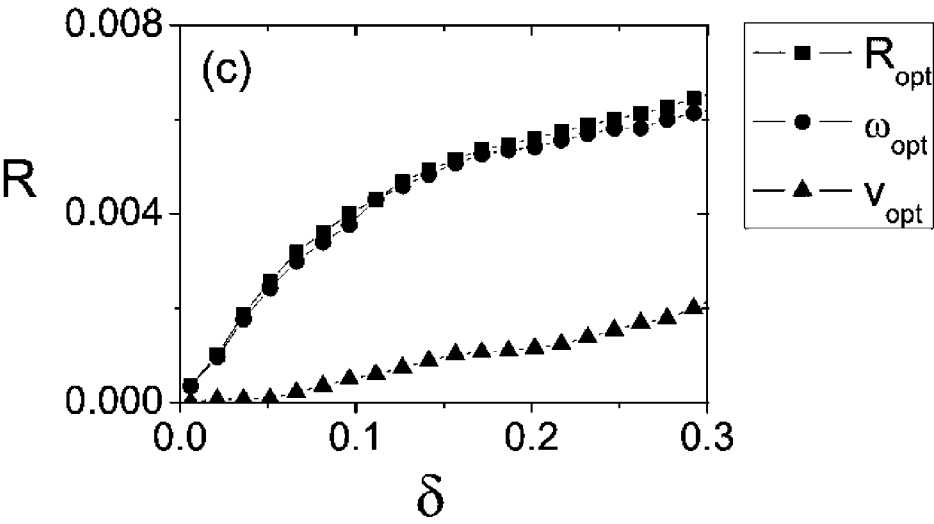


图 3 (c)

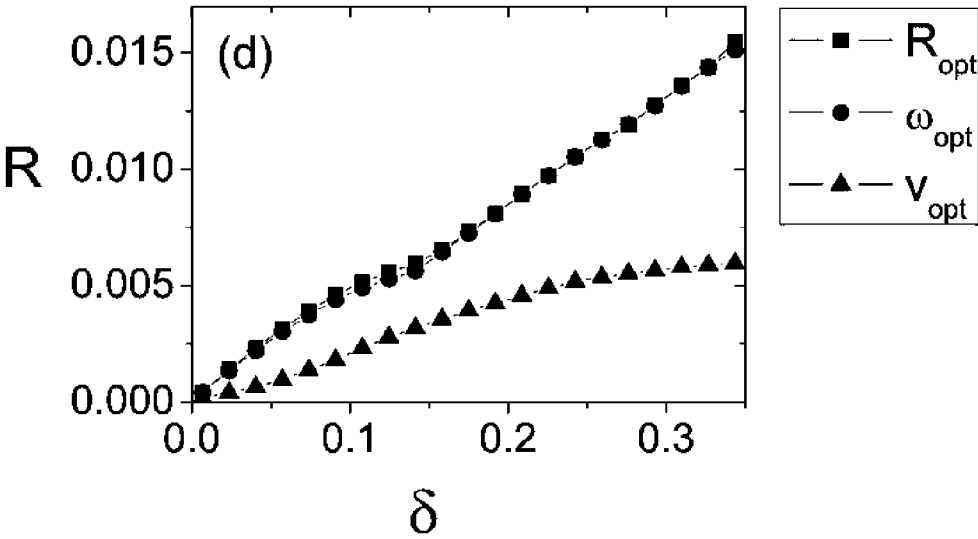


图 3 (d)

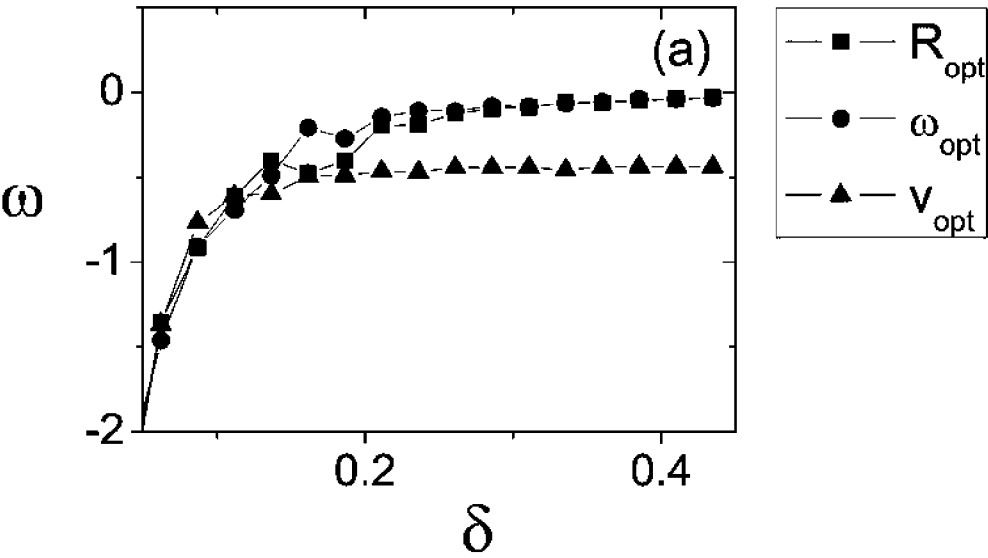


图 4 (a)

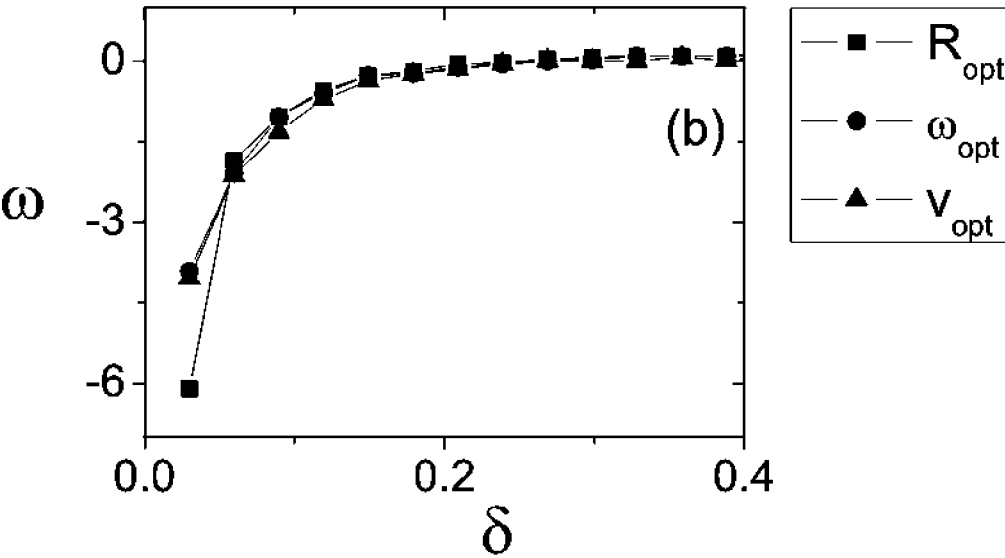


图 4 (b)

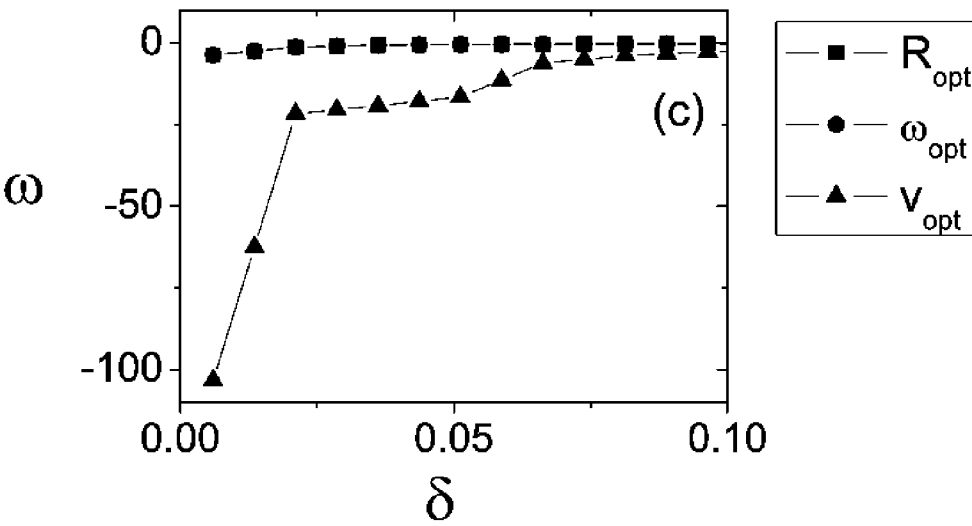


图 4 (c)

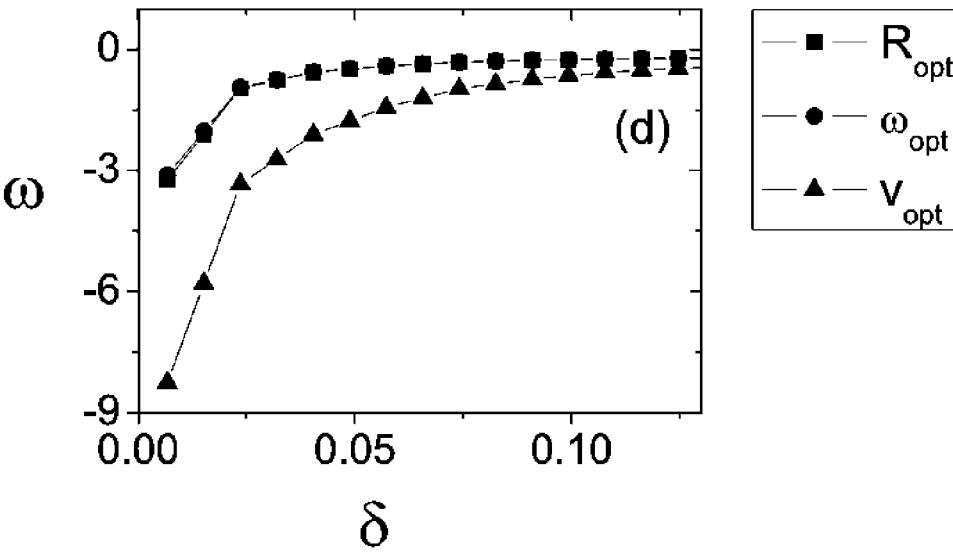


图 4 (d)

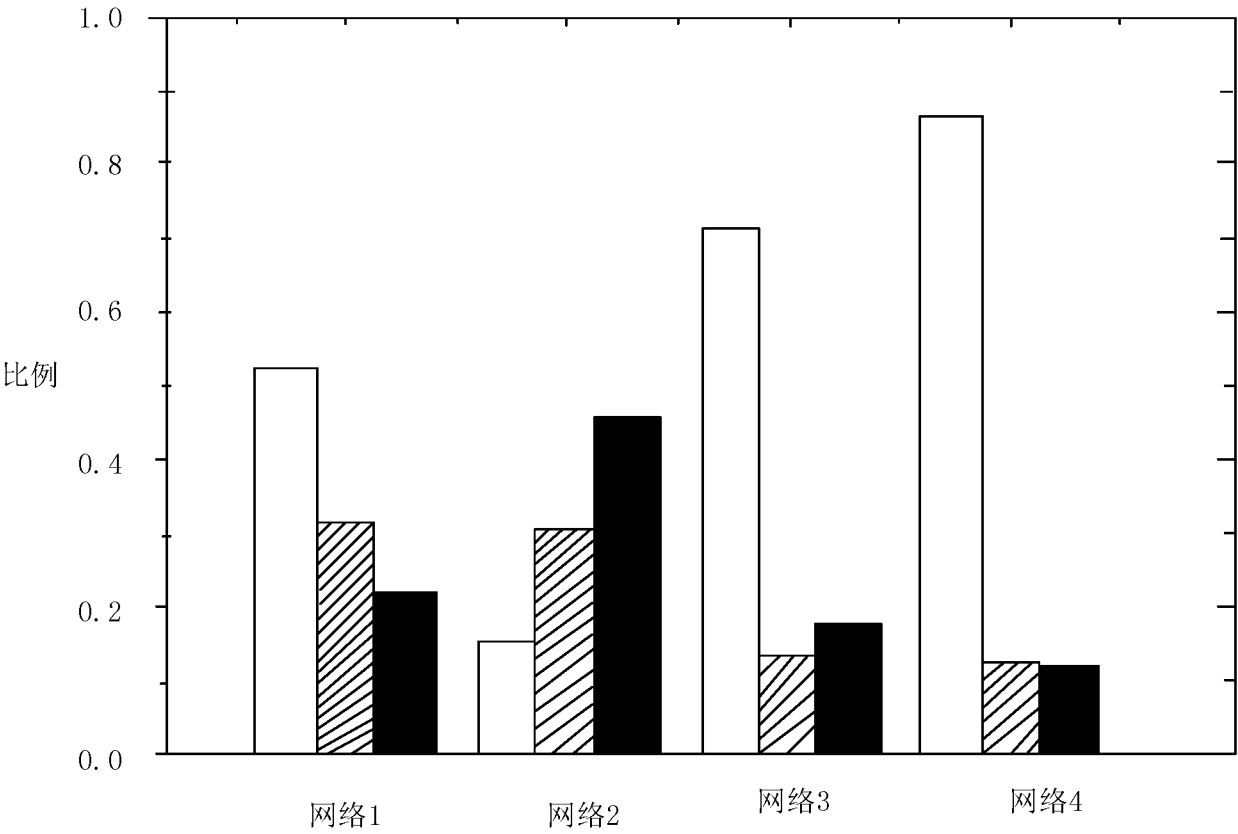


图 5

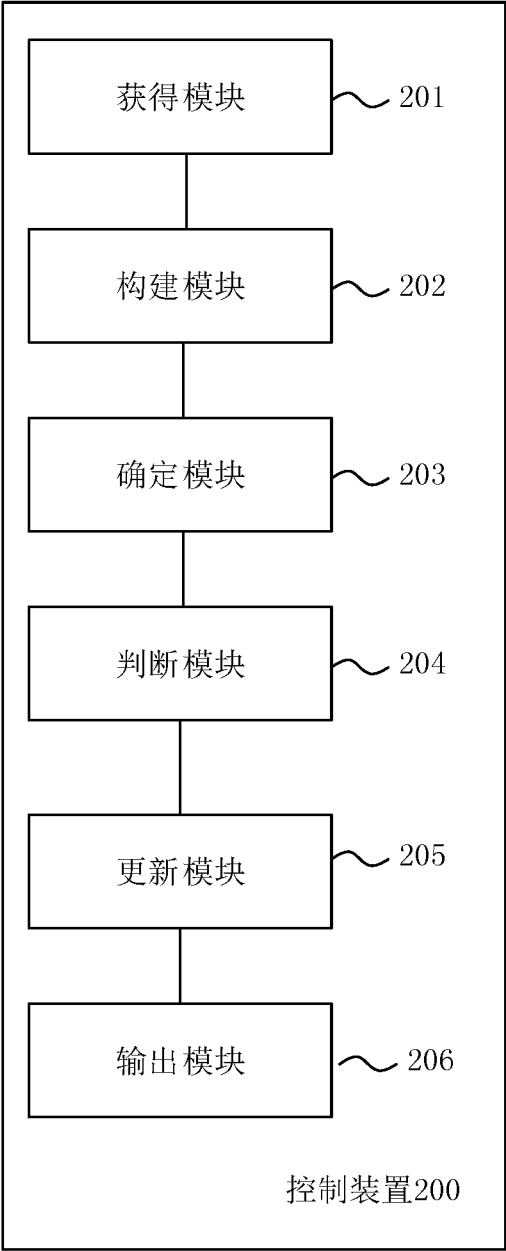


图 6

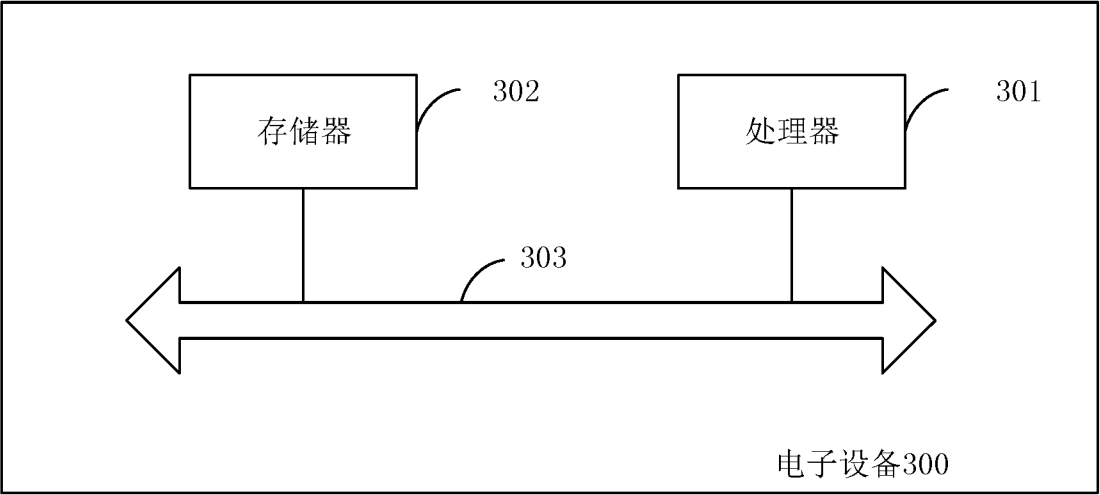


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/080965

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H04L 12/24(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H04L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, WPI, CNPAT, IEEE, CNKI: 网络, 牵引控制, 控制节点, 状态, 耦合, 反馈, 特征值, pinning, control, node?, coupl
+, feedback**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JALILI, M. et al. "Optimal pinning controllability of complex networks: Dependence on network structure" <i>Physical Review E</i> , Vol. 91, No. 1, 31 January 2015 (2015-01-31), pp. 2-4	1-10
X	ZHOU, M. Y. et al. "Diffusion inspires selection of pinning nodes in pinning control" <i>Physica A</i> , Vol. 446, 28 November 2015 (2015-11-28), pp. 121-123	1-10
Y	汪小帆 等 (WANG, Xiaofan et al.). "复杂动态网络控制研究进展 (Recent Progress in Content of Complex Dynamical Networks)" <i>力学进展 (Advances in Mechanics)</i> , Vol. 38, No. 6, 25 November 2008 (2008-11-25), page 753	1-10
Y	陈关荣 (CHEN, Guanrong). "复杂动态网络环境下控制理论遇到的问题与挑战 (Problems and Challenges in Control Theory under Complex Dynamical Network Environments)" <i>自动化学报 (Acta Automatica Sinica)</i> , Vol. 39, No. 4, 30 April 2013 (2013-04-30), pages 315 and 316	1-10
A	CN 109039745 A (NORTHEASTERN UNIVERSITY) 18 December 2018 (2018-12-18) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 December 2019

Date of mailing of the international search report

02 January 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/080965

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	109039745	A	18 December 2018	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/080965

A. 主题的分类 H04L 12/24 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																				
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) H04L 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) EPDOC, WPI, CNPAT, IEEE, CNKI: 网络, 牵引控制, 控制节点, 状态, 耦合, 反馈, 特征值, pinning, control, node?, coupl+, feedback																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>JALILI, M. 等. "Optimal pinning controllability of complex networks: Dependence on network structure" PHYSICAL REVIEW E, 第91卷, 第1期, 2015年 1月 31日 (2015 - 01 - 31), 第2-4页</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>ZHOU, M.Y. 等. "Diffusion inspires selection of pinning nodes in pinning control" Physica A, 第446卷, 2015年 11月 28日 (2015 - 11 - 28), 第121-123页</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>汪小帆 等. "复杂动态网络控制研究进展" 力学进展, 第38卷, 第6期, 2008年 11月 25日 (2008 - 11 - 25), 第753页</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>陈关荣. "复杂动态网络环境下控制理论遇到的问题与挑战" 自动化学报, 第39卷, 第4期, 2013年 4月 30日 (2013 - 04 - 30), 第315-316页</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 109039745 A (东北大学) 2018年 12月 18日 (2018 - 12 - 18) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	X	JALILI, M. 等. "Optimal pinning controllability of complex networks: Dependence on network structure" PHYSICAL REVIEW E, 第91卷, 第1期, 2015年 1月 31日 (2015 - 01 - 31), 第2-4页	1-10	X	ZHOU, M.Y. 等. "Diffusion inspires selection of pinning nodes in pinning control" Physica A, 第446卷, 2015年 11月 28日 (2015 - 11 - 28), 第121-123页	1-10	Y	汪小帆 等. "复杂动态网络控制研究进展" 力学进展, 第38卷, 第6期, 2008年 11月 25日 (2008 - 11 - 25), 第753页	1-10	Y	陈关荣. "复杂动态网络环境下控制理论遇到的问题与挑战" 自动化学报, 第39卷, 第4期, 2013年 4月 30日 (2013 - 04 - 30), 第315-316页	1-10	A	CN 109039745 A (东北大学) 2018年 12月 18日 (2018 - 12 - 18) 全文	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
X	JALILI, M. 等. "Optimal pinning controllability of complex networks: Dependence on network structure" PHYSICAL REVIEW E, 第91卷, 第1期, 2015年 1月 31日 (2015 - 01 - 31), 第2-4页	1-10																		
X	ZHOU, M.Y. 等. "Diffusion inspires selection of pinning nodes in pinning control" Physica A, 第446卷, 2015年 11月 28日 (2015 - 11 - 28), 第121-123页	1-10																		
Y	汪小帆 等. "复杂动态网络控制研究进展" 力学进展, 第38卷, 第6期, 2008年 11月 25日 (2008 - 11 - 25), 第753页	1-10																		
Y	陈关荣. "复杂动态网络环境下控制理论遇到的问题与挑战" 自动化学报, 第39卷, 第4期, 2013年 4月 30日 (2013 - 04 - 30), 第315-316页	1-10																		
A	CN 109039745 A (东北大学) 2018年 12月 18日 (2018 - 12 - 18) 全文	1-10																		
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																				
<table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> * 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td style="vertical-align: top;"> "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																			
国际检索实际完成的日期 2019年 12月 20日		国际检索报告邮寄日期 2020年 1月 2日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 李铎 电话号码 86-(10)-53961393																		

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/080965

检索报告引用的专利文件	公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN 109039745 A	2018年 12月 18日	无	