

基于图论的智能针灸机器人取穴原理研究

刘震¹ 赵壮¹ 林祺² 徐天成³

(1 南京中医药大学信息技术学院,南京,210023; 2 南京中医药大学第二临床医学院,南京,210023;

3 南京中医药大学附属医院,南京,210029)

摘要 随着医疗机器人技术及通用人工智能技术的迅猛发展,标准化、智能化已经成为了现代医学发展的主流趋势。我团队自主开发了基于数字经理理论的智能针灸机器人,具备基于经穴主治与症状联系的小世界网络自动配穴这一核心功能,我们运用基于模块度优化的启发式社区发现算法,对腧穴-主治网络进行了较为系统的研究,并通过进一步的开发,初步实现了基于图论的针灸智能取穴功能。

关键词 腧穴;复杂网络;社团划分;图论;针灸治疗;医疗机器人;人工智能;算法

Research on Acupoint Selection Theory of Intelligent Acupuncture Robot Based on Graph Theory

Liu Zhen¹, Zhao Zhuang¹, Lin Qi², Xu Tiancheng³

(1 Institute of Information Technology, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China; 2 Second School of Clinical Medicine, Nanjing University of Chinese Medicine, 210023, China; 3 Affiliated Hospital of Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210029, China)

Abstract With the rapid development of medical robot technology and general artificial intelligence technology, standardization and intelligence have become the mainstream trend of modern medical development. Our team independently developed a smart acupuncture robot based on the digital meridian theory. It has the core function of the automatic world-based acupoints based on the acupoint-indication and symptom connection. We use the heuristic community discovery algorithm based on modularity optimization to carry out systematic study on acupoints-indication network, and through further development, initially realized the intelligent acupoint selection function based on graph theory.

Key Words Acupoints; Complex networks; Community divisions; Graph theory; Acupoint treatment; Medical robot; Artificial intelligence; Algorithm

中图分类号:R245 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1673-7202.2018.08.043

Alpha Go 人机围棋大战的成功给中医学提供了极大的启发,中医学将可能借助基于大数据的新人工智能走上以智能化、机器化、自动化为标志的现代化之路。将中医药典籍和中医诊疗过程等中医知识、经验转化为数据,所形成的中医大数据将为中医智能化提供丰富的经验基础^[1]。而随着通用人工智能技术的进一步成熟,用于诊断的医疗人工智能正逐步从实验室走近临床,2018年2月23日,顶级期刊 Cell 以封面文章的形式发表了一篇人工智能(AI)在医疗领域应用的重磅研究成果,指出基于深度学习技术已研发出一款能诊断眼病和肺炎两大类疾病的 AI 系统^[2],跨病种、跨影像学数据类型并具有一定可解释性的新一代人工智能平台是人工智能图像技术在医学影像领域的首个应用成果,可促进疾病的早期治疗和精准治疗,改善患者的临床预后。

而在中医针灸的相关研究中,引入循证医学理念和方法促进针灸经验决策模式向循证决策模式转变,对提高针灸临床疗效具有非常重要的意义^[2]。而早年的研究较为分散和模糊^[4],且技术尚未成熟,诸多研究围绕的是基于深度学习或数据挖掘等得出腧穴的配伍规律^[5-6],而未能实现将得出的规律反向运用于指导临床,我团队尝试使用图论在挖掘腧穴-主治网络拓扑学规律的基础上,形成基于该结果的人工智能针灸选穴软件。

1 图论及其主要研究参数

1.1 图论简介 图论起源于著名的 Königsberg 七桥问题^[7]。位于前苏联的这座古老的城堡中,有一条 Pregel 河,河水把城市分成 4 个小岛般的区域,人们在河上建造了 7 座桥,把城市连成一体。由此引发了一个问题:是否存在一种路径,从 4 个河岸中的

任1个开始,通过每座桥且只能通过1次,并最后回到起点。数学家 Leonhard Euler 解决了这一难题,他认为,该问题与河岸和岛的大小、形状以及桥的长度曲直无关,关键取决于河岸、岛、桥的数目并证明了这个问题没有解。之后他又对这一类问题进行总结推广,给出了关于一个图以某种方式走遍的判定法则,标志着图论的诞生。许多的自然系统和社会系统以网络的式存在,如因特网,代谢网络、社交网络、食物链网络、知识网络、神经网络、业务关系网络、血管网络等^[8]。网络在数学上又称为“图”,图论作为离散数学的重要组成部分之一,通常也是研究网络的主要且有效的方法。这种生物、社会、交通、能源等存在于真实世界中的很多系统,都可表示成若干节点和边构成的网络。其表示的系统,其基本单位可简化成这些节点,边则表示这些基本单元间的相互作用或关系^[9]。这样的系统数学网络化的过程以系统的基本单位及其间的结构联系为重点,忽略了这些系统本身的理化等特性,抽象出“图”的数学模式。

现实世界中,不同类的系统间差异鲜明,但通过图论的数学建模过程发现,这些抽象而来的网络中很多具有共同的结构或性质,且通过研究这些网络的特性可进一步揭示系统原型的形成原理、结构功能和演化规律等。随着信息技术的迅猛发展,现在我们能够收集和分析的数据规模远大于先前,复杂网络可达数百万节点以及数十亿连边的级别^[10]。网络规模的变化势必引起分析方法的改变,原本小型网络中不存在的问题可能在大型网络中出现,并且无法被原先仅适用于小型网络的方法所解决。在大规模如上万节点的一个网络中,随意移除一两个节点网络整体可能并没有什么变化,但究竟移除多少个顶点才会对网络的连通性产生极大的影响呢?这样的问题就具有非常现实的意义^[11]。近年来对大规模复杂网络的定量与定性研究,尤其是几个重要的特性。吸引子、小世界、无标度等的研究,已成为当代科学研究中极其重要的挑战性挑战之一^[12]。

1.2 图论在中医药研究中的应用 作为一项通用性的分析技术,使用图论研究的中医问题也十分丰富,例如佟旭^[13]提出的基于复杂网络重叠社区发现算法的特征选择,能有效提取出对证型代表性强且区分度高的典型特征组合,所得出的多种建模策略可胜任糖尿病肾病多证型分类任务,类似模型也适用于中医药领域具有高维度、稀疏性和非线性特点的其他数据和类似问题的建模研究。而在针灸领

域,图论更广泛地应用于观测针刺特定穴位后脑功能的改变数据分析,如付彩红^[14]应用独立成分分析提取静息态多个脑功能网络,并通过比较分析中风偏瘫患者和健康受试者脑网络内的功能连接的特点,探讨中风偏瘫患者脑功能网络变化的异常特征。在此基础上,采用格兰杰因果分析进一步探讨针刺对中风偏瘫多个脑网络间的调节效应。

1.3 图论研究的主要参数介绍

在图论研究过程中,对于某一网络的拓扑特征分析,主要从最短路径、平均路径、网络直径、节点度、度分布、度中心性、介数中心性、聚集系数和特征向量等参数展开,下面本文就这些参数作简要介绍。

1.3.1 最短路径、平均路径和网络直径 最短路径是连接两个节点的所有路径中最小的路径,在无权图中就是最短路径经历的边数,表示为 d_{ij} 。网络平均路径为所有节点对之间距离的平均值,记为 $L = \text{avg}_{ij}(d_{ij})$ 。网络直径为任意两个节点距离的最大值,记为 $D = \max_{ij}(d_{ij})$ 。现实世界中复杂网络所涌现出来的重要特性,比如小世界现象和无标度特性,都影响着病毒的传播行为。探索复杂网络上病毒的传播行为,揭示蕴藏其中的传播规律,进而发现影响病毒传播的重要因素,对于提出相应的预防,免疫和控制策略有着非常重要的现实意义^[15]。

1.3.2 节点度和度分布 网络中节点 i 的度 k_i 为节点 i 连接的边的总数目,记为 $d(v)$ 。所有节点 i 的度 k_i 的平均值称为网络的平均度 k ,记为 \bar{d} 。网络中节点的度分布用分布函数 $p(k)$ 来表示,其含义为任意选择的某一节点恰好有 k 条边的概率,也等于网络中度数为 k 的节点的个数占网络中节点总个数的比值。

1.3.3 度中心性和介数中心性 中心性反映了成员在网络中所处的地位和权利影响,分为度中心性和介数中心性。前者反映了节点与其他节点存在直接联系,以节点度大小作为衡量标准;而介数中心性则反映节点对其他节点之间联系的控制作用,用经过节点的最短路径来衡量^[16]。吕永强等^[15]用介数中心性刻画北京交通流量,值越高,说明该交通节点的流量越高,对其他节点的影响越大,最终指出北京交通网络的介数中心性高值区沿京港澳高速、京藏高速、机场高速等和二环、三环、四环分布,得出这些道路内部的交通流量大、通勤度较高,能够吸引人口、产业集聚的结论^[17]。这就是图论在现实世界中的实际运用。

1.3.4 聚集系数 聚集系数表示一个图中节点聚

集的程度,在现实网络中,尤其是在特定的网络中,由于相对高密度连接点的关系,节点总是趋向于建立一组严密的组织关系。在现实世界的网络,这种可能性往往比两个节点之间随机设立了一个连接的平均概率更大。节点 i 的聚集系数定义为 $C_i = \frac{2M_i}{d(v_i)(d(v_i)-1)}$,其中 $d(v_i)$ 为节点 i 的度, M_i 为与节点 i 实际相连的边数。

1.3.5 特征向量 节点的重要性除了与连接的边数有关,还与连接节点本身的重要性有关,一个节点可通过连接重要的节点从而提高本身在网络中的重要性,特征向量就是刻画与节点相连接的节点与边的影响。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ 表示网络的邻接矩阵 A 的 N 个特征值,设 λ 是邻接矩阵 A 的主特征值,特征向量为 $e = [e_1, e_2, e_3, \dots, e_N]^T$, $\lambda e_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} e_j, i = 1, \dots, n$,那么节点 v_i 的特征向量指标可定义为: $C_e(v_i) = \lambda^{-1} \sum_{j=1}^N a_{ij} e_j^{[19]}$ 。

2 针灸腧穴-主治网络的小世界特征

我们团队提取《经络腧穴学》及《针灸甲乙经》书中的“穴名”和“主治”2 个元素进行的经脉系统的数学建模。其基本原理为:穴位间根据相同主治进行连边,如劳宫穴与涌泉穴的共同主治证候之一为中暑,则形成一条连边。根据这一原则构建的腧穴-主治网络,在未标定网络经穴连线方向(即构建无向网络)的情况下,计算出《经络腧穴学》中穴-症网络平均聚类系数为 0.643,而相同条件下,节点数 362 个,连线率 5% 的随机网络的平均聚类系数为 0.026^[19]。经穴-主治复杂网络的高聚类系数是同规模随机网络的 24 倍,体现了高度的聚类特性。同理所得,《针灸甲乙经》穴-症网络平均聚类系数为 0.709,同样条件下,节点数 306 个,连线率 5% 的随机网络的平均聚类系数为 0.022。这一组研究成果的具体分析已经发表^[20-21],后续的分析 and 编程均基于以上研究成果。

3 编程思路

3.1 模块度的意义 典型的大型网络如社交网络、移动电话网络等,规模可达数百万甚至数十亿。传统算法难以胜任对整个网络的分析挖掘,学者提出的一个可能的方法是将网络提取出由一些高度连接的节点构成的子网络(或社区)^[22]。识别这些社区的重大意义,有利于发现未知的功能模块。

社区划分的目标是使得划分后的社区内部节点间联系较为紧密,而隶属于不同社区的节点之间的联系则较为稀疏。近年来,几种不同的社区发现算

法被提出,如分裂算法,扫描网络试图检测并删除不重要的连接边,凝聚算法等分裂算法也在腧穴社区发现中得到了应用^[23]。

为了评价社区划分的优劣,Newman 等提出了模块度的概念^[24],用社区内的连接数量与社区间的连接数量比较以衡量社区内部的连接密度。带权网络中的模块度定义如下:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} [A_{i,j} - \frac{k_i k_j}{2m}] \delta(c_i, c_j) \quad (1)$$

其中, $m = \frac{1}{2} \sum_{i,j} A_{i,j}$ 表示的是网络中的所有的权重, $A_{i,j}$ 表示的是节点 i 和节点 j 之间的权重, $k_i = \sum_j A_{i,j}$ 表示的是与顶点连接的边的权重, c_i 表示的是顶点被分配到的社区,当 $c_i = c_j$ 时 $\delta(c_i, c_j)$ 函数为 1,否则为 0。

本文采用基于模块度衡量社区优劣的 fast_unfolding 算法对病症-腧穴网络进行社团划分。算法分为以下步骤:

1) 网络初始化:先将网络中每个节点划分到一个单独的社区中;

2) 迭代计算:对于每个节点,尝试将其划分到与其相邻的节点所属的社区中,计算此时的模块度 Q_{new} 并与此次划分前的模块度 Q 比较得到 ΔQ ,若 ΔQ 为正,则接受本次划分,否则,拒绝本次划分;

重复以上过程,直到模块度 Q 值不能再增大为止;

3) 重新构造改图:根据当前社团划分情况,将同一社团中的节点凝聚为一个节点并计算相应边的权重;

4) 依次重复过程 2) 和 3),直到该图不再变化为止。

3.2 Q 峰值的计算 Q 函数可真实反映网络社团化的程度,其计算公式如式(1)。在 fast_unfolding 算法迭代过程中,根据公式计算每次划分后网络的 Q 值整体呈上升趋势,在前 4 000 次迭代过程中 Q 值迅速上升,在 4 000 到 12 000 次迭代过程中 Q 值上升速度略有减缓,在 12 000 次到 20 000 次迭代过程中, Q 值上升速度进一步减慢,20 000 次迭代之后 Q 值逐渐趋于稳定,并局部有振荡。说明划分结果趋于稳定, Q 值逐渐收敛,值得强调的是,fast_unfolding 算法对不合理的划分更加敏感,即在找到最理想的社团划分结果之前,算法尝试不合理的社团划分会在 Q 值上体现地更加明显,直观的变化趋势如图 1 所示:

算法输入为由腧穴-症状组成的网络,其中腧穴和症状作为节点,腧穴与症状的连接作为边,部分迭代结果如图2。

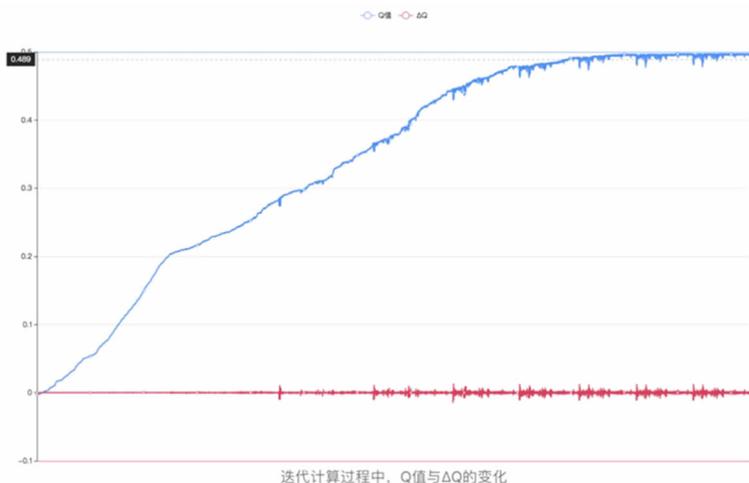
最终社团划分结果,由于节点较多,此处选择度数大于7的节点给予显示。见图3。

4 对针灸发展的意义

4.1 对针灸临床取穴具有指导意义 如今针灸临床治疗疾病,多有循经取穴,通过“经络理论”进行归经和主治整理,弱化了对穴位本身治疗作用的考虑,也是由于“经络理论”,可能放大了不同经穴位的差异,例如便秘,多考虑从手阳明大肠经,足阳明胃经等进行取穴,而临床多使用手少阳三焦经上支沟穴。通过穴-症的小世界网络,可使临床取穴更加

简洁高效,使用最少的穴位,达到最高的疗效,组成“性价比高”的针灸处方。

4.2 发展现代针灸 基于图论的智能针灸配穴系统顺应了数字经络智能针灸机器人的思维方式,从而使机器人理解经络,能够使其在得到症状后快速取穴,以发展现代针灸事业。根据“小世界效应”与“涌现计算”构建经穴主治定量分析模型,经由一系列数据挖掘的算法分析,穴-症网络具备高效的信息传递性,经脉不是穴位间关系的唯一表达。为将此理论实体化,我们建立穴位-主治网络,并以此为基础开发辅助选穴系统。软件系统最主要的功能为识别用户输入症状组,经由算法处理反馈给用户一组治疗对应症状的有效穴位。见图4、图5。



第23753次迭代	Q=0.4964509139494302
第23754次迭代	Q=0.4964509139494302
第23755次迭代	Q=0.49645214456179176
第23756次迭代	Q=0.4965932254789496
第23757次迭代	Q=0.496577403320016
第23758次迭代	Q=0.49729071898527183
第23759次迭代	Q=0.49720000527405256
第23760次迭代	Q=0.4970157650233592
第23761次迭代	Q=0.4961097706226455
第23762次迭代	Q=0.4961097706226455
第23763次迭代	Q=0.4961097706226455
第23764次迭代	Q=0.4965168396116535
第23765次迭代	Q=0.4965168396116535

Q = 0.49730478312654613

图1 迭代计算过程中 Q 值变化规律

图2 部分迭代结果

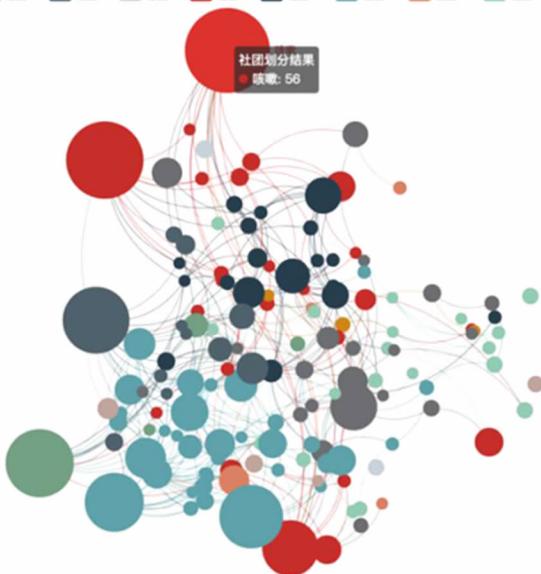


图3 社团划分结果

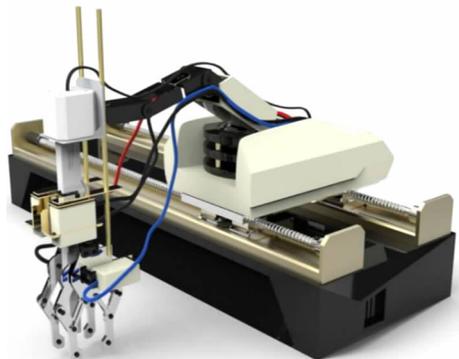


图4 针灸机器人示意图

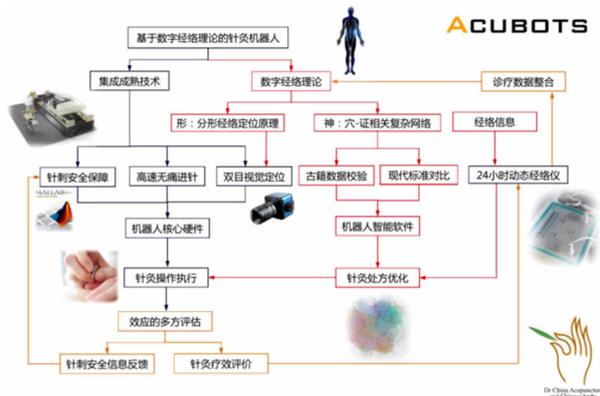


图5 数字经络智能针灸机器人项目规划

5 结语

随着当代医学科学的迅猛发展,中医学面临着日趋严峻的挑战和竞争,中医学要保持自身的魅力必须适应时代的需要进行发展与创新。创新是人类发展的不竭动力,是民族凝聚力和创造力的具体表现,同时也是对传统的继承与发扬。在国家创新体系中,高校学生处于创新链条的前端,是知识创新和技术创新的引领者和开拓者。

使用针灸机器人进行针灸科学研究是一个全新的设想,存在以下问题:1) 初创成本较高:初级版机器人治疗范围局限,但功能有限,实现全身穴位自动化定位和针刺的升级产品成本会进一步增加;2) 行业标准空白:针刺治疗属于介入性手段,国内尚无配套医疗行业标准;3) 安全措施有限:需按受体皮脂厚度等因素制定更详细的个性化针刺程序,增加超声传感器、力学传感器等提高自动针刺的安全性。因此,短期内其主要应用方向是针刺研究中的实验动物。此外,值得思考的是,针刺的刺激是否能够简化为单纯的物理刺激? 机器人针刺和人工针刺在“治神”等方面的区别是否能够证明针刺的非物理作用? 这些都是今后研究中需要进一步探讨的问题。而使用图论进行智能选穴的设想正式针灸机器人的核心组件之一,我们希望类似的研究能对中医

现代化的事业尽一份绵薄之力。

参考文献

[1] 黄欣荣,钟平玉,马纲. 人工智能与中医智能化[J]. 中医杂志, 2017,58(24):2076-2079,2106.

[2] Kermany DS,Goldbaum M,Cai W, et al. Identifying Medical Diagnoses and Treatable Diseases by Image-Based Deep Learning[J]. Cell, 2018,172(5):1122-1131. e9.

[3] 任玉兰,梁繁荣,吴曦,等. 基于数据挖掘的针灸临床循证决策支持系统研究[J]. 中华中医药杂志,2011,26(4):795-797.

[4] 蒋培. 基于超文本知识库的模糊针灸专家系统[D]. 合肥:合肥工业大学,1997.

[5] 刘精精. 基于人工智能算法的腧穴配伍规律的研究[D]. 长春:长春工业大学,2016.

[6] 赵凌,任玉兰,余毓如,等. 基于数据挖掘技术分析古代针灸治疗偏头痛的经穴特点[J]. 中国中医基础医学杂志,2008,14(10):774-776.

[7] 张欣. 公交网络的复杂性研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.

[8] 乔赫元. 基于复杂网络的脑功能研究与分析[D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.

[9] 梁夏,王金辉,贺永等. 人脑连接组研究:脑结构网络和脑功能网络[J]. 科学通报,2010,55(16):1565-1583.

[10] 张文波. Internet 宏观拓扑结构的生命特征研究[D]. 沈阳:东北大学,2006.

[11] 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[J]. 自然杂志,1990,13(1):3.

[12] 方锦清,汪小帆,刘曾荣. 略论复杂性和非线性复杂网络系统的研究[J]. 科技导报,2004,6(2):15-17.

[13] 佟旭. 基于复杂网络理论的糖尿病肾病辨证建模研究[D]. 北京:北京中医药大学,2016.

[14] 付彩红. 针刺阳陵泉对中风偏瘫静息脑网络响应特征的多元Granger 因果分析研究[D]. 北京:北京中医药大学,2016.

[15] 吕永强,郑新奇,周麟. 路网中心性与城市功能用地空间分布相关性研究——以北京城市中心区为例[J]. 地理研究,2017,36(7):1353-1363.

[16] 熊云艳. 复杂网络的某些性质研究及其应用[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[17] Fortunato S, Castellano C. Community structure in graphs[J]. Encyclopedia of Complexity & Systems Science,2007:490-512.

[18] 孙天晓. 基于复杂网络社团结构划分的面瘫腧穴配伍规律研究[D]. 成都:成都中医药大学,2016.

[19] Newman ME, Park J. Why social networks are different from other types of networks[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2003,68(3 Pt 2):036122. Epub 2003 Sep 22.

[20] 刘涛,陈忠,陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程,2005,23(6):1-7.

[21] 钟琦,汪克夷. 基于社会网络分析法的组织知识网络及实例研究[J]. 科技管理研究,2009,29(4):211-214.

[22] 黄鑫. 复杂网络上计算机病毒传播研究[D]. 沈阳:辽宁工程技术大学,2011.

[23] Latapy M. Main-memory triangle computations for very large (sparse (power-law)) graphs[J]. Theor Comput Sci,2008,407(1-3):458-473.

[24] 徐天成,李诗园,徐先红,等. 基于穴-症关系的经脉拓扑模型定量研究[J]. 中国针灸,2017,37(11):1229-1232.