

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.02.003

机械结构网络模体探究

杨茂林, 闫 栋

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘 要:为了从新的角度探究机械结构的特点,借鉴了网络模体的研究方法,对机械结构进行了网络构建和网络局部特性分析。阐述了该方法的概念和原理,然后以大量机械结构为实验对象,用 FANMOD 软件进行模体检测,分析实验数据,找出了机械结构网络中的3种典型网络模体,并与蛋白质交互网、软件网等其他领域网络进行对比,发现机械结构网络与蛋白质交互网络的局部特性有相似的显著性趋势。最后探究了网络模体方法对机械结构分析的作用,并给出了进一步的研究方向。

关 键 词:机械结构;网络模体;模体检测;网络相似性

中图分类号:TP273;F224.33

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)02-0009-05

Detection of Mechanical Structure Network Motif

YANG Maolin, YAN Dong

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to study the structure of mechanical networks from a new perceive, the mechanical structure of network construction and local network characteristics were analyzed by used of network motif. The conception and principle of the method was expounded, and motif detection was carried out to use of FANMOD software by many experiments of mechanical structure. By analyzing the experiment data the three typical motifs have been found in mechanical structure network. By comparing with motifs of other field such as protein interactive network and software network, the protein interaction network has the similar significant trend with the mechanical structure network. The concepts, principles and significance associated with the experiment were elaborated. The results were analyzed and directions for further research were given.

Key words: mechanical structure; network motif; motif detection; network similarity

Milo 等人在 2002 年发现许多不同领域大型网络中包含着一些相同的小型拓扑结构^[1]。这些相同拓扑结构出现的频率很高,不禁让人猜测其中有着某种联系。在网络中具有较高出现频率的这类子结构,被称为网络模体,即“复杂网络的简单模块”^[2]。这一发现吸引了生物学、软件、互联网等各领域的人员对各自领域的大型网络进行模体分析。Kashtan^[3-4]等人发现,在特定环境条件下,当优化某些具有特定功能的网络拓扑结构时,不会形成模体;但是,当该网络被放置在变化的环境条件下,并具有不同的功能要求时,将会出现网络模体。网络模体能够在不同的输入条件中

执行不同的任务。还有一些其它研究认为网络中经常出现的子结构可能是某些其它现象的附带结果^[5-6]。

大型设备的机械结构中也同样存在网络模体,机械结构网络中特定结构模体的频繁出现可能暗示着复杂机械结构在形成过程中的鼓励模式,也可能是机械结构的演化进化结果。研究这些在实际机械结构网络中出现频率比随机网络中高得多的子结构有助于识别机械结构中关键的机构与部件,同时有助于了解整个机械结构的特性。另外,找出机械结构网络模体并与其它领域具有相似局部特征的网络模体进行对比,可以借鉴这些领域的网络结构的演化机理并且找出联

收稿日期:2014-09-12;修回日期:2014-11-10

基金项目:国家自然科学基金:基于网络模体的可重构制造系统多样性研究(51205220)

作者简介:杨茂林(1990),男,甘肃金昌人,硕士研究生,主要研究方向为复杂网络和配置设计。E-mail:yml071715@126.com

系,从新的角度研究机械结构。

1 机械结构网络的建立

建立机械结构网络模型是用网络方法分析机械结构的基础。一个机械结构由若干零部件组成,零部件之间通过各种方式连接在一起。如果将零部件看成节点,将零部件之间的连接关系看成边,那么整个机械结构就表现为一个网络的拓扑形态。它反映了机械结构内部复杂的装配关系。如果考虑零部件之间关键特征等装配信息的传递,那么零部件之间的边是有向的,反之则为无向的。

1.1 有向网络

图1为汽车前盖装配关系分解图,图2为其对应的有向网络图。将每个部件都映射为网络图中的一个节点,以车身框架BF为分析的起点,它与右内挡板RIF、左内挡板LIF以及车前盖H直接相连以传递装配信息,箭头方向即是关键特征的传递方向;将它们之间直接相连的关系转化为网络图中的边,由此得到汽车前盖的有向网络图模型。

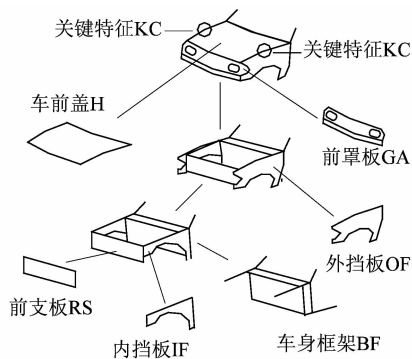


图1 汽车前盖模型装配关系分解图

Figure 1 Assembly drawing of automobile front hood

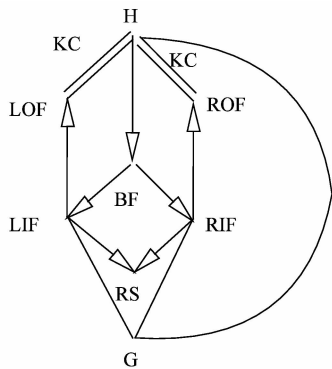
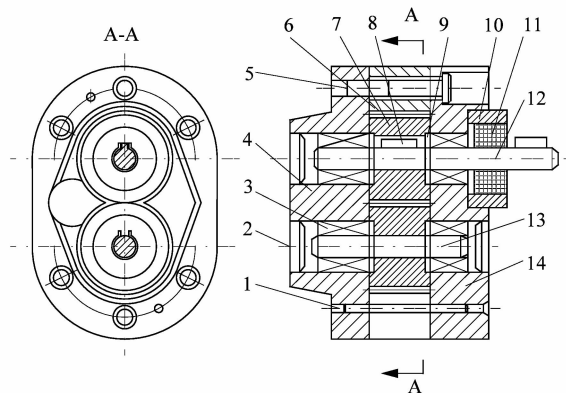


图2 汽车前盖结构有向网络模型图

Figure 2 Directed graph of automobile front hood

1.2 无向网络

图3和图4分别为CB-B型齿轮泵装配图^[7]及其无向网络图,图4中编号和图3的编号相对应。该随机网络图中各节点间没有一定的指向关系,所得的网络模型为无向网络。



1—圆柱销;2—压盖;3—轴承;4—后盖;5—螺钉;6—泵体;7—齿轮;8—平键;9—卡环;10—法兰;11—油封;12—长轴;13—短轴;14—前盖

图3 CB-B型齿轮泵结构图

Figure 3 Structure chart of CB-B gear pump

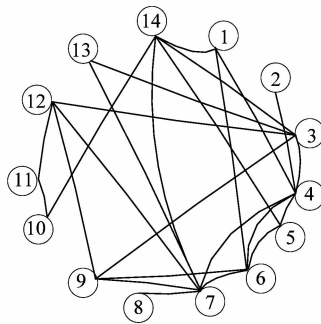


图4 CB-B型齿轮泵无向网络模型图

Figure 4 Undirected network graph of CB-B gear pump

2 机械结构网络模体的研究原理

2.1 相关概念和原理

2.1.1 模体

网络的形态复杂多变,但构成网络的方式却有一定的规律。机械结构网络模体是机械结构网络中频繁出现的子结构,它反映了机械结构各零部件间潜在的协作和配合方式。各式各样的模体通过反复地复制和重组,最终组成了各式各样的大规模网络。

2.1.2 三节点联通子图

由逻辑关系可知,三节点模体有13种形式的联通子图,如图5所示。四节点连通子图可多达199种,暂不作分析。

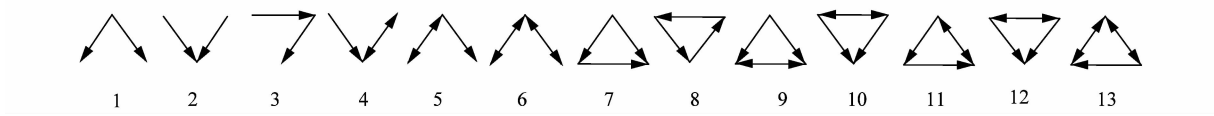


图5 13种三节点联通子图

Figure 5 13 kinds of three-nodes motif

2.1.3 模体检测

图6(a)为16节点真实网络模型,图6(b)是4个随机网络(在实际检测中,生成的随机网络数量远不止4个,具体数量按需要设定),随机网络中各节点间的边是随机连接的,但它与真实网络具有相同的节点数,且每个节点都具有相同的入度和出度(具有相同特征)。图6(a)是一种三节点子图,前馈环(Feed Forward Loop 用实心箭头表示)共出现了5次;在图6(b)中4个随机化网络中总共出现了2次,该三节点子图就是图6(a)中真实网络的模体^[8]。

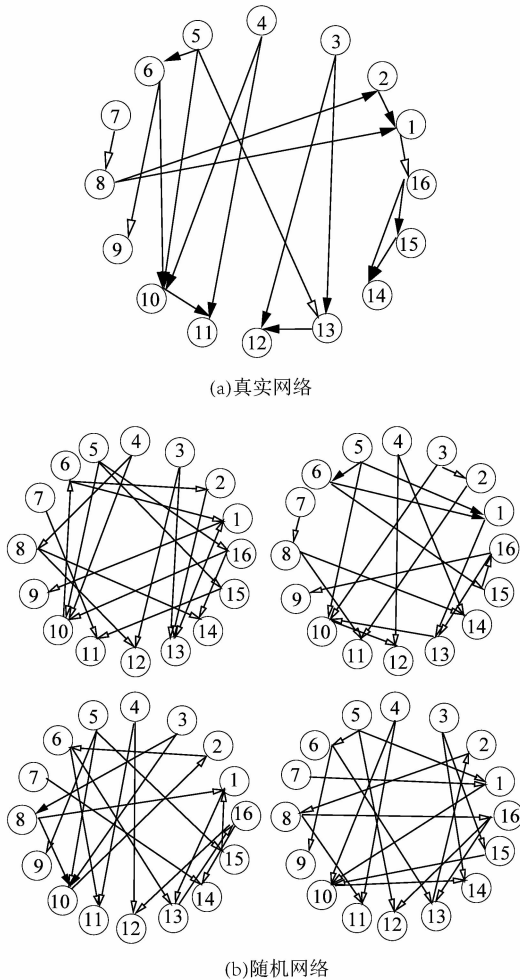


图6 复杂网络模体

Figure 6 Complex network motif

2.2 子图显著性判断

对于待检测的机械结构网络,先建立与真实网络对应的随机网络(具有相同特征),然后在真实网络和随机网络间进行对比,看哪些子图的出现频率有显著性的提高。

对每个连通子图 i ,构造以下3个检验统计量: Z_i 值、 P 值和 SP 值^[9]。

1) Z_i 值

$$Z_i = \frac{N_{\text{real}} - \bar{N}_{\text{rand}}}{\sigma_{\text{std}}} \quad (1)$$

$$\bar{N}_{\text{rand}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{i-\text{rand}}}{n} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{std}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(N_{i-\text{rand}} - \bar{N}_{\text{rand}})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中: N_{real} 为这个子图在真实网络中出现的次数; $N_{i-\text{rand}}$ 为这个子图在第 i 个随机化网络中出现的次数; $\bar{N}_{\text{rand}}$ 为 N 次随机化网络中子图出现次数的平均值; σ_{std} 是 N 个随机化网络中子图出现次数的标准方差。

2) P 值

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}$$

子图在第 i 个随机网络中出现的次数大于或等于在实际网络中出现的次数时,有 $P_i = 1$;反之 $P_i = 0$ 。

P 值也称为显著性水平。当某检验的结果具有较小的 P 值时,认为这个检验结果具有“统计显著性”(与其对应的标准差相差很大)。

3) SP 值

$$SP_i = \frac{Z_i}{\sqrt{\sum Z_i^2}}$$

SP 是对 Z 值的归一化处理,它强调了子图的相对显著性。大型网络中的模体比小型网络中的模体具有更高的 Z 值,采用 SP 值可以避免不同规模的网络对子图出现次数造成的影响。

基于以上定义,子图是否为网络模体的判断依据可设为:

1) 该子图在实际网络中出现的次数远大于它在与实际网络相对应的随机网络中出现的次数。通常要求该子图在与实际网络对应的随机化网络中出现的次数大于它在实际网络中出现次数的概率小于某个阈值 P (一般 $P=0.01$)。

2) 该子图在实际网络中出现的次数 N_{real} 大于等于 U (通常 $U=4$)。

3) 该子图在实际网络中出现的次数 N_{real} 高于它对应随机网络中出现的次数 N_{rand} , 通常要求 $N_{\text{real}} > 1.1N_{\text{rand}}$ 。

符合上述 3 个条件的连通子图, 即为典型的网络模体。

3 机械结构网络模体探究

根据第 2 章所述原理, 本文对机械结构网络中的 3 节点连通子图进行探究分析。具体步骤如下:

1) 选取样本数据

选取多种类型机械结构作为实验对象。为了更好地统计出机械结构网络与模体间的联系, 在选择样本时, 以具有一定相似性为基本原则。本文中的实验对象为 86 个来自互联网及相关书籍的机械结

构^[10-11], 主要为汽车部件及液压泵。

2) 机械结构网络模型的建立

首先, 根据机械装配图, 分析各零部件之间的装配关系, 然后将零部件映射成为节点, 将零部件间的关系影射为边, 建立该机械结构的网络模型。对于零部件间没有明显支配关系的机械结构, 对其建立无向网络模型。对于有明显支配关系的, 建立有向网络模型。

3) 判断三节点连通子图是否是网络模体

选择 FANMOD 软件作为本文的实验工具, 根据步骤 2) 中所得到的网络模型编辑出节点关系文本文件, 将文本文件输入到 FANMOD 软件中, 计算出每个软件网络中三节点联通子图出现的频率、 Z_{score} 值以及 P 值。用无偏差采样算法降低运行时间, 每个子图只计算一次, 使充分枚举相对合理, 最后结合第 2 章中的判别条件找出模体。

4 实验结果与分析

4.1 模体显著性判断

通过使用 FANMOD 对 64 个机械结构网络进项实验分析, 统计得到 3 个最具显著性的网络模体, 具体参数见表 1。

表 1 模体检测数据表

Table 1 Motif detection results

模体 ID	相邻矩阵	真实网络中出现频率/%	随机网络中出现频率/%	标准差	Z 值	P 值	模体形状
78	0 0 1	42.857	42.857	3.332 3E-15	-0.999 5	0	
	0 0 1						
	1 1 0						
238	0 1 1	57.143	57.143	6.553 6E-15	0.999 5	0	
	1 0 1						
	1 1 0						
164	0 1 0	44.815	10.809	0.025 697	1.559 0	0	
	1 0 0						
	1 0 0						

3 个连通子图在所考察的机械结构网络中被认定为最符合标准的网络模体, 其中 78 和 238 号为无向网络中具有最高出现频率的模体, 最高出现概率分别为 42.857% 和 57.143%; 164 号为考虑到关键特征传递方向时在有向网络中的模体, 最高出现概率为 44.815%。这 3 种连通子图的参数都符合本文第 3 章中的模体检测原理, 可以判断是网络模体。

他们在真实机械结构中出现的次数要远远高于其在随机网络中出现的次数, 因此这 3 种结构的模体可能是构成机械结构所必须的, 或是被用来执行某些必须的功能或任务。特别是 ID238 的连通子图, 它在所有分析的样本网络中出现频率最高, 这种三节点两两

相连的模体结构正是最简洁又最具有稳定性的结构, 他在机械结构中的大量出现与这种结构适合机械结构的形成相印证。图 4 中可明显看出, 78 号和 238 号模体的出现频率很高, 这种结构的模体在保证零件之间装配关系稳定和达到配合要求的前提下尽量减少定位数, 防止过定位导致的工件变形和对加工精度的影响。图 3 中编号 1, 4, 6 (圆柱销、后盖、泵体) 组成的子图结构即为典型的 ID238 型模体。该模体也常出现在神经网络、基因网络等其它网络中, 机械机构网络和这些网络是否对这一结构的模体有着相似的鼓励机制值得进一步地研究。164 号模体结构反映了关键特征传递过程中最常见的机理。也与关键特征传递的原则一致,

即“没有任何单一部件会传递 KC”。

4.2 网络相似性

根据实验数据,画出机械结构 13 个三节点子图的 SP 趋势图(图 7),并将其与其它领域网络^{[3]39}相对比,发现三节点子图在蛋白质交互网和齿轮泵结构网中的出现情况非常相似。这说明蛋白质结构和机械结构形成机理之间有相似性。利用不同领域之间网络结构相似性可以帮助更深层次理解和分析机械结构的形成机理。

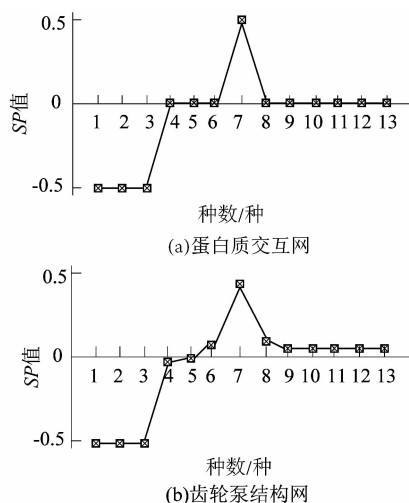


图 7 蛋白质交互网和齿轮泵结构网的 SP 趋势图

Figure 7 SP tendency graphs of protein interaction network and gear pump structure network

5 结语

相比其它领域,比如生物学网络,社交网络,食物链网络等,机械结构网络在整体结构和局部特征的研究都显得较为薄弱。本文借鉴 Milo 等人在网络模体方面的研究方法,对不同类型,不同功能的机械结构进行网络建模和模体检测,找出了较为典型的 3 个模体,并对网络结构相似性进行了分析。

研究发现多种类型机械结构的模体具有相似性,但不同类型机械结构间的模体是不同的。机械结构网络模体虽然能够看出机械结构所鼓励的模体形式,但模体本身缺乏明确的语义表示,因此机械结构网络模

体和其在网络中所具有的功能之间还不能建立起直接的联系,但它体现出了机械结构网络的演化和生长上的一些规律和趋势,这与 Stumpf 等人^[12]最新的研究成果一致。机械结构的功能和与其对应的模体结构之间的对应关系的建立,将对智能化装配及配置设计起很大帮助。同时对机械结构网络模体的深入研究将帮助建立产品结构功能信息数据库,对机械结构多样化等方面的研究起促进作用。另外,在实验分析过程中发现,机械结构网络中的一些模体,在其他领域的网络中也有出现,他们之间是否有相关性,有什么样的相关性,也值得进一步深入研究和探讨。

参考文献:

- [1] MILO R, SHEN O S, ITZKOVITZ S, et al. Network motifs: simple building blocks of complex networks[J]. Science, 2002, 298(5594): 824-827.
- [2] WONG E, BAUR B, QUADER S, et al. Biological network motif detection: principles and practice[J]. Briefings in Bioinformatics, 2012, 13(2): 202-215.
- [3] MILO R, ITZKOVITZ S, KASHTAN N, et al. Superfamilies of evolved and designed networks[J]. Science, 2004, 303(5663): 1538-1580.
- [4] ALON U. Network motifs: theory and experimental approaches[J]. Nature Reviews Genetics, 2007, 8(6): 450-461.
- [5] SOLE R V, VALVERDE S. Are network motifs the spandrels of cellular complexity? [J]. Trends Ecology & Evolution, 2006, 21(8): 419-422.
- [6] MAZURIE A, BOTTANI S, VERGASSOLA M. An evolutionary and functional assessment of regulatory network motifs [J]. Genome Biology, 2005, 6(4): 35.
- [7] 陆望龙. 经典液压元件 600 例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [8] SHEN O S, MILO R, MANGAN S, et al. Network motifs in the transcriptional regulatory network of escherichiacoli [J]. Nature Genetics, 2002, 31(1): 64-68.
- [9] KANNAN R, TETAIL P, VEMPALA S. Simple markov-chain algorithms for generating bipartite graphs and tournaments [C]// SODA'97 proceedings of the eighth annual ACM-SIAM symposium on discrete algorithms. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1997: 193-200.
- [10] 王霄峰. 汽车底盘设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [11] 谭本忠, 胡勇. 汽车底盘构造与维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [12] INGRAIN P J, STUMPF M, STARK J. Network motifs: structure does not determine function[J]. BMC Genomics, 2006(7): 108-115.

(上接第 8 页)

- [5] 罗守靖, 陈炳光, 齐丕骧. 液态模锻与挤压铸造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [6] 应富国, 万志国, 邢小峰. 铝合金双重挤压铸造补缩位置和补缩力的确定[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(5): 411-413.
- [7] 应新法. 凸式冲头挤压铸造挤压力研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [8] 齐丕骧, 齐霖. 双重挤压铸造研究[J]. 铸造技术, 2008, 29(3):

307-311.

- [9] 李玉海, 郭广思, 王连琪, 等. 铸造合金凝固过程补缩机理探讨[J]. 沈阳工业学院学报, 1997, 16(2): 36-41.
- [10] 吴朝忠, 李元元, 赵海东. A319 合金挤压铸造凝固过程数值研究[J]. 金属铸锻焊技术, 2011, 40(9): 45-48.
- [11] 沈家栋, 张海亮. 铝合金活塞铸造工艺数值模拟研究[J]. 机电工程, 2013, 30(3): 322-324.