文章编号:1000-582X(2007)01-0006-04

基于全回路拓扑特性矩阵运动链同构的辨识*

罗金良[1,2],黄茂林[1],文 群[2]
(1. 重庆大学 机械工程学院,重庆 400030;2. 南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:以运动链的广义拓扑图为基础,建立了包含运动链所有信息的全回路拓扑特性矩阵. 给出了矩阵的构建原则和方法,并对其用于运动链同构识别进行了研究,进一步给出了应用该矩阵辨识运动链同构体的方法及主要的步骤,并给出了应用实例. 同时,解决了其它方法在回路选择上出现分歧的问题,不受运动链杆数和自由度的限制,矩阵元素少,计算量小,速度快,又可以在计算机上实现,因此更加高效和可靠. 经过大量的实例证明该方法行之有效,特别是在构件数和回路数多的运动链的同构识别中更具优势.

关键词:运动链;全回路拓扑特性矩阵;同构体;辨识

中图分类号: TH112 **文献标识码**:A

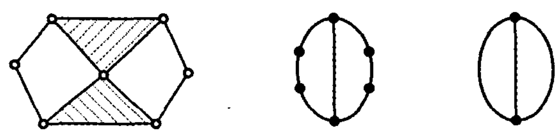
智能机械已成为现代机械系统的发展方向,运动链是创新综合与设计各种机构及机械系统的基础[1]. 随着对自调自适应机械研究的不断深入与发展[2],笔者发现自由度为 0 和 -1 运动链是用来综合各种类型自适应机构的最基本的初始运动链. 但由于 0 和 -1 这种特殊的自由度要求,其所能综合出来的运动链要比自由度为 +1 的运动链的结构和数量都更复杂和更多. 从而,构型综合中最关键的问题——运动链同构体的识别也将变得更加复杂和困难.

目前,在辨识运动链的同构方面,国内外机构学学者提出了大量的不同的方法[3-6]. 但总体上还是有一些不足之处,如:有的构造的矩阵阶数多、构造复杂;有的缺少唯一性;有的对于找寻最短的回路较复杂和困难,而且对于同长度回路的选择出现分歧等问题等等[6]. 笔者通过在综合自由度为 0 和 -1 的自适应运动链的过程中,在前人取得的成果的基础上,提出了利用广义拓扑回路构建的运动链全回路拓扑特性矩阵来识别运动链同构的方法,以期能更简单有效地解决运动链的构型综合中同构识别的问题.

1 运动链全回路拓扑特性矩阵

1.1 运动链的广义拓扑图

运动链在构型综合时,通常把机构的运动链抽象成拓扑图,即在运动链的基础上,用顶点表示构件,用边表示运动副所形成的线图. 将运动链拓扑图中的二度点(只与 2 条边联接的顶点)去掉,就得到了运动链的拓扑胚图,如图 1 所示. 从图 1(b) 中可以看出,运动链具有 3 条支路(边),其中有 2 条支路上各有 2 个二元素杆,它完全表达了运动链的全部信息. 如果将其稍加已改变,将其三元素杆以数字表示,而支路则以二元素杆(或运动副)的数量来表示,将得到图 2 所示的拓扑图,称这样的拓扑图为运动链的广义拓扑图,同样,它与拓扑图一样,也包含运动链的全部信息.

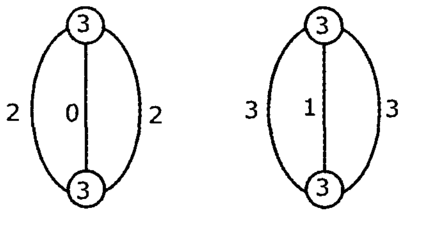


(a)运动链图 (b)拓扑图 (c)拓扑胚图

图 1 运动链结构图

运动链同构是指运动链的构件,运动副和回路都

* 收稿日期:2006-07-13
基金项目:国家自然科学基金项目资助(50075087)
作者简介:罗金良(1968-),男,重庆大学博士研究生,南华大学高级工程师,主要从事智能机械,自适应机械的研究. 黄茂林,男,教授,博士生导师,电话(Tel.)023-65103493;E-mail:mlhuang219@163.com.



（a）二元素杆表示　　（b）运动副表示

图2　运动链广义拓扑图

具有一一对应的关系，那么根据广义拓扑图，各多元素杆之间的联接支路完全相同. 只需依靠广义拓扑图找出表达运动链构件、运动副以及各回路的装配关系，就可以辨识运动链的同构.

1.2　运动链的全回路拓扑特性矩阵

因运动链的广义拓扑图包含了运动链的全部信息，所以可以依靠广义拓扑图来建立运动链的拓扑特性矩阵，只要矩阵包含了构成运动链的各回路、构件以及运动副等的相互连接形式及组合关系，就可以用来辨识运动链的同构.

为建立全回路拓扑特性矩阵，先定义回路的向量：

$$\boldsymbol{L}_i = (X_1X_2\cdots X_K) \ , \qquad (1)$$

式中：X_k 为由广义拓扑图中的顶或支路组成，代表第 i 回路第 k 顶点或支路的二元素杆的数量，顶点为三度点（三元素杆）$X_k=3$，四度点（四元素杆）$X_k=4,\cdots$，如果是支路，就取支链上的运动副数量（二元素杆的数量加 1）作为 X_k 的值（为了区分后面矩阵中的其它 0 元素）. $\boldsymbol{L}_i$ 为第 i 回路的回路向量；$i=1,2,\cdots L,L+1$，L_{L+1}为拓扑图外环路的向量. L 为运动链的独立的回路数，且

$$L = P-(N-1).$$

其中，P 为运动链的运动副总数，N 为运动链的构件总数.

现定义运动链的全回路拓扑特性矩阵

$$\boldsymbol{S}_{L+1} = [L_1 \quad L_2 \quad \cdots \quad L_{L+1}]^{\mathrm{T}}, \qquad (2)$$

矩阵的行数为拓扑图中所有回路数 $L+1$；矩阵的列数 k 为 i 回路中顶点数和支路数的总和的最大值. 当某回路的向量坐标值数量小于 k 时，就后面补 0 代替. 这样就得到了一个 $(L+1)\times k$ 阶全回路拓扑特性矩阵.

1.3　全回路拓扑特性矩阵的构建方法

为保证矩阵 S_{L+1} 的唯一性，对其构建方法作如下规定：

1）构建运动链广义拓扑图，验证运动链的独立回路数量，尽量以最大度的顶点选择回路，标好序号.

2）按式（1）写出各回路的向量 $\boldsymbol{L}_i$，其坐标值排列的总原则是：以最大度的顶点为起点，沿次最大度顶点的旋向依次写出；如正反旋向的顶点的度相同，则选支路上数字最大的方向为旋向；如果支路再相同，就看第 3顶点，第 2 条支路，如此按照最大值依次写出. 起点的确定具体原则如下：

① 所有顶点的度相同，支路上的数字也都相同，则可选任意顶点作为起点，以任意的旋向写出坐标；

② 所有顶点的度相同，只有一条支路数目最大，则选择最大数目的支路上的一个顶点作为起点；

③ 所有顶点的度相同，最大数字的支路有 2 条时，如果 2 条支路串联在一起，则选串联两支路的一个端点作为起点；如果不是，可以选其中一条支路上的一个顶点作为起点；

④ 所有顶点的度相同，最大数字的支路有 2 条以上时，则选择这些串联支路多的一个端点作为起点；

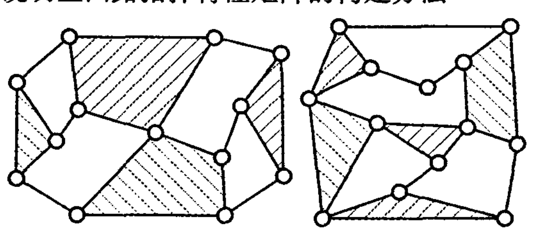
⑤ 有 2 个顶点的度最大时，如果由一条支路直接相连，可任选其一作为起点；如果没有支路直接相连，选靠近次大度顶点和支路数字最大的作为起点；

⑥ 有 2 个以上顶点的度最大时，如果全连在一起，则选两端的一个作为起点，如果是分开可以参考⑤的选法，或者如果数量较多，可以选靠近最小度的和连接支路最大的点作为起点. 总之在建立向量的时候顶点的选择和旋向的选择方法一定要统一.

3）按照式（2）构建全回路拓扑特性矩阵，注意某 L_i 的坐标值没达到最大值 k 时，就在后面的列中以 0 表示.

1.4　全回路拓扑特性矩阵的构建举例

现以图 3 所示 $F=1$ 的 a、b 两 10 杆单铰运动链为例来说明全回路拓扑特性矩阵的构建方法.



（a）运动链　　（b）运动链

图3　10 杆 $F=1$ 单铰运动链

首先，构建如图 4 所示的 a、b 广义拓扑图，图中支路上的数字表示该支路上的运动副的数目，即二元素杆的数目加上 1.

从图 4 中可清楚地看出，两运动链的独立回路数都为 $L=4$，带圆圈的数字表示. 总回路为 $L+1=5$.

然后，按照向量的编写原则，按式（1）写出运动链中各回路的向量，其中最后一个向量为拓扑图中的外围回路的向量，即：

$L_{1a}=[4\ \ 1\ \ 4\ \ 2\ \ 3\ \ 2]$,

$L_{2a}=[4\ \ 2\ \ 3\ \ 2]$,

$L_{3a}=[4\ \ 1\ \ 4\ \ 2\ \ 3\ \ 2]$,

$L_{4a}=[4\ \ 2\ \ 3\ \ 2]$,

$L_{5a}=[4\ \ 2\ \ 3\ \ 2\ \ 4\ \ 2\ \ 3\ \ 2]$;

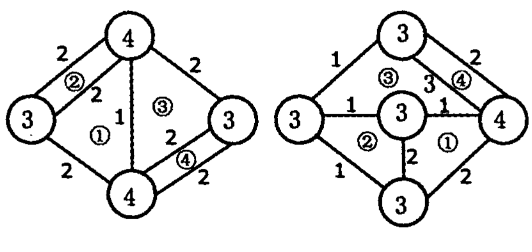
$L_{1b}=[4\ \ 2\ \ 3\ \ 2\ \ 3\ \ 1]$,

$L_{2b}=[3\ \ 2\ \ 3\ \ 1\ \ 3\ \ 1]$,

$L_{3b}=[4\ \ 3\ \ 3\ \ 1\ \ 3\ \ 1\ \ 3\ \ 1]$,

$L_{4b}=[4\ \ 3\ \ 3\ \ 2]$,

$L_{5b}=[4\ \ 2\ \ 3\ \ 1\ \ 3\ \ 1\ \ 3\ \ 2]$.



(a)拓扑图 a (b)拓扑图 b

图4 运动链广义拓扑图

最后,按式(2)通过转换得到两运动链的全回路拓扑特性矩阵为:

$$S_{L+1,a}=\begin{bmatrix}4&1&4&2&3&2&0&0\\4&2&3&2&0&0&0&0\\4&1&4&2&3&2&0&0\\4&2&3&2&0&0&0&0\\4&2&3&2&4&2&3&2\end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$S_{L+1,b}=\begin{bmatrix}4&2&3&2&3&1&0&0\\3&2&3&1&3&1&0&0\\4&3&3&1&3&1&3&1\\4&3&3&2&0&0&0&0\\4&2&3&1&3&1&3&2\end{bmatrix}. \quad (4)$$

2 全回路拓扑特性矩阵运动链同构的辨识

2.1 辨识方法与步骤

运动链的全回路拓扑特性矩阵是在运动链广义拓扑图的基础上构建的,它含有运动链的多元素杆及各支路的全部信息,它是惟一的. 两运动链的全回路拓扑特性矩阵为 $S_{L+1,a}$, $S_{L+1,b}$, 当不考虑矩阵各行的顺序时,如果两矩阵各行的元素都可以对应相同,那么这两运动链就为同构体,否则,则为异构体. 具体辨识计算步骤为:

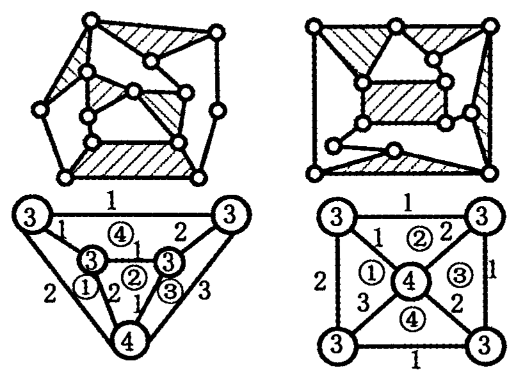
步骤 1,取矩阵 $S_{L+1,a}$ 第一行的各元素与矩阵 $S_{L+1,b}$ 的 $(L+1)$ 行的各元素逐行进行比较,如果矩阵 $S_{L+1,a}$ 的第一行与矩阵 $S_{L+1,b}$ 所有行都不相同,则两运动链不同构. 否则进行步骤 2.

步骤 2,首先分别删除步骤 1 中搜索到的矩阵 $S_{L+1,a}$ 和 $S_{L+1,b}$ 中相同的行;然后,取矩阵 $S_{L+1,a}$ 中的第二行与 $S_{L+1,b}$ 的 L 比较,如果都不相同,则两运动链不是同构体. 否则再进行步骤 2,直到两矩阵的 $L+1$ 行全部比较结束.

如果两矩阵 $S_{L+1,a}$ 和 $S_{L+1,b}$ 所有的 $L+1$ 行都相同,则两运动链同构.

2.2 应用举例

如图 5 所示的(a)、(b)运动链,上图为运动链简图,下图为其广义拓扑图. 其全回路拓扑特性矩阵分别为:



(a) 运动链 1 (b) 运动链 2

图5 两 10 杆 4 回路运动链

$$S_{L+1,a}=\begin{bmatrix}4&2&3&1&3&2&0&0\\4&2&3&1&3&1&0&0\\4&3&3&2&3&1&0&0\\3&2&3&1&3&1&3&1\\4&3&3&1&3&2&0&0\end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$S_{L+1,b}=\begin{bmatrix}4&3&3&2&3&1&0&0\\4&2&3&1&3&1&0&0\\4&2&3&1&3&2&0&0\\4&3&3&1&3&2&0&0\\3&2&3&1&3&1&3&1\end{bmatrix}. \quad (6)$$

按照前面所述的方法可以得到, $L_{1a}=L_{3b}$, $L_{2a}=L_{2b}$, $L_{3a}=L_{1b}$, $L_{4a}=L_{5b}$, $L_{5a}=L_{4b}$, 即两矩阵的行都相同,因此可以肯定这两运动链是同构的.

值得注意的是,矩阵(4)中有两行列数最多的回路向量,即图 4(b)中回路③、⑤(外围回路)的长度 L_{3b}, L_{5b} 相等,而且正好是最长的回路. 如果采用参考文献[6]中所述,用最短的独立回路来建立运动链的拓扑特性矩阵,将出现回路的选择分歧问题. 如果两完全相同的运动链仅因为选择了③、⑤不同的回路,将导致回路拓扑特性矩阵不同,在辨识同构时,判别将失效.

但是，采用全回路拓扑特性矩阵，因其包含了所有的回路，不必考虑回路的长度是否相等，更不必去寻找最短的回路. 从而辨识将变得更简单，而且更可靠.

3 结　论

1）利用运动链的广义拓扑图，可以得到运动链的全部信息，各构件、运动副及回路信息清晰简明，从而可以更快更准确地构建运动链的全回路拓扑特性矩阵，并使矩阵包含了运动链的全部信息，保证了其惟一性. 采用全回路（独立回路 + 外回路）建立拓扑特性矩阵，可以避免分析寻找运动链中最短独立回路带来的各种困难，同时还可以避免当运动链中出现最长的回路数量大于 2，无法确定应选独立回路的问题.

2）应用全回路拓扑特性矩阵辨识运动链的同构体，具有构造简单，不涉及复杂的理论，与现有的其它矩阵的辨识法相比，辨识运算小，其最少的运算次数为 $(L+1)K$ 次，而最多也仅为 $K\sum_{i=1}^{L+1} i$ 次，且具有准确、可靠和便于计算机实现等特点. 该方法还可以解决一些其它方法的片面性问题，应用范围广，特别是在构件数和回路数多的运动链的同构识别中更具优势.

参考文献：

[1] 向成宜，黄茂林，许怀友. 基于运动链的机构结构方案的创新综合方法[J]. 重庆大学学报：自然科学版，2003，26(2)：97-102.

[2] 李太福，黄茂林，赵杰. 基于平面约束不确定性的自调机构设计[J]. 重庆大学学报：自然科学版，2003，26(5)：1-5.

[3] RAO A C, JAGADEESH ANNE. Topology based characteristics of kinematic chains, work space, rigidity, input-joint and isomorphism[J]. Mech Mach Theory, 1998, 33(5): 625-638.

[4] T S MRUTHYUNJAYA. Kinematic structure of mechanisms revisited[J]. Mech Mach Theory, 2003, 38: 279 - 320.

[5] ZONGYU CHANG , CE ZHANG, YUHU YANG, et al. A new method to mechanism kinematic chain isomorphism identification[J]. Mech Mach Theory, 2002, 37: 411-417.

[6] 李树军，宋桂秋. 用拓扑特性矩阵辨识运动链的同构体及机架变换研究[J]. 机械工程学报，2002，38(1)：149-153.

Mechanism Kinematic Chain Isomorphism with All-Loop-Link-Join-Martrix

LUO Jin-liang [1,2], *HUANG Mao-lin* [1], *WEN Qun* [2]

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Mechanical Engineering, Nanhua University, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: Based on generalized topological figures of kinematical chains, *all-loop-link-join-matrix* is built, which contains all information of kinematical chains. The constructive principle and method of that matrix is put forward. It is applied in the research of the Isomorphism Identification of kinematical chains. The method and the main process of the Isomorphism Identification of kinematical chains is given out further. Some practical examples are solved by the new method. The matrix contains all loops of kinematical chains, and solves forky problems in the choice of loops. It cannot be constrained by the bars and the freedom of kinematical chains. In the matrix, elements are fewer; the amount of calculation is little, and the speed of calculation is high, so the method can be realized in computer. Because of the use in computer, the method is efficient and reliable. The method is certified by tremendous examples, especially in the Isomorphism Identification of kinematical chains which contain many bars and loops.

Key words: knematic chains; All-Loop-Link-Join-Matrix; iomorphisms; identification

（编辑　张小强）