

含复铰运动链的耦合度算法

辛洪兵

(北京工商大学, 北京 100048)

摘要: 机构耦合度和结构因子, 是有序单开链法研究机构的组成原理、运动学与动力学的重要参数, 在不含复铰运动链耦合度算法的基础上, 根据双色拓扑图, 给出了含复铰运动链耦合度算法, 最后通过实例验证了算法的正确性。

关键词: 机构耦合度; 有序单开链; 双色拓扑图; 机构组成原理

中图分类号: TH132.43; TB486.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)17-0067-03

Algorithm for Coupling Degree of Mechanism with Compound Hinges

XIN Hong-bing

(Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: In ordinal single open chain method, coupling degree and structure factor of mechanism are important parameters for research of mechanism structure principle, kinematics, and dynamics. The algorithm of coupling degree for the kinematic chain with compound hinges was developed based on the algorithm for the kinematic chain without compound hinges and dual-color topology graph. The correctness of the algorithm was verified by a practical example.

Key words: coupling degree of mechanism; ordinal SOC; dual-color topology graph; mechanism structure principle

自 20 世纪 80 年代初, 经 20 多年的发展, 我国包装机械已成为重要机械行业之一。在国内外包装机械中, 各类自动机构得到了广泛应用。机构性能在很大程度上影响整机性能, 机构的选型、设计和分析成了包装自动机构设计的重要内容^[1-3]。例如将反求技术、遗传算法与包装技术相结合, 开展了对引进包装机械机构设计的消化和吸收研究^[4]; 对国内外绝大多数厂家生产的平压平自动模切机动平台双曲柄连杆机构驱动系统, 采用气液增压系统和机械增力机构的机构创新设计, 提高了倍力效果, 其中机械增力机构为含有 2 个复铰, 回路数 $\nu=3$ 的平面 8 杆机构^[5], 现代机构创新设计包括拓扑结构设计、运动学设计和动力学设计 3 个层次, 其中机构结构分析与设计是机构设计学的基础。基于单开链单元的机构结构组成原理, 构建机构结构学、运动学和动力学统一的系统理论与方法, 是机构拓扑结构学发展的重要方向之

一^[6]。

在以单开链(Simple Opened Chain—SOC)为运动链基本结构单元类型的机构学理论体系中, 任一运动链都可以分解为一个基础构件和 ν 个有序单开链, 或由基础构件和 ν 个有序单开链合成。同一运动链可能有多条不同的结构分解路线, 每一条结构分解路线都是由一个基础构件和 ν 个有序单开链组成。机构耦合度和结构因子是有序单开链法的重要参数。笔者研究含复铰运动链耦合度算法。

1 含复铰运动链耦合度算法

耦合度是运动链结构分解与合成、机构运动学与动力学分析的重要参数。其定义为^[7]:

$$k = \frac{1}{2} \min \left(\sum_{j=1}^{\nu} |\Delta_j| \right) \quad (1)$$

收稿日期: 2011-07-04

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3082005)

作者简介: 辛洪兵(1968—), 男, 满族, 辽宁人, 博士, 北京工商大学教授, 主要研究方向为自动机械机构学与谐波齿轮传动等。

其中: k 为运动链耦合度; t 为运动链的第 t 条结构路线; v 为运动链基本回路数;第 j 个单开链的结构因子 $\Delta_j = m_j - I_j - \xi_j$, m_j , I_j , ξ_j 分别为第 j 个单开链的运动副数、主动副数和运动链中包含第 j 个单开链的所有回路的独立位移方程的最小值,对于平面运动链,当包含第 j 个单开链的所有回路中存在只由移动副组成的回路时, $\xi_j = 2$,对其他情况 $\xi_j = 3$ 。

对不含复铰运动链,文献[7]给出了耦合度的 k 算法,但并未讨论含复铰运动链的耦合度算法。文中提出的含复铰运动链耦合度算法是由不含复铰运动链的耦合度 k 算法改进而来。所采用运动链拓扑图为双色拓扑图,黑色顶点表示构件,白色顶点表示运动副,黑色顶点的度为该构件上的运动副数,白色顶点的度减1为白点所代表的实际运动副数。所以,在双色拓扑图上,白色顶点的度 $d_w > 2$ 的点代表复铰,该复铰具有的实际运动副数为 $(d_w - 1)$ 。

含复铰运动链的耦合度 k 算法中,回路或通路的长度指该回路或通路所具有的白色顶点的数目,结构因子 $\delta_j = m_j - I_j - 3$ 中的 m_j 也即白色顶点数。

在单铰运动链的耦合度 k 算法中,删除前一个单开链所有边的操作,在此变为删除前一个单开链包含的白色顶点及其关联边的操作,但需注意,若此单开链中包含复铰,即度 $d_w > 2$ 的白色顶点,只有对其删除操作的次数等于 $(d_w - 1)$ 时,才删除该白色顶点及其关联边,否则保留该白色顶点及其所有关联边,包括那些被该单开链所包含的关联边。

确定剩余子图中联接前一个以及以前所有单开链所含黑色顶点之间最短通路时,不考虑这样的通路:其所有边都是度 $d_w > 2$ 的白色顶点在上次删除操作时的删除对象。

在含复铰运动链耦合度算法进行结构分解的过程中,上述对复铰的处理与含复铰运动链的结构综合相逆,算法具有一般性。

2 分析实例

例如,经编机传动舌针平面10杆机构^[7]见图1a,该机构包括复铰 B 和 C ,利用含复铰运动链耦合度算法对机构进行结构分解。

2.1 结构分解步骤

画出该机构双色拓扑图见图1b。按含复铰运动链耦合度算法对机构进行结构分解的具体步骤如下。

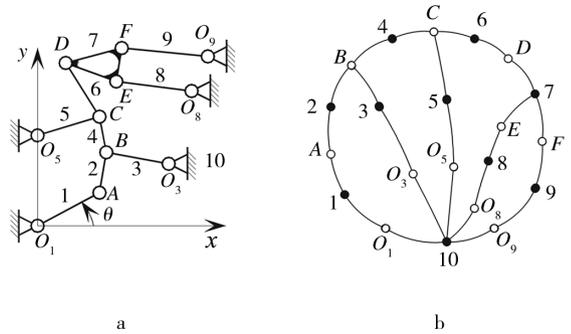


图1 经编机传动舌针10杆机构

Fig. 1 10-link mechanism in warp knitting machine

1)在双色拓扑图中,确定结构因子 Δ_j 最小的回路作为第1基本回路(第1单开链SOC1),这样的回路只有1个,因此,第1单开链为:

$$O_1 A B O_3 (\Delta_1^{(1)} = m_1 - I_1 - 3 = 4 - 1 - 3 = 0)$$

2)在双色拓扑图中,删除第1单开链所有2度白点及其关联边,第1单开链所含复铰 B 及其关联边保留一次。

3)确定联接第1单开链SOC1和点之间结构因子最小(长度最短)通路,作为第2单开链SOC2,但不计算其所有边都是复铰白点在上次删除操作时的删除对象的通路,如通路 $2-B-3$ 。

满足上述条件的通路只有1个,该通路作为第2单开链SOC2。

$$B C O_5 (\Delta_2^{(1)} = m_2 - I_2 - 3 = 3 - 0 - 3 = 0)$$

4)在上一个剩余子图中,删除第2单开链SOC2的所有2度白点及其关联边,对SOC2中的复铰白点,若包括此次删除操作的次数等于其度数减1,即 $(d_w - 1)$,则删除该白点及其关联边,拓扑图中 B 点满足条件,故删除。 C 点度数为3,可删2次,故此保留。

5)确定联接SOC1和SOC2所含黑点之间结构因子最小之通路,但不计其边皆为上次应删除对象者,作为第3单开链SOC3。

这样的通路有2个:

$$C D E O_8 (\Delta_3^{(1)} = m_3 - I_3 - 3 = 4 - 0 - 3 = +1)$$

$$C D F O_9 (\Delta_3^{(1)} = m_3 - I_3 - 3 = 4 - 0 - 3 = +1)$$

6)在上一个剩余子图中,分别删除SOC3之一,按以上规则确定SOC4,SOC4有2个,分别对应前2个SOC3。

$$F O_9 (\Delta_4^{(1)} = m_4 - I_4 - 3 = 2 - 0 - 3 = -1)$$

$$EO_8(\Delta_4^{(1)} = m_4 - I_4 - 3 = 2 - 0 - 3 = -1)$$

则第 1 次结构分解得到 2 条结构分解路线, 机构耦合度皆为:

$$k^{(1)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 |\Delta_i| = \frac{1}{2}(0 + 0 + 1 + 1) = 1$$

取 $\Delta_1^{(2)} = \Delta_1^{(1)} + 1$, 则 $\Delta_1^{(2)} = +1 = k^{(1)}$, 故以 $\Delta_1^{(2)}$ 的回路作为第 1 单开链, 对图 1a 所示机构再进行结构分解, 具体如下。

1) $\Delta_1^{(2)}$ 的第 1 单开链 SOC1 有 3 个, 分别为:

$$O_1ABCO_5(\Delta_1^{(2)} = 5 - 1 - 3 = +1)$$

$$O_3BCO_5(\Delta_1^{(2)} = 4 - 3 = +1)$$

$$O_8EFO_9(\Delta_1^{(2)} = 4 - 3 = +1)$$

2) 分别以上述单开链为第 1 单开链, 按含复铰运动链的耦合度 k 算法求出 SOC2, 依次类推, 求出第 3 单开链 SOC3 和第 4 单开链 SOC4, 分别见式(2)~(4)。其中箭头表示有序单开链分解顺序。

1) 以 $O_1ABCO_5(\Delta_1^{(2)} = +1)$ 为 SOC1。

$$SOC_1 \longrightarrow SOC_2 \longrightarrow SOC_3 \longrightarrow SOC_4$$

$$O_1ABCO_5(\Delta_1^{(2)} = +1) \rightarrow BO_3(\Delta_2^{(2)} = -1) \rightarrow$$

$$\begin{cases} CDEO_8(\Delta_3^{(2)} = +1) \rightarrow FO_9(\Delta_4^{(2)} = -1) \\ CDFO_9(\Delta_3^{(2)} = +1) \rightarrow EO_8(\Delta_4^{(2)} = -1) \end{cases} \quad (2)$$

耦合度 $K^{1*} = 2$ 。

2) 以 $O_3BCO_5(\Delta_1^{(2)} = +1)$ 为 SOC1。

$$SOC_1 \longrightarrow SOC_2 \longrightarrow SOC_3 \longrightarrow SOC_4$$

$$O_3BCO_5(\Delta_1^{(2)} = +1) \rightarrow O_1AB(\Delta_2^{(2)} = -1) \rightarrow$$

$$\begin{cases} CDEO_8(\Delta_3^{(2)} = +1) \rightarrow FO_9(\Delta_4^{(2)} = -1) \\ CDFO_9(\Delta_3^{(2)} = +1) \rightarrow EO_8(\Delta_4^{(2)} = -1) \end{cases} \quad (3)$$

耦合度 $K^{2*} = 2$ 。

3) 以 $O_8EFO_9(\Delta_1^{(2)} = +1)$ 为 SOC1。

$$SOC_1 \longrightarrow SOC_2 \longrightarrow SOC_3 \longrightarrow SOC_4$$

$$O_8EFO_9(\Delta_1^{(2)} = +1) \rightarrow O_5CD(\Delta_2^{(2)} = 0) \rightarrow$$

$$\begin{cases} CBAO_1(\Delta_3^{(2)} = 0) \rightarrow BO_3(\Delta_4^{(2)} = -1) \\ CBO_3(\Delta_3^{(2)} = 0) \rightarrow BAO_1(\Delta_4^{(2)} = -1) \end{cases} \quad (4)$$

耦合度 $K^{3*} = 1$ 。

第 2 次分解得到结构分解路线 6 条, 机构耦合度:

$$K^{(2)} = \min\{K_1^*, K_2^*, K_3^*\} = 1$$

因为 $\Delta_1^{(3)} = \Delta_1^{(2)} + 1 = 2 > K^{(2)} = 1$, 因此停止结构分解。

对图 1a 所示机构进行第 1 次结构分解, 得到 2 条结构分解路线, 其耦合度 $K^{(1)} = 1$, 第 2 次结构分解得到 6 条结构分解路线, 其中耦合度为 2 的 4 条, 耦

合度为 1 的 2 条, 根据运动连耦合度的定义, 机构的耦合度为 $K = 1$, 共有 4 条与之对应的结构分解路线。

$$K^{(1)} = 1$$

$$O_1ABCO_5(\Delta_1^{(1)} = 0) \rightarrow BCO_5(\Delta_2^{(1)} = 0) \rightarrow$$

$$\begin{cases} CDEO_8(\Delta_3^{(1)} = +1) \rightarrow FO_9(\Delta_4^{(1)} = -1) \\ CDFO_9(\Delta_3^{(1)} = +1) \rightarrow EO_8(\Delta_4^{(1)} = -1) \end{cases}$$

$$K^{(2)} = 1$$

$$O_8EFO_9(\Delta_1^{(2)} = +1) \rightarrow O_5CD(\Delta_2^{(2)} = 0) \rightarrow$$

$$\begin{cases} CBAO_1(\Delta_3^{(2)} = 0) \rightarrow BO_3(\Delta_4^{(2)} = -1) \\ CBO_3(\Delta_3^{(2)} = 0) \rightarrow BAO_1(\Delta_4^{(2)} = -1) \end{cases}$$

2.2 基本运动链

在所有结构分解路线中, 与 $K^{(1)} = 1$ 对应的 2 条结构分解路线具有最小划分数 3, 3 个基本运动链为 $BKC[0, 1, 0]$, $BKC[0, 1, 0]$, $BKC[0, 2, 1]$, 见图 2。

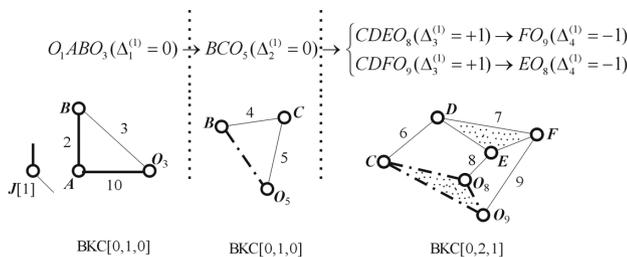


图 2 基本运动链

Fig. 2 Basic kinematic chains

此结果与文献[7]在机构运动分析中采用的结构分解路线一致。

3 结论

在不含复铰运动链耦合度 k 算法的基础上, 根据含复铰运动链双色拓扑图, 提出了含复铰运动链的耦合度算法。其核心算法在于删除前一个单开链包含的白色顶点及其关联边的操作过程中, 对于度 $d_w > 2$ 的白色顶点, 只有删除次数等于其所代表的运动副数时, 才删除该白色顶点及其关联边, 否则保留该白色顶点及其所有关联边, 另外, 在确定剩余子图中联接前一个以及以前所有单开链所含黑色顶点之间最短通路时, 不考虑其边都是度 $d_w > 2$ 的白色顶点在上次删除操作时的删除对象的通路。该算法对复铰的处理与含复铰运动链的结构综合相逆, 因此具有一般性。实例验证了算法的正确性。

(下转第 101 页)

参考文献:

- [1] 刘锦芳. 数字打样质量控制要点[J]. 印刷杂志, 2005(9): 46-49.
- [2] 李文育, 顾恒, 李和伟. 基于 Best 专业打样系统的数码打样仿真技术[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 105-107.
- [3] 许天亮. 六色打印机彩色特性检测与校正技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [4] 梁静. 基于 Printopen 的数码打样色彩管理实施方案[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 118-120.
- [5] 张东林. 分段最小二乘曲线拟合[J]. 沈阳大学学报, 1994(2): 80-83.
- [6] 蔡山, 张洁, 陈洪辉, 等. 基于最小二乘法分段三次曲线拟合方法研究[J]. 科学技术与工程, 2007(3): 352-355.
- [7] 李小东, 陈路, 龚修端. 数字喷墨打印机质量控制分析[J]. 包装工程, 2010, 31(4): 86-88.
- [8] 胡维友. 喷墨数码印刷品网点扩大值和标定网点面积率间关系的研究[J]. 包装工程, 2009, 30(3): 74-75.
- [9] MARTINEZ W L, MARTINEZ A R. Computational Statistics Handbook with Matlab[K]. Chapman & Hall/CRC, 2002.

(上接第 69 页)

参考文献:

- [1] 李跃进, 樊宁, 李炳贤. 一种新颖连杆机构在包装机械中的应用[J]. 包装工程, 1998, 19(4): 41-43.
- [2] 易启伟. 椭圆齿轮机构及其在包装机械中的应用分析[J]. 包装与食品机械, 1999, 17(4): 23-25.
- [3] 毛中彦. 包装机械中常用间歇转动机构[J]. 机电信息, 2003, 22(58): 25-26.
- [4] 吴若梅, 刘玉生, 谭理刚, 等. 基于反求工程的包装机械机构创新设计[J]. 包装工程, 2004, 25(5): 35-37.
- [5] 耿武帅, 齐元胜, 王晓华, 等. 平压平模切机驱动机构创新设计及理论分析[J]. 包装工程, 2011, 32(11): 61-64.
- [6] 杨廷力, 刘安心, 罗玉峰, 等. 机器人机构结构综合方法的基本思想、特点及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 1-11.
- [7] 杨廷力. 机械系统基本理论: 结构学-运动学-动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [8] 卢开澄, 卢华明. 清华大学出版社图论及其应用[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1996.

(上接第 75 页)

论分析与设计方法中, 繁琐容易出错的问题; 同时, 首次对凸轮机构从建模到仿真单独利用 ADAMS 软件设计, 省去了从其他三维建模软件(如 Pro/E)导入 ADAMS 软件进行仿真的一些接口问题^[9-10]。此外, ADAMS 带有的强大的函数功能, 可以对不同轮廓曲线的凸轮机构进行设计, 只需要根据从动件的运动规律, 输入已知条件和运动方程, 自动生成凸轮轮廓, 从而得到三维实体模型。在 ADAMS 环境下进行运动仿真, 分析其仿真结果, 如发现问题可以直接对凸轮模型进行改进, 与传统方法相比, 提高了设计效率和质量, 缩短了开发周期。

参考文献:

- [1] 王莹. 纸杯机典型机构的运动分析与仿真[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 136-138.
- [2] 孙娜娜. 全自动纸杯成型机机构设计与运动仿真研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- [3] 崔彦彬. 基于 Pro/E 的凸轮参数化设计及 ADAMS 运动仿真[J]. 机械传动, 2007, 31(5): 56-58.
- [4] 安子军. 机械原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [5] 申永胜. 机械原理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [6] 石永刚. 凸轮机构设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1995.
- [7] 郑建荣. ADAMS——虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] 陈文华. ADAMS2007 机构设计与分析范例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9] 崔彦彬. 基于 Pro/E 的凸轮参数化设计及 ADAMS 运动仿真[J]. 机械传动, 2007, 31(5): 56-58.
- [10] 刘飞. 基于 Pro/E 和 Adams 的共轭凸轮设计与仿真[J]. 机械研究与应用, 2011(1): 60-62.