DOI: 10.3901/JME.2015.13.095

平面含复铰及齿轮-连杆运动链的拓扑描述和结构自动综合*

褚金奎¹ 邹炎火²

(1. 大连理工大学机械工程学院 大连 116024;
2. 中国科学院海西院泉州装备制造研究所 泉州 362200)

摘要: 平面含复铰及齿轮-连杆运动链的拓扑结构自动综合可为机构方案创新设计提供各种优选类型, 是研究机构结构组成的有效方法, 是构思、发明新机构的基础。研究平面含复铰和齿轮-连杆运动链的多色拓扑图描述及借助拓扑图描述实现的单开链迭加结构自动综合方法。详细地讨论平面含复铰和齿轮-连杆运动链的双色拓扑图和三色拓扑图描述, 为机构的分析与综合提供良好的数学工具。借助于相应的多色拓扑图描述, 给出综合相应输入参数的基于单开链迭加的平面含复铰及齿轮-连杆运动链结构自动综合方法, 并给出相应的综合实例来验证该自动综合方法的有效性及其可靠性。

关键词: 平面含复铰及齿轮-连杆运动链; 多色拓扑图; 结构自动综合; 单开链迭加法

中图分类号: TH112

Topological Graph Descriptions and Structural Automatic Synthesis of Planar Multiple Joint and Geared-linkage Kinematic Chains

CHU Jinkui¹ ZOU Yanhuo²

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024;
2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362200)

Abstract: Topological structural synthesis of planar multiple joint and geared-linkage kinematic chains which can provide various comparable schemes for innovative mechanism designs; it is an effective method to researching the structure composition of mechanisms. Multicolor topological graph descriptions and structural automatic synthesis of planar multiple joint and geared-linkage kinematic chains based on single-open-chains adding method is discussed. Multicolor topological graphs of planar multiple joint and a geared-linkage kinematic chain are discussed in detail, which provide good mathematical tool for mechanism structure analysis and synthesis. With the help of multicolor topological graphs, planar multiple joint and geared-linkage kinematic chains with specified input parameters can be automatically synthesized in batch by the single-open-chains adding method. Finally, the comprehensive examples are given to verify the validity and reliability of the automatic synthesis method.

Key words: planar multiple joint and geared-linkage kinematic chains; multicolor topological graph; structural automatic synthesis; single-open-chains adding method

0 前言

平面运动链结构类型综合是机械设计过程中最富有创造性和最具有活力的阶段。它可以发明、

创造出新型机构, 是机械系统的原始性创新。因此, 长期以来针对平面运动链结构类型综合一直是国内外机构学界研究的热点与难点, 它对机械产品的创新具有决定性意义。

到目前为止, 有关平面含复铰运动链结构综合方面的研究成果还是比较少, 归纳起来主要方法如下所述。1979年, MRUTHYUNJAYA^[1]提出二副杆转化法; 1988年, YAN等^[2]给出缩杆拓扑图综合法;

* 国家自然科学基金(51175056)、基金委创新群体(51321004)和国家重点基础研究发展计划(973计划, 2011CB30210, 2011CB302105)资助项目。20150213收到初稿, 20150523收到修改稿

1989 年,文献[3-5]中提出基于双色拓扑图的单开链迭加法;文献[6-9]中给出双色拓扑缩图插点法;2004 年,宋黎等^[10]给出了含复铰运动链综合的闭开式链组合法;2010 年,DING 等^[11-12]提出基于单铰链图谱库转化法。平面齿轮-连杆运动链是在具有低副特征的一系列啮合齿轮而构成,目前国内外对于平面齿轮-连杆运动链结构类型综合的研究主要有以下几种方法。1967 年,JOHNSON^[13]给出平面单铰运动链“低副高代”生成法;1979 年,CONSTANTINESCU 等^[14]提出了在初始运动链基础上增加“结构组”生成法;1990 年,文献[15]中给出了“齿轮-连杆杆组”迭加法。1994 年,文献[16-20]中引入“焊点”这一概念,提出依附链上配置齿轮模块设置焊点组合法。

本文详细地探讨了平面含复铰和齿轮-连杆运动链的多色拓扑图描述及借助拓扑图描述实现的单开链迭加结构自动综合方法。在第 1 节里,首先详细地讨论了平面含复铰和齿轮-连杆运动链的双色拓扑图和多色拓扑图描述,为机构的分析与综合提供良好的数学工具。在第 2 节里,借助多色拓扑图描述,给出了基于单开链迭加法的平面含复铰及齿轮-连杆运动链结构自动综合方法。在第 3 节里,对全文进行了总结。

1 平面含复铰及齿轮-连杆运动链的多色拓扑图描述

1.1 平面含复铰运动链的双色拓扑图描述

平面运动链的拓扑结构关系通常用两种方式表示:一种是拓扑图描述,主要取其直观、形象;另一种是矩阵表示,主要取其便于运算。平面单铰运动链一般用点表示构件及用边表示运动副的单色拓扑图来描述,即用一种颜色的点表示构件及相应的连接边表示运动副。而如果用单色拓扑图来描述含复铰运动链,则会有三角形奇异连接出现,所以单色拓扑图不能很好地描述含复铰运动链的结构特点。为此,1989 年,作者在文献[3]中提出了用一种颜色的点表示构件及另一种颜色的点表示运动副的双色拓扑图来描述含复铰运动链,从而为平面含复铰运动链的拓扑结构分析与综合提供了良好的数学工具。

双色拓扑图,即用实心点表示构件,用空心点表示运动副,当构件与运动副相关联时,则用边把这两个顶点连接起来。双色拓扑图与平面含复铰运

动链的拓扑要素具有一一对应关系。双色拓扑图中的构件和运动副永远是间隔出现,顶点数等于运动链中构件数与运动副数之和,边数为运动链中运动副数的两倍,拓扑图中的多副构件和复铰在拓扑结构关系上是等价的。

双色拓扑缩图,由于统一双色拓扑图描述中顶点数为构件数与运动副数之和,为了简化运动链拓扑描述,可以把双色拓扑图中表示运动副 2 度顶去掉,于是就得到了较简洁的双色拓扑缩图。2009 年,丁华锋和黄真也采用该双色图,并利用它对平面含复铰运动链进行结构分析与综合^[21]。

加权双色拓扑缩图,去掉双色拓扑图中表示运动副及构件的 2 度顶点,并把双色拓扑图中各支路中删去的 2 度顶构件数作为权赋给图中的相应边,便得到了加权双色拓扑缩图。

如图 1 所示,图 1a 为一平面 8 杆 1 自由度含复铰运动链,其相应双色拓扑图如图 1b 所示,图 1c 为其去掉 2 度顶运动副后得到的双色拓扑缩图 1,图 1d 为其去掉 2 度顶构件后得到的双色拓扑缩图 2,图 1e 为其去掉 2 度顶运动副及构件后赋上加权值后得到的加权双色拓扑缩图。

图 1 平面 8 杆 1 自由度含复铰运动链及双色拓扑图描述

1.2 平面齿轮-连杆运动链的三色拓扑图描述

平面齿轮-连杆运动链可以看成是以连杆运动链为基础,引入具有齿轮高副特征的一系列啮合齿轮组合而构成的复杂机械系统。由于平面齿轮-连杆运动链中包含了高、低副,又包含有单铰和复铰,对于这样的机械系统,为了方便研究,1998 年,基于平面含复铰运动链可以用双色拓扑图来描述的基本思想,作者在文献[22]中提出了采用三色拓扑图来表示平面齿轮-连杆运动链的拓扑结构特征。从而为平面齿轮-连杆运动链的拓扑结构分析与综合提供良好的数学工具。

三色拓扑图,用实心圆点表示构件,用空心圆点表示转动副,再用三角空心点表示高副,当构件与运动副相关联时,用边把表示运动副及构件的顶

点连接起来,就得到了描述平面齿轮-连杆运动链的三色拓扑图。

三色拓扑缩图,由于平面齿轮-连杆运动链三色拓扑图中的顶点包含了构件与运动副(高副和低副),顶点数较多,为了简化拓扑表示,可以把三色拓扑图中表示构件的 2 度顶点去掉,于是就得到了一种较为简洁的三色拓扑缩图。如果把三色拓扑图中表示转动副的 2 度顶点去掉,这样也可得到另一种三色拓扑缩图描述。

加权三色拓扑缩图,去掉三色拓扑图中表示转动副及构件的 2 度顶点,并把三色拓扑图中各支路中删去的 2 度顶构件数和转动副数之和作为权赋给图中的相应边,便得到了加权三色拓扑缩图。

如图 2a 为一 4 杆 3 齿轮 1 自由度平面齿轮-连杆运动链,其三色拓扑图如图 2b 所示,去除 2 度点构件后得到如图 2c 所示的三色拓扑缩图 1,去除 2 度点转动副后得到如图 2d 所示的三色拓扑缩图 2,去掉三色拓扑图中表示转动副及构件的 2 度顶点,并把三色拓扑图中各支路中删去的 2 度顶构件数和转动副数之和作为权赋给图中的相应边,便得到了如图 2e 所示的加权三色拓扑缩图。

图 2 平面 4 杆 3 齿轮 1 自由度齿轮-连杆运动链及三色拓扑图描述

2 平面含复铰及齿轮-连杆运动链的拓扑结构自动综合

2.1 平面含复铰运动链的拓扑结构自动综合

双色拓扑图描述为平面含复铰运动链的拓扑结构综合提供良好的数学工具。一个具有 D 个基本回路的平面含复铰运动链可以看成是在一个单闭链 C_1 的基础上按一定的规则有序地迭加上 $D-1$ 个单开链 $O_2, O_3, \dots, O_D$ 而构成,称之为有序单开链迭加综合法。

如图 3 所示一平面 10 杆 1 自由度含复铰运动链的单开链迭加形成过程。该运动链含有 $D=4$ 个基本回路,它是在一个基础单闭链 C_1 的基础上以一定方式依次迭加上单开链($O_j, j=2, 3, 4$)而构成。首先选择一个基础单闭链 $C_1(1-a-2-b-3-c-4-d)$ 作为第一基本回路,从而形成具有一个基本回路的运动链;接着第二单开链 $O_2(e-5-f-6-g)$ 的两端分别迭加到已构成的具有一个基本回路的构件 1 和 3 上,形成具有两个基本回路的运动链;然后第三单开链 $O_3(c-7-h-8-i)$ 的两端分别迭加到已构成具有两个基本回路的转动副 c 和构件 6 上,形成具有三个基本回路的运动链;最后第四单开链 $O_4(e-9-j-10-i)$ 的两端分别迭加到已构成具有三个基本回路的两转动副 e 和 i 上,形成具有四个基本回路的运动链;从而得到满足要求的平面 10 杆 1 自由度含复铰运动链。

由以上的单开链迭加法生成一定综合参数平面含复铰运动链,对迭加形成过程中的运动副和构件单开链单元的分配方案及迭加形成相应综合参数关联矩阵的步骤进行规划,结合其他相关文献中的运动链同构和消极子结构判别的方法及绘制双色拓扑缩图的方法^[3,24],可以得到平面含复铰运动链拓扑缩图图谱自动综合的一般步骤,具体可表述如下。

图 3 平面 10 杆 1 自由度含复铰运动链的单开链迭加形成综合过程

(1) 输入平面含复铰运动链综合参数, 即自由度 F 、构件数 n 和总复铰因子 P 。

(2) 确定运动副和构件单开链单元的分配方案; 依次取每一个分配方案迭加形成得到相应所有平面含复铰运动链关联矩阵。

(3) 对于求得的运动链关联矩阵进行进一步结构分析, 去除包含同构和消极子结构的运动链关联矩阵, 从而得到满足要求的平面含复铰运动链关联矩阵。

(4) 依次取每一个关联矩阵绘制相应双色拓扑缩图, 从而得到满足要求的平面含复铰运动链双色

拓扑缩图图谱。

由以上的步骤可进行平面含复铰运动链拓扑缩图图谱自动综合, 用 Matlab 7.0 编制相应计算机程序, 只要输入综合基本参数 F 、 n 、 P , 即可求得满足要求的平面含复铰运动链双色拓扑缩图图谱。

基于以上的自动综合方法, 输入综合基本参数 $F=1$ 、 $n=10$ 、 $P=3$, 综合得到 566 种平面 10 杆 1 自由度 $P=3$ 含复铰运动链双色拓扑缩图图谱, 其中 18 种该类型平面含复铰运动链双色拓扑缩图图谱可得如图 4 所示。

图 4 18 种平面 10 杆 1 自由度 $P=3$ 含复铰运动链双色拓扑缩图图谱

2.2 平面齿轮-连杆运动链的拓扑结构自动综合

三色拓扑图描述为平面齿轮-连杆运动链的拓扑结构综合提供良好的数学工具。一个具有 D 个基本回路的平面齿轮-连杆运动链可以看成是在一个包含 D_1 个基本回路的基础连杆运动链(BLKC)上以一定方式依次迭加上 D_2 个齿轮组单开链 O_2 , $O_3, \dots, O_{D_2+1}$ 而构成(D_2 为运动链中齿轮组构成的

基本回路数, $D = D_1 + D_2$)。

如图 5 所示为一 6 杆 5 轮 3 高副 2 焊点 1 自由度平面齿轮-连杆运动链的齿轮单开链迭加形成过程。该平面齿轮-连杆运动链含有 5 个基本回路, 它是在一个含有 2 个基本回路的 Stephenson 型基础运动链上以一定方式依次迭加上 3 个齿轮单开链 O_j ($j=2, 3, 4$)而构成, 其构成方法为: 首先选择 Stephenson

图 5 平面 6 杆 5 轮 3 高副 2 焊点 1 自由度齿轮-连杆运动链的单开链迭加形成综合过程

型 6 杆 1 自由度运动链作为基础运动链; 接着包含两个齿轮的齿轮单开链 O_2 一端中的齿轮迭加到连杆 1 上并与之设置焊点构成同一构件, 另一端中的齿轮迭加到转动副 a 上; 然后包含两个齿轮的齿轮单开链 O_3 一端中的齿轮迭加到连杆 1 上并与之设置焊点构成同一构件, 另一端中的齿轮迭加到转动副 d 上; 最后包含一个齿轮的齿轮单开链 O_4 一端迭加到齿轮构件 8 上并与之啮合形成齿轮副 j , 另一端迭加到运动副 e 上; 从而形成满足要求的具有 5 个基本回路的齿轮-连杆运动链。

由以上的齿轮单开链迭加法生成一定综合参数平面齿轮-连杆运动链, 对迭加形成过程中的齿轮副、齿轮和焊点的单开链单元的分配方案及迭加形成相应综合参数关联矩阵的步骤进行规划, 结合其他相关文献中的运动链同构和消极子结构判别的方法及绘制三色拓扑缩图的方法^[3,24], 可以得到平面齿轮-连杆运动链拓扑缩图图谱自动综合的一般步骤, 具体可表述如下。

(1) 输入平面齿轮-连杆运动链综合参数, 即基础运动链 $[n_1, m_1, F_1]$ 的关联矩阵 A 和齿轮单开链的齿轮数 n_c 、齿轮副数 m_c 、焊点数 h 和自由度数 F_2 。

从而确定综合为 n_1 杆 n_c 轮 m_c 齿轮副 h 焊点 (F_1+F_2) 自由度平面齿轮-连杆运动链的输入条件。

(2) 确定齿轮单开链单元分配方案, 依次取每一个分配方案迭加形成得到相应所有平面齿轮-连杆运动链关联矩阵。

(3) 对于求得的运动链关联矩阵进行进一步结构分析, 去除包含同构和消极子结构的运动链关联矩阵, 从而得到满足要求的平面齿轮-连杆运动链关联矩阵。

(4) 依次取每一个关联矩阵绘制相应三色拓扑缩图, 从而得到满足要求的平面齿轮-连杆运动链三色拓扑缩图图谱。

由以上的步骤可进行平面齿轮-连杆运动链拓扑缩图图谱自动综合, 用 Matlab 7.0 编制相应计算机程序, 只要输入综合基本参数即可求得满足要求的平面齿轮-连杆运动链三色拓扑缩图图谱。

基于以上的自动综合程序, 输入要综合参数, 即基础运动链为 6 杆 Stephenson 型运动链关联矩阵 A 和齿轮单开链参数($n_c=4, m_c=2, h=0, F_2=2$), 可以综合得到 18 种 6 杆 4 轮 2 齿轮副 0 焊点 3 自由度齿轮-连杆运动链三色拓扑缩图图谱, 如图 6 所示。

图 6 18 种 6 杆 4 轮 2 齿轮副 0 焊点 3 自由度齿轮-连杆运动链三色拓扑缩图图谱

3 结论

(1) 详细地讨论了平面含复铰的双色拓扑图描述和平面齿轮-连杆运动链的三色拓扑图描述, 为平面含复铰和齿轮-连杆运动链的分析与综合提供良好的数学工具。

(2) 借助双色及三色拓扑图描述, 给出了综合相应的输入参数的基于单开链迭加的平面含复铰及

齿轮-连杆运动链的拓扑缩图结构自动综合方法。

参 考 文 献

- [1] MRUTHYUNJAYA T S. A computerized methodology for structural synthesis of kinematic chains: Part 1-Formulation[J]. Mech. Mach. Theory, 1984, 19(6): 487-495.
- [2] YAN Hongsen, HSU C H. Contracted graphs of kinematic chains with multiple joints[J]. Mathematical and

- Computer Modelling, 1988, 10(9): 681-695.
- [3] CHU Jinkui, CAO Weiqing. Type synthesis of Baronnov Trusses with multiple joints and computer autogeneration [C]// The 5th International Symposium on Linkage and Computer Aided Design Method, Romania, 1989, 419-426.
- [4] CHU Jinkui, ZOU Yanhuo. An algorithm for structural synthesis of planar simple and multiple joint kinematic chains[J]. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2014, 228(12): 2178-2192.
- [5] 褚金奎. 平面连杆机构结构特性及尺度特性的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1992.
- CHU Jinkui. A study of structural and dimensional characteristics of planar linkages[J]. Beijing: Beihang University, 1992.
- [6] 曹惟庆, 褚金奎. 含有复铰的平面八杆单自由度机构的类型综合[J]. 机械科学与技术, 1990, 9(4): 1-7.
- CAO Weiqing, CHU Jinkui. Structural synthesis of planar 8-bars, 1-DOF multiple joints kinematic chains[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 1990, 9(4): 1-7.
- [7] 褚金奎, 曹惟庆, 吕传毅. 平面十杆复铰单自由度机构的类型综合[J]. 西安理工大学学报, 1995, 11(4): 239-244.
- CHU Jinkui, CAO Weiqing, LÜ Chuanyi. Structural synthesis of planar 10-bars, 1-DOF multiple joints kinematic chains[J]. Journal of Xi'an university of Technology, 1995, 11(4): 239-244.
- [8] CAO Weiqing, CHU Jinkui. Structural analysis and synthesis of assur groups with multiple joint[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1992, 5(1): 16-22.
- [9] CHU Jinkui, CAO Weiqing. Synthesis of Assur groups with multiple joints[J]. Mech. Mach. Theory, 1998, 33(8): 1127-1133.
- [10] 宋黎, 杨坚, 曹惟庆. 含复铰平面闭式运动链型综合的组合法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 37-41.
- SONG Li, YANG Jian, CAO Weiqing. Combination method of type synthesis for palanar kinematic chain with multiple joints[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(2): 37-41.
- [11] DING Huafeng, ZHAO Jing, HUANG Zhen. Unified structural synthesis of planar simple and multiple joint kinematic chains[J]. Mech. Mach. Theory, 2010, 45(4): 555-568.
- [12] DING Huafeng, YANG Weijing, HUANG Peng. Automatic structural synthesis of planar multiple joint kinematic chains[J]. ASME J. Mech. Des., 2013, 135(9): 091007-1-12.
- [13] JOHNSON R C. Creative design of epicycles gear trains using number synthesis[J]. ASME J. Eng. Ind., 1967, 5: 309-314.
- [14] CONSRANTINESCU N R, ZAMFIR V. The Concept of structural group in the synthesis of barred and geared mechanism[C]//Proceedings of the 5th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, 1979, 357-392.
- [15] 洪笃利, 朱友民. 常用齿轮连杆机构的分组运动分析第一部分-常用齿轮连杆机构的分组方法[C]//第七届全国机构学学术讨论会议论文集, 1990: 184-190.
- HONG Duli, ZHU Youmin. Grouping motion analysis of common geared-linkage mechanism part-I: The grouping method of common geared-linkage mechanism [C]//The 7th National Mechanism Academic Institutions Meeting, 1990: 184-190.
- [16] 吕传毅, 曹惟庆, 褚金奎. 齿轮连杆机构结构分析与综合方法[J]. 西安理工大学学报, 1994, 10(4): 241-249.
- LÜ Chuanyi, CAO Weiqing, CHU Jinkui. Structural analysis and synthesis method of geared-linkage mechanisms[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1994, 10(4): 241-249.
- [17] 吕传毅, 曹惟庆, 褚金奎. 无焊点齿轮连杆运动链的类型综合研究[J]. 西安理工大学学报, 1995, 11(1): 10-15.
- LÜ Chuanyi, CAO Weiqing, CHU Jinkui. Structural synthesis of geared-linkage mechanisms without spots[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1995, 11(1): 10-15.
- [18] 吕传毅, 曹惟庆, 褚金奎. 齿轮连杆机构结构生成的研究[J]. 机械科学与技术, 1995(2): 17-22.
- LÜ Chuanyi, CAO Weiqing, CHU Jinkui. Research on structural generation of geared-linkage mechanisms[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 1995(2): 17-22.
- [19] 吕传毅, 曹惟庆, 褚金奎. 齿轮连杆机构类型综合的研究[J]. 机械工程学报, 1996, 32(3): 9-14.
- LÜ Chuanyi, CAO Weiqing, CHU Jinkui. Research on type synthesis of geared-linkage mechanisms[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1996, 32(3): 9-14.
- [20] LI Tuanjie, CAO Weiqing, CHU Jinkui. The computer automatic generation for the type synthesis of geared linkage mechanisms[C]//Proceedings of International Conference on Mechanical Transmission and Mechanisms, Tianjin, 1997, 111-114.
- [21] DING Huafeng, ZHAO Jing, HUANG Zhen. Unified topological representation models of planar kinematic chains[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2009, (下转第 115 页)