

DOI: 10.3901/JME.2018.03.026

面向作业任务的约束变胞机构设计方法^{*}

李树军^{1,2,3} 王洪光² 李小彭^{1,2} 杨贺绪³ 戴建生⁴

- (1. 东北大学机械与自动化学院 沈阳 110819;
2. 中国科学院机器人学国家重点实验室 沈阳 110016;
3. 宁夏理工学院机械工程学院 石嘴山 753000;
4. 伦敦大学国王学院 伦敦 WC2R 2LS 英国)

摘要: 如何根据作业任务需求设计约束变胞机构的构型,特别是包含变胞运动副的类型与约束方式的变胞机构,是变胞机构在实际应用中有待解决的关键问题之一。将作业任务分解为子任务,获取对应的变胞构态及其输出运动形式,进而获得对应的变胞运动副的类型及约束周期,构成了基于任务的变胞机构的输出运动与约束组合循环图。根据变胞运动副的类型和邻接关系,归纳出扩展 Assur 杆组可以提供的输出运动形式,建立了扩展 Assur 杆组与变胞机构的运动形式与约束组合的关联,因而可以便捷设计出变胞源机构。通过研究变胞机构的组合变胞循环图与变胞机构的等效阻力梯度变化的对应关系,求得约束变胞运动副的约束形式和结构,代入变胞源机构即可得到对应带有变胞运动副约束形式的全部变胞机构;同时进一步考虑工艺条件及运动的可靠性等因素,从中选取适合作业要求的变胞机构。以设计实例演示和验证了提出的设计理论和设计方法的可行性和实用性。

关键词: 约束变胞机构; 任务-运动映射; 约束循环图; 等效阻力; 变胞副形式

中图分类号: TH112

Task-orientated Design Method of Practical Constraint Metamorphic Mechanisms

LI Shujun^{1,2,3} WANG Hongguang² LI Xiaopeng^{1,2} YANG Hexu³ DAI Jiansheng⁴

- (1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819;
2. State Key Laboratory of Robotics of China, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;
3. School of Mechanical Engineering, Ningxia Institute of Science and Technology, Shizuishan 753000;
4. King's College, University of London, Strand London WC2R 2LS, UK)

Abstract: How to design constraint metamorphic mechanisms according to the requirements of tasks, especially involved with the types of metamorphic kinematic pairs and the ways of constraints, is one of the key issues to be urgently solved during the practical application of metamorphic mechanisms. With the decomposition of the tasks, the corresponding configurations and movement output forms of metamorphic mechanisms are mapped, and as well as the types and constraint period of metamorphic kinematic pairs are achieved. Based on it, a task-based metamorphic mechanisms diagram concerned with the output motions and the constraints is presented. Subsequently, according to the types of metamorphic kinematic pairs as well as their adjacent relations, the movement output forms generated by the augmented Assur groups are summarized. Further, the relationships between the movement forms and constraint combinations of metamorphic mechanisms and the augmented Assur groups are established, which results in a convenient design of source metamorphic mechanisms. Followed by it, the constraint forms and structures of metamorphic kinematic pairs in the constraint metamorphic mechanisms is solved by studying the relationship between the task-based metamorphic mechanisms diagram and the gradient variation of equivalent resistance in the metamorphic mechanisms, which is further applied to the source metamorphic mechanisms so as to achieve whole metamorphic mechanisms with constraint forms of metamorphic kinematic pairs. Then, considering the influences such as process conditions and movement reliability, the metamorphic mechanisms meeting the requirements of the tasks is chosen from them. In the end, the feasibility and effectiveness of the proposed theory and method are demonstrated and verified.

^{*} 国家自然科学基金(51575091, 51535008)、机器人学国家重点实验室开放基金(2015-O04)资助项目。20161130 收到初稿, 20170929 收到修改稿

Key words: constraint metamorphic mechanisms; task-motion mapping; combined cyclogram; equivalent resistance; forms of metamorphic joint

0 前言

变胞机构自 1998 年由 DAI 等^[1]首次提出后, 2000 年 PARISE 等^[2]引出变胞正交机构。2002 年李端玲等^[3]通过构态变换的矩阵运算研究变胞机构的综合。LIU 等^[4]在 2004 年提出了利用杆件的耦合、杆件连接关系的变化和运动副的特性变化实现变胞。2007 年王德伦等^[5]探讨了变胞机构的组成与表达方式并建立了变胞方程。2009 年 DING 等^[6]研究了对称结构、可装配的变胞机构的拓扑特征和变胞特性, 同年 ZHANG 等^[7]将变胞方式分为运动副变胞、构件变胞和几何约束变胞, 分析了几何约束变胞的特点。2009 年 GAN^[8]研究了变胞并联机构, 同年李树军等^[9]提出了扩展 Assur 杆组的概念和基于扩展 Assur 杆组的变胞机构结构组成原理, 并在 2012 年进行了进一步深入研究^[10]。2010 年蓝兆辉^[11]研究了平面变胞机构的结构元素和演化方式, ZHANG 等^[12-13]研究出一种可变轴线变胞运动副, 并发明了一种称为可重构的虎克铰用于并联机构的构型变化。ZHANG 等^[14]于 2011 年还提出一种基于约束变量的变胞机构综合方法。2015 年 LI 等^[15-16]引入了约束变胞机构的等效阻力的概念, 并研究了变胞运动副的约束形式、约束力性态及运动副结构的关系, 提出一种包含变胞机构的机构综合方法。AIMEDEE 等^[17]在 2016 年对变胞机构和可重构机构的实现方法进行了系统的综述。上述研究为变胞机构的设计、特别是构型综合和构态变换建立了理论基础。

通常用于实际作业的变胞机构是一种通过约束变胞运动副运动周期的约束变胞机构(是一种欠驱动机构)。这类机构不仅需要设计出变胞源机构, 还要根据预期实现工作构态, 设计变胞运动副特定的约束形式和结构形式以满足作业要求^[18-19]。如何基于作业任务获取对应的变胞源机构, 根据变胞工作构态对约束力的要求, 选择何种约束形式和结构形式的变胞运动副、其组合方式有多少种等构型综合问题, 都是约束变胞机构应用设计中亟待研究和解决的问题。

1 变胞机构的输出运动与约束组合循环图

将作业任务分解为子任务, 对应于变胞机构的

各作业构态。根据子任务作业需求, 提取出变胞机构各对应作业构态的输出运动形式, 进而确定对应变胞运动副的约束状态和变胞运动副的类型及其组合。

1.1 变胞构态的输出运动形式

根据机构的类型和变胞构态数, 可以归纳出变胞机构各构态的可能输出运动形式。如对于 2 自由度(即 2 变胞构态)的平面变胞机构, 其输出运动为转动或移动, 因此各变胞构态的输出运动形式组合为: ① 构态 1 移动, 构态 2 移动; ② 构态 1 移动, 构态 2 转动(摆动); ③ 构态 1 转动(摆动), 构态 2 移动; ④ 构态 1 转动(摆动), 构态 2 转动(摆动)。

1.2 变胞运动副的类型及其组合

根据变胞机构各变胞构态的输出运动形式, 提取运动链中变胞运动副运动的类型及其组合方式。对于 2 自由度变胞机构, 其输出的运动形式与变胞运动副类型和约束状态关系可归纳为以下几点。

(1) 构态 1 的输出运动形式为移动, 构态 2 的输出运动形式为移动: 为了实现预定的输出运动形式, 首先在变胞机构的运动链中应拥有满足相应输出运动的运动副类型。为了保证上述输出运动, 要使对应的变胞构态运动链中的移动副不被约束, 优选对运动链中的转动副进行约束。因此, 对应构态 1 约束转动的变胞运动副静止不动, 从而为构态 1 的输出移动运动不被约束; 而对应构态 2 约束转动的变胞运动副静止不动, 从而为构态 2 的输出移动运动不被约束。即选择构态 1 的约束变胞运动副对应为转动副 R, 构态 2 的约束变胞运动副对应为转动副 R。

(2) 构态 1 输出构件的运动形式为移动, 构态 2 输出构件的运动形式为转动(摆动): 根据上述原则, 可以优选构态 1 的约束变胞运动副对应为转动副 R, 构态 2 的约束变胞运动副对应为移动副 P。

(3) 构态 1 输出构件的运动形式为转动(摆动), 构态 2 输出构件的运动形式为移动: 根据上述原则, 可以优选构态 1 的约束变胞运动副对应为移动副 P, 构态 2 的约束变胞运动副对应为转动副 R。

(4) 构态 1 输出构件的运动形式为转动(摆动), 构态 2 输出构件的运动形式为转动(摆动): 根据上述原则, 可以优选构态 1 的约束变胞运动副对应为移动副 P, 构态 2 的约束变胞运动副对应为移动副 P。

应该说明的是, 上述仅给出的是可以满足给定

运动要求的约束变胞运动副的类型之一,或者说是能够实现预定输出运动的优选组合之一。对于全部是转动副或移动副的运动链,直接选择约束同类运动副提供同类输出运动。若通过运动链派生的运动提供非同类运动副的输出运动形式,但会降低输出运动的范围和确定性,本文研究不涉及这种情况。

表1 基于任务的2自由度变胞机构的输出运动与约束组合循环图

类型组合	1		2		3		4	
作业任务	子任务1	子任务2	子任务1	子任务2	子任务1	子任务2	子任务1	子任务2
构态	构态1	构态2	构态1	构态2	构态1	构态2	构态1	构态2
输出运动	移动	移动	移动	转动	转动	移动	转动	转动
变胞副 J_i	*		*		**		**	
变胞副 J_j		*		**		*		**

设计时根据作业任务分解的子任务及其输出运动要求,从中选取一种变胞运动副组合,简化构型综合,避免构型爆炸。

2 变胞杆组的可输出运动形式

上述变胞机构的运动组合循环图将作业任务等效为变胞机构的输出运动形式和变胞运动副的类型和约束状态,因此在基于任务的变胞机构综合时,可转化为寻求满足选定的输出运动形式和变胞运动副类型的变胞源机构。对于基于扩展 Assur 杆组的机构组成原理,就是选取对应的变胞杆组。

2.1 变胞杆组

2自由度的变胞杆组,即扩展 Assur 杆组构成如图1所示^[8,10]。主动件的2种驱动方式如图2所示。

2.2 变胞杆组的可输出运动形式

图1中满足提供2个转动输出(RR)的变胞杆组有 $A_{AII}^1 \sim A_{AII}^7$ 7种。通常2个变胞工作构态为同一作业对象,可选择2个变胞运动副相邻连接,对应有5种变胞杆组($A_{AII}^1 \sim A_{AII}^4$, A_{AII}^7)符合相邻链接。如果考虑选择变胞运动副在运动链的末端邻接,对应的前4种变胞杆组($A_{AII}^1 \sim A_{AII}^4$)符合要求。另外还有4种变胞杆组($A_{AII}^1 \sim A_{AII}^2$, $A_{AII}^5 \sim A_{AII}^6$)的2个转动副不邻接。同理,可以分离出图1中满足具有2个移动输出运动(PP),一个转动运动和一个移动运动

根据上述,基于机器作业任务得到的2自由度变胞机构的变胞输出运动形式与约束组合循环图如表1所示。表1中的单个星号(*)表示转动相对静止,双星号(**)表示移动相对静止。表1给出了作业任务、变胞构态、输出运动形式和变胞运动副类型及其约束状况的关系。

(RP/PR)的变胞杆组及其对应的邻接方式。2自由度变胞杆组及其对应的可输出运动形式如表2所示。

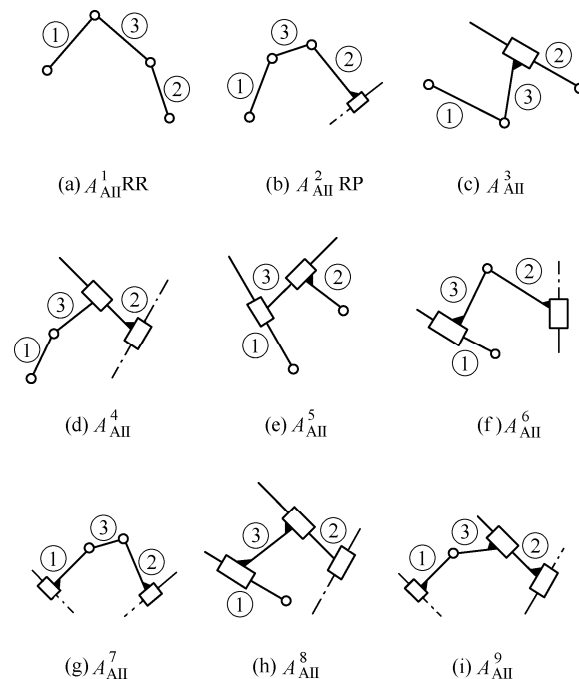


图1 扩展 II 级 Assur 杆组及其构件编号和符号表示

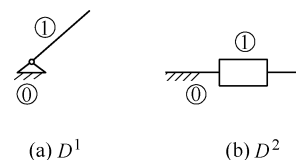


图2 主动件和机架的编号及符号表示

表2 2自由度变胞杆组及其对应的可输出运动形式

输出运动形式	A_{AII}^1	A_{AII}^2	A_{AII}^3	A_{AII}^4	A_{AII}^5	A_{AII}^6	A_{AII}^7	A_{AII}^8	A_{AII}^9
RR	□▲○	□▲○	□▲	□▲	○	○	□		
PP				▲	□	○	○	□▲	▲○
RP/PR		▲○	□▲○	□○	□▲	□▲○	▲○	▲○	▲○

□一般邻接 ▲末端邻接 ○不邻接

3 满足作业构态的变胞运动副约束形式与结构

3.1 作业构态与变胞运动副约束力

(1) 变胞机构的等效阻力梯度模型^[18]。在约束变胞机构运动过程中，对应每一个工作构态都有一个相对运动的变胞副，其余变胞副保持相对静止。变胞运动副在运动与静止间的相互转换是根据变胞副提供的约束力的相对大小切换的，亦即是由变胞运动副提供的约束力自动调控的。为了描述变胞运动副受力状况和约束特点，并使同一机构中转动变胞副所受的约束力矩和移动变胞副所受的约束力能够进行比较，定义一种量纲一变胞运动副的等效阻力系数函数 $f(\theta_i)$ ^[15]

$$f_m(\theta_i) = \frac{F_c(\theta_i)}{F_{\min}} = \frac{T_c(\theta_i)}{T_{\min}} \quad (1)$$

$$f_s(\theta_i) = \frac{F_c(\theta_i)}{F_{\max}} = \frac{T_c(\theta_i)}{T_{\max}} \quad (2)$$

式中， $f_m(\theta_i)$ 为变胞周期内相对运动变胞副的等效阻力系数函数， F_{\min} 和 T_{\min} 分别为对应构态周期内变胞运动副所受的最小力和最小力矩。 $f_s(\theta_i)$ 为变胞周期内相对静止变胞副的等效阻力系数函数， F_{\max} 和 T_{\max} 分别为对应构态周期内变胞运动副所受的最大力和最大力矩。 $F_c(\theta_i)$ 和 $T_c(\theta_i)$ 分别表示变胞运动副在运动方向上所受的约束力和约束力矩。由式(1)、(2)可知， $f_m(\theta_i)$ 和 $f_s(\theta_i)$ 与 $F_c(\theta_i)$ 和/或 $T_c(\theta_i)$ 成比例，即使机构中变胞运动副的阻力系数曲线形状与变胞运动副等效阻力曲线的形状相似。

根据机构运动的最小阻力原则，各变胞运动副的相对动作顺序是和其提供的等效阻力系数成比例的，在每一个变胞构态运动周期中，要保证相对运动的变胞副的等效阻力系数小于静止变胞运动副的等效阻力系数，即整个约束变胞过程的等效阻力梯度变化规律为

$$f_m(\theta_i) \leq 1 \quad f_s(\theta_i) \geq 1 \quad (3)$$

式(3)为描述变胞过程中变胞运动副的运动和约束力关系的等效阻力梯度模型。根据式(3)，2 自由度变胞机构的等效阻力梯度曲线如图 3 所示。

(2) 变胞机构等效阻力矩阵。为了建立变胞运动副的运动与其所受约束力的联系，根据式(1)、(2)并对比图 3，可以建立 2 自由度变胞机构等效阻力

矩阵 F

$$F = \begin{bmatrix} f_{i1} & 0_{i2} \\ 0_{j1} & f_{j2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

或

$$F = \begin{bmatrix} 0_{j1} & f_{j2} \\ f_{i1} & 0_{i2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中，矩阵的行表示变胞运动副在各工作构态的约束状态，列表示工作构态。 $f_{ij} > 1$ 为变胞运动副 i 在构态 j 处于约束状态， 0_{ij} 为变胞运动副 i 在构态 j 处于非约束状态。

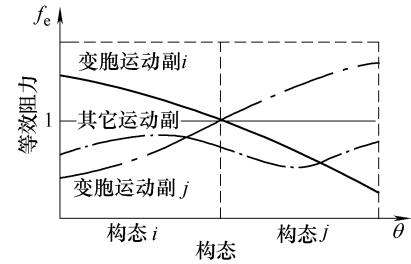


图3 2 自由度变胞机构等效阻力梯度线图

3.2 约束形式与变胞运动副的结构拓扑

3.2.1 变胞运动副约束形式及其矩阵表达

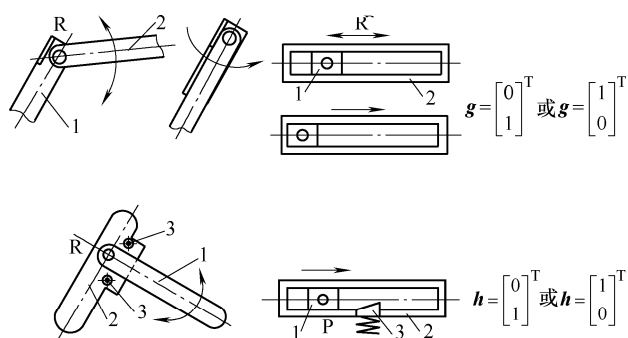
约束变胞运动副的主要实现形式包括：变胞运动副结构提供的约束，包含几何约束(几何形状限位)和力约束(弹簧力、重力、作业对象的反力等)以及机构结构参数对变胞运动副提供的约束等。2 种典型的约束形式及约束特性的矩阵表述如图 4 所示。在约束特性矩阵中，0 表示非约束状态，1 表示约束状态。

3.2.2 变胞运动副的结构拓扑矩阵

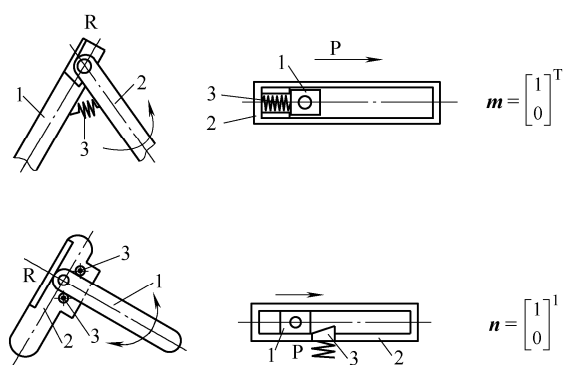
约束变胞运动副的约束形式和结构所提供的约束力的变化规律，应符合变胞机构的工作构态等效阻力梯度的变化。为了将约束变胞运动副的约束形式与其在各工作构态提供的等效阻力规律建立联系，对比式(4)或式(5)约束变胞机构的等效阻力矩阵，可建立对应图 3 的 2 自由度约束变胞机构的变胞运动副的结构拓扑矩阵 C ^[19]

$$C = \begin{bmatrix} J_i \\ J_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & c_{i2} \\ c_{j1} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中，行表示变胞运动副的约束力变化规律矩阵，对比图 4 即可建立起变胞运动副的约束力与变胞运动副的结构拓扑的对应关系。列表示对应的工作构态。 $c_{ij}(i, j=1, 2)$ 表示变胞运动副 i 在构态 j 处于约束状态，0 表示变胞运动副处于非约束状态。



(a) 几何约束和弹簧力控制的几何约束



(b) 力和几何复合约束

图 4 典型变胞运动副约束形式及矩阵表述

4 基于任务的变胞机构设计方法

4.1 基于作业任务的变胞源机构综合

根据机构组成原理, 变胞源机构可由主动件、机架和扩展 Assur 杆组组成^[8, 10]。基于任务, 即基于变胞运动副的运动形式及类型组合的变胞源机构综合过程如下。

(1) 根据任务确定变胞运动副的运动形式和类型组合。根据作业工艺和动作要求, 提取变胞机构各工作构态的输出运动形式, 参考表 1 选取一种变胞机构运动循环图。对照循环图确定对应工作构态的变胞运动副的运动形式和变胞运动副类型, 即获取变胞运动副的类型及其组合形式。

(2) 根据变胞运动副组合形式选取对应的杆组类型。根据获取的变胞运动副的组合形式和变胞构态输出运动的状态, 同时结合运动副的工艺特点和实际作业状况, 确定变胞运动副在杆组中的邻接顺序, 由表 2 选择对应的各变胞杆组。

(3) 构建变胞源机构。根据机构的组成原理, 变胞源机构可由主动件、机架和变胞杆组组成。同时, 考虑主动件的类型有如图 2 的 2 种, 因此可以构成的变胞源机构的数目是对应变胞杆组连接构型

的 2 倍。结合作业任务特点, 选取一种主动件的驱动形式, 即可获取一种满足作业任务的变胞源机构。

4.2 基于作业构态变化的变胞运动副的约束形式设计

(1) 根据任务要求, 结合运动循环图确定变胞构态对应等效阻力变化关系, 为确定变胞运动副约束形式提供依据。

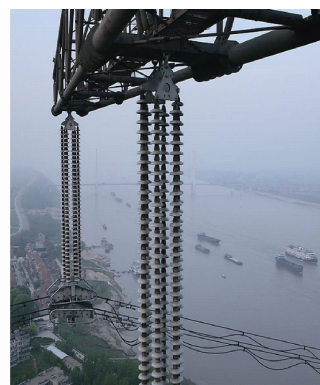
(2) 基于等效阻力变化线图, 对比典型约束变胞运动副的约束力变化特性, 选取变胞运动副类型。将选取的变胞运动副代入变胞运动副的结构拓扑矩阵, 获取对应的可行约束变胞机构。

(3) 根据作业环境、加工工艺和运动的可靠性等因素, 在上步获取的机构中选择一种作为解决方案。

5 基于任务的变胞机构构型设计举例

5.1 作业背景

绝缘子是支撑高压电器带电部分和高压配电装置母线的绝缘支柱, 它使得接地体和导体在电气上绝缘而机械上连接。作为架空高压线的重要组成部分, 绝缘子能否安全运行对电力系统的稳定性具有重要影响。绝缘子串安装在高空, 且形状可分为悬垂串、水平串以及带倾斜角度的 V 型串, 如图 5 所示。对绝缘子进行检测是及时发现其故障和排除事故隐患的重要手段。



(a)



(b)



(c)

图 5 绝缘子及其作业环境

因此开发一种智能机器人系统,用于自动检测绝缘子的运行状态,进而发现潜在的风险,对于电力传输的稳定性具有重要的意义。

爬行机构是检测机器人系统的重要组成部分,国内外学者针对爬行机构的设计开展了广泛的研究。现有爬行类绝缘子检测机器人移动机构主要有两类:一类为履带式爬行机构,主要适合水平绝缘子串(特别双串)的检测;另一类为转动卡爪式,通过卡爪与绝缘子表面(通常仅适合类圆锥表面,因此不适于水平串检测)的滚动加滑动“啮合”,不仅对绝缘子表面镀层产生磨损,而且难以适应绝缘子串的制造和安装误差,容易造成机构的卡死。

5.2 绝缘子检测机器人变胞源机构设计

本文结合绝缘子检测机器人变胞爬行机构的设计,给出基于等效阻力梯度模型的约束变胞机构的设计方法和设计过程。约束变胞源机构的设计过程如下。

(1) 检测作业任务与输出运动形式。作业任务与输出运动需求分析:绝缘子检测机器人需要对绝缘子串上的每个绝缘子进行自动的劣化检测。这就要求绝缘子检测机器人要以绝缘子边缘为支点(机架)交替支撑跨越,即需要有沿绝缘子径向切入和退出的绝缘子跨越输出运动;绝缘子检测机器人沿绝缘子串方向移动(有导向机构保证机器人能沿绝缘子串顺畅移动),并能在检测位置停止对该片绝缘子进行检测,即具有移动的输出运动。针对检测作业任务归纳出的输出运动形式如图 6 所示。

(2) 输出运动形式与作业构态。根据上述作业任务与输出运动形式分析可知,完成该检测作业任务需要下述 2 种作业构态。

构态 1: 为检测机构提供一种跨越绝缘子串的爬行运动,而且爬行构件最好是平动(或接近平等)运动以不破坏闪裙 RTV 材料涂层。

构态 2: 为检测构件提供一个沿绝缘子串方向的移动(进退双向)的运动。该构态提供一种移动输出运动。

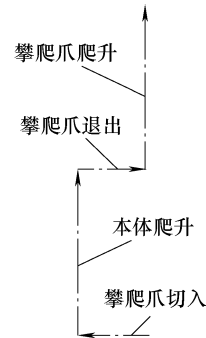
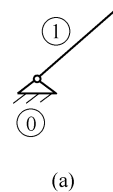


图 6 检测作业的运动形式

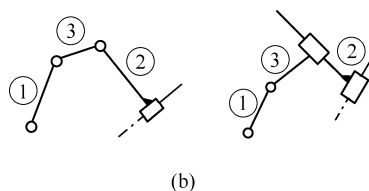
(3) 变胞爬行机构约束变胞运动副类型组合。根据上述检测任务对应的输出运动形式与作业构态需求,由于攀爬切入/退出的行程相对较小,可以通过摆动或移动实现,因此选定构态 1 的约束变胞运动副对应为转动副 R 或移动副 P,由于构态 2 的移动行程大,故约束变胞运动副对应选为移动副 P。即变胞运动副的组合为 R/P 或 (P/R) 和 P/P。根据表 1,运动形式 3 和 4 满足上述要求。

(4) 绝缘子检测机器人爬行机构的变胞源机构。根据变胞运动副组合形式选取对应的杆组类型。根据表 1,具有 R/P(或 P/R)配置变胞运动副的变胞杆组共有 18 种拓扑结构,具有 P/P 变胞运动副的变胞杆组共有 8 种拓扑结构。通常 2 个变胞运动副邻接配置便于控制,对应前者有 7 种,后者有 3 种,同时考虑有图 2 所示的 2 种驱动形式,即可组成所有满足运动要求的变胞源机构。考虑变胞运动副约束的可靠性等因素,选择转动驱动形式和 A_{Au}^2 和 A_{Au}^4 即 RRRP 杆组和 RRPP 杆组作为变胞杆组。

将主动件、机架(图 7a)和选取的杆组(图 7b)连接起来,即可获取对应的变胞源机构如图 7c、7d 所示。



(a)



(b)

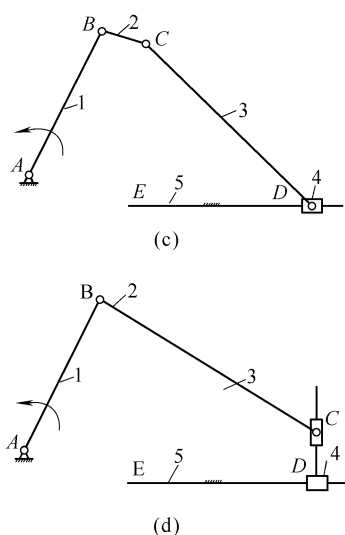


图7 2种绝缘子检测机器人爬行机构的变胞源机构

5.3 具有变胞运动副约束形式的构型设计

要使单驱动的 2 个自由度变胞机构具有确定的作业构态和运动时序,在运动的每个时刻都有一个运动副是被约束的,并通过运动副约束运动的切换实现作业构态的变换。变胞运动副提供的约束形式,包含几何约束(几何形状限位)和力约束(弹簧力、重力、作业对象的反力等)以及机构的位形(如死点)对变胞运动副提供的约束等。若选取图 7 变胞源机构中的 C 和 E 为约束变胞运动副,由前述提出的等效阻力梯度模型,其等效阻力梯度曲线如图 8 所示。

根据式(5),将变胞运动副的等效阻力梯度线图用矩阵表达,可建立其等效阻力矩阵 F

$$F = \begin{bmatrix} 0 & f_{45} \\ f_{34} & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(6)建立 R/P 形式约束变胞运动副的结构拓扑矩阵 C

$$C = \begin{bmatrix} P_{45} \\ R_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & c_{45} \\ c_{34} & 0 \end{bmatrix}$$

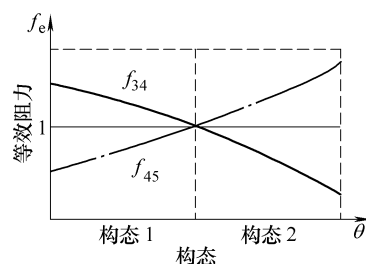


图8 约束变胞机构工作行程的等效阻力梯度曲线

P/P 形式约束变胞运动副的结构拓扑矩阵

$$C = \begin{bmatrix} P_{45} \\ P_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & c_{45} \\ c_{34} & 0 \end{bmatrix}$$

将上式矩阵中的每行与图 4 中的约束特性矩阵进行比对,据工艺要求选取变胞运动副的结构形式。考虑作业任务的实际状况,变胞运动副的约束形式选图 4 中的几何约束和具有弹力和几何的复合约束形式,将其代入变胞运动副结构拓扑矩阵 C ,可获取 R/P 形式约束变胞运动副的结构拓扑形式

$$C = \begin{bmatrix} P_{45} \\ R_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & c_{45} \\ c_{34} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & g/m \\ g/h/n & 0 \end{bmatrix}$$

P/P 形式约束变胞运动副的结构拓扑形式

$$C = \begin{bmatrix} P_{45} \\ P_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & c_{45} \\ c_{34} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & g/m \\ g/h/n & 0 \end{bmatrix}$$

将 R/P 结构拓扑矩阵具体的约束形式带入图 7c 变胞源机构,可得图 9 所示 6 种具有变胞运动副约束形式的变胞机构。同理,将 P/P 结构拓扑矩阵具体的约束形式带入图 7d 变胞源机构,可得图 10 所示 6 种具有变胞运动副约束形式的变胞机构。

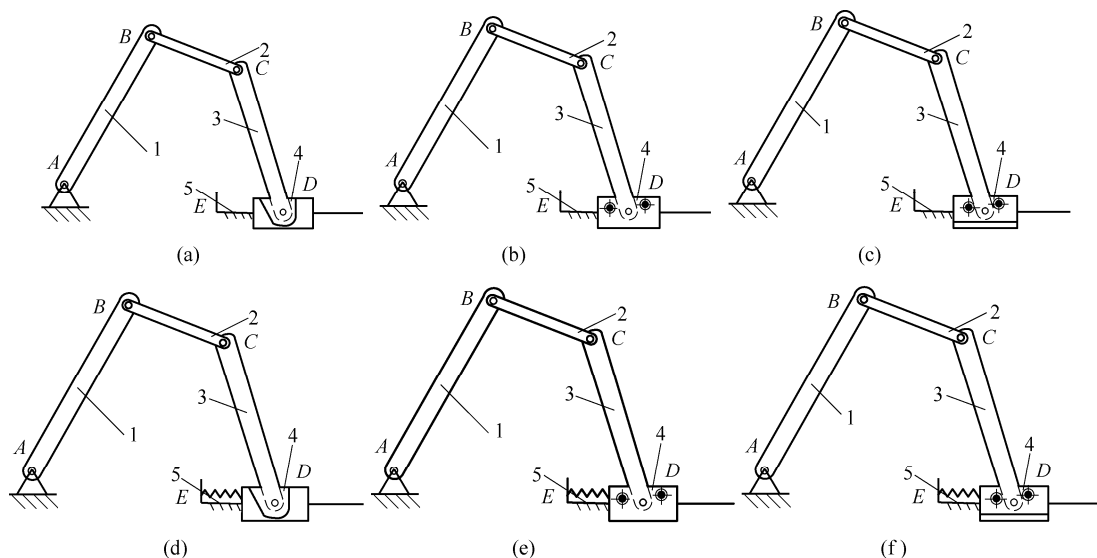


图9 具有 RP 变胞运动副 6 种约束形式的变胞机构

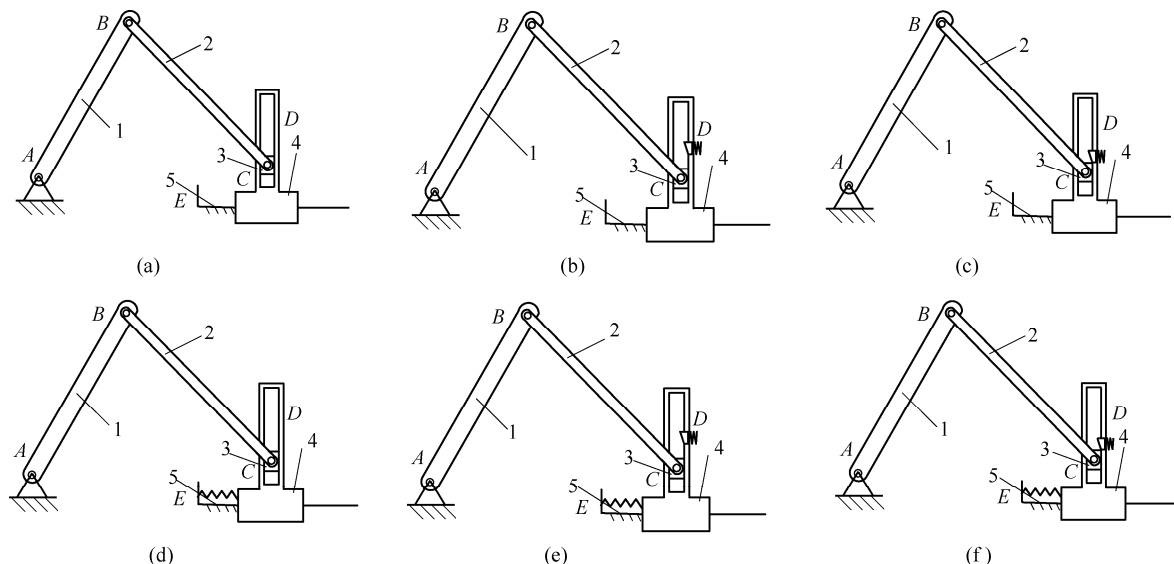


图 10 具有 PP 变胞运动副 6 种约束形式的变胞机构

5.4 绝缘子检测变胞爬行机构的设计

根据作业要求和考虑构态变换的可靠性, 选择约束形式最简单、运动可靠的图 9d 或图 10d 机构作为绝缘子检测变胞爬行机构如图 11 所示。其中图 11a 为由 R/P 变胞运动副获取的变胞机构, 其中图 11b 为由 P/P 变胞运动副获取的变胞机构。

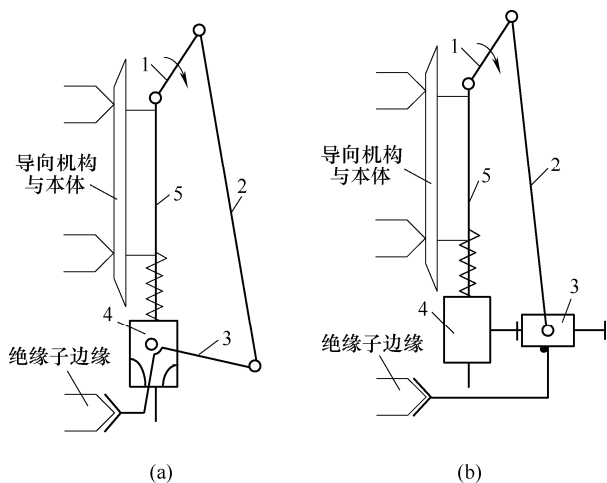


图 11 获取的 2 种绝缘子检测变胞爬行机构

通常检测机器人由 3 组爬行机构对称环绕布置于绝缘子串形成封闭的本体。以图 11 a 为例说明绝缘子检测爬行变胞机构的工作原理。其工作过程如下。

(1) 主动件 1 顺时针转动, 通过连杆 2 带动摆杆 3 摆动到左边极限位置(4 构件在弹簧力约束下不动), 3 构件与 4 构件合并为一个构件。此时装在 3 上的爬行爪刚好切入到绝缘子边缘与其贴合, 3 构件停止运动。

(2) 1 继续顺时针转动, 由于 3 构件与 4 构件不动, 从而带动 5 构件(机器人本体)在导向机构的约束下, 沿着绝缘子串向爬行上升到一个绝缘子间距,

锁紧装置将机器人本体锁死在绝缘子串上;

(3) 1 构件逆时针转动, 3 构件逆时针转动带动爬行爪抬起, 3 达到右极限位置时与 4 合并为一个构件。1 继续逆时针转动带动 4 构件上升一个绝缘子间距, 完成一个运动循环。

应该说明的是, 由于爬行爪可以实现接近平动(图 11b 机构可以实现完全平动)的切入与退出绝缘子边缘, 与绝缘子表面无啮合摩擦, 不损伤绝缘子表面涂层。同时, 由于爬行爪切入时与绝缘子边缘相当于锥型对接, 对绝缘子串的误差容错性好, 可克服现有转动啮合式爬行机构容错性差运行时出现的卡死现象。

6 结论

(1) 通过研究作业任务(子任务)与变胞构态、输出运动形式及其变胞运动副约束状态的映射关系, 将作业任务与约束变胞机构的构型综合关联在一起。给出一种基于任务的变胞机构的输出运动与约束组合循环图, 建立了变胞理论与实用变胞机构设计间的桥梁。

(2) 通过归纳扩展 Assur 杆组的运动副类型、邻接关系和可能的输出运动形式, 更直接地建立了作业任务与对应可行变胞杆组的联系, 缩小了变胞源机构综合和选型的范围。

(3) 通过比照变胞源机构的输出运动与约束组合循环图和约束变胞运动副的等效阻力线图, 建立了构态变换与变胞副约束力变化的联系。通过归纳变胞运动副的约束形式、约束力性态和对应结构并与变胞机构等效阻力变化曲线对比, 给出了一种可反求出变胞运动副的约束形式和结构

构型综合方法。

(4) 以绝缘子检测机器人变胞机构的设计为例, 演示和验证了提出的设计理论和设计方法的可行性和实用性。需要说明的是, 本论文主要给出了 2 自由度约束变胞机构的构型综合和应用设计, 多自由度变胞机构的分析与设计可在此基础上拓展获取。

参 考 文 献

- [1] DAI J S, REES J J. Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds[J]. Transactions of the ASME: Journal of Mechanical Design, 1999, 121(3): 375-382.
- [2] PARISEJ J, HOWELL L, MAGLEBYS P. Ortho-planar mechanisms[C]// Proc. 26th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, 2000, Baltimore.
- [3] 李端玲, 戴建生, 张启先, 等. 基于构态变换的变胞机构综合[J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 2-16.
LI Duangling, DAI Jiansheng, ZHANG Qixian, et al. Structure synthesis of metamorphic mechanisms based on the configuration transformations[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 2-16.
- [4] LIU C H, YANG T L. Essence and characteristics of metamorphic mechanisms and their metamorphic ways[C]// Proc. 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjing, 2004, China: Mechanical Engineering Press, 2004: 1285-1288.
- [5] 王德伦, 戴建生. 变胞机构及其综合的理论基础[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 32-42.
WANG Delun, DAI Jiangsheng. Theoretical foundation of metamorphic mechanisms and its synthesis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 32-42.
- [6] DING X L, YANG Y. Investigation of reconfiguration theory based on an assembly-circlesartifact[C]// ASME/IFTToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, June 22-24, 2009, London, United Kingdom: 456-463.
- [7] ZHANG L P, DAI J S. Metamorphic techniques and geometric reconfiguration principles[C]// ASME/IFTToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, June 22-24, 2009, London, United Kingdom: 32-40.
- [8] 李树军, 戴建生. 基于扩展 Assur 杆组的变胞机构组成原理[J]. 机械工程学报, 2009, 46(10): 19-28.
LI Shujun, DAI Jiangsheng. On the structure of metamorphic mechanisms based on augmented assur groups[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 46(10): 19-28.
- [9] GAN D M, DAI J S, LIAO Q Z. Mobility change in two types of metamorphic parallel mechanisms[J]. Transactions of the ASME: Journal of Mechanisms and Robotics, 2009, 1(4): 041007_1-9.
- [10] LI S J, DAI J S. Structure synthesis of single-driven metamorphic mechanisms based on the augmented Assur groups[J]. Transactions of ASME, Journal of Mechanisms and Robotics, 2012, 4(3): 031004-1-8.
- [11] LAN Z H. Structure and evolution of planar metamorphic mechanisms[C]// CCMMS 2010, Shanghai, China: 104-106.
- [12] ZANG K, DAI J S, FANG Y. Topology and constraint analysis of phase change in the metamorphic chain and its evolved mechanism[J]. Transactions of the ASME: Journal of Mechanical Design, 2010, 132(12): 121001_1-11.
- [13] GAN D M, DAI J S, LIAO Q Z. Constraint analysis on mobility change of a novel metamorphic parallel mechanism[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(12): 1864-1876.
- [14] ZHANG W X, DING X L, DAI J S. Morphological synthesis of metamorphic mechanisms based on constraint variation[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(12): 2297-2310.
- [15] LI S J, WANG H G, YANG Q. Constraint force analysis of metamorphic joints based on the augmented assur groups[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(4): 747-755.
- [16] LI S J, WANG H G, DAI J S. Assur-group inferred structural synthesis for planar mechanisms[J]. Transactions of ASME, Journal of Mechanisms and Robotics, 2015, 7(4): 041001.
- [17] AIMEDEE F, GOGU G, DAI J S, et al. Systematization of morphing in reconfigurable mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 96(part 2): 215-224.
- [18] LI S J, DAI J S. Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robotics I [M]. Springer, 2012.
- [19] 杨强, 王洪光, 李树军, 等. 含变胞运动副结构的约束变胞机构构型综合[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 1-8.
YANG Qiang, WANG Hongguang, LI Shujun, et al. Type synthesis of constrained metamorphic mechanisms with structural forms of the metamorphic joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13): 1-8.

作者简介：李树军，男，1955 年出生，教授。主要研究方向为机构学、机械设计与理论、机器人机构学。
E-mail: shjunli@mail.neu.edu.cn
王洪光，男，1965 年出生，研究员。主要研究方向为机器人机构的分析

与综合，串联和并联操作手动力学，模块化可重构机器人和自治移动机器人。

E-mail: hgwang@sia.cn

李小彭(通信作者)，男，1976 年出生，教授，博士研究生导师。主要研究方向为机械动力学、振动摩擦耦合动力学。

E-mail: xpli@me.neu.edu.cn



第 7 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

基于偏心轮受迫振动的压电马达研究

作者：潘巧生

毕业学校：中国科学技术大学

指导教师：冯志华

压电马达是当前新型驱动器的研究热点，它在工业控制系统，汽车专用电器，办公自动化设备以及智能机器人等领域都有着十分广阔的应用前景。然而现有的压电马达主要依靠压电定子振动，通过摩擦传动驱动转子旋转或者直线运动，一般运动速度较低，还存在磨损严重，输出功率小，效率低等一系列问题。为了从根本上解决这些问题，探索新型原理的压电马达，彻底摆脱其对摩擦力的依赖，论文首次提出一种新型原理的压电马达：基于偏心轮受迫振动的压电马达，并完成了对其从理论分析、设计制造到实验研究和应用探讨的一系列工作。论文主要成果和创新点如下：

首次提出了基于偏心轮受迫振动的压电马达。针对现有的压电马达存在的问题，为了使得压电马达在速度、功率和效率等方面都有所提高，从发明不依赖于摩擦力驱动的新型原理压电马达的角度思考，提出一种新型基于偏心轮受迫振动的压电马达。该压电马达使用轴承实现定子与转子之间的几何连接，利用压电叠堆强迫振动的方式将压电振动能量馈入转子并实现非摩擦驱动。为了使得压电叠堆的功率有效馈入偏心轮转子中，在设计中对偏心轮的不平衡量与压电换能器输出特性进行了合理的匹配，在实验中，对压电叠堆的驱动电压相位进行了优化。该新型压电马达的提出为压电马达特别是高速压电马达的研究和发展提供了新的思路。

建立了基于偏心轮受迫振动的压电马达力学模型。根据运动的微分方程，分析计算转子质心和形心轨迹以及偏心轮转子在受迫振动中馈入的能量。根据馈入能量大小的求导运算，获得了压电叠堆驱动电压理论最佳初始相位 $\omega_0=\pi/2$ ，在该最佳初始相位的电压驱动下，对轴承进行了受力分析，给出了该新型压电马达的微观工作机理，为该压电马达的实验提供了理论依据。

设计和制作了所提出的基于偏心轮受迫振动的压电马达装置。探索了压电叠堆制作工艺，压电叠堆由 26 层厚度为 0.7 mm 的压电陶瓷片堆积而成，通过打磨，割缝，引线，极化以及表面绝缘处理等八个步骤的处理，获得了经济实用的压电叠堆。利用 ANSYS 有限元分析软件设计与之匹配的位移放大机构，其位移放大比为 4.62 倍，静态下输出位移可达 160 μm 。根据预期寿命，选择了 6001 氮化硅轴承作为实验轴承，将压电叠堆、位移放大机构以及轴承通过带有直角铰链的轴承座进行连接和装配形成了马达的定子。首次利用偏心轮作为压电马达的转子，并根据定子输出特性匹配设计了偏心轮转子的不平衡量。根据偏心轮转子工作状况对其进行了强度校核，提高了设计的可靠性。理论分析了六种不同偏心轮转子的工作速度范围，为实验研究提供了理论数据。最后选择和设计了马达的辅助装置，包括内耗较低的直流电磁电机及其支架，L 形底座，霍尔传感器及其支架。通过对定子，转子及辅助装置进行合理装配，搭建了一整套压电马达的机电系统。

实验研究了所制作的基于偏心轮受迫振动的压电马达输出性能。首先给出了马达的实验启动方案，获得了驱动电压实验最佳初始相位为 $\omega_0=\pi/2$ ，与理论分析结果一致。然后以偏心不平衡量较大的 6#偏心轮为转子，对马达的输出特性进行了测试研究，获得了马达的空载输出速度特性，在压电叠堆的工作频率仅为 152 Hz 下，马达的输出速度高达 9120 rpm，是目前存在的高速压电马达之一。同时，测试了该频率下压电马达的输出功率为 8.45 W，平均效率为 25.3%，实验结果表明该新型压电马达综合性能得到了提高。最后，测试了另外五种偏心轮转子的工作频率范围，实验结果显示，随着偏心轮转子不平衡量($m\cdot r$)的降低，马达的启动频率和截止频率都逐渐增加，实验结果与理论计算一致。对于偏心轮最小的 1#偏心轮而言，实验测试获得速度高达 15000 rpm，这是目前文献可见的压电马达最高速度。该压电马达原理新颖，结构简单，具有很大的发展潜力。

探讨了该新型基于偏心轮受迫振动的压电马达未来的应用前景。首次提出了压电飞轮储能概念，提出利用压电陶瓷的逆压电效应实现能量馈入转子，利用压电陶瓷的正压电效应实现飞轮动能向电能的转化，从而实现能量储存和利用的功能，压电飞轮储能理论上可达到相比于电磁飞轮储能更高的速度，因此可提高飞轮储能容量。除此之外，该新型压电马达技术还可应用于离心分离，宽频激振以及压电泵中的应用等等。