文章编号: 1000-8608(2007)03-0372-06

混联机械系统组合方式广义特征状态方程

张利萍, 王德伦*

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 提出了混联机械系统组合方式分析的新的广义特征状态方法. 定义了多个机构单元的串、并混联等组合方式及其典型组合单元的数学模型, 并以基本组合方式为基础, 建立其对应的广义特征状态模型(集), 提取了不同组合关系下的广义特征状态方程, 从而建立起组合方式数学表达式. 讨论了不同组合变化对应广义特征状态方程的计算方法及其变化规律, 分析了组合关系的重组计算及功能传递方式, 采用分层特征模式并结合定性数学知识建模, 实现了把复杂机械系统的组合方式问题转化为广义运动特征矢量间的组合计算问题, 继而构建组合系统运动变换的广义特征状态组合模型来传递输入输出特征, 为其运动方案综合的选型及分解计算提供了参考模板, 为混联机械系统的分析及特征建模提供了一种有效方法.

关键词: 概念设计; 混联系统; 组合方式; 广义特征状态方程

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A

0 引 言

生产中对机构运动要求多种多样, 而单个基本机构由于其结构上的限制, 难以实现复杂的运动轨迹或获得特殊的运动规律. 为此, 人们尝试将基本机构进行适当组合, 使其既能发挥特长, 又能避免本身固有的局限性, 从而形成性能优良的机械系统. 但组合方式本身的复杂性、组合关系的多样性及其间耦合结构的不透明性, 给组合方式的分析计算和组合特征传递分析等研究工作带来一定的困难.

在(机构)组合理论的研究方面, 文献[1-2]研究了单自由度机构单元串联组合的运动方案求解问题, 组合系统只有一种单输入单输出形式. 吕庸厚[3]针对某些特定机构组合系统如齿轮-连杆组合机构、凸轮-连杆机构等具体实例进行了相关运动分析和设计计算. 邹慧君[4]针对组合机构的类型和组合机构的功能特点进行了分析. Yan[5]通过树图图谱来表达加工中心运动的拓扑特性. Han[6]根据不同机构串联组合构建其构型空间中多种构型形式和数学表达方式. 现有的机械系统的组合分析, 只限于单输入单输出系统, 机构之间的联接方式限于串联, 对于多输入多输出的并联、混联方式系统的分析与综合, 尤其是组合方式的数学建模问题, 还未见文献涉及.

文献[7]初步解决了单自由度机构串联组合运动方案设计问题. 文献[8]提出混联机械系统的运动方案设计状态空间方法并探讨了空间的性质. 本文在组合元素即基本机构分析基础上, 从分解混联方式入手, 针对不同组合方式将组合系统归为串联式、并联式及其混合方式组合问题, 再建立每种组合方式对应的广义特征状态模型(集), 讨论参与组合单元的不同形式对组合关系的影响, 分析其广义特征状态变换关系, 建立广义特征状态方程, 从而从总体上针对各种变化形式归类简化, 找到统一的解决办法和相对一致的数学建模方法, 探讨出混联系统组合方式分析的新思路.

1 基本机构及其特征状态方程

作为机械系统组合和特征分析的基本单元, 基本机构是组成类型及功能变换等运动分析的基础. 可分为由单开、闭环运动链形成的单[7]、多自由度基本机构, 及由若干单闭链、单开链相对同一

收稿日期: 2006-05-10; 修回日期: 2007-03-20.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475154).
作者简介: 张利萍(1974-), 女, 博士生; 王德伦*(1958-), 男, 教授, 博士生导师.
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

机架组合形成具有确定运动的多闭环机构 3种类型,均通过建立相应的功能特征状态空间方法建模分析.

基本机构都具有特定的运动变换功能,根据输入输出端的相对运动规律,动作功能包括运动类型、运动方向性变换、单向/往复性、连续/间歇性、速比变化特征如线性和非线性等,这些特征是基本机构运动功能变换数学建模不可缺少的内容.

将基本机构单元输入输出端功能信息表达为 x、y 和 z 轴方向上的 6维输入输出特征状态矢量 $\boldsymbol{r}_i$ 和 $\boldsymbol{r}_o$, $\boldsymbol{r}_i = (R_{ix}\quad R_{iy}\quad R_{iz}\quad T_{ix}\quad T_{iy}\quad T_{iz})^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{r}_o = (R_{ox}\quad R_{oy}\quad R_{oz}\quad T_{ox}\quad T_{oy}\quad T_{oz})^{\mathrm{T}}$,分量中的 R 和 T 分别表示转动与移动的运动类型,特征矢量各分量值表示运动变换特征(σ、v、k、W及其组合).

根据不同类型基本机构的运动方程分析,提取其内部特征转换关系并抽象为数学表达形式,建立基本机构运动传递的具体特征状态方程,对基本机构的不同输入输出情况讨论,常见形式见表 1. 其中单输入单输出(SISO)方程为

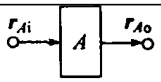
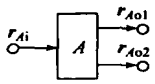
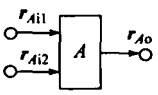
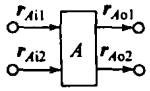
$$\boldsymbol{r}_{Ao} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_{Ai} \tag{1}$$

两输入单输出多自由度机构特征状态方程形式为

$$\boldsymbol{r}_{Ao} = \boldsymbol{A}_1\boldsymbol{r}_{Ai1} + \boldsymbol{A}_2\boldsymbol{r}_{Ai2} \tag{2}$$

表 1　基本机构单元特征状态方程

Tab. 1　The characteristic state equations of basic mechanism units

基本机构单元 广义特征状态模型		基本机构单元 广义特征状态方程
SISO		$\boldsymbol{r}_{Ao} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_{Ai}$
SIMO		$\begin{pmatrix}\boldsymbol{r}_{Ao1}\\ \boldsymbol{r}_{Ao2}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\boldsymbol{A}_1\\ \boldsymbol{A}_2\end{pmatrix}\boldsymbol{r}_{Ai}$
MISO		$\boldsymbol{r}_{Ao} = (\boldsymbol{A}_1\quad \boldsymbol{A}_2)\begin{pmatrix}\boldsymbol{r}_{Ai1}\\ \boldsymbol{r}_{Ai2}\end{pmatrix}$
MIMO		$\begin{pmatrix}\boldsymbol{r}_{Ao1}\\ \boldsymbol{r}_{Ao2}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}A_{11} & A_{12}\\ A_{21} & A_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{r}_{Ai1}\\ \boldsymbol{r}_{Ai2}\end{pmatrix}$

可见,不同输入输出的基本机构单元都具有特定的输入输出特征矢量、特征状态变换矩阵和特征状态方程,但实现一种运动变换功能并不仅有一个基本机构,这也正是机械运动方案设计多样性的体现. 因此上述定义需推广到多个基本机构的组合,其组合、组合表达以及性质还需要讨论.

2　组合方式及其广义特征状态方程

从基本机构分析可知,功能特征信息由输入输出特征状态矢量及特征状态变换矩阵体现,特征状态方程决定了矢量之间的关系. 因此,输入输出特征矢量与特征状态方程可扩展到组合方式的分析与计算中.

2.1　特征状态模型

为直观表示要研究的机构组合形式,并为定性地研究不同形式的传递性态提供方便,抽象出能够反映基本机构间广义特征矢量状态跃迁关系的特征状态模型,以便简单、清晰地表达模型内部运动传递和组合特征逻辑关系. 抽象出体现系统传动形式且有代表意义的基本组合通用单元,并对应单元有: 抽象输入、输出运动功能变换特征并定性描述为矢量形式称为广义特征状态矢量(如 $\boldsymbol{r}_i$, $\boldsymbol{r}_o$); 通过对应组合方式中基本机构间运动传递方式建立广义特征矢量间运算关系即广义特征状态方程.

不同机构组合方式对应不同的广义特征状态模型(集). 代表机构自身特性的特征状态变换矩阵定性用运动传递基本单元的方框图表示,即模型中方框代表着一个基本机构,方框之间是有向的连线,代表着广义运动特征及传递关系的广义特征状态矢量,如表 2中(1)图. 广义特征状态模型具有独立功能和互换性,所以可单独拿出来讨论其性质. 这里应用广义特征状态模型能够定性描述组合关系之间的状态变化.

复杂的组合系统均可以分割成能够表示相对稳定传动关系的广义特征状态模型; 反之,模型的不同组合,不仅满足功能要求多样化,还为创新设计提供参考方案. 因此,本文对多变的组合方式归类分析,并讨论体现组合关系的基本形式. 尽管形式复杂多样,归纳起来一般可分为串联和并联基本组合方式. 现仅以每种组合方式的典型特征状态模型的广义特征状态方程的推导为例进行分析.

2.2　串联组合方式

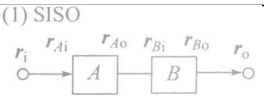
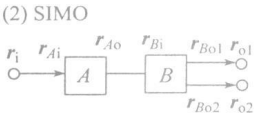
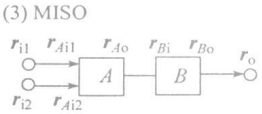
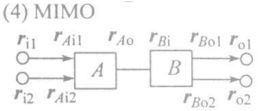
串联组合方式的特点为前一个基本机构的输出构件是后一个单自由度基本机构的原动件,体现为顺序结构,系统内部单元间无其他横向联系

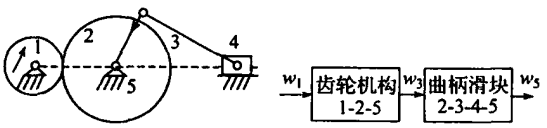
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(图 1).

表 2 串联组合方式广义特征状态方程(部分)

Tab. 2 The generalized characteristic state equations of series combined patterns (partial)

串联组合方式 广义特征状态模型	串联组合方式 广义特征状态方程
(1) SISO 	$\boldsymbol{r}_o = \boldsymbol{B}\boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_i$
(2) SIMO 	$\begin{pmatrix} \boldsymbol{r}_{o1} \\ \boldsymbol{r}_{o2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{B}_1 \\ \boldsymbol{B}_2 \end{pmatrix} \boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_i$
(3) MISO 	$\boldsymbol{r}_o = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{A}_1 \quad \boldsymbol{A}_2)\begin{pmatrix} \boldsymbol{r}_{i1} \\ \boldsymbol{r}_{i2} \end{pmatrix}$
(4) MIMO 	$\begin{pmatrix} \boldsymbol{r}_{o1} \\ \boldsymbol{r}_{o2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{B}_1 \\ \boldsymbol{B}_2 \end{pmatrix} (\boldsymbol{A}_1 \quad \boldsymbol{A}_2)\begin{pmatrix} \boldsymbol{r}_{i1} \\ \boldsymbol{r}_{i2} \end{pmatrix}$
……	……



(a) 齿轮 –曲柄滑块串联机构 (b) 运动传递关系框图

图 1 串联组合方式机构实例

Fig. 1 Illustration for series combined mechanism

其广义特征状态模型为表 2中 SISO型,广义特征状态模型的输入、输出广义特征矢量为 $\boldsymbol{r}_i$、$\boldsymbol{r}_o$,对应机构单元广义特征状态矩阵 $\boldsymbol{A}$和 $\boldsymbol{B}$,由图示,$\boldsymbol{r}_{Ao} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_i$; $\boldsymbol{r}_o = \boldsymbol{B}\boldsymbol{r}_{Bi}$; $\boldsymbol{r}_{Bi} = \boldsymbol{r}_{Ao}$,因此广义特征状态方程写为 $\boldsymbol{r}_o = \boldsymbol{B}\boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_i$. 扩展不同输入输出机构组合形式,见表 2.

2.3 并联组合方式

并联组合方式一般由两个或者多个单、多自由度基本机构并行传递运动. 系统内部需同时完成多个功能后再执行下一个分功能(如图 2).

(1) 并联 I型(分支型)如表 3中(1),模型的输入广义特征矢量 $\boldsymbol{r}_i$、输出 $\boldsymbol{r}_o$,对应机构单元广义特征状态矩阵 $\boldsymbol{A}$和 $\boldsymbol{B}$,有 $\boldsymbol{r}_{o1} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_i$; $\boldsymbol{r}_{o2} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{r}_i$.

可见,由输出两分支逆推,最后合并为一个输入. 推导结果是输出的特征向量等于两分支输出特征向量矢量和,即两单输入特征向量与相应机构特征状态矩阵的乘积之和.

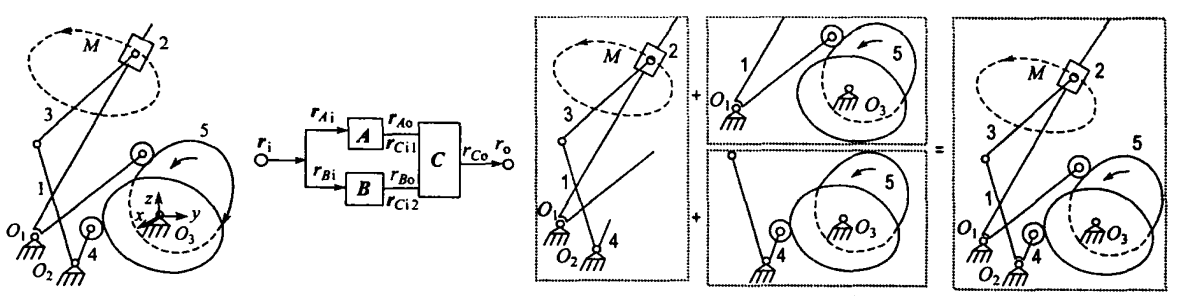
上述分析同样适用扩展后的多支路并联形式(即并联支路≥ 2).

可见,与串联特征状态矩阵运算关系不同,并联系统则体现为具有并联关系的基本机构变换矩阵的加和计算.

(2) 并联 II型(合并型)如表 3中(2),这种特征模型的输入广义特征矢量 $\boldsymbol{r}_{i1}$和 $\boldsymbol{r}_{i2}$、输出 $\boldsymbol{r}_o$,对应机构单元广义特征状态矩阵 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$和 $\boldsymbol{C}$,由表中图示,$\boldsymbol{r}_{o1} = \boldsymbol{C}_1\boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_{i1}$,$\boldsymbol{r}_{o2} = \boldsymbol{C}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{r}_{i2}$,因此广义特征状态方程为 $\boldsymbol{r}_o = \boldsymbol{r}_{o1} + \boldsymbol{r}_{o2} = \boldsymbol{C}_1\boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_{i1} + \boldsymbol{C}_2\boldsymbol{B}\boldsymbol{r}_{i2}$.

由此,多自由度基本机构能实现多输入运动合并,实质是将多自由度基本机构包含的多个状态矩阵分别参与计算,即 $\boldsymbol{C}_1$与 $\boldsymbol{C}_2$拆分后,再与其他机构单元参与组合计算.

可见,上面的组合方式的分析中,随着基本机构数目及输入输出的不同,同一种组合方式可以扩展出很多具体形式,体现组合的多样性. 将常用并联组合方式形式归类于表 3.



(a) 并联机构简图 (b) 运动传递关系框图 (c) 并联式机构实例组合过程

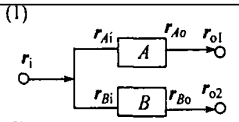
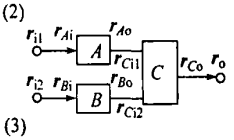
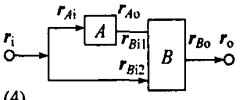
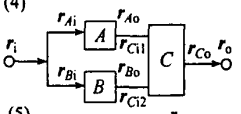
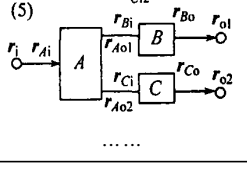
图 2 并联组合方式机构实例

Fig. 2 Illustration for parallel combined mechanism

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　混联组合方式广义特征状态方程 (部分)

Tab. 3　The generalized characteristic state equations of hybrid combined patterns (partial)

串并混联组合方式广义特征状态模型	串并混联组合方式广义特征状态方程
(1) 	$\begin{pmatrix} r_{o1} \\ r_{o2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} r_i$
(2) 	$r_o = (C_1A \quad C_2B)\begin{pmatrix} r_{i1} \\ r_{i2} \end{pmatrix}$
(3) 	$r_o = (B_1A + B_2)r_i$
(4) 	$r_o = (C_1A + C_2B)r_i$
(5) 	$\begin{pmatrix} r_{o1} \\ r_{o2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} BA_1 \\ CA_2 \end{pmatrix} r_i$
……	……

3　广义特征状态方程计算

3.1　方程组合运算

基本组合方式之间的再组合形式多样,组合数目也是相对的,因具体环境、状态条件而定. 如图 3复杂的机械系统可以简化为代表不同组合方式的组合单元间的串、并联组合模型,依据组合单元的标准的广义特征状态方程间的计算,得到系统的输入输出运动传递关系.

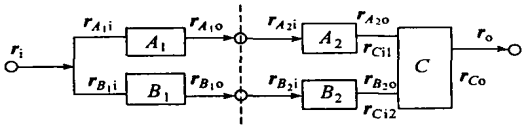


图 3　模型混联组合

Fig. 3　Hybrid combination model

已知模型输入 r_i 输出 r_o,并由前面推导组合模型单元的分析有: $r_{A_1o} = A_1 r_{A_1i}$ 且 $r_{B_1o} = B_1 r_{B_1i}$; $r_{Co} = C_1A_2r_{A_2i} + C_2B_2r_{B_2i}$. 由组合关系确定矢量方程 $r_{A_1o} = r_{A_2i}$; $r_{B_1o} = r_{B_2i}$; $r_{A_1i} = r_{B_1i} = r_i$,再将上述标准广义特征状态方程依次相乘展开为

$$r_o = (C_1A_2A_1 + C_2B_2B_1)r_i \tag{3}$$

可见复杂系统可以转换为模型单元间的广义特征状态方程的计算;结果任一输出特征向量 r_o 等于由该输出端遍历所有可能路径到输出端的线性组合. 其中每一条支路均可视为一串联路径,同串联性质分析,体现为广义特征状态变换矩阵间乘积形式;平行路径之间为并联分路,体现为广义特征状态变换矩阵和的形式. 上面结论满足任意基本机构组成的混联运动系统.

3.2　广义特征状态方程分解

混联系统组合运算分析,包括由组合方式及其组合单元的广义特征状态方程形式来确定系统特征状态方程的分解形式、分解条件及特征计算规则等.

广义特征状态方程的运算,实际上对应的是相同或者不同组合单元间的连接与匹配. 由前面推导可知,组合关系与特征状态矩阵运算的对应关系: 串联关系时为矩阵相乘;并联关系时则为矩阵相加. 相应矩阵中的元素遵循逻辑"与"及逻辑"或"计算准则:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{q} A_{ik}^{(1)} \otimes A_{kj}^{(2)};\quad A_{ij} = A_{ij}^{(1)} \oplus A_{ij}^{(2)} \tag{4}$$

其中关于逻辑与⊗ 及逻辑或⊕ 的计算规律为

$1 \otimes 0 = 0, 0 \otimes 1 = 0, 0 \otimes 0 = 0, 1 \otimes 1 = 1;$

$1 \oplus 0 = 1, 0 \oplus 1 = 1, 1 \oplus 1 = 1, 0 \oplus 0 = 0$

矩阵的分解问题实质是组合方式分析的逆问题. 由广义特征状态方程确定矩阵分解计算顺序是由外而内分,即先⊕ 后⊗ ,分析时顺序则相反.

特征状态方程与可能的特征状态模型 (组合单元) 是一对多关系,说明系统要求 (特征状态方程) 可以通过多种组合方式分别实现,体现针对不同组合关系分析的必要性. 另外,系统组合方式和参与组合的基本机构输入输出矢量决定广义特征状态矢量个数和特征状态方程形式.

3.3　广义特征计算

组合特征是指基于组合方式的特征变换规律. 抽象状态分析基础上的组合特征有多层表达模式,如广义与狭义等. 为表达组合模型体现的组合关系及组合功能,进行广义特征分析:

当单元组合关系为串时,上一个输出矢量的特征被传递给下一个输入矢量,系统特征为两个串接单元特征的逻辑与关系,有

$$F_s = F_2 \otimes F_1 \tag{5}$$

当组合关系为并时,第一种情况: 分支. 此时一个混合特征被分配成两个或者多个特征 (或者混合特征),由于构件间的固接关系,运动特征被毫无保留地传递给下一个输入矢量,有

$$F_s = F_2 = F_1 \tag{6}$$

另一种情况: 汇合. 两个或者多个特征汇合成一个混合特征,输出运动为多汇合运动的合成,

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

特征的合成关系遵循逻辑或的原则,有

$$F_s = F_2 \oplus F_1 \tag{7}$$

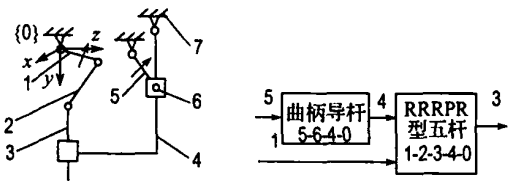
上述串、并联关系,可以发生在不同组合模型的输入输出矢量之间,也可在不同基本机构的输入与输出分量之间.

特征计算顺序是由内而外,即先⊗ 后⊕. 依据不同组合模型,有相应的特征运算关系,不是特征的单纯组合,还会出现特征的取舍及其他变异情况.

4 基本组合实例分析

由具体的机构组合系统,分析其组合方式,利用所属组合单元的广义特征状态方程,依据矩阵及特征运算的规则,并针对具体机构单元实例,代入方程中计算出组合系统的输入输出间运动功能转换情况.

以 LH-1182型缝纫机针杆传动机构(两自由度)为例分析图 4(a),曲柄 1和 5驱动针杆 3作平面运动,即上下往复刺料运动及摆动送料运动.



(a) 五杆-曲柄摇杆组合机构 (b) 运动传递关系框图

图 4 基本组合机构实例

Fig. 4 Illustration for basic combined mechanism

分析组合方式,其广义特征模型见图 5.

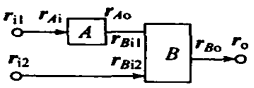


图 5 广义特征模型

Fig. 5 Generalized characteristic state model

其广义特征状态方程为

$$\boldsymbol{r}_o = (\boldsymbol{B}_1 \quad \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{A})\begin{pmatrix}\boldsymbol{r}_{i1}\\ \boldsymbol{r}_{i2}\end{pmatrix} = \boldsymbol{A}_s\begin{pmatrix}\boldsymbol{r}_{i1}\\ \boldsymbol{r}_{i2}\end{pmatrix} \tag{8}$$

式中 A为曲柄导杆机构,B为 2自由度 RRRPR型五杆机构,建立如图 5所示的系统参考坐标系 $\{0\}$,机构单元坐标系 $\{A\}\{B\}$与其重合.

(1) 写出系统特征状态矩阵 $\boldsymbol{A}_s$

由系统输入输出功能特征提取,输入运动特征矢量 $\boldsymbol{r}_{i1} = (\boldsymbol{w}_x \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$; $\boldsymbol{r}_{i2} = (\boldsymbol{w}_x \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$; 输出 $\boldsymbol{r}_o = (\boldsymbol{w}_x \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \boldsymbol{v}_y \quad \boldsymbol{v}_z)^T$. 确定系统特征状态矩阵 $\boldsymbol{A}_s$:

$$\begin{pmatrix} kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{9}$$

(2) 基本机构单元特征状态方程[9]

① 2自由度 RRRPR型的曲柄导杆机构

B机构的构件 1和 2为主动件,构件 3输出,此时的特征状态方程为 $\boldsymbol{r}_{oB} = \boldsymbol{B}_1\boldsymbol{r}_{iB_1} + \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{r}_{iB_2}$

$$\begin{pmatrix} w_x^{(3)}\\ 0\\ 0\\ 0\\ v_y^{(3)}\\ v_z^{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} w_x^{(1)}\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} w_x^{(4)}\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0 \end{pmatrix} \tag{10}$$

② 转动导杆机构 A中的输入构件为 5,输出构件为 4,有 $\boldsymbol{r}_{oA} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{r}_{iA}$

$$\begin{pmatrix} w_x^{(4)}\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} kvnr & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} w_x^{(5)}\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0 \end{pmatrix} \tag{11}$$

(3) 广义特征状态方程具体化

由组合关系矢量方程 $\boldsymbol{r}_{iB_2} = \boldsymbol{r}_{oA}$; $\boldsymbol{r}_{iA} = \boldsymbol{r}_{i2}$; $\boldsymbol{r}_{iB_1} = \boldsymbol{r}_{i1}$; $\boldsymbol{r}_{oB} = \boldsymbol{r}_o$有 $\boldsymbol{A}_s = (\boldsymbol{B}_1 \quad \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{A})$,代入具体矩阵,并结合特征与矩阵运算规则得到计算结果.

(4) 验证分析结果

$\boldsymbol{A}_s$与系统功能要求实现的运动特征状态矩阵形式一致,可见具体机构的组合关系分析与模型的广义状态方程的分析结果相一致.

可见,系统矩阵 $\boldsymbol{A}_s = (\boldsymbol{A}_{s1} \quad \boldsymbol{A}_{s2})$,根据特征模型的状态方程公式,以相对串联的方式(逻辑与)分解 $\boldsymbol{A}_{s1}$或者 $\boldsymbol{A}_{s2}$,矩阵的分解结果可能为 $(\boldsymbol{B}_1 \quad \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{A})$或者 $(\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{A} \quad \boldsymbol{B}_2)$,再对应基元模型的基元连接关系,$\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{A}$或者 $\boldsymbol{B}_2\boldsymbol{A}$中的后者 $\boldsymbol{A}$,对应单自

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由度基本机构 ,***B*** 为多自由度基本机构 ,对应不同的基本机构来实现 ,可从中选出合适的组合设计方案.

以上的实例验证了利用组合方式数学模型 ,即广义特征状态方程方法的正确性. 反过来 ,设计综合选型过程中 ,在满足系统输入输出数目要求前提下 ,预先选择合理的代表组合方式的特定组合单元结构形式 ,通过对应组合单元的广义特征状态方程及单元组合时的方程间运算关系 ,得到内部机构单元的运动传递关系 ,并由系统具体的输入输出运动功能要求 ,通过代表的相应基本机构单元数据知识库中选型设计 ,可获得对应该组合方式的可行机构组合方案解集.

5　结　论

(1) 提出利用广义特征状态组合模型来抽取输入输出特征属性 ,表达基本机构功能特征及其组合拓扑关系的方法 ,为复杂系统功能分析提供一种新途径.

(2) 建立组合方式的广义特征状态方程 ,尤其是以往未见分析的并联式数学模型 ,奠定了混联机械系统概念设计自动解算的重要基础.

(3) 广义运动特征矢量间的组合计算对应基本机构间不同组合形式 ,矢量的特征值计算是组合特征分析的依据.

参考文献:

[1] CHIOU Shean-Juinn, KOTA Sridhar. Automated conceptual design of mechanisms [J]. **Mech and Mach Theory**, 1999, **34**(3): 467-495

[2] MOON Yong-mo, KOTA Sridhar. Automated synthesis of mechanism using dual-vector algebra [J]. **Mech and Mach Theory**, 2002, **37**: 143-166

[3] 吕庸厚. 组合机构设计 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996

[4] 邹慧君. 机械运动方案设计手册 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1994

[5] YAN H S. A methodology for creative mechanism design [J]. **Mech and Mach Theory**, 1992, **27**(3): 235-242

[6] HAN Young-hyun. Using sign algebra for qualitative spatial reasoning about the configuration of mechanisms [J]. **Computer-Aided Des**, 2002, **34**(11): 835-848

[7] 王德伦, 张德珍, 马雅丽. 机械运动方案设计的状态空间方法 [J]. 机械工程学报, 2003, **39**(3): 548-553

[8] 张利萍, 王德伦. 混联机械系统方案设计特征状态空间理论方法 [J]. 机械工程学报, 2006, **42**(12): 26-35

[9] 张利萍, 王德伦. 二自由度基本机构特征状态方程及其应用 [J]. 中国机械工程, 2007, **18**(2): 130-135

Generalized characteristic state equations for combination patterns of hybrid mechanism system

ZHANG Li-ping, WANG De-lun*

(Key Lab. for Precis. & Non-tradit. Mach. Technol. of Minist. of Edu., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract A new generalized characteristic state analyzing method for hybrid mechanism system is proposed. First, the basic combination patterns are investigated as well as related to the behavior of hybrid combination mechanism and the generalized characteristic state model sets are established according to the classified basic combination patterns. And then, generalized characteristic state equations are derived and the mathematic models of various combination patterns are set up. Meanwhile, the algorithm, transferring the compound combination system to the operation of the generalized characteristic state vectors, is analyzed according to the corresponding combination patterns. Thus, the reference regulation for the synthesis of kinematic schemes and the decomposition method are applied to conceptual design of the hybrid mechanical system. The mathematical model of the hybrid combination pattern facilitates the characterization of the basic mechanism units and basic combination patterns, transformation of problem specifications, decomposition into sub-problems, and the ability to system synthesis generated automatically.

Key words conceptual design; hybrid system; combination pattern; generalized characteristic state equation

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net