

机械运动方案设计的状态空间方法*

王德伦 张德珍 马雅丽

(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 提出了机械运动方案设计的状态空间方法, 以基本变换单元为基础, 建立了运动变换状态方程, 提取了输入与输出特征矢量、运动传递函数与特征值, 讨论了对偶矢量、状态变换矩阵及状态空间的性质, 得到状态空间中运动变换特征矢量的运算规则, 实现了把串联机械系统的运动方案设计问题转化为输入输出运动特征矢量在状态空间中的单环路径规划问题, 通过状态空间中不同对偶点的连接方式可以获得相应的运动方案设计可行解, 为机械运动方案设计提供一种新的有效方法。

关键词: 概念设计 运动方案设计 状态空间 CAD

中图分类号: TH122

0 前言

概念设计是寻求满足机械产品设计要求的方案解, 而机械运动方案设计是概念设计的基础, 由于运动方案设计数学描述的复杂性和性能评价的模糊性, 至今尚无成熟实用的设计方法, 始终是概念设计的瓶颈问题。为此, 国内外学者采用多种方法开展研究。形态学矩阵方法^[1,2]或类似的方法是较为常用的概念设计方法, 根据总功能分解而成的多个功能元, 可以寻找多种系统的组合方案。基于图论的概念设计方法^[3,4], 对传动链及机构的拓扑表示是一个较好方法。人工智能及专家系统^[5-8]技术的采用, 为功能描述及求解提供了手段。随着计算机技术的发展, 运动方案设计问题的计算机自动求解方法逐渐成为研究热点, 但在现有的方法中, 往往缺少严密的数学模型描述, 或者运动链与其实现的功能缺少内在联系, 即使 Kota 提出的矩阵分解方法^[9], 依据机械运动变换的类型、方向及大小特征分别制定了若干变换规则与运算准则, 可以在计算机上自动求解, 但诸多变换规则、功能实现以及运算准则等缺少有机联系, 数学描述尚不完整, 应用不方便, 因此, Kota^[10]引入对偶空间试图建立起联系, 然而, 目前还停留在表示方法上, 还有待完善。

借鉴 Kota^[9]方法的功能特征表示方法, 提出建立机械运动变换状态空间表示方法, 建立机械运动基本变换单元的运动变换状态方程, 提取输入输出特征矢量并映射到状态空间中描述, 把机械运动方案设计问题转化为状态空间中的路径规划问题, 不同的路径对应不同的可行解, 与图论方法有

类似之处, 但由于其路径上的节点和边对应于特征矢量, 并有自成体系的几何空间集合意义, 又有特定的物理意义, 因而又有本质区别。本文仅以单自由度串联机械系统为例说明机械运动方案设计状态空间方法的原理与应用, 并联、混合及多自由度系统的原理和方法另文阐述。

1 机械运动变换基本单元与状态方程

机械运动变换形式多种多样, 有实现单参数运动输入与单参数运动输出的单个刚性与柔性传动机构, 文献^[9]归纳有 45 种, 也有以流体为中间介质运动变换, 还有以电能转化为机械功实现运动传递与变换, 以及单自由度和多自由度及其组合等, 为了准确表达机械运动变换方式与单元, 在此给出广义的单自由度机械运动变换基本单元的定义。

定义 1 以一个独立机械运动参数输入得到一个或多个确定的机械运动参数输出的机械运动变换基本单元称为单自由度广义机械运动基本变换单元, 以下简称基本变换单元。

上述基本变换单元不仅涵盖了常规的由刚体构件组成的单自由度机构, 而且也包括发电机与电动机、液压泵与液压马达、空气压缩机或液压缸系统。应该指出, 像电动机、液压马达和空气压缩机之类的驱动单元需要特殊处理, 暂不讨论。基本变换单元都具有特定的运动变换功能, 其变换原理各不相同, 形态各异, 利用物理方程或几何关系描述其输入输出关系往往相当复杂, 如何描述它们的运动变换功能及其特征, 是尚未解决的问题。因此, 首次提出利用状态方程与特征矢量及运动传递函数来描述基本变换单元的功能与特征, 并阐述其内在联系与性质, 为机械运动方案设计提供理论依据。

基本变换单元的功能与特征可以通过输入输出

* 国家自然科学基金资助项目(50075012 和 50275016)。20020326 收到初稿, 20021112 收到修改稿

参数建立对应关系, 设一个基本变换单元的广义输入位移矢量为 x_i , 广义输出位移矢量为 x_o , 其函数关系为

$$x_o = f(x_i) \quad (1)$$

式中 x_i 和 x_o 均为多维矢量, 对于单自由度输入, x_i 只有一个分量是连续参数变量, 其余均为常量; 而 x_o 可以有一个或多个分量参数是 x_i 的函数, 其余是常量, 常量的个数及大小是由变换单元的性质与结构决定的; 显而易见, 式(1)的具体关系表达式随变换单元的性质与结构不同, 其内涵与复杂程度不同, 一般为非线性方程, 以式(1)研究基本变换单元的功能特征难度太大, 为此, 将式(1)对时间 t 求得导广义输入输出速度的方程, 为方便起见, 用符号 v 表示广义速度, 即

$$v_o = Av_i \quad (2)$$

显然, 上式的输出速度矢量 v_o 与输入速度矢量 v_i 是线性关系, 而系数 $A=f'(x_i)$ 呈现矩阵形式, 是运动变换位置的函数, 表明单元的状态关系, 经过对各类基本变换单元分析研究发现, 系数矩阵 A 一般呈现比较特殊的结构和性质, 根据基本变换单元和机械运动方案设计的一般情况, 将式(2)作出如下特征提取和简化。

(1) 将输出速度矢量 v_o 与输入速度矢量 v_i 的各分量进行特征提取, 对于常数分量基本保持不变, 而对于连续变量分量, 将定量表达变为定性表示, 从而脱离具体单元的尺度关系。

(2) 根据输出速度矢量 v_o 与输入速度矢量 v_i 的特征表示, A 矩阵也将产生相应的变化, 其内部结构的定量描述部分变为定性表示, 并在总体结构上没有质的变化, 但脱离具体单元尺度的一般关系。

为了统一表达基本变换单元的输入输出特征及变换功能的关系, 并便于信息存储, 借鉴控制工程的思想术语^[1], 在此给出如下定义。

定义 2 基本变换单元的输出速度矢量 v_o 与输入速度矢量 v_i 的分量用参数特征定性表示, 分别称为基本变换单元的输入特征矢量和输出特征矢量, 统称为状态特征矢量; 输入与输出特征矢量之间的关系矩阵 A 称为状态变换矩阵; 而写成如式(2)形式的表达式称为运动变换状态方程, 简称状态方程。

以基本变换单元的转动与移动类型特征、在 x 、 y 和 z 轴方向上的运动速度特征和大小特征为例, 建立 6 维输入输出特征矢量 v_i 和 v_o , 则状态方程式(2)中的输入特征矢量 $v_i = [R_{x_i} \ R_{y_i} \ R_{z_i} \ T_{x_i} \ T_{y_i} \ T_{z_i}]^T$; 输出特征矢量 $v_o = [R_{x_o} \ R_{y_o} \ R_{z_o} \ T_{x_o} \ T_{y_o} \ T_{z_o}]^T$, v_i 和 v_o 各分

量中的 R 和 T 表示转动与移动的运动类型, 而其下标 x 、 y 、 z 表示该类型运动在单元统一坐标系下的运动方向, 输入与输出特征矢量各分量的数值则表示该分量的运动大小特征, 可以用后文的运动传递函数特征 (c, v, δ) 及其组合表示; 状态变换矩阵 A 为 6×6 矩阵, 可以由具体基本变换单元类型与结构写出。应当指出, 并非输入与输出特征矢量一定是 6 维, 根据需要可以简化为 3 维(如平面运动变换), 也可以扩充为 9 维(如含有螺旋运动)或更高维数(特征分量更多)等。

由此可知, 任意基本变换单元都具有特定的输入特征矢量和输出特征矢量、状态变换矩阵和状态方程, 但实现一种运动变换功能并不仅有一个变换单元, 这正是机械运动方案设计多样性的体现; 同样, 上述定义也可以推广到多个单元的组合, 当然, 如何组合及组合的性质以及表达还需要讨论。

2 对偶特征矢量与状态变换矩阵

从机械运动基本变换单元的状态方程可知, 基本变换单元的特征信息由输入输出特征矢量及状态变换矩阵体现, 而状态变换矩阵决定了输入输出特征矢量之间的联系, 因此, 输入输出特征矢量与状态变换矩阵是基本变换单元功能知识的载体, 是状态空间的基础。

2.1 对偶特征矢量的定义

由式(2)可知, 运动变换基本单元的输入与输出特征矢量由状态变换矩阵紧密联系在一起, 从而体现基本变换单元的功能与特征, 同时, 输入特征矢量与输出特征矢量对于基本变换单元而言, 又成对出现(驱动单元另外讨论), 故有

定义 3 基本变换单元的输入特征矢量 C_i 与输出特征矢量 C_o 称为对偶特征矢量, 记为 $C_i C_o$ 。

2.2 对偶特征矢量的性质

对偶特征矢量反映了基本变换单元输入输出特征矢量成对出现的现象, 也就是互为对偶矢量, 其实质是基本变换单元的状态与输入输出特征的一种内在联系, 通过分析基本变换单元的输入输出特征矢量可知, 互为对偶特征矢量具有如下性质。

(1) 对偶特征矢量 C_i 与 C_o 间的关系为

$$C_o = AC_i, \text{ 当且仅当 } A=I \text{ 时 } C_o = C_i.$$

(2) $C_i C_o$ 为对偶特征矢量, 若存在另一对偶特征矢量 $D_i E_o$, 使得 $D_i = C_o$, $E_o = C_i$, 则 $C_i C_o$ 称为可逆对偶特征矢量。可逆对偶特征矢量的输入输出可互换,

运动可逆。

(3) 两组对偶特征矢量 $C_i C_o$ 与 $E_i E_o$ 中, 若有 $C_i // E_o$ 或 $E_i // C_o$, 则 $C_i C_o$ 与 $E_i E_o$ 可合并形成新的对偶特征矢量 $E_i C_o$ 或 $C_i E_o$ 。

2.3 状态变换矩阵与单元知识存储

状态变换矩阵反映了基本变换单元的状态, 并通过输入特征矢量与输出特征矢量与外部联系起来, 实现运动变换功能, 因此, 可以用状态变换矩阵描述机械运动基本变换单元的功能与输入输出知识, 建立各类基本变换单元的状态变换矩阵信息存储模型, 为机械运动方案设计提供知识源。

定义 2 提取基本变换单元的特征矢量, 保留特征而脱离尺度关系, 本节以单自由度机械运动变换系统和 6 维输入输出特征矢量为例阐明状态变换矩阵的形成过程。设机械运动基本变换单元一曲柄滑块机构及其坐标系如图 1 所示, 曲柄长为 l_1 , 与 y 轴夹角为 φ_1 , 连杆长为 l_2 , 与 y 轴夹角为 φ_2 , 输入运动为转动角速度 ω_1 , 输出为滑块的移动速度 v_o , 按照定义 2 提取输入 6 维特征矢量, 并按式(2)写出输入输出特征矢量及状态变换矩阵形成的一般形式状态方程为

$$\begin{bmatrix} R_{x_o} \\ R_{y_o} \\ R_{z_o} \\ T_{x_o} \\ T_{y_o} \\ T_{z_o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} \\ A_{31} \\ A_{41} & & A_{ij} \\ A_{51} \\ A_{61} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{x_i} \\ R_{y_i} \\ R_{z_i} \\ T_{x_i} \\ T_{y_i} \\ T_{z_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由上式可知, $v_{oi} = \sum_{j=1}^6 A_{ij} v_{ij}$, 其中 A_{ij} 可以按式(1)中的位移矢量函数 $f(x_i)$ 的各分量 $f_i(x_i)$ 对输入矢量 x_i 各分量求偏导给出, 即

$$A_{ij} = \frac{\partial f_i(x_i)}{\partial x_{ij}} \quad (4)$$

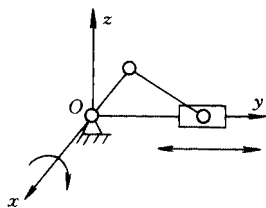


图 1 曲柄滑块机构及其坐标系

对照图 1 可得上式中输入特征矢量

$$v_i = [R_{x_i} \ R_{y_i} \ R_{z_i} \ T_{x_i} \ T_{y_i} \ T_{z_i}]^T = [\omega_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

输出特征矢量

$$v_o = [R_{x_o} \ R_{y_o} \ R_{z_o} \ T_{x_o} \ T_{y_o} \ T_{z_o}]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ v_o \ 0]^T$$

由于如图 1 所示为单输入单输出系统, 输入特征矢量函数和输出特征矢量函数各有一个非零元素, 而且输出特征矢量函数 v_o 仅与输入特征矢量函数 v_i 的一个分量有关, 所以, 状态变换矩阵 A 仅有一个非零元素 A_{51} , 其他元素均为 0; 按几何关系可以导出曲柄滑块机构的滑块移动速度

$$A_{51} = l_1 (\cos \varphi_1 \tan \varphi_2 - \sin \varphi_1) \quad (5)$$

即 A_{51} 是机构结构参数和运动位置的函数; 因此, 在理论上要建立完整的基本变换单元的状态变换矩阵, 元素 A_{ij} 需要按式(4)对特征矢量的各分量求偏导数形成, 不仅过程复杂, 而且具体矩阵各元素的数值依赖基本变换单元的尺度, 从而把具体参数设计导入方案设计之中, 使方案设计决策过程复杂化。在一般情况下, 对于一个具体的基本变换单元的运动变换类型、输入运动与输出运动变换方向是相对固定的, 如果在基本变换单元上建立合适的直角坐标系, 尽可能使得输入或输出沿某一轴线方向, 从而减少状态矩阵的非零元素; 为了使状态变换矩阵的非零元素便于表达及数值计算, 并能体现不同基本变换单元的运动变换在数值上的特点, 需要将式(4)进行级数展开, 提取特征数值, 如式(5)进行傅里叶级数变换并提取常数项或前 3 项特征等, 由于状态变换矩阵非零元素及其数值在运动变换中的作用与控制工程中的传递函数有类似之处, 在此有

定义 4 机械运动基本变换单元对应的状态变换矩阵非零元素, 称为该基本变换单元的运动传递函数, 非零元素的特征数值称为传递特征值。

根据研究对象为机械运动变换单元的串联系统, 可以对单输入单输出基本变换单元作如下约定以简化状态变换矩阵并脱离单元的尺度关系。

(1) 固定于基本变换单元的直角坐标系, x 轴与原动件的类速度矢量重合, 其他轴按右手系确定, 输出运动与坐标系轴线可以重合的必须重合。

(2) 基本变换单元的传递特征值分为四级, 即常数 c 、间歇 δ 、变化 v 和组合 δv 。

按照上述约定以及式(4)和(5), 曲柄滑块机构的状态变换矩阵式(3)的非零元素的传递特征值 $A_{51} = v$, 状态方程为: $v_o = A_{ij} v_i$, 其非零部分表达式

为 $v_o = v\omega_o$ 。因此，根据上述约定和对偶特征矢量的性质，推得单输入单输出基本变换单元的状态变换矩阵有如下性质。

(1) 输入输出运动方向平行或正交时，则有仅有一个非零元素 A_{ij} ，其数值为基本变换单元的传递函数特征值；运动方向非平行或非正交时，一个非零元素分解为多个不独立的分量。

(2) 非零元素 A_{ij} 在状态变换矩阵中的位置与运动变换类型和方向有关，同类型方向的运动变换非零元素 A_{ij} 在对角线上 ($i=j$)。

(3) 基本变换单元的逆变换，其状态变换矩阵为原矩阵的转置矩阵。

根据上述性质，单输入单输出基本变换单元的功能与特征等知识可以由状态变换矩阵的非零元素的位置及传递特征数值表示，只需要储存状态变换矩阵的非零元素的位置及传递特征数值，可以建立单输入单输出基本变换单元知识数据库，如上节所述，基本变换单元与状态变换矩阵并不一一对应，因而同一 A_{ij} 数据，可能对应多个单元，他们都可以实现数据所描述的功能。

3 运动变换状态空间及其性质

由于不同类型、方向和大小特征的运动变换都需要不同的基本变换单元实现，而同一类型的不同基本变换单元又可以实现相同类型的运动变换，所以，诸如此类的基本变换单元与组合的集合呈现出机械运动方案设计解的性质；在此讨论基本变换单元特征矢量集合的性质。

定义 5 所有基本变换单元的状态特征矢量的集合称为机械运动变换状态空间，简称状态空间。

在状态空间中，一个基本变换单元有一对偶特征矢量，在状态空间中映射为一对偶点，所有基本变换单元的状态矢量的映射均在状态空间中，反之，状态空间中的一对偶点对应多少基本变换单元，与特征矢量的维数有关，维数越高，特征越细，对应的单元越少，如实现从转动到转动的平行轴定传动比齿轮传动的直齿圆柱齿轮与斜齿圆柱齿轮传动，称为基本变换单元的元素，在 6 维状态空间中难以区分，他们有相同的对偶特征矢量和状态变换方程；状态空间中的所有对偶点并不一定都对应于基本变换单元，也包括基本变换单元的组合。依据状态变换空间中点所对应特征矢量的性质，可以将状态空间划分为若干个子空间，如属于相同运动类型变换，把相对于机架转动 R 转变为移动 T 的子空间 RT ，把 x 方向的移动变为 y 方向移动的子空

间 Txy ，把绕 z 轴的转动角速度减小 C 倍的子空间 RC ，诸如此类等等，即有一个或几个相同分量的对偶特征矢量的集合构成子空间。由不同性质的子空间构成机械运动变换的状态空间。

由状态空间的定义 5 可知，所有状态特征矢量的集合构成机械运动变换状态空间，那么，状态空间中的矢量之间有什么关系，是否可以进行运算，运算过程所对应的实际物理意义是什么等等，需要进一步讨论。由于输入输出特征矢量在状态空间中是成对出现，且与状态变换方程相一致，所以，在讨论状态空间性质时以双字母形式表示对偶矢量 $E_i E_o$ ，意义同前。如在此以机械运动变换串联系统为例，设对偶特征矢量 $E_i E_o$ 、 $B_i B_o$ 、 $C_i C_o$ 、 $D_i D_o$ 属于状态空间 M ，则有如下性质。

(1) 加法 $\forall E_i E_o, B_i B_o \in M$ ，有 $E_i E_o + B_i B_o = E_i C_o \in M$ ，当且仅当 $E_o // B_i$ 时， $C_o = [B_{ij}] [E_{ij}] E_i \neq 0$ ，否则， $C_o = 0$

(2) 数乘 $\forall E_i E_o \in M$ ， k 是数量，则 $kE_i E_o \in M$

(3) 0 对偶矢量 $0 \in M$

(4) 可逆 $E_i E_o \in M$ ， $E_i E_o$ 可逆，则有 $-E_i E_o \in M$

(5) 结合律 当若干组对偶矢量相加满足加法平行条件且排列顺序不变时，有

$$(E_i E_o + B_i B_o) + (C_i C_o + D_i D_o) = E_i E_o + (B_i B_o + C_i C_o) + D_i D_o$$

由状态变换矩阵和对偶特征矢量的性质可知，上述性质(1)表明两对偶特征矢量的可加性，要求相加两对偶特征矢量具有中间平行条件，如图 2 所示，是两个机械运动基本变换单元可连接条件的数学描述，即前一个的输出特征矢量与后一个输入特征矢量平行，意味着非零元素个数和位置相同，数值可以不同。显而易见，在本质上，两个机械运动基本变换单元的串联连接就是上述两对偶特征矢量相加， $[E_{ij}]$ 与 $[B_{ij}]$ 两对偶特征矢量状态变换矩阵的简写。特殊地，当 $E_o = B_i$ 时，则二者重合。性质(2)使特征矢量 $E_i E_o$ 各分量的数值扩大或缩小，但状态特征矢量性质未变，类似于机械运动变换基本单元前串接一等速比传动装置；性质(3)表明状态空间包含 0 元素，这不仅表明状态空间的完整性，而且对于不满足性质(1)平行条件加法的运算无运动输出；性质(4)表示对偶特征矢量运动可逆。性质(5)

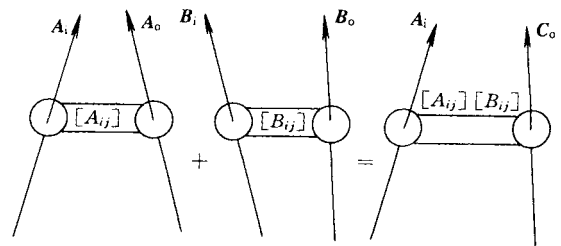


图 2 状态空间对偶矢量加法示意图

给出了多个基本变换单元的串联连接的加法性质。

由上述状态方程、对偶特征矢量及状态变换矩阵的性质可以看出,在一般情况下,状态空间中的对偶矢量不满足分配律和交换律,即

$$\textcircled{1} k(E_i E_o + B_i B_o) \neq k E_i E_o + k B_i B_o$$

$$\textcircled{2} E_i E_o + B_i B_o \neq B_i B_o + E_i E_o$$

同理,由状态空间的性质(1)~(5)可以反推得到单输入输出基本变换单元的状态变换矩阵及其分解规则,即:已知要求输入输出特征矢量 E_i 与 F_o 为状态空间中两特征矢量,反求出所要设计的系统运动变换实现方案,即基本变换单元的状态变换矩阵组合。已知两特征矢量 E_i 与 F_o ,由状态方程、状态变换矩阵性质及式(3)可反求运动变换系统的总状态变换矩阵 A 的元素 A_{ij} 为

$$A_{ij} = E_{ij} F_{oi} / |E_i| \quad (6)$$

式中 E_{ij} 和 F_{oi} 分别表示分量, $|E_i|$ 表示 E_i 的非零元素数值的绝对值;由式(6)可形成运动变换系统的总状态变换矩阵 A ,依据 A 的非零元素位置及数值可在基本数据库中查寻到对应的基本变换单元;若不存在基本变换单元实现 $F_o = A E_i$,可由两个或更多满足加法条件的基本变换单元对偶矢量 $C_i C_o$ 与 $D_i D_o$ 相加,使得 $E_i F_o = C_i C_o + D_i D_o$,则相应的单元状态变换矩阵 D_{ij} 与 C_{ij} 有如下关系

$$F_o = [D_{ij}] [C_{ij}] E_i \quad (7)$$

$$\text{或} \quad A = [A_{ij}] = [D_{ij}] [C_{ij}] \quad (8)$$

式(8)还可以再次分解成 3, 4, ..., n 个单元状态变换矩阵的乘积。由于每一对偶特征矢量及单元状态变换矩阵都对应一类机械运动变换单元,而在同类型基本变换单元中又包括不同的单元元素(如锥齿轮机构与蜗杆蜗轮机构同为实现转动到转动并且输入输出运动方向互相垂直),所以,采用不同的单元元素以及由几个基本变换单元组合形成运动变换系统,使得系统运动变换设计方案呈现多种多样,可以按照由状态方程、状态变换矩阵及状态空间的性质推得运算规则,即机械运动方案设计转换为基本变换单元间的连接与分解方法及计算规则。

4 机械运动方案的状态空间方法设计

综上所述,机械运动方案设计可以映射到状态空间中按照对偶矢量的运算法则实现,在此简要说明状态空间方法进行机械运动方案设计的步骤,并以一个设计实例给出设计过程。在已建立单输入单输出机械运动基本变换单元的知识数据库,即单元状态特征矢量的维数统一确定, A_{ij} 数据库已建立的

情况下,按状态空间性质和式(8)制订总状态变换矩阵的分解条件、规则与计算方法。机械运动方案设计可按下列计算步骤。

(1) 根据机械系统的设计要求,将输入与输出在系统状态空间中描述,写出输入特征矢量 E_i 与输出特征矢量 F_o 。

(2) 按状态方程及式(6)形成方案设计系统的状态变换矩阵 A_{ij} 。

(3) 检索基本变换单元及其元素数据库,是否存在对应于 $[A_{ij}]$ 条件的基本变换单元。

(4) 核实系统的总状态变换矩阵的分解条件是否满足。

(5) 列出所有查到的基本变换单元(元素)按连接顺序连接,即得所有机械运动变换的设计方案。

现以大连某服装机械厂的钉扣机横向送布机构为例,阐述机械运动方案设计过程。

该钉扣机横向送布机构的输入轴(即线钩轴)单向匀速转动,转速为 $n_i = 1200$ r/min;输出运动为摆杆往复摆动,输出运动为往复摆动 $n_o = 450$ 次/min,箱体的空间布局要求线钩轴和摆杆轴线之间互相垂直。在一个钉扣周期内(周期为 0.8 s),摆杆角速度存在变化、间歇特征。

设计步骤

(1) 设线钩轴输入运动方向为 x 轴,摆杆轴输出运动方向为 z 轴。则有

$$E_i = [\omega_i \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$F_o = [0 \ 0 \ cv\delta \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

(2) 形成方案设计系统的状态变换矩阵 A_{ij} ,有一个非零元素为 A_{31} ,由式(6)得

$$A_{31} = cv\delta$$

(3) 按 $A_{31} = cv\delta$ 选择基本变换单元(机构等),液压可以实现,但需要加控制系统,并且容易污染,不便采用,数控伺服可以,也需要加控制系统,成本较高,未被采用;显然,线性 c 、非线性 v 和阶跃函数 δ 的三种传递函数特征难以由一个基本机构实现,故不存在单个基本变换机构解。

(4) 故将 $[A_{31}]$ 分解为两个矩阵之积。由式(8)知,其中非零元素 $A_{31} = \sum_{k=1}^6 D_{3k} C_{k1}$,当 $k=1, 2, \dots, 6$ 时的

6种情况。又因机器的运动传递函数特征 $cv\delta$ 可以分解为 $c \sim v\delta$ 及 $v\delta \sim c$ 等情况并对应于基本变换单元 1 和 2 的特征。因此,利用基本单元数据库求出同时满足条件的两个串联基本机构组合(见下表)。通过本文编制的计算程序计算,可得到 30 多种钉扣机横向送布机构的设计方案,表中给出多种组合方案;

如果利用3个基本机构串联可以得到更多的设计方案,尽管系统要复杂一些,利用方案评价体系,可以选出合适方案,实现方案的创新设计。

表 方案设计获得的解(局部)

解序号	C_{k1}	D_{3k}
1	外啮合直齿圆柱齿轮机构	摆动推杆圆柱凸轮机构
2	蜗杆蜗轮机构	摆动推杆盘形凸轮机构
3	直动推杆圆柱凸轮机构	齿轮齿条机构
4	对心直动滚子推杆盘形凸轮机构	螺母移动螺杆转动的螺旋机构
...

5 结论

(1) 状态特征矢量及状态变换矩阵可以准确描述机械运动变换单元及系统的类型、方向和运动传递特征信息,为方案设计的知识表达提供了一种新方法。

(2) 状态空间及其性质反映了机械运动变换单元及其组合的性质,为机械运动方案设计研究提供了理论基础。

(3) 在状态空间中研究机械运动基本变换单元的组合方法,为机械运动创新方案设计研究提供了新方法。

参 考 文 献

- 1 Ulrich K T, Seering W P. Synthesis of schematic descriptions in mechanical design. *Research in Engineering Design*, 1989 (1): 3~18
- 2 Kannapan S, Marshek K M. An algebraic and predicate logic approach to representation and reasoning in machine design. *Mechanism and Machine Theory*, 1990, 25 (3): 335~353
- 3 Freudenstein F, Dobrjanskyj L. On a theory for the type synthesis of mechanisms. In: *Proceedings of the Eleventh International Conference of Applied Mechanics*, 1964: 420~428
- 4 Freudenstein F, Maki E R. The creation of mechanisms according to kinematic structure and function. *Environment and Planning*, 1979 (6): 375~391
- 5 Soni A H, Dado M, Weng Y. An automated procedure for intelligent mechanism selection and dimensional synthesis. *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 1988, 110: 130~137
- 6 Hoeltzel D A, Chieng W H. Knowledge-base approaches for creative synthesis of mechanisms. *CAD*, 1990, 22: 57~67

7~67

- 7 邹慧君, 顾明敏. 机构系统方案设计专家系统初探(一)——知识库管理系统的建立. *机械设计*, 1996 (5): 26~28
- 8 邹慧君, 顾明敏. 机构系统方案设计专家系统初探(二)——推理系统的建立和应用. *机械设计*, 1996 (6): 12~14
- 9 Chiou S J, Sridhar Kota. Automated conceptual design of mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 1999, 34 (3): 467~495
- 10 Moon Y M, Kota S. Automated synthesis of mechanism using dual-vector algebra. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37(2): 143~166
- 11 吴韞章. *自动控制理论基础*. 西安: 西安交通大学出版社, 1999

NEW APPROACH TO AUTOMATED CONCEPTUAL DESIGN OF MECHANICAL SYSTEM BY MEANS OF STATE-SPACE

Wang Delun Zhang Dezhen Ma Yali
(Dalian University of Technology)

Abstract: A new approach to automated conceptual design of mechanical system is presented by means of a state-space. At first, a state equation is set up according to the function of a basic mechanical unit transformed a motion between input and output terminal. Then, the input and output characteristic vectors and the state space matrices are defined by means of a state equation, which are corresponding to a certain basic mechanical unit, even composite one. The conceptual design can be extracted from the dimension design by the way. Secondly, the state space is established in terms of the set of all characteristic vectors for transformation units and whose properties are discussed, such as vectors plus, constant multiplying, reversible driving, zero vector as well as a state space matrices decomposable. However, the mathematic model is presented and the groundwork is laid for the conceptual design in the state space. Finally, an example is given to show the process of conceptual design in state space.

Key words: Conceptual design Kinematic scheme design
State-space CAD

作者简介: 王德伦, 男, 1958年出生, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事机械设计理论与信息集成方法的科研与教学工作, 主要研究方向为机械系统方案理论与方法、机械设计制造信息集成及图形图像处理的几何方法。