

基于功能模块变换的齿轮连杆导引机构综合

刘静帅¹, 林松^{2*}, 张宇¹, 王瀚超¹

(1. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 中德学院, 上海 201804)

摘要:刚体导引运动综合是机构设计中的典型问题, 为避免采用 Burmester 运动几何学理论为基础的传统综合方法出现机构的结构类型和功能特性缺陷, 探讨基于机构功能模块相似变换的广义综合理论, 建立以功能特性为主线的导引机构综合方法。由于广义综合方法以标准机构功能模块为最小设计单元, 为扩展其结构类型, 对能够产生复杂运动规律的齿轮连杆机构进行研究, 以建立相应的基本尺寸型机构功能模块。首先, 通过对齿轮连杆机构的构型分析研究传动功能与导引功能之间的转换映射, 将传动机构转化为导引机构。其次, 采用复数矢量法进行齿轮连杆机构运动学分析, 建立包括构件相对尺寸、导引转角函数、导引点轨迹和运动几何标识的全拓扑信息机构功能模块。然后, 分析机构的尺寸参数、齿轮传动比参数与导引功能特性的双向映射规律, 得出合理调整预选功能模块尺寸参数的方法, 以确保求解机构满足预期的功能特性要求。最后, 以某粉料产品加工生产线中要求实现手抓短暂平移导引功能的机构设计为例, 分析和求解运动任务的几何标志, 并提取预选齿轮连杆机构功能模块的几何标志, 给出几何标志之间的相似变换方法, 得到满足工艺要求的求解机构实际尺寸和位置参数, 对设计结果的验证表明了提出的广义综合方法的有效性和实用性。

关键词:功能模块; 相似变换; 刚体导引; 齿轮连杆; 广义综合方法

中图分类号: TH112

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2017)02-0225-07

Synthesis of Geared Linkage Mechanism for Guidance Task Based on Function Module Transformation

LIU Jingshuai¹, LIN Song^{2*}, ZHANG Yu¹, WANG Hanchao¹

(1. School of Mechanical Eng., Tongji Univ., Shanghai 201804, China;

2. Sino-German College for Postgraduate Studies, Tongji Univ., Shanghai 201804, China)

Abstract: Rigid body guidance synthesis is a typical problem in mechanism design. In order to avoid the defects by traditional synthesis methods based on Burmester kinematic geometry theory, such as the limitation of mechanism structure type and the uncertainty of mechanism function, a generalized function oriented geometric synthesis method based on similarity transformation of the mechanism function modules was discussed. Since the standard mechanism modules were considered as basic design units for this method, the structure type of guidance mechanism modules need to be extended for a larger solution space, therefore the geared linkage structure that can generate complex motion patterns was taken into account, aiming at the establishment of corresponding function module through kinematic analysis. At first, the transformation and mapping method between transmission function and guidance function were obtained through the configuration analysis of geared linkage, thus converting the transmission mechanism to the guidance mechanism through changing the rotation center of output gear. Secondly, the complex vector method was introduced for the kinematic analysis to obtain the guidance function, after that the geared linkage function module with full topology information was established, which included the transmission characteristics as well as the guidance characteristics, i. e. the relative dimensional parameters, the guidance angle performance, the guidance point trajectory and the motion geometric identifier. Then, in order to obtain the method for adjusting dimensional parameters of the preselected function module, a bidirectional mapping rule between relative dimensions and achievable guidance functions was revealed. At last, a practical guidance mechanism design task for powder production with partial parallel guidance function requirement was given,

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275354); 上海市文化创意产业基金资助项目(452)

作者简介: 刘静帅(1989—), 男, 博士生. 研究方向: 机构非线性运动分析与综合. E-mail: 1210295@tongji.edu.cn

* 通信联系人 E-mail: slin@tongji.edu.cn

the similarity transformation of geometric identifier between geared linkage function module and the guidance task was presented, then the actual solution mechanism size and position parameters which meet the technical requirements were obtained. Finally the validity and practicability of the proposed generalized synthesis method were verified by the analysis of design results.

Key words: function module; similarity transformation; rigid-body guidance; geared linkage; generalized synthesis methodology

给定有限数量位置的平面刚体导引综合是工程领域中常见的一类非线性运动任务。一百多年来,众多学者提出了几何法、解析法和图谱法 3 类综合方法,其中,几何法相较于解析法形象直观^[1],可借助计算机将图形转化为代数精确求解,更符合工程师的要求。目前,常用的几何法主要以 Burmester 曲线^[2-3]为理论基础,建立在圆点和圆心点之间定长的二铰链构件基础上,设计参数为单一铰链几何位置,由这些位置构建的连杆机构可能存在曲柄问题、回路问题、顺序问题等功能缺陷^[4]而需要迭代综合。为了避免使用传统综合方法在求解机构的结构类型和功能特性方面的缺陷,林松等^[5-7]提出了模糊位置导引机构的综合理论,建立了面向机构功能的广义综合理论和方法。

齿轮连杆组合机构存在多种输出特性,具有大摆角摆动,非匀速转动以及带有停歇或反向转动等简单机构难以实现的功能,在农业、包装和印刷机械等行业中应用广泛。目前,齿轮连杆机构在结构综合^[8]、运动传递^[9-10]、轨迹发生^[11-12]、函数生成^[13]等方面的研究较为成熟,而基于 Burmester 理论的综合方法并不适用于组合机构的刚体导引运动综合。作者在广义综合方法的基础上,以常用的五构件二齿轮连杆传动机构为例,研究该机构作为导引机构的运动学特性,通过建立相应的标准机构功能模块来研究其功能特性与尺寸参数之间的映射规律,获得在功能模块相似变换求解时选取和调整机构参数的方法。通过综合算例进一步给出了基于齿轮连杆机构功能模块的广义综合相似变换求解步骤,综合过程体现了该方法的直观性。

1 导引机构广义综合方法

文献[6]首先研究了导引机构广义综合理论,目的在于突破传统综合方法在机构结构和功能特性方面的缺陷,探讨揭示机构功能特性与尺寸之间的映射规律,建立起面向工程应用的具有普适性的机构综合理论与方法,使得导引机构的综合不再局限于连杆机构,同时确保求解机构满足预期功能特性要求。该方法的技术流程如图 1 所示:1)分析给定的导引运动任务和工艺过程得到导引运动初始规律,同时根据预期的功能特性从各类机构资源中预

选具备部分功能特性的机构结构,拟定其全拓扑信息的机构功能模块;2)分别提取给定的运动任务和机构功能模块的导引运动特征参数,得到对应的标志极点位置和转角;3)通过对机构功能模块尺寸参数的调整使得运动任务极点标志与机构功能模块极点标志一致,由中心射影原理建立几何标志间的相似变换,通过平移、旋转、缩放等步骤获得具有预期功能特性的实际求解机构。

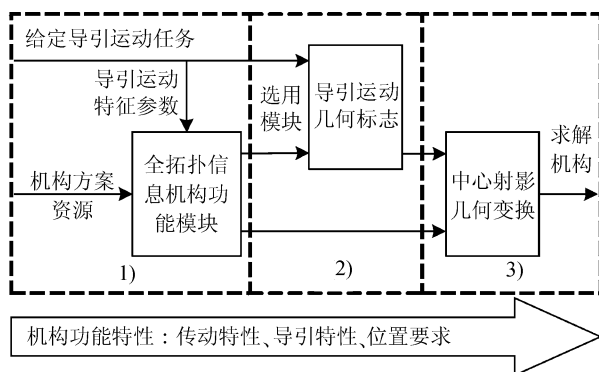


图 1 机构广义综合方法流程

Fig. 1 Process for generalized synthesis method

由于各种类型的导引机构都可以被系统地处理为标准化无量纲机构功能模块,该广义综合理论可以直接应用于建立连杆和非连杆机构、刚性和柔性机构以及平面和空间机构等类型功能模块。建立不同结构类型的标准导引机构功能模块是获得求解机构的基础要素,能够拓展广义综合方法的解空间和应用范围。

2 齿轮连杆机构功能模块

作为机构结构特性、运动特性和功能特性的载体,机构功能模块不仅包含机构的构件数、运动副数、运动副类型、自由度和构件连接方式等传统意义上的拓扑信息,还包括构件相对尺寸以及主动件起始位置信息,构成了全拓扑信息的机构功能模块。

2.1 齿轮连杆导引机构构型分析

1 对齿轮与基础四杆机构的组合可能产生四、五、六构件类型的运动链,并且组合运动链中存在 1 个高副。根据 Gruebler 自由度计算公式,齿轮连杆机构具有单自由度的可动条件满足 $P_1 = (3N - 5)/2$, 其中, P_1 为机构低副数, N 表示构件总数。

因此,在可能产生的3种运动链中,仅有 N 取值为5时, P_1 为正整数,则其中1个齿轮必须与基础四杆机构的某一构件固联。图2为工程实际中常用的五构件回归式双曲柄齿轮连杆传动机构,当固定铰链 B_0 位于I、II、III、IV位置时,分别对应4种类型的传动函数^[14]:固定联接无相对运动、非匀速单向转动、具有短暂停顿的非匀速单向转动、进退式非匀速单向转动。

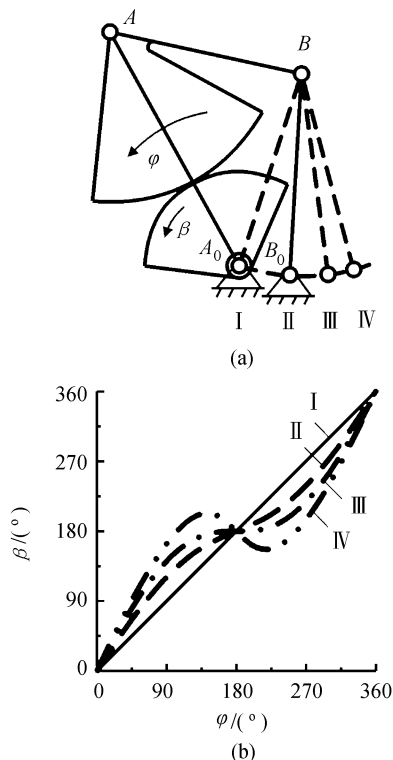


图2 齿轮连杆机构及其传动函数

Fig. 2 Mechanism and transmission function of geared linkage

分析图2可知,传动机构的活动齿轮输出绕固定铰链中心 A_0 的定轴转动,不符合一般导引运动的轨迹要求。因此,当活动齿轮作为导引运动输出构件时,不存在回归式结构。通过调整活动齿轮中心与连杆杆 A_0B_0 的相对位置使其不与固定铰链 A_0 重合,将传动功能机构转换为导引功能机构。图3为五构件二齿轮连杆组合机构的构型原理。

2.2 全拓扑信息功能模块建立

如图4所示,1对齿轮装载于基础机构的主动杆 A_0A ,固定齿轮 R 与连杆 AB 固联,活动齿轮中心 C 与固定铰链 A_0 不重合,导引输出运动构件 CK 与活动齿轮 r 固联。以 A_0 为坐标原点,以机架 A_0B_0 为 x 轴建立机构的矢量坐标系。为建立无量纲基本尺寸型的标准机构功能模块,所有构件为相对于机架($A_0B_0 = 1$)的相对尺寸。为建立全拓扑信息的机构

功能模块,分别研究机构导引转角函数、导引点轨迹和运动几何标识。

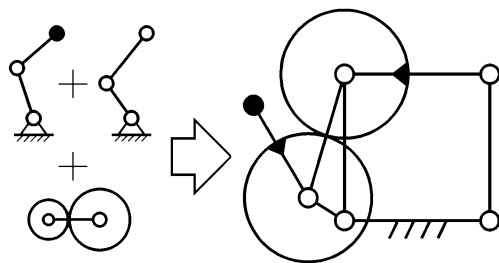
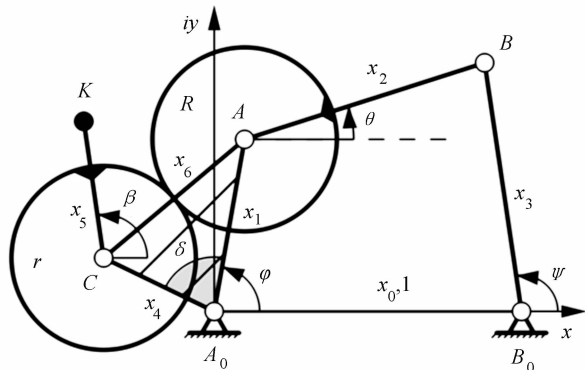


图3 齿轮连杆导引机构构型

Fig. 3 Mechanism configuration of geared linkage



置无关,且与相应二齿轮传动机构的传动函数相同,即 $\beta_r(\varphi) = f(\varphi, x_1, x_2, x_3, \rho)$ 。

齿轮连杆机构的导引转角函数 $\beta(\varphi)$ 为:

$$\beta(\varphi) = \beta_r(\varphi) + \beta_0 \quad (5)$$

式中, β_0 为导杆 CK 相对于齿轮 r 的初始转角位置。

导向构件 CK 的转角范围 $\Delta\beta$ 为:

$$\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min} = \beta_{r_{\max}} - \beta_{r_{\min}} \quad (6)$$

式中, $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$ 分别为导杆转角的最大值和最小值, $\beta_{r_{\max}}$ 、 $\beta_{r_{\min}}$ 分别为活动齿轮转角的最大值和最小值。

2) 机构导引轨迹

与活动齿轮固定联接的导杆末端导引点 K 的轨迹表示为:

$$K = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \rho, \varphi, \beta_0) = x_4 e^{i(\delta + \varphi)} + x_5 e^{i\beta} \quad (7)$$

式中, x_4 为活动齿轮中心 C 与固定铰链 A_0 相对距离, x_5 为导杆 CK 的相对尺寸, δ 为 A_0C 与 A_0A 夹角。

将式(7) 分解得到如图 4 所示的导引点 K 的轨迹方程为:

$$\begin{cases} x_K = x_4 \cos(\varphi + \delta) + x_5 \cos \beta, \\ y_K = x_4 \sin(\varphi + \delta) + x_5 \sin \beta \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\delta = \arccos[(x_1^2 + x_4^2 - x_6^2)/2x_1x_4]$ 。

3) 导引运动几何标识

由导杆 CK 在运动过程中的 2 个相关位置 $E_j(U_j, \beta_j)$ 、 $E_k(U_k, \beta_k)$ 能够唯一确定地描述运动位置变化的几何标识极点^[15] 为:

$$Q_{jk}(\alpha_{jk}) = \frac{i}{2} \cdot \frac{U_k e^{-i\alpha_{jk}} - U_j e^{i\alpha_{jk}}}{\sin \alpha_{jk}} \quad (9)$$

式中: U_j 为导杆初始位置 E_j 的基点, 且 $U_j = x_{A_j} + iy_{A_j}$; U_k 为运动位置 E_k 的基点, 且 $U_k = x_{A_k} + iy_{A_k}$; α_{jk} 为 E_j 至 E_k 的转角半角, 且 $\alpha_{jk} = \beta_{jk}/2 = (\beta_k - \beta_j)/2$, 其中, β_j 、 β_k 为导杆在 E_j 、 E_k 时对应的转角位置。

由于导杆的每个运动相关位置都与初始参考位置产生对应的几何标识极点, 将这些极点依次连接后可产生一条光滑的极点曲线。若选择不同的相关位置作为参考, 则产生若干条形状和位置不同的极点曲线, 极点曲线群的分布区域和机构安装位置的关联特性可参考文献[16]。

3 尺寸参数与功能特性映射规律

确定机构尺寸参数与功能特性之间的双向映射规律是综合求解预选功能模块的基础。基于动态交互式几何程序 GeoGebra 进行机构的变参数、可视化运动分析, 动态显示机构尺寸参数的调整对功能特

性的影响。根据工程实际应用需求, 作者主要讨论具有整周转驱动特性的机构功能模块导引函数类型及其尺寸参数的选择。

3.1 基础四杆机构尺寸参数

为了判断机构主动件的整周连续旋转特性, 由 Grashof 定理建立与基础机构相对尺寸相关的函数关系式:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, x_3) = x_1 + x_2 - x_3 - 1; \\ f_2(x_1, x_2, x_3) = x_1 - x_2 + x_3 - 1; \\ f_3(x_1, x_2, x_3) = -x_1 + x_2 + x_3 - 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_1 、 f_2 、 f_3 之间存在 8 种符号组合, 对应基础机构的 8 种结构类型^[17]。当要求机构具有整周转驱动特性时, 应满足曲柄存在的尺寸条件 $l_{\min} + l_{\max} < l' + l''$, 其中, $l_{\min}$ 、 $l_{\max}$ 分别为最短构件、最长构件的相对杆长, l' 、 l'' 分别为其余 2 个构件相对杆长。

基础四杆机构的相对尺寸决定了五构件齿轮连杆机构的结构类型和驱动特性, 若 $f_1 < 0$ 、 $f_2 < 0$ 、 $f_3 < 0$ 且 $l_{\min}$ 为主动件, 基础机构为曲柄摇杆结构类型, 如图 4 所示, 组合机构的活动齿轮输出运动为周期性非匀速单向转动; 若 $f_1 > 0$ 、 $f_2 > 0$ 、 $f_3 > 0$ 且 $l_{\min}$ 为机架, 基础机构为双曲柄结构类型, 活动齿轮输出具有停歇或进退式的周期性非匀速转动。

3.2 导引运动规律与尺寸参数关系

1) 线性导引运动

当双曲柄基础机构取为特殊相对尺寸 $x_1 = x_3$ 、 $x_2 = x_0 = 1$ 时, 即 $f_1 = 0$ 、 $f_3 = 0$, 该基础机构成为平行四边形结构, 则机构的导引函数 β 与 ρ 、 φ 线性相关, 且满足条件 $\Delta\beta = \beta_{i+1} - \beta_i = \text{const}$, 其中, β_{i+1} 、 β_i 分别为 φ_{i+1} 、 φ_i 对应的导杆转角, $\beta_{i+1} = (1 + 1/\rho)\varphi_{i+1}$, $\beta_i = (1 + 1/\rho)\varphi_i$ 。

2) 具有平动特性的非线性导引运动

导引机构的短暂平动功能与传动机构的短暂停歇相对应, 要求导引构件具有单向连续转动和运动停歇两种形态。导杆 CK 产生近似平动运动的条件为 $\Delta\beta = \beta_{i+1} - \beta_i = 0$ 。

3) 具有回转特性的非线性导引运动

若要求导引机构具有反转运动功能, 则导引构件具有单向连续转动和反向转动两种运动形态。导杆 CK 产生反转运动条件为 $\Delta\beta = \beta_{i+1} - \beta_i < 0$ 。

由上述分析可知, 如图 4 所示的机构的导引函数与相应回归式传动机构的传动函数相同, 则导引函数的变化规律取决于机构参数 x_1 、 x_2 、 x_3 和 ρ , 而导杆的相对位置参数 x_4 、 x_5 、 x_6 对导引点的轨迹和机构的整体尺寸影响较大。当确定基础机构的相对尺寸

参数时,导引函数的运动规律随齿轮传动比 ρ 的减小而逐渐产生如图2所示的I、II、III、IV型运动规律。

4 应用实例

设计某粉料产品加工装置,具有短暂平移导引运动功能,要求机械手通过取料位置后对水平传送带上的工件模具进行装填和刮平,每分钟加工20件产品。给定机械手的取料位置 E_1 、落料位置 E_2 、摊片刮平推至后续工位 E_3 ,表1为给定的相对位置参数。机构的总体设计要求为结构紧凑,运动平稳,整套装置由旋转电机驱动。

表1 位置参数

Tab.1 Parameters of given positions

E_i	M_i/cm	N_i/cm	$\beta_i/(^{\circ})$
E_1	(25.3,47.4)	(20.9,49.7)	152.7
E_2	(19.6,31.9)	(14.6,31.9)	180.0
E_3	(13.6,31.8)	(8.6,31.8)	180.0

基于功能模块变换的机构综合理论与方法^[18]的主要综合求解步骤如下:

- 1)提取给定导引运动任务的几何标识
- 根据平面位置几何学理论,由2个运动相关位置确定1个关联的转动极点 P_{ij} 和相应的转角 β_{ij} ,即运动几何标识。类似式(9)求解得到 E_2 、 E_3 相对于初始位置 E_1 的2个极点 P_{12} 、 P_{23} 和相应的转角 β_{12} 、 β_{13} ,所有运动几何标识极点参数 $P_{ij}(\alpha_{ij})$ 见表2,且 $\alpha_{ij} = \beta_{ij}/2$ 。

表2 运动任务、功能模块的几何标识

Tab.2 Geometric identifications for the motion task and mechanism function module

i	j	P_{ij}/cm	$\beta_{ij}/(^{\circ})$	Q_{ij}
1	2	(55.0,27.5)	27.3	0.8
1	3	(13.6,31.8)	27.3	-3.6

- 2)预选标准机构功能模块
- 对运动任务分析可知,要求实现部分平移导引功能,采用本文建立的五构件二齿轮连杆机构功能模块作为求解机构,且基础四杆机构为曲柄摇杆结构类型,预选活动齿轮的3个运动相关位置,根据式(9)确定该机构的运动标识极点 Q_{12} 、 Q_{13} ,具体参数也如表2所示。按照上述尺寸参数调整方法使得机构导引函数具有平动特性,且极点 Q_{12} 、 Q_{13} 对应的转角分别与给定运动任务的转角 α_{12} 、 α_{13} 相等,如图5所示。

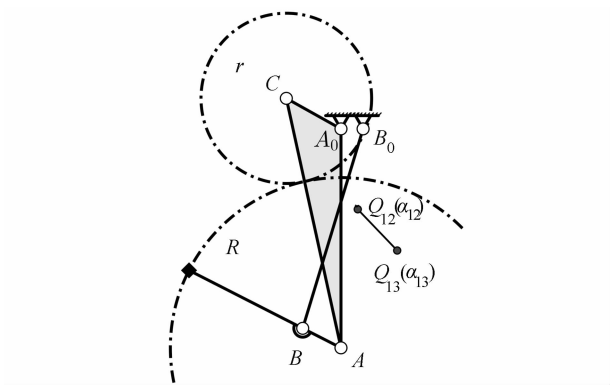


图5 预选标准机构功能模块

Fig.5 Preselected standard mechanism function module

3)建立中心射影相似变换

建立中心射影相似变换的条件是使给定运动任务和机构功能模块的几何标识一致,以功能模块的固定铰链 A_0 为相似变换中心,且几何相似变换系数为:

$$\Lambda = \lambda e^{i\delta} = \frac{P_{13} - P_{12}}{Q_{13} - Q_{12}} e^{i\delta} \tag{11}$$

式中: λ 为机构尺寸缩放因子; δ 为机构位置旋转因子,即极点线段间的夹角。

根据极点线段 P_{13} 、 P_{12} 、 Q_{13} 、 Q_{12} 的长度之比求得缩放因子 λ 为4.86,由线段之间逆时针方向的夹角得到 δ 为 300° ,求得功能模块相似变换系数 Λ 。

4)机构功能模块定位求解

以 A_0 为旋转变换中心,根据相似系数 Λ 对机构功能模块进行整体缩放和转动,然后由平移向量 $T = (68.5, 39.6)$ 对机构进行整体平移,使得运动任务与功能模块两者之间的几何标识 $P_{ij}(\alpha_{ij})$ 与 $Q_{ij}(\alpha_{ij})$ 一致,完成机构功能模块的几何定位,得到求解机构的实际尺寸与安装位置,如图6所示。

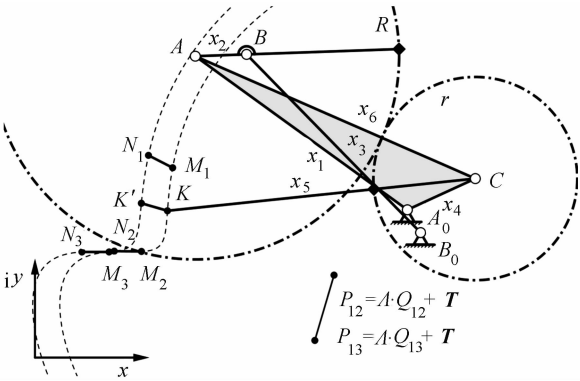


图6 导引运动任务与求解机构

Fig.6 Guidance task and solution mechanism

分析已知生产速率可知,电机输入运动转速为 $120 (^{\circ})/\text{s}$,对求解机构进行运动分析。图7(a)为

每个运动周期内导杆 CK 相对于主动件 A_0A 的角位移曲线,即导引函数曲线,表明该机构具有短暂平动导引功能,图 7(b) 和(c) 为对应的角速度和角加速度曲线。构件的实际尺寸和铰链初始位置参数见表 3。此外,齿轮传动比 ρ 为 0.5,机械手抓 KK' 与导杆 CK 的固定角为 158° 。

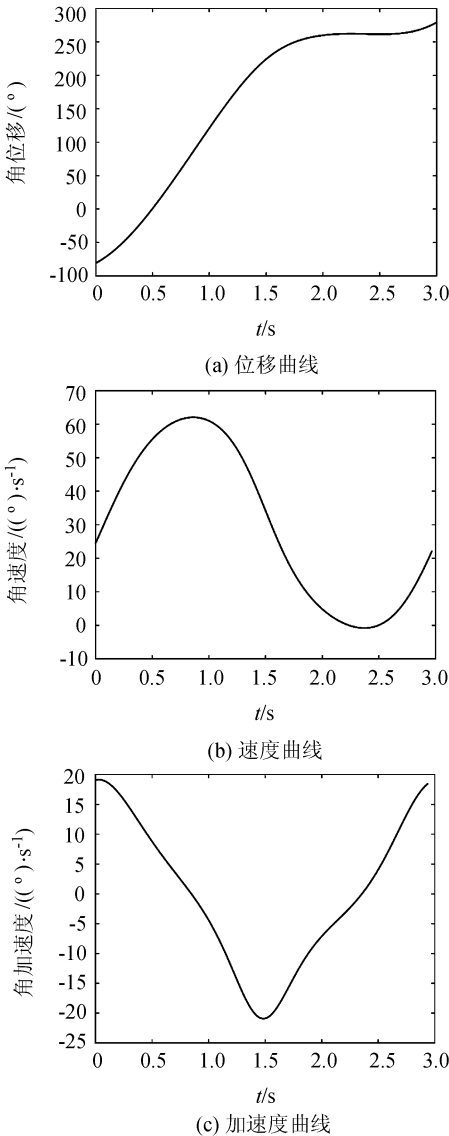


图 7 导杆运动特性分析
Fig.7 Kinematic analysis of the guide bar

表 3 求解机构的初始位置参数

Tab.3 Initial position parameters of solution mechanism

构件	l/cm	铰链点	x/cm	y/cm
A_0A	48.24	A_0	68.52	39.60
AB	9.45	A	37.51	76.56
B_0B	45.90	B_0	70.95	35.39
A_0B_0	4.86	B	46.70	74.37
AC	56.26	C	82.04	42.17
A_0C	13.77	K	25.32	47.36

5 结 论

1)提出的基于功能模块变换的导引机构广义综合方法适用于齿轮连杆组合机构,克服了基于 Burmester 理论的传统综合方法在机构的结构类型与功能特性不定性方面的缺陷。

2)由二齿轮四杆传动机构转化为导引机构,建立了全拓扑信息机构功能模块,分析了齿轮连杆机构尺寸参数与功能特性的映射规律,为预选机构功能模块尺寸参数的调整提供了指导。

3)提出的基于机构功能模块相似变换的导引机构综合方法实现了“从功能特性到机构结构”的过程,而非传统“从机构结构到功能特性”的综合过程。综合算例表明该广义综合方法形象直观,能够示明综合求解过程,易于工程技术人员掌握和理解。

参考文献:

[1] McCarthy J M, Soh G S. Geometric design of linkages [M]. 2nd ed. New York: Springer Science & Business Media, 2011.

[2] Ceccarelli M, Koetsier T. Burmester and Allievi: A theory and its application for mechanism design at the end of 19th century[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130 (7): 1 – 16.

[3] Mlinar J R, Erdman A G. An introduction to Burmester field theory[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122 (1): 25 – 30.

[4] Shrinivas S B, Sartish C. Defects in link mechanisms and solution rectification[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(9): 851 – 876.

[5] Lin Song, Modler K H, Guo Ruiqin, et al. Universal synthesis theory based on full topological information of the mechanism functional models and its applications [C]// 2012 International Conference on Mechanisms and Machine Science. Huangshan, 2012. [林松, Modler K H, 郭瑞琴, 等. 基于全拓扑信息的机构功能模块的广义综合理论及其应用方法[C]//2012 中国机构与机器科学国际会议论文集. 黄山, 2012.]

[6] Lin Song. Getriebesynthese nach unscharfen lagenvorgaben durch Positionierung eines vorbestimmten Getriebes[M]. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.

- [7] Modler K H, Lin Song. General solution of three-position problem with unsharpened position [C]//Proceedings of International Conference on Mechanical Transmissions and Mechanisms. Tianjin, 1997: 369 – 373.
- [8] Chu Jinkui, Zou Yanhuo. Topological graph descriptions and structural automatic synthesis of planar multiple joint and geared-linkage kinematic chains [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (13): 95 – 100. [褚金奎, 邹炎火. 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 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (13): 95 – 100.]
- [9] Parlaktas V, Söylemez E, Tanik E. On the synthesis of a geared four-bar mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45 (8): 1142 – 1152.
- [10] Li Guiqin, Shao Ping, Lu Lixin. Design and motion analysis of three-gear linkage [C]//2011 International Conference on Mechanisms and Machine Science. Xi'an, 2011: 72 – 74. [李桂琴, 邵萍, 陆利新. 三齿轮连杆机构传动特性分析及设计 [C]//第9届中国机构与机器科学应用国际会议论文集. 西安, 2011: 72 – 74.]
- [11] Mundo D, Gatti G. A graphical analytical technique for the synthesis of non-circular gears in path generating geared five-bar mechanisms [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2008, 32 (3/4): 487 – 497.
- [12] Sandhya R, Kadam M, Balamurugan G, et al. Synthesis and analysis of geared five bar mechanism for ornithopter applications [C]. The 2nd International and 17th National Conference on Machines and Mechanisms, Kanpur, 2015.
- [13] Modler K H, Lovasz E C, Bar G F, et al. General method for the synthesis of geared linkages with non-circular gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44 (4): 726 – 738.
- [14] 吕庸厚, 沈爱红. 组合机构设计与应用创新 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [15] Chu Zhibing, Yang Yanlong, Huang Qingxue, et al. Kinematical analysis of PR-11RⅢ level composite rod linkage mechanism [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47 (6): 165 – 171. [楚志兵, 杨彦龙, 黄庆学, 等. 基于 PR-11RⅢ级复合连杆滚动剪切机构运动学分析 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2015, 47 (6): 165 – 171.]
- [16] Lin Song, Liu Jingshuai, Zhang Yu. Planar guidance mechanism synthesis based on pole curve transformation [C]. The 14th IFToMM World Congress, Taipei, 2015.
- [17] Luck K, Modler K H. 机械原理: 分析 综合 优化 [M]. 孔建益, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [18] Hanke U, Lin Song, Modler K H. The use of similarity transformation for synthesis of mechanisms [C]. The 13th International Conference on Geometry and Graphics, Dresden, 2008.

(编辑 黄小川)

引用格式: Liu Jingshuai, Lin Song, Zhang Yu, et al. Synthesis of geared linkage mechanism for guidance task based on function module transformation [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49 (2): 225 – 231. [刘静帅, 林松, 张宇, 等. 基于功能模块变换的齿轮连杆导引机构综合 [J]. 工程科学与技术, 2017, 49 (2): 225 – 231.]