

DOI: 10.19333/j.mfkj.2017060020405

# 转杯纺落纱机械手连杆机构设计

刘传群, 何勇, 彭达, 卢斌

(东华大学机械工程学院, 上海 201620)

**摘要:**全自动转杯纺落纱系统是由多个机械手子系统组成,为了设计出满足需要的连杆机构尺寸,需要掌握各个机械手的运动轨迹曲线。通过虚拟样机与数学计算相结合的方法,给出轨迹拟合过程中所需要的离散点的位置信息。利用 Matlab 对关键点进行 3 次样条插值,得出预定轨迹的数学模型。通过对数学模型的优化,得出满足运动轨迹和设计要求的连杆机构。将所得的机构尺寸使用虚拟样机技术进行运动模拟仿真,其轨迹曲线以及关键点处的运动状态满足要求(既无刚性冲击也无柔性冲击)。该方法大大提高了设计效率,降低了机构设计的盲目性。

**关键词:**自动落纱系统;机械手;优化设计;样条插值

中图分类号:TS 103.11 文献标志码:A

## Design of linkage mechanism of rotor spinning doffing manipulator

LIU Chuanqun, HE Yong, PENG Da, LU Bin

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The automatic rotor spinning system is composed of a number of robotic subsystems. In order to design the size of the connecting rod that meets the requirement, we should to know the movement of the entire link curve. Through the combination of virtual prototyping and mathematical calculation, we can get the positional information of the discrete points that needed in the trajectory fitting process. Cubic spline interpolation in Matlab is used on those points to get the mathematical interpolation curve model of the trajectory. By using the method of optimization design, we can get the link mechanism that we need. The virtual prototype technology is used to simulate the motion of the mechanism, the track curve and the motion state of the key points meet the requirements (neither rigid shock nor flexible impact). This method greatly reduces the blindness of the mechanism design and improves the efficiency of design.

**Keywords:** automatic doffing system; manipulator; optimal design; cubic spline interpolation

转杯纺作为目前最为成熟的新型纺纱方式之一,已经在棉纤维及棉型化纤领域成功应用<sup>[1]</sup>。自动落纱系统是全自动转杯纺纱机重要的组成部分,它是一种完全代替人工实现自动落筒换管功能的装置。随着纺纱机运行速度以及自动化程度的不断提高,手动落纱的方式已经不能适应现代企业的生产要求,自动落纱装置必将得到更为广泛地应用<sup>[2]</sup>。自动落纱系统是由多个机械手组成,通过各个机械手的相互配合实现自动落筒换管的功能。机械手主

要由执行机构、运动机构和控制系统三大部分组成<sup>[3]</sup>。运动机构是机械手的重要组成部分,实现执行机构的各种摆动、移动或复合运动,一般由单轴或空间四杆机构来实现,由于受空间大小和位置的限制,要求落纱机械手系统结构紧凑、工作可靠。

连杆机构设计的综合方法一般可分为:①图解法。使用运动几何学建立起来的几何图解法,具有概念清晰、直观性强等优点,但是作图过程繁琐、求解精度和效率较低,涉及复杂的几何知识,目前很少使用。②解析法。可分为代数法和优化法<sup>[3]</sup>:代数法多用于给定精确点的轨迹问题,但由于机构独立设计参数的限制,精确点的数目不能超过待定机构的数目<sup>[4]</sup>,难以建立起显函数表示的综合方程组,

收稿日期:2017-06-06

第一作者简介:刘传群,硕士生,研究方向为智能检测与控制。通信作者:何勇, E-mail: heyong@dhu.edu.cn。

并且高阶非线性方程组求解困难;优化法是根据实际生成的轨迹曲线和目标轨迹曲线间的误差而列出非线性约束方程,然后转化为无约束优化问题求解<sup>[5-6]</sup>。优化法的求解将受到初值选取、目标函数性态以及寻优方法的影响。③图谱法。图谱法是根据图谱寻找与预期轨迹相似的连杆轨迹来实现轨迹综合,属于经验设计法,存在综合结果精度不高和寻找效率低等问题<sup>[7]</sup>。

本文以落纱机械手为例,采用电动机驱动四杆机构作为机械手的运动机构,在连杆机构设计过程中,按预定轨迹进行设计十分复杂,由于实际设计过程中,无法给出连杆准确的运动轨迹曲线,只能得到几个关键点的位置信息,给连杆机构设计带来许多不确定性。本文通过采用虚拟样机与数学分析相结合的方法,考虑机械手与其他机构的位置关系以及实际运动过程中需要避免干涉的情况,给出关键点的位置信息。通过3次样条插值的方法拟合出预期的运动轨迹曲线,然后从图谱库中选取匹配的四杆机构,并进行一定的优化设计,最终得到所需要的连杆机构。

## 1 机械手运动过程与轨迹确定

换管机械手是转杯纺纱机落纱系统中重要的组成部分之一,其功能是将新的空管从传送带上取下,将其抓取搬移到纺纱筒子架上。换管机械手能否准确、稳定、快速抓取空管,并准确释放到纺纱筒子架上,将影响整个纺纱的工作效率,因此设计出满足落纱运动轨迹要求的机械手具有重要意义。

在全自动转杯纺纱过程中,当一个工作锭位上的筒子达到规定卷绕直径时,工作锭位向系统发出信号,落纱系统启动落纱换管工作过程。处于等待位置的机械手(已经在上一次落筒换管动作完成后抓取新的空管)移动到筒子架上的空管固定点处,筒子架闭合,夹紧空管,手爪打开,释放空管,筒子架带着空管返回纺纱工作位置,机械手手爪在空管离开后闭合。机械手按预定的运动轨迹运动到空管传送带上方,此时在传送带上的空管抓取位置已经存在一个空管,空管运输过程与落纱工作同步进行。机械手移到空管抓取位置时,机械手手爪打开并调节抓取角度,随后抓取传送带上的空管。机械手抓取空管后继续按照预定轨迹运动,返回等待位置,等待下一次工作过程。换管机械手工作过程示意图如图1所示。

连杆机构结构简单、制造方便,能够实现多种运动规律和轨迹要求,满足全自动转杯纺纱机械手设计要求。通过分析换管机械手的工作流程,可以

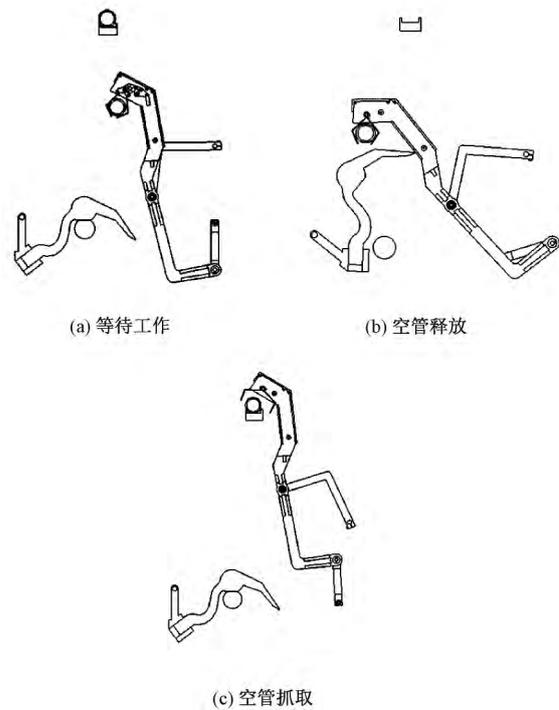


图1 换管机械手工作过程示意图

知道,整个运动过程要求满足3个精确的位置点:等待位置、抓取位置和释放位置。需要考虑机械手手爪所能打开的最大范围以及手爪所能调节的最大角度,如果机械手在空管抓取以及释放过程中的运动方向受到落纱其他子机械手系统干扰或者轨迹偏差较大,就会导致工作过程的失败。

现在已知3个精确点的相对位置以及机械手通过3个位置时的运动方向,由3个点很难得到准确的运动轨迹曲线,也就无法设计出符合要求的四杆机构。为了解决这个问题,设计中采用数学分析与虚拟样机相结合的方法,得到所需要的轨迹曲线。在自动落纱系统中存在多个机械手,各个机械手需要满足不同的运动要求,并且需要保证相互不干涉。在虚拟样机设计过程中,考虑换管机械手的结构特点,以及换管机械手与其他机械手的相互位置关系,分析各个机械手的运动轨迹,进而确定换管机械手的运动轨迹。通过分析,给出其他一些关键点的位置信息,通过所添加的关键点,最终可以确定出连杆机构的运动轨迹,换管机械手轨迹曲线如图2所示。

已知各固定铰链的位置、各杆长度 $l_i$ 及相对角度 $\phi$ 、 $\delta$ 等,通过对铰链的位置进行分析,可以得到杆件的运动轨迹:

ABCD环:

$$\begin{aligned} l_1 \cos \phi_1 + l_2 \cos \phi_2 &= x_D + l_3 \cos \phi_3 \\ l_1 \sin \phi_1 + l_2 \sin \phi_2 &= y_D + l_3 \sin \phi_3 \end{aligned} \quad (1)$$

各动铰位置:

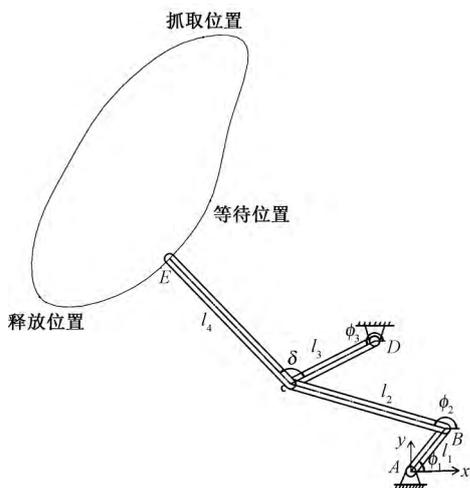


图2 换管机械手轨迹曲线

$$\begin{aligned} x_C &= l_1 \cos\phi_1 + l_2 \cos\phi_2 \\ y_C &= l_1 \sin\phi_1 + l_2 \sin\phi_2 \\ x_E &= x_C + l_4 \cos(\delta + \phi_3) \\ y_E &= y_C + l_4 \sin(\delta + \phi_3) \end{aligned} \quad (2)$$

曲线插值是指借助已有的一系列不同的离散点,选择适当的数学形式拟合变量间的关系,从而揭示变量间的内在规律,推导出离散点以外其他点数值的方法。如果已知的离散点数量较少,则无法利用数学的方法推导出其他的离散点。自动落纱机械手采用数学分析与虚拟样机设计相结合的方法,由几个已知的关键点确定整个曲线的运动轨迹,该方法可以作为实际工程中的一种设计方法。3次样条插值计算简单、稳定好并且在计算机上容易实现,而4次或者5次样条插值在处理类似的问题时,由于它们的连续性方程所引出的矩阵不再像3次样条插值那样具有对角占优的性质,因而产生了一定的困难。

抓管机械手运动过程中需要满足的关键点位置坐标如表1所示。

表1 关键点位置坐标 mm

关键点	坐标	关键点	坐标
1	(163, 346)	7	(2, 87)
2	(204, 342)	8	(6, 163)
3	(190, 260)	9	(14, 191)
4	(170, 183)	10	(32, 223)
5	(152, 151)	11	(64, 274)
6	(91, 95)	12	(103, 315)

自动落纱机械手系统采用3次样条插值的方法来进行连杆曲线的拟合,将已经给定的各个关键点的位置坐标进行插值计算,拟合出抓管机械手的预期运动轨迹如图3所示。

为了判断所获得的拟合曲线是否满足实际设计

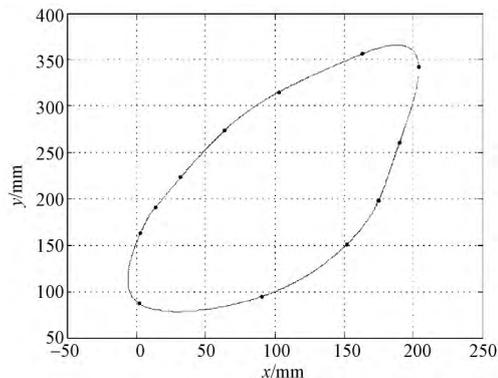


图3 抓管机械手拟合轨迹曲线

要求,将其与虚拟样机中抓管机械手的运动轨迹进行比较,如图4所示。图中虚线为3次插值样条曲线,实线为抓管机械手运动轨迹曲线。通过对机械手运动轨迹曲线和样条曲线的比较,说明所得到的样条曲线满足设计要求。

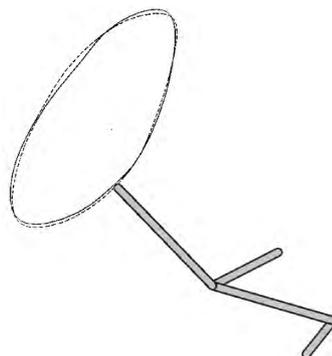


图4 抓管机械手连杆曲线与样条曲线比较

## 2 换管机械手运动轨迹数学模型

### 2.1 设计变量及目标函数

在优化设计过程中,设计变量必须是独立变量,设计变量的选取是影响优化设计结果的重要因素。随着设计变量的增加,可以优选的方案也越多,但如果选用太多的设计变量会使收敛于局部最小值的可能性增加,在高度非线性时容易导致不收敛现象的发生。随着设计变量的增加,需要进行的迭代次数也越多,求解也更为复杂,需要更多的时间进行运算。因此在优化过程中,需要合理的选取设计变量的数目。平面四杆机构如图5所示。

可以看出,对于平面四杆机构,连杆上E点的运动轨迹通常由9个设计变量决定,用矢量表示为  $X = (x_{A_0}, y_{A_0}, l_1, l_2, l_3, l_4, \phi_0, \theta)$ 。

对于四连杆机构轨迹的优化设计问题,通常以连杆点的轨迹与给定轨迹点距离总和的均值作为目标函数<sup>[8]</sup>。通过极小化目标函数,得到最优解。为了减少计算量,通常情况下把机构轨迹与预期要求实现的轨迹距离之差的平方和作为目标函数:

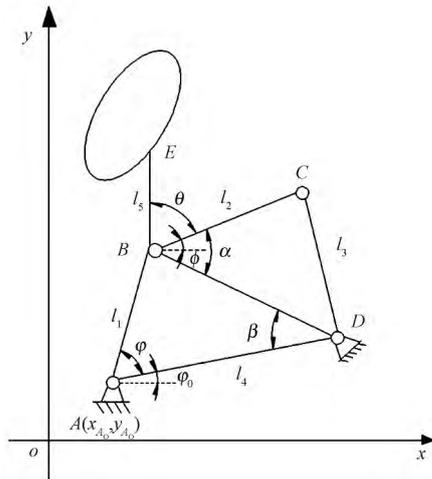


图5 平面四杆机构设计简图

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n [(X_E^i - X_Q^i)^2 + (Y_E^i - Y_Q^i)^2] \quad (3)$$

式中:  $X_E^i, Y_E^i$  为第  $i$  个综合轨迹点的坐标值;  $X_Q^i, Y_Q^i$  为第  $i$  个预期轨迹点的坐标值。

对于一般位置的平面四杆机构,即曲柄存在起始角,机架在输入曲柄转动轴线上存在偏转,且沿坐标轴方向上有偏移。连杆的轨迹曲线可以用点  $E$  的坐标来表示。

$$\begin{aligned} X_E &= x_{A_0} + l_1 \cos(\varphi + \varphi_0) + l_5 \cos(\theta + \alpha) \\ Y_E &= y_{A_0} + l_1 \sin(\varphi + \varphi_0) + l_5 \sin(\theta + \alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 + \alpha - \beta \\ \alpha &= \arccos \frac{l^2 + l_2^2 - l_3^2}{2ll_2} \\ \beta &= \arcsin \frac{l_1 \sin \varphi}{l} \\ l &= \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1 l_4 \cos \varphi} \end{aligned}$$

式中:  $\varphi$  为曲柄偏转角;  $\theta$  为机架安装角;  $\varphi, \alpha, \beta$  为辅助夹角。

## 2.2 约束条件

铰链四杆机构中,存在曲柄的条件是:

- ①最短杆长度 + 最长杆长度  $\leq$  其他 2 杆长度之和;
- ②连杆架和机架中必有一杆是最短杆。

由此可得到表达式(5):

$$\begin{aligned} g_1(x) &= l_2 - l_1 \geq 0 \\ g_2(x) &= l_3 - l_1 \geq 0 \\ g_3(x) &= l_4 - l_1 \geq 0 \\ g_4(x) &= l_1 + l_2 \leq l_3 + l_4 \\ g_5(x) &= l_1 + l_3 \leq l_2 + l_4 \\ g_6(x) &= l_1 + l_4 \leq l_2 + l_3 \end{aligned} \quad (5)$$

传动角  $\gamma$  条件为:

$$\gamma_1 = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - (l_4 - l_1)^2}{2l_2 l_3} \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - (l_4 + l_1)^2}{2l_2 l_3} \quad (7)$$

$$\min(\gamma_1, \gamma_2) \geq [\gamma]$$

## 3 换管机械手优化设计

目前,使用连杆轨迹综合的方法较为普遍。将所给的连杆轨迹按等输入角进行采样,通过相应的傅里叶变换和归一化处理得到其谐波特征参数。将特征参数与图谱库中的对应项进行比较,进而找到相应的连杆机构。通过图谱库中得到的四杆机构参数的方法较为简单,但精度难以保证。

本文所设计的抓管机械手首先采用轨迹综合的方法,从图谱库中选出对应的四杆机构<sup>[9]</sup>,以此作为优化设计的基础。由于连杆杆长按一定比例关系变化时,轨迹曲线也成一定的比例放大或缩小,曲线的形状并不改变,所以在设计过程中,将从图谱库中选出的连杆机构进行优化后,按一定比例进行放大或缩小即可得到满足要求的四杆机构。

以图谱库中的已知曲线为例,进行优化设计。已知预期轨迹上按曲柄转角等距分布的 12 个点的轨迹参数如表 2 所示,许用传动角  $[\gamma] = 40^\circ$ 。

表2 轨迹参数

曲柄转角 / (°)	X 坐标 / mm	Y 坐标 / mm
0	231.2	150.6
30	207.7	213.3
60	154.4	271.2
90	95.6	595.9
120	34.4	315.4
150	-6.6	276.5
180	-21.2	207.2
210	-4.3	126.5
240	40.2	55.6
270	89.2	12.9
300	159.8	11.4
330	211.5	53.3

在优化设计过程中,共涉及到 9 个设计变量。其中设计变量  $x_{A_0}, y_{A_0}, \varphi_0$ , 只影响轨迹曲线的实际位置,并不影响轨迹曲线的实际形状<sup>[10-11]</sup>,可将 3 个参数作为已知量处理,以减少设计变量,降低计算难度。

连杆机构的尺寸设计问题属于多元非线性约束最优化的极小值问题,可以通过采用 Matlab 中的

Fmincon 函数进行优化设计。通过将关键点的位置坐标带入目标函数中,运用优化函数进行优化,得到的换管机械手优化解如表3所示。

表3 换管机械手优化解

$l_1$ /mm	$l_2$ /mm	$l_3$ /mm	$l_4$ /mm	$l_5$ /mm	$\theta/(^\circ)$
152.11	300.20	265.27	247.42	315.07	95.79

通过使用 Matlab 中的 Fmincon 函数对四杆机构进行优化设计,得到四杆机构的杆长、角度等数据。将所得的结果带入虚拟样机中,建立四杆机构的三维造型,通过使用虚拟样机对换管机械手进行模拟,机械手的运动满足要求,所得到的换管机械手模拟运动轨迹曲线如图6所示。所得的四连杆机构通过 Admas 进行运动学的动力学分析,既无刚性冲击也无柔性冲击。

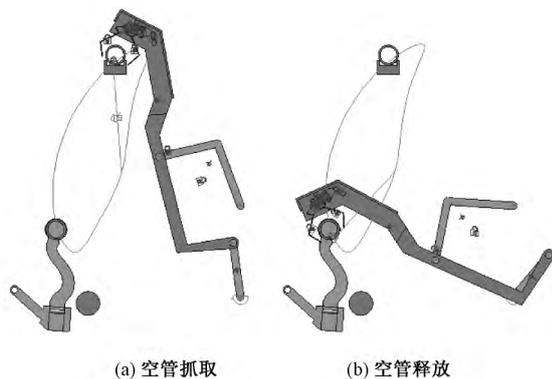


图6 换管机械手模拟运动轨迹图

## 4 结论

换管机械手是全自动转杯纺纱机自动落纱系统的重要组成部分,其运动状态决定着整个落纱过程的效率。在设计过程中,将虚拟样机与数学分析相结合,通过几个机械手的相互运动关系以及换管机械手的设计要求,给出几个关键点的信息,进而拟合出机械手的运动轨迹。通过采用 Matlab 中 Fmincon

函数求出连杆机构的优化解,将所得的优化解带入虚拟样机进行运动模拟,所得的抓管机械手运动轨迹能够满足设计要求。与传统的设计方法相比,在无法知道连杆机构准确运动轨迹的情况下,将数学分析与虚拟样机相结合,为换管机械手的设计提供了一种可行的方法,极大降低了机构设计的盲目性,提高了设计效率。

## 参考文献:

- [1] 杨玉广,焉瑞安,蔡玉琳. 涤/毛混纺转杯针织纱的开发[J]. 毛纺科技, 2017, 45(6): 15-18.
- [2] 孙桓. 机械原理[M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [3] 于红英,赵彦微,许栋铭. 平面铰链四杆机构的轨迹综合方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(1): 40-47.
- [4] 王东,陶跃珍. 基于 Matlab 三次样条插值的连杆机构轨迹再现优化设计[J]. 机械传动, 2011, 35(1): 38-41.
- [5] 褚金奎,孙建伟. 基于傅里叶级数理论的连杆机构轨迹综合方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 31-41.
- [6] 孙靖民,梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] 赵彦微. 平面四杆机构轨迹综合方法及可视化表达[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] 宋清玉,李建,殷文齐. 基于多目标的机械压力机六连杆机构设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 225-229.
- [9] 李学荣. 连杆曲线图谱[M]. 重庆: 重庆出版社, 1993.
- [10] CHANEKAR P V, GHOSAL A. Optimal synthesis of adjustable planar four-bar crank-rocker type mechanisms for approximate multi-path generation[J]. Mechanism & Machine Theory, 2013, 69(70): 263-277.
- [11] 诺顿 R L. 机械设计: 机构和机构综合与分析[M]. 陈立周,译. 北京: 机械工业出版社, 2003.