

曲柄摇杆机构运动分析与结构设计

辛悦正

青岛科技大学智能制造学院

DOI:10.32629/etd.v7i1.22219

[摘要] 曲柄摇杆机构是平面四杆机构的一种基本形式,在各种机械设备中得到大量应用。本文以机构学为基础,对曲柄摇杆机构的运动特性以及结构设计进行研究。首先根据约束条件得出曲柄存在的几何条件;然后给出位移、速度、加速度等运动学方程,着重介绍急回特性、压力角和传动角等内容;最后总结出杆长确定、最小传动角选取、结构尺寸及材料选择的设计过程。研究发现,在运动学特性和结构可行性之间进行折衷是必要的,而合理地选取传动角对于提高其工作性能具有重要意义。本文对曲柄摇杆机构的研究有利于对其进一步理解和应用。

[关键词] 曲柄摇杆机构; 运动分析; 传动角; 急回特性; 结构设计

中图分类号: TH112 文献标识码: A

Motion Analysis and Structural Design of the Crank-Rocker Mechanism

Yuezheng Xin

School of Intelligent Manufacturing, Qingdao University of Science and Technology

[Abstract] The crank-rocker mechanism is a basic form of planar four-bar linkage and is widely used in various mechanical equipment. Based on mechanism theory, this paper investigates the motion characteristics and structural design of the crank-rocker mechanism. First, the geometric conditions for the existence of the crank are derived according to the constraints. Then, kinematic equations for displacement, velocity, and acceleration are presented, with emphasis on the quick-return characteristic, pressure angle, and transmission angle. Finally, the design process is summarized, including the determination of link lengths, selection of the minimum transmission angle, and selection of structural dimensions and materials. The study finds that a trade-off between kinematic characteristics and structural feasibility is necessary, while the proper selection of the transmission angle is of great significance for improving operating performance. This study contributes to a better understanding and further application of crank-rocker mechanisms.

[Key words] crank-rocker mechanism; motion analysis; transmission angle; quick-return characteristic; structural design

引言

曲柄摇杆机构是铰链四杆机构中应用最为广泛的一种类型,它把连续转动转换成非对称往复摆动,在破碎机械、压力机、送料装置以及机床辅助机构中得到大量使用。早在机构学诞生之时就有关于它的相关内容,初期采用图解法进行研究简单明了但是准确性较差,20世纪中期发展起来的解析法大大提高了运动分析精度,近十几年来,多目标优化、弹性动力学以及含有间隙的非线性性质等方面也都取得了很大进展。但是目前大多数研究都集中在针对某一方面的应用问题上对于运动学理论的研究和设计方法缺乏系统总结。本文基于机构学的基本原理,总结各种运动分析的方法以及结构设计的过程,突出传动角的重要性,希望给工程设计带来启发。

1 曲柄摇杆机构的基本特性与曲柄存在条件

1.1 机构的几何构型与运动简图

曲柄摇杆机构由机架、曲柄、连杆及摇杆4个构件用4个转动副依次相连组成。曲柄是主动件,可沿机架上不动的轴作一周完整的旋转运动;而摇杆是从动件,在一定范围内来回摇摆;连杆一端与曲柄相连,另一端与摇杆相连,用来传递运动和动力^[1]。在运动简图上,用机架长度 d 、曲柄长度 a 、连杆长度 b 、摇杆长度 c 来代表各个构件之间的大小及其相互位置关系,从而决定该种机构的性质以及工作特性等。

1.2 曲柄存在的几何条件

曲柄整周转动条件根据Grashof定理确定,即最短杆与最长杆长度之和小于或等于另外两边之和,并且最短杆为连架杆。对

于曲柄摇杆机构中, 曲柄是最短杆, 即 a 是最短杆, 且 $a+d \leq b+c$ (其中 d 是最大的一个杆件)。满足此条件时曲柄可以做完整一圈运动, 而摇杆来回摆动; 如果不满足上述条件, 则没有曲柄能够做整周转动, 这种情况下就形成了双摇杆机构。所以Grashof条件是必须遵守的第一个限制。

1. 3机构的极限位置与摆角

机构的极限位置出现在曲柄与连杆两次共线处: 拉直共线为摇杆的一个极限位置; 重叠共线为摇杆另一极限位置; 两者之间所夹锐角就是摇杆的最大摆角 ψ 。 ψ 决定了输出行程大小, 在一定程度上反映了工作的能力, 由杆长决定, 可以在极限位置三角形内利用余弦定理计算得出。

2 运动学分析

2. 1位移分析与位置方程

建立直角坐标系, 取曲柄回转中心为原点 O , 机架在 x 轴上放置, 摇杆回转中心用 A 表示, 在 x 轴上, 它的坐标是 $(d, 0)$, 设曲柄转角是 θ_2 , 连杆与 x 轴正方向所成角度是 θ_3 , 摇杆摆角是 θ_4 , 则该机构闭环矢量方程可以写成:

$$a \cdot e^{i\theta_2} + b \cdot e^{i\theta_3} = d + c \cdot e^{i\theta_4}$$

将上式沿 x 、 y 方向分解, 得到两个实部方程:

$$a \cos \theta_2 + b \cos \theta_3 = d + c \cos \theta_4$$

$$a \sin \theta_2 + b \sin \theta_3 = c \sin \theta_4$$

当曲柄转角 θ_2 给定时, 在这个非线性方程中存在两个未知数 θ_3 以及 θ_4 , 可以通过消元或者数值迭代进行求解, 在消去 θ_3 之后就可以得到一个关于 θ_4 的一元二次方程, 该方程有两个根:

$$\theta_4 = 2 \arctan \left[\frac{(-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2})}{(C - A)} \right]$$

其中系数 A 、 B 、 C 均为 θ_2 的函数, 虽然这个公式比较繁琐, 但是对以后求解速度以及加速度打下良好基础, 在此需要说明的是, 在此式中的正负号是与机构两种不同的装配形式(即所谓的“开口”、“交叉”)有关, 在实际设计时要依据所给定机构装配方式进行选取^[2]。

2. 2速度与加速度分析

对方程组关于时间求导, 可以得出速度方程, 在此基础上再对方程对时间求一次导数, 得到如下结果。

$$-a\omega_2 \sin \theta_2 - b\omega_3 \sin \theta_3 = -c\omega_4 \sin \theta_4$$

$$a\omega_2 \cos \theta_2 + b\omega_3 \cos \theta_3 = c\omega_4 \cos \theta_4$$

其中 ω_2 是曲柄已知角速度, ω_3 、 ω_4 分别是连杆、摇杆角速度。以上方程组是一组线性方程组, 可以直接求出 ω_3 、 ω_4 的值。而摇杆角速度 ω_4 决定了机器人的输出运动速度大小变化, 在不同曲柄位置上所对应的不同速度变化对机器人的工作稳定性有重要影响。

对速度方程再次求导, 可得加速度方程:

$$-a\alpha_2 \sin \theta_2 - a\omega_2^2 \cos \theta_2 - b\alpha_3 \sin \theta_3 - b\omega_3^2 \cos \theta_3 = -c\alpha_4 \sin \theta_4 - c\omega_4^2 \cos \theta_4$$

$$a\alpha_2 \cos \theta_2 - a\omega_2^2 \sin \theta_2 + b\alpha_3 \cos \theta_3 - b\omega_3^2 \sin \theta_3 = c\alpha_4 \cos \theta_4 - c\omega_4^2 \sin \theta_4$$

当曲柄以恒定角速度旋转($\alpha_2=0$)时, 可以求出连杆角加速度 α_3 以及摇杆角加速度 α_4 , 在加速度分析中可以得到该机构

在运动过程中所受惯性力的大小与方向, 这对后续进行强度校核以及平衡设计起到重要作用。

2. 3急回特性与行程速比系数

曲柄摇杆机构一个重要运动性质是急回运动, 在摇杆来回摆动时, 工作行程(一般较慢行程)与返回行程(较快行程)平均角速度不同, 这是由于曲柄在两个极限位置处转过的角度不同所致: 曲柄由一个极限位置运动至另一个极限位置所转角度为 $\alpha=180^\circ + \theta$, 而回到原处所转角度为 $\beta=180^\circ - \theta$, 其中 θ 称为极位夹角。

行程速比系数 K 是指摇杆空回行程平均角速度与工作行程平均角速度之比, 即:

$$K = \beta/\alpha = (180^\circ + \theta)/(180^\circ - \theta)$$

从上述公式可以看出, 极位夹角 θ 越大, 急回运动越明显。急回运动对生产实践有两方面的积极意义, 在工作行程中较小的速度可以更好地保证产品质量以及平稳性; 而在空回行程中较大的速度又可以更大地提升工作效率, 但是过大急回运动往往会带来传动角不良的问题, 这需要在实际应用中加以考虑。一般情况下, K 值一般选取为 $1.1 \sim 1.5$ 之间, 在一些特定的情况下也可以放宽要求。

2. 4压力角与传动角

压力角是指作用在从动件上的力的方向与其接触点的速度方向所构成的小于九十度的角度, 在曲柄摇杆机构中一般取摇杆上 C 点处的压力角。而传动角是连杆与摇杆之间的夹角 μ (取锐角), 它们之间是互补的关系(在机构有效的工作范围内)。因为传动角容易在机构的工作图上测量以及进行计算, 在工程上常用传动角来表示一个机构传动性能的好坏。传动角是随曲柄转动而变化的, 在曲柄与机架重合或者平行的位置时, 传动角分别取得最大值 $\mu_{\max}$ 和最小值 $\mu_{\min}$, 而这个最小值 $\mu_{\min}$ 是在曲柄与机架刚好拉直或者重合的时候取得。最小传动角的位置是由各构件长度决定的, 可以利用余弦定理求出。为了使机器良好地传力, 一般规定 $\mu_{\min} \geq 40^\circ$ (对于高速或重载情况下应大于等于 50°)。如果最小传动角太小的话, 在运动过程中可能会出现卡死或者自锁的情况, 严重时会使整个机器停止运转。

3 结构设计方法

3. 1机构类型选择与杆长初步确定

曲柄摇杆机构设计从运动方案开始, 给定条件一般为摇杆摆角 ψ 、行程速比系数 K (或者极位夹角 θ)以及一些极限位置的要求, 有时还要满足曲柄或者摇杆长度的要求。杆长大致确定可以使用图解法或者解析法。图解法根据 ψ 和 θ 得到摇杆两端极限位置, 在此基础上作出铰链的位置以及测量出杆长; 而解析法则需建立含有约束条件的非线性方程组来求解杆长组合, 常用的有位移矩阵法、解析综合法以及优化法等^[3]。在初步设计时主要是为了使机构满足运动学要求而确定的基本杆长, 为下一步的设计打下基础。

3. 2最小传动角优化

传动角优化是重点。在满足曲柄存在条件、摆角以及急回

特性基础上, 应该使工作行程传动角尽可能大并且变化平缓。由于最小传动角是杆长的复杂三角函数表达式, 对其进行精确求解比较困难, 在工程上一般有两种方法: 一种是在给定摆角和行程速比系数情况下, 以最小传动角最大为目标, 把杆长比例作为变量, 用复合形法或者遗传算法等数值方法求解; 另一种是在基本杆长已知时, 改变机架和曲柄长度, 在基本保证摆角情况下改善传动角。这两种方法都需要把Grashof条件作为硬性条件。研究发现增大连杆与摇杆之比有利于增大最小传动角, 但是受到总体尺寸限制。

3.3 结构参数设计

确定运动学尺寸之后, 要进行零件结构设计, 即确定截面形状及尺寸、转动副结构形式以及总体布置等。杆件截面根据受力选择圆、方或工字形, 承受弯矩和轴向力的连杆可用空心以减轻质量。曲柄是高速旋转件, 不仅要保证足够的强度还须进行平衡设计以便减少振动。转动副的设计要考虑载荷、转速、润滑以及装配等因素, 正确选择滑动或滚动轴承并规定其配合公差与间隙等^[4]。从空间上看不能有相互干涉之处(包括杆件之间以及与其他机件间的相互干涉), 一般需画出一些重要位置的运动简图来进行检查, 如果有必要还可以改变某些铰链的位置或者改变某些构件形状等。

3.4 材料选择与强度校核

材料选择与承载能力及寿命有关, 要根据不同零件所受载荷不同而定。曲柄受交变弯矩及扭矩作用, 宜采用45钢或40Cr调质; 连杆主要承受拉伸压缩交变载荷, 可用优质碳素钢或球墨铸铁; 摇杆所受载荷不大但要求有较高刚度, 可选铸钢或铸铁; 转动副销轴及衬套要求有很高硬度以耐磨, 一般用20Cr渗碳淬火或GCr15滚动体轴承钢。强度计算要考虑极限位置以及最大速度位置等工况, 在此基础上应用动态静力法求出铰链处反力及其上各点内力分布情况, 对危险截面进行静强度和疲劳强度校核。对于高速运转机构还要考虑其临界转速以免发生共振现象。

3.5 润滑、密封与可靠性设计

良好的润滑对于保证转动副工作良好、降低摩擦磨损非常重要。低速轻载应定期添加润滑脂, 而高转速或大载荷则需要使用稀油润滑或者油雾润滑。密封形式须依据不同的润滑条件以及工作环境决定, 避免泄露以及灰尘等进入。可靠性设计主要包括磨损寿命计算、由于间隙增加引起的工作精度下降分析以及易损件维修间隔时间设定。含有铰链或者滑动轴承的转动副磨损会造成间隙变大从而使得运动不符合预期, 产生振动和噪音问题, 在设计时要留有足够的余量, 在保养制度中也要规定定期检测和调节的内容。

4 结语

本文综述曲柄摇杆机构的研究进展, 基于完整的运动学模型探讨急回特性和压力角、传动角对机构的影响以及如何根据杆长选择合适的材料进行机构的设计, 提出机构设计的本质是在保证运动要求的基础上合理匹配参数以提高传动角, 使运动和动力都有所改善, 在Grashof条件和最小传动角的约束下, 急回特性起到协调工作效率与质量的作用, 而目前大多数学者只关注运动学或者传统的方案, 对于高速轻量化背景下的弹性动力学、间隙非线性和多体耦合振动等问题关注较少, 对它们进一步的研究有利于更好地设计出高质量的曲柄摇杆机构。

[参考文献]

- [1]李增刚. 曲柄摇杆机构传动角优化设计的解析方法研究[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 112-116.
- [2]陈立平, 张云清. 计及铰链间隙的曲柄摇杆机构动力学特性分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(2): 89-96.
- [3]赵升吨, 贾谦. 高速曲柄摇杆机构弹性动力响应分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 45-53.
- [4]杨玉虎, 沈兆光. 基于轨迹综合的曲柄摇杆机构解析设计方法[J]. 机械传动, 2022, 46(4): 33-39.

作者简介:

辛悦正(2004--), 男, 汉族, 山东济宁人, 本科, 研究方向: 机械工程。