

偏心轮夹紧机构设计与力学特性研究

韩和涛 靳亚宁

河北科技学院, 河北唐山, 063200;

摘要: 偏心轮夹紧机构具有结构简单、使用便捷、夹紧效率高等特点, 已经广泛应用于机械加工、工装夹具、自动化装备等领域。论文以圆偏心轮夹紧机构为研究对象, 基于机械原理和静力学理论开展机构设计和力学分析。通过对偏心轮夹紧机构的工作原理分析, 推导自锁条件和夹紧力计算公式等基本的力学模型, 找出几何参数对机构性能的影响; 完成偏心轮、转轴、手柄等的结构设计和参数优化, 通过力学仿真验证机构的受力分布和夹紧稳定性; 分析机构在实际工况下的失效形式和改进措施, 提出兼顾自锁、夹紧力和寿命的设计方案, 证明了合理选择偏心距、基圆半径等参数可以改善偏心轮夹紧机构的力学性能和工作可靠性, 为同类夹紧机构的设计和应用提供理论和技术依据。

关键词: 偏心轮; 夹紧机构; 力学特性; 自锁条件

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.015

引言

机械夹紧机构是保证工件准确定位、加工稳定的关键部件, 影响机械加工精度和生产效率, 传统夹紧机构常采用螺旋夹紧、斜楔夹紧等, 夹紧力稳定但步骤复杂, 夹紧速度较慢。偏心轮夹紧机构通过偏心轮回转产生径向位移, 无需传动结构, 单手即可完成快速夹紧松开, 减少装夹时间, 适合中小批量、高频装夹。随着工业生产的高效化、精密化、轻量化, 对夹紧机构力学性能、结构紧凑性、操作便捷性提出了更高要求, 但部分偏心轮夹紧机构存在自锁不可靠、夹紧力不足、受力分布不均等问题, 不能广泛用于工业生产。因此, 对偏心轮夹紧机构的设计方法和力学特征进行研究, 优化结构参数、提高力学性能对于完善工装夹具设计体系、推进机械加工装备升级具有工程意义和理论价值。

1 偏心轮夹紧机构工作原理与力学基础

1.1 偏心轮夹紧机构工作原理

机械夹紧机构是确保工件准确定位、加工平稳的重要部件, 关系着机械加工精度和生产效率, 传统夹紧机构多为螺旋夹紧、斜楔夹紧等, 夹紧力固定但步骤复杂, 速度缓慢, 而偏心轮夹紧机构是由偏心轮转动产生径向位移, 无需传动结构, 一人可以快速夹紧松开, 不需装夹时间长, 适合中小批量、高频率装夹。工业生产高效化、精密化、轻量化, 对夹紧机构的力学性能、结构紧凑性、操作便捷性提出了更高要求, 而且部分偏心轮夹紧机构存在自锁不可靠、夹紧力不足、受力分布不均等问题不能用于工业生产。研究偏心轮夹紧机构设计方法、力学性能, 优化结构参数、提高力学性能, 对完善工装

夹具设计体系、促进机械加工装备升级具有重要的工程价值和理论意义。

1.2 机构力学基础与核心参数界定

偏心轮夹紧机构的力学性能由几何参数和摩擦特性共同决定, 主要包括偏心距、基圆半径、偏心轮直径、工作转角、摩擦系数等参数。偏心距是偏心轮的几何中心到回转中心之间的距离, 决定了夹紧行程、夹紧力大小; 基圆半径是偏心轮从回转中心到外缘的最小半径, 决定了机构初始间隙和夹紧稳定性; 工作转角是偏心轮由松开到夹紧的回转角, 在合理范围内均可, 力学分析中需要考虑偏心轮与工件、转轴和偏心轮之间的摩擦力, 摩擦力是机构自锁的关键力, 对夹紧机构的防松性能产生决定性影响。基于静力学平衡, 建立偏心轮受力模型, 将手柄施加的外力矩分解为夹紧力和摩擦力矩, 指明各力间的传递关系和平衡条件, 为后续推导自锁条件、计算夹紧力提供依据。

2 偏心轮夹紧机构力学特性分析

2.1 自锁条件推导与分析

自锁性能是偏心轮夹紧机构安全稳定工作的关键性因素, 决定了机构在切削外力、机械振动、冲击载荷等复杂工况下能否保持夹紧状态、绝无松脱的可能, 是机构的设计核心。圆偏心轮夹紧机构的自锁性能的本质是摩擦角和工作升角力学平衡关系, 借助偏心轮的几何特点进行推导得到的可靠的自锁边界条件。与斜面夹紧机构固定升角不同, 偏心轮工作段的升角是变化的, 在夹紧初始时回转半径最小, 升角最大, 最大升角是判断机构是否自锁的一个关键性指标, 若最大升角满足要求,

全工作段都可以实现自锁。

结合偏心轮几何参数，以偏心距、基圆半径为关键变量，构建升角与结构参数的关联模型，依据静摩擦定律、当量摩擦角理论推导得到机构自锁核心准则：偏心轮工作段最大升角不大于接触副当量摩擦角。通过分析参数影响规律可以知道，偏心距与基圆半径的比值决定了自锁性能，越小的比值最大升角就越小，机构自锁稳定性越好，但压缩夹紧行程，减小装夹适配性；越大的比值最大升角突破摩擦角限值会直接导致自锁失效，使夹紧松动甚至工件脱落。针对钢铁、铸铁等常用工件材质的摩擦系数范围，结合工程经验确定偏心轮参数合理配比区间，同时根据实际工况磨损、润滑衰减、振动冲击等不利因素引入 1.2~1.5 安全系数对自锁进行修正，进一步增强复杂工况的自锁可靠性。

2.2 夹紧力计算与影响因素分析

夹紧力是偏心轮夹紧机构装夹精度的最直观反映，是工件位置精度、加工稳定性和生产安全性较高的指标，需要通过准确的力学建模计算，利用刚体静力学平衡方程的特点，排除机构快速运转的惯性力，并通过手柄施加外力、作用力臂、偏心距、接触面摩擦系数等参数，建立夹紧力理论计算公式，求解偏心轮对工件压紧力，为机构强度校核、结构设计提供数据。

力学分析表明，夹紧力与外力矩、偏心距成正比相关，与摩擦阻力矩成负相关；外力臂越长、偏心距越大，夹紧力输出越大，但外力臂过长会造成结构臃肿、占地大、偏心距超过会破坏自锁平衡，导致事故发生。除几何结构参数外，实际工况中还会出现多种影响因素：接触副表面粗糙、润滑状态较差会加速摩擦损耗，导致有效夹紧力下降；工件材质较软会产生弹性变形，需适当提高夹紧力，保证定位精度，接触面锈蚀、杂质附着会削弱摩擦自锁能力，导致夹紧力下降。以单因素变量方法逐一分析各参数的影响规律，画出夹紧力与偏心距、力臂、摩擦系数的关系曲线，寻找兼顾自锁性、夹紧力和装夹行程的最优参数范围，为偏心轮夹紧机构的设计、工程选型提供参考。

3 偏心轮夹紧机构结构设计

3.1 整体结构方案设计

结合工程的应用需求和力学特性的分析，确定通用型偏心轮夹紧机构的整体结构，确定机构由偏心轮、转轴、手柄、基座、锁紧垫片 5 部分组成，基座为铸铁材质，刚度适中且稳定，安装载体为定位孔和安装槽，机构可在工装设备上快速安装；转轴为 45 号钢，具有抗

弯和耐磨性能，偏心轮与转轴为过盈配合，防止工作时相对转动；手柄为弧形握把，符合人体工学，表面有防滑纹路，加强操作舒适性；锁紧垫片用于偏心轮与转轴之间的转动摩擦，防止轴向窜动；整体结构采用模块化设计，可拆卸、更换，方便维修；结构外形小，占用空间小，适用各种小型工装夹具与自动化设备。确定机构的夹紧行程、夹紧力、操作力矩等技术指标，结合指标完成整体尺寸规划，满足工程安装与操作需求。

3.2 核心零部件设计与参数计算

偏心轮为主要零部件，圆偏心，材质为 40CR 合金钢淬火提高硬度和耐磨性。根据偏心距和夹紧力设定偏心距、基圆半径、外径，工作转角 90° 以内，兼顾夹紧行程和操作便利性；转轴直径根据偏心轮受力和抗弯强度设定，长度与基座和偏心轮配合，两端设限位台阶。手柄长度根据操作力矩和人体工学设定，材质为轻质铝合金减轻机构自重。完成各个零部件尺寸公差、表面粗糙度、热处理工艺等设计，确保零部件的加工精度和装配精度。针对偏心轮外缘磨损问题，可更换耐磨套，磨损后更换耐磨套即可恢复机构性能。

4 机构力学仿真与性能验证

4.1 静力学仿真建模与分析

利用有限元软件建立偏心轮夹紧机构三维仿真模型，根据实际材料属性设置材料参数，划分网格和边界条件约束，固定基座，模拟安装状态，在手柄处设置额定力矩，在偏心轮与工件的接触处设置接触对，还原真实受力条件，仿真计算机构各部件的应力分布、位移变形云图和夹紧力值，重点研究偏心轮、转轴等重点部件的应力集中部位和最大变形量。仿真结果显示偏心轮外缘接触部位应力最大，符合受力规律，且最大应力小于材料的许用应力，无塑性变形，转轴位移变形小，保证机构的夹紧精度，经比较仿真夹紧力与理论计算值，误差 5% 左右，验证了力学模型与结构设计的合理性。对应力集中部位进行圆角与壁厚的优化，进一步降低应力峰值，提高部件的抗疲劳性能。

4.2 机构性能测试与工程验证

加工制作偏心轮夹紧机构样机，搭建性能测试平台，进行自锁性能、夹紧力、耐久性测试。自锁性能测试中，对夹紧后的工件施加侧向冲击力和振动，机构无松脱，达到自锁要求；夹紧力测试中，采用压力传感器获取实际夹紧力值，与理论值和仿真值符合，达到要求；耐久性测试中，连续实施 1000 次夹紧-松开，各机构部件无

磨损、变形现象，夹紧力保持不变。将样机用于数控车床工件装夹工况，加工中工件定位正确，没有位移、振动现象，加工精度满足生产要求，机构操作简单，装夹效率较传统螺旋夹紧机构高60%以上。试验结果表明，设计的偏心轮夹紧机构力学性能稳定、结构可靠，能满足工程应用要求，且兼具通用性和互换性，能够应用于机械加工领域。

5 机构失效分析与优化改进

5.1 常见失效形式与机理分析

偏心轮夹紧机构在长期工况下容易出现多种失效现象。常见的失效现象主要有偏心轮外缘磨损、转轴弯曲变形、自锁失效、手柄断裂四种。偏心轮外缘与工件反复接触挤压，表面磨损导致夹紧行程变小、夹紧力下降，严重时会影响接触精度造成夹紧松动；转轴长期承受交变应力，材质强度不足或尺寸不合理容易造成弯曲变形，导致偏心轮回转卡顿、受力不均匀；自锁失效主要由于参数配合不合理、摩擦副磨损使摩擦系数下降而造成，无法抵抗外力；手柄受力集中且长期承受扭转力，容易在手柄与偏心轮连接处断裂。对失效部件的检测与受力分析后，发现各失效现象的主要原因，磨损是由于接触应力过大、材质耐磨性较差、变形断裂是由于应力集中、强度不足，自锁失效是由于参数匹配不合理与工况损耗导致的。

5.2 机构优化改进措施

对偏心轮夹紧机构存在的磨损、断裂、自锁失效等问题应分材质、结构、参数和工艺四个方面进行优化，材质上偏心轮外缘采用高硬度耐磨合金堆焊，提高表面硬度和抗磨粒磨损能力；转轴采用高强度合金钢，大幅提升其抗弯抗扭性能，从源头上抑制塑性变形；结构上改进偏心轮与手柄连接处圆角半径的增大，消除应力源，杜绝疲劳裂纹；偏心轮内部合理增设加强筋，在不增加重量的前提下提高整体刚度，抑制受力变形；参数结合有限元仿真及试验数据，微调偏心距与基圆半径的比值，平衡自锁可靠性和夹紧力；适当加长手柄力臂，通过杠杆原理降低操作力矩，改善人机工程。工艺上采用“调

质+表面淬火”复合热处理工艺，使部件芯部韧性与表面硬度最优匹配；控制关键尺寸的加工公差及装配精度，降低由于间隙过大导致的受力偏载；同时新增间隙补偿机构，自动抵消由于长期磨损导致的间隙变化，延长维护周期，经过测试，优化后机构的耐磨性提高40%，自锁稳定性和抗疲劳性能大幅提高，失效率大幅降低，提高了机构在重载高频工况的工程适用性与使用寿命。

6 结论

本文以偏心轮夹紧机构为研究对象，系统开展了工作原理、力学特性、结构设计、仿真验证与优化改进全流程研究，通过理论推导、仿真分析与工程测试，得出以下结论：一是明确了圆偏心轮夹紧机构的自锁条件与夹紧力计算模型，确定偏心距、基圆半径、摩擦系数是影响力学性能的核心参数，合理匹配参数可实现自锁性能与夹紧力的协同优化；二是完成了通用型偏心轮夹紧机构的结构设计与零部件参数计算，模块化结构设计兼顾了操作便捷性与维护便利性；三是通过静力学仿真与样机测试，验证了设计方案的合理性，机构应力分布均匀、夹紧力稳定、自锁可靠，满足工程应用要求；四是针对机构常见失效形式，提出了材质、结构、参数、工艺多维度优化措施，有效提升了机构的耐久性与可靠性。本文研究完善了偏心轮夹紧机构的设计方法与力学分析体系，为同类工装夹具的设计与改进提供了参考。后续可进一步开展机构动力学分析，探究高速工况下的力学响应，结合智能化技术实现夹紧力的自动调控，拓展机构的应用场景。

参考文献

- [1] 李佳梅, 王华敏, 王明明. 夹紧机构的多层次灰色理论选择算法与应用[J]. 机械设计与制造, 2026, (02): 256-259+265.
- [2] 王明明. 面向CAFD的装夹布局优化及夹紧机构选择方法[D]. 南昌航空大学, 2022.
- [3] 聂鹏, 金源, 刘春, 等. 一种耐高温(700℃)圆偏心夹紧机构的设计[J]. 机械设计与制造, 2022, (04): 230-233.