

光伏支架加工夹具设计与装夹精度优化

年天林¹ 庄然²

天津意华智能制造有限公司 天津 300409

【摘要】：光伏支架作为光伏发电系统中的关键部件，其加工质量直接影响系统的稳定性与长期运行效率。为了提高光伏支架的生产效率与精度，夹具设计和装夹精度优化成为关键环节。通过分析光伏支架加工过程中的精度要求，提出了一种高精度夹具的设计方法，并对装夹过程中可能出现的误差进行了详细分析与优化。基于数值仿真与实际试验，优化了夹具结构，减少了装夹误差，提高了加工精度。研究表明，优化后的夹具设计能够有效提升光伏支架加工的精度与生产效率，为光伏产业的制造过程提供了技术支持。

【关键词】：光伏支架；夹具设计；装夹精度；加工优化；数值仿真

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.057

引言

光伏支架作为光伏发电系统的基础组成部分，其加工精度直接决定了安装后的稳定性与长期性能。光伏支架的生产过程中，如何通过优化夹具设计和精确装夹来保证加工精度，成为了提升制造质量和效率的重要手段。现有的加工技术虽然在某些方面取得了显著进展，但在高精度要求的夹具设计和装夹精度的优化方面仍然存在诸多挑战。对此，研究光伏支架的夹具设计和装夹精度优化，能够有效解决实际生产中遇到的误差问题，推动光伏产业的制造技术发展。

1 光伏支架加工的精度要求

1.1 支架加工的主要难点

光伏支架的加工过程面临多个技术难题，主要体现在复杂的几何形状与高精度的要求上。由于支架通常由金属材料如钢或铝制成，其加工过程中需要面对形状不规则、表面粗糙度控制严格等问题。支架的精度要求不仅体现在尺寸的准确性上，还需要确保角度、孔位的正确性，这对设备的加工能力和夹具的设计提出了较高的要求。支架的表面处理工艺也要求在加工过程中避免划伤和腐蚀，因此，加工过程中的误差控制尤为重要。精度不达标的支架可能导致安装后出现结构不稳定、受力不均等问题，影响光伏发电系统的整体性能。

1.2 精度对光伏系统性能的影响

支架加工精度直接影响光伏系统的整体性能，尤其是在安装阶段，精度的误差将导致支架与光伏板的配合不紧密，从而影响光伏板的安装角度和方位。支架的倾斜或不对称可能使得太阳能板的光照接收角度偏离最佳状态，导致能量转换效率下降，最终影响整个系统的发电能力^[1]。支架的连接部分若精度不高，可能会引起接触不良或松动，从而增加系统的维护成本，甚至影响其使用寿命。保证支架加工的高精度至关重要，才能确保光伏发电系统长期稳定高效地运行。

1.3 常见的加工误差分析

在光伏支架的加工过程中，常见的误差来源主要包括设备

精度、夹具设计、材料变形及操作工艺等方面。设备精度不足可能导致加工过程中的尺寸偏差，尤其是在进行复杂的切割和打孔操作时，设备的精度波动对最终产品精度产生直接影响。夹具设计不合理，未能有效固定支架工件，也会导致装夹过程中的位置误差，从而影响加工结果。材料的热膨胀或变形在加工过程中也可能导致误差，特别是在高温环境下进行焊接或热处理时。操作工艺的不规范，包括操作人员的技术水平，也可能成为加工误差的重要原因。了解这些误差来源，有助于在设计和生产过程中采取有效的优化措施。

2 夹具设计的关键要素

2.1 夹具设计的基本原则

夹具设计的首要任务是确保工件在加工过程中保持稳定的固定状态，从而减少因装夹误差而产生的加工精度问题。合理的夹具设计需要考虑到工件的形状、加工特性、装夹方式等因素，设计时要遵循“刚性”、“稳定性”和“可操作性”三大基本原则。刚性要求夹具能够承受加工过程中产生的切削力和振动，确保工件不发生位移；稳定性要求夹具能在长时间使用过程中维持其固定性，避免因磨损或变形导致的精度下降；可操作性则要求夹具结构简单，便于安装和调节。通过优化夹具的设计，可以有效提升加工精度和生产效率，减少人工操作的不确定性。

2.2 夹具结构与精度关系

夹具结构的设计直接影响加工精度，其主要体现在工件的定位和固定方式上。夹具的定位方式有多种，例如基准面定位、孔位定位和支撑点定位等，每种方式都需根据工件的具体要求来选择。夹具的固定方式也对精度产生重要影响，合理的夹紧力能确保工件不受外力影响而发生位移，但过大的夹紧力会导致工件变形，进而影响加工精度^[2]。在夹具结构的优化设计中，合理的支撑点布局和夹紧力的均衡分布是关键，能够保证工件在加工过程中的精度稳定。夹具的热膨胀效应、刚性设计和材料选择也需要仔细考虑，以避免因结构变化导致的加工误差。

2.3 夹具设计的优化方法

夹具设计的优化方法多种多样，主要目的是提高装夹精度并提升生产效率。数值仿真技术被广泛应用于夹具设计中，通过模拟夹具与工件的接触过程，分析不同夹紧力和支撑方式对工件精度的影响，从而优化夹具结构。模块化设计方法在夹具设计中的应用也越来越普遍，它通过标准化组件的组合，既能减少设计和制造周期，又能提高夹具的通用性与灵活性，适应不同工件的加工需求。夹具的材料选择同样是优化的重要方面，采用高强度、低热膨胀的材料能有效提高夹具的稳定性和精度。在实际应用中，夹具的自适应调整功能也是一种优化方法，能够自动根据工件的特性调整夹具的夹紧力，进一步提升加工精度。

3 装夹精度优化的理论与方法

3.1 装夹误差来源分析

装夹误差通常源自多个方面，包括夹具的设计缺陷、工件的定位不准、夹紧力的不均匀分布及装夹过程中出现的变形等。在实际加工中，夹具的刚性不足或不合理的支撑点布局可能导致工件位置的偏差，进而影响加工精度。同时，工件本身的几何形状不规则、表面粗糙度过大以及装夹过程中对工件的外力施加不均匀，都可能引入额外的误差。材料在装夹过程中可能发生形变，尤其是在使用高强度材料或薄壁结构时，变形效应尤为明显。这些误差源的相互作用，往往导致加工过程中产生复合误差，需要通过精细的分析与优化来减少其对加工精度的影响。

3.2 优化方法与技术

针对装夹精度的优化，可以采取多种方法进行改进。首先通过改进夹具设计，采用高刚性材料以及合理的夹具结构，可以有效提高装夹精度。优化夹紧力的分布，避免过度集中或不均匀的夹紧力，能够减少因变形带来的误差。其次采用自适应装夹技术，根据工件的实际形状与状态调整夹紧力，确保在加工过程中维持稳定的夹持力^[3]。另一个优化方向是利用智能化装夹系统，结合传感器技术实时监测工件的定位与夹紧状态，动态调整装夹参数，确保加工精度的稳定性。通过这些技术手段的结合，能够有效提升装夹精度，确保光伏支架加工的高质量与高效率。

3.3 装夹精度的数值仿真与试验验证

数值仿真作为优化装夹精度的重要手段，通过建立装夹过程的数学模型，能够对夹具与工件之间的接触、夹紧力的分布以及工件的变形进行精确模拟。通过仿真分析，可以提前识别潜在的装夹误差来源，并根据仿真结果调整夹具设计及工艺参数，避免在实际加工中发生误差。试验验证是检验仿真结果有效性的关键步骤。通过实际加工试验，可以验证优化设计是否能有效减少误差并提升精度。结合仿真与试验两者的优点，不

仅能够提高装夹精度优化的可靠性，还能为实际生产提供数据支持与理论依据，确保设计方案在实际应用中的可行性与稳定性。

4 基于仿真的夹具设计与优化

4.1 仿真分析方法

仿真分析是优化夹具设计的重要手段，能够在不进行实际试验的情况下预测夹具与工件之间的相互作用，分析夹紧力、变形及应力分布等关键信息。通过采用有限元分析（FEA）技术，可以模拟夹具在夹紧过程中受到的外力和应力，预测其刚性及稳定性。仿真过程中，首先需要建立精确的工件和夹具三维模型，输入材料属性、外部负荷、边界条件等参数。通过求解模型中各节点的变形、应力和位移情况，可以确定夹具是否能够承受加工过程中产生的力量并有效固定工件。仿真分析的目标不仅是为了找出可能的装夹误差，还可以验证夹具设计的可行性，为实际生产提供数据支持。通过不断迭代优化设计方案，仿真能够为夹具设计的精度提升提供理论依据和优化方向。

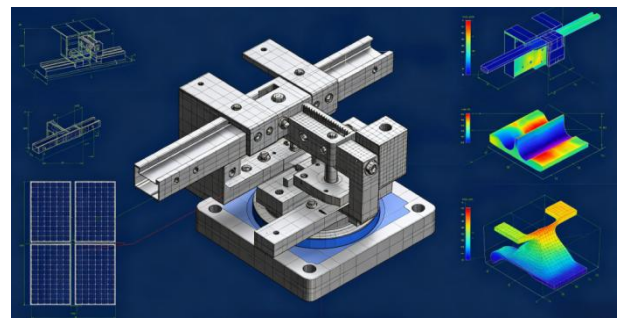


图1 有限元分析图片

4.2 夹具设计优化方案

优化夹具设计的关键在于合理安排支撑点、夹紧力的分布及夹具的刚性设计。支撑点的布置需要确保工件在装夹过程中能够得到稳定的支持，避免工件发生变形。夹具的支撑结构应避免对工件产生额外的力矩或不均匀的压力，影响加工精度。对于夹紧力的设计，必须实现均匀分布，以避免过高或过低的夹紧力对工件产生不良影响^[4]。通过数值仿真，可以精确计算每个夹具元件的受力情况，优化夹紧力的分布，使得夹具既能确保工件定位准确，又能避免因过度夹紧导致的形变或损伤。夹具的刚性设计至关重要，夹具本身需要足够刚性，以确保在加工过程中不会发生变形而影响工件位置精度。优化设计方案还应考虑夹具材料的选择，采用高强度、低热膨胀系数的材料可以显著提高夹具的稳定性。

4.3 仿真结果与实际对比

仿真结果为夹具设计提供了理论依据，但在实际生产中，仿真分析的精度必须通过实际试验来验证。仿真模型中的一些假设条件，诸如夹紧力的分布、材料的屈服特性等，在实际加

工中可能会与理论有所偏差。仿真结果必须与实际加工过程进行对比,检验夹具设计的有效性。通过对比仿真和实际加工后工件的尺寸精度、表面质量以及稳定性,可以验证夹具设计是否符合要求。如果仿真结果与实际试验数据存在较大差距,就需要对仿真模型进行调整,重新评估夹具设计方案的合理性。通过不断进行仿真与实际验证的循环,不仅能够优化夹具设计,还能及时发现潜在的设计缺陷,最终确保光伏支架加工过程中的高精度与高效率。

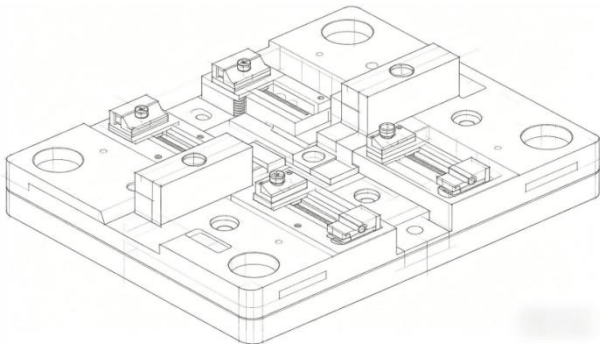


图1 多工位精密定位工装夹具

5 光伏支架加工精度提升的应用效果

5.1 优化设计对生产效率的提升

在光伏支架加工过程中,通过优化夹具设计和装夹精度,能够显著提升生产效率。优化后的夹具设计可以缩短工件的装夹时间和调整周期,从而减少每个加工环节所需的时间。具体而言,合理的夹具结构设计能够使得工件更容易被定位和固定,减少了因定位不准造成的返工次数。同时,优化后的夹紧力分布能够保证工件在加工过程中不发生形变,避免了因为误差造成的修正工作。通过数值仿真和试验验证相结合的优化流程,可以提前发现并解决潜在问题,减少了因夹具设计不当而带来的故障停机时间。生产线上的效率提升,使得整体生产能力得以提高,单位时间内的产量也随之增长。这种提高生产效

率的效果,不仅优化了生产过程,还有效降低了生产成本。

5.2 实际加工精度的改善

光伏支架的加工精度直接影响其安装效果与系统稳定性。经过优化设计后的夹具能够显著改善实际加工中的精度问题。优化后的夹具结构通过精确的定位和均匀的夹紧力,有效避免了由于夹具不稳定或夹紧力不均而产生的变形。更重要的是,数值仿真分析能够在设计阶段预测并调整可能出现的误差,从而减少了实际加工过程中由于装夹误差导致的尺寸偏差^[5]。在优化后的夹具帮助下,支架的尺寸精度和孔位精度均得到了显著提升,误差范围大幅缩小,确保了各组件在光伏系统中的准确对接与安装。这些改进提高了支架的整体性能和寿命,减少了后期维护的需求。

5.3 案例分析与总结

在某一生产企业的实践中,采用了基于仿真的夹具优化设计,成功解决了原有夹具在高精度要求下出现的加工误差问题。优化后,夹具设计的刚性和支撑点位置得到了改善,夹紧力得到了合理分配。在实际加工过程中,工件的位置误差明显减少,加工精度大幅提高,生产效率也有了显著提升。经过试验验证,优化设计不仅在数值仿真中得到了验证,其在实际生产中的表现也超出了预期。通过这一案例,不仅证明了仿真优化设计的有效性,也展示了精准设计对加工精度和生产效率的巨大影响,为更多光伏支架的制造提供了有力的技术支撑。

6 结语

夹具设计与装夹精度优化对光伏支架加工的提升具有重要意义。优化后的夹具设计不仅能有效减少加工误差,还能显著提高生产效率,保证光伏支架加工的高精度和高稳定性。结合仿真分析与实际试验验证的方法,能够确保设计方案的可靠性与适用性。未来,随着技术的不断进步,夹具设计和装夹精度的优化将为光伏产业的高效生产提供更加坚实的支持。

参考文献:

- [1] 刘海军,杨颖,陶华.联动式光伏支架结构优化设计方案[J].光源与照明,2025(10):157-159.
- [2] 张世洋,黄模佳,张志炫,杨新航,肖先志,赵腾飞,李爱民.柔性光伏支架承重索张力与线形计算式的推导与应用[J].南昌大学学报(理科版),2025,49(6):621-628+636.
- [3] 傅昌勇.山地柔性支架光伏发电项目施工中的技术难题与解决方案[J].低碳世界,2025,15(8):121-123.
- [4] 孟庆法,严亮,马亮,陈星宇.基于PVsyst的倾角可调固定式光伏支架的调节次数及倾角偏差影响分析[J].太阳能,2024(5):76-82.
- [5] 尚仁杰,蒋方新,孙悦,王国辉.考虑几何非线性的柔性光伏支架变形与刚度分析[J].力学与实践,2023,45(2):395-400.