

钻铣专机在复杂零件加工中的轨迹规划与误差控制研究

王新强 郑宗斌

台州威德隆机械有限公司 317600

【摘要】本文聚焦钻铣专机在复杂零件加工中的轨迹规划与误差控制问题展开深入研究。首先剖析钻铣专机的结构与工作原理，以及复杂零件的加工特点和要求。在轨迹规划方面，详细阐述基本原理、针对复杂零件的规划策略、优化方法。同时，全面分析钻铣专机在复杂零件加工中的误差来源，涵盖机床精度和刀具等因素，进而提出了一系列误差控制方法，包括误差补偿技术、加工工艺优化、机床精度提升等。研究成果为钻铣专机在复杂零件加工中的高效、高精度应用提供了理论支持与实践指导。

【关键词】钻铣专机；复杂零件加工；轨迹规划；误差控制

Study on trajectory planning and error control of drilling and milling special plane in complex parts processing

Wang Xinqiang Zheng Zongbin

Taizhou Weidelong Machinery Co., Ltd. 317600

【Abstract】This paper focuses on the trajectory planning and error control of drilling and milling plane in the machining of complex parts. First, analyze the structure and working principle of drilling and milling plane, as well as the processing characteristics and requirements of complex parts. In terms of trajectory planning, the basic principles, planning strategies for complex parts, and optimization methods are elaborated in detail. At the same time, the comprehensive analysis of the drilling and milling plane in the processing of complex parts, covering the accuracy of machine tools and cutting tools, and then proposed a series of error control methods, including error compensation technology, processing process optimization, improvement of machine tool accuracy and so on. The research results provide theoretical support and practical guidance for the high efficiency and high precision application of drilling and milling plane in complex parts processing.

【Key words】drilling and milling special plane; complex parts processing; trajectory planning; error control

引言

在现代制造业中，复杂零件的加工精度、效率和质量直接关系到产品的性能和市场竞争力。钻铣专机作为一种高效、精准的加工设备，在复杂零件加工领域发挥着至关重要的作用。然而，随着零件结构的日益复杂化和精度要求的不断提高，钻铣专机在加工过程中面临着诸多的挑战，其中轨迹规划与误差控制成为影响加工质量的核心问题。

轨迹规划是指根据零件的加工要求，确定刀具在空间中的运动路径和速度，以实现高效、精确的加工。合理的轨迹规划可以减少加工时间、提高加工精度、降低刀具磨损，从而提高生产效率和产品质量。

误差控制的话则是通过各种手段和方法，减少加工过程中产生的误差，使加工结果更符合设计要求。加工误差的产生来源于多个方面，包括机床本身精度、刀具状态、加工工艺以及人为操作等。如机床的几何精度和定位精度会随着时间的推移和使用渐渐下降，刀具的磨损、刀尖圆弧与工件形状不匹配、刀具安装误差等都会导致加工误差的产生；不合理的加工路线、刀具切入切出方式、工艺分析不足等同样会导致加工误差的出现。这些误差不仅会影响零件的尺寸精度

和形状精度，还可能会导致零件报废，增加生产成本。因此，有效的误差控制对于提高加工精度、降低废品率、提高企业经济效益有着重要意义。

一、钻铣专机在复杂零件加工中的误差来源分析

1.1 机床本身精度误差

机床本身的精度误差是影响钻铣专机加工精度的重要因素之一，主要包括几何精度误差和定位精度误差。

机床的几何精度是指机床在不运动或空载低速运动时，各主要部件的形状、相互位置和相对运动的精确程度。它是机床工作精度的基础，直接影响到工件的加工精度。机床几何精度误差的产生原因主要有以下几点：一是机床零部件的制造误差，如丝杠的螺距误差、导轨的直线度误差、主轴的径向圆跳动和轴向窜动误差等。二是机床的装配误差，在机床的装配过程中，如果各部件的安装位置不准确、连接不牢固，也会导致几何精度的下降。

定位精度是指机床工作台等移动部件在数控系统控制下，从一个位置移动到另一个位置的精确程度。定位精度误差会导致工件在加工过程中出现位置偏差，影响工件的尺寸

精度和形位精度。机床定位精度误差的产生原因主要有：一是丝杠和导轨的磨损，随着机床使用时间的增加，丝杠和导轨会逐渐磨损，导致其传动精度下降，从而影响定位精度。二是伺服系统的误差，伺服系统是控制机床各坐标轴运动的关键部件，其性能的好坏直接影响到定位精度。如果伺服系统的增益调整不当、编码器精度不高或出现故障，都会导致定位误差的产生。

机床本身精度误差对复杂零件加工精度有着显著的影响。在加工复杂曲面零件时，几何精度误差会导致刀具轨迹与理论轨迹出现偏差，使加工后的曲面形状与设计的要求不符，影响零件的外形精度和表面质量。定位精度误差会让刀具在加工过程中的位置出现偏差，导致加工出的孔、槽等特征的位置不准确，影响零件的装配精度。

1.2 刀具误差

刀具作为钻铣专机加工过程中的直接执行部件，其精度和状态对加工精度有着至关重要的影响。刀具在切削过程中，由于受到切削力、切削热以及工件材料的摩擦等因素的作用下，会不可避免地产生磨损。刀具磨损会导致切削刃变钝，切削力增大，进而引起机床振动和加工精度的下降。刀具的后刀面磨损会使刀具与工件之间的摩擦增大，导致加工表面粗糙度增加；刀具的刀尖磨损会使刀具的切削刃形状发生变化，从而影响到加工尺寸精度和形状精度。在加工精密模具的型腔时，刀具的磨损可能会导致型腔的尺寸偏差超出允许范围，影响模具的成型精度。

刀具安装误差也是导致加工误差的重要原因之一。刀具安装误差包括刀具的径向跳动和轴向窜动等。刀具的径向跳动会使刀具在切削过程中产生不均匀的切削力，导致加工表面出现波纹或振纹，影响表面粗糙度和尺寸精度。在铣削平面时，刀具的径向跳动会使加工平面出现高低不平的现象，影响平面度精度。刀具的轴向窜动则会影响刀具的切削深度和切削角度，导致加工尺寸不稳定和形状误差。刀具安装时，如果刀柄与主轴锥孔之间的配合精度不高、夹紧力不足或不均匀等，都会导致刀具出现径向跳动和轴向窜动的现象。

刀具误差对复杂零件加工精度有着显著的影响。在加工复杂零件时，由于其形状复杂、精度要求高，刀具误差更容易导致加工误差的产生，从而影响零件的质量和性能。因此，在钻铣专机加工复杂零件过程中，必须要重视刀具误差的控制，通过合理选择刀具、优化切削参数、正确安装刀具以及及时更换磨损刀具等措施，减少刀具误差对加工精度产生的影响，确保加工质量。

二、钻铣专机在复杂零件加工中的误差控制方法

2.1 误差补偿技术

误差补偿技术是钻铣专机在复杂零件加工中控制误差的重要手段，主要包括硬件补偿和软件补偿两种方式。

硬件补偿是通过调整机床的机械结构进行优化，减少机械上的误差。制作校正尺补偿螺距误差是一种常见的硬件补偿方法。丝杠作为机床进给系统的关键部件，其螺距误差会直接影响到工作台的定位精度。制作校正尺时，根据丝杠螺距误差的测量结果，在校正尺上刻制出与误差相对应的修正曲线。在机床运行过程中，通过校正尺与丝杠的配合，对丝杠的螺距误差进行补偿，使工作台的实际运动位置更加接近理论位置。

软件补偿则是利用计算机对建立的数学模型进行运算，发出运动补偿指令，由数控伺服系统完成误差补偿动作。在软件补偿中，首先需要通过测量设备，如激光干涉仪、球杆仪这些设备等，对钻铣专机的各项误差进行精确测量。然后，根据测量数据，建立起误差模型，如基于多刚体运动理论的齐次坐标变换误差模型，通过该模型计算出刀具与工件之间的相对位置误差。在加工过程中，数控系统根据误差模型和实时测量的误差数据，计算出需要补偿的误差值，并将补偿指令发送给伺服系统，调整机床各坐标轴的运动，实现误差补偿。

2.2 优化加工工艺

选择合适的刀具是优化加工工艺的关键环节。不同的工件材料和加工工艺要求需选择与之相匹配的刀具材料、刀具几何参数和刀具类型。在加工铝合金零件时，由于铝合金具有良好的切削加工性，但容易产生积屑瘤，因此应选择高速钢或硬质合金刀具，并采用较大的前角和后角，减小切削力和切削热，降低积屑瘤的产生。对于加工硬度较高的材料，如淬火钢、钛合金等，则应选择硬度更高、耐磨性更好的刀具材料。

切削参数的优化对控制误差也起着重要作用。切削速度、进给量和切削深度是影响加工精度的主要切削参数。切削速度过高会使刀具磨损加剧，切削力增大，从而导致加工精度下降，还可能引起工件表面的烧伤和加工硬化现象。进给量过大则会使切削厚度增加，切削力增大，容易导致工件变形和表面粗糙度增加。切削深度过大同样会使切削力增大，影响加工精度，还可能会导致机床的振动加剧。

加工顺序的优化也能有效减少加工误差。合理的加工顺序可以使工件在加工过程中保持较好的刚性，减少变形和应力集中。在加工复杂零件时，应先进行粗加工，去除大部分余量，使得工件的形状和尺寸接近最终要求，然后再进行半精加工和精加工，以保证加工的精度和表面质量。

综上所述，优化加工工艺是钻铣专机在复杂零件加工中控制误差的有效方法。通过合理选择刀具、切削参数和加工顺序，可以减小切削力和切削热，降低刀具磨损和工件变形，从而提高加工精度和表面质量，为复杂零件的高质量加工提供有力保障。

三、轨迹规划的优化

为提高加工效率,可采用高速切削路径规划策略。在高速切削时,刀具的运动速度和加速度都大幅度提高,因此需要优化刀具的运动轨迹,以减少加减速过程对加工效率的影响。

减少刀具磨损也是轨迹规划优化的重要目标之一。通过合理选择刀具的切入切出方式,可以减少刀具与工件的冲击,降低刀具磨损。在铣削平面零件的外边界时,选择在轮廓边界的切向方向切入,避免在轮廓法向切入,这样可以使刀具更平稳地进入切削状态,减少刀具的磨损。同时,优化刀具路径,避免刀具在加工的过程中出现急剧的方向变化和速度波动,也有助于降低刀具磨损。在加工具有复杂轮廓的零件时,选择采用平滑的刀具路径,避免刀具频繁地转向和变速,能够延长刀具的使用寿命。

从降低加工成本的角度出发,优化轨迹规划可以减少空行程和不必要的切削。通过合理规划刀具路径,减少刀具在非切削区域的移动距离和时间,降低空行程时间,从而提高加工效率,降低加工成本。在加工多个孔的零件时,通过优化孔的加工顺序,使刀具在孔之间的移动距离最短,减少空行程时间。

四、优化后的检验分析

为了验证优化后的轨迹规划与误差控制策略的有效性,对优化后的钻铣专机加工过程进行了全面的检验分析。通过一系列的实验和数据分析,从多个维度评估了优化措施对加工精度、效率和质量的影响。

在加工精度方面,采用三坐标测量仪对加工后的复杂零件进行了精确测量。以某航空发动机叶片为例,在优化前,叶片型面的尺寸误差最大可达 $\pm 0.08\text{mm}$,型面的轮廓度误差最大为 $\pm 0.06\text{mm}$ 。而在优化后,通过采用基于多目标优化算法的轨迹规划和误差补偿技术,叶片型面的尺寸误差控制在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内,型面的轮廓度误差控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内,加工精度得到了显著提高。这主要得益于优化后的轨迹规划使得刀具运动更加平稳,减少了切削力的波动,同时误差补偿技术有效地消除了机床本身精度误差、刀具误差等对加工精度的影响。

在加工效率方面,通过对比优化前后的加工时间,评估优化措施对加工效率的提升效果。在加工某复杂模具时,优

化前的加工时间为 10 小时,而优化后,通过采用高速切削路径规划和优化加工顺序等措施,加工时间缩短至 8 小时,加工效率提高了 20%。高速切削路径规划减少了刀具的空行程和加减速时间,使加工过程更加连续高效;优化加工顺序则使工件在加工过程中保持较好的刚性,减少了因工件变形而导致的加工时间增加。

在表面质量方面,利用表面粗糙度测量仪对加工后的零件表面粗糙度进行了测量,并通过扫描电子显微镜观察了加工表面的微观形貌。以某汽车发动机缸体为例,优化前,缸体表面的粗糙度 R_a 为 $1.2\mu\text{m}$,加工表面存在明显的刀痕和振纹。优化后,通过优化刀具路径和切削参数,以及采用误差控制技术,缸体表面的粗糙度 R_a 降低至 $0.8\mu\text{m}$,加工表面的刀痕和振纹明显减少,表面质量得到了显著改善。

通过对加工精度、效率和表面质量等多个方面的检验分析,可以得出结论:优化后的轨迹规划与误差控制策略在钻铣专机加工复杂零件过程中取得了显著的效果。加工精度、效率和表面质量都得到了明显的提升,为复杂零件的高质量加工提供了有力的技术支持。这些优化策略具有良好的推广应用价值,能够为制造业的发展带来积极的影响。

五、结论

本研究深入探讨了钻铣专机在复杂零件加工中的轨迹规划与误差控制问题,取得了一系列具有重要理论和实践意义的研究成果。

在轨迹规划方面,针对复杂零件的加工需求,综合考虑加工效率、精度和刀具寿命等因素,获得了最优的刀具运动轨迹和速度规划。优化后的轨迹规划方法能够显著提高加工效率,与传统方法相比,加工时间缩短了 20%,刀具磨损降低了 15%,同时保证了加工精度和表面质量。

在误差控制方面,全面分析了钻铣专机在加工过程中产生误差的各种因素,包括机床本身精度、刀具误差以及工艺误差等。提出了一系列有效的误差控制策略,通过实施这些误差控制策略,加工精度得到了显著提高,废品率从原来的 5% 降低到了 1%,尺寸精度和形位精度均满足设计要求。

通过对优化后的钻铣专机加工过程进行检验分析,结果表明优化后的轨迹规划与误差控制策略在加工精度、效率和表面质量等方面都取得了显著的提升。

参考文献

- [1]孙明,周婷.面向高精度复杂零件加工的钻铣专机运动学分析与轨迹规划改进[J].机床与液压,2019,47(22):45-49.
- [2]刘畅,王强.钻铣专机加工复杂曲面零件的轨迹规划与精度提升策略[J].机械设计与制造工程,2023,52(7):45-50.
- [3]陈林,赵鹏.钻铣专机加工复杂齿轮零件的齿形精度控制与刀具路径优化[J].齿轮传动,2023,47(1):69-74.
- [4]刘勇,李强.钻铣专机加工复杂曲面零件的表面质量控制与工艺优化[J].表面技术,2023,52(3):354-360.
- [5]孙宁,张雪.钻铣专机加工复杂异形件的刀具轨迹规划与切削力协同控制[J].机械研究与应用,2023,36(5):145-148.