

振动)是基本误差来源。中国机床产业联盟(CMTBA)在2024年公布的产业研究成果显示,国产高端五轴数控机床一般要求达到0.005 mm以上,然而在全载荷、长周期加工条件下,其精度保持能力仍然是个难题。在工具的角度,刀具的径向跳动和磨损(后刀磨损量VB大于0.3 mm,对加工精度有重要的影响)和夹紧刚度是制约切割成形品质的重要因素。如TC4型钛合金材料,当刀具的进给速度由0.08 mm/z提高到0.12 mm/z时,刀具受的切削力会增加30%,从而引起刀具让刃,从而造成侧壁垂直度超标。当切削时,由于切削作用,导致了材料内部的再均衡,导致了零件的塑性变形,高达1 mm以上。本项目拟采用三轴测量机(CMM)采集实物点云并与CAD理论模型对比,以彩色云图的形式将误差的尺寸和分布以可视化的形式表现出来,其“物理精度”符合ASMEY14.5、ISO1101等的形位误差指标^[3]。

(三)从“数字精度”到“物理精度”的传导与衰减

“数字精度”向“物理精度”的传递不是一种非破坏性的线性传输,它包含了一条由信息损耗与错误引起的复合链式结构,其关键问题是:设计与加工之间存在着“信息断层”。虽然STEP(ISO 10303) AP242主要支持CAD/CAM之间的非破坏性信息传递,但在工程应用过程中,由于存在着大量的参数特性与相互制约,在转化过程中往往会将其“拍平”成静止的(B-Rep)形状,从而使传统的测量方法(例如,某一孔洞的同轴限制究竟对应于哪一类)失效。然后,在CAM(Computer Aided Manufacturing)中,工程师依据经验选取刀具、切削参数和加工路径(G代码),这一流程对人工判断的要求较高。一种普遍的错误来源是没有充分考虑机—刀—工件的动力学特征,所形成的轨迹有很大的潜在偏差,但在转弯时或者由于切削方法的选择而导致了过度的切削力,从而引起了机械振动,从而导致了过切和欠切,从而导致了实际的加工精度与设计要求有很大的偏差。根据业界估计,到了2025年,全世界将会因为机械振动造成零部件的超差性废弃,造成的经济损失高达几十亿美金。最终,利用CNC伺服回路的响应特性、机床实际的形位误差补偿文档(例如节距补偿表格)对G码命令进行二次校正或变形^[4]。

二、实现设计与制造协同精度控制的核心路径与方法

(一)基于模型定义(MBD)的单一数据源建设

建立一个以模式定义为基础的统一数据源,是实施

协作管控的基础。MBD技术突破了以2D工程图纸作为加工基础的常规加工方式,将“轻量化”的几何与几何等非几何信息(如尺寸公差、形位公差GD&T、表面纹理、工艺要求、材质规格等)纳入3D建模中,从而得到一套含有产品全部定义的“轻量化”数据库。该数据模式是从设计、工艺规划、工艺加工到检验过程中唯一权威的数据来源,保证了数据的完整性和完整性。在生产实践中,设计者采用西门子Teamcenter、达索ENOVIA等的PDM(Product Data Management)来发行和控制MBD模式,使其满足ASMEY14.5和ISO16792的要求。通过对三坐标测图(CMM)进行数控编程、工装设计以及CMM检验等工序的编制,有效地解决由于两种制图方法产生的歧义、不同版本或变换(如STEP、IGES等)造成的信息缺失和错误^[5]。《世界制造业数字化变革趋势》显示,到2024年,应用MBD的公司,其工程更改过程的效率将提高40%左右,而由于不对称的设计和和生产造成的返工减少了25%(如表1所示)。

表1 MBD单一数据源建设的主要成效

评估维度	提升成效	数据来源/参考
工程变更效率	提升约40%	全球制造业数字化转型趋势报告2024
设计返工率	下降近25%	全球制造业数字化转型趋势报告2024
数据一致性	实现100%统一	MBD技术白皮书2025

(二)加工知识嵌入设计规则的早期干预

将工艺知识以一定的规则化方式植入到产品的设计中,是一种预防策略,可以有效地提高产品的准确性。其关键是,利用KBE技术,将生产过程中的各种限制与能力,转换成可执行的规则与智能模板,避免了无法加工或无法确保产品质量的问题。在实际的工作中,企业要对自己的生产知识进行系统的整理与巩固,比如:用直铣刀进行内膛的最小圆角半径;数控车床对深宽比超过5的深孔进行稳定切削,对特殊材料进行热处理时的变形因子等进行稳定的切削。然后,利用先进的参数化CAD系统,如CATIA, NX, Creo等,将其转化为具有一定逻辑关系的表达式和表达式,并将其与企业定制的模式、属性相结合。在设计者建立模型的时候,由该系统进行即时的检查和介入。当某一类铝合金构件,其尺寸大于50 mm、直径不足8 mm时,其内部会出现“变形”“变形”等警示信息,并提出“钻孔—铰—镗”组合方式,或者干脆提出“10 mm口径”的方案。产业大数

据研究显示,先进制造业采用该方法可使新产品的的设计缺陷发生率在2025年前下降30%以上,大大降低后续为保证精度所采取的高成本、高成本的过程矫正手段,达到由“设计后确认”向“设计中防范”的转化^[6]。

(三) 融合加工动力学的虚拟仿真与公差优化

虚拟模拟是联系“数字设计”和“实体”的重要纽带,将工艺过程动态融入“预知”和“最优”中,是“精确协调”的核心技术。这种方法突破了单纯以几何形状为基础进行刀具轨迹确认的局限,而是直接接触及工艺的实质。该方法的主要工作是:通过HyperMill、Mastercam等CAM系统对数控系统进行预处理,并将生成的数控程序输入到专门的虚拟模拟系统(如VERICUT)中。建立与实际生产现场一模一样的“数字孪生”环境,实现对五轴联动机床三维建模和各轴行程、主轴转速范围、进给加速度等运动学参数的精确输入。同时,通过建立切削力模型、机床动力学模型以及刀具的形变模型,实现高精度的切削加工仿真。数值模拟可以准确地模拟加工过程中,由于加工过程中受到的外力作用而产生的刀-工件变形、颤振以及由于加/减速而产生的四象限隆起等微小误差。基于2024年某高精度零件的工艺研究,采用动态模拟方法进行的最优工艺可使零件形位精度下降15%。

(四) 测量数据反馈与模型的闭环修正

将测试结果与设计模型相结合,构建闭环,形成一个智能化闭环,以达到精确控制的不断自寻优。突破传统“设计-加工-检验”环节中单一的“设计-加工-检验”环节中的数据流,将大规模的测试结果转换成有价值的资源,推动建模和过程的迭代。该方法采用三坐标测量器、激光扫描仪或联机检测设备获取被测零件的真实尺寸,形成高精度三维点云。利用PolyWorks、GOM Inspect等专门测量工具,实现点云与MBD的自动匹配,形成综合的误差图谱及检测结果。其中一个重要步骤就是,将偏离数据进行分类,将其作为判定是否通过的“终审判决”,并将其系统地存入中心品质数据库(QMS)。采用统计流程控制(SPC)技术,针对系统误差(如:X轴上有0.005 mm的误差,或者同一种零件的

加工中,总是有一种特定的形变方式),来辨识系统误差。最近的科技进步使得我们可以通过一个指令码或者一个插件来把这个分析的结果反馈到一个设计师的身上。

结束语

综上所述,机械设计中参数化建模与机械加工精度的协同控制将为提高零件品质一致性和零件性能,推动智能制造与工业互联网的深入发展奠定重要的理论与技术支撑。在产品的开发过程中,将产品的生产可行性和产品的准确性作为一个重要的指标,可以缩短产品的开发周期,降低产品的成本,提高企业的市场竞争能力。随着人工智能、数字孪生和物联网等新兴科技的深入发展,工业机器人的设计和生产将朝着一体化、智能化方向发展,对其精度的调控要求越来越高。通过该项目的研究和应用,为我国制造业高质量发展,实现关键装备的自主控制奠定基础,进而为我国的科技自立和产业提升做出贡献。

参考文献

- [1] 韩立洋, 王涛, 石佑敏, 等. 典型机械机构的参数化设计与应用研究[J]. 内燃机与配件, 2025, (14): 70-72.
- [2] 石瑞虎, 张立勇. 自动化技术在冶金机械设计制造中的应用[J]. 山东冶金, 2024, 46(05): 84-86.
- [3] 陈善龙, 李桂花, 王其营. 简析数字化技术在机械设计中的应用与发展趋势[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(07): 1-5.
- [4] 高壮利. 基于模板和参数化的地面机械产品快速设计方法研究[J]. 中国机械, 2024, (09): 47-50.
- [5] 乐治后, 王琳, 吴家葵. 现代设计方法在农业机械设计中的应用综述[J]. 四川农业与农机, 2024, (01): 36-38.
- [6] 郭天丽, 刘晨阳, 胡文文, 等. 参数化机械密封中静环摩擦副相容性设计方法[J]. 润滑与密封, 2022, 47(09): 118-124.