《航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心》编制说明

1 任务背景

航空发动机叶片作为航空动力系统的核心部件，其复杂曲面几何精度与表面质量直接影响发动机的气动效率与可靠性。传统磨削设备在五轴联动控制、微米级定位精度及动态稳定性等方面难以满足叶片曲面的高精度、高效率加工需求，导致加工一致性低、工艺调整频繁，甚至引发叶片疲劳失效风险。

随着多轴联动数控技术、超精密伺服控制及智能温控系统的突破，航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心通过五轴同步联动（X/Y/Z/A/C 轴）、高刚性蜂窝结构床身、超精密主轴系统及闭环光栅反馈控制，实现了叶片复杂曲面的全序集成加工。该类设备集成智能冷却系统、砂轮动态平衡补偿及油雾回收装置，显著提升了加工稳定性与环保性。同时，其支持在线检测与自适应修整功能，可实时修正加工误差，确保叶片曲面轮廓精度与表面质量的一致性。

然而，当前行业对叶片磨削中心的技术要求缺乏专项标准，设备设计、制造与验收依赖企业经验或通用机床规范（如 GB/T 17421 系列），导致设备性能差异大、兼容性不足，甚至存在安全隐患（如防护等级未达 IP67、电气系统抗干扰性弱）。现有标准对多轴联动精度、复杂曲面加工适应性及智能化功能等关键指标未作明确规定，制约了高端装备的产业化应用。

为此，制定《航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心》标准，旨在规范设备核心技术参数（如多轴动态精度能力）、功能要求（如五

轴联动算法、砂轮寿命预测）及安全性能（如机械防护等级、电气EMC 抗扰度），为研发、制造与验收提供科学依据。通过标准化推动技术创新与产业链协同，降低设备维护成本，提升我国航空发动机关键零部件的自主制造能力，助力高端装备迈向国际领先水平。

2 任务来源

本标准编制任务来源于浙江省自动化学会于2025年2月28日下达的浙自学标委[2025] 1号《浙江省自动化学会标准起草任务书》，归口单位为浙江省自动化学会标准技术工作委员会，标准名称为《航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心》，起草任务书号：ZJAA2025001。

3 主要起草单位和工作组成员

本标准负责起草单位：杭州莱格曼特科技有限公司。

本标准参与起草单位：浙江科技大学、杭州芝元机电有限公司、湖南大学、杭州电子科技大学、浙江德欧电气技术股份有限公司、苏州华正科技有限公司、杭州合大铸造有限公司、杭州明捷机械有限公司、浙江诚创精密机械股份有限公司、浙江汉威阀门制造有限公司。

本标准主要起草人：曹荣、李强、徐海峰、刘静、胥宗涛、安晨辉、倪敬、蒙臻、张振、章辉、李飞、王善良、魏铭、来国伟、王西奎、李依、徐华高、胡东海。

4 主要工作过程

4.1 成立标准起草工作组

根根据任务要求，杭州莱格曼特科技有限公司于2025年2月成

立了标准编制工作起草小组，组织标准编制组织工作。标准编制工作起草小组从2023年2月份积极组织筹备和征集标准起草单位。经过近2个月的征集、评审和筛选，并最终由杭州莱格曼特科技有限公司定了标准起草工作组的成员单位，成立了标准起草工作组；同时，根据本公司多年的产品研制经验，主导起草了《航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心》（草案），提交浙江省自动化学会。

4.2 第一次编制讨论及项目立项

2025年4月21日，由浙江省自动化学会组织专家组，召开立项会议，对我司《航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心》团标进行沟通讨论，从行业发展和建立标准的必要性考虑，最终通过了我司《航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心》团标立项，确定了标准的工作内容、工作思路以及后续的主要工作安排。

专家组还对《航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心》（草案）提出了修改意见。

1. 制订《航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心》团体标准编制说明。会后，工作组严格按照要求制定编制说明。

2.修正标准文档内容及格式。会后，工作组对标准的文档内容及格式进行了调整：使用最新的浙江省自动化学会团体标准模板。

3.根据现有草案及资料，结合各起草单位，尽可能多地收集相关组织、单位的意见，开展本标准的完善工作；要继续进行更为广泛和深入的市场调查，对市场情况有非常全面和科学的认知，才能够确保以后做出来的标准符合大部分同行的制造水平；目前标准的内容还比

较单薄，需后续对相关数据进一步整理扩充。

4.3 第二次工作组会议

为了提高沟通效率，工作组讨论会主要以线上交流的方式进行。在2025年4月22日至2025年5月7日两周内，工作组成员对编制讨论的内容进行了详细的校对评审，并对标准草案进行了深入的研讨，尤其对标准的条款及内容等进行分析研判，形成了基本共识。

5 标准编制原则和主要内容

5.1 标准编制原则

本标准的制定工作遵循“统一性、协调性、适用性、一致性、规范性”的原则，本着先进性、科学性、合理性和可操作性的原则，按照 GB/T1.1-2009《标准化工作导则第一部分:标准的结构和编写》给出的规则编写。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由浙江省自动化学会提出并归口。

本标准不对新技术设定约束，仅对新技术的应用进行了描述。

5.2 标准主要内容

本标准规定了航空发动机叶片磨削中心的基本参数、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输及贮存。

本标准适用于航空发动机叶片磨削中心设计、制造、检验与验收。

5.2.1术语和定义

5.2.1.1 叶片磨削中心

用于航空发动机叶片复杂曲面精密磨削的数控机床，具备多轴联动、高精度定位功能。

5.2.1.2 五轴联动

机床的五个运动轴（X、Y、Z及两个旋转轴）在加工过程中实现同步控制，完成复杂轨迹加工。

5.2.2技术要求——基本参数

（1）工作台具体尺寸参数由制造商协作客户定制。

（2）机床工作参数见表1。

表1 机床工作参数

平移运动	行程	速度	最小设定单位
工作台横向移动	1250 mm	0-20000 mm/min	0.0001 mm
磨头垂直进给	650 mm	0-1700 mm/min	0.0001 mm
立柱纵向移动	650 mm	0-5000 mm/min	0.0001 mm
旋转运动	旋转角度	偏摆速度	最小分辨率
A轴分度旋转轴	-120°~40°	20 RMP	0.0001°
C轴工件旋转轴	0°~360°	40 RMP	0.0001°

5.2.3技术要求——一般要求

（1）机床坐标和运动方向应符合相关要求，见图1。

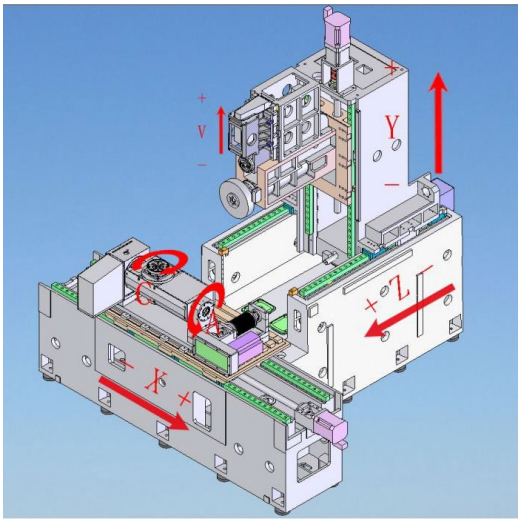


图1 机床坐标和运动方向

（2）设备应具备五轴联动功能，实现复杂曲面一次装夹加工。

（3）设备各部件应具备足够的刚度和稳定性，以保证加工零件时的精度和稳定性。

5.2.4技术要求——功能要求

（1）运行过程中的异常情况、软件和硬件故障等，应能进行报警，及时生成故障频率报告和停机故障报告。

（2）通过操作面板，应能实现设定和调整参数。

（3）操作面板应能实时显示生产线运行周期、当班产量、效率和不合格品率等生产信息。

（4）软件控制的各个工位动作应及时、准确、协调，操作界面人性化。

5.2.5技术要求——性能要求

5.2.5.1 **加工几何精度要求**

（1）工作台纵向移动（X轴线）在XY垂直平面内的直线度

允差：1000mm测量长度内为0.015mm。

局部公差：任意300mm测量长度上为0.005mm。

（2）工作台纵向移动（X轴线）在ZX水平面内的直线度

允差：1000mm测量长度内为0.015mm。

局部公差：任意300mm测量长度上为0.005mm。

（3）工作台纵向移动（X轴线）在ZX水平面内的直线度

允差：1000mm测量长度内为0.015mm。

局部公差：任意300mm测量长度上为0.005mm。

（4）工作台面对工作台纵向移动（X轴线）的平行度

允差：1000mm测量长度内为0.015mm。

局部公差：任意300mm测量长度上为0.005mm。

（5）工作台面对对立柱横向移动（Z轴线）的平行度

允差：1000mm测量长度内为0.010mm。

（6）立柱横向运动（Z轴线）在YZ垂直平面内的直线度

允差：0.010mm。

局部公差：任意300mm测量长度上为0.005mm。

（7）立柱对工作台纵向移动（X轴线）的垂直度

允差：任意300mm测量长度上为0.005mm。

（8）磨头垂直移动（Y轴线）对立柱横向移动（Z轴线）的垂直度

允差：任意300mm测量长度上为0.015mm。

（9）中央T形槽对工作台纵向移动（X轴线）的平行度

允差：1000mm测量长度内为0.015mm。

局部公差：任意300mm测量长度上为0.008mm。

（10）砂轮主轴轴线对立柱横向移动（Z轴线）的平行度

允差：0.025mm/300mm，两个测量点间的距离。

（11）砂轮主轴轴线对立柱横向移动（X轴线）垂直度

允差：0.025mm/300mm，两个测量点间的距离。

5.2.5.2 **加工定位精度要求**

（1）数控X轴(纵向)运动

双向定位精度A：≤0.005mm。

双向重复定位精度R：≤0.003mm。

（2）数控Y轴(纵向)运动

双向定位精度A：≤0.004mm。

双向重复定位精度R：≤0.002mm。

（3）数控Z轴(纵向)运动

双向定位精度A：≤0.004mm。

双向重复定位精度R：≤0.002mm。

（4）数控A轴旋转运动

双向定位精度A：±5弧秒。

双向重复定位精度R：±2弧秒。

（5）数控B轴旋转运动

双向定位精度A：±5弧秒。

双向重复定位精度R：±2弧秒。

（6）数控C轴旋转运动

双向定位精度A：±5弧秒。

双向重复定位精度R：±2弧秒。

5.2.6技术要求——机械安全要求

（1）应有清晰醒目的操纵、润滑等安全警示标志，安全标志应符合GB 2894的规定。

（2）各零件、螺栓及螺母等紧固件应可靠固定，防止松动，不应因震动而脱落。往复运动机构应有极限位置的保护装置。

（3）操作装置上应配有安全防护装置，并应符合JB7233的规定。

（4）活动式安全防护装置应设有保障人员安全的安全联锁保护，当操作人员打开安全防护装置时应报警并停止工作。

5.2.7技术要求——电气安全要求

（1）电气系统保护联结电路连续性应符合GB/T 5226.1—2019中8.2.3的规定，接地电阻应不大于0.1Ω。

（2）电气系统的绝缘电阻应符合GB/T 5226.1—2019中18.3的规定。

（3）电气系统的耐压电阻应符合GB/T 5226.1—2019中18.4的规定。

（4）电气系统的指示灯和显示器应符合GB/T 5226.1—2019中10.3的规定。

（5）电气系统的标记、警告标志和参照代号应符合GB/T 5226.1—2019中第16章的规定。

5.2.8试验方法——一般要求检验

（1）通过手动或程序控制各坐标轴运动，观察其运动方向是否与标准一致，检查机床各坐标轴的定义和运动方向是否符合GB/T 19660-2005的规定。

（2）检查加工过程中各轴的运动是否协调，是否存在异常振动或误差。同时使用标准测试工件（如S形试件或锥形试件）进行加工，测量加工后的几何精度和表面质量。

（3）使用复杂曲面工件进行加工，验证机床是否能够在不重新装夹的情况下完成所有加工工序。

（4）对机床关键部件（床身、立柱、主轴等）进行静态刚度测试，施加额定载荷并测量变形量。

（5）在机床空载和负载条件下，测量关键部件的振动频率和振幅，确保其在允许范围内，参照GB/T 17421.1-2017。

（6）在机床连续加工过程中，监测关键部件（主轴、导轨、电机等）的温度变化，确保温度不超过设计允许值，参照JB/T 1308.1-2011。

（7）对机床各部件之间的连接部位（如螺栓、销钉等）进行扭矩测试，确保其紧固力符合设计要求，参照GB/T 16823.1-2018。

5.2.9试验方法——功能要求检验

采用目测和实际操作的方式进行检验。

5.2.10 试验方法——几何精度检验

（1）工作台纵向移动（X轴线）在ZX水平面内（或在XY垂直平面内）的直线度检验：

调整平尺，使其在测量长度上的两端读数相同，测量长度应与有效磨削长度一致，指示器支座装在磨头的固定部位上，测头触及平尺表面，两项误差分别计算，误差以指示器读数的最大差值计，参照GB/T 17421.1-1998。

（2）立柱横向移动（Z轴线）对工作台纵向移动（X轴线）的垂直度检验：

指示器装在磨头的固定部位上，平尺平行于工作台纵向移动方向放置，将工作台置于中间位置，使角尺紧贴平尺，检查拖板（或立柱或磨头）的横向移动，检查拖板（或立柱或磨头）的横向移动，参照GB/T 17421.1-1998。

（3）中央T形槽对工作台纵向移动（X轴线）的平行度检验：

中央T形槽对工作台纵向移动（X轴线）的平行度，移动工作台，在工作台全部行程上检验，检验时允许T形槽两端出口处在25mm范围内不作考核，误差以指示器读数的最大差值计，参照GB/T 17421.1-1998。

（4）砂轮主轴轴线对工作台纵向移动（X或Z轴线）的垂直度检验：

平尺水平放在工作台中央，并平行于工作台X轴线方向，在横向和纵向移动的中间位置检验，指示器固定在夹紧于主轴的检具上，指示器测头触及平尺表面，旋转主轴检验，误差以指示器读数的差值计，参照GB/T 17421.1-1998。

（5）数控X轴(Y、Z同理) (纵向)运动的定位精度和重复定位精度检验：

使用激光测量仪装置，非检测的Y、Z轴线（X、Z或X、Y同理）运动部件位于行程的中间位置，使长度基准尺或激光测量仪的光束轴线与被检轴平行，当轴线测量长度≤2000时，每1000长度内至少选择5个测点。当轴线测量长度＞2000时，每隔250左右选取1个测点，参照GB/T 17421.1-1998。

5.2.11 试验方法——定位精度检验

（1）数控A轴（B轴、C轴同理）分度轴旋转运动的定位精度和重复定位精度检验：

回转轴校准组件固定再转台中心，激光干涉仪固定在转台外，调整激光干涉仪，对准回转轴校准组件，在转台回转运动的圆弧（周）（不少于270º）上选取不少于8各目标位置（均匀分布）进行测量，回转运动从一基准点快速旋转趋近各目标位置，而后又快速旋转返回。

（2）经各目标位置回到基准点，如此重复5次，测量任意目标位置Pi处的位置偏差，参照GB/T 17421.2-2000。

5.2.12 试验方法——机械安全检验

（1）安全检验标志按GB 2894 的规定进行检查。

（2）各紧固件和往复运动机构采用目测进行检验。

（3）设备正常运行时，检查各个部件的安全防护、各部位联锁保护充电装置以及操作与养护装置。

（4）安全联锁保护采用目测和实际操作的方法进行检验。

（5）气动系统安全性能检验按GB/T 7932 的规定执行。

5.2.13 试验方法——电气安全检验

（1）电气系统的保护联结电路连续性检验按GB/T 5226.1—2019中18.2和GB/T 24342—2009中6.2的规定进行。

（2）电气系统的绝缘电阻检验按GB/T 5226.1—2019 中18.3的规定进行。

（3）电气系统的耐压检验按GB/T 5226.1—2019中18.4的规定进行。

（4）电气系统的指示灯和显示器检验按GB/T 5226.1—2019 中10.3的规定进行。

（5）电气系统的标记、警告标志和参照代号检验按GB/T 5226.1—2019 中第16章的规定进行。

6 主要验证试验情况和分析

按照本标准条款要求，对航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心实施了相关重要的试验项目进行验证，全面验证标准编写条款的适用性和可行性，验证结果来看，满足标准编写要求。

7 预期达到的社会效益、对产业发展的作用

标准制定后，现有的航空发动机叶片复杂曲面精密磨削中心按此标准要求，将促进产业集约性和规模化发展，该标准以填补国标及行标空白为目的，促进行业发展。

该标准可有效推进产学研一体化产业技术革新，催生新型产品、技术的更新，将研究成果转化为适应市场需求的产品，开发出“含金量”更高，市场适应性更强的产品，实现持续发展。

8 采用国际标准和国外先进标准的情况

未直接采用国际标准或国外先进标准。

9 在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准属于地方团体标准。

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准没有冲突或矛盾。

10 重大分歧意见的处理经过和依据

本标准制定过程中无重大分歧。

11 重大分标准实施日期

待定。

12 标准性质的建议说明

无。

13 贯彻标准的要求和措施建议

本标准目前正在制定阶段，新标准发布后，使用单位须对标准进行宣贯，并按新标准的实施日期执行。

14 废止现行相关标准的建议

无。

15 其他应予说明的事项

无。