

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.005

## 一种叶片专用五轴加工中心的多维度评价方法

蔺治强<sup>1</sup>, 卢成斌<sup>2</sup>, 李 佳<sup>2</sup>, 张嘉诚<sup>3</sup>, 吴起勋<sup>3</sup>, 赵国龙<sup>3</sup>

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110092; 2. 通用技术集团机床工程研究院有限公司沈阳分公司, 沈阳 110142; 3. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 航空叶片类复杂曲面零件加工对五轴数控机床提出高精度、高稳定性及高效率的综合性能要求。针对国产五轴数控加工中心在该领域的应用适应性, 开展了 SMU350 五轴联动加工中心的系统性能分析与综合评价研究。通过对其结构配置与核心性能指标的实测分析, 并结合典型叶片零件的试切实验, 验证了其在几何精度、动态响应能力及运行稳定性方面的加工性能。进一步构建基于模糊数学理论的多指标综合性能评价模型, 设计 S 形、Z 形与高斯型隶属函数, 建立模糊关系矩阵与工程权重向量, 采用积-和型模糊运算方法对实测数据进行综合判定。该机床的综合评价得分为 83.18 分, 为国产叶片五轴专精机床的应用评估提供了量化手段与方法参考。

**关键词:** 机械制造及其自动化; 五轴数控加工中心; 航空叶片加工; 模糊综合评价; 隶属度函数

中图分类号: V263

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2026)01-0064-09

## A Multidimensional Performance Evaluation Method for Blade-Specialized Five-Axis Machining Centers

LIN Zhiqiang<sup>1</sup>, LU Chengbin<sup>2</sup>, LI Jia<sup>2</sup>, ZHANG Jiacheng<sup>3</sup>, WU Qixun<sup>3</sup>, ZHAO Guolong<sup>3</sup>

(1. AECC Shenyang Liming Aero-engine Co., Ltd., Shenyang 110092, China; 2. Shenyang Branch, Machine Tool Engineering Research Institute, Genertec, Shenyang 110142, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Machining of aero-engine blade-type complex curved-surface parts places stringent requirements for high accuracy, stability, and efficiency on five-axis CNC machine tools. To assess the suitability of domestic five-axis CNC equipment for this application, we conduct a systematic performance analysis and comprehensive evaluation of the SMU350 simultaneous five-axis machining center. We assess its structural configuration and empirically measure key performance indicators; combined with trial cuts on typical blade parts, these tests verify machining performance in terms of geometric accuracy, dynamic response, and operational stability. Furthermore, we develop a fuzzy-mathematics-based multi-index comprehensive evaluation model: S-shaped, Z-shaped, and Gaussian membership functions are designed; a fuzzy relation matrix and an engineering weight vector are established; and a product-sum fuzzy operator is employed to synthesize judgments from the measured data. The machine tool achieves an overall comprehensive score of 83.18, providing a quantitative method and methodological reference for assessing the application of domestically produced specialized five-axis machine tools for blade machining in the aviation manufacturing domain.

**Key words:** mechanical manufacturing and automation; five-axis CNC machining center; aero blade machining; fuzzy comprehensive evaluation; membership function

收稿日期: 2025-09-24; 修订日期: 2025-10-16

通信作者: 赵国龙, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhaogl@nuaa.edu.cn。

引用格式: 蔺治强, 卢成斌, 李佳, 等. 一种叶片专用五轴加工中心的多维度评价方法[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(1): 64-72. LIN Zhiqiang, LU Chengbin, LI Jia, et al. A multidimensional performance evaluation method for blade-specialized five-axis machining centers[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(1): 64-72.

随着中国航空航天产业的快速发展,复杂曲面零部件的加工对精度与效率的要求日益严苛<sup>[1]</sup>。叶片类零件作为航空发动机的核心构件,其复杂的几何结构与严苛的表面质量要求已成为衡量高端制造水平的关键。传统加工设备已难以满足其对高精度、高稳定性的加工需求,而具备多轴联动能力的专用五轴数控机床,凭借多轴协同加工优势,逐渐成为叶片制造的主流装备<sup>[2-3]</sup>。在机床性能评价方面,国际上普遍参考 ISO 230 系列与 ISO 10791 系列等试验规范,对几何精度、重复定位、动态响应与热稳定等环节进行定量验收与对比。

近年来,国外叶片专用五轴数控加工中心的重点主要在加工精度提升、效率优化和智能化集成方面。通过改进数控系统、刀具路径规划及补偿技术,使得加工精度与表面质量明显提高;同时,基于大数据、人工智能和物联网的实时监控系統可检测振动、温度、刀具磨损等因素,并自动调整参数,确保加工过程的稳定性和加工结果的一致性<sup>[4]</sup>。上述智能优化通过提升效率和减少人为干预,有效增强了系统的可靠性<sup>[5]</sup>。此外,进给驱动系统及关键传动部件的动态性能优化也被认为是提升高速加工稳定性与效率的重要技术路径<sup>[6-7]</sup>。国内的叶片专用五轴数控加工中心起步较晚,早期在技术上依赖进口,尤其是在精密加工和高端叶片制造领域,存在较大差距<sup>[8]</sup>。然而近年来,国产数控系统及核心功能部件实现多项关键技术突破,国内相关企业在五轴数控加工技术方面取得了显著进展,其在数控系统、伺服驱动、精密主轴等关键技术方面逐步突破,提升了设备的综合性能和精度稳定性<sup>[9]</sup>,一批具备自主知识产权的高性能五轴加工中心相继问世<sup>[10]</sup>。如图 1 所示,SMU350 叶片五轴加工中心在结构设计中融入多项创新:采用双 A 轴与双 Z 轴协同结构,通过圆弧导轨提升系统刚性、实现刀尖回转中心与 B 轴同轴设计,并集成温度监测与振动感知系统,改善了机床的热稳定性与智能化水平。



图 1 SMU350 叶片五轴加工中心

Fig.1 SMU350 blade-dedicated five-axis machining center

为全面评估 SMU350 在叶片类零件加工中的实际应用效果,本文面向叶片类应用提出一种基于模糊数学(Fuzzy mathematics, FM)的多指标综合评价方法,融合 S/Z/高斯隶属函数与工程权重,采用积-和型算子实现综合判定,并以 SMU350 实际工况下的试切实验进行验证。该评价方法为实际叶片加工场景提出了一套可复现的整机级模糊综合评价流程,并为国产装备应用评估提供了量化依据。

## 1 SMU350 机床结构及性能参数

SMU350 五轴联动加工中心是专为满足航空发动机叶片等典型复杂曲面零部件的高精度、高效率制造需求而研发的高性能国产数控装备。在轴系布局上,该机床采用叶片专用五轴结构体系:X、Y、B 三轴集成于刀具端,A、Z 轴部署于工件端,其中 A 轴与 Z 轴均采用双电机驱动架构,通过提升旋转精度与负载响应能力,实现了各轴间的高同步性联动,有效改善了复杂曲面加工过程中的姿态解算精度与切削稳定性,其核心技术参数及高性能指标如表 1 所示。

表 1 机床主要性能参数表

Table 1 Main performance parameters of the machine tool

机床测试项目	高性能指标	实测结果
X/Y/Z 定位精度/ $\mu\text{m}$	5	3.3/1.9/1.7
X/Y/Z 重复定位精度/ $\mu\text{m}$	3	2.2/0.8/0.9
回转轴定位精度/( $^{\circ}$ )	6	3.15/2.69
回转轴重复定位精度/( $^{\circ}$ )	3	2.37/2.01
直线轴快移速度/( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	60	60
直线轴加速度/ $\text{g}$	1	1
直线轴加加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-3}$ )	200	200
A 轴最大转速/( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	200	200
B 轴最大转速/( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	50	50
A/B 轴加速度/( $(^{\circ})\cdot\text{s}^{-2}$ )	50 000/ 2 000	50 000/ 2 000
A/B 轴加加速度/( $(^{\circ})\cdot\text{s}^{-3}$ )	500 000/ 20 000	500 000/ 20 000
平均无故障工作时间/h	> 2 000	2 124.6

结构设计上,如图 2 所示,SMU350 突破传统立柱支撑模式,采用无立柱悬臂式刚性框架,有效优化了整机运动惯量特性与热对称性,同时减小占地面积,提升系统布局灵活性。A 轴、Z 轴的双驱动控制设计增强了轴向运动的响应速度与抗扭刚度;X 轴采用高推力直线电机驱动,配合高精度光栅尺实时反馈,保障了高速运动下的轨迹精度与动态响

应性能。特别地,  $B$  轴中心与刀尖回转中心的同轴设计, 结合圆弧导轨结构, 不仅简化了姿态转换控制逻辑, 还大幅降低了五轴联动加工时的运动耦合难度。

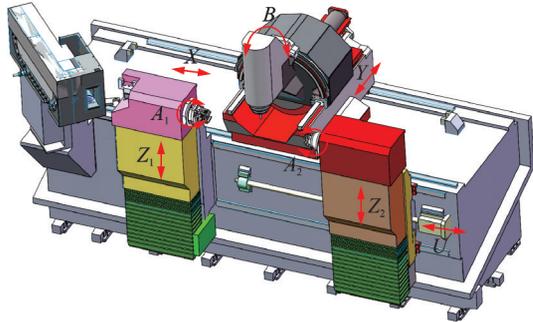


图2 机床结构示意图

Fig.2 Schematic of the machine tool structure

## 2 SMU350 机床的加工性能分析

### 2.1 SMU350 机床叶片试切实验方案设计

为验证 SMU350 五轴联动加工中心在航空发动机叶片类零件加工中的实际性能表现, 本文选取

TC4 航空发动机叶片作为典型工件, 如图 3 所示, 开展了试切加工实验与三坐标检测评估。工件尺寸为  $\varnothing 83 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ , 材料硬度约为 35HRC, 属难加工材料, 对机床的动态响应能力、热稳定性与几何精度控制能力提出较高要求<sup>[11-12]</sup>。试切叶片加工工艺方案如表 2 所示。

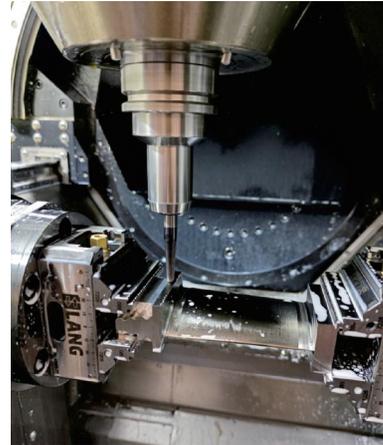


图3 叶片试切实验图

Fig.3 Photograph of the blade trial machining experiment

表2 叶身型面加工工艺方案

Table 2 Process plan for blade airfoil surface machining

加工说明	刀具类型	规格	涂层	刃数	主轴转速/ ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	进给速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	切深 $a_p$ / mm	切宽 $a_e$ / mm
粗加工	硬质合金圆鼻刀	$\varnothing 20R2.5$	TiAlN	4	1 035	880	0.5	14
二次开粗	硬质合金锥度球刀	R3-3°	TiAlN	4	3 500	1 000	1	1
半精叶身	硬质合金锥度球刀	R1.5-3°	TiAlN	3	9 000	3 000	0.4	0.5
精叶身	硬质合金锥度球刀	R1.5-3°	TiAlN	3	12 500	5 000	0.1	0.25

### 2.2 叶片试切加工精度与效率验证结果分析

加工完成后, 采用蔡司 PRISMO ULTRA 三坐标测量机与 Mahr ST750D 粗糙度/轮廓度测量仪进行检测, 沿展向选取  $A-A(L)$ 、 $B-B$ 、 $C-C$  与  $D-D(D)$  4 个典型截面, 对叶片背(凸)/腹(凹)面及前缘(LE)/后缘(TE)进行轮廓采样, 并以设计基准建立工件坐标系, STACK  $X/Y$  表示名义叠线在叶高方向的定位偏差, 其中正值表示相对名义面的外偏(余量), 负值表示内偏(欠切)。由表 3 ( $\pm \text{Tol}$  表示正负公差)的检测结果可知, 叶片在 4 个典型截面上的几何精度均处于设计公差范围内: STACK  $X$  与 STACK  $Y$  的展向定位偏差均控制在  $\pm 0.012 \text{ mm}$  内; 凸/凹面轮廓极值均落入图样公差带 ( $CV/CC$ :  $+0.05/-0.07 \text{ mm}$ ,  $LE/TE$ :  $+0.05/-0.01 \text{ mm}$ ), 其中最大正偏出现在  $B-B$  截面的凹面 ( $CC \text{ CONT MAX} = 0.026 \text{ mm}$ ); 扭转角偏差范围  $-0.056^\circ$  至

$0.041^\circ$ , 低于设计限值  $\pm 0.167^\circ$ ; 最大厚度与弦长偏差分别不超过  $0.025$  与  $0.011 \text{ mm}$ ; 表面粗糙度为  $0.6 \mu\text{m}$ 。

为消除极值误差对机床性能评价的干扰, 本文采用稳健统计口径对全件误差分布进行分析: 以各截面符号轮廓偏差的中位数代表局部特征, 再取四截面中位值作为总体指标。结果表明, 三坐标测量误差的稳健均值为  $0.024 \text{ mm}$ , 可视为该机床在该材料与工况下的典型加工精度水平。同时, 结合最大偏差  $0.026 \text{ mm}$  可验证机床在极端截面处的加工边界能力。总体而言, 叶片在几何精度、展向一致性及结构尺寸方面均表现出较高稳定性与重复性, 验证了机床系统在复杂薄壁曲面加工中的精度保持与刚性控制能力, 可作为后续模糊综合性能评价模型的有效输入<sup>[13]</sup>。

试验结果显示, 在进给速度由常规的  $2 000 \text{ mm/min}$  提升至  $5 000 \text{ mm/min}$  后, 加工总时

表 3 叶片检测数据表

Table 3 Blade inspection data table

检测项目	+Tol/mm	-Tol/mm	A-A(L)/mm	B-B/mm	C-C/mm	D-D(D)/mm
叠线 X 坐标 STACK X	0.05	-0.05	-0.012	-0.012	-0.004	0.007
叠线 Y 坐标 STACK Y	0.05	-0.05	-0.002	0.004	0.005	0.012
凸面轮廓最小值 CV CONT MIN	0.05	-0.07	0	0.004	0.005	-0.006
凸面轮廓最大值 CV CONT MAX	0.05	-0.07	0.012	0.012	0.015	0.014
凹面轮廓最小值 CC CONT MIN	0.05	-0.07	0	0.002	-0.001	-0.001
凹面轮廓最大值 CC CONT MAX	0.05	-0.07	0.015	0.026	0.019	0.015
前缘轮廓最小值 LE CONT'R MIN	0.05	-0.01	-0.003	0.001	0.005	-0.003
前缘轮廓最大值 LE CONT'R MAX	0.05	-0.01	0.023	0.012	0.013	0.013
后缘轮廓最小值 TE CONT'R MIN	0.05	-0.01	-0.005	0	0.005	0
后缘轮廓最大值 TE CONT'R MAX	0.05	-0.01	0.018	0.014	0.016	0.02
扭转角 TWIST ANG	0.167	-0.167	-0.056	-0.007	0.012	0.041
最大厚度 MAX THICK	0.14	-0.02	0.008	0.025	0.021	0.005
弦长 CHORD WID	0.14	-0.02	-0.011	0.009	0.011	0
表面粗糙度	0.6					

间由 17 min 缩短至 10 min,效率提升超过 40%,且表面粗糙度稳定控制在 0.8  $\mu\text{m}$  以内,未出现振动或毛刺等加工缺陷,体现了优良的动态稳定性与热补偿控制效果。

### 3 基于模糊综合评价的 SMU350 机床性能评估方法

为实现对 SMU350 五轴联动加工中心性能的系统化、量化评估,本文构建了一种基于模糊数学理论的多指标综合性能评价方法。模糊数学作为处理模糊性与不确定性问题的理论体系,其核心在于通过模糊集合的逻辑扩展突破传统经典集合“非黑即白”的二元划分局限,借助隶属度函数刻画元素与集合间的隶属关系,可有效表征实际工程中常见的模糊边界与灰色过渡区域<sup>[14-15]</sup>。凭借在处理多源异构信息、语言不确定性及系统模糊边界问题上的理论优势,模糊数学方法已广泛应用于控制工程、智能系统、模式识别、管理决策及复杂装备性能综合评价等领域<sup>[16-17]</sup>。将其引入数控机床性能评价体系,不仅能提升多维指标整合分析的科学与灵活性,更为结构优化与工艺决策提供了理论支持与量化依据。

#### 3.1 确定因素集合

在对 SMU350 五轴联动加工中心进行性能评估时,须首先明确影响其加工能力的关键因素。这些因素通常具有多维度、多层次特性,其差异性直接决定评价结果的准确性。本文将因素集合(记为  $U$ )定义为影响评估对象性能的所有关键因素构成的集合。

航空叶片加工以高精度、复杂曲面几何特征及强工艺稳定性为核心要求,对机床的静态与动态性能均提出严苛挑战,单一指标难以全面衡量其综合加工能力。因此,本文从加工精度、可靠性及动态响应能力等核心维度构建评价体系:选取工件试切三坐标误差作为加工精度的代表性指标,以平均无故障时间(Mean time between failures, MTBF)表征机床运行可靠性,通过重复定位精度衡量位置控制能力,以直线轴加加速度反映动态响应性能。据此构建的机床性能评价因素集如下

$$U = \{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4\} \quad (1)$$

式中: $\mu_1$ 为重复定位精度, $\mu_2$ 为 MTBF, $\mu_3$ 为直线轴加加速度, $\mu_4$ 为工件试切三坐标误差。

#### 3.2 确定评判集合

为实现对因素集中各项指标的规范化评价,须依据国家标准、行业规范及航空叶片加工实践要求,建立相应的评判集合。鉴于五轴数控机床在航空叶片加工中对精度、稳定性与响应能力的高要求,本文结合资深专家与高级设备工程师的实践经验,将每项因素划分为“优秀”“良好”“一般”和“差”4个等级,并分别赋予 100、75、50、25 的量化评分,以直观反映不同水平的性能表现。具体评判集定义如下

$$V = \{100, 75, 50, 25\} \quad (2)$$

式中:评判集合  $V$  表示各因素的等级评分,数值越高表示五轴机床在该指标下的表现越优异。例如,若某型号机床的重复定位精度表现优异,则在该因素上的评分接近 100,反之则趋近于 25。该方法为后续的模糊综合评价提供了明确的量化基础。

### 3.3 隶属度函数

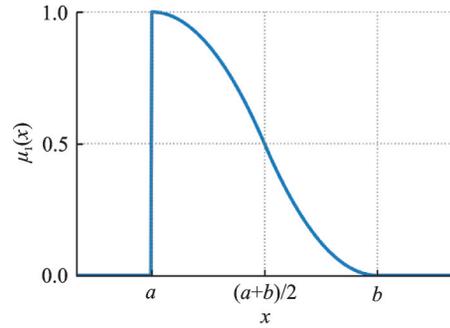
隶属度函数作为模糊集合的核心数学工具,可根据评价需求采用S形、Z形、梯形、三角函数或高斯函数等形式,以表达指标与评价等级间的非线性映射关系。实际应用中,须结合指标单调性及工程意义合理选型:三角形与梯形函数结构简单、参数少、计算效率高,适用于阈值分界明确或样本稀疏场景;高斯型与广义Bell型函数曲线连续光滑、无断点,可反映指标统计意义上的自然分布或“中庸区间”;S形函数具有单调递增、Z形函数具有单调递减性,且二者在端点处具有饱和性,能体现“越大越好”或“越小越好”的评价偏好。同时,模糊数学通过引入模糊关系矩阵与运算规则,构建指标与评价结果的映射关系,实现模糊交集、并集与补集的多元融合。

#### 3.3.1 重复定位精度与加工三坐标误差均值的隶属度函数

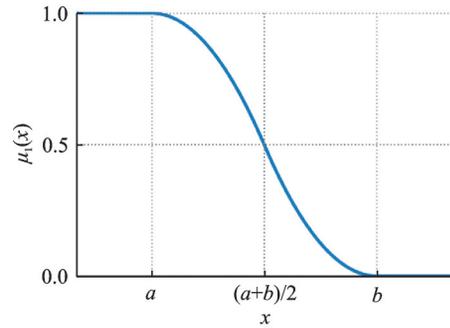
重复定位精度与加工三坐标误差均值是评价五轴联动加工中心动态精度与加工一致性的关键指标。这两类指标本质上反映了机床在连续运行中因伺服系统响应、结构热变形、导轨间隙等因素引起的偏差,属于典型的“数值越小越优”型负向指标。因此,在构建其隶属度函数时,采用Z形分布以凸显误差增大时隶属度迅速下降、对精度劣化的敏感性,Z形分布隶属度函数图如图4所示,Z形隶属度函数如下

$$\mu_1(x) = \begin{cases} \varphi & x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x$ 表示评价因素重复定位精度与加工三坐标误差均值的实际测量值; $a$ 与 $b$ 在本文的评价系统中充当了判断指标等级的阈值, $a$ 具体对应某一等级(如“优秀”“良好”“一般”“差”)区间的下限,而 $b$ 具体对应与 $a$ 相同等级区间的上限; $\varphi$ 为特定的隶属度参数,其取值范围为0或1,依据对重复定位精度与加工三坐标误差均值两个评价因素所划定的评价等级区间来设定。当实测值 $x$ 不落入“良好”“一般”或“差”3个区间时,隶属度为零,即 $\varphi=0$ ;另外,这两个评价因素属于“数值越小越优”的负向指标,当实测值 $x$ 小于“优秀”区间的左端点时,表示其性能优于“优秀”指标的标准,具有显著优势。因此,在此情况下,令 $\varphi=1$ ,表示该指标完全符合“优



(a) Membership function curve for  $\varphi = 0$



(b) Membership function curve for  $\varphi = 1$

图4 Z形分布隶属度函数图

Fig.4 Plot of the Z-shaped membership function

秀”区间的标准。 $\mu_1(x)$ 为隶属度值,表示实测值 $x$ 在某一等级区间内的隶属程度,取值范围从0到1,1表示完全隶属该等级,0表示完全不隶属该等级。

该Z形隶属度函数通过其分段结构反映了五轴联动加工中心动态精度与加工一致性衰减的不同阶段:当实测值 $x$ 优于当前等级的预设下限 $a$ 时,隶属度为 $\varphi$ ,表明其加工精度已超越本等级;当 $x$ 进入区间 $[a, (a+b)/2]$ 时,隶属度以平方速率加速下降,这表征了在精密叶片加工中,误差增大,其对加工质量的负面影响会加剧;而当 $x$ 进入区间 $[(a+b)/2, b]$ 时,隶属度以递减的速率缓慢趋近于零,表明性能已严重偏离该等级核心区间。

#### 3.3.2 MTBF的隶属度函数

MTBF属于“数值越大越优”的寿命类正向指标,宜选用S形隶属函数,S形分布隶属度函数图如图5所示,使得MTBF在低值区间对隶属度贡献有限、在高值区间快速趋近于1,符合高可靠性为系统带来的性能饱和。S形隶属度函数如下

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} < x < b \\ \varphi & x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x$ 表示评价因素MTBF的实际测量值; $\varphi$ 为特定的隶属度参数,其取值范围为0或1,依据对评

价因素 MTBF 所划定的评价等级区间来设定。当实测值  $x$  不落入“良好”“一般”或“差”3 个区间时,隶属度为零,即  $\varphi=0$ ;另外,评价因素 MTBF 属于“数值越大越优”的正向指标,当实测值  $x$  大于“优秀”区间的右端点时,表示其性能优于“优秀”指标的标准,具有显著优势。因此,在此情况下,令  $\varphi=1$ ,表示该指标完全符合“优秀”区间的标准。 $\mu_2(x)$  为隶属度值,表示实测值  $x$  在某一等级区间内的隶属程度,取值范围从 0 到 1,1 表示完全隶属该等级,0 表示完全不隶属该等级。

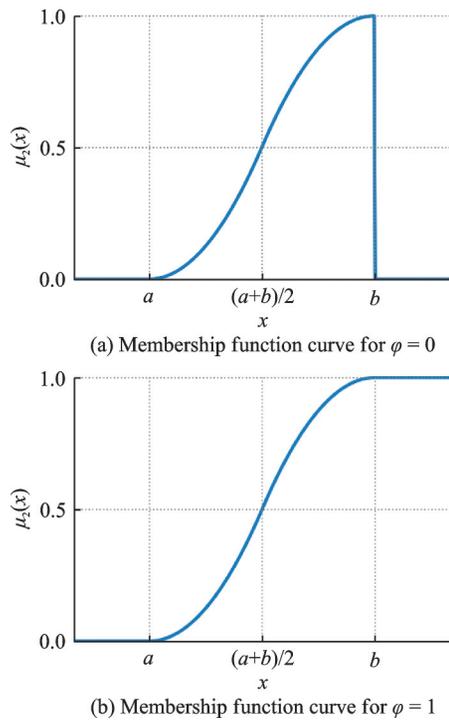


Fig.5 Plot of the S-shaped membership function

该 S 形隶属度函数通过其分段结构反映了 MTBF 值在特定评价等级区间内的隶属度变化规律:当实测值  $x$  低于当前等级下限  $a$  时,隶属度为 0,表明其可靠性表现未达到该等级要求;当  $x$  进入区间  $[a, (a+b)/2]$  时,隶属度以平方速率加速提升,反映了 MTBF 超过特定评价等级下限后,其对该等级的符合程度迅速提升;当  $x$  进入区间  $[(a+b)/2, b]$  时,隶属度以对称的平方速率减速增长并趋近于 1,表明随着 MTBF 进一步提高,其对该等级的隶属关系趋于完全确立;当  $x$  超越等级上限  $b$  时,隶属度为  $\varphi$ ,表明其可靠性表现已优于当前等级标准。

### 3.3.3 直线轴加加速度的隶属度函数

直线轴加加速度虽然较大能够提高动态响应,进而提高加工效率,但过大易引发振动与冲击<sup>[18]</sup>,因此存在“适中最佳”的区间特性,宜采用高斯型隶

属函数,其函数图像如图 6 所示。以峰值对应工艺经验确定的最优加加速度,左右两侧对称下降,从而兼顾加工效率与机床稳定性的双重要求,高斯型隶属度函数如下

$$\mu_3(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中: $x$  为直线轴加加速度的实测值; $c$  为高斯函数的中心值,代表由机床结构刚性、伺服驱动性能与叶片加工工艺共同确定的最优加加速度值,在此状态下机床的动态性能与稳定性达到最佳平衡; $\sigma$  为高斯分布的标准差,定量描述了在该最优值附近可接受的性能波动范围,其大小反映了评价体系对指标稳定性的容忍度; $\mu_3(x)$  为隶属度,用于衡量实测值  $x$  在以  $c$  为核心的最优区间的隶属程度。

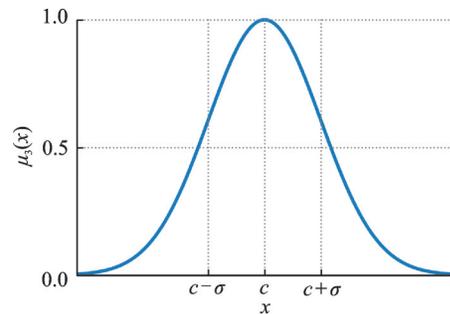


图 6 高斯型分布隶属度函数图  
Fig.6 Gaussian membership function plot

该高斯型分布隶属度函数曲线以  $c$  为顶点向两侧对称且连续衰减,精确模拟了加加速度偏离最优值时机床综合性能的下落趋势,体现了精密加工中动态响应指标的双向偏离均会导致性能衰减的内在特性。

### 3.4 评价因素等级区间划分

为确保隶属函数能够有效反映五轴数控机床关键指标与综合性能等级之间的对应关系,本文在等级区间划分时充分考虑了多个维度的依据。主要参考了叶片生产中其他主流专用五轴数控设备加工中心的实测数据、国家标准<sup>[19]</sup>、行业通用规范以及航空叶片类零件加工的共性需求。在此基础上,采用区间重叠设计原则,通过模糊化处理保证等级划分的过渡性与连续性,力求使评价逻辑更贴合实际工程中的设备性能波动特性,提升综合评价的科学性与应用适配度。

在线性轴重复定位精度的等级划分中,考虑其作为负向指标的性质,选用 Z 形隶属函数来构建其评价函数。根据航空叶片对微米级重复精度的一致性要求,将“优秀”等级设定为  $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ ,对应主流高端设备的精度表现;“良好”等级区间为  $2.0\sim 3.5\ \mu\text{m}$ ,能够满足复杂自由曲面等高端零件

的精密加工需求;“一般”等级为 3.0~4.5  $\mu\text{m}$ ,反映国产主流五轴设备的常规定位精度;而“差”等级为 4.0~6.0  $\mu\text{m}$ ,其加工一致性不足,可能对叶片型面质量造成不利影响。

对于平均无故障时间这一正向指标,采用 S 形隶属函数以体现其“越大越好”的特点。参考高可靠性制造需求及设备稳定性数据,将“优秀”等级设定在 2 000~2 500 h,代表航空制造领域对设备连续稳定运行能力的高标准;“良好”等级为 1 600~2 000 h,对应中高端国产五轴设备在实际批量生产中的可靠运行水平;“一般”等级区间为 1 000~1 600 h,代表行业通用设备的平均性能水平;而“差”等级则设定为 500~1 000 h,低于航空制造对设备稳定性的最低要求。

加工三坐标误差均值作为另一个负向指标,直接关系到零件最终的几何精度,尤其在航空叶片关键曲面轮廓控制中具有决定性作用。因此,同样采用 Z 形隶属函数进行处理。将“优秀”等级设定为 0.010~0.025 mm,对应航空高端机床在关键型面加工中能达到的精度标准;“良好”等级为 0.020~0.035 mm,可满足叶片主要区域的气动性能精度控制;“一般”等级设定为 0.030~0.050 mm,适用于常规工业叶片或次要型面的加工误差控制;“差”等级则为 0.050~0.070 mm,已超出航空叶片结构对精度的误差容限,存在较大运行风险。

直线轴加加速度体现了设备的动态响应性能和结构刚度平衡,属于典型的“适中最佳”型指标,因其既不能过低导致响应迟缓,也不能过高而引发振动或控制失稳,因此适合采用高斯型隶属函数进行描述<sup>[18]</sup>,其“优秀”等级对应中心值 200  $\text{m/s}^3$ 、标准差为 3.0  $\text{m/s}^3$ ,该值能够同时保障加工动态稳定性与效率;“良好”等级分别以 190 和 210  $\text{m/s}^3$ 为中心值、标准差为 3.0  $\text{m/s}^3$ ,适应国产中高端设备对复杂叶片加工响应要求;“一般”等级区间分别以 180 与 220  $\text{m/s}^3$ 为中心值、标准差为 3.0  $\text{m/s}^3$ ,反映常规设备的可接受响应能力;而“差”等级则分别以 170 与 230  $\text{m/s}^3$ 为中心值、标准差为 3.0  $\text{m/s}^3$ ,设备可能因响应能力不足或动态控制失衡而影响最终加工质量。

### 3.5 隶属度矩阵的构建

根据不同隶属度函数分别求出不同因素的隶属度向量,将因素集中所有因素的隶属度向量进行组合得到相应的隶属度矩阵。并且须对隶属度矩阵施行归一化处理,这一操作的核心目的在于,通过使矩阵中每行元素(即每个指标的隶属度)之和等于 1,消除不同指标因隶属度数量级差异可能对后续分析产生的干扰,确保各指标在统一量级下参

与运算,其数学表达式为每行隶属度满足  $\sum r_i=1$ 。将五轴数控机床的实测值(见表 4)代入各自对应的隶属度函数,得到相应的隶属度向量,经组合得到隶属度矩阵  $R$  如下

$$R = \begin{bmatrix} 0.369 & 0.631 & 0 & 0 \\ 0.173 & 0.826 & 0 & 0 \\ 0.996 & 0.004 & 0 & 0 \\ 0.148 & 0.852 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

表 4 SMU350 五轴联动加工中心评价因素实测值

Table 4 Measured values of evaluation factors for the SMU350 five-axis machining center

评价因素	重复定位精度/ $\mu\text{m}$	平均无故障时间/h	直线轴加加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-3})$	加工三坐标误差均值/mm
实测值	2.2	2 124.6	200	0.026

### 3.6 确定权重向量

在多维度性能评价体系中,权重向量  $W$  的合理分配是确保评价结果科学性与客观性的重要基础。本质上,这一过程旨在通过定量分析各评价因素对机床整体性能的影响程度,从而突出关键特性的权重引导,实现综合评价的有效聚焦。针对航空叶片加工场景在高精度、高稳定性与高效率方面的复合需求,本文结合各评价因素在实际加工过程中的工程意义与作用机制,并综合考虑工艺敏感性与性能主导性的基础上,对其权重进行了系统赋值<sup>[18]</sup>:MTBF 被赋予最高权重(0.35),作为衡量机床长期运行可靠性的核心指标,其直接关联生产连续性与制造成本,较长的无故障运行时间可显著减少非计划停机损失,对航空批量生产的稳定性至关重要,因此在权重分配中占据主导地位;加工三坐标误差均值权重设定为 0.3,该指标直接反映叶片型面的几何精度控制能力,是决定航空叶片气动性能与装配质量的关键因素,其精度水平须严格匹配航空级公差要求,具有较高优先级;重复定位精度权重赋值为 0.2,作为机床运动精度的基础保障,其稳定性直接影响复杂曲面加工的轨迹复现能力,是实现微米级精度控制的前提,对加工质量的一致性具有根本性影响;直线轴加加速度权重设定为 0.15,该指标虽关联机床的动态响应速度与加工效率,但在航空叶片“精度优先”的评价框架下,其重要性相对低于可靠性与精度指标,因此权重略低。综上,最终确定的综合权重向量为  $W=[0.2, 0.35, 0.15, 0.3]$ ,其分配( $\mu_2 > \mu_4 > \mu_1 > \mu_3$ )充分体现了航空高精加工场景中“可靠性为基、精度为核、效率为辅”的评价逻辑,为后续模糊综合运算提供了科学的量化依据。

### 3.7 模糊算子的选择

在模糊综合评价体系中,模糊算子作为连接权重向量与隶属度矩阵的核心运算工具,其合理选择直接决定评价结果对实际性能的代表精度。模糊算子通过对指标权重与等级隶属度的融合运算,将

多维度分散信息转化为综合评价向量,为性能量化评估提供关键支撑。常用模糊算子根据运算逻辑的差异可分为积-和型、积-max型、min-和型及min-max型等,各类算子的数学形式与适用场景如表5所示。

表5 常见模糊算子类型及适用情境一览表

Table 5 Summary table of common fuzzy operator types and applicable contexts

模糊算子	数学形式	适用情境
积-和型	$B_k = \sum_{i=1}^m \omega_i r_{ik}$	各因素对评价结果的影响较为均衡,信息充分,适用于隶属度分布合理、差异不显著的情形
积-max型	$B_k = \max(\omega_i r_{ik})$	适用于“关键控制因子”主导的评价,例如存在瓶颈指标、性能突出项或要求突出优势项的情形
min-和型	$B_k = \sum \min(\omega_i r_{ik})$	适合不确定性强、指标评估偏谨慎的场合,例如安全风险评估、可靠性评价等场景
min-max型	$B_k = \max\{\min(\omega_i r_{ik})\}$	适合约束条件严格或评价对象对某个最低限项要求高的场景,例如合规性审查、故障敏感性评价等

针对SMU350五轴联动加工中心的性能评价需求,须结合评价因素的分布特征选择合适的模糊算子。本文构建的评价体系中,重复定位精度、平均无故障时间、直线轴加加速度及加工三坐标误差均值4个核心指标对机床整体性能的影响具有均衡性,且各指标在不同评价等级下的隶属度值差异较小(无显著极端值或主导性指标)。基于此,积-和型模糊算子成为最优选择,该算子通过权重与隶属度的乘积求和运算,能够全面整合各指标的贡献度,避免单一指标对评价结果的过度主导,更贴合多维度均衡评价的需求,其数学表达式如下

$$B_k = \sum_{i=1}^m \omega_i r_{ik} \quad (6)$$

式中: $\omega_i$ 为第*i*个指标的权重, $r_{ik}$ 为第*i*个指标在第*k*等级下的隶属度。

将隶属度矩阵 $R$ 结合权重向量 $W=[0.2, 0.35, 0.15, 0.3]$ 进行积-和运算,经运算后得到综合评价模糊向量 $B=[0.33, 0.67, 0, 0]$ ,向量中各元素分别对应机床性能对“优秀”“良好”“一般”“差”4个等级的隶属度。由于各等级隶属度未呈现单一主导特征(“优秀”与“良好”等级均有显著隶属分布),采用加权平均法对模糊向量进行合成分析更为合理。该方法可通过等级评分与隶属度的加权求和,全面反映性能的整体分布特征,计算公式如下

$$S = \sum_{i=1}^m b_i v_i \quad (7)$$

式中: $b_i$ 为综合评价向量 $B$ 中的元素; $v_i$ 为因素集中各个等级的分数; $S$ 为模糊综合评价结果。经过综合分析可以得到该条数据的综合评价结果为83.18分。

## 4 结 论

本文围绕国产SMU350五轴联动加工中心展开了系统性研究,结合其结构特征、关键性能指标以及典型叶片试切结果,全面评估了其在航空叶片类复杂曲面零件加工中的应用能力与工程潜力。研究表明,SMU350在结构布局、运动性能等方面集成了多项面向叶片加工需求的技术优化方案,具备优良的几何精度控制能力和高速高动态加工性能。实测数据显示,其线性轴重复定位精度分别为2.2、0.8和0.9  $\mu\text{m}$ ,旋转轴重复定位精度达2.37"与2.01",三坐标误差控制在0.026 mm以内,直线轴加加速度为200  $\text{m/s}^3$ ,针对航空叶片加工场景在高精度、高稳定性与高效率方面的复合需求,本文构建了一种基于模糊数学理论的多指标综合性评价模型。该模型以加工精度、位置控制能力、动态响应速度与运行可靠性4项关键指标为基础,建立了由S形、Z形与高斯型函数构成的隶属度模型,并引入权重向量与积-和型模糊算子,实现了多维性能指标的统一量化与柔性评估。该模型综合评价得分为83.18分,验证了SMU350在典型叶片类零件加工中的综合性能,同时也为其他类型的叶片专用五轴加工中心评价提供了量化手段与方法参考。

### 参考文献:

- [1] 徐金亭,牛金波,陈满森,等.精密复杂曲面零件多轴数控加工技术研究进展[J].航空学报,2021,42(10):24-47.  
XU Jinting, NIU Jinbo, CHEN Mansen, et al. Research progress in multi-axis CNC machining of precision complex curved parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 24-47.

- [2] 刘蕊. 航空发动机零件制造过程中自动化控制技术应用研究[J]. 模具制造, 2025, 25(7): 181-183.  
LIU Rui. Research on the application of automation control technology in the manufacturing process of aircraft engine parts[J]. Die & Mould Manufacture, 2025, 25(7): 181-183.
- [3] JIANG Y F, GUO M L, DU G C, et al. Cutting dynamics research on the five-axis machining of thin curved surface with barrel-taper-ball milling cutter[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(7): 3905-3919.
- [4] LIU G Q, WANG Y F, HUANG B D, et al. The intelligent monitoring technology for machining thin-walled components: A review[J]. Machines, 2024, 12(12): 876.
- [5] BEHERA R, CHAN T C, YANG J S. Innovative structural optimization and dynamic performance enhancement of high-precision five-axis machine tools [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2024, 8(4): 181.
- [6] HEYDARNIA H, KISELEV I A, ERMOLAEV M M, et al. Dynamic modeling of the feed drive system of a CNC metal cutting machine[J]. Sound & Vibration, 2021, 55(1): 19-30.
- [7] WANG L P, HAN J H, TANG Z H, et al. Geometric accuracy design of high performance CNC machine tools: Modeling, analysis, and optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2025, 38(1): 87.
- [8] 刘志峰, 邱军雷, 陈传海, 等. 数控机床关键功能部件可靠性研究综述[J]. 航空精密制造技术, 2025, 61(3): 1-4, 8.  
LIU Zhifeng, QIU Junlei, CHEN Chuanhai, et al. Review on reliability research of key functional components of CNC machine tools[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2025, 61(3): 1-4, 8.
- [9] 陈吉红. 国产数控系统的技术进步与应用成果[J]. 金属加工(冷加工), 2023(2): 9-14.  
CHEN Jihong. Technical progress and application achievements of domestic CNC system[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2023(2): 9-14.
- [10] 付威铭, 闫司琦. 五轴加工技术与装备的发展现状及展望[J]. 金属加工(冷加工), 2025(5): 1-9, 13.  
FU Weiming, YAN Siqi. Development status and prospects of five-axis machining technology and equipment[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2025(5): 1-9, 13.
- [11] LIN X J, WU D B, SHAN X F, et al. Flexible CNC polishing process and surface integrity of blades[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(6): 2735-2746.
- [12] WU D B, WANG H, ZHANG K Y, et al. Research on formation mechanism and optimization method of surface waviness of TC4 blisk blade[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 305-326.
- [13] 中国航空工业总公司. 叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度: HB 5647—1998[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1998.
- [14] HUANG X Q, WANG Z L, LIU S H. Health status evaluation method of CNC machine tools based on grey clustering analysis and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2022, 42(4): 4065-4082.
- [15] SENTHILKUMAR G, MURUGAN R, GNANAKUMAR G, et al. Fuzzy logic modelling of machining characteristics for CNC milling of EN24 using Ti-N coated tool[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 82: 137-144.
- [16] JAGADISH, RAY A. A fuzzy multi-criteria decision-making model for green electrical discharge machining [C]//Proceedings of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving. New Delhi: Springer, 2015: 33-43.
- [17] XU Y, ZAMAN M H M, ZHOU F. Optimized dual NURBS curve interpolation for high-accuracy five-axis CNC path planning[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 25409.
- [18] 封志明, 闵兴龙, 江维, 等. 基于组合赋权的数控机床精度模糊评价[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 64-72.  
FENG Zhiming, MIN Xinglong, JIANG Wei, et al. Fuzzy evaluation of accuracy of CNC machine tools based on combination weighting[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2022, 41(5): 64-72.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 五轴联动加工中心检验条件 第1部分: 卧式机床精度检验: GB/T 34880.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

(编辑: 胥橙庭)