

# 发动机低压涡轮长轴内腔检测技术

## Long Shaft Inner Profile Measurement for Aero Engine Low-Pressure Turbine

■ 高晓斐 宋毅 周丽华 同更强 叶忠宇 / 中国航发西航

低压涡轮长轴是航空发动机中连接低压涡轮和风扇转子的关键零件，长轴内腔有凸台、凹槽、度面等多种需要测量的结构，尺寸多、公差严、孔口小而内腔大的枣核形结构，给测量带来很大的困难，实现涡轮长轴内外径几何尺寸的准确测量对发动机装配和使用安全有重要影响。

航空发动机低压涡轮长轴几何结构复杂，内型面呈枣核形结构，存在多个坐标点、度面、环槽以及转接圆弧。受测量深度的影响，常用的坐标测量机无法深入内腔进行检测。在研制初期，采用首件解剖检测，以解剖件的检测结果验证数控加工设备的精度和加工程序，后续交付件的内腔状态由设备精度和固化数控程序保证，一旦零件内腔型面结构改变或数控程序优化就需要重新进行破坏验证，这种方法存在检测时间长、资源浪费等缺点。本文通过工装设计、测针配置、测量路径规划等技术研究以解决长轴类零件内腔尺寸检测难题，并通过测量系统分析、测量不确定度分析等方法，实现了

涡轮长轴几何尺寸的精准测量。

### 测量工装设计

受结构影响，若长轴在测量机中摆放位置不合适，会超过测量机的量程，无法一次性完成所有特性的测量。为了方便装夹、便于测量、提高效率，对长轴装夹及定位方法进行研究，研制合适的测量工装。工装设计应该考虑的因素包括：长轴类零件类型多，工装应具有一定的通用性，能够对大小不同，结构相似的轴类零件进行稳定定位；开敞性好，尽可能减少测量部位的遮挡；长轴类零件外形尺寸大、测量部位多，设计的工装应轻便，便于搬运；测具的上、下高度和前、后距离应可以灵活调整，防止在长轴内腔时

发生干涉。为了符合以上要求，装置采用了分体设计思路，由3个部分组成，包括2个周向定位V形块和1个轴向零点定位支承杆。

周向后端定位V形块由底座和条形螺纹孔组成。V形块底座上两个条形螺纹孔间距与坐标测量机上的螺纹孔间距相等，条形螺纹孔可以调节V形块前后位置，如图1(a)所示。

周向前端定位V形块由支块、压紧螺钉、V形支架、滑块和滑道组成。支块是一组高度不同的矩形金属块，V形支架在滑道中运动，可以调节周向前端定位V形块的高度，如图1(b)所示。

轴向零点定位支承杆由支承杆、定位销、滑块和压紧螺钉组成，滑

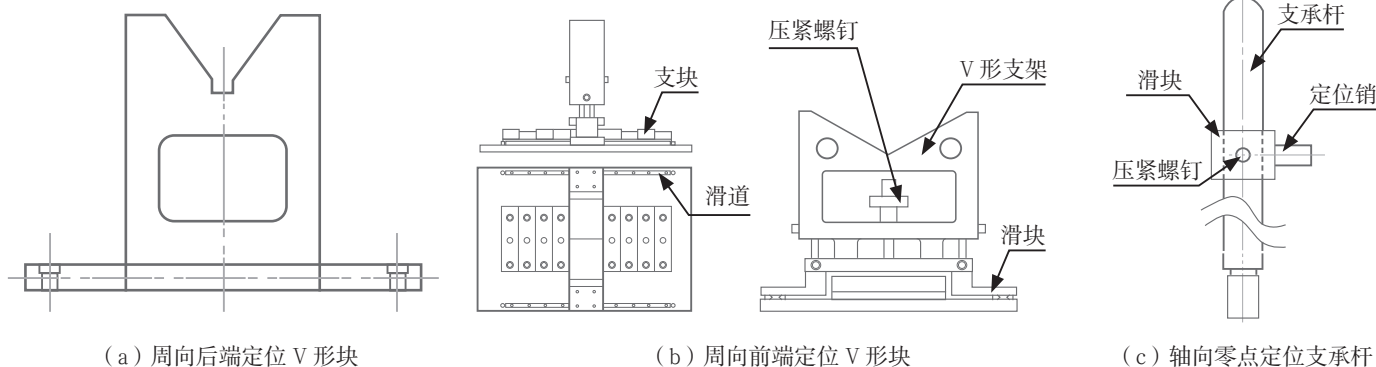


图1 轴类零件测量工装

块用于调节定位销的高度，定位销与长轴前段法兰上的孔配合，确定零件的轴向零件和角向位置，轴向零点定位支承杆如图1(c)所示。

两V形块配合使用，用于长轴的轴向定位，零点定位支承杆用于长轴的径向定位。采用测量工装，可以一次性将零件安装到位，可直接在工装上建立测量坐标系，简化坐标系建立过程，提高检测效率。

## 零件安装

低压涡轮长轴两端口的直径大小不一致，不能简单地从两侧分别按照总长的1/2分段测量，需要根据内腔结构计算不同直径测针可检测的长度范围，从而确定长轴在机床上的摆放位置，以防止量程不足。例如，零件长度为 $L$ ，通过计算需要从长轴的大端处测量内腔 $2/3L$ 的长度，则测针的测杆长度应不小于 $2/3L$ ，零件大端应放置在机床最大量程的 $2/3L+10\text{mm}$ （10mm为安全距离）处。

长轴安装位置应与测量方向的测针平行，否则测针未到达指定的测量位置时，会与内壁产生干涉。一般情况下，校准的测针方向与测量机的机床坐标系平行，故在安装时，长轴内腔轴线与机床坐标系平行。在安装结束后须对零件径向和轴向位置分别进行调整。

## 测针选择

### 测针类型选择

低压涡轮长轴须采用不同类型、不同直径的测针分段测量。针对不同形状的枣核形结构，需要精密计算内腔不同部位的直径，论证不同测针带来的测量误差和可能产生的测量干涉。

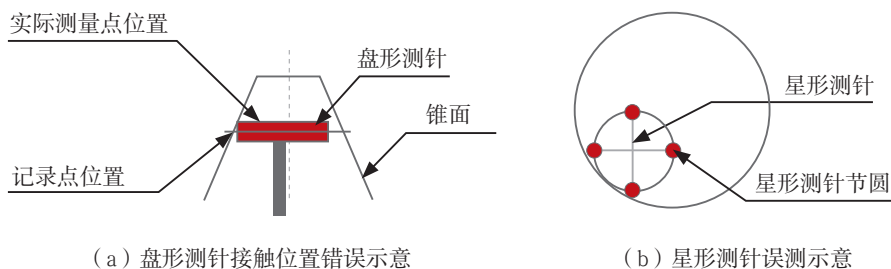


图2 测针选择示意

常用的测针类型包括球形测针、盘形测针和星形测针。球形测针使用简单，易于操作，用于测量两端口处的内腔型面；盘形测针有一定的厚度，在测量锥型面内壁时，盘形测针侧壁与锥型面内壁是线接触而不是面接触，测量机记录的是盘形测针中心点的位置，实际接触位置是盘形上表面与锥面交接的位置，两者之间将会产生很大误差，盘形测针接触位置错误如图2(a)所示，故锥型面内壁不能选用盘形测针测量；星形测针装有4个相互垂直的球形测针，在测量圆柱面内壁时，可能会有2个甚至3个测球与内壁接触，造成测量错误，星形测针误测如图2(b)所示，故测量圆柱面内壁时不能采用星形测针测量；在测量凹槽时，受凹槽槽宽限制，须采用适合半径的星形测针测量。

通过综合考虑测量的可达性和准确性，分析可能产生的干涉和大半径测针造成的余弦误差，根据内腔结构计算不同结构、不同直径测针检测的长度范围。最终确定在测量长轴端口位置时选用球形测针；测量内腔柱面直径时选用盘形测针；测量锥面和凹槽时选用星形测针。

### 测针直径选择

在规划测量方案时，通常选用的最长测针测杆长度约为轴总长的 $2/3$ 。由于测针的测杆直径不均匀，

选择盘形测针和星形测针测量时，需要借助数学模型准确计算。若盘形测针直径过小或星形测针的4个测针测杆长度过小，测针测球还未接触到轴的内壁，测量杆就会碰撞到最小内腔的内壁；若盘形测针直径过大或星形测针的4个测针测杆长度过大，会无法通过内腔最小直径处。当测针经过的内腔最小直径为 $d$ ，测量部位的圆直径为 $D$ ，测杆最大直径为 $m$ ，则测量选择的盘形测针直径或星形测针最大外接圆直径 $M$ 的范围为 $D > M > (D-d+m+\text{安全距离})$ 。盘形测针如图3(a)所示，星形测针如图3(b)所示，测针直径与长轴内腔直径关系如图3(c)所示。

## 路径规划

与传统的测量方法不同，长轴内腔内的凸台、导角等结构在测量时，测针所在位置不可见，不能直接在测量部位采点，需要合理规划测量路径，采用合适的测量方式。

低压涡轮长轴结构类型多，测量时需要综合使用多种类型和直径的测针，测试测量机更换测针的时间与安全移动的时间，比较不同测针测量同一部位测量时间与采用同一测针测量不同部位的时间，归纳出各种测量方案的检测效率。

经过测试，测量机更换一次测针用时20s，最长距离的移动时间为

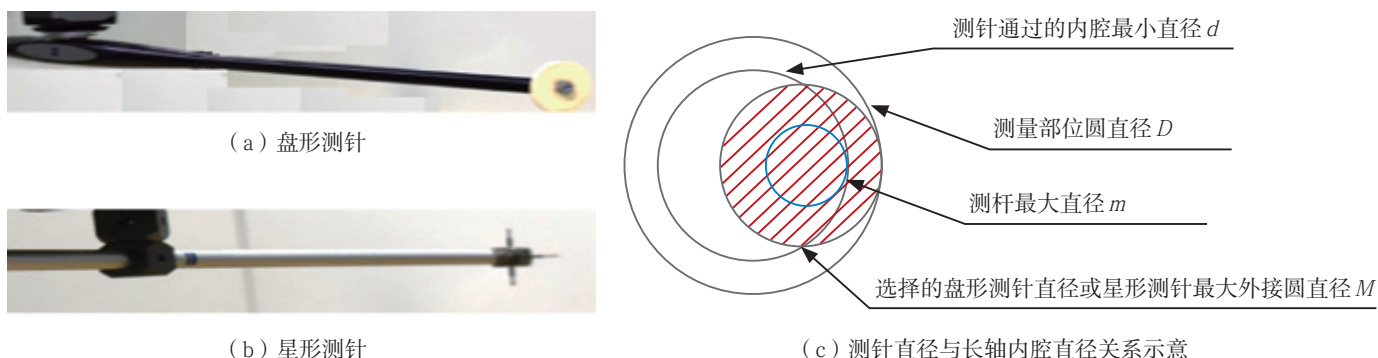


图3 测针结构与测量关系

10s。在相同条件下完成长轴特性测量，采用测量部位优先（用不同测针完成同一部位测量后更换到下一测量位置）的测量时间为2.5h，而采用测针优先（用同一测针完成不同部位上需要用该测针测量的结构后更换其他测针）的时间为1.5h。为了提高测量效率，以不同测针名为索引，对测量特性进行分组，各组间的测量顺序按就近原则进行排序，按照优化的测量路径，检测效率能提高30%以上。

### 测量数模

低压涡轮轴内腔测量无法通过目视采点，需要通过数模引导测量，且测量路径规划、测针类型选择、测量理论值和测量位置都需要通过数模推算得出，故数模的准确性、完整性对测量结论的可靠性起到非常重要的作用。建模过程应严格按照基于航空发动机建模要求执行，模型应保证完整准确，无冗余、无碎面，工件坐标系准确并与设计基准一致。

### 关键特性尺寸的测量和评价

低压涡轮轴关键结构尺寸可分为径向尺寸、轴向尺寸、形位公差、壁厚尺寸4大类300多个特性。通过稳定的定位、合理的测针、准确的数模和测量策略，能够实现长轴特性的精准检测，但长轴壁厚和大圆弧曲面与圆柱面交点错检率较高，需要重点分析。

#### 长轴壁厚测量

壁厚的测量是在长轴指定截面的内外壁上测量同心圆，计算同心圆的半径差，即指定位置的壁厚，测量时需要在数模内外壁在同一截面选取圆特性，应用相同的测针、测量策略、拟合方法和评价方法，否则就会造成测量错误。

通过检验员在长轴5个不同截面上分别测量壁厚，每个截面圆测量2次，进行测量系统分析，测量系统分辨数均大于4，具有很好的分辨能力。测量的重复性和再现性均小于零件公差的30%，说明该测量方法是可接受的。

#### 大圆弧曲面与圆柱面交点测量

大圆弧曲面与圆柱面交点的测

量是检测的难题之一。为了保证测量的准确性，对大圆弧面和圆柱面进行高密度扫描，扫描时一定要保证扫描线在轴的同一条母线上，参考理论数模，将扫描点进行过滤重新拟合，构造实测圆，实测圆与圆柱面相交，计算相交点间的距离。

为了验证检测的可靠性，对同一零件尺寸及偏差为 $(16 \pm 0.2)$  mm的交点尺寸连续测量6次，测量结论如表1所示。采用A类评定方法进行测量不确定度分析，得出合成不确定度为 $6.36 \mu\text{m}$ ，扩展不确定度为 $12.72 \mu\text{m}$ 。因为 $(16 \pm 0.2)$  mm交点尺寸的公差为 $-0.2 \sim 0.2$  mm，公差的1/4为0.1 mm，测量不确定度满足小于公差1/4的标准要求。

### 结束语

针对航空发动机低压涡轮长轴结构特点，通过测量工装研制、测量过程研究，评价结果验证，实现了发动机低压涡轮长轴内腔的准确高效检测，保证了长轴内腔关键特性尺寸测量和评价方法的准确性。检测方法通用性较强，能同时实现其他多种轴类零件的可靠测量。 **航空动力**

（高晓斐，中国航发西航，高级工程师，主要从事先进检测技术研究）

表1 交点尺寸测量结果

测量次数	1	2	3	4	5	6
测量值/mm	16.012	16.011	15.985	15.987	16.003	16.010