

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220932-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220932

压气机可调静子叶片数字化标定方法与应用

曹传军, 顾志祥, 徐 峰

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘 要: 为了提高可调静子叶片(variable stator vane, VSV)的角度精度, 建立了压气机可调静子叶片数字化标定的流程和方法, 主要步骤包括: 角位移传感器标零, 极限位置角度测量, 连杆长度调节, 极限位置角度校核, 叶片角度与作动机构线位移调试以及全转速角度偏差校核等。搭建了 VSV 数字化标定的平台, 规避了传统标定方法受人员操作, 工装精度对标定结果的影响。试验结果表明: 新的数字化标定方法精度控制在 0.5° 范围。可调静叶角度的精度提升提高了压气机匹配性能和压气机性能评定的精确性。

关 键 词: 压气机; 可调静子叶片; 数字化; 标定; 应用

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Digital calibration method and application of compressor variable stator vanes

CAO Chuanjun, GU Zhixiang, XU Feng

(Commercial Aircraft Engine Company Limited,

Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200241, China)

Abstract: In order to improve the angle precision of variable stator vane (VSV), the process and method of digital calibration for VSV were established. The main steps include: zero calibration of angular resolver, angle measurement of extreme position, length adjustment of connecting rod, angle checking of extreme position, vane's angle and liner displacement of actuator, and angle checking of difference for all speeds. The platform system was also founded for VSV digital calibration. The method proposed avoided the impact from personal operation deviation and precision of calibration tool. The test results showed that, the new digital VSV calibration improved the angle precision at half degree. The improvement of angle precision promoted the matching performance of compressor and the accuracy of compressor performance evaluation.

Keywords: compressor; variable stator vane; digital; calibration; application

高负荷多级轴流压气机为了保证中低转速的喘振裕度满足要求, 通常会设计多排的可调静子叶片(variable stator vanes, VSV), 通过改变转子来流的攻角从而调节叶片的负荷和压气机的喘振裕度^[1]。LEAP-X 和 GE9X 等先进民用发动机压气机分别设计了五排和六排可调静叶^[2], F119 和

M88 等先进发动机压气机设计了三排可调静叶^[3]。国内外针对可调静叶角度调节对压气机性能的影响开展了大量的研究, Long 等^[4]研究表明, 静叶调节对于低反力度低负荷压气机, 小流量系数时有效性更高。张健、胡晏铭等^[5-6]研究表明, 静叶角度调节改善了级间匹配关系, 提高绝热效率,

收稿日期: 2022-12-03

基金项目: 航空发动机及燃气轮机重大专项

作者简介: 曹传军(1982—), 男, 研究员, 博士, 主要从事压气机设计与试验研究。E-mail: ccjnuaa@126.com

引用格式: 曹传军, 顾志祥, 徐峰. 压气机可调静子叶片数字化标定方法与应用[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220932. CAO Chuanjun, GU Zhixiang, XU Feng. Digital calibration method and application of compressor variable stator vanes[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220932.

增加了稳定裕度并改善了压气机非设计工况的性能。曹志鹏等^[7]采用流线曲率法求解组合压气机准三维流场并结合全三维计算分析了静叶调节对流场结构的影响,结果表明静叶调节削弱了叶片排中激波强度,抑制了气流的分离,明显改善了流场结构。王赫等^[8]研究了可调静叶调节角度在发动机加减速过程中随转速的变化规律,得出了加速过程中在稳态角度上偏差 2° ,减速过程中偏差 5.5° ,可以确保试验过程中压气机有较好的稳定裕度,保证试验安全。

可调静叶调节机构主要由作动机构、联动机构和可调静子叶片组成,角度调节的精度和可靠性是影响压气机性能优化的关键因素,国内外开展了仿真和试验研究。Pohl 等^[9]研究了可调静叶端区圆台与机匣间隙之间形成的微小空腔流动以及主流的相互影响,双倍间隙空腔流动额外增加了 6.8% 总压损失,影响区域集中在 40% 叶高以下。Wollmann 等^[10]研究了可调静叶轴颈衬套的摩擦磨损和失效形式,试验发现了 4 种主要的磨损和失效现象。杨伟等^[11]采用 ADAMS (automatic dynamic analysis of mechanical systems, ADAMS) 参数化分析方法建立了可调叶片调节机构的简易模型,包括作动筒、驱动臂、曲柄和连杆,可以快速、有效地进行调节机构结构参数优化,满足方案设计阶段的要求。张晓宁等^[12]采用 UG 软件建立可调叶片、摇臂、联动环、操纵杆、作动筒的三维模型,利用 ADAMS 构建了可调叶片调节机构多刚体系统动力学模型,分析了联动机构仿真结果与设计目标的差异和 AUTOCAD 绘图软件计算法结果的比较,验证了 ADAMS 进行调节结构仿真的可行性和经济性,为进一步有限元结构分析奠定基础。张少平等^[13]应用自研柔性多体动力学仿真程序,建立可调叶片调节机构多体动力学模型,研究表明联动环和摇臂的柔性耦合效应和机匣的热变形对角度偏差和周向一致性影响显著,设计时需要增加联动环与摇臂的刚性且控制机匣的变形协调。郑彦等^[14]采用 ADAMS 虚拟样机仿真软件研究了可调静叶联动环支架间隙与数量对调节精度的影响,得出了联动环支架数量 8 个,间隙 0.05~0.10 mm 的组合,角度调节精度最高的结论。张哲等^[15]建立了可调静叶调节机构的刚柔耦合动力学模型,考虑装配间隙、尺寸公差、关键件柔性、热及接触摩擦等影响,揭示了气动力引起的摩擦力矩是造成机构阻滞力、角

度调节迟滞和调节精度下降的主要原因。张宝振等^[16]通过简化建模单元,向求解器提供力元对状态变量的偏导数,在保证计算精度的前提下,提升了计算效率 24.56%,提出并验证了改善调节机构性能的补偿措施。张学宝等^[17]基于系统工程的方法,从需求、设计、制造协同、验证的角度对静叶调节机构进行了精益研发,旨在提高调节机构的可靠性和设计成熟度,其中叶片角度采用自主开发的倾角仪进行测量。

综上所述,采用运动学和动力学模型研究整个可调静叶调节机构角度调节精度的研究较多,而针对角度标定环节的研究较少。文献 [18] 介绍了可调静叶角度调节的原理和 3 种传统校准标定方法,其中刻度盘式和联动环孔式定位精度低、机匣孔式需要预设校准孔。本文创新采用数字化标定方法,即直接采用经过工装标定的角位移传感器获得叶片的实际角度,标定出作动机构全行程范围内角度与作动线位移的关系。本方法极大地提高了压气机可调静叶调节机构的角度控制精度,对航空发动机多级压气机性能的优化提升具有重要的工程实用意义。

1 销孔定位标定方法及其局限性

VSV 调节机构角度标定的目的是通过作动机构操纵组件与联动环之间连杆长度的调节将可调叶片在流道内的安装角度确定下来,再通过作动机构的打压过程得到不同转速时 VSV 角度与作动机线位移之间的关系,发动机在实际工作过程中,仅开环控制作动机构的线位移。

传统的 VSV 角度标定采用的是销孔定位式叶片角度标定方法,如图 1 所示,在每级可调叶片周向选择均布的 2 处安装标定块。标定块上有 3 个定位销孔,通过定位销将联动环上的孔与标定块的孔对齐,即为将定位销处的联动环进行了周向的定位,该 3 个孔可分别用来定位可调静子叶片的 3 个对应的角度状态。

采用以上传统的角度标定方法有以下局限性:①受限于安装空间,标定块周向仅安装 2 处,但由于联动环与摇臂在径向方向存在间隙,因此安装两个标定块,并不能完全将联动环固定;②标定块上静叶安装孔与联动环定位孔的距离需同摇臂的长度保持一致,受限于摇臂长度,该距离较短,销孔位置精度对角度的影响较大;③为保证定位销能顺利插入标定块和联动环上的孔,

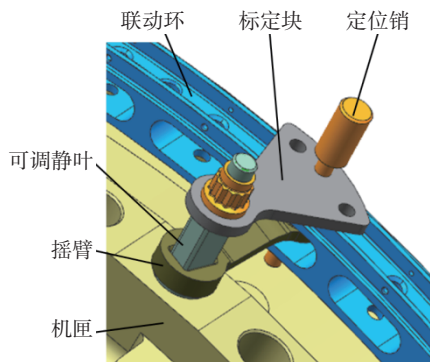


图 1 VSV 标定块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VSV calibration tool

销子与孔一般采用间隙配合, 插销定位时, 操作手法的不同, 得到的叶片角度有差异; ④受尺寸限制, 该标定块上开孔的数量有限, 仅开了 3 个孔来定位可调叶片的 3 个角度状态。其中, 上述第②、③两条因素对标定精度影响最为显著。定位块零件精密孔实际加工位置, 安装位置等均与理论要求存在偏差。按照高压压气机摇臂长度约为 30 mm, 精密孔常用位置度 0.05 mm, 定位块安装位置度 0.05 mm, 可调叶片安装孔位置度 0.1 mm, 定位销与标定块孔、联动环孔的配合间隙极限 0.04 mm(半径方向)计算, 引入的角度偏差约为 0.28°。

2 数字化角度标定流程及方法

2.1 数字化角度标定流程

VSV 数字化角度标定的主要步骤为: 连接安装各调节机构零组件、标零后的角位移传感器, 然后测量静叶极限位置角度与设计值偏差, 再通过调整连杆长度使得各转速下静叶角度偏差满足要求, 最后联合调试得到各级静叶角度与作动筒线位移的关系曲线。具体流程如图 2 所示。

2.2 数字化角度标定方法

2.2.1 连接调节机构

调节机构主要包括作动筒、操纵组件、连杆、联动环、摇臂、可调静子叶片以及各连接位置处的销轴、紧固件等, 其中连杆的长度可以调节(图 3)。

2.2.2 角位移传感器标零

VSV 的设计角度以摇臂平行于发动机轴线时为 0°, 如图 4 所示。为保证角位移传感器示数与叶片实际角度一致, 需先对角位移传感器示数进行标零。

通过将标零工装安装在校准平台, 当定位轴插入中间孔时, 测试位置与叶片 0°位置一致, 在

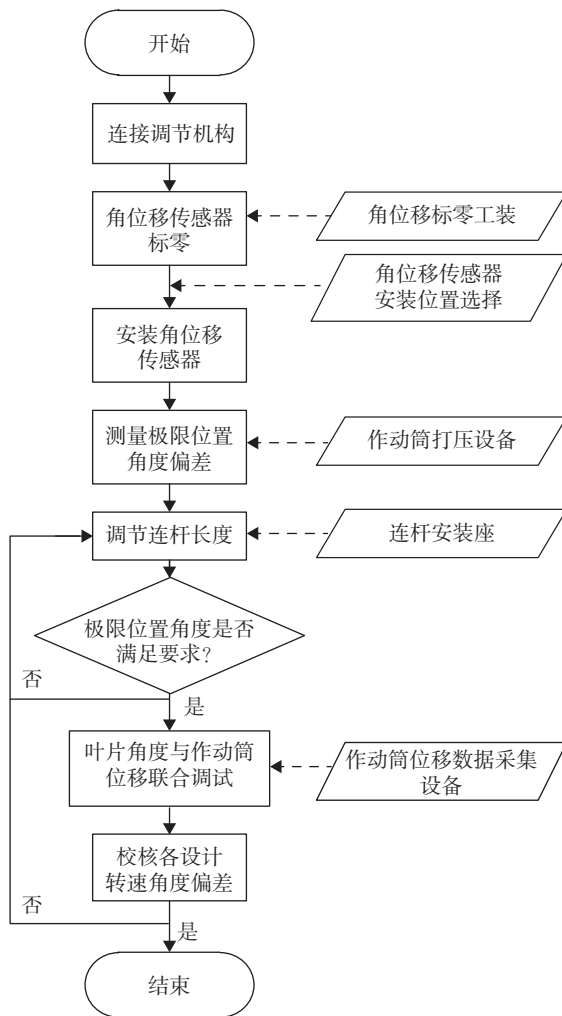


图 2 VSV 数字化角度标定流程图

Fig. 2 Process of digital angle calibration of VSV

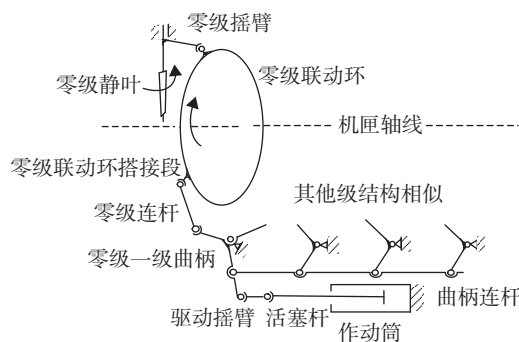


图 3 VSV 调节机构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of VSV adjusting mechanism

此处可进行角位移传感器的标零, 如图 5 所示。标零工装的精度与两个因素有关: 一是销孔与角位移传感器安装轴的距离; 二是角位移传感器和定位销的安装位置度。通过校准平台左右两侧的销孔, 可对测量系统的测量精度进行校验。

校准工装的精度 ε 可用式(1)表示

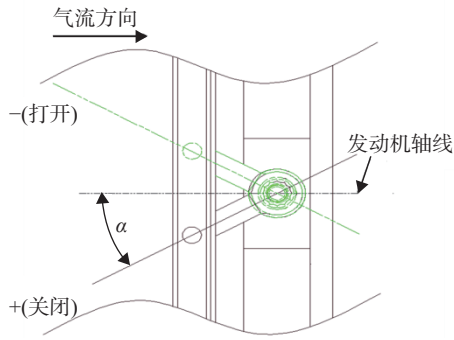


图 4 摇臂角度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of arm angle

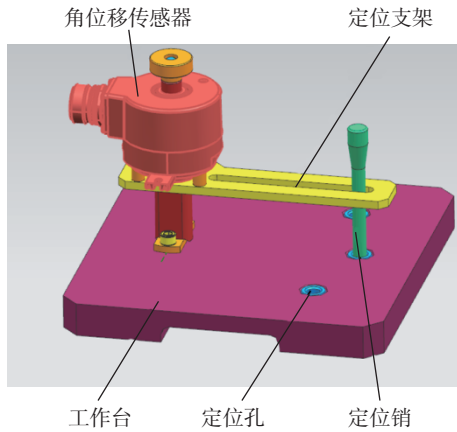


图 5 角位移传感器标定台模型

Fig. 5 Model of angular resolver calibration platform

$$\varepsilon = \arcsin\left(\frac{\varepsilon_{1\max} + \varepsilon_{2\max}}{R}\right) \quad (1)$$

式中 $\varepsilon_{1\max}$ 为角位移传感器安装位置度; $\varepsilon_{2\max}$ 为定位销安装位置度; R 为定位销孔距离角位移传感器轴心距离。

按目前机械加工的精度, 若 $\varepsilon_{1\max}$ 、 $\varepsilon_{2\max}$ 均为 0.05 mm, R 取 120 mm, 该校准工装的精度可以达到 0.05°, 如图 6 所示。

2.2.3 安装角位移传感器

由于叶片数量较多、传感器安装空间限制、成本高等因素, 不可能在所有叶片上安装角位移传感器, 因此需选择合适数量的叶片进行测量。但是由于联动环上限位螺钉与机匣存在间隙, 会导致联动环与机匣偏心, 从而引起不同周向位置的叶片角度不同。间隙越大, 叶片角度极差越大, 因此需要选择合适数量和合适位置的叶片测量其角度, 才能代表该级所有叶片的平均角度值。

图 7 分析了联动环位置对可调静叶角度的影响。图中 X 为联动环偏离方向; Y 为与联动环偏离方向相垂直的方向; θ 为可调静叶相对于 X 轴的角向位置; δ 为由于限位套间隙导致的联动环

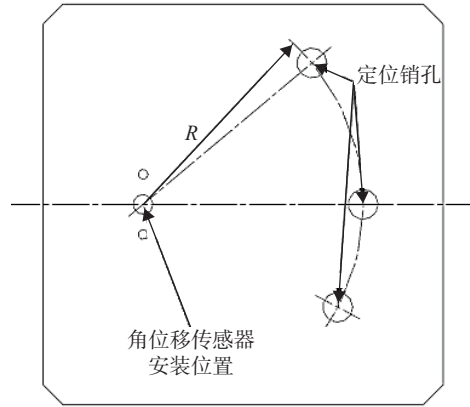


图 6 角位移传感器标定台定位销孔示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the pin hole of angular resolver calibration platform

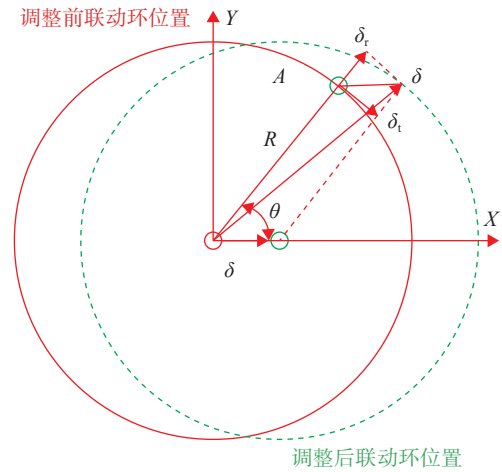


图 7 联动环偏心运动位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of action ring eccentric movement

位置偏移量; δ_r 为偏移量径向分量; δ_t 为偏移量切向分量; L 为摇臂轴向有效长度; $\Delta\varphi$ 为可调静叶角度偏移量; R 为联动环半径; A 为位于 θ 位置处的摇臂和联动环连接点。

由于联动环偏心, 位于 θ 角向位置的 A 点也存在偏移量 δ , 位置和联动环一致, 其运动可分解为径向 δ_r 和切向 δ_t (如图 8、图 9), 且满足如下:

$$\delta_r = \delta \cos \theta \quad (2)$$

$$\delta_t = \delta \sin \theta \quad (3)$$

其中切向偏移 δ_t 会导致可调静叶角度发生偏移 $\Delta\varphi$ 满足

$$\Delta\varphi = \frac{\delta_t}{L} = \frac{\delta \sin \theta}{L} \quad (4)$$

对于数量为 N 的周向均匀分布的叶片, 则有

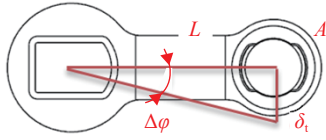


图 8 摇臂运动示意图

Fig. 8 Schematic diagram of arm movement

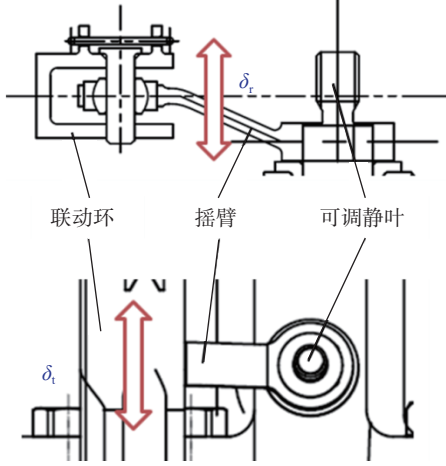


图 9 摇臂连接点位移分量示意图

Fig. 9 Schematic diagram of arm connection point motion component

$$\Delta\varphi(n) = \frac{\delta \sin \left[\theta(1) + \frac{2\pi}{N} \cdot (n-1) \right]}{L} \quad (5)$$

其平均角度偏移值为

$$\Delta\bar{\varphi} = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta\varphi(n)}{N} \approx \frac{\int_0^{2\pi} \Delta\varphi(\theta) d\theta}{N} = \frac{\delta \int_0^{2\pi} \sin \theta d\theta}{NL} = 0 \quad (6)$$

由此可见, 限位螺钉间隙带来的联动环位置偏移能够导致可调静叶角度变化。周向角度变化分布满足正弦函数(如图 10 所示), 周向位置角度变化平均值为 0°。以 S1 为例, 摇臂长度为 31 mm, 则联动环周向偏移 1 mm 能够带来最大 1/31 弧度的角度偏差, 约 1.85°, 摇臂长度越小, 相同联动环周向偏移量对角度偏差的影响越大。为了测量的

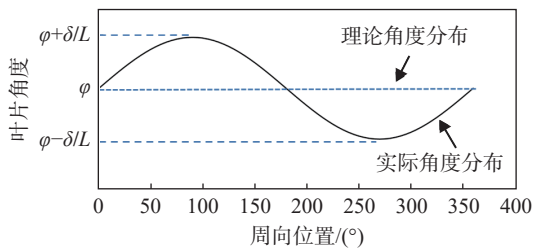


图 10 可调静子叶片角度周向分布示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the angle circumferential distribution for VSV

准确性, 选取周向均布 4 处的叶片安装角位移传感器进行角度标定。

2.2.4 测量极限位置角度偏差

VSV 标定与角度测量系统可以测量叶片转角, 如图 11 所示, 定位轴 1 安装在叶片尾端的螺纹上; 定位轴 2 通过孔轴配合套在定位轴 1 上, 并通过底部的燕尾槽跨在摇臂上; 压紧螺母将定位轴 2 压紧在摇臂上。通过上述 3 个工装零件的安装, 将可调叶片的角度基准转移到标零后的角位移传感器上。

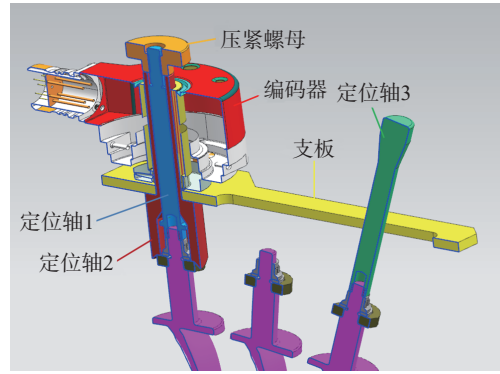


图 11 VSV 角度测量装置图

Fig. 11 Schematic diagram of the angle measurement for VSV

角位移传感器轴套通过涨紧与定位轴 2 实现配合, 将可调叶片与角位移传感器进行刚性连接; 角位移传感器外壳体通过螺钉与支板固定。定位轴 3 跨过若干叶片, 安装在叶片尾端螺纹上, 穿过支板的腰型孔, 限定了支板的转动自由度。

当叶片转动时, 角位移传感器外壳与支板自由度为零, 不会随之转动; 角位移传感器轴套会随着叶片转动, 实现了对叶片转角的测量。

通过上述步骤利用角位移传感器测量叶片在极限打开位置和极限关闭位置的角度, 并与理论设计值进行对比。如果差异超过 0.5°, 对性能及流量会有较大影响, 则需要调整连杆长度来满足要求。

2.2.5 调节连杆长度

连杆的长度可以通过测量工作平台进行调整及测量, 如图 12 所示。一个带有销轴的固定柱安装在工作平台上, 另一带有销孔的滑动测量柱安装在工作平台的滑槽中。连杆安装在测量平台上, 固定柱的销轴与其中一侧杆端轴承孔配合, 杆端轴承贴合至销轴端面; 连杆的另一侧杆端轴承孔通过插销与测量柱的孔固定。两个立柱在相同高度位置增加圆槽, 便于游标卡尺可以卡住测量。

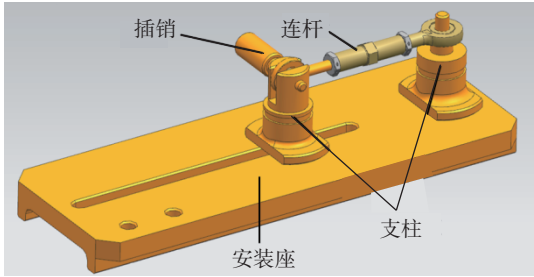


图 12 连杆长度测量示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the length measurement for connecting rod

通过读取卡尺测量长度,可获得连杆长度值。

通过上述方法逐一调整 and 测量各级连杆的长度后,将连杆重新安装至调节机构组件上。

2.2.6 校核极限位置角度偏差

重复文中第 2.2.4 节的内容检查,叶片的调节范围是否符合设计要求,如果满足,则可以进行作动筒行程全范围内的角度标定,否则重新调整连杆长度。

2.2.7 叶片角度与作动筒位移联合调试

安装液压作动筒活塞杆位移信号采集、显示设备,确认设备工作正常;以其中一级可调叶片作为调试基准,采用多级联调的模式,分别记录调节机构由全关闭到全打开(对应发动机升转过程)以及调节机构由全打开到全关闭(对应发动机降转过程)时各级叶片角度与作动筒活塞杆位移的关系。发动机实际工作过程中,转速与角度关系由转速与作动筒位移开环控制。

2.2.8 校核各设计转速角度偏差

检查全转速范围内各级叶片角度并与设计值进行对比。通常很难保证全转速范围内角度精度一致且满足要求,因此需重点关注发动机典型工作转速时(通常为发动机中高转速)VSV 的角度精度。如果某级偏差较大,比如超过 0.5°,则需再次调整连杆长度,重新进行联调,以保证角度在各行程范围内的调节精度满足要求。

3 应用实例

以某民用大涵道比涡扇发动机十级高压压气机 VSV 标定过程为例(该高压压气机共有 5 排可调静子叶片,采用角度联调方式),对调试结果进行评判。机匣左右侧各有一个作动筒驱动联动机构和可调静叶转动。

3.1 数字化角度标定结果

3.1.1 连杆长度调节

两侧连杆长度调节一致,有利于控制可调叶片周向角度的一致性和角度调节过程中的同步性。调节后的连杆长度与设计参考值的对比如表 1 所示,实际左右连杆长度差最大仅 0.10 mm,连杆长度实际值与设计参考值最大差值仅 0.45 mm。连杆长度的控制精度提高,可以提升角度的控制精度并减小升回程的角度差异。

3.1.2 联动环偏心影响

根据前文理论分析,限位螺钉与机匣凸台间隙导致的联动环偏心会影响同级叶片角度的极差,但不影响平均值。

通过数字化标定方法测量不同偏心状态下每级叶片上均布的 4 个测点角度值来评估联动环偏心对叶片角度的影响。以某级叶片角度为例,从表 2 中可以看出,联动环偏心对单一测点的角度值影响较大(极差较大),对于该级角度平均值影响较小。

3.1.3 作动筒线位移与摇臂转角标定结果

标定时分为去程和回程,去程代表发动机的起动至设计转速的过程,回程代表发动机从设计转速降转至停车的过程。标定的过程即确定发动机运转在不同转速时,作动筒线位移与角位移传感器指示的周向平均角度之间的关系。标定完成之后,发动机实际运转过程中,通过转速与作动筒线位移的标定关系控制 VSV 随转速的角度变化。通过在 VSV 升回程打压过程中,同时记录作动筒线位移与角位移传感器转角,可以绘制出角

表 1 各级连杆长度值

Table 1 Length of the connecting rod

mm

叶片级	L 参考值	L 实测值(左)	L 实测值(右)	两侧实测值差异	与参考值最大差异
S0	95.30	95.32	95.34	0.02	0.04
S1	88.85	88.40	88.50	0.10	0.45
S2	89.73	89.74	89.74	0.00	0.01
S3	90.81	90.79	90.75	0.04	0.06
S4	89.64	89.30	89.31	0.01	0.34

表 2 偏心状态下同级叶片角度差异对比

Table 2 Different vane angle at eccentric state of the same stage (°)

叶片位置	偏心状态	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	极差	平均值	差异
极限关	偏心大	13.70	18.27	19.27	15.54	5.57	16.70	0.09
	偏心小	16.77	16.90	16.77	16.73	0.17	16.79	
中间点	偏心大	-10.17	-6.12	-5.25	-8.63	4.92	-7.54	0.09
	偏心小	-7.88	-7.46	-7.40	-7.79	0.48	-7.63	
极限开	偏心大	-9.37	-4.98	-3.88	-7.40	5.49	-6.41	0.21
	偏心小	-6.21	-6.21	-6.17	-6.21	0.04	-6.20	

位移传感器转角与作动筒线位移的关系。

在不同转速下作动筒伸出量与摇臂转角的对应关系目标值(理论值)如表 3 所示,表中状态 1 代表初始位置,作动筒完全伸出,并以状态 1 位移和摇臂角作为基准值 1。

图 13、图 14 为左右两侧作动筒实测 VSV 控制曲线(即作动筒线位移与 VSV 角度关系曲线,线位移和角度均进行了归一化处理)与理论目标 VSV 控制曲线进行对比。从图中可以看出,在作动筒的全行程范围内,各级 VSV 角度与左右两侧

表 3 作动筒活塞杆伸出量-叶片转角的对应关系目标值

Table 3 Target of relationship between the actuator piston rod displacement and vane angles

状态	位移参考值	S0 摇臂角	S1 摇臂角	S2 摇臂角	S3 摇臂角	S4 摇臂角
1	1	1	1	1	1	1
2	0.993	1.000	0.984	0.983	0.977	0.978
3	0.979	0.998	0.948	0.943	0.926	0.928
4	0.957	0.994	0.895	0.886	0.848	0.858
5	0.921	0.981	0.811	0.793	0.727	0.745
6	0.870	0.950	0.689	0.662	0.557	0.588
7	0.790	0.871	0.504	0.465	0.306	0.364
8	0.676	0.699	0.249	0.202	-0.020	0.084
9	0.534	0.379	-0.074	-0.114	-0.386	-0.207
10	0.293	-0.254	-0.525	-0.508	-0.783	-0.458
11	0.188	-0.592	-0.711	-0.647	-0.892	-0.490
12	0.121	-0.825	-0.821	-0.721	-0.935	-0.481
13	0.064	-1.039	-0.909	-0.773	-0.956	-0.454
14	0.041	-1.130	-0.942	-0.791	-0.959	-0.438

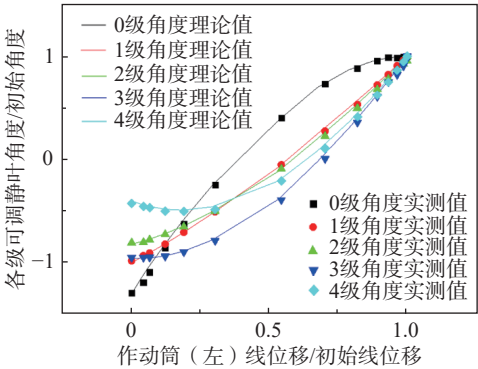


图 13 作动筒(左)线位移与叶片角度关系图

Fig. 13 Curve graph of the left actuator linear displacement and vane angle

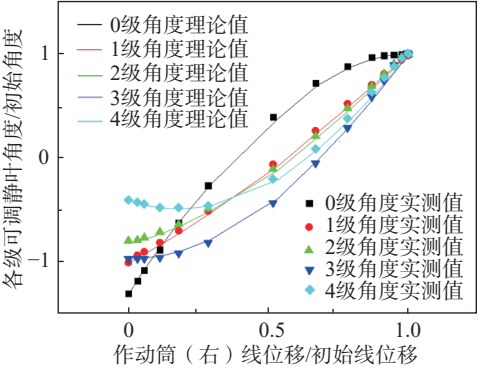


图 14 作动筒(右)线位移与叶片角度关系图

Fig. 14 Curve graph of the right actuator linear displacement and vane angle

作动筒线位移的标定结果均与理论要求一致性较好,在各工作转速状态点,实测角度与理论要求的最大差异为 0.5° 。差异主要是因为该调节机构是运动机构,为了保证机构的运动灵活性,各旋转副均采用小间隙设计,传力路径中的各个旋转副间隙会消耗作动筒的活塞杆位移,导致实际运动过程中出现相同位移条件下,叶片角度出现轻微偏差的现象。

3.2 试验结果分析

完成可调静叶数字化标定方法之后,发动机运转至设计转速,试验过程中升回程 VSV 角度与目标值差异如图 15(由于外部管路干涉, S0 角位移传感器未安装,此处仅给出 S1~S4 共 4 排可调静叶的平均角度变化,图中黑色曲线代表角度目标值,红色曲线为试验中升回程实际的 VSV 角度)。结果表明,采用 VSV 数字标定方法,压气机 VSV 角度在升回程过程中与设计的目标角度值吻合很好,尤其在 80% 相对换算转速以上,从而保证压气机在中高速以上的各级流量、压比等性能参数匹配良好,达到设计预期。

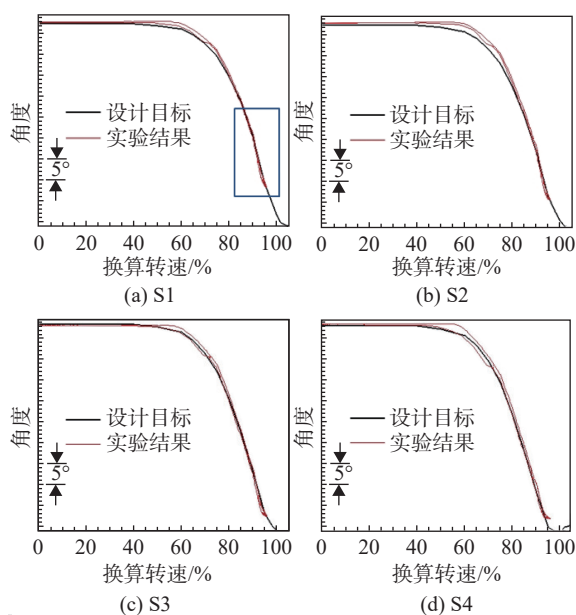


图 15 采用数字化标定方法的 VSV 角度试验数据

Fig. 15 VSV angle test data relate to digitized calibration method

进一步细化中高速压气机各级角度与目标值的差异,如图 16 所示。选取发动机试验的降转过程即压气机 VSV 在回程时的状态进行分析,因为回程时发动机达到热平衡,性能数据反映了真实工况,选取的转速范围如图 15 矩形框所示,图 16 中数值是各级可调静叶试验中实测角度值与目标

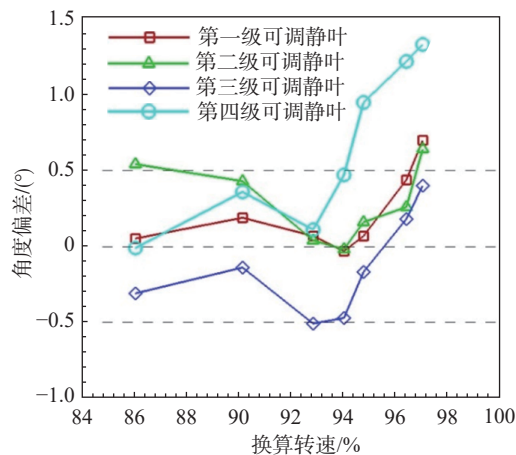


图 16 中高速减速过程 VSV 试验角度与目标值偏差对比

Fig. 16 Angle difference comparison of test data and target in deceleration process at medium and high speeds

值的差。结果表明,除 S4 在 95% 转速以上偏差超过 1° , S1 和 S2 在接近设计转速偏差达到 0.6° ,其余各级在中高速范围内与目标角度值差异均在 0.5° 以内。从图 15 和图 16 所示结果看,在可调机构作动的中间转速范围角度误差相对较小,而在较低转速范围和近设计转速附近误差相对较大。原因是该调节机构标定动作是在发动机车间总装过程中进行的,机构处于常温状态且没有负载,这与发动机的实际工作状态存在较大差异;此外由于调节机构采用刚性摇臂构型(摇臂尾部设计有关节轴承球,通过该轴承球的转动补偿联动环的周向运动),当机构处于运动的两个近极限状态(对应低转速和设计转速)时,联动环周向运动的角度补偿较大,机构中的运动副摩擦阻力也出现较大影响。

多级压气机性能试验中 VSV 角度联调试验表明,压气机采用数字化调试标定的 VSV 控制精度得到明显提高,在高速角度偏差由 1° 缩小至 0.5° 后,流量偏差由 1.45% 降至 0.73%,压比偏差由原来的 1.83% 降低至 0.92%,效率偏差减小 0.07%,角度精度提升明显提高了压气机性能参数的精确性。

4 结 论

1) 建立了 VSV 数字化标定的流程和方法,主要步骤包括:角位移传感器标零,极限位置角度测量,连杆长度调节,极限位置角度校核,叶片角度与作动机构位移调试以及全转速角度偏差校核等。

2) 搭建了 VSV 角度数字化标定的平台,包

括角位移传感器标零机构, 作动筒线位移与角度关系标定安装结构、数采设备。消除了两侧连杆偏差大, 联动环偏心, 极限角度偏差对角度精度的影响, 规避了传统标定方法受人员操作, 工装精度对标定角度的影响。

3) 试验结果表明, 数字化 VSV 标定方法各级角度精度在中高转速基本控制在 0.5° 范围。可调静叶角度控制精度的提升提高了压气机匹配性能和压气机性能评定的精确性。

参考文献:

- [1] 桂幸民. 航空压气机气动热力学理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014.
GUI Xingmin. Compressor aerothermodynamics and its applications in aircraft engines[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014. (in Chinese)
- [2] 曹传军, 刘天一, 朱伟, 等. 民用大涵道比涡扇发动机高压压气机技术进展[J]. 航空学报, 2023, 44(12): 027824.
CAO Chuanjun, LIU Tianyi, ZHU Wei, et al. Technology development in high pressure compressor of civil high bypass-ratio turbofan engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(12): 027824. (in Chinese)
- [3] 熊劲松, 侯安平, 袁巍, 等. 可调叶片的发展趋势及其气动问题的探讨[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 112-116.
XIONG Jinsong, HOU Anping, YUAN Wei, et al. Some discuss on technology trend and aerodynamics problem of adjustable blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 112-116. (in Chinese)
- [4] LONG Bingxiang, CHEN Qin, REN Zebin, et al. Effectiveness of variable rotor blades technique & variable stator vanes technique in adjusting axial-flow compressor[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 751(1): 012003.
- [5] 张健, 任铭林. 静叶角度调节对压气机性能影响的试验研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 27-30.
ZHANG Jian, REN Minglin. Experimental investigation on effect of stator vane angle adjustment on compressor performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 27-30. (in Chinese)
- [6] 胡晏铭, 聂超群. 轴流压气机变工况导叶/静叶/转速联调规律探索[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(7): 765-771.
HU Yanming, NIE Chaoqun. Exploration of combined adjustment laws about IGV, stator and rotational speed in off-design conditions in an axial compressor[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2010, 40(7): 765-771. (in Chinese)
- [7] 曹志鹏, 刘波, 丁伟. 静叶角度调节对组合压气机性能优化机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 878-881, 893.
CAO Zhipeng, LIU Bo, DING Wei. Stator setting angles adjustment on performance improvement of axial-centrifugal compressor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 878-881, 893. (in Chinese)
- [8] 王赫, 杨纯辉, 韩文俊, 等. 核心机压气机进口可调静子叶片角度控制规律[J]. 航空发动机, 2022, 48(3): 20-24.
WANG He, YANG Chunhui, HAN Wenjun, et al. Control law of compressor inlet variable stator vanes angle of a core engine[J]. Aeroengine, 2022, 48(3): 20-24. (in Chinese)
- [9] POHL D, JANSSEN J, JESCHKE P, et al. Variable stator vane penny gap aerodynamic measurements and numerical analysis in an annular cascade wind tunnel[J]. International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, 2020, 11(2): 44-55.
- [10] WOLLMANN T, NITSCHKE S, KLAUKE T, et al. Investigating the friction, wear and damage behaviour of plain bearing bushes of the variable stator vane system[J]. Tribology International, 2022, 165: 107280.
- [11] 杨伟, 徐伟. ADAMS 参数化分析在高压压气机调节机构设计中的初步应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(4): 20-24.
YANG Wei, XU Wei. Preliminary application of parameterized analysis based on ADAMS in VSV's adjusting mechanism design of high pressure compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2012, 25(4): 20-24. (in Chinese)
- [12] 张晓宁, 赵雷, 杨勇刚. 联动机构虚拟样机运动学动力学仿真[J]. 航空发动机, 2014, 40(4): 56-60.
ZHANG Xiaoning, ZHAO Lei, YANG Yonggang. Kinematics and dynamics simulation of jointly adjusting mechanism based on virtual prototype technology[J]. Aeroengine, 2014, 40(4): 56-60. (in Chinese)
- [13] 张少平, 杨川, 张一彬. 压气机静叶调节机构的柔性多体建模及仿真[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2018, 31(4): 12-18.
ZHANG Shaoping, YANG Chuan, ZHANG Yibin. Modeling and simulation of the adjusting mechanism of stators through flexible multibody approach[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2018, 31(4): 12-18. (in Chinese)
- [14] 郑彦, 钟明桥. 联动环支架间隙和数量对静子叶片调节精度的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(5): 20-25.
ZHENG Yan, ZHONG Mingqiao. Analysis of clearance and number influence of linkage ring brackets on stator vane adjustment accuracy[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(5): 20-25. (in Chinese)
- [15] 张哲, 王汉平, 孙浩然, 等. VSV 调节机构阻滞力和调节精度的归因分析[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 380-390.
ZHANG Zhe, WANG Hanping, SUN Haoran, et al. Attribution analysis of blocking force and adjustment accuracy of adjusting mechanism of variable stator vane[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(12): 380-390. (in Chinese)
- [16] 张宝振, 王汉平, 徐峰, 等. VSV 调节机构的仿真提速和精度补偿措施研究[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 499-512.
ZHANG Baozhen, WANG Hanping, XU Feng, et al. Research on simulation speed-up and accuracy compensation measures of adjusting mechanism of variable stator vane[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 499-512. (in Chinese)
- [17] 张学宝, 张一彬, 孙登科, 等. 基于系统工程的压气机调节机构精益研发[J]. 航空动力, 2022(1): 55-58.
ZHANG Xuebao, ZHANG Yibin, SUN Dengke, et al. Lean research and development of compressor adjusting mechanism based on systems engineering[J]. Aerospace Power, 2022(1): 55-58. (in Chinese)
- [18] 张延, 陈栋权, 欧阳酩, 等. 航空发动机可调叶片角度校准工装设计方法[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(5): 21-27.
ZHANG Yan, CHEN Dongquan, OU Yangkun, et al. Analysis of calibration tooling design about adjustable stator blade angle[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2019, 55(5): 21-27. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)