文章编号:1000-8055(2024)07-20220459-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220459

基于骨架特性的压气机可调叶片模型特性修正

李 斌,严红明,李方刚,曹传军,杜 辉

(中国航发商用航空发动机有限责任公司,上海 200241)

摘 要: 基于骨架特性原理,建立压气机可调叶片(VSV)变几何性能模型。介绍了压气机骨架特性处理方法的优点和适用性。基于压气机骨架特性处理方法,开发一种VSV模型修正方法,通过调整流量系数、功系数和损失系数的比例修正系数,实现压气机特性随VSV任意角度变化的高精度建模。建立自动优化方法,提高执行效率,减少人工干预。同时,与某型压气机VSV联调试验结果进行对比,相对误差达到小于0.2%的水平,验证了修正方法的正确性和精度;选用比例系数修正特定骨架特性的修正方法,可推广至压气机特性的其他二次影响修正(如雷诺数效应)。

关键词:压气机;骨架特性;可调叶片模型;特性修正;总体性能仿真中图分类号:V231.3 文献标志码:A

Compressor variable stator vane model performance correction based on backbone map

LI Bin, YAN Hongming, LI Fanggang, CAO Chuanjun, DU Hui

(Commercial Aircraft Engine Company Limited, Aero Engine Corporation of China, Shanghai 200241, China)

Abstract: The model of variable geometry performance for compressor variable stator vane (VSV) was established based on the principle of backbone map. The advantages and applicability of the compressor backbone map were introduced. Based on the compressor backbone map, the VSV model correction method was developed. By adjusting the proportional correction coefficients of the flow coefficient, work coefficient and loss coefficient, the high-precision modeling of compressor performance varying with VSV angle deviation was realized. An automatic optimization method was established, which improved execution efficiency and reduced manual intervention. As a result, compared with the experimental results, the relative error of the model reached a level of less than 0.2%, which verified the correctness and accuracy of the correction method. The correction method by scaling the specific backbone map parameters could be used to the correction of other secondary effects on compressor maps (e.g. Reynolds number effects).

Keywords: compressor; backbone map; variable stator vane model; performance correction; engine cycle simulation

开展涡扇发动机性能仿真计算离不开压气机 部件特性。传统的压气机特性图一般通过试验测 量获取不同转速下的等转速离散点性能参数,包 括相对换算转速、换算流量、压比及效率,再经过 多项式的方法拟合光顺,使离散的压气机性能参 数构成光顺的压气机特性压比-流量曲线及效率

引用格式:李斌, 严红明, 李方刚, 等. 基于骨架特性的压气机可调叶片模型特性修正[J]. 航空动力学报, 2024, 39(7): 20220459. LI Bin, YAN Hongming, LI Fanggang, et al. Compressor variable stator vane model performance correction based on backbone map[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(7): 20220459.

收稿日期:2022-06-26

基金项目:国家科技重大专项(2017-Ⅱ-0001-0013)

作者简介:李斌(1990-),男,高级工程师,硕士,从事航空发动机总体性能模型开发相关工作。E-mail: libin_1860@126.com

云图[1]。传统的压气机特性处理方法,其处理结 果好坏主要依赖于原始数据的精确性和设计师的 经验判断。在低转速区域,较难获取足够的试验 数据,通常需要基于相似理论,发展低转速部件 特性扩展方法,由于压气机在低转速的弱相似性, 使获得的低转速部件特性精度较低[2]。国内外研 究人员对此开展了大量的研究工作:黄向华等[3] 基于典型单级性能曲线,用逐级叠加法实现压气 机低转速部件特性计算。王宇等[4]提出基于抛物 线外推的压气机低转速特性获取方法,处理结果 精度较低,外推后需手工对转速线上不合理的效 率值进行微调。王广等^[5]提出指数外推法计算低 状态特性,预测特性曲线形状和趋势与试验吻合 较好,但预测效率精度误差较大,效率特性误差 约5%。饶高等[2]将指数外推法同支持向量机相 结合,相比单纯的指数外推法进一步改善低转速 预测精度,效率特性误差约1.9%。杨欣毅等⁶提 出三维曲面代替等转速线表达压气机特性,采用 滑动最小二乘法拟合特性曲面,为低转速特性扩 展提供了新的思路。

在起动或风车状态下运用压气机特性时,尤 其压气机从涡轮状态向搅拌机状态过渡时,效率 在特性图上变化不连续,导致常规的压气机特性 表达方式有可能面临一些困难。刘建勋等[7]提出 用换算扭矩代替效率描述部件特性,解决低转速 部件效率不连续的问题。周通等[8]采用流量系数、 负荷系数和负载扭矩描述部件特性,提出能量外 推法,适用于低转速部件特性扩展。Converse 等^[9-11] 提出了一种基于最小损失的压气机骨架特性(backbone map, BBM)处理方法,遵循压气机工作机理, 结合试验测试积累的经验而总结出的压气机特性 处理方法,其不仅能对部件特性进行光顺处理, 甄别和修正试验测试结果中不合理的数据,而且 能基于高转速特性趋势,扩展延伸至全转速范围, 形成全范围部件特性,为发动机起动性能及风车 性能计算提供数据支撑。Vishal^[12]将骨架特性计 算方法集成至发动机性能仿真软件 PROOSIS 中, 并在 SNECMA 公司推广使用。国内施洋等^[13-14] 在骨架特性原理上开展理论研究,建立一套全状 态性能仿真计算模型,并用数值模拟的方法验证 了该模型的全状态性能仿真能力。目前国内公开 文献中,缺乏对如何从压气机传统特性转换到骨 架特性处理方法的详细研究,同时缺少结合试验

数据的工程应用。本文依据压气机骨架特性原理 给出压气机骨架特性处理方法,结合试验数据给 出应用实例。

压气机的一张特性图中隐含着某个特定的可 调叶片(VSV)变化规律。发动机实际运行过程中, VSV 角度值与转速的对应关系是变化的,以达到 改善压气机性能,保证压气机在各转速工况高效 稳定工作的目的^[15-18]。VSV 联调也是总体性能匹 配的一项重要调节手段^[19]。因此评估 VSV 偏差 对部件特性乃至整机性能的影响是性能仿真必须 解决的问题。基于上述需求,在压气机部件试验 台上开展 VSV 联调专项试验,得到了不同 VSV 偏离程度的压气机特性数据。如何有效利用上述 试验数据,是一项亟需解决的课题。目前常见的 处理方法是基于变几何压气机特性直接插值;在 没有变几何特性图的条件下,对压气机特性的流 量、压比和效率参数直接缩放进行变几何修正^[20]。 马文通等[21]利用平面叶栅试验数据,推导出模型 级轮缘功及效率在变几何前后的对应关系,采用 级叠加法估算变几何特性,平均误差最小达3.6%。 针对基于压气机骨架特性方法建立的 VSV 角度 变化修正模型,国内缺乏相关领域的深入研究, 本文将基于骨架特性相关原理方法,摸索一套可 反映VSV角度变化对压气机特性影响的修正模 型,用于压气机性能评估。

1 压气机骨架特性计算方法

1.1 传统的压气机特性

传统的压气机特性由压气机主要性能参数 (换算转速、换算流量、压比及效率)的关系曲线 构成,见图1,图中换算流量 W、压比 π 及效率 η





均做归一化处理,效率用等值线显示,下标 d 表示 设计点, N。为相对换算转速。

定义压气机流量系数**Φ**

$$\Phi = C_x / U_t \tag{1}$$

式中C_x为轴向速度,U_t为叶尖切线速度。

压气机在不同发动机工况下,可能处在以下 三种典型的工作状态(见图 2):

 1) 压气机状态, 是压气机设计的正常工作状态, 压气机对气体做功, 使气流压力升高, 温度 升高;

2)搅拌机状态,是压气机低转速的典型工作状态,压气机对气体做功,但压气机损失大于输入功,气流压力降低,温度升高;

3)涡轮状态,是发动机风车工况的典型工作 状态,压气机从气流中获取能量,输出功,气流压 力降低,温度降低。





传统的压气机特性在发动机稳态及加减速过 程中得到广泛应用。风车状态计算模拟时,传统 的效率定义导致工作状态由搅拌机向涡轮状态过 渡时,效率存在奇点,使得传统压气机特性无法 光滑过渡,无法建立发动机全状态性能模型。

1.2 压气机骨架特性计算原理

压气机骨架特性通过考虑叶轮机械速度三角 形关系,遵循叶轮机械工作机理,结合试验测试 积累的部件损失经验关系,实现全转速范围的部 件特性模拟。

假设空气绝热指数为定值,并给定叶尖切线 速度、进口面积及比定压热容。

定义压气机功系数Ψ

$$\Psi = \frac{h_{\rm o} - h_{\rm i}}{U_{\rm t}^2/2} \tag{2}$$

式中 h 为总焓, 下标 i、o 分别表示部件进口、出口。 定义压气机理想功系数 ¥id

$$\Psi_{\rm id} = \frac{h_{\rm o,id} - h_{\rm i}}{U_{\rm t}^2/2} \tag{3}$$

式中下标 id 表示理想等熵状态。

各转速压比流量特性可转换为功系数与流量 系数的曲线,如图3所示。





Fig. 3 Work coefficient as a function of flow coefficient

定义压气机损失系数σ

$$\varpi = \Psi - \Psi_{\rm id} \tag{4}$$

引入损失系数 *ω*表示部件功系数与理想功系 数的差值,反映效率变化,压气机效率-压比曲线 可转化为损失系数-功系数曲线,如图 4 所示。等 转速线上损失系数最小的点定义为最小损失点 (图 1、图 3、图 4 中圆点)。

图 3、图 4 中方点为起动状态点,星形点为风 车状态点,发动机全转速状态下,损失系数均为 正值,且变化连续,不存在奇点,相比传统特性, 模拟风车状态时可保证参数的连续性。





骨架特性就是围绕流量系数、功系数和损失 系数这几个概念建立的:各转速下最小损失点串 起来构成一条主骨架,等转速下各非最小损失特 性点构成延伸骨架。最小损失点的流量系数、功 系数和损失系数随转速的变化曲线如图 5 所示, 下标 b 表示最小损失点的参数。



Fig. 5 Min-loss points backbone characteristics

确定压气机主骨架特性后,延伸骨架特性可 基于主骨架最小损失点特性的偏移量表示。

定义功系数偏移量∆Ψ

$$\Delta \Psi = \Psi - \Psi_{\rm b} \tag{5}$$

定义损失系数偏移量Δσ

$$\Delta \boldsymbol{\varpi} = \boldsymbol{\varpi} - \boldsymbol{\varpi}_{\mathrm{b}} \tag{6}$$

参考低速压气机级特性试验分析结果^[12],同 一转速下,在最小损失点附近,损失系数偏移量 与功系数偏移量呈二次关系,即:Δω与ΔΨ·|ΔΨ| 呈近似线性关系,见图 6,图中各转速单独构成一 条曲线。

压气机非最小损失点虚拟马赫数*Ma*、随功系数偏移量的变动关系见图 7,图中各转速单独构成一条曲线。虚拟马赫数定义见文献 [9-11]。



图 6 损失系数偏移量随ΔΨ·|ΔΨ|变化曲线





Fig. 7 Virtual Ma_v as a function of $\Delta \Psi$

基于压气机骨架特性计算原理,整理出将压 气机传统特性转换到骨架特性的处理方法,具体 处理细节见文献 [9-11]:

 1)将压气机传统特性转换为由流量系数、功 系数、损失系数表示的特性数据;

2)找出各转速条件下的最小损失点,合理扩展,生成最小损失点骨架特性曲线;

3)基于等转速下各非最小损失特性点构建 延伸骨架,建立损失系数偏移量与功系数偏移量 变化曲线,建立非最小损失点虚拟马赫数随功系 数偏移量变化曲线。

1.3 压气机骨架特性处理结果

采用文中第 1.2 节介绍的骨架特性处理方法, 选取某型压气机性能试验获得的基准 VSV 角度 的试验特性数据,生成骨架特性数据。

基于骨架特性数据反求的压气机特性结果与 原始试验数据对比见图 8。由图可知,骨架特性 转换后的压气机特性与原始特性基本重合,特性 参数最大相对误差达到 0.6% 的水平,具有较高的 转换精度。



图 8 骨架特性转换结果对比 Fig. 8 Backbone map compared with test result

2 VSV 模型修正方法

2.1 骨架特性修正方法

VSV 联调是总体性能匹配的一项有效的调节手段, 航空发动机在起动、低空、高空和瞬态时具有不同的调节计划。VSV 角度偏差对部件特性乃至整机性能均产生重要影响, 规定 VSV 数值 增加表示打开方向, 数值减小表示关闭方向。

VSV 角度用φ表示。实际角度与基准角度的 偏差用dφ表示:打开为正,关闭为负,0值为基准, 见图 9,图中 C 为绝对速度,C_r为相对速度,U为 切线速度,α为绝对进气角,β为相对进气角。 VSV 变动改变静子的出口气流角,进而影响下游 转子的进口气流角,调整下游转子叶片的进口攻 角γ,改变转子加功量,改变负荷水平,对压气机 的做功能力、损失和通流能力均产生影响。

一套 VSV 调节规律对应一张压气机特性图。 若 VSV 可变,则 VSV 角度将作为额外的特性图 独立变量。如何在模型中建立 VSV 角度与特性 图的对应关系,需要深入研究。

一种方法是采用多组压气机特性图,每组对



Fig. 9 Influence of change of VSV

应一条预定义的 VSV 调节规律,使用中根据实际 转速和 VSV 在这些图中间插值。该方法一般选 用文中第 1.1 节所述传统的压气机特性,为保证 插值精度,对输入特性的数量和质量有很高的要 求,同时在风车及起动状态效率存在奇点的情况 下,无法正确反映修正意图。

另一种方法是以基准压气机特性图为基础, VSV角度偏离基准值,选用修正因子对压气机特 性图的组成参数进行修正,得到任意 VSV 角度偏 差量的压气机特性。

基于前述骨架特性原理,本文选用修正因子的方法深入研究,通过调整特定的骨架参数,间 接实现对部件压比、流量、效率等性能参数的修 正。初步选定的修正骨架参数包括:流量系数 ϕ_b 、 功系数 Ψ_b 和损失系数 ϖ_b 。

采用缩放的方法,对基准的骨架特性参数进行调整,定义缩放系数:流量系数的修正系数 S_{φ} 、功系数的修正系数 S_{ψ} 、损失系数的修正系数 S_{σ} 。

修正后的流量系数

$$\Phi_{\rm b}' = \Phi_{\rm b} S_{\Phi} \tag{7}$$

修正后的功系数:

$$\Psi_{\rm b}' = \Psi_{\rm b} S_{\Psi} \tag{8}$$

修正后的损失系数:

$$\varpi'_{\rm b} = \varpi_{\rm b} S_{\,\psi} S_{\,\varpi} \tag{9}$$

通过基于S_φ、S_Ψ和S_∞修正系数生成的三张 二维数表,构建了基于骨架特性的 VSV 角度偏差 修正模型,二维数表的两个自变量分别为 VSV 角 度偏移量和换算转速。

2.2 VSV 修正系数自动优化方法

修正过程中,修正参数的选取较多地依赖工 程师判断,调整参数多,自由度大,需反复尝试以 求保证修正系数的光顺性和合理性,十分耗时。

基于上述现状,作者开发一种基于牛顿-拉夫 逊迭代方法的自动优化算法,减少人工干预,以 期实现短时间优化出较好的修正系数。优化流程 见图 10。





优化设定目标变量 Y为

$$\boldsymbol{Y} = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)^{\mathrm{T}}$$
(10)

式中*o*_i为特定变量计算结果与试验数据的相对误差,下标1~3对应流量、压比、效率。

$$\sigma_{i} = \sqrt{\left\{\sum_{j=1}^{n} \left[\left(P_{i,j} - P_{i,j}^{*}\right) / P_{i,j}^{*}\right]^{2}\right\} / n} \qquad (11)$$

式中P为特性变量,上标*表示试验数据,n表示目标特性数据总点数。

设定自变量X为

$$\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, x_3)^{\mathrm{T}}$$
(12)

式中下标 1、2、3 分别对应 S_{φ} 、 S_{Ψ} 和 S_{ω} 。

- 优化计算步骤如下:
- 1) 给定修正系数初值, 计算目标变量 Y;

2) 判断偏差是否满足精度要求;

3)如不满足,各项修正系数分别叠加小的偏差量,计算偏差矩阵A

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_2} & \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial \sigma_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \sigma_2}{\partial x_2} & \frac{\partial \sigma_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial \sigma_3}{\partial x_1} & \frac{\partial \sigma_3}{\partial x_2} & \frac{\partial \sigma_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$
(13)

4) 计算生成新的修正系数, 计算公式为

$$\boldsymbol{X}_{n+1} = \boldsymbol{X}_n - \mathrm{inv} \left(\boldsymbol{A} \right) \cdot \boldsymbol{Y} \tag{14}$$

5) 基于迭代修正参数重新计算偏差量;

6)判断是否满足精度要求,如不满足,继续 重复上述步骤3)至步骤5),直至收敛;

7) 基于自动优化结果, 选定偏差最小的 N 组 方案(暂时取 10), 考虑光顺性要求, 挑选最终的 修正曲线。

2.3 结果分析及讨论

采用前文所述方法,选取某型压气机性能试 验获得的 0.98N_c、0.94N_c、0.90N_c和 0.75N_c四条转 速的 VSV 联调试验特性数据,结合试验获取的中 低转速规律,外插更低转速特性(如图 11~图 13 中 0.50N_c转速),覆盖 VSV 联调所需的转速范围, 生成 VSV 角度偏差修正模型(VSV 偏离±5°以外 区域由线性外插得到)。

流量系数的修正系数随 VSV 角度变化的曲 线见图 11,不同转速条件下流量系数修正系数随 VSV 角度变化趋势相同:随着 VSV 打开,叶片通





20220459-6









Fig. 13 Loss coefficient scalar as a function of $d\varphi$

流能力增加,流量增大,流量修正系数也随之增加,反之亦然。优化结果符合物理规律。对应于相同 VSV 角度变化量,分析转速对流量系数修正 系数的影响:中低转速相比高转速,修正系数的 变化幅值更大一些,中低转速条件下流量对 VSV 角度变化更敏感。

功系数的修正系数随 VSV 角度变化的曲线 见图 12,不同转速区间功系数修正系数随 VSV 角度变化趋势相同:随着 VSV 打开,进口攻角增 加,加功量增大,导致压比升高,功系数修正系数 也随 VSV 增大呈增加趋势,反之亦然。优化结果 符合物理规律。对应于相同 VSV 角度变化量位 置,分析转速对功系数修正系数的影响: VSV 打 开,中低转速相比高转速,修正系数的变化幅值 更小一些,高转速区间压气机的做功能力在 VSV 打开方向随 VSV 角度变化更敏感;而 VSV 关闭, 暂未发现随转速明显的变化趋势。

损失系数的修正系数随 VSV 角度变化的曲 线见图 13, 由图可知: 各转速条件下损失系数随 VSV 角度变化的趋势并不一致, 中低转速区间,

关闭 VSV 导致损失迅速增加, 而打开 VSV 损失 增加不明显;高转速条件下,关闭 VSV 损失变化 不明显,而打开 VSV 损失显著增加。从流动分离 及加功能力的角度分析,可能原因如下:①中低 转速区间,压气机表现出"前喘后堵"的特征,为保 证转子处于合理的攻角状态,基准 VSV 角度本身 就处于较大的偏关的位置,静叶流场中存在较大 的负攻角分离区,进一步关闭 VSV,将导致静叶 流场加剧恶化,损失快速增加;VSV打开,会改善 静叶流场,静叶内部损失降低,后排转子气流转 角增大,但由于中低转速前面级转子气动负荷较 低, 气流转角的增加未导致损失明显变化; ②高 转速区间,压气机表现出"前堵后喘"的特征,为保 证转子处于合理的攻角状态,基准 VSV 角度处于 接近零攻角的位置, VSV 打开, 后排转子气流转 角增大,气动负荷增大,激波强度增强,导致损失 显著增加;关闭 VSV,由于静子叶片自身内部流 场流动性较好,角度变化对静叶损失影响不大。

以 0.98N_c(高转速区间)及 0.75N_c(中低转速区 间) VSV 联调特性为例,给出基于修正骨架特性 数据反求的压气机特性与试验数据的对比。表 1 给出 0.98N_c转速模型计算结果与试验数据的平 均相对计算误差,流量、压比和效率等特性参数 的最大相对误差分别为 0.176%、0.068% 和 0.186%。 表 2 给出 0.75 N_c转速模型计算结果与试验数据 的平均相对计算误差,流量、压比和效率等特性 参数的最大相对误差分别为 0.430%、0.270% 和 0.426%。图 14 给出 0.98N_c转速计算特性与试验 数据的特性对比,图 15 给出 0.75N_c转速计算特性 与试验数据的特性对比,图中实心方点为试验测 量结果,实线为 VSV 修正模型计算特性。

采用本文所述的相关修正方法,特性计算结 果与试验数据相比,高转速区间模型转换精度达 到小于 0.2% 的水平,中低转速区间模型转换精度 达到小于 0.45% 的水平,同时实现了特性数据的 光顺扩展,基本满足发动机总体性能仿真的精度 要求。

表 1 0.98N_c转速修正模型的相对误差 Table 1 Relative error of corrected model at 0.98N_c

_		-		-
	$d\varphi/(\circ)$	σ_1 /%	$\sigma_2/\%$	$\sigma_3/\%$
	-3.0	0.093	0.018	0.186
	-1.0	0.176	0.068	0.144
	1.0	0.122	0.026	0.145
	3.0	0.075	0.006	0.107

表	表 2 0.75N。转速修正模型的相对误差					
Table 2	Table 2Relative error of corrected model at $0.75N_c$					
$d\varphi/(\circ)$	σ_1 /%	σ_2 /%	$\sigma_3 / \%$			
-3.0	0.430	0.185	0.426			
-1.0	0.395	0.270	0.289			
1.0	0.275	0.123	0.394			
3.0	0.292	0.090	0.367			





VSV 模型修正方法选用比例系数修正特定 的骨架参数, 调整流量系数反映换算流量的变化, 调整损失系数反映效率的变化, 调整功系数和损 失系数反映压比的变化, 通用性强, 可推广应用 于压气机特性二次影响修正(包括雷诺数及各种 变几何形式对性能的影响)。

自动优化方法的实现,节省人力成本,提高优 化效率,为后续实现压气机模型精细化建模提供 有力技术支撑。

由于模型的假设与实际仍存在偏差,在偏离





最小损失点较远的位置,特性数据与试验数据相 比仍会出现较明显的偏差,分析原因,偏离最小 损失点较远的位置存在流动分离,损失系数偏移 量与功系数偏移量可能不再符合假设的二次关系, 需要进一步完善骨架特性模型。

3 结 论

本文给出一套基于骨架特性的压气机可调叶 片角度特性模型修正方法,得出如下结论:

 1)基于最小损失的压气机骨架特性处理方法,遵循压气机工作机理,结合试验数据给出应 用实例,实现原始压气机离散、非光顺压气机性 能数据的光顺处理。用损失系数代替效率表征特 性,可保证全转速状态参数的连续性。

2) 基于最小损失点的功系数、损失系数和流 量系数等三个系数确定基于骨架特性的比例修正 系数,建立 VSV 调节对特性修正的模型表达,计 算结果对比试验数据:高转速区间模型转换精度 达到小于 0.2% 的水平,中低转速区间模型转换精 度达到小于 0.45% 的水平,基本满足发动机总体 第7期

性能仿真的精度要求。

文中所述的骨架特性由于模型的假设与实际 仍存在偏差,在局部位置仍与试验数据存在一定 偏差,需要基于理论研究,完善骨架特性模型,进 一步提高转换精度。

本文提出的 VSV 模型修正方法具有通用性, 后续可推广应用于压气机特性其他的二次影响修 正,诸如雷诺数影响修正等;同时自动优化方法 的实现,也为后续实现压气机模型精细化建模提 供有力技术支撑。

参考文献:

- RIEGLER C, BAUER M, KURZKE J. Some aspects of modeling compressor behavior in gas turbine performance calculations[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 372-378.
- [2] 饶高,苏三买,翟向博.指数外推法和支持向量机相结合的 压气机特性扩展方法[J].航空动力学报,2017,32(3):749-755.

RAO Gao, SU Sanmai, ZHAI Xiangbo. Method of compressor characteristic extension combining exponent extrapolation method with support vector machine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 749-755. (in Chinese)

- [3] 黄向华,郑绪生.基于逐级叠加法的航空发动机起动模型研究[J].航空学报,2005,26(5):540-544.
 HUANG Xianghua, ZHENG Xusheng. Research on startup model of aircraft engine based on stage-stacking method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 540-544. (in Chinese)
- [4] 王宇,刘建勋,李应红,等.基于抛物线外推的压气机低转 速特性研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1136-1142.
 WANG Yu, LIU Jianxun, LI Yinghong, et al. Research on low speed characteristics of compressor based on parabola extrapolation[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5): 1136-1142. (in Chinese)
- [5] 王广,李军,牟牧. 航空发动机叶轮机部件低状态特性的指数预测方法[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 1032-1036.
 WANG Guang, LI Jun, MU Mu. Exponent extrapolation method of aero-engine turbomahinery low state characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 1032-1036. (in Chinese)
- [6] 杨欣毅, 沈伟, 刘海峰, 等. 一种应用滑动最小二乘求取压 气机特性的方法[J]. 航空动力学报, 2009, 24(8): 1741-1746.
 YANG Xinyi, SHEN Wei, LIU Haifeng, et al. Compressor characteristics generation method using moving least square[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(8): 1741-1746. (in Chinese)
- [7] 刘建勋,于焕义,刘同胜,等. 轴流压气机低转速特性表达 方式的改进及应用[J]. 航空计算技术, 2009, 39(2): 14-17. LIU Jianxun, YU Huanyi, LIU Tongsheng, et al. Improved description of axial compressor characteristics and its application[J]. Aeronautical Computing Technique, 2009, 39(2): 14-17. (in Chinese)
- [8] 周通,黄兴,刘渊,等.某型压气机低转速特性扩展方法对 比分析[J].航空发动机,2018,44(3):65-70.

ZHOU Tong, HUANG Xing, LIU Yuan, et al. Comparative analysis of index expansion method for low speed characteristics of certain compressor[J]. Aeroengine, 2018, 44(3): 65-70. (in Chinese)

- [9] CONVERSE G L, GIFFIN R. Extended parametric representation of compressor fans and turbines: Volume 1 CMGEN user's manual[R]. NASA-CR-174645, 1984.
- [10] COVERSE G L. Extended parametric representation of compressor fans and turbines: Volume 2 part user's manual (parametric turbine) [R]. NASA-CR-174646, 1984.
- [11] CONVERSE G L, GIFFIN R. Extended parametric representation of compressor fans and turbines: Volume 1 CMGEN user's manual[R]. NASA-CR-174647, 1984.
- [12] VISHAL S. Advanced performance simulation of gas turbine components and fluid thermodynamic properties[D]. Bedfordshire, UK: Cranfield University, 2008.
- [13] 施洋, 屠秋野, 严红明, 等. 一种航空发动机全状态性能模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 373-381.
 SHI Yang, TU Qiuye, YAN Hongming, et al. A full states performance model for aero engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 373-381. (in Chinese)
- [14] 施洋.民用大涵道比涡扇发动机全状态性能模型研究[D]. 西安:西北工业大学, 2017.
 SHI Yang. A research on full states performance model for civil high bypass turbofan engine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)
- [15] 胡骏,吴铁鹰,曹人靖.航空叶片机原理[M].北京:国防工 业出版社,2006.
- [16] 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)
- [17] 夏联,崔健,顾扬.可调静叶对压气机低速性能影响的试验研究[J].燃气涡轮试验与研究,2005,18(1):31-34.
 XIA Lian, CUI Jian, GU Yang. An experimental investigation on the effect of variable stator vane angle on compressor performance at low speed[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2005, 18(1):31-34. (in Chinese)
- [18] 张晓诗,李游.某型高压压气机低转速可调静叶角度优化 试验研究[J].装备制造技术, 2020(5): 50-52.
 ZHANG Xiaoshi, LI You. Variable stator vane schedule optimization for a high-pressure compressor at low speed[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(5): 50-52. (in Chinese)
- [19] WALSH P P, FLETCHER P. Gas turbine performance[M]. 2nd ed. Malden, MA, US: Blackwell Science, 2004.
- [20] 周红.变循环发动机特性分析及其与飞机一体化设计研究
 [D].西安:西北工业大学,2016.
 ZHOU Hong. Investigation on the variable cycle engine characteristics and integration design with aircraft[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [21] 马文通,苏明,余南华.变几何多级轴流式压气机特性估算
 [J].中国电机工程学报,2008,28(11):72-76.
 MA Wentong, SU Ming, YU Nanhua. Characteristic estimation method of variable geometry multistage axial-flow compressors[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11): 72-76. (in Chinese)

(编辑:陈 越)