

基于灵敏度分析的可调静叶调节机构运动精度优化

徐峰, 曹传军, 胡淑慧, 张苗苗
(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘要:为提升高负荷多级轴流压气机静叶调节机构的运动精度, 针对5级联调构型, 梳理了37个对调节精度可能存在影响的参数, 提出了一种基于局部灵敏度分析的参数降维预处理优化方法。通过局部灵敏度分析认识各参数对调节精度的影响规律, 甄选重要参数, 依靠自主优化程序与多体运动学软件联合的技术途径并采用SQP算法对机构进行优化; 仅采用相对灵敏度影响最大的9个参数进行优化时, 调节精度达到 0.4020° ; 采用剔除13个绝对灵敏度最小参数后的参数进行优化时, 调节精度优化达到 0.2000° ; 而采用全部37个参数进行优化后, 调节精度依然为 0.2000° 。结果表明: 所提出的降维预处理优化方法能够在保证运动精度的同时有效减小计算规模, 联合优化的方式较传统虚拟样机优化具有更高的精度。

关键词:调节机构; 灵敏度分析; 调节精度; 可调静叶; 高负荷多级轴流压气机; 航空发动机

中图分类号: V235.13+3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.05.015

Motion Accuracy Optimization of Variable Stator Vane Adjusting Mechanism based on Sensitivity Analysis

XU Feng, CAO Chuan-jun, HU Shu-hui, ZHANG Miao-miao
(AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: To improve the accuracy of the variable stator vane adjusting mechanism of a highly loaded multistage axial compressor, by sorting out 37 parameters that may influence the adjusting accuracy of the five-cascade modulation configuration, a parameter dimension reduction preprocessing optimization method based on local sensitivity analysis was proposed. Through local sensitivity analysis, the influence of each parameter on the adjusting accuracy was understood, and important parameters were selected. Based on the SQP algorithm, the mechanism was optimized by the joint technical approach of an in-house optimization program and Multibody Dynamics (MBD) software. The results show that if the 9 parameters with the greatest influence on the relative sensitivity are used for optimization, the adjusting accuracy is 0.4020° ; if the 13 parameters with the smallest absolute sensitivity are removed for optimization, the adjusting accuracy reaches 0.2000° ; and if all 37 parameters are used, the accuracy is still 0.2000° . The proposed dimension reduction preprocessing optimization method can ensure motion accuracy and effectively reduce the calculation scale, the joint optimization method also has higher accuracy than traditional virtual prototype optimization.

Key words: adjusting mechanism; sensitivity analysis; adjusting accuracy; variable stator vane; highly loaded multiple axial compressor; aeroengine

0 引言

可调静叶主要用于高负荷多级轴流压气机中, 通过调节静子叶片角度, 使转子叶片处于满意的攻角下工作, 从而避免喘振^[1-2], 拓宽压气机中低转速下的稳定工作范围, 这对航空发动机正常工作和飞行器的飞行安全至关重要^[3]。一般情况下, 多级静子叶片采用

一套联调机构进行统一调节, 使各级叶片按照设计规律偏转, 从而提高机构的可靠性^[4]和减小系统质量。

当前对于静叶调节机构运动学设计和角度调节偏差方面的研究, 主要有几何评估和基于虚拟样机技术优化2种方式。钱笃元^[5]将调节机构运动作为平面问题给出了运动方程; 贺飞等^[6]采用齐次坐标变换将机构运动学模型拓展到3维空间, 并将其应用于角度

收稿日期: 2021-09-24

基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 徐峰(1982), 男, 硕士, 高级工程师。通信作者: 曹传军(1982), 男, 博士, 自然科学研究员。

引用格式: 徐峰, 曹传军, 胡淑慧, 等. 基于灵敏度分析的可调静叶调节机构运动精度优化[J]. 航空发动机, 2023, 49(5): 115-120. XU Feng, CAO Chuan-jun, HU Shuhui, et al. Motion accuracy optimization of variable stator vane adjusting mechanism based on sensitivity analysis[J]. Aeroengine, 2023, 49(5): 115-120.

调节偏差的优化;Riesland^[7]、杨伟等^[8-9]的研究验证了虚拟样机技术在调节机构设计和优化阶段的有效性;张晓宁等^[10]的研究表明了基于虚拟样机技术的优化较物理实验具有较强的经济优势;梁爽等^[11]采用试验设计方法对3级联调机构的角度调节偏差进行了优化。以上研究在调节机构的方案设计阶段,采用参数化分析方法可快速有效地进行设计参数的选取与优化,使机构的运动学仿真结果满足设计要求;但上述研究均采用逐级分解、单级优化的串行优化方法,未能对机构设计参数进行整体优化,且优化后的角度偏差约为 $0.4^{\circ} \sim 0.6^{\circ}$ 。孙凯等^[12]针对某扭力杆式调节机构对参数进行了全面梳理,但仍为分级优化,且优化结果为 0.7° ,可见当运动学模型中考虑较多设计参数时,串行优化的精度明显降低;于嘉鹏等^[13]解析推导出2级叶片转动关系方程,对2级角度匹配问题进行优化,但仅对曲柄长度和定位角度进行了分析;唐佑远^[14]综合考虑了各级设计参数,提出正-逆运动学相结合的机构全局尺度优化设计方法,有效规避了串行优化方法的不足,但未对设计参数进行全面梳理,且无法明晰各参数对角度调节偏差的影响程度。

为此,本文以发动机5级联调式可调节静叶(Variable Stator Vane, VSV)调节机构为研究对象,全面梳理其可能影响角度调节精度的特征参数,提出一种基于局部灵敏度分析参数降维预处理的运动学优化方法。

1 机构构型与运动学建模

1.1 运动原理与几何建模

VSV调节机构主要由作动筒、活塞杆、曲柄连杆、曲柄、连杆、联动环、摇臂、静子叶片等组成。由于机构各级组成部件相同,因此只以单级为例介绍其运动原理,如图1所示。由于曲柄连杆的存在使各级曲柄在活塞杆驱动下保持同步转动,曲柄带动连杆进而使

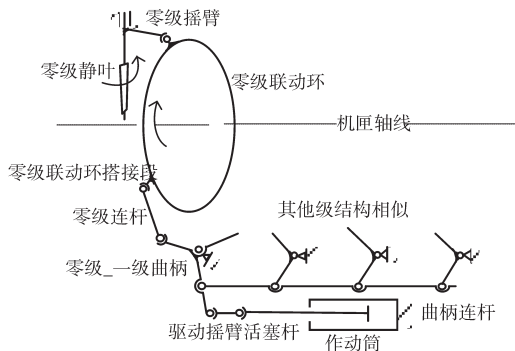


图1 VSV调节机构运动原理

联动环绕机匣轴线旋转,静子叶片与摇臂固连,二者被联动环带动旋转,旋转轴为机匣和静子内环轴孔连线。

机构几何模型通过CAD软件绘制,再将部件导入多体运动学软件的方式进行构建^[15]。根据机构构型和运动关系,可对机构几何建模进行适当简化。叶片可直接与地面相铰接,省去机匣和静子内环建模;在机构参数设计中不需考虑随机因素(加工公差、装配间隙)影响,因此不考虑部件运动的周向不一致,单级只选取1个摇臂和叶片进行建模;在驱动部件中,作动筒、活塞杆以及起支撑作用的支架也省略。

1.2 机构参数化

由运动原理分析可知,在设计优化中,许多关键参数直接影响机构叶片调节规律。针对本文研究对象共有37个参数需要确定,其物理含义见表1。 $V_1 \sim V_3$ 为0级曲柄转轴定位和定向参数,结合参数 $V_4 \sim V_7$ 可对各级曲柄进行定位,参数 $V_8 \sim V_{13}$ 的各级物理意义相同,因此仅以0级为例说明。

表1 建模与分析特征参数

序号	设计参数	物理意义
V_1	Bar_A	0级曲柄转轴点定位角
V_2	Bar_D	0级曲柄转轴点距发动机轴线的距离
V_3	CrA	0级曲柄轴线定位角
V_4	Bar_0_1_X	0级1级曲柄转轴位置
V_5	Bar_2_X	2级曲柄转轴距离
V_6	Bar_3_X	3级曲柄转轴距离
V_7	Bar_4_X	4级曲柄转轴距离
V_8	Arm_L_i	摇臂长度($i=0,1,2,3,4$)
V_9	Arm_A_i	摇臂初始摆角($i=0,1,2,3,4$)
V_{10}	Ring_R_i	联动环半径($i=0,1,2,3,4$)
V_{11}	Lug_H_i	联动环搭接段高度($i=0,1,2,3,4$)
V_{12}	Crank_L_i	曲柄臂长($i=0,1,2,3,4$)
V_{13}	Link_A_i	连杆定位角($i=0,1,2,3,4$)

部件之间约束需要通过对对应标记点来建立,这些标记点都依据表1中的关键参数进行全参数化建模,以此构建的全参数化机构模型修改方便,为参数灵敏度分析与优化打下基础。

1.3 运动副与驱动添加

运动副也随几何建模进行相应简化,依照机构的运动原理将部件之间约束进行整理,运动学模型中的运动副见表2,运动学建模中按此加载即可;由于驱动部件作动筒与活塞杆未构建实体模型,因而可将其活塞杆平移运动规律换算为曲柄的定轴转动,以角位

表2 运动学模型中的运动副

部件 1	部件 2	运动副
叶片	Ground	旋转副
摇臂	叶片	固定副
摇臂	联动环	在线约束
联动环	连杆	球铰
连杆	曲柄	万向节
曲柄	支架	旋转副
曲柄	驱动连杆	旋转副

移驱动的方式进行加载。

2 VSV 调节机构参数灵敏度分析

2.1 调节精度衡量指标

定义最大偏差角 $\theta_{\max}$ 作为衡量机构运动准确度和机构调节精度的指标

$$\theta_{\max} = \max \begin{pmatrix} \left| \theta_{S1}(t) - \theta_{T1}(t) \right|, \\ \left| \theta_{S2}(t) - \theta_{T2}(t) \right|, \\ \left| \theta_{S3}(t) - \theta_{T3}(t) \right|, \\ \left| \theta_{S4}(t) - \theta_{T4}(t) \right| \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $\theta_{\text{si}}(t)$ 为*i*级叶片转角的仿真值; $\theta_{\text{Ti}}(t)$ 为*i*级叶片转角的理论值, $i=1,2,3,4$ 。

式中不包含0级叶片转角的原因是:0级叶片转角是其它各级理论值的取值基准,其它4级叶片的仿真值与理论标定值的差异在0级叶片转角相同条件下取得。从式(1)中可见, $\theta_{\max}$ 值越小,叶片转动角度越接近理论标定值,机构调节精度越高。

2.2 参数对调节精度的影响分析

对于表1中任意参数 x ,取 n 次值进行仿真就有对应的 n 个 $\theta_{\max}$,依据中心差分格式定义该参数对 $\theta_{\max}$ 的绝对灵敏度^[16]为

$$S_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_{\text{Max } i+1} - \theta_{\text{Max } i}}{x_{i+1} - x_i} + \frac{\theta_{\text{Max } i} - \theta_{\text{Max } i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right) \quad (2)$$

绝对灵敏度 S_i 值为正, 表示该参数增大使最大偏差角变大, 叶片角度调节偏离设计值, 调节精度下降; 反之, S_i 为负, 表示该参数增大使叶片角度调节更贴近设计值。

本文取 $n = 5$, 即对表 1 中 37 个参数在设计范围内等距取 5 次值, 按序号 1 ~ 5 从小到大逐渐进行灵敏度计算, 得到各参数在允许范围内对调节精度的影响趋势。经总结, 表 1 中参数根据影响趋势的不同可分

为2种类型。

第 1 种类型参数包括: Bar_A、CrA、Bar_2_X、Link_A_0、Link_A_1、Link_A_2、Link_A_3、Link_A_4、Arm_A_0、Arm_A_1、Arm_A_2、Arm_A_3、Arm_A_4, 共 13 个参数, 限于篇幅仅以 0 级曲柄转轴点定位角(Bar_A)展示, 其在允许变动范围内的 Bar_A 灵敏度见表 3。从表中可见, 以 Bar_A 为代表的设计变量灵敏度值在参数变化时都接近于 0, 这表明这些设计变量对运动精度的影响比较微小。

序号	目标	绝对灵敏度
1	0.23267	0.0018056
2	0.23312	0.0017346
3	0.23354	0.0015962
4	0.23392	0.0014642
5	0.23427	0.0013998

表3 Bar A灵敏度

序号	目标	绝对灵敏度
1	0.23267	0.0018056
2	0.23312	0.0017346
3	0.23354	0.0015962
4	0.23392	0.0014642
5	0.23427	0.0013998

除以上参数外,表1中其它参数为第2种类型参数,同样限于篇幅仅以0级摇臂长度(Arm_L_0)进行展示,Arm_L_0绝对灵敏度见表4。以0级摇臂长为代表的设计变量在其许用参数范围内,灵敏度值均有正有负,且在偏极小时,灵敏度值为负值;在偏极大值时,灵敏度值为正值,这说明肯定存在1个值使灵敏度值为0,即运动精度针对该设计变量存在极小点。

表4 Arm_L_0绝对灵敏度

序号	目标	绝对灵敏度
1	9.2238	-1925.3
2	4.4104	-1291.4
3	2.7669	184.9
4	5.3347	938.0
5	7.4567	848.8

2.3 重要影响参数甄别

通过各参数绝对灵敏度对比,可以得到所有参数对调节精度的基本影响规律,若需对各参数进行横向对比,则应在绝对灵敏度 S_i 基础上定义无量纲化的相对灵敏度 R_i ,以此来对不同尺寸特征参数(例如长度和角度)进行横向对比。相对灵敏度可定义为

$$R_i = \left| \frac{1}{2} \left(\frac{\theta_{\text{Max } i+1} - \theta_{\text{Max } i}}{x_{i+1} - x_i} + \frac{\theta_{\text{Max } i} - \theta_{\text{Max } i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right) \cdot \frac{x_i}{\theta_{\text{Max } i}} \right| \quad (3)$$

37个特征参数名义尺寸下相对灵敏度对比如图2所示。从图中可见,按照对角度调节精度的影响程

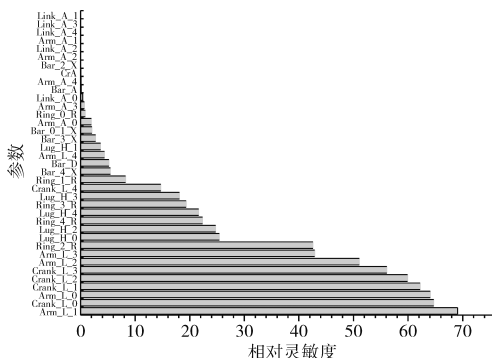


图2 不同参数相对灵敏度对比

度由小到大排序,不难看出不同参数对角度调节的影响程度存在明显差异。

从图中还可见,有9个参数相较其它参数影响更为显著(见表5)。比较来看,摇臂臂长、曲柄臂长是对运动学设计角度调节精度影响较大的参数,在工程设计中应予以格外关注。而第4级的摇臂和曲柄臂长影响程度较其它3级的明显更小,这是由于第4级角度调节范围远远小于其它4级的,而摇臂和曲柄的臂长又不影响其它级调节,因而第4级参数影响程度偏低。

通过无量纲化的相对灵敏度对比,明确了各参数对运动学设计中角度调节精度的影响程度,为调节机构冷态装配和调节提供重要的技术依据,也为全局灵敏度分析奠定基础。

3 机构调节精度优化分析

3.1 优化问题概述

VSV 调节机构的运动学优化问题可以表述为

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta_{\max} \\ \text{find } \quad & \mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\ \text{s.t.} \quad & x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

式中: x_i 为第*i*个特征尺寸的值; $\mathbf{X}$ 为各特征尺寸参数组合成的矢量; $x_{i\max}$ 、 $x_{i\min}$ 分别为第*i*个特征尺寸允许变化范围内的最大、最小值。

该优化问题涉及的模型复杂,参数数目和组合的方式都较多,直接进行优化计算耗时较长,因此本文以灵敏度分析结果为基础,剔除对调节精度影响较小的参数,有效降低参数向量组 $\mathbf{X}$ 的维度。VSV 机构优化面临的另一难点是,多体运动学软件自身优化算法有限,对于机构的运动学优化精度不足,因此本文使用自主优化程序与多体运动学软件联合优化,联合优

化原理如图3所示。在自主优化程序与多体运动学软件之间建立 TCP/IP 通讯协议,以字节流的形式实现相互数据交换:自主优化程序采用 SQP 法在迭代步中根据模型计算结果更新搜索方向、残差、设计变量取值等信息,并通过字节流将当前设计变量取值传入多体运动学软件,多体运动学软件接收信息后完成运动学计算并返回目标函数结果,如此实现机构的运动学优化。

3.2 参数优化结果分析

SQP 算法^[17]相较于其它非线性优化算法,具有求解效率高、不依赖于初值、自校正能力强等优势,因此本文对调节机构的优化也采取 SQP 算法,将式(4)对应的优化问题依据原问题和约束条件构建新的拉格朗日函数作为目标函数,并二次近似为二次规划子问题,采用牛顿法不断迭代更新,最终求得最优解。

在参数选取方面,选取3种参数组合进行对照分析。第1组依据相对灵敏度分析结果,只对表5中影响显著的参数进行优化分析;第2组剔除绝对对灵敏度分析中的13个基本没有影响的参数,对其余24个结果进行优化;第3组对全部37个参数进行优化。其优化前后最大偏差角对比如图4所示。从图中可见,在未经优化时,最大偏差角 4.8675° 不能满足气动和总体要求;选取第1组参数进行优化,经过12次迭代,最大偏差角

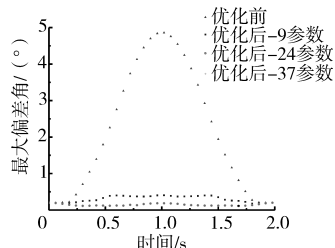


图4 优化前后最大偏差角对比

由 4.8675° 减小为 0.4020° ,符合设计指标,这证明仅对影响最为显著的参数进行优化即可满足设计要求,且计算耗时低,方便工程设计初期的快速性能迭代升级。后2组优化结果相同,从图4中还可可见,对于运动学模型仿真1个周期,2组优化结果几乎完全一致,都经过16次迭代,使最大偏差角度减小至 0.2° ,这证明选取更加全面的参数进行优化可以进一步提升调节精度,但无需所有参数全部参与寻优,可以剔除在允许变动范围内对调节精度结果基本无影响的参数,可以在对优化结果影响微乎其微的前提下,平衡优化精度与效率。

3组不同参数选取下的优化结果对比表明,基于灵敏度分析进行参数降维后的优化结果满足实际应用所需的精度需求,同时也进一步证实了前文所述的

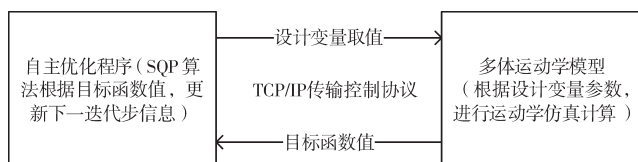


图3 联合优化原理

按灵敏度分析对调节精度影响参数进行筛选和排序方法的可信性。

分组优化前后目标及设计参数值见表 6。从表中可见,尺寸优化调整后调节精度进一步提升,但是大部分尺寸特征参数在优化前后变化幅度较小,这是由于:(1)大部分的参数对角度调节影响较小,因此这类参数在优化迭代过程中并未得到显著改变;(2)少量参数对角度调节影响较大,仅仅需要小幅变化即可

表 6 分组优化前后目标及设计参数值

参数	初始值	第 1 组	第 2 组	第 3 组
Objective	4.8675	0.4020	0.2000	0.2000
Bar_A	16.66776	16.66776	16.66776	16.66800
Bar_D	0.371204	0.371204	0.371290	0.371290
CrA	2.5000	2.5000	2.5000	2.5002
Bar_D	0.371204	0.371204	0.371290	0.371290
Bar_0_1_X	7.53×10^{-2}	7.53×10^{-2}	7.41×10^{-2}	7.41×10^{-2}
Bar_2_X	6.75×10^{-2}	6.75×10^{-2}	6.75×10^{-2}	6.75×10^{-2}
Bar_3_X	6.05×10^{-2}	6.05×10^{-2}	6.09×10^{-2}	6.09×10^{-2}
Bar_4_X	5.63×10^{-2}	5.63×10^{-2}	5.40×10^{-2}	5.40×10^{-2}
Link_A_0	15.7485	15.7485	15.7485	15.7483
Link_A_1	7.8485	7.8485	7.8485	7.8485
Link_A_2	20.54850	20.54850	20.54850	20.54857
Link_A_3	11.04850	11.04850	11.04850	11.04829
Link_A_4	41.4515	41.4515	41.4515	41.44974
Crank_L_0	4.60×10^{-2}	5.00×10^{-2}	5.04×10^{-2}	5.04×10^{-2}
Crank_L_1	4.32×10^{-2}	4.42×10^{-2}	4.54×10^{-2}	4.54×10^{-2}
Crank_L_2	3.93×10^{-2}	3.83×10^{-2}	3.89×10^{-2}	3.89×10^{-2}
Crank_L_3	3.85×10^{-2}	3.95×10^{-2}	3.91×10^{-2}	3.91×10^{-2}
Crank_L_4	1.87×10^{-2}	1.87×10^{-2}	1.97×10^{-2}	1.97×10^{-2}
Lug_H_0	0.360200	0.360200	0.362398	0.362398
Lug_H_1	0.356100	0.356100	0.353311	0.353311
Lug_H_2	0.33825	0.33825	0.33924	0.33924
Lug_H_3	0.341600	0.341600	0.341395	0.341395
Lug_H_4	0.346000	0.346000	0.345982	0.345982
Ring_R_0	0.334308	0.334308	0.335081	0.335081
Ring_R_1	0.316450	0.316450	0.317882	0.317882
Ring_R_2	0.309937	0.306937	0.310210	0.310210
Ring_R_3	0.308799	0.308799	0.308351	0.308351
Ring_R_4	0.317209	0.317209	0.317349	0.317349
Arm_A_0	29.30000	29.30000	29.30000	29.30005
Arm_A_1	14.2	14.2	14.2	14.2
Arm_A_2	6.100000	6.100000	6.100000	6.100078
Arm_A_3	0.08	0.08	0.08	7.35×10^{-2}
Arm_A_2	6.100000	6.100000	6.100000	6.100078
Arm_A_3	0.08	0.08	0.08	7.35×10^{-2}
Arm_A_4	5.800000	5.800000	5.800000	5.800131
Arm_L_0	2.60×10^{-2}	2.40×10^{-2}	2.35×10^{-2}	2.35×10^{-2}
Arm_L_1	3.45×10^{-2}	3.45×10^{-2}	3.25×10^{-2}	3.25×10^{-2}
Arm_L_2	3.84×10^{-2}	3.54×10^{-2}	3.89×10^{-2}	3.89×10^{-2}
Arm_L_3	4.14×10^{-2}	4.24×10^{-2}	4.14×10^{-2}	4.14×10^{-2}
Arm_L_4	3.56×10^{-2}	3.56×10^{-2}	3.77×10^{-2}	3.77×10^{-2}

提升角度调节精度。

4 结论

(1)通过局部绝对灵敏度分析加强了设计变量对调节机构调节规律影响的认识,即大部分设计变量在有效域内存在极小点或对角度调节偏差影响较小。

(2)选取 3 组不同参数进行运动学优化,优化结果均能使调节精度满足总体要求,验证了局部灵敏度分析的准确性和所提出的变量降维预处理优化方法的可信性;通过局部灵敏度分析剔除影响较小参数而后进行优化分析,这是一种效率和精度兼具的优化方法,可在减小计算规模的同时获得与全部参数优化基本一致的结果。

(3)通过建立 TCP/IP 通讯协议传输数据的方式实现了自主 SQP 优化程序与多体运动学软件的联合优化,相较于传统的虚拟样机优化和几何评估方法,其精度更高,可用于后续类似的复杂高维空间机构问题的优化求解,同时也为多模块仿真和优化分析提供了新的技术途径。

参考文献:

[1] 黄爱华. 涡扇发动机可调静子叶片控制规律研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2017, 30(1): 48-51.
HUANG Aihua. Control law of variable stator vane for turbofan engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2017, 30(1): 48-51. (in Chinese)

[2] 李世林. VSV 系统对 CFM56 发动机喘振的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2011(20): 4934-4936.
LI Shilin. Research on VSV faults based CFM56 engine surge[J]. Science Technology and Engineering, 2011(20): 4934-4936. (in Chinese)

[3] 王云. 航空发动机原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009: 85-89.
WANG Yun. Aeroengine principle[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009: 85-99. (in Chinese)

[4] Wirkowski P. Influence of the incorrect settings of axial compressor inlet variable stator vanes on gas turbine engine work parameters[J]. Journal of KONES, 2015, 19(3): 483-489.

[5] 钱笃元. 航空发动机设计手册: 压气机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 303-311.
QIAN Duyuan. Aeroengine design manual: compressor[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 303-311. (in Chinese)

[6] 贺飞, 陈国智, 温泉, 等. 涡轴发动机叶片调节机构设计及应用[J]. 航空动力学报, 2007, 22(2): 332-336.
HE Fei, CHEN Guozhi, WEN Quan, et al. Design of control mechanism

- for the multistage axial compressor variable vane[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(2): 332-336. (in Chinese)
- [7] Riesland D. Aircraft engine analysis using ADAMS[C]//European ADAMS User Conference. Rome: Engineering Center Steyr GmbH, 2000: 1-9.
- [8] 杨伟, 罗秋生, 张少平, 等. 基于UG和ADAMS的调节机构虚拟样机动力学仿真[J]. 燃气轮机试验与研究, 2009, 22(2): 22-25.
YANG Wei, LUO Qiusheng, ZHANG Shaoping, et al. Dynamics simulation of compressor's adjusting mechanism virtual prototyping based on UG&ADAMS[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(2): 22-25. (in Chinese)
- [9] 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]. 燃气轮机试验与研究, 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)
- [10] 张晓宁, 赵雷, 杨勇刚. 联调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)
- [11] 梁爽, 印雪梅, 王华. 基于ADAMS的静叶联调机构参数化设计[J]. 航空发动机, 2016, 42(1): 65-69.
LIANG Shuang, YIN Xuemei, WANG Hua. Parametric design of stator blade jointly adjusting mechanism based on ADAMS[J]. Aeroengine, 2016, 42(1): 65-69. (in Chinese)
- [12] 孙凯, 林清松, 张屹尚. 基于ADAMS与ISIGHT的压气机VSV调节机构运动学优化设计[C]//第七届中国航空学会青年科技论坛论文集(下册). 中山: 中国航空学会, 2016: 363-368.
- SUN Kai, LIN Qingsong, ZHANG Yishang. Kinematic optimization of compressor VSV system based on ADAMS and ISIGHT[C]//The 7th Youth Science and Technology Forum of the Chinese Society of Aeronautics (Volume II). Zhongshan: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2016: 363-368. (in Chinese)
- [13] 于嘉鹏, 孙加明, 纪福森, 等. 航空发动机静叶联调机构运动分析及优化[J]. 航空动力学报, 2019, 34(6): 1193-1200.
YU Jiapeng, SUN Jiaming, JI Fusen, et al. Motion analysis and optimization of jointly adjusting mechanism of aeroengine stator vane[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1193-1200. (in Chinese)
- [14] 唐佑远, 郭为忠. 静叶调节机构尺度全局优化设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 26-36.
TANG Youyuan, GUO Weizhong. Global dimensional optimization for the design of adjusting mechanism of variable stator vanes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(11): 26-36. (in Chinese)
- [15] 郑建荣. ADAMS虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 154-172.
ZHENG Jianrong. Technology gateway and improvement of ADAMS virtual prototype[M]. Beijing: China Machine Press, 2002: 154-172. (in Chinese)
- [16] 韩林山, 李向阳, 严大考. 浅析灵敏度分析的几种数学方法[J]. 中国水运(下半月), 2008, 8(4): 177-178.
HAN Linshan, LI Xiangyang, YAN Dakao. Analysis of the sensitivity analysis of several mathematica methods[J]. China Water Transport (the Second Half of the Month), 2008, 8(4): 177-178. (in Chinese)
- [17] 石国春. 关于序列二次规划(SQP)算法求解非线性规划问题的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
SHI Guochun. Research on algorithm of sequential quadratic programming for nonlinear programming problems[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)