

# 基于 SimulationX 的可调静子导叶机械滞后 效应系统仿真

王常亮,邱明星,金海,李兆红,石磊,袁森  
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

**摘要:**为了解决压气机可调静子导叶(VSV)机械滞后问题,基于 SimulationX 系统仿真平台,建立了 VSV 调节系统仿真模型。通过仿真结果与台架试验数据对比分析,验证了模型的有效性。在此基础上,结合 FMEA 方法分析了不同因素对 VSV 角度滞后的影响程度。分析结果表明:发动机个体分散度和不同热状态之间的驱动负载、驱动能力、活门特性的差别是引发问题的主要因素,当由 2 种以上因素共同作用时,VSV 角度的机械滞后效应增加。提出了 1 种新的故障模式,并通过台架试验完成了验证。

**关键词:** 可调静子导叶;系统仿真;机械滞后效应;故障模式;压气机;航空发动机

**中图分类号:** V231.3

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.02.008

## System Simulation on Mechanical Hysteresis Effects of Variable Stator Vane Based on SimulationX

WANG Chang-liang, QIU Ming-xing, JIN Hai, LI Zhao-hong, SHI Lei, YUAN Sen  
(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of mechanical hysteresis of compressor VSV, the simulation model of VSV regulating system was established based on SimulationX system simulation platform. The validity of the model was verified by comparing the simulation results with the bench test data. On this basis, the influence of different factors on the angle hysteresis of VSV was analyzed by FMEA method. The results show that the main factors causing the problem are the difference of driving load, driving ability and valve characteristics between individual dispersion and different thermal states of the engine. When two or more factors work together, the mechanical hysteresis effects of VSV angle increases. A new fault mode is proposed and verified by bench test.

**Key words:** VSV; system simulation; mechanical hysteresis effects; failure mode; compressor; aeroengine

## 0 引言

压气机可调静子导叶 (Variable Stator Vane 简称 VSV) 的调节控制,直接影响压气机的喘振裕度,其角度调节规律的设置,是保证多级高压比压气机实现设计指标的重要技术手段<sup>[1-3]</sup>,因此对于其角度的控制精度有严格要求。本项研究涉及的 VSV 调节系统为机械液压式调节系统,在设计上具有技术原理成熟和可靠性高等优点,普遍应用于航空发动机上,如美国 F16 飞机配装的 F110-100 发动机、俄罗斯 Su-27 飞机配装的 A Д-31 Ф 发动机、波音 777 飞机配装的

GE90 发动机等,均使用该类型调节控制系统,具有广泛的应用基础<sup>[4-7]</sup>。一般来说,使用上述调节系统的发动机,其 VSV 角度控制精度已经达到了相当高的水平,可满足发动机的使用需求。但是大量发动机的使用经验和统计规律显示,个别发动机的 VSV 角度调节存在滞后量大的问题,导致发动机多次进行硬件更换和排故试车,造成较大的经济损失。类似 VSV 机械滞后问题在国外相关研究[8]中也有提及,通过改进驱动方案后得以解决。对于本文研究的问题,尽管现象类似,但由于不存在非对称变形影响因素,其故障模式有所区别;同时,由于并非批量发动机的共性问题,

收稿日期:2018-03-29 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:王常亮(1982),男,硕士,工程师,主要从事航空发动机总体性能设计和试验研究工作;E-mail:407005210@qq.com。

引用格式:王常亮,邱明星,金海,等.基于 SimulationX 的可调静子导叶机械滞后效应系统仿真研究[J].航空发动机,2019,45(2):38-42.WANG Changliang, QIU Mingxing, JIN Hai, et al. System simulation on mechanical hysteresis effects of variable stator vane based on simulationX[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 38-42.

故障的出现有不确定性,影响因素复杂,且所涉及的控制系统、操纵机构等部件众多,增加了研究的技术难度。

本文基于 SimulationX 系统仿真平台<sup>[9-10]</sup>,搭建了 VSV 角度闭环调节系统仿真模型,运用 FMEA 方法<sup>[11]</sup>进行计算分析及试验验证,确定 VSV 角度滞后的影响因素,提出改进优化方案。对设计技术的改进及设计流程优化具有较强的现实意义。

### 1 系统工作原理及问题现象

VSV 角度闭环调节系统主要由控制器、执行操纵机构和反馈机构 3 部分组成,如图 1 所示。其主要工作原理为依据发动机工作转速状态,控制器通过传感器获取转速指令信号,并作为 VSV 角度控制的输入,提供给控制器内部控制活门以形成控制偏差,高压活门重新分配供给作动筒 2 腔的压力,推动作动筒动作,进而带动压气机导向叶片进行转动。同时,反馈机构将 VSV 角度位置信息反馈给控制器,控制器通过比较理论位置与反馈信息,进一步通过内部杠杆机构减小控制偏差,逐步将 VSV 控制活门拉回到平衡位置,使 VSV 角度重新稳定在新的位置,实现按转速变化的闭环控制。

图 1 闭环调节控制原理

根据统计结果,个别发动机的 VSV 角度控制存在滞后量大的现象(如图 2 所示),导致发动机多次进行硬件更换和排故试车。国外发动机类似 VSV 机械滞后表现如图 3 所示<sup>[8]</sup>,主要原因为驱动方案引起的非对称变形及机构摩擦阻力增大,通过改进驱动方案后,问题得以解决。但由于本文研究的对象,其驱动方案为双作动

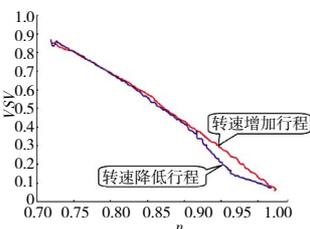


图 2 VSV 滞后问题 (无量纲)

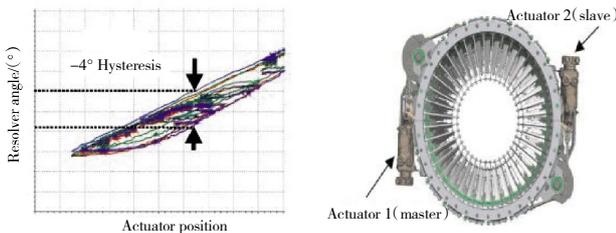


图 3 国外某发动机 VSV 滞后现象及改进方案<sup>[8]</sup>

筒对称排布,故障模式与国外文献描述的有所差别。由于影响因素复杂,且存在相关性,传统的故障隔离试验方法并不完全适用,而系统仿真不受硬件资源和加工周期等因素的限制,可以深入研究潜在的影响因素及其影响程度。

### 2 模型搭建及验证

通过多学科系统仿真平台 SimulationX,并运用二次开发工具 TypeDesigner 对 VSV 角度调节系统搭建模型,其模块主要包括控制器内的指令杠杆、反馈凸轮-杠杆、高压分流活门、作动筒、反馈机构及气动/摩擦负载模块等元部件。具体系统模型如图 4 所示。元器件模型相应结构尺寸按部件实际参数进行设置,动态输入参数按试验测量数据给定。

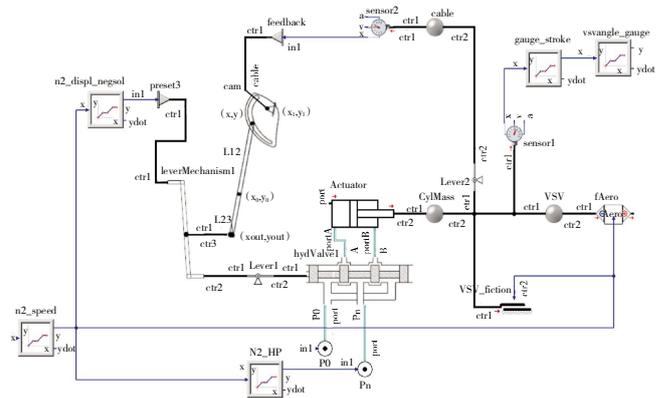


图 4 系统模型

以系统模型中的气动/摩擦负载模块为例,通过分析机构运动状态,选取作动筒活塞作为受力分析对象,物理模型如图 5 所示。

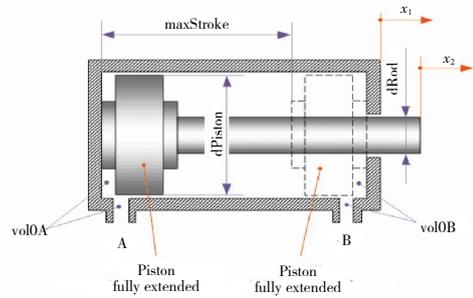


图 5 作动筒模型 (SimulationX 模型说明)

机构运动为稳态或匀速运动,此时活塞杆静止或做匀速往复运动,作动筒 2 腔压力产生的驱动力与 VSV 操纵机构受到的气动力与摩擦阻力基本达到平衡状态,建立转速增加及降低过程的活塞受力平衡方程

$$F_{d1}=F_a+F_f \quad (1)$$

$$F_{d2}=F_f-F_a \quad (2)$$

式中:  $F_{d1}$ 、 $F_{d2}$  分别为转速增加、降低过程驱动负载力;  $F_a$  为发动机流路中的气体在叶片上的气动作用传递到活塞杆上的力;  $F_f$  为摇臂等机构的摩擦作用传递到活塞杆上的力。

分析活塞工作状态, 可得油压驱动力与腔压及活塞结构尺寸关系

$$F_{q1}=P_A \cdot A_A - P_B \cdot (A_B - A_g) \quad (3)$$

$$F_{q2}=P_B \cdot (A_B - A_g) - P_A \cdot A_A \quad (4)$$

式中:  $F_{q1}$ 、 $F_{q2}$  分别为转速增加、降低过程油压驱动力;  $P_A$ 、 $P_B$  分别为作动筒 2 腔腔压;  $A_A$ 、 $A_B$  分别为对应侧活塞作用面积;  $A_g$  为活塞杆截面积。

其中腔压可参考实际测量数据, 活塞结构尺寸按实际情况给出, 由于驱动负载  $F_{d1}$ 、 $F_{d2}$  与  $F_{q1}$ 、 $F_{q2}$  分别为作用力与反作用力, 因此, 联立式(1)~(4)可初步估算出气动力及摩擦阻力曲线, 如图 6 所示。

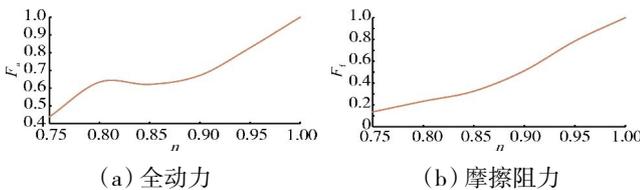


图 6 气动力及摩擦阻力曲线(无量纲)

对搭建的系统仿真模型的有效性进行了验证, 将仿真计算结果与整机试验实测结果进行对比, 可以看到腔压模拟(如图 7、8 所示)和驱动力模拟(如图 9 所示)计算结果与试验实测数据有较好的一致性, 说明该模型可以较好地反映

VSV 系统各模块间的协调作用, 且计算结果误差较小, 可以作为进一步故障因素分析工作的仿真计算基础。

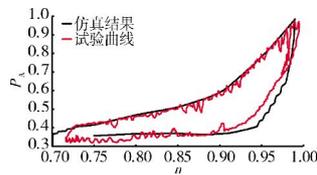


图 7 作动筒 A 腔压力仿真及试验结果(无量纲)

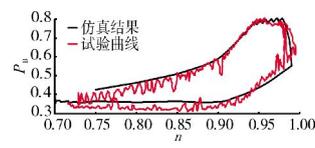


图 8 作动筒 B 腔压力仿真及试验结果(无量纲)

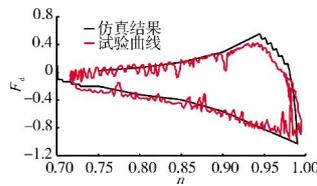


图 9 驱动力仿真及试验结果(无量纲)

### 3 仿真计算及结果分析

以搭建的 VSV 闭环调节系统为研究平台, 运用 FMEA 方法, 注入可能的影响因素进行仿真计算, 分析可能的故障因素, 确定问题故障模式。并通过上述分析, 对 VSV 闭环调节系统的设计流程进行优化改进。

#### 3.1 故障影响因素仿真分析

根据系统工作原理、内部结构组成及试验测量情况, 识别出的可能影响因素主要包括油路压力异常、活门泄漏、机械结构刚度异常、活门特性分散度大等控制器因素, 输入输出关系异常等反馈机构因素, 以及摩擦阻力、驱动负载异常等操纵执行机构因素。

针对可能的影响因素, 以搭建的系统仿真模型为平台, 逐一进行 FMEA 分析, 计算结果见表 1。

表 1 故障因素影响计算

序号	影响因素	VSV 滞后量 / (°)
1	泵后压力过低	仿真排除
2	活门泄漏	仿真排除
3	摩擦阻力突变	仿真排除
4	控制器内部机械刚度过低	仿真排除
5	反馈机构位移输入输出偏差	仿真排除
6	作动筒内泄漏	仿真排除
7	驱动能力偏低	0.63
8	活门输出特性分散度大	0.89
9	驱动负载偏大	0.98
10	活门输出特性分散度大 + 驱动负载偏大	2.70
11	驱动负载偏大 + 驱动力偏低	2.03
12	活门输出特性分散度大 + 驱动力偏低	1.79
13	活门输出特性分散度大 + 驱动负载偏大 + 驱动力偏低	3.35

计算得到主要影响因素, 包括驱动能力偏低、活门输出特性分散度大及驱动负载偏大, 进一步研究其产生原因, 认为是由发动机个体差异或热状态差异导致的, 因此在故障现象上表现出一定的不确定性。进一步对上述 3 方面主要因素进行叠加分析, 复现了故障现象。

#### 3.2 故障模式分析及验证

根据仿真分析结果, 结合实际试验情况得到如下故障模式: 首先, 在实际试车过程中, 在相同转速下, 控制器主泵后压力与回油压力存在一定的分散度, 即控制器自身驱动能力有所差别, 导致在某一时刻因驱

动力不足使 VSV 角度滞后。随着主机转速进一步降低,驱动能力也随之迅速降低,增大了 VSV 角度滞后的概率。其次,根据实测结果,控制活门自身的输出特性也存在分散度,如果输出特性偏差,则会加剧 VSV 角度的滞后程度。在驱动负载方面,发动机个体也存在差别,这主要反映在发动机个体的操纵机构静态阻滯力差别、热态摩擦阻力增加、气动力差别 3 个方面。即存在发动机个体驱动负载偏大导致其与驱动能力匹配不佳的情况。对于发动机实际工作过程,如果只存在 3.1 节中的 3 种主要影响因素的 1 种,并不会引起 VSV 角度显著滞后,如果叠加 2 种及以上诱发因素,则会出现明显的 VSV 角度滞后情况。

为验证上述分析,选取 1 台发动机进行试验。通过前期的部件测量及整机测试数据分析,认为该发动机的控制器驱动能力偏低、活门输出特性较差和热态驱动负载偏大。数值仿真过程按发动机热态摩擦阻力增大后的评估结果进行设定,控制器回油压力按实测数据给定突跳,活门输出特性按附件出厂实测数据分散度给定,仿真结果与实际整机试验结果吻合较好(如图 10~12 所示),故障现象得以复现。

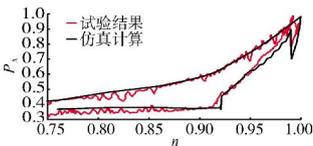


图 11 A 腔压力仿真及试验结果(无量纲)

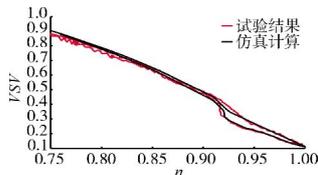


图 10 VSV 角度仿真及试验结果(无量纲)

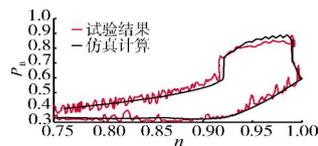


图 12 B 腔压力仿真及试验结果(无量纲)

### 3.3 VSV 调节控制系统设计流程优化

通过对上述故障问题的研究分析,发现 VSV 调节系统作为实现 VSV 角度闭环控制功能的载体,其传统的设计流程不完善,需加以改进优化。主要从正向设计的角度出发,参考系统工程设计方法<sup>[12-15]</sup>,对原有的设计流程改进优化(如图 13 所示)。主要增加了以下环节:

- (1)在控制器和执行机构的部件设计过程中,增加驱动能力及驱动负载匹配设计环节,并进行相应的负载模拟试验和运动仿真评估,进一步通过联合仿真进行初步评估;
- (2)在控制器活门等关键部件的生产制造过程中,根据研究经验,提出分散度控制要求;
- (3)在执行机构方案设计过程中,应对热态过程组件间的摩擦阻力增加情况予以考虑。

## 4 结论

通过系统仿真研究及试验验证,完成了 VSV 机械滞后问题的仿真模拟及故障模式验证,基于分析验证结果,得出以下结论:

- (1)基于 SimulationX 软件平台搭建了 VSV 调节系统仿真模型,并完成了有效性验证;
- (2)通过 FMEA 分析,对 VSV 角度机械滞后效应的影响因素进行了系统仿真分析,得到了单一因素及叠加因素的影响评估结果。进而基于研究结论,提出了 1 种新的故障模式,并通过了整机试车验证;

基于研究结论,对原有设计流程改进优化,对发动机 VSV 调节系统的设计过程具有较强的参考价值。

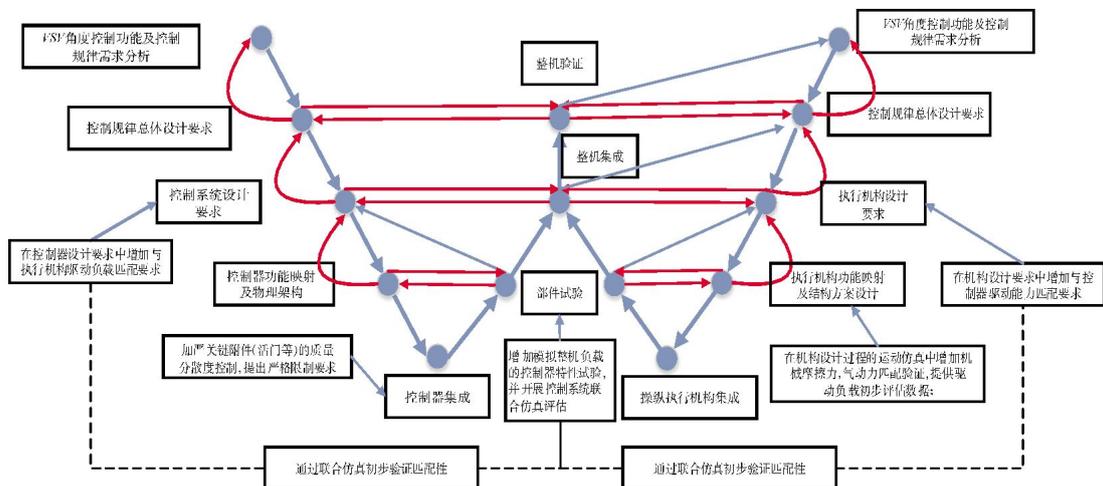


图 13 VSV 调节系统设计流程优化

## 参考文献:

- [1] HHH Saravanamuttoo, GFC Rogers, Cohen H, et al. Gas turbine theory: 6th edition [M]. UK: Prentice Hall, 2009: 263-270.
- [2] Jack L K. Aircraft engines and GAS turbines: 2nd edition [M]. US: MIT Press, 1992: 250-254.
- [3] Arjun Bala, Vishal Sethi, Enrico Gatto, et al. Study of VSV effects on performance via integrated aerodynamic component zooming process [R]. AIAA-2007-5046.
- [4] 熊劲松, 侯安平, 袁巍. 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. Some discuss on technology trend and aerodynamics problem of adjustable blade [J]. Journal Of Aerospace Power, 2008, 23(1): 112-116. (in Chinese)
- [5] 夏存江. CFM56-3 发动机可变几何控制系统对发动机性能的影响 [J]. 航空发动机, 2008, 34(3): 42-45.  
XIA Cunjiang. Effect of CFM56-3 engine variable geometry control system on aerongine performance [J]. Aeroengine, 2008, 34(3): 42-45. (in Chinese)
- [6] 刘长福. 航空发动机结构分析 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 76-78.  
LIU Changfu. Structure analysis of aeroengine [M]. Xi'an: Northwest Polytechnic University Press, 2006: 76-78.
- [7] Wirkowski Paweł. Influence of changes of axial compressor variable stator vanes setting on gas turbine engine work [J]. Polish Cimac, 2007, 2(2): 511-517.
- [8] Holger K, Sebastian B, Hans F V, et al. Altitude testing of the E3E core engine [R]. ASME 2011-GT-45876.
- [9] 刘艳芳. SimulationX 精解与实例: 多学科领域系统动力学建模与仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社. 2010: 68-80.  
LIU Yanfang. SimulationX with explanations and examples: system dynamics modeling and simulation in multidisciplinary domain [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010: 68-80.
- [10] 张帅. VSV 调节机构运动特性的分析方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
ZHANG Shuai. Study on the analysis method of motion characteristics of VSV regulating mechanism [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [11] 杨虞微. 现代航空燃气涡轮发动机故障分析与智能诊断关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.  
YANG Yuwei. Study on key techniques of fault analysis and intelligent diagnosis for modern gas turbine aeroengine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [12] 朱一凡. NASA 系统工程手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 87-212.  
ZHU Yifan. NASA systems engineering handbook [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 87-212. (in Chinese)
- [13] 国际系统工程协会. 系统工程手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 105-147.  
International Council on Systems Engineering. Systems engineering handbook [M]. Beijing: Mechanism Industry Press, 2013: 105-147. (in Chinese)
- [14] 史妍妍, 王桂华. 航空发动机需求管理方法研究 [J]. 航空发动机, 2017, 43(1): 91-94.  
SHI Yanyan, WANG Guihua. Research on aircraft requirements management method. [J]. Aeroengine, 2017, 43(1): 91-94. (in Chinese)
- [15] 史妍妍, 王桂华. 基于需求的航空发动机研制过程分析 [J]. 航空发动机, 2017, 28(1): 48-53.  
SHI Yanyan, WANG Guihua. Aircraft engine development process analysis based on requirements [J]. Aeroengine, 2017, 28(1): 48-53. (in Chinese)

(编辑: 刘 亮)