

# 基于 CATIA 和 ADAMS 的单级可调静子叶片系统仿真分析

## Simulation Analysis of Single-Stage Variable Stator Vane System Based on CATIA and ADAMS

西北工业大学动力与能源学院 胡明 郑龙席

**[摘要]** 以单级可调静子叶片系统为研究对象,运用虚拟样机技术在 CATIA 中建立单级可调静子叶片系统的三维实体模型,然后将其导入到 ADAMS 中进行运动学和动力学仿真,并分析仿真结果,验证了机构设计的正确性。与用其他 CAD 软件建模相比,在 CATIA 中建模能够自动将装配体中的约束转换为分析模型中的运动副或约束,大大方便了仿真设计,提高了设计效率。

**关键词:** 可调静子叶片 虚拟样机 仿真 CATIA ADAMS

**[ABSTRACT]** By applying virtual prototyping technology to the single-stage variable stator vane system, the three-dimension model of the above mentioned system could be established in CATIA. Then import the model into ADAMS, conduct kinematic & dynamic simulation analysis and analyze the result generated, the correctness of mechanism could be well proved. Compared with the simulation models established in other CAD software, the simulation models established in CATIA can automatically convert the constraints in the assembly model to those in the analysis model, which will improve the design efficiently.

**Keywords:** Variable stator vane Virtual prototyping Simulation CATIA ADAMS

压气机喘振是多级轴流式压气机始终要面临的课题。多级轴流压气机喘振本质上的原因是当发动机在非设计状态工作时,压气机前面增压级和后面增压级的流通能力不匹配,引起气流不稳定,造成前喘后涡或前涡后喘的现象。以致压气机发生旋转失速甚至喘振,轻则造成发动机特性的急剧恶化,重则导致发动机熄火甚至于叶片断裂而致使整台发动机遭受严重破坏<sup>[1-2]</sup>。在实际应用中,采用可调进口导流叶片(Inlet Guide Vane,简称 IGV)和可调静子叶片(Variable Stator Vane,简称 VSV)来调节发动机的流量和攻角等,可以提高压气机的起动加速性、拓宽压气机的稳定工作范围、改善发动机的整体效率,从而防止压气机喘振的出现<sup>[3]</sup>。

VSV 系统的传统设计方法是先设计并制造出物理

样机,再测试调节效果,这种方法具有成本高、研制周期长、设计效率低等缺点;而利用虚拟样机技术进行运动学和动力学仿真在这方面具有巨大优势,能够通过计算机仿真测试多种设计,并对结构进行优化设计<sup>[4]</sup>。

本文使用专业动力学仿真软件 ADAMS<sup>[5]</sup>进行仿真,因为 ADAMS 的建模能力较差,所以使用建模功能强大的 CATIA 软件<sup>[6]</sup>对 VSV 系统进行三维实体建模,两者通过 SimDesigner 模块<sup>[7]</sup>进行无缝联接,将 CATIA 建立的模型导入 ADAMS 中进行运动学和动力学仿真。利用虚拟样机技术,在 CATIA 中建模,并将其导入 ADAMS 中对模型进行运动学和动力学仿真,对可视化程度高的模型(如为了得到更为准确的仿真结果,简化较少甚至不简化的模型)具有很强的实用性。以本文为例,为得到不同位置静子叶片的仿真结果,采用 CATIA 和 ADANS 软件进行仿真,可以避免重复建模和手动逐个设置大量的运动副的麻烦,大大丰富设计手段、缩短设计周期、提高设计效率。

## 1 虚拟样机的建立

VSV 系统虚拟样机设计的主要要求是结构简单、操作灵活,在完成规定调节角度范围内转角误差小<sup>[8]</sup>。

### 1.1 VSV 系统构件组成

某高压压气机 VSV 系统<sup>[9]</sup>包括安装在机匣上的外部设备和安装在高压压气机内转子之间的静子叶片两部分。VSV 系统的外部设备包括液压作动筒、双曲轴摇杆、反馈传感器和联动环;VSV 系统的内部设备包括进口导流叶片和可调静子叶片。据此为了使模型可视化程度更高,本文模型进行了很少的简化,进行仿真的单级 VSV 系统模型选取了 24 套静子叶片、摇臂和销钉,1 个联动环以及 1 套作动系统。

### 1.2 VSV 系统运动分析

VSV 系统的整体运动是作动筒中活塞推动驱动臂,驱动臂推动联动环使联动环绕发动机轴线转动,接着联动环带着摇臂绕静子叶片转动轴线转动,摇臂的转动使静子叶片绕转动轴线转动,从而实现静子叶片角度的调节。

VSV 系统的模型建立时,每个部件也需要满足一定

的运动条件。在模型中,机匣是固定件;静子叶片及其上的摇臂是固联关系,并一起绕静子叶片转动轴线做转动运动;联动环既有绕发动机轴线的转动运动,也有沿着发动机轴线的平动运动;作动系统中作动筒可以绕固定支点做任意方向的摆动,而活塞和驱动臂在作动筒内做平动运动;特别需要注意的是,在VSV系统里摇臂与联动环为空间运动连接,通常情况下,静子叶片的转动轴线与发动机轴线垂直,所以在静子叶片调节系统工作过程中,摇臂与联动环的连接点和摇臂与静子叶片转动轴线的连接点之间的连线,除了有在摇臂转动平面上的转动运动分量外,还有垂直于摇臂转动平面的一定位移分量,摇臂与联动环的连接点处联动环的法线方向也有转动分量。

所以,在建立VSV系统三维实体模型时,一定要把这些运动要求考虑进去。

### 1.3 VSV系统仿真模型的建立

由于VSV系统的机构较为复杂,为了便于实现仿真分析与虚拟样机技术相结合,采用专业的CAD软件CATIA对VSV系统进行建模。建模过程主要分为3步:

(1)在CATIA环境中建立机匣、叶片、摇臂、销钉、联动环和作动系统等零部件的实体模型,并在CATIA装配工作台中,根据各零部件之间的连接与约束关系,建立VSV系统的整体装配模型,如图1所示。本文为了得到不同位置静子叶片仿真结果,在方便表达的前提下,如图1所示设置了1号静子叶片位置,并顺时针方向对静子叶片进行编号。

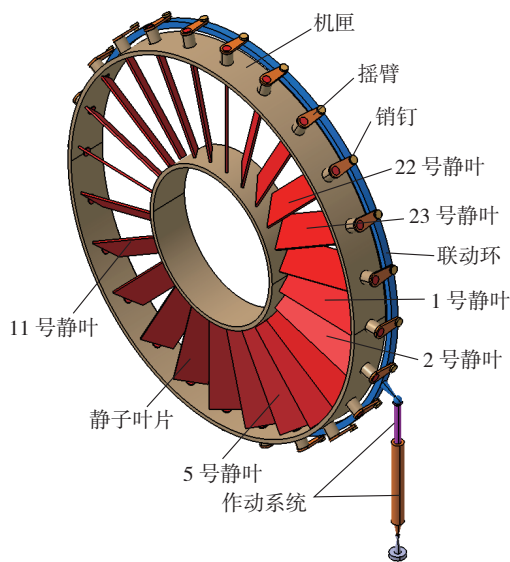


图1 VSV系统总装模型

Fig.1 VSV system assembly model

在装配工作台可以对VSV系统进行装配分析与空间分析。装配分析主要包括约束分析、自由度分析以及

计算碰撞和间隙,用以检查部件的约束、自由度及空间间隙;空间分析可以进行机构装配模型的干涉分析和距离与区域分析。

(2)利用SimDesigner模块定义VSV系统各部件之间的运动约束。由于VSV系统的模型零部件较多,在创建SimDesigner模型时选择自动转换装配体。不用手动逐个设置运动副或约束,SimDesigner模型会自动将装配体中的所有约束转换为分析模型中的运动副或约束。

在这里需要注意的是:这种添加方式对于复杂模型容易转换出冗余约束,会导致仿真分析无法正常进行,为了避免产生冗余约束,在转换运动副或约束之前应仔细检查装配模型,去除与运动学和动力学分析无关的相关约束。另外,为了满足摇臂与联动环之间特殊的空间运动关系,有2种处理方法:一是不改变运动连接方式,对摇臂或联动环进行弹性处理,这样活塞需要很大的作用力;二是不改变摇臂和联动环,改变二者之间的运动连接方式,即在二者连接处添加关节轴承以满足3个运动分量的要求。本模型选取的是第2种处理方法,因此在转换运动副或约束之后,要将此处的圆柱副手动修改成球副。各零部件之间的最终运动副设置如表1所示。

表1 模型约束类型

约束	铰类型	I零件	J零件
1	固定副	机匣	大地
2	转动副	静子叶片	机匣
3	固定副	摇臂	静子叶片
4	球副	销钉	摇臂
5	圆柱副	联动环	销钉
6	球副	驱动臂	联动环
7	移动副	活塞	作动筒壳
8	球副	作动筒壳	固定支座
9	固定副	固定支座	大地

(3)将定义好运动约束的模型导入ADAMS/view下完成仿真模型的建立,如图2所示。导入ADAMS中的仿真模型完好地保存了SimDesigner模型中转化的运动副或约束,相对于用其他CAD软件建立的模型,避免了在导入ADAMS后逐个手动设置繁多的运动副或约束容易出错的问题。

### 1.4 定义材料属性

VSV系统要进行动力学分析,各活动部件必须具有质量信息。将VSV系统模型导入ADAMS/view后,由于系统不能自动给导入的构件赋予材料信息,需要为每个构件指定一个材料信息,否则在计算时会出现错误。一

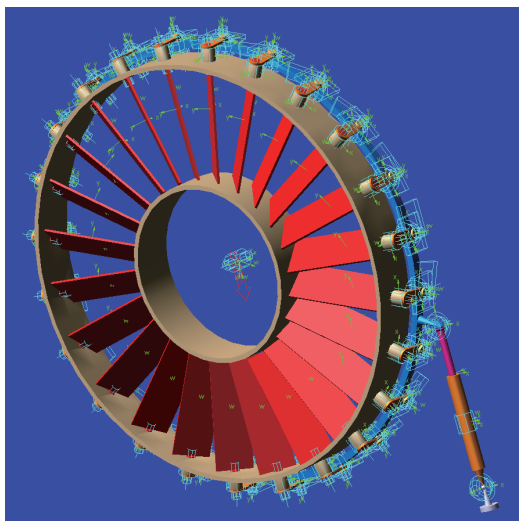


图2 设置各种约束后的VSV系统仿真分析模型  
Fig.2 VSV system simulation analysis model

且给构件赋予了材料属性,系统会自动计算出构件的质量、转动惯量和质心的位置,并在质心处自动创建质心坐标系。本文中 VSV 系统零部件均设为钢制部件。

### 1.5 添加载荷和驱动

一般在虚拟样机的建立过程中除了要给模型添加各种约束以外,还要为各个部件添加合适的力。VSV 系统所受载荷主要有 2 个来源:(1)气流流经 VSV 系统静子叶片时作用在静子叶片上的气动载荷;(2)各运动部件之间的摩擦力。

VSV 系统实现静子叶片角度的调节是以作动筒中活塞上的移动副为驱动源,通过相关连接完成运动仿真,在该移动副上添加的驱动可以是位移、速度、加速度,本文添加的是位移驱动。

## 2 仿真分析

本文仿真设计的目标是实现作动系统在一个作动循环内使静子叶片角度调节  $\pm 30^\circ$ ,静子叶片角度变化正常无突变。因此,在活塞上添加的是平滑的 STEP 函数线条作为位移驱动,仿真时间是 1.2s。仿真结果如图 3~6 所示,VSV 系统运动学和动力学仿真结果分析:

(1)由图 3、图 4 可知,静叶、联动环的角度、角速度及活塞的行程、速度变化正常无突变,静子叶片最大转动角度为  $\pm 30.08^\circ$ ,误差值为  $\pm 0.27\%$ ,满足静子叶片最大转角  $\pm 30^\circ$  的设计要求。

(2)如图 5 所示,VSV 系统在仿真过程中活塞的加速度和受力情况较好。在 0.3s 和 0.9s 附近的加速度突变是由于活塞运动方向改变引起的,此时静子叶片角度变化也在转向。活塞在 VSV 系统仿真过程中一直受到大小为 183N 左右的压力。活塞受力情况可能不是很准

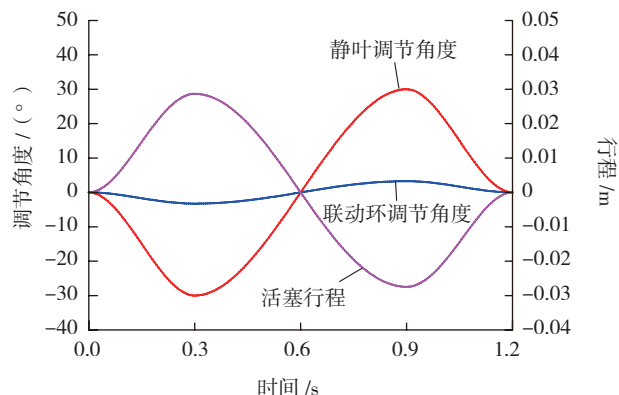


图3 静叶、联动环角度及活塞行程曲线

Fig.3 Stator vane angle, unison ring angle and piston stroke curves

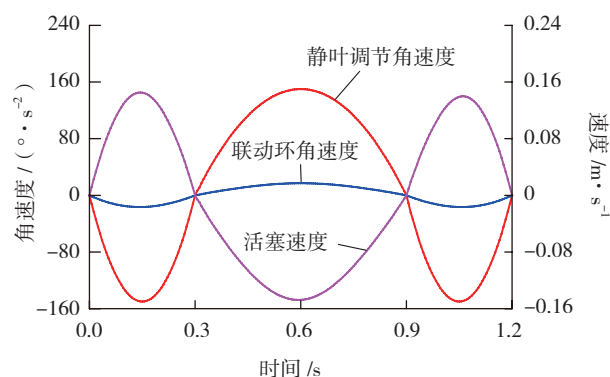


图4 静叶、联动环角速度及活塞速度曲线

Fig.4 Stator vane angular velocity, unison ring angular velocity and piston velocity curves

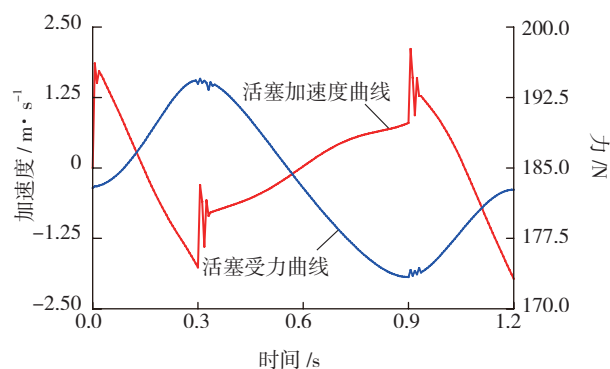


图5 活塞加速度与受力曲线

Fig.5 Piston acceleration and piston force curves

确,气流速度、静子叶片的大小及形状、转子叶片的转速以及叶栅间距大小的不同都导致作用在静子叶片上的气动载荷相差较大,并且气动载荷是变量,所以在仿真中不能精确输入气动力矩的大小造成的。虽然活塞受力情况仿真精度不高,但是可以通过活塞受力曲线的变化情况来分析它的受力变化趋势。

(3)由图 6 可以看出,不同位置的静子叶片(编号

如图1所示)所受摩擦力的大小和变化趋势有较大差异。这是由于随着静子叶片的调节,不同位置静子叶片所受重力和连接关系造成静叶与机匣之间作用力的改变引起的。不同位置的静子叶片的摩擦力仿真结果可以为静子叶片和机匣的设计提供参考。

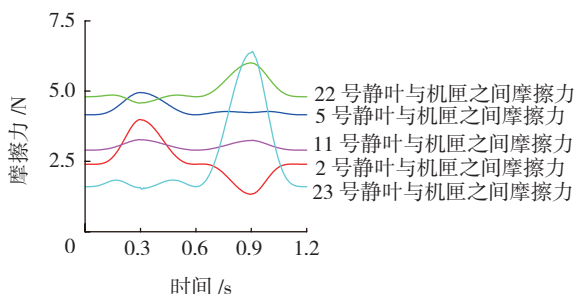


图6 不同位置静叶与机匣之间摩擦力曲线

Fig.6 Friction between different stator vanes and the case

### 3 结论

(1) 本文利用虚拟样机技术,采用CATIA和ADAMS软件对单级VSV系统进行运动学和动力学仿真,仿真分析结果满足设计要求,验证了机构设计的正确性;并且得到各构件的运动曲线、受力曲线等仿真结果,可以为VSV系统的机构设计提供参考。

(2) 采用CATIA和ADAMS软件相结合的仿真方法对于复杂的机构仿真设计具有可视化程度高和实用性强的优点,由于复杂的机构所需要的约束和运动副较多,以前的处理方法(手动逐个设置约束和运动副)繁重而且容易出错,而这种方法能够自动将装配体中的所有约束转换为分析模型中的运动副或约束,在很大程度上方便了仿真设计,提高了设计效率。

### 参考文献

- [1] 刘长福,邓明,方昌德,等.航空发动机结构分析.西安:西北工业大学出版社,2006.
- [2] 陈光.航空发动机结构设计分析.北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [3] 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.航空发动机,2008-34(3):42-45.
- [4] Riesland D. Aircraft engine analysis using ADAMS. 2000 European ADAMS User Conference.
- [5] 郑建荣.ADAMS——虚拟样机技术入门与提高.北京:机械工业出版社,2001.
- [6] 曾洪江,黄聪.CATIA V5机械设计从入门到精通.北京:中国青年出版社,2004.
- [7] MSC Software 中国市场部.成功的因素在于“仿真提前”——集成于PLM内部的虚拟产品开发工具MSC SimDesigner. CAD/CAE与制造业信息化,2005(5):66-68.

[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.燃气涡轮试验与研究,2009,22(2):22-25.

[9] 唐庆如,孔萌.CFM56-7B发动机VSV结果损伤分析.航空维修与工程,2011(4):31-33.

(责编 良辰)

(上接第97页)

由此表看出,前移(向风扇方向移动)导流片和增加导流片的长度,都可以降低模型的应力值、减小变形,前者在减小变形方面更优,后者在降低应力方面更优。两种方案的计算结果都较原气动模型好。

### 3.2 将整流罩和电机平台设置为不同厚度时,模型应力、应变比较

所有模型中,导流片的厚度均设置为20mm。在载荷、约束相同的条件下,分别取后整流罩的厚度为10mm、20mm,电机平台厚度为30mm、40mm,计算结果如表2所示。由表2看出,增加后整流罩的厚度和电机平台的厚度,都能达到降低模型应力、减小模型应变的目的。但从计算结果看出,增加后整流罩厚度的效果更明显。

表2 不同厚度模型结果比较

模型	模型参数/mm			计算结果	
	导流片厚度	后整流罩厚度	电机平台厚度	应力/MPa	应变/mm
模型1	20	10	30	99.72	3.483
模型2	20	20	30	62.91	2.911
模型3	20	10	40	70.43	3.224

在实际设计中,可以参考表1和表2的分析方法,找到影响模型应力、应变的关键因素,对模型的气动外形进行优化设计,使模型既能满足强度要求,又节省材料。

### 4 结论

本文以某风洞动力段结构强度有限元模拟分析为出发点,通过对动力段多种模型方案的计算与比对,找到影响模型结构强度的关键因素,并为优化模型结构指明了方向。如今,以有限元分析指导结构设计已普遍被大家认同,尤其对于结构庞大、造型复杂的非标设备的设计,经验固然重要,但有限元分析无疑成为结构设计的一个重要参考依据。对于大型复杂的风洞洞体的结构设计,ABAQUS有限元软件较同类有限元软件,在建模方面表现出更大的优势,能更好地模拟真实的构造。本文中有限元分析方法和ABAQUS软件的运用,可以为更多大型复杂的非标设备的设计所借鉴。

(责编 亿霖)