

轴对称矢量喷管设计与试验技术研究

贾东兵 陈 锐

(中国航空工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘要: 简要综述了轴对称矢量喷管的设计与试验, 介绍了其技术特点和相应的工作方法, 包括计算机仿真技术的采用和循序渐进、并行发展的工作思路, 并概要介绍了试车验证情况。试车结果表明: 轴对称矢量喷管技术已经取得突破, 技术指标达到了飞机部门提出的初步要求。

关键词: 轴对称矢量 排气喷管 计算机仿真

V2, TP391.9 A

The Investigation on Axisymmetric Vectoring Nozzle

Jia Dongbing Chen Rui

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015)

Abstract: Design and test of an axisymmetric vectoring are briefly summarized in the paper. The key technologies and some experience gained are described including computer simulation and step by step approach. The results of test indicate that the prescribed target has been achieved.

Key words: axisymmetric thrust vectoring; exhaust nozzle; computer simulation

1 引言

飞机推力矢量技术是通过改变发动机排气方向为飞机提供更强的转向力矩的技术。飞机推力矢量技术的应用能赋予战斗机超机动性、短距起降和低的可探测性, 极大地提高战斗机的作战有效性和生存能力。美国、俄罗斯等发达国家都将其作为重要技术优先发展。

在飞机推力矢量技术的研究中, 改变发动机排气方向, 即推力矢量喷管的研究是关键且具决定意义的一环, 必须首先研究发展。

轴对称矢量喷管(AVEN)是在常规机械式收扩喷管上发展出来的一种推力矢量喷管, 通过喷管扩散段的偏转改变发动机排气方向。就整个飞机推力矢量技术来讲, AVEN 具有简单、轻质、低风险的特点, 对飞机、发动机主机的改装要求小, 是实施推力矢量技术的最佳喷管方案。

AVEN 技术研究的目标是完成目标平台涡扇

型的 AVEN 试验件的研制, 并实现热态试车。

2 研究目标及途径

AVEN 要在保持轴对称收扩喷管面积和面积比调节功能的基础上实施扩散段的偏转, 与其他机械装置的重要区别在于 AVEN 是一种复杂的空间多自由度运动机械, 人们最为关心的是如何使这样的机械装置运动起来, 如何实现偏转, 如何保证偏转后众多的、相互交叠的构件协调运动而不卡滞, 如何确定正确的运动规律。所以, 研究思路是从攻克运动机理入手, 从计算机仿真到模型, 当模型成功之后, 立即决定在成件上改装成 1:1 的原理样机, 从而攻克了推力矢量喷管研究中的技术关键——运动机理。

由于 AVEN 研究的技术难度大, 国内技术储备不足, 没有类似机械装置可供参考, 要想一次摸清其需要解决的关键技术是不可能的。针对这种情况, 通过自力更生、循序渐进的研究途径, 从计算机仿真

收稿日期: 2001-04-10

第一作者简介: 贾东兵, 高级工程师, 1967 年出生, 1989 年 7 月毕业于西北工业大学, 从事加力燃烧室可调喷管、轴对称矢量喷管和 CAD 的开发研究工作, 曾获得 2001 年团中央暨中航一集团技术创新奖、2001 年国防科工委科学技术一等奖等。

到模型、从模型到实物、从冷态到热态,分阶段分解关键技术,逐个采取技术措施,并根据需要采用计算机仿真或试验件试验等方法进行验证,同时,研究分解下一阶段的关键技术,如此循环发展,逐步攻克了 AVEN 各阶段关键技术,最终完成了目标平台涡扇型 AVEN 试验件的研制和热态试车。

AVEN 试验件研制是一个涉及气动、机构、结构、强度、控制、材料和工艺等多方面技术的研究课题,每一方面都有大量创新性的研究内容,采用并行工程技术协调多专业的同步发展,在研究效率和研制质量上都获得了极大的收益。

3 计算机仿真

AVEN 是一种复杂的空间多自由度运动机构,典型的 AVEN 机构有 200 左右个运动构件,300 多个运动副,这些构件在一个环形空间相互交叠运动,单凭人工手段研究其运动机理和相互关系是不可能的。在整个 AVEN 试验件的研制过程中,大量采用计算机仿真技术,完成了运动机理研究、运动构件设计乃至装配工艺检查等多方面技术工作,不仅有效地缩短了研究周期,也提高了结构设计的准确性。

3.1 运动机理仿真

用 C 语言编制 AVEN 主要运动构件的动态运动仿真软件,研究 AVEN 的运动机理、主要运动构件的相互运动关系、A9 操纵作动筒与喷管扩散段的位置关系,从而给出 AVEN 的运动位置和控制规律。

3.2 实体仿真

在 AVEN 的研究过程中,特别是全尺寸冷、热态试验件的研制中,运用计算机仿真技术,按照如下工作过程,完成了 AVEN 的闭环设计:

(1) 依据气动设计方案和运动机理仿真结果进行结构方案设计;

(2) 按机构方案进行初步的真实尺寸 3D 计算机实体建模、计算机实体装配仿真,然后进行计算机 AVEN 实体机构运动仿真,检查结构方案的合理性和运动的准确性;

(3) 将主要承力构件的 3D 模型提供给强度设计进行强度、刚度校核和初步结构强度优化;

(4) 给出初步的控制规律,并行开展液压系统和控制器的方案设计;

(5) 这个方案设计小闭环过程,经过或多或少的几次反复之后,结构设计方案得以优化,后续设计

工作有了良好的基础。

在主要零组件的工程设计完成之后,按照真实结构进行 AVEN 的 3D 实体仿真,验证结构设计的合理性和控制规律的正确性,并检查零件的加工工艺性能和试验件的装配工艺性能。

按照这样的设计过程,可以在硬件加工之前完成虚拟装配和虚拟试验,有效地排除了大部分设计盲点和失误,极大地提高了试验件的研制质量,缩短了研制周期,也节省了研制经费。

在这些仿真工作的基础上,编制了 AVEN 机构方案设计及运动仿真软件,可以快速准确地完成 AVEN 的方案设计和优化工作。

4 运动机理及模型试验件

为验证运动机理计算机仿真结果的正确性,进一步研究 AVEN 运动机构,开始了冷态运动机理及模型试验件的研制和试验。

首先,完成了 AVEN 扩散段缩比运动机构试验件,研究 AVEN 运动机构的可控性能和偏转运动时主要构件的运动协调关系;此后,研制了真实发动机尺寸的冷态原理样机,研究 AVEN 运动机构、运动机构的结构可行性以及各个子机构的具体结构实施方法,研究和验证控制规律和控制系统。

通过对上述两套试验件的研制和试验,验证了运动机理计算机仿真结果的正确性;获得了对 AVEN 运动机构的直观、清晰的认识;掌握了 AVEN 的操纵方法;找到了优化矢量角度的技术途径;完成了有级、半自动化控制器的研制;确定了下一步需要解决的关键技术。

5 攻克关键技术并通过热态试验件试验

在冷态试验件的研究基础上,根据飞机部门提出的 12 项要求和前期工作的技术成果,分解了关键技术,完成了热态试验件及其控制系统的设计加工和联调,实现了在涡喷发动机平台上的全加力状态试车。

热态台架试验件试车,验证了 8 项主要技术关键,即气动性能、结构设计、强度刚度分析、自动控制、材料与工艺、冷却与隔热、密封与封严、测试与试车,其解决措施是成功的,为我国自行研制 AVEN 技术验证机奠定了坚实的技术基础。

6 技术验证及热态试验件的改进

在热态试验件已攻克 8 项关键技术的基础上,

为攻克另外4项关键技术,研制了改进型热态试验件,共完成了两个阶段的试车。第一阶段试车完成了5580次矢量循环,试车表明,该试验件在完全继承二批机所有成功之处的同时,达到了攻克上述四项关键技术的设计目的,AVEN的设计指标已经全面达到飞机部门提出的12项要求。

由于试车台架的限制,不能对AVEN热态试验件进行全面的试车,为此,对试车台进行了适应性改造,给试车台增加三分量测力系统。在具备三分量测力系统的试车台上,对改进型热态试验件进行了加大矢量角、增加矢量循环数的试验研究,最大加力矢量角达到了 21° ,热态矢量循环数10026次。试车证明AVEN热态试验件已经具有一定的可靠性。同时,测取了关键零组件的温度分布、应力分布及推力特性等方面的试验数据。

7 目标平台的热态试验件达标

在对以上工作进行了认真的总结分析之后,经过对三种基本气动方案和两种基本结构方案的优化分析,确定了目标平台AVEN的最终方案和需要攻克的11项关键技术。目标平台AVEN继承了前两台AVEN的所有成功技术措施,改进了所有不足之处,最终完成了目标平台AVEN的全加力状态试车。目标平台AVEN保持了与目标平台原喷管相近的气动特性、控制规律和安装接口,具有良好的互换性。试车结果证明,在目标平台大调节范围和高载荷的条件下,目标平台AVEN运动灵活准确、喷管密封良好、承力系统可靠有效;同时,目标平台AVEN拥有全新的小型集成化数字控制系统,并具备了安全可靠的应急系统。

目标平台AVEN达到了如下技术指标:

- (1) 偏转方位: 360° ;
- (2) 矢量偏角: $17^\circ \sim 20^\circ$;
- (3) 偏转速率: $\omega_x = 120^\circ \sim 180^\circ/\text{s}$,
 $\omega_y = \omega_z = 45^\circ \sim 60^\circ/\text{s}$;

- (4) 内传力结构、外廓尺寸满足飞机要求;
- (5) 设置控制系统应急复位装置。

AVEN在目标平台上的试车结果表明:

- (1) 喷管调节范围完全满足发动机主机的要求。
- (2) 内传力结构经受住了大推力等级的负载考验。

- (3) A8设计正确,用原数字式电子控制器实现

了AVEN的A8自动控制与原控制系统完全兼容,无需改动。

- (4) A8与A9可单独控制,又可按给定关系联动,协调很好。

- (5) A9控制系统实现了小型化、数字化、集成化,工作稳定可靠。

- (6) 密封片、调节片等构件工作可靠。

- (7) AVEN应急复位功能安全可靠。

- (8) 在发动机中间状态,小加力状态、部分加力状态和全加力状态,AVEN偏转工作中喷管与主机气动参数匹配良好,机械系统工作稳定。

- (9) 外廓尺寸和气动外形满足飞机要求。

- (10) 试车中成功测得各种工作状态下的矢量力、主要构件的温度分布、应力分布及发动机的性能。

涡扇型轴对称矢量喷管试车成功,说明该台热态试验件解决11项关键技术的措施是成功的,使推力矢量喷管研究又跨上了一个新的台阶。

8 结束语

AVEN能够保持国内现有发动机收扩喷管的所有功能以及相同的调节控制方式,最终完成的AVEN将可替代现有的轴对称收扩喷管,使3代半飞机具有机动优势。

同样,AVEN可根据推比10、推比12、推比15发动机的要求进行设计,作为推比10、推比12、推比15的一种标准喷管,使我国的第4代战斗机具有更高的机动性能,增强我国的国防空中力量。

飞机推力矢量技术可以应用在舰载飞机上,并可望研制出适合舰载的无尾短距起降飞机及常规布局垂直起降舰载飞机(常规布局垂直起降飞机的起降方式类似于运载火箭,可在移动式起降平台或中型舰艇直升机起降平台上起降)。

装有推力矢量喷管的航空发动机经过改装后,作为新型的地效飞机或地效船的动力,将极大地提高其突击能力、机动能力和生存能力。所以说推力矢量技术不但具有很强的空中优势,同时也具备广阔的市场发展前景。

推力矢量技术研究中应用的新设计方法,如计算机仿真技术、新型材料(如Ni3Al)研究、新工艺(如超塑成型和扩散连接)研究,对国防技术以及民用技术的发展将会起到推进作用。