

# 航空发动机吞鸟试验要求与验证

魏海涛, 刘涛, 薛文鹏  
(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

**摘要:**针对国内开展航空发动机吞鸟试验较少、试验方法尚不成熟、不规范等问题,从吞鸟试验标准条款要求入手,对比分析了GJB241A、GJB242A、GJB3727、CCAR33等标准规范在吞入的鸟的质量、数量、速度,以及鸟撞位置、发动机状态、试验程序等方面的差异。从试车台、抛鸟设备、测速装置、试验用嵌鸟弹壳等方面,提出了试验设备选择及研制方法。结合某型发动机吞鸟试验,确定了具体试验技术指标,研制了专用抛鸟试验设备,制定了吞鸟试验程序和方法。首次在发动机定型中开展了发动机吞鸟试验,获得了较为满意的试验效果,验证了试验技术指标确定、试验设备选择和研制方法的可行性和有效性,并在防护措施、抛鸟设备、应急预案、鸟撞击位置、吞鸟对发动机的影响等方面提出了建设性意见。

**关键词:**吞鸟试验;鸟撞;抛鸟设备;环境试验;航空发动机

中图分类号:V263.3

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.013

## Requirements and Verification on Bird Ingestion Test of Aeroengine

WEI Hai-tao, LIU Tao, XUE Wen-peng  
(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of less bird ingestion test, immature test method and non-standard in China, the differences of GJB 241A, GJB 242A, GJB 3727, CCAR33 in weight, quantity, speed, impact position, engine status and test procedure of bird ingestion test were compared and analyzed. The selection and development methods of test equipment were proposed from the aspects of test bench, bird throwing equipment, speed measuring device and bird shell. Combined with the bird ingestion test of a certain engine, the specific test technical indexes were determined, the special bird throwing test equipment was developed and the bird ingestion test procedures and methods were formulated. The bird ingestion test of the engine was carried out for the first time in the engine finalization, and the satisfactory test results were obtained, which verified the feasibility and effectiveness of the determination of test technical indexes, the selection of test equipment and the development method. Constructive suggestions were put forward on the effects of bird ingestion test on engine, protective measures, bird throwing equipment, emergency plan and collision location.

**Key words:** bird ingestion test; bird impact; bird throwing equipment; environmental test; aeroengine

## 0 引言

人类从鸟类的飞行中受到启发,研制出了飞机,实现了升空的梦想。而中低空是鸟与飞机共同飞行的区域,二者存在相撞的可能,若飞鸟撞到飞机将直接影响到飞行安全。有关资料表明,仅1980~1982年间,美国空军发生的损失在1000美元以上的鸟撞事故就有3900多起;1976~1980年间,欧洲14国各条航线共发生7500多起鸟机相撞事故。随着航空飞行器的广泛应用和低空领域的开放,鸟撞事件发生的

可能性也越来越大<sup>[1]</sup>。为此,美国空军成立了“鸟撞事故调查处理委员会”,进行鸟撞试验,制订有关鸟撞试验的规定,并将此纳入美国航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范MIL-E-5007D。

目前,防止和消除鸟撞危害的方法主要有2种:一种是在飞机上安装鸟群探测雷达,使飞机能够对鸟群进行有效避让,同时对机场进行园林化管理,利用猛禽、药物或其他方式驱离或消灭机场附近鸟类,这些措施能在一定程度上保证飞机的安全;另一种则是通过提高飞机/发动机抗击鸟撞的能力来最大限度地

收稿日期:2019-09-18 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:魏海涛(1968),男,硕士,自然科学研究员,主要从事航空发动机整机试验工作;E-mail:13892856385@163.com。

引用格式:魏海涛,刘涛,薛文鹏.航空发动机吞鸟试验要求与验证[J].航空发动机,2021,47(增刊1):69-75.WEI Haitao, LIU Tao, XUE Wenpeng. Requirements and Verification on Bird Ingestion Test of Aeroengine[J]. Aeroengine, 2021, 47(S1): 69-75.

降低鸟撞的危害<sup>[2]</sup>。对于发动机研制机构而言,要考虑如何提高和检验发动机的抗鸟撞能力,开展发动机吞鸟试验是最直接有效的手段<sup>[3-5]</sup>。

航空发动机吞鸟试验研究在国外开展较早,20世纪70年代,RR公司、GE公司、萨克莱推进试验中心等著名发动机研制和试验机构均先后按照相应的规范要求开展了发动机吞鸟试验研究<sup>[6]</sup>。在中国以往的航空发动机研制过程中,发动机吞鸟试验没有得到重视,其原因有2个:一个是因为中国发动机大多依靠仿制,其材料、性能和结构与原型机相同或相近,而原型机曾进行过此类试验;另一个是由于发动机吞鸟试验危险性高、难度大,若试验造成定型发动机的损伤或毁坏,可能会影响整个型号的定型进度。中国的发动机吞鸟试验研究始于20世纪80年代,最初开展的仅仅是技术探索性试验研究。随着发动机行业的快速发展,自主研发的发动机不断涌现,并且研究的深度和广度也在不断扩展。发动机的安全性和可靠性越来越受到重视,有关发动机吞鸟试验的内容和要求开始出现在军/民用发动机的定型/适航性试飞大纲中<sup>[7]</sup>。但由于种种原因,可以搜集到的技术资料非常有限,这也在一定程度上限制了中国发动机吞鸟试验技术的发展。

本文从发动机吞鸟试验规范和标准的要求、试验设备的选择、试验的开展等几方面进行分析,以对航空发动机整机吞鸟试验的开展提供参考和借鉴,促进航空发动机吞鸟试验技术的发展。

## 1 试验要求

随着中国航空发动机研制工作的开展,相应的标准规范建立并不断完善,对于发动机吞鸟试验的内容也有了相关的规定和要求。比如吞鸟的质量、数量,以及吞鸟的速度、鸟撞位置、鸟撞时发动机的工作状态等。

### 1.1 吞鸟的质量和数量

在吞鸟试验中,鸟的质量与开展的试验内容有关。通常按照鸟的质量将吞鸟试验分为吞小鸟、吞中鸟、吞大鸟等3个试验类别。

国军标《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》<sup>[8]</sup>(GJB241A-2010)、《航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范》<sup>[9]</sup>(GJB242A-2018)、《航空发动机吞鸟试

验要求》<sup>[10]</sup>(GJB3727-99),以及《航空发动机适航规定》<sup>[11]</sup>(CCAR33)中对于发动机吞鸟试验时鸟的质量和数量均有要求,但各标准要求的内容有所差异<sup>[12-14]</sup>,见表1~3。

表1 在吞大鸟试验中鸟的质量要求(CCAR33)

$A/\text{cm}^2$	鸟的质量/g
$A < 13500$	$\geq 1850$ , 除非使用更小的鸟可使验证更加严格
$13500 \leq A < 39000$	2750
$39000 \leq A$	3650

表2 在吞中鸟试验中鸟的质量和数量要求(CCAR33)

$A/\text{cm}^2$	鸟的数量/只	鸟的质量/g
$A < 500$	不适用	
$500 \leq A < 1000$	1	350
$1000 \leq A < 2000$	1	450
$2000 \leq A < 4000$	2	450
$4000 \leq A < 6000$	2	700
$6000 \leq A < 10000$	3	700
$10000 \leq A < 13500$	4	700
$13500 \leq A < 17000$	1 加3	1150 700
$17000 \leq A < 21000$	1 加4	1150 700
$21000 \leq A < 25000$	1 加5	1150 700
$25000 \leq A < 39000$	1 加6	1150 700
$39000 \leq A < 45000$	3	1150
$45000 \leq A$	4	1150

注:A为发动机进气道喉道面积。

### 1.2 发动机状态和吞鸟速度

在进行发动机吞鸟试验时,发动机工作状态和吞鸟的速度在相关的国军标和适航条款中均有明确要求,但其具体要求有所差异,见表4。

### 1.3 鸟撞位置

相关的国军标中对于吞鸟试验时鸟撞位置要求相同,然而适航条款中关于鸟撞位置的要求则与国军标不同,见表5。

### 1.4 试验程序

在GJB3727和CCAR33中,要求的吞鸟持续时间均为1s,但二者对于航空发动机吞鸟试验程序的规定有所不同。GB3727-99的要求较为简单,吞鸟试验应在发动机状态稳定后进行,吞鸟后,在型号规范规定的发动机恢复到吞鸟前工作状态的时间内,应保持油门杆(或控制杆)不动。

表3 不同条款对吞鸟试验中鸟的质量和数量的要求对比

试验类别	GJB241A—2010	GJB242A—2018	GJB3727—99	CCAR33
吞小鸟试验	质量/g	50~100		85
	数量/只	每 300 cm <sup>2</sup> 上压气机迎风面积或大于此面积 50% 的面积上应有 1 只,但最多不超过 16 只		每 320 cm <sup>2</sup> 上进气道面积或其余数部分应有 1 只,但最多不超过 16 只
吞中鸟试验	质量/g	1000	900~1000	见表 2
	数量/只	每 1500 cm <sup>2</sup> 上压气机迎风面积或大于此面积 50% 的面积上应有 1 只		
吞大鸟试验	质量/g	2000	1800~2000	见表 1
	数量/只	只要进口面积足够容纳 1 只大鸟,就应吞 1 只大鸟		1

表4 不同条款对吞鸟试验中发动机状态和吞鸟速度的要求对比

试验要求	GJB241A—2010	GJB242A—2018	GJB3727—99	CCAR33
吞小鸟和吞中鸟试验	状态 1	发动机转速为最大状态转速,鸟速为飞机起飞速度		发动机稳定在不小于 100% 的起飞功率或推力状态。吞鸟速度应反映从地面到地面上 460 m 的正常飞行高度所使用的空速范围内的最严酷条件,但不应小于飞机的 V <sub>1</sub> 最小速度
	状态 2	发动机转速为最大连续状态转速,鸟速为飞机巡航飞行速度		
	状态 3	发动机转速为下滑规定转速,鸟速为飞机下滑飞行速度		
吞大鸟试验	发动机转速为最大状态转速和最大连续状态转速这二者可能损伤较大者,鸟速为 2500 m 高度内飞机最大极限飞行速度。		发动机状态与吞小鸟和中鸟试验相同。吞鸟速度,固定翼飞机,鸟速为 370 km/h,悬翼飞行器,鸟速则为正常飞行时的最大空速。	

表5 不同条款对吞鸟试验中鸟撞位置的要求对比

试验要求	GJB241A—2010	GJB242A—2018	GJB3727—99	CCAR33
吞小鸟试验	吞小鸟的时间间隔应是随机的,并应无规则地散布在进口面积上		应保证 1 只鸟投向第 1 级转子叶片的任何关键位置上,其余的鸟则应均匀分布在整个发动机的前表面上	
吞中鸟试验	鸟应对准发动机正面的关键部位		若只用 1 只鸟时,这只鸟应投在发动机核心机流道上; 若 2 只或 2 只以上时,其中最大的 1 只应投在发动机核心机流道上,次重的 1 只应投向第 1 级转子叶片的最关键的暴露位置上,其余的鸟必须均匀地分布在整个发动机的前表面上。	
吞大鸟试验			投向第 1 级转子叶片的最关键的暴露位置。	

CCAR33 对于吞鸟后的要求如下:

(1)悬翼航空器发动机。吞鸟时间持续 1 s,吸鸟后 2 min 内不能移动功率杆。随后 3 min 在试验状态的 75%;随后 6 min 在试验状态的 60%;随后 6 min 在试验状态的 40%;随后 1 min 在进场慢车状态的 40%;随后 2 min 在试验状态的 75%;最后稳定在慢车位置,并使发动机停车。

(2)其他发动机。吞鸟时间持续 1 s,随后 3 min 在试验状态的 75%;随后 90 s 在下降的飞行慢车位置;随后 30 s 在试验状态的 75%;最后稳定在慢车位置,并使发动机停车。

## 2 试验设备

航空发动机吞鸟试验所需设备主要包括试车台、抛鸟设备、测速装置、摄像仪器、记录设备等,在 GJB 3727 中,对这些设备提出了一些定性要求。试车台

具有发动机常规试车所需的各种设备,抛鸟设备能够将规定质量和数量的鸟以一定的速度抛出,测速装置能够准确测量试验中鸟的速度,摄像系统需完成不同角度各关键部位的高速摄像,记录设备能够实现试验数据的全程记录。

### 2.1 试车台

试车台是发动机吞鸟试验的基础设备,也是关键设备,其建设规范和相应要求已在相关规范和标准中明确提出。试车台的安装、控制、测试、燃油供给等设备和系统还应能够满足被试发动机的具体试车需求。为了便于这些设备设施的安装和使用,通常选择露天试车台进行发动机吞鸟试验。某涡扇发动机吞鸟试验用露天试车台如图 1 所示。



图1 200 kN 露天试车台

## 2.2 抛鸟设备

抛鸟设备属于专用试验设备,也是发动机吞鸟试验的关键设备之一,主要功能是将一定数量和质量的鸟按照要求的速度抛射到发动机进口的规定部位。抛鸟设备按照抛射原理主要有滑道式抛鸟和气炮式抛鸟2种形式。

(1)滑道式抛鸟设备。主要由滑道、滑块、控制机构、阻挡装置等组成。试验前将鸟体固定在滑块上,试验时操纵控制机构,使载有鸟体的滑块沿滑道从空中滑落,依靠设备自身的重力不断加速,达到试验所需的速度后,鸟体与设备分离并抛向试验发动机,滑道式抛鸟设备原理如图2所示。该类型设备资源需求少,但占地空间大,安装和使用均有不便,尤其受到滑块结构、质量和环境因素的影响,鸟速控制精度较低。

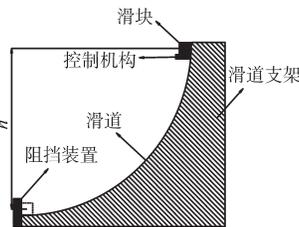


图2 滑道式抛鸟设备原理

滑道式抛鸟设备的鸟速为

$$V = \sqrt{2(g h - k L)} \quad (1)$$

式中: $V$ 为鸟速; $g$ 为重力加速度; $h$ 为鸟体滑落高度; $L$ 为滑块划过距离; $k$ 为系数(与滑块的摩擦系数、风阻系数等有关,通过试验获取)。

(2)气炮式抛鸟设备。主要由气罐、炮管、鸟体装填装置、控制机构等组成。在试验前,须先使用鸟体装填装置将鸟体装填到炮管中,并对气罐充填一定压力的空气;在试验时操纵控制机构,使气罐中的气体快速释放进入炮管中,鸟体依靠压缩空气的推动在炮管中不断加速,在达到试验所需的速度后抛向发动机进口。气炮式抛鸟设备原理如图3所示。

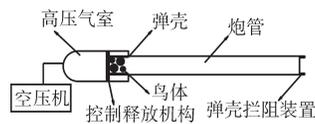


图3 气炮式抛鸟设备原理

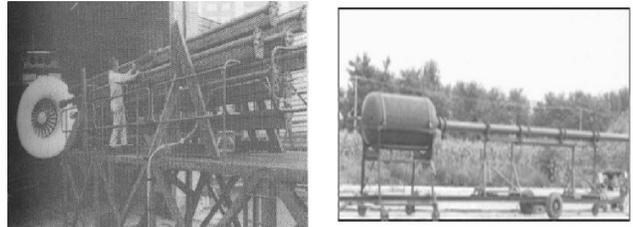
气炮式抛鸟设备的鸟速为

$$V = \sqrt{\frac{2 p_{pqs} W_{vqs}}{\varphi(\gamma - 1) m}} \times \sqrt{1 - \left(1 + \frac{A_p L}{W_{vqs}}\right)^{1-\gamma}} \quad (2)$$

式中: $P_{pqs}$ 为气室压力; $W_{vqs}$ 为气室容积; $\gamma$ 为绝热指数, $\gamma=1.4$ ; $\varphi$ 为气炮计算功率因素(经验校准值); $m$ 为发射鸟体质量; $L$ 为气炮炮管长; $A_p$ 为炮管截面。

气炮式抛鸟设备需要空气压缩机等辅助设备和一定的电力资源,但其占用空间小,鸟速控制精度高,使用较为便捷,因此,在吞鸟试验中得到广泛应用。

同时,如何使气罐中的空气快速释放到炮管是该设备的1项关键技术,以往曾采用过雷管爆破膜片和电动阀或气动阀控制的方式,近几年开始采用组合气室结构,但这种结构大多使用在单管气炮中。RR公司的多管气炮和某机构使用的单管气炮如图4所示。



(a) RR公司多管气炮

(b) 某机构单管气炮

图4 抛鸟用气炮装置

## 2.3 测速装置

GJB 3727中要求在航空发动机整机吞鸟试验过程中要有准确的鸟速测量装置,其测量精度应达到 $\pm 3\%$ 。对于高速运动的物体,由于速度较高,考虑到测量系统精度要求比较高,目前一般采用间接的方法来得到速度参数,即通过物体在某段距离上的通过时间计算出其平均速度。按照测量时高速运动物体是否与测量装置接触,鸟速测量分为接触式测量和非接触式测量<sup>[15]</sup>。

接触式鸟速测量方法的工作原理是鸟体通过2道网靶并将网靶击破,由击破网靶的时间和2个网靶的间距得到物体运动速度。其优点是结构简单、使用快捷、制造方便、不易受外界干扰和影响,但是靶面的撞击会对物体的飞行有一定的影响,且网靶不能重复使用。

非接触式鸟速测量方式主要有2种,分别是光幕靶测速法和高速摄像机测速法。光幕靶测速法是鸟体通过光幕靶引起光通量的变化,从而触发计数单元,再根据已知靶距确定鸟的飞行速度;高速摄像机测速法是通过判断定长距离的视频帧数得到鸟体的速度,可实现全程记录,能够测量某一段距离的平均速度。1979年,法国萨克莱推进试验中心就采用高速摄像机进行了鸟速测量。

通过几种形式鸟速测量的精度分析可知,鸟速光幕靶测量和高速摄像机测量可以满足3%的测量精度要求,适用于航空发动机吞鸟试验的速度测量。建议使用高速摄像机进行鸟速测量,可以得到鸟体在飞行过程中任意段的平均速度。

## 2.4 嵌鸟弹壳

在发动机吞鸟试验中,还有1个辅助试验设备——嵌鸟弹壳。虽然在GJB 3727中没有提及,但该设备非常重要。由于鸟体为不规则形状的活体,难以保证在炮管中平稳运行。采用嵌鸟弹壳一方面可以将鸟体和压缩空气之间封堵起来以减少漏气损失,保证压缩空气对鸟体的有效推动,另一方面可以放置鸟体,保持炮管中鸟体在外形上的一致性,以及鸟体在炮管中运动时具有大致相同的摩擦阻力,这样既能保证在相同压力下鸟速的稳定性,同时还有助于鸟体抛射的准确性。

嵌鸟弹壳采用轻质泡沫材料压制而成,如图5所示。试验中弹壳因受到较大阻力而滞止,只有鸟体抛向发动机。这种弹壳在飞机的鸟撞试验中应用较多,在早期的发动机吞鸟试验中也有应用,但若炮口距离发动机进气道较近(小于3 m),需增设拦阻网等装置,以防止弹壳被发动机吸入。

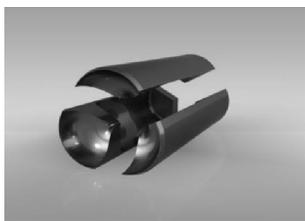


图5 非金属材料弹壳

在近几年开展的发动机吞鸟试验中,开始采用金属材质的弹壳,材料多选用铝或者其他延展性较好的金属,如图6所示。采用金属弹壳进行试验时,必须在炮口安置1个集壳器,收集试验用弹壳,防止其随鸟体一起抛进发动机。为便于在试验时弹壳与集壳器碰撞时的能量吸收,防止弹壳破裂掉块威胁发动机安全,金属弹壳常常采用波纹管形状的壁面结构。同时,将弹壳端部设计成锥面形式,依靠端口收缩变形延长碰撞时间,减小碰撞力,从而降低弹壳破裂的风险。

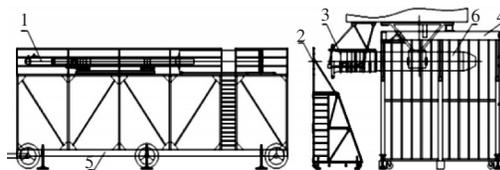


图6 特殊结构的金属弹壳

## 3 吞鸟试验

2014年,某涡扇发动机按照定型试飞大纲要求首次开展了吞鸟试验,选用地面露天试车台(图1)作为此次试验用试车台。

吞鸟试验设备除测速装置外全部为自主研发。试验设备布置如图7所示,采用集成式气炮作为抛鸟设备,炮管长8.5 m,直径为160 mm,最大抛射质量为



1—气炮装置;2—靶板组件;3—专用进气道;  
4—发动机防护装置;5—炮体安装平台;6—发动机

图7 吞鸟试验设备布置

2.5 kg,最大抛射速度为550 km/h。该气炮的气室和炮体为一体化设计,炮体的高低和方向可调,控制系统是专门设计的。鸟速测量通过高精度高速摄影机完成,嵌鸟弹壳采用金属弹壳(图6)。试验现场照片如图8所示。



图8 吞鸟试验现场

此次吞鸟试验使用同一台发动机进行了4次,分别为模拟飞机起飞和着陆时吞小鸟和吞中鸟试验。吞鸟试验内容(吞鸟速度、鸟的质量和数量以及发动机工作状态等)由研制方根据国军标要求并结合型号研制大纲制定。鉴于安全考虑,吞鸟试验在鸟的质量和数量选择上与国军标要求有一定差距。

吞小鸟试验的发动机工作状态分别为中间状态和 $n_1=60.5\%$ 的状态,选择3只50 g小鸟,鸟速分别为294、291 km/h,鸟撞部位为压气机叶片叶尖。在进行吞鸟试验时,发动机振动稍有增大,但未出现喘振、参数超限、熄火及停车等现象,发动机工作无异常,吞鸟前后发动机试验数据未见明显变化。

吞中鸟试验的发动机工作状态分别为 $n_1=60.5\%$ 的状态和中间状态,选择1只280 g中鸟,鸟速分别为304、302 km/h,鸟撞部位为压气机叶片叶尖。

(1)发动机在 $n_1=60.5\%$ 状态下吞中鸟后,振动突增,0.5 s后又回落至吞鸟前状态,其它参数未见明显变化。

(2)发动机在中间状态下吞中鸟后,参数波动明显,推力减小14%,高低压转速在0.5 s内有0.5%的突增之后又回落并趋于稳定,涡轮后温度有0.6 s超限,最高温度达到822.6 °C,振动最大突增达到42.44 mm/s,但没有出现发动机喘振、熄火、停车等现象。将发动机分解检查发现,第1级转子有1处叶片凸肩错位,3个叶片撕裂,第1级转子叶片凸肩7处掉块,零级静子

内端衬套有18件破碎,高压涡轮导向器弦中区域有12组叶片烧伤变形,6处裂痕,后篦齿环4处裂纹。

在此次航空发动机吞鸟试验中,得到以下几点体会:

(1)发动机吞鸟试验风险性较大,试验时必须采取必要的防护措施。从试验结果来看,在试验发动机周围采取堆积沙袋的措施较为有效,不仅保护了油管等重要部位和人员工作位置,而且防止了沙尘飞扬或泄漏对发动机工作产生不利影响。

(2)在发动机吞鸟试验过程中,出现发动机喘振、停车、起火等突发现象的可能性较大,因此,有必要根据试车台的具体情况和被试发动机的特点制定切实可行的应急预案,并应在试验前进行检查和演练。

(3)气体炮作为抛鸟设备在抛鸟时压缩空气随鸟体一起喷出,可能对发动机进气流场产生影响。试验中炮口与发动机进气道应保持一定距离,减少这部分气流对发动机进气产生影响,这一距离通常为2.5~4 m。通过炮口的特殊设计使气流从旁路流出,可有效减少气流对进气的影响。一般情况下,应在试验前进行空炮测试检查,以确认压缩空气不会对发动机工作产生影响。

(4)在进行吞鸟试验之前,通过靶试对撞击点进行校准。靶板宜设计成环形靶,尺寸与发动机进气道相同,靶板中心与发动机轴线一致。靶板上对撞击部位有明显标记,靶试采用真实或模拟鸟体均可。

(5)采用高速相机拍摄鸟撞瞬间的影像,固定时间内帧数越多越理想,相应的拍摄时间也越短。试验中多次出现因摄像机开启过早或过晚而错过最佳拍摄时间的情况。在试验中摸索出鸟炮开启开关与摄像机开启开关同步的方式。

#### 4 结束语

近些年,中国航空工业得到飞速发展,新型发动机不断涌现,许多基础性试验得以加强,对吞鸟试验也开始重视。吞鸟对发动机而言,主要影响其强度和内部流场。在试验中,飞鸟首先会对发动机进口整流支板、导向叶片、压气机第1级叶片造成直接撞击。若这些部件掉块,则又会对后面的叶片和部件造成二次损伤,甚至会击穿机匣飞出发动机。同时,在发动机吞鸟时,进气截面面积减小,内部流场发生了变化,很可能造成发动机喘振。

作为发动机环境试验中最为重要的试验之一,开展发动机吞鸟试验有助于研究外界环境对发动机性能、强度以及整机安全性的影响,是发动机可靠性研究的重要手段。提高发动机吞鸟试验技术,必将促进发动机环境适应性试验水平的提高,更好地保证飞行中人员和财产的安全。

#### 参考文献:

- [1] 李卫东. 中国民航飞机鸟击事件统计分析与研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.  
LI Weidong. Statistical analysis and research on bird strike events of civil aviation aircraft in china [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)
- [2] 李玉龙, 石霄鹏. 民用飞机鸟撞研究现状[J]. 航空学报, 2012, 33(2): 189-198.  
LI Yulong, SHI Xiaopeng. Investigation of the present status of research on bird impating on commercial airplanes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2012, 33(2): 189-198. (in Chinese)
- [3] 张海洋, 蔚夺魁, 王相平, 等. 鸟撞击风扇转子叶片损伤模拟与试验研究[J]. 推进技术, 2015, 36(9): 1382-1388.  
ZHANG Haiyang, YU Duokui, WANG Xiangping, et al. Numerical and experimental investigation of damage of bird impact on fan blades[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(9): 1382-1388. (in Chinese)
- [4] 陈伟, 关玉璞, 高德平. 发动机叶片鸟撞击瞬态响应的数值模拟[J]. 航空学报, 2003, 24(6): 531-533.  
CHEN Wei, GUAN Yupu, GAO Deping. Numerical simulation of the transient response of blade due to bird impact[J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2003, 24(6): 531-533. (in Chinese)
- [5] 马力, 姜甲玉, 薛庆增. 航空发动机第1级风扇叶片鸟撞研究[J]. 航空发动机, 2014, 40(2): 65-69.  
MA Li, JIANG Jiayu, XUE Qingzeng. Research on bird Impact of aero-engine first stage fan [J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 65-69. (in Chinese)
- [6] 王长喜, 李明亮, 刘选民. 美、英航空发动机部分特种地面试验简介[J]. 航空发动机, 1998(3): 54-61.  
WANG Changxi, LI Mingliang, LIU Xuanmin. Introduction to some special ground tests of American and British aero engines[J]. Aeroengine, 1998(3): 54-61. (in Chinese)
- [7] 吴大观. 发动机吞鸟试验[J]. 航空标准化与质量, 1984(5): 29-31.  
WU Dagan. Bird ingestion test of engine[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 1984(5): 29-31. (in Chinese)
- [8] 程卫华, 杨士杰, 魏德明, 等. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范: GJB 241A-2010[S]. 北京: 空军装备研究院装备总体论证研究所, 2010: 1-132.  
CHENG Weihua, YANG Shijie, WEI Deming, et al. Engine, aircraft, turbojet and turbofan, general specification for: GJB241A-2010 [S]. Beijing: Air Force Equipment Research Institute. 2010: 1-132. (in Chinese)

- nese)
- [9] 易军,单晓明,何峻,等.航空涡轮螺旋桨和涡轮轴发动机通用规范: GJB 242-2018[S].北京:中国人民解放军陆航装备发展办公室, 2018.
- YI Jun, SHAN Xiaoming, HE Jun, et al. Engine, aircraft, turboprop and turboshaft, general specification for: GJB242-2018[S]. Beijing: PLA aviation equipment development office. 2018. (in Chinese)
- [10] 钱世光,葛治美,姜锡明,等.航空发动机吞鸟试验要求: GJB 3727-99 [S].北京:中国航空综合技术研究所, 1999: 1-7.
- QIAN Shiguang, GE Zhimei, JIANG Ximing, et al. Test of bird ingestion, aircraft engine, requirements for: GJB 3727-99[S]. Beijing: China Aviation Comprehensive Technology Research Institute, 1999: 1-7. (in Chinese)
- [11] 中国民用航空局.中国民用航空规章第33部—航空发动机适航规定:CCAR33[S].北京:中国民用航空局, 2012: 42-52.
- CAAC. CCAR33-airworthiness requirements for aircraft engine[S]. Beijing: CAAC, 2012: 42-52. (in Chinese)
- [12] 张永飞,贾宗芸,陈玮,等.某型涡轴发动机吞鸟试验及验证[J].航空发动机, 2017, 43(5): 62-68.
- ZHANG Yongfei, JIA Zongyun, CHEN Wei, et al. Bird ingestion test and verification of a turboshaft engine[J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 62-68. (in Chinese)
- [13] 葛治美,姜锡明.军用航空涡喷和涡扇发动机吞鸟试验[J].航空发动机, 1998(1): 32-38.
- GE Zhimei, JIANG Ximing. Bird impact test of military aviation turbojet and turbofan engines[J]. Aeroengine, 1998(1): 32-38. (in Chinese)
- [14] 晏祥斌,张琼,许多.军用涡扇发动机吞鸟适航符合性验证研究[J].燃气涡轮试验与研究, 2017, 30(4): 51-55.
- YAN Xiangbin, ZHANG Qiong, XU Duo. Airworthiness compliance verification of bird ingestion for military turbofan engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2017, 30(4): 51-55. (in Chinese)
- [15] 王欢,刘涛,吕凤斌.航空发动机吞鸟速度测量技术研究[J].工程与试验, 2015, 55(2): 42-45.
- WANG Huan, LIU Tao, LYU Fengbin. Research on technology for measuring bird ingestion velocity of engine[J]. Engineering & Test, 2015, 55(2): 42-45. (in Chinese)

(编辑:刘静)