



M5.5.3.9 发动机监控与维护

修订批准页:

1

版次	修订时间	编写/改版	修订说明	审核/时间	审批/时间
R0	2020.06.14	谈海军	新编课件	谈海军 2020.08.07	张玉 2020.08.11

目的与要求:

目的	通过本次课程的学习，掌握发动机监控，发动机运转与配平，典型发动机系统维护介绍
要求	<ol style="list-style-type: none">1. 发动机状态监控参数和作用2. 发动机振动与配平3. 发动机航线维护的主要内容、发动机勤务、发动机水洗4. 发动机无损检测和孔探检查5. 常见操作（干冷转、湿冷转、反推操作测试、点火测试）

课程安排:

序号	内容	等级	课时
1	发动机监控		1H
2	发动机运转与配平		1H
3	典型发动机系统维护介绍		4H

A faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background of the slide.

5.3.9.1 发动机监控

5.3.9.2 发动机运转与配平

5.3.9.3 典型发动机系统维护介绍



5.3.9.1 发动机监控

1.1 发动机状态监控

a 发动机状态监控定义

利用

- 发动机性能趋势监控
- 滑油消耗量监控
- 孔探检查
- 燃油滤和滑油滤检查
- 滑油磁性堵塞检查
- 以及对滑油金属含量分析



等手段对发动机的使用和维护状态进行监控

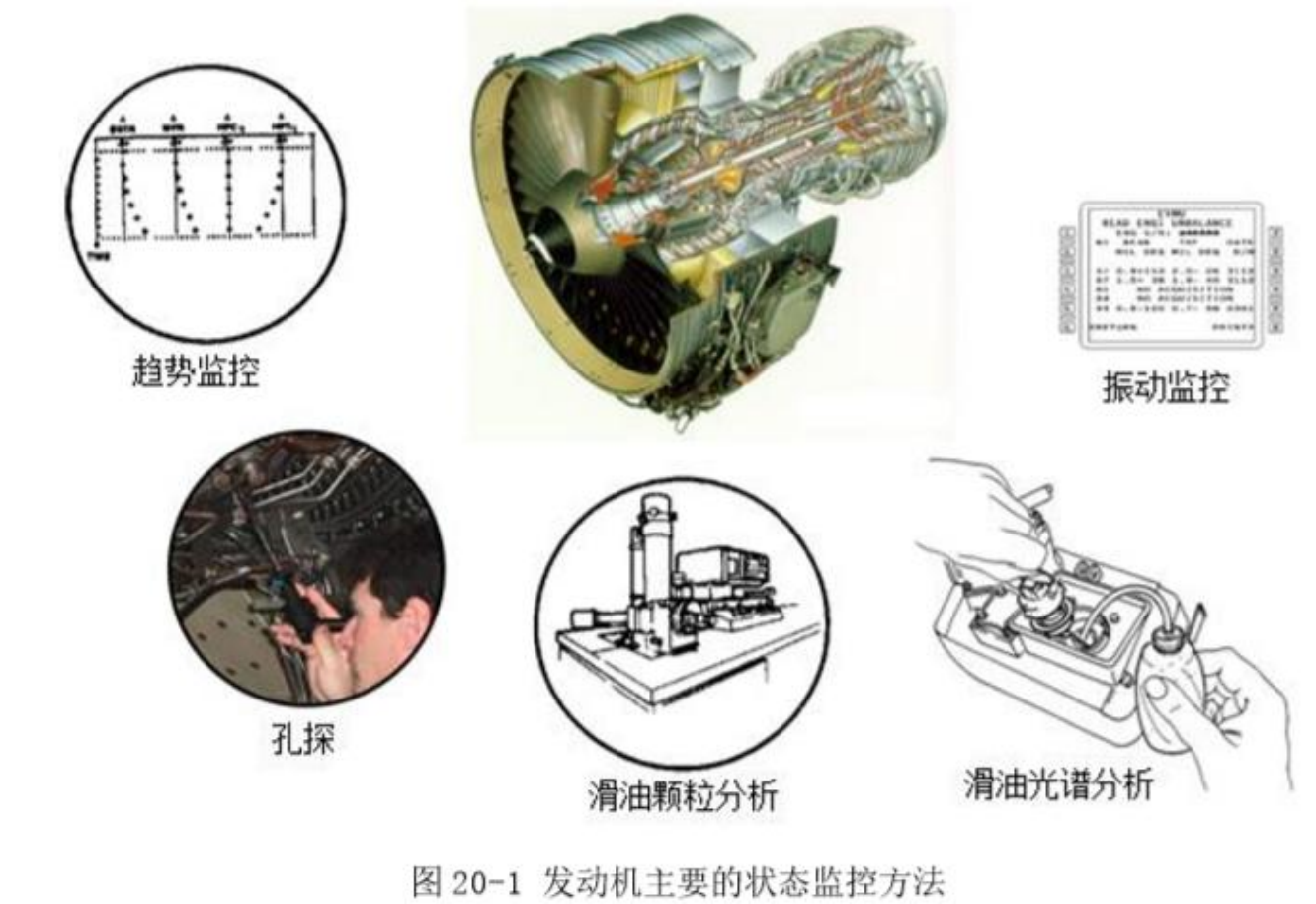


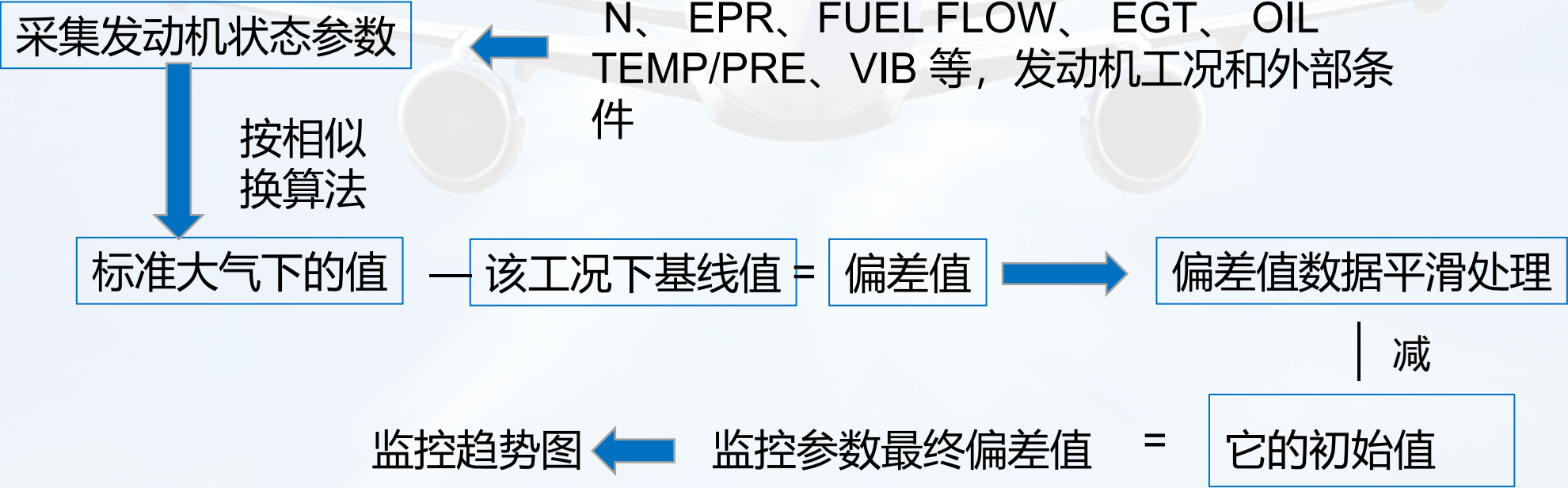
图 20-1 发动机主要的状态监控方法

b 发动机状态监控优点

实施工作，在一定程度上能够**预防或协助排除发动机故障**，从而保障发动机机队的**可靠性**

1.1 性能趋势监控:

a 性能趋势定义



b 性能趋势图分析内容

依据趋势图分析

- ◆ 最终偏差值与基线值比较，检查是否超限
- ◆ 参数的不同变化趋势推断原因，故障隔离提供重要参考
- ◆ 计算趋势的变化率，同飞机上的各台发动机趋势对比
- ◆ 借助参数变化趋势，对参数未来发展趋势预测

c 监控方法



航司采用两种监控方式并存模式，以远程监控为主，SAGE 等作为辅助或备份监控手段

发展方向 → 远程监控平台取代以单机软件为基础的监控方式

1.2 发动机磁堵检查

a 磨损危害

机械装置中的运转部件，接触表面相互运动的摩擦作用，必然会造成机件的磨损，运行时间的增长，磨损会加剧

磨损危害

造成轴承破损

传动轴断裂

导致转子卡滞

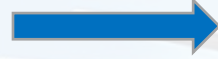
传动失效等严重故障

在一般运转机件的失效形式中，磨损失效占 80%以上。

b 监控方法

磨粒是监控磨损
的重要信息源

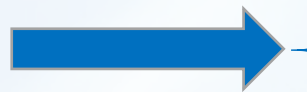
重要依据



- ◆ 表面的损伤机理
- ◆ 诊断磨损过程
- ◆ 诊断磨损类型

滑油本身及其所
携带的磨损微粒
的监测分析

作用



- ◆ 监控机械的磨损状态，预防磨损故障，提高机械工作的可靠性
- ◆ 机械的磨损故障诊断，确定严重程度和故障部位，制定方案

c 安装方式

颗粒尺寸 0.02~1mm

机械磁铁

规定间隔
检查磁堵

位置

积油槽回油管

回油泵下游的共享回油管

不需要额外的工具就
能将磁堵拿出来

电子式磁堵

优点

FADEC监视这两组磁铁间的阻抗

不需检查或拿出，除非FADEC给出
信息

滑油碎屑监视器

诱导测量技术
的传感器

根据颗粒尺寸和类型（磁性的或非磁性的）检测磨损颗粒计数和分类，判定滑油中颗粒物总数的趋势

FADEC 计算机或指定功能的计算机相连

d CFM56-7B

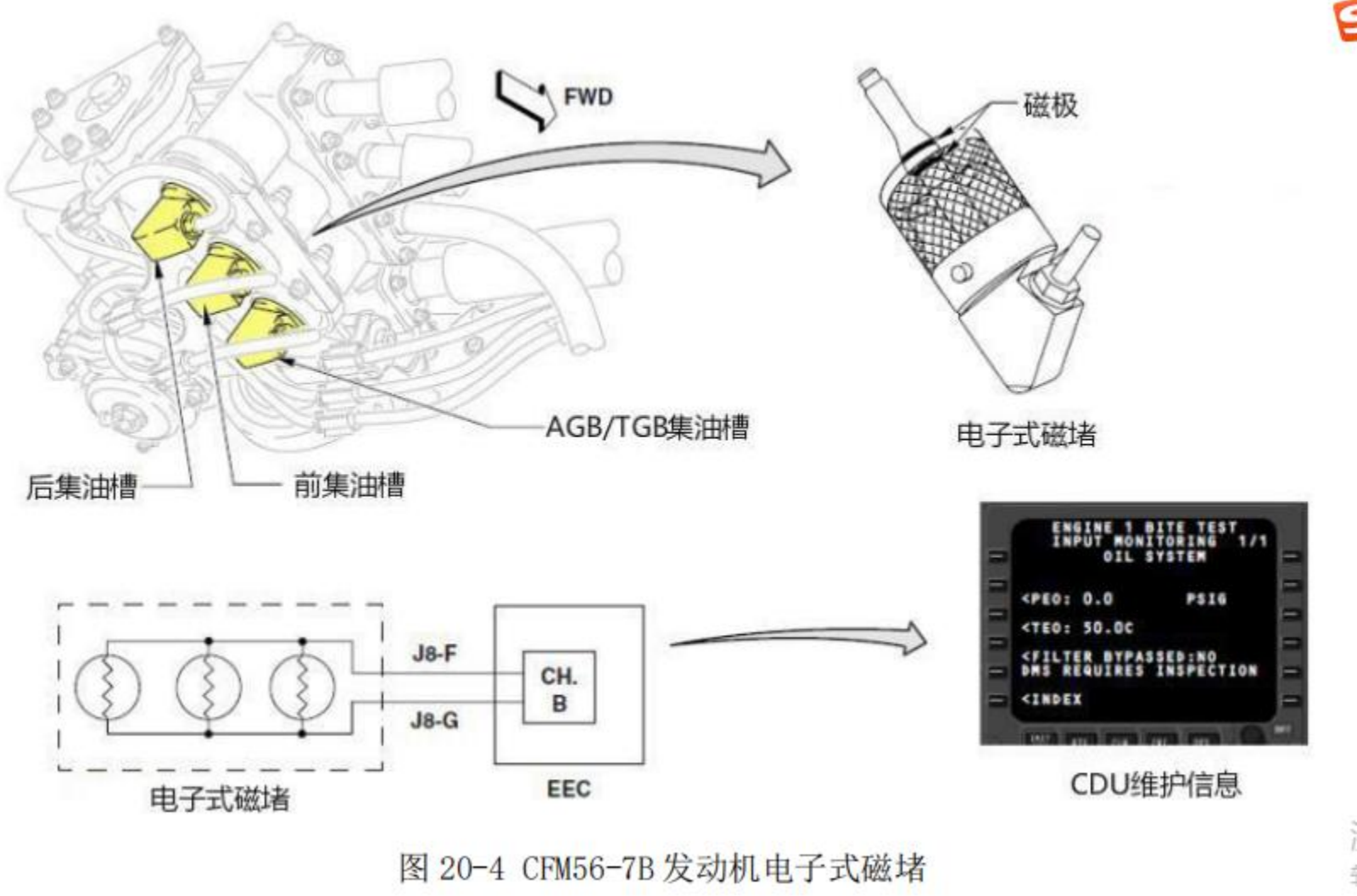


图 20-4 CFM56-7B 发动机电子式磁堵

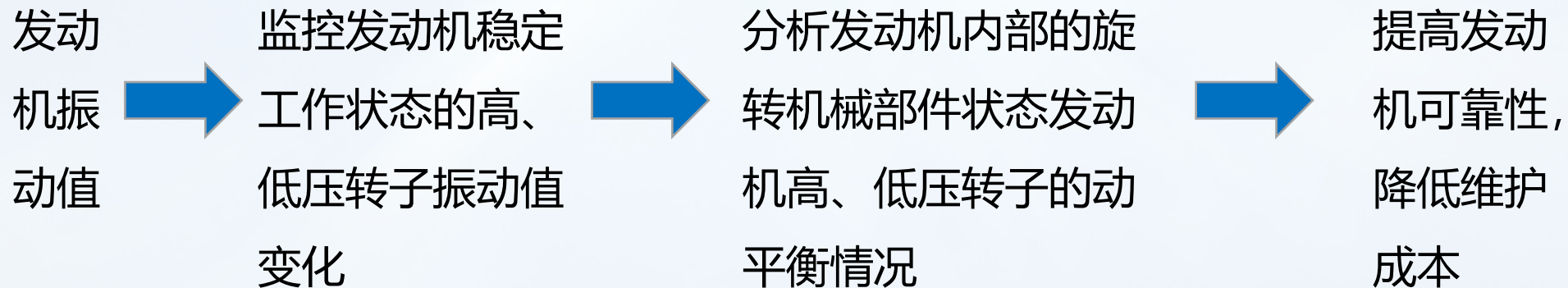
1.3 发动机振动监控

a 发动机振动监控特点


航空发动机的振动信号(如振动信号的幅值、频率和相位等)可直接反映其当前工作状态

航空发动机振动监控主要用于监视发动机旋转机械的工作状态

民用航空发动机振动的监控, 是保证安全的有效手段



b 主要方法

A faint, light-colored illustration of a commercial airplane is centered in the background. A blue bracket on the left side of the engine area points to the text "EVMU (发动机振动监测组件)" and "AVM (机载振动监测仪)".

振动监测装置

EVMU (发动机振动监测组件)
AVM (机载振动监测仪)

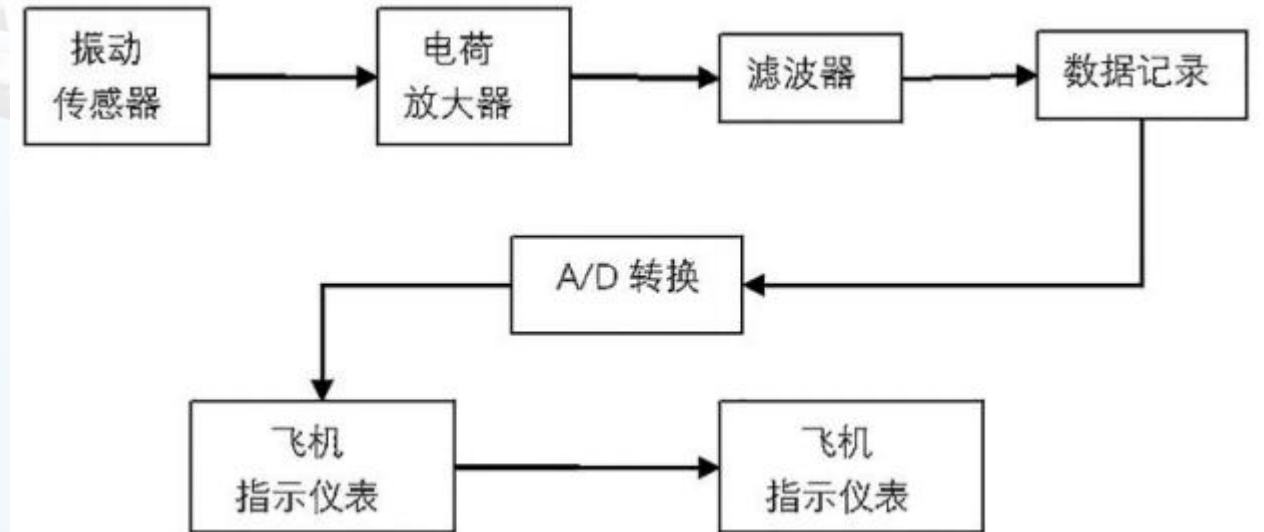
c 安装特点

- ◆ 振动监测装置通过加速度计监测振动情况
- ◆ 振源具有**稳定的激振力**，能准确反映发动机振动能量
- ◆ 测量振动的加速度计须靠近振源安装
- ◆ 加速度计安装发动机的安装点、转子支撑面、发动机机匣对接面等位置

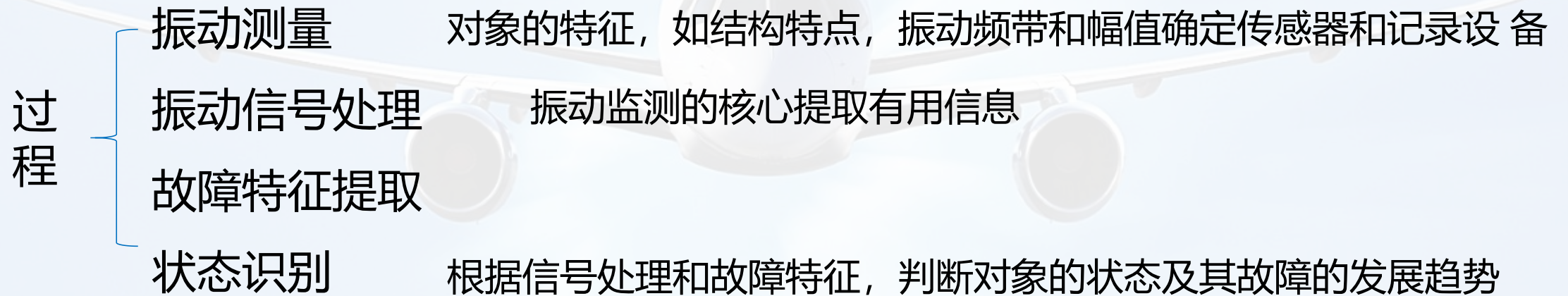
民用航空发动机为例，有两个加速度计，位于风扇机匣和轴承上，分别测量风扇机匣和轴承处的振动信息

d 振动原理

EVMU 内部的电荷放大器、滤波器、记录器、A/D 转换器、振动信号处理计算机计算后，输出给飞机显示器，为飞机驾驶舱实时提供发动机振动值显示



e 监测过程




信号处理和故障状态识别通过计算机软件实现

f 如何状态识别

- ◆ 振动总量反映发动机总的振动能量状况,
- ◆ 振动分量反映何种激振源及其激励大小

振源有不同
激振频率

- ◆ 转子质量不平衡会激起频率为转子工作转速的振动
- ◆ 不对中故障会激起较大的二阶振动
- ◆ 转子与静子碰摩会产生分频等频率丰富的振动

A faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background, showing the fuselage, wings, and engines.

5.3.9.2 发动机运转与配平

2.1 发动机地面运转

发动机地面运转： 启动、地面试车和冷转

试车原因

- ◆ 换发；
- ◆ 确认发动机故障；
- ◆ 检查飞机系统；
- ◆ 调整或部件更换后检验；
- ◆ 发动机闲置后检验发动机

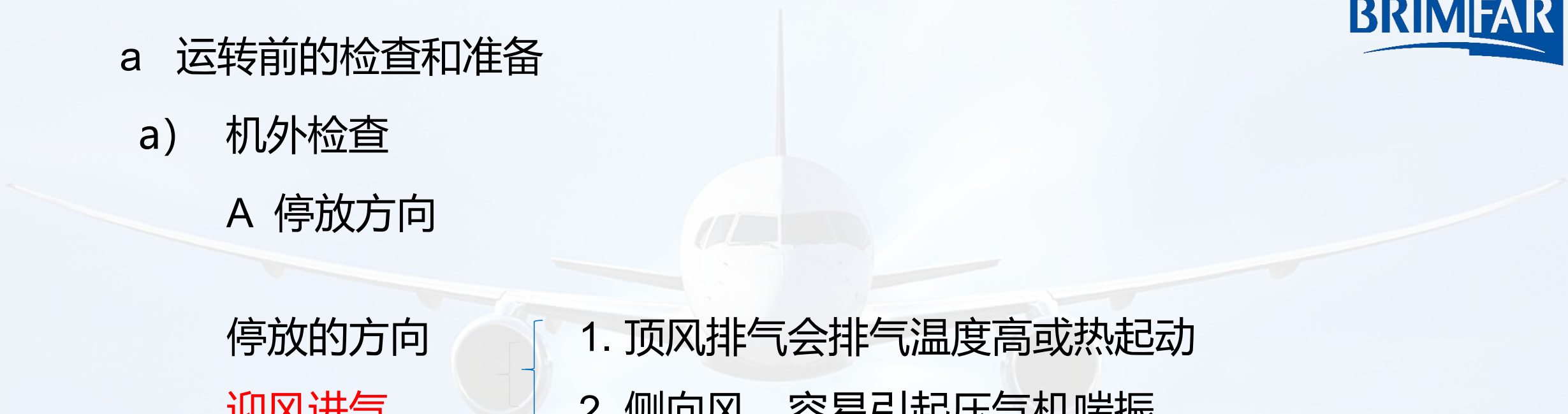
a 运转前的检查和准备

a) 机外检查

A 停放方向

停放的方向

迎风进气

- 
1. 顶风排气会排气温度高或热起动
 2. 侧向风, 容易引起压气机喘振

B 停放环境

避免吸入外来物而造成损伤

注意排气周围的环境，排气不但速度高而且温度也高，
不要对周围环境和物体造成损伤。

C 发动机的检查

- ◆ 进气道无异物,
- ◆ 风扇叶片无裂纹,
- ◆ 发动机无任何渗油痕迹,
- ◆ 发动机喷管内无异物,
- ◆ 发动机前方区域是否清洁



图 20-6 CFM56-5B 发动机地面运转时风速和风向的限制

b) 机内检查

有检查单

- ◆ 电源
- ◆ 点火电门
- ◆ 油门杆
- ◆ 燃油控制电门
- ◆ 液压泵控制电门
- ◆ 发动机引气控制

c) 准备工作

1. 轮挡
2. 熟悉控制面板和显示系统,
3. 供电、供液压
4. 调整驾驶舱灯光
5. 操作燃油和气源
6. 与地面人员的通讯
7. 防火系统测试

b 发动机地面运转注意事项

a) 起动机的工作时间限制

b) 发动机的工作限制

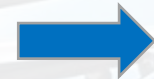
c) 危险区

a) 启动机的工作时间限制

启动机转速高,
负荷大



工作时间是有限制的



时间长短及连续
工作次数都有规
定

b) 发动机的工作限制



c) 危险区

- ◆ 进气道进口和排气管周围
- ◆ 功率越大，范围就越大
- ◆ 发动机运转，接近发动机的安全走廊
- ◆ 噪声

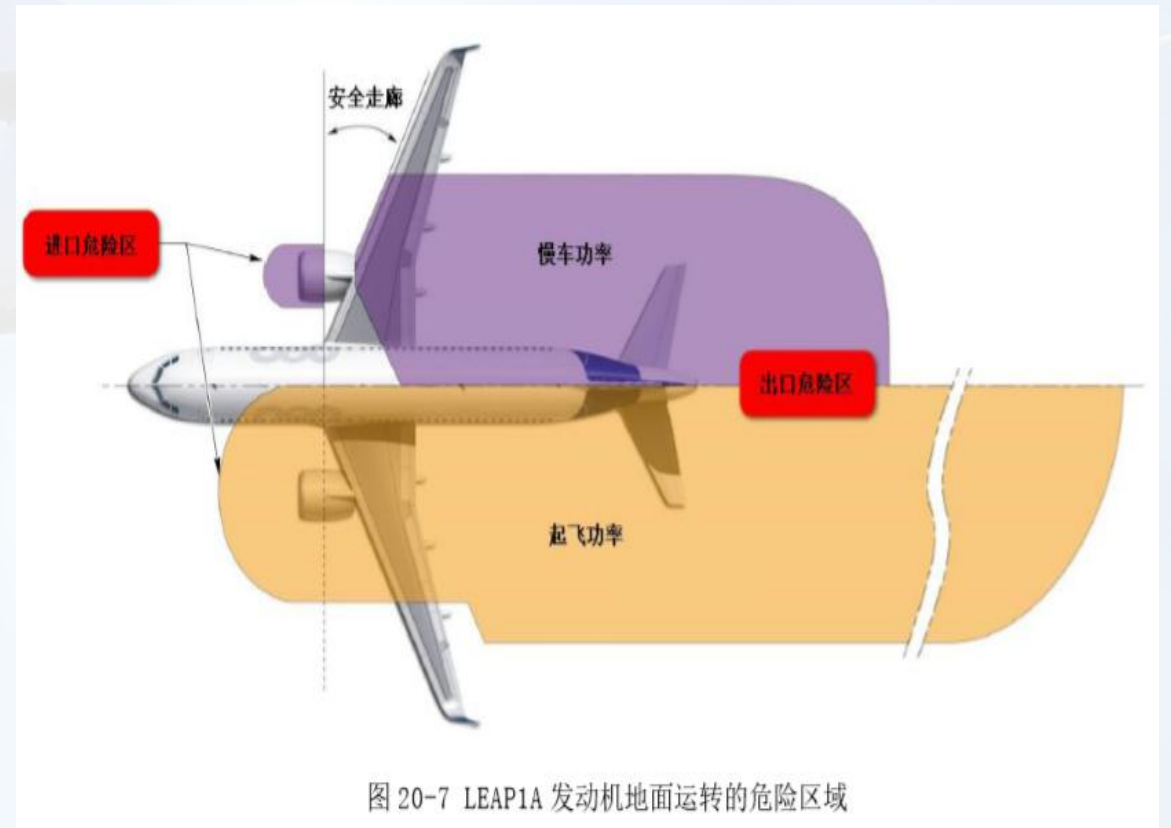


图 20-7 LEAP1A 发动机地面运转的危险区域

2.2发动机振动与配平

a 振动害处

部件移位、变形、变脏和磨损导致振动会随时间变化逐渐增大

害处

- ◆ 降低整机及部件的可靠性;
- ◆ 影响性能, 加速发动机衰退;
- ◆ 客舱中大噪音, 降低舒适性

b 配平优点

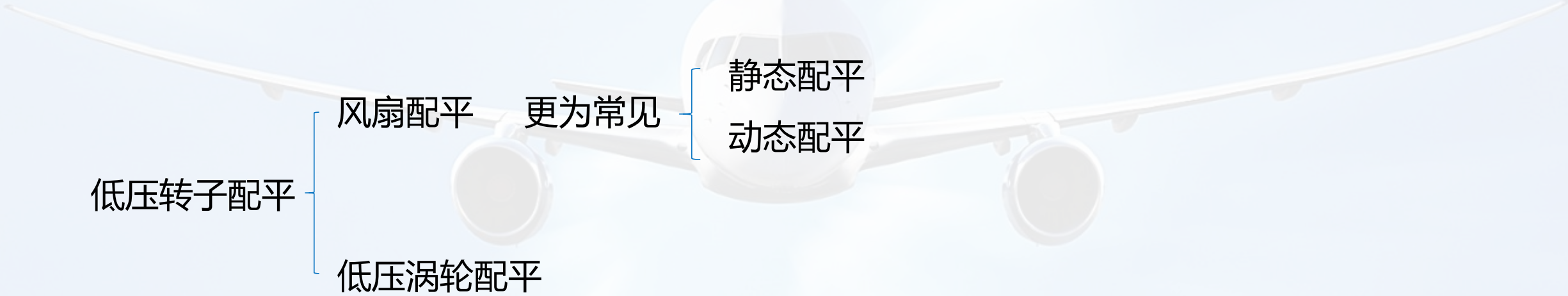
先确认不是结构损坏原因造成的高振动后再对发动机进行配平，

配平减震优点

- ◆ 提高发动机轴承可靠性
- ◆ 发动机使用经济性
- ◆ 增加发动机在翼时间
- ◆ 降低维护和大修成本
- ◆ 改善发动机安全性
- ◆ 飞机的乘坐舒适性

c 配平的方法

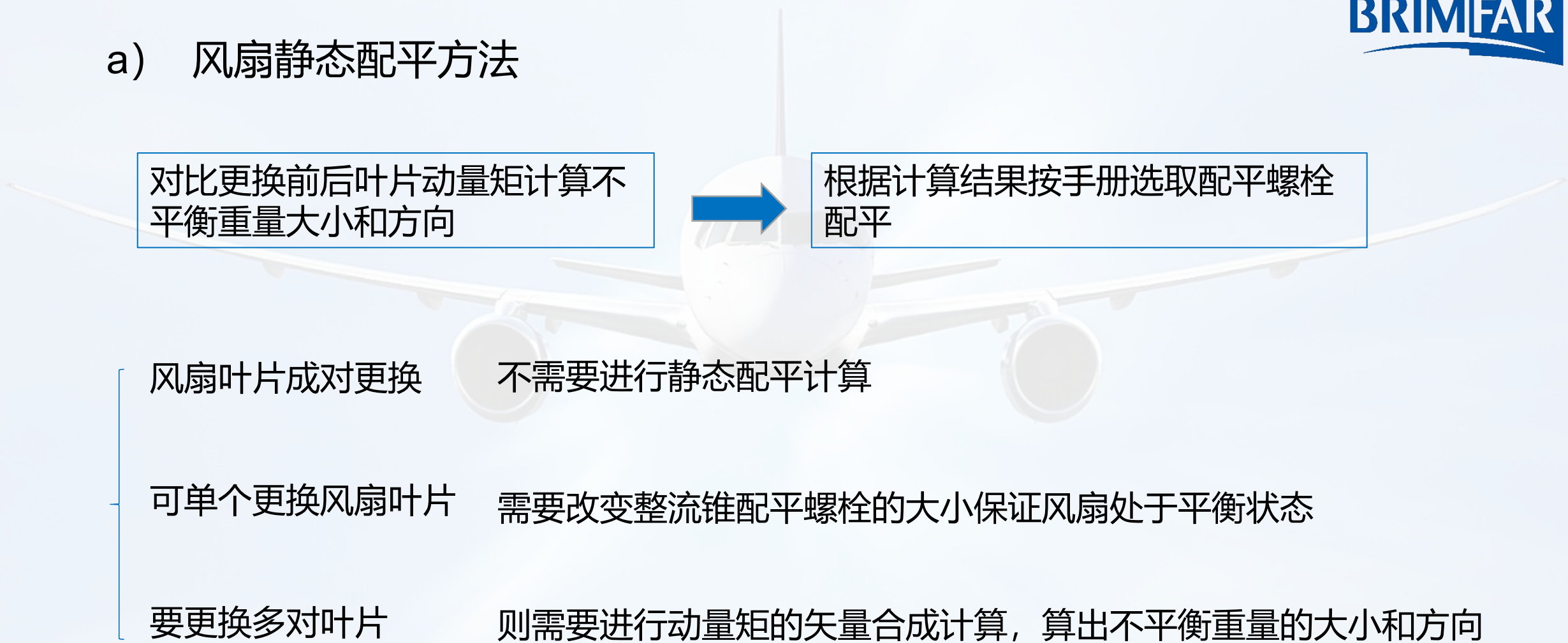
双转子发动机低压转子做配平，通过添加配重，高压转子振动超限，换发



- ◆ 重量重新布置,
- ◆ 增加配重 主要方法
- ◆ 去除重量

更换风扇叶片或其它部件造成不平衡时，先静态配平，有必要再动态配平

a) 风扇静态配平方法



对比更换前后叶片动量矩计算不平衡重量大小和方向

根据计算结果按手册选取配平螺栓配平

风扇叶片成对更换

不需要进行静态配平计算

可单个更换风扇叶片

需要改变整流锥配平螺栓的大小保证风扇处于平衡状态

要更换多对叶片

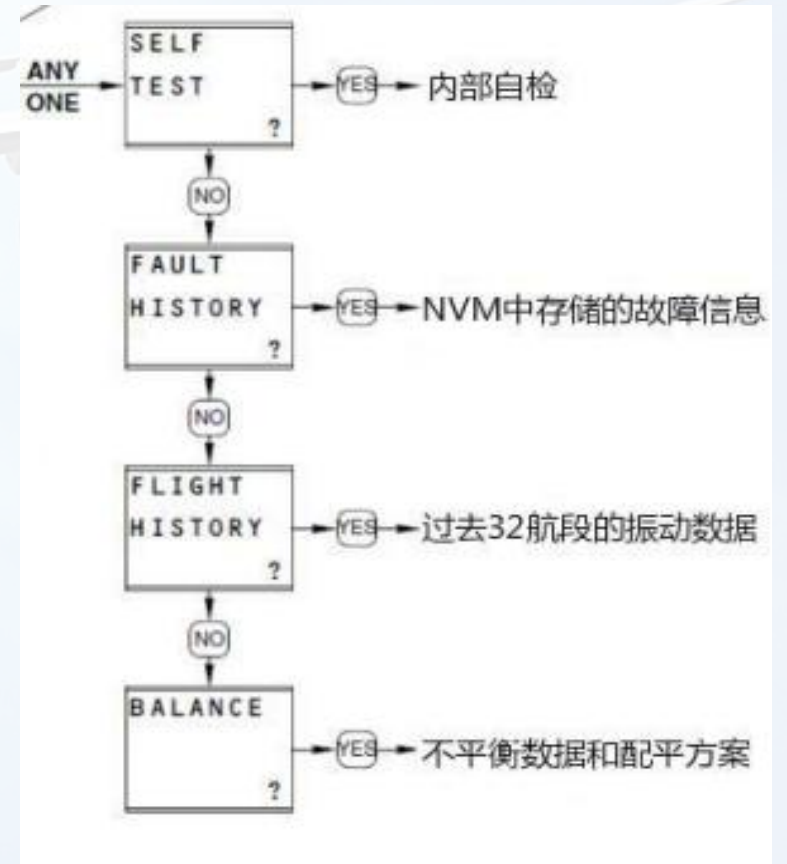
则需要进行动量矩的矢量合成计算，算出不平衡重量的大小和方向

b) 风扇动态配平方法

运转后，寻找配平重量大小和位置的过程被称为**风扇动态配平**

- ◆ CFM56-5B 一个配平面发动机前端；
- ◆ CFM56-7B/CFM56-3, 一个发动机前端，一个后端

- (1) (EVMU/AVM)进行配平；**简单**，
- (2) 三元配平法配平；**繁琐**
- (3) 专门的测试设备配平。



A faint, light-colored illustration of a twin-engine airplane is centered in the background of the slide.

5.3.9.3 典型发动机系统维护介绍

典型发动机系统维护介绍

在翼维护

- ◆ 航线维护
- ◆ 定期维护

大修

送回大修厂将发动机分解

在翼维护

- a. 定期维护
- b. 不定期维护

a 定期维护

定期维护是发动机厂家为了保证发动机安全、可靠地工作，制定的最基本的维护工作内容是按发动机的工作循环、工作小时数或日历时间来制定定期维护的时间

过站维护

航线维护

根据发动机管
理大纲的内容

发动机/动力装置外部目视检查;

系列功能/工作检查;

发动机孔探检查;

定期检查

更换某些部件

b 不定期维护

时间无关的事件所引起的维护

- ◆ 外来物损伤
- ◆ 飞机硬着陆后检查和维护修理
- ◆ 不正常现象如超转、超温等,
- ◆ 自检 (BITE) 设备给出的故障信息等,

3.1 发动机气路清洗

a 作用

延长在翼时间，降低油消耗的有效方法

沉积在叶片和气流通道中 →

- ◆ 影响压气机和风扇的效率
- ◆ 核心机的流通能力造成影响

- ◆ EGT 裕度
- ◆ 压气机喘振裕度
- ◆ 转子的转速裕度下降
- ◆ 油耗率高

外来物在压气机或涡轮转子和静子叶片以及机匣上的沉积累计造成性能退化

b 水洗过程

发动机气路清洗是恢复性能，延长发动机在翼时间，降低燃油消耗率的有效方法之一，它常被用在由于外来物在压气机或涡轮转子和静子叶片以及机匣上的沉积累计造成性能退化的发动机上

- ◆ 拆掉一些附件设备
- ◆ 断开发动机部分管路并封口
- ◆ 滑油系统加入防腐油
- ◆ 关闭飞机引气系统
- ◆ 恢复到正常的准备运转状态
- ◆ 试车烘干，打开飞机引气系统运转长时间

c 方法

- ◆ 清水清洗 一般用清水，清水有要求，水中颗粒物的含量、大小
- ◆ 清洗剂清洗 清洗剂类型取决于特定的发动机型号

d 清洗效果监控

一般以排气温度裕度 (EGTM) 恢复量来衡量清洗效果



清洗方法和清洗时间间隔取决于清洗的效果



信息反馈到发动机状态系统

关注 EGTM 的变化情况

3.2 发动机的拆卸和安装

a 安装布局

翼吊布局, 320 系列与 Boeing 737 系列

尾吊布局 商务客机 G550 MD90

翼下/尾吊布局, 例如 Lockheed 的 Tristar MD11

b 翼吊布局优缺点

客舱内的噪音较小,

飞机稳定性高,

减小飞机飞行时机翼根部的应力

机翼及机身的强度需求

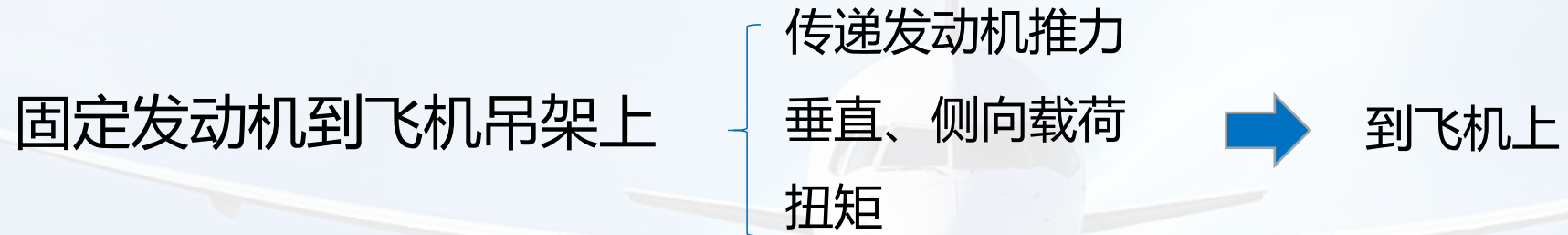
降低飞机的自身重量

增大飞行时的空气阻力

控制发动机的前后位置

控制距离机翼的高度

c 安装点连接



翼吊布局通过发动机的前后两个安装点悬挂在飞机吊架上，安装点在轴向载荷的框架上，如**风扇框架**、**涡轮框架**等。缩短推力路径，绝大部分发动机推力由前安装点传递，因此前安装点是直接安装在风扇框架上。

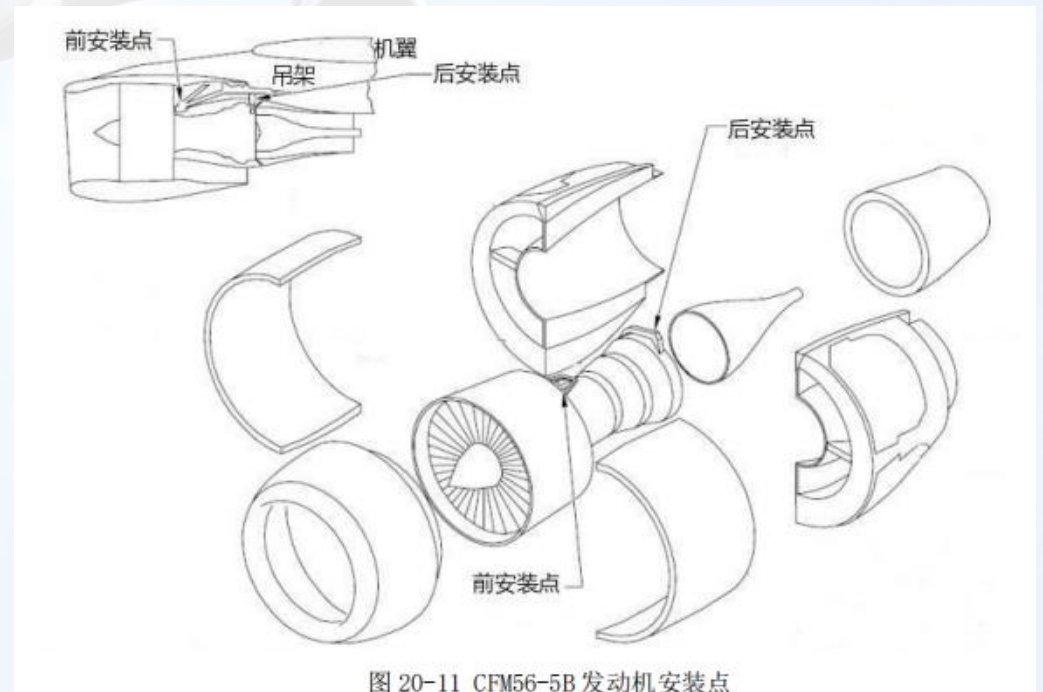
- a) CFM56-5B 发动机
- b) CFM56-7B

a) CFM56-5B 发动机

前后两个安装点

前安装点安装在风扇框架 → 缩短推力传递到吊架的路径

后吊点在涡轮框架



b) CFM56-7B

发动机的顶部没有足够的空间设计前安装点或发动机其他结构

两根推力杆将风扇框架的推力传递到后安装

发动机的推力通过后安装点传递到发动机吊架上

推力通过安装点传递到吊挂，安装点采用的是**失效-安全设计**。发动机安装点或推力传力构件是不允许完全失效的。

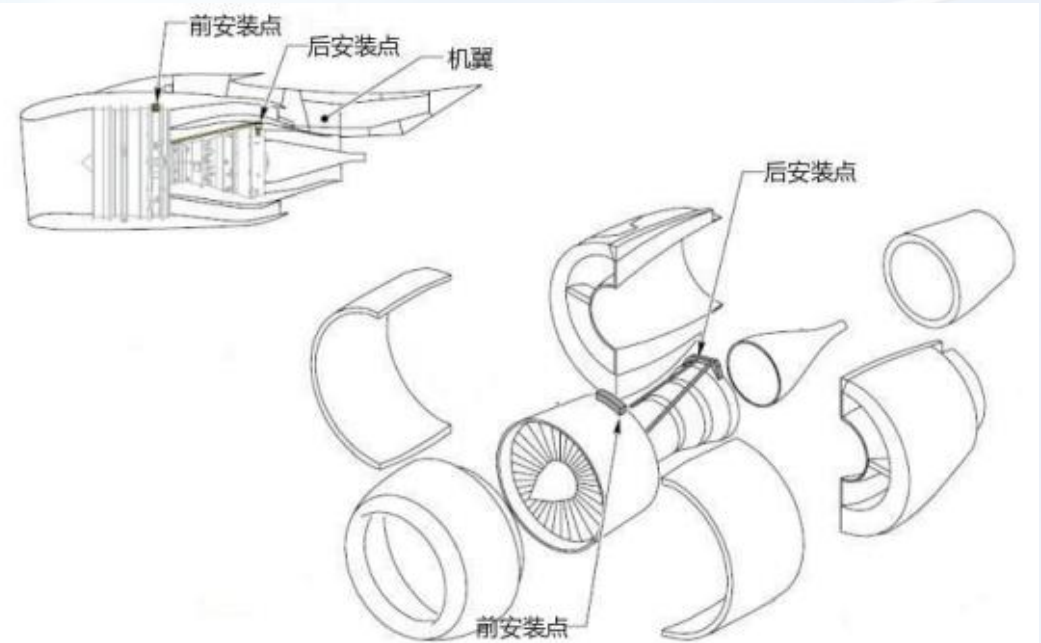
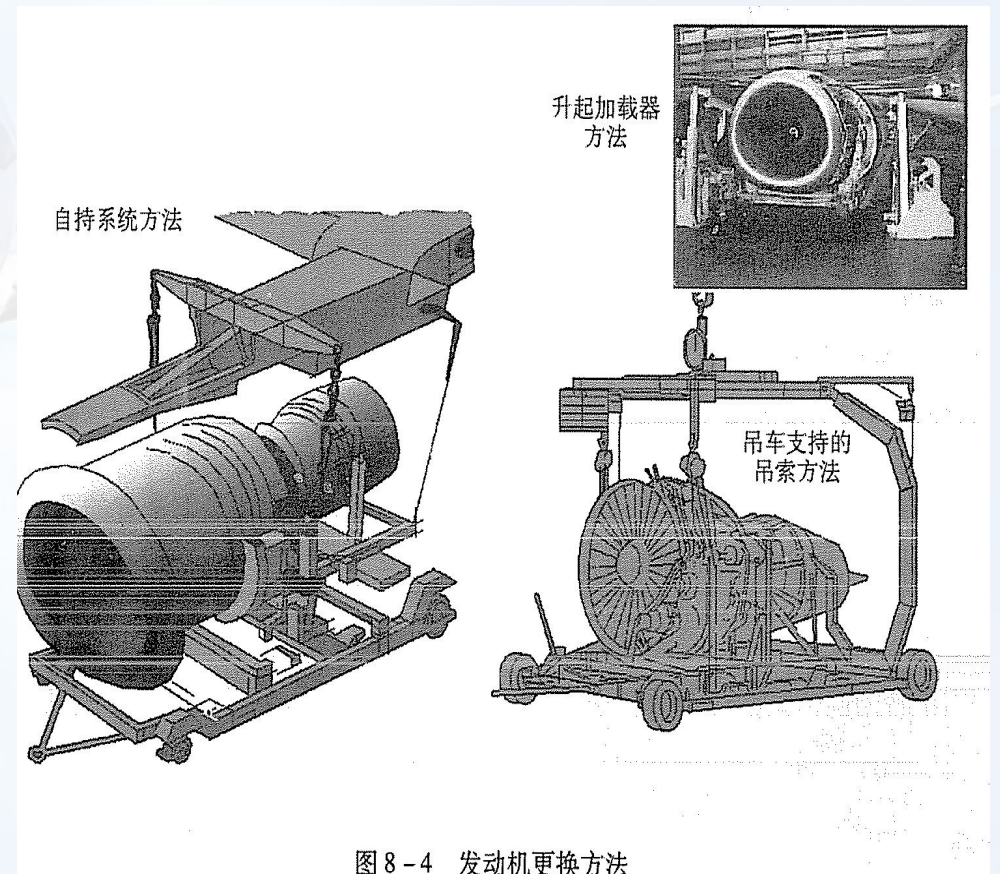


图 20-12 CFM56-7B 发动机安装点

d 发动机换发

- 发动机换发
- ◆ 自持系统方法
 - ◆ 吊车支持的吊索方法
 - ◆ 升起加载器

吊架组件处于水平状态,



e 发动机换发流程

停车至少 5 分钟，项目检查单完成，记录发动机小时和循环数



准备起吊装置和发动机托架，最大安全工作负荷必须大于被吊起的发动机重量。拆卸之前应将襟/缝翼放在合适的位置



安装前检查发动机铭牌，确信所安装的发动机是正确的



吊装中，吊架水平状态,不要前低后高，前、后钢索两侧之间的负载差



发动机安装完成后，需执行 ECU 功能测试，ECU 硬件和软件版本



进行启封，通过冷转完成 FADEC 操作测试，试车检查

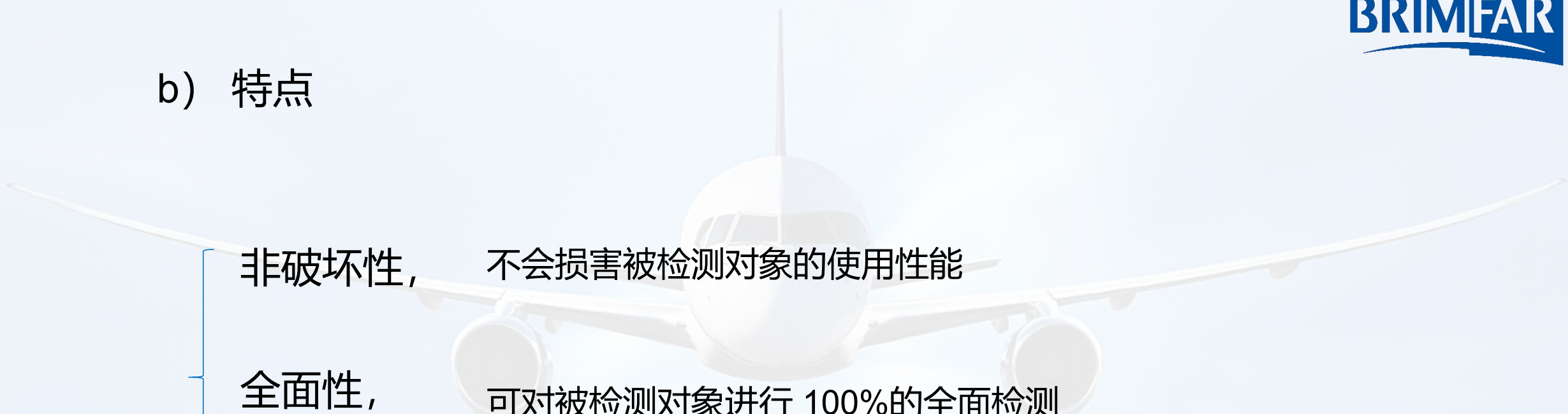
3.3 无损检测和孔探检查

a 无损检测

a) 概念

利用物质的声、光、磁和电等特性，在不损害或不影响被检测对象使用性能的前提下，检测被检对象中是否存在缺陷或不均匀性，给出缺陷大小，位置，性质和数量等信息

b) 特点

A faint, light-colored illustration of a commercial airplane is centered in the background of the slide.

非破坏性, 不会损害被检测对象的使用性能

全面性, 可对被检测对象进行 100%的全面检测

全程性, 不仅可对制造用原材料, 各中间工艺环节、直至最终产成品进行全程检测, 也可对服役中的设备进行检测

c) 方法

目视检测

射线照相检验

利用射线在介质中传播时的衰减特性，强度将会不均匀，检件表面或内部是否存在缺陷

超声检测

超声波在界面出的反射和折射以及超声波在介质中传播过程中的衰减，对缺陷进行定位、定性与定量

磁粉检测

缺陷与基体材料的磁特性不同，穿过基体的磁力线在缺陷处将产生弯曲并可能逸出基体表面，形成漏磁场

涡流检测

交变磁场产生涡流，受激励磁场（电流强度、频率）、导体的电导率和磁导率、缺陷（性质、大小、位置等）反作用于原激发磁场，阻抗等特性参数发生改变

A 射线检测

利用射线(X 射线、 γ 射线和中子射线)在介质中传播时的**衰减特性**，射线从被检件的一面注入时，缺陷与被检件基体材料对射线的衰减特性不同，透过被检件后的射线强度将会不均匀，用胶片照相、荧光屏直接观测等方法在其对面检测透过被检件后的射线强度，即可判断被**检件表面或内部是否存在缺陷**（异质点）

B 超声检测

超声波在界面（声阻抗不同的两种介质的结合面）出的反射和折射以及超声波在介质中传播过程中的衰减，由发射探头向被检件发射超声波，由接收探头接收从界面（缺陷或本底）处反射回来超声波（**反射法**）或透过被检件后的透射波（**透射法**），以此检测备件部件是否存在缺陷，并对缺陷进行**定位、定性与定量**

C 磁粉检测

由于缺陷与基体材料的**磁特性**（磁阻）不同穿过基体的磁力线在缺陷处将产生弯曲并可能逸出基体表面，**形成漏磁场**。若缺陷漏磁场的强度足以吸附磁性颗粒，则将在缺陷对应处形成尺寸比缺陷本身**更大、对比度也更高**的磁痕，从而**指示缺陷的存在**。

D 涡流检测

将交变磁场靠近导体（被检件）时，由于**电磁感应**在导体中将感生出密闭的环状电流，此即涡流。该涡流受激励磁场（电流强度、频率）、导体的电导率和磁导率、缺陷（性质、大小、位置等）等许多因素的影响，并反作用于原激发磁场，使其阻抗等特性参数发生改变，从而**指示缺陷的存在与否**

b 孔探检查

a) 概念

孔探检查（又称内窥镜检查）是常用的目视检查方法，其作用是借助工业内窥镜定期检及非定期（特殊情况，比如鸟击等）检测发动机内部部件工作状态，及时发现损伤缺陷，以评估发动机的整体性能和健康情况，为航空发动机的安全运行和维修工作提供可靠的技术依据

b) 孔探类别和各特点

- ◆ 刚性内窥镜（又称直杆镜）结构简单，成像质量好，使用方便
- ◆ 柔性内窥镜 提供高品质的图像，耐久性，探头本体可弯曲，有导向功能
- ◆ 视频内窥镜 连接VGA，图像清晰，色彩真实准确，360度导向

c) 孔探定期检查

每隔多久做一次孔探检查，根据损伤的**类型、大小**来判断发动机是否继续使用或继续使用多久。热端（如燃烧室、涡轮等）有定期孔探，而冷端部件通常没有。

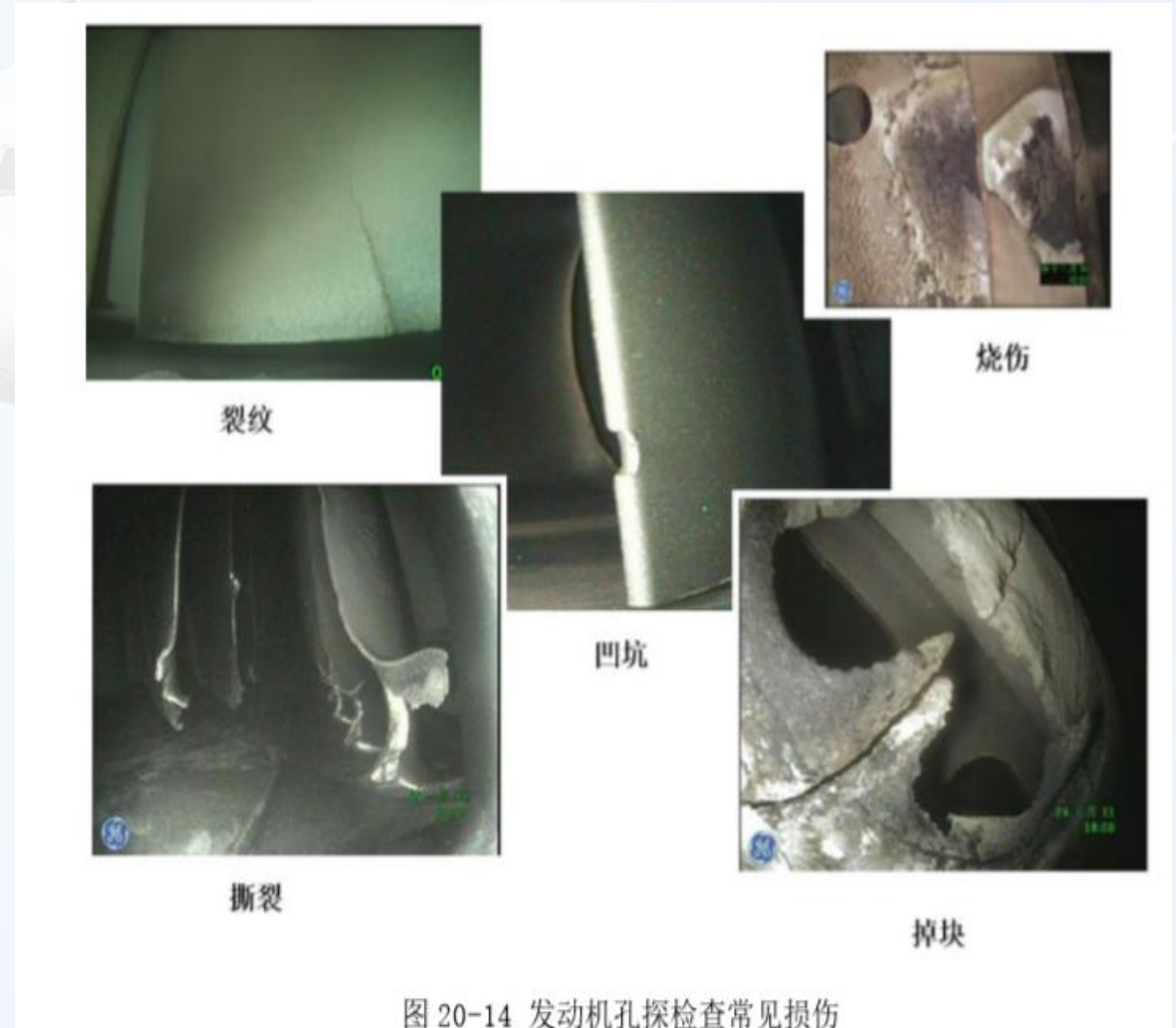
孔探检查结论

- ◆ 可以继续使用到下次时间再做检查
- ◆ 延长或缩短孔探检查的时间间隔
- ◆ 发动机可允许工作多久就需要换发
- ◆ 即刻换发

d) 孔探检查损伤

关键是损伤和损伤所在区域，
以及损伤的大小，对照手册做出
判断

- ◆ 第一点是损伤的定义，缺失，
裂纹，凹坑等
- ◆ 第二点就是判断损伤大小。



e) 不定期孔探

发动机出现事故后，一般也做孔探检查，即不定期孔探检查，如发动机在喘振、超转、超温以及外来物进入发动机等以后，因为这些事故均有可能造成发动机内部损伤

3.4 发动机干冷转和湿冷转

发动机冷转是指不点燃发动机内的油气混合气，由起动机带动发动机转子转动的过程。在整个冷转过程中，点火系统被切断，发动机不作为热机转动，燃烧室处于“冷状态”

{ 干冷转
湿冷转

干或湿冷转时**可以打开**风扇整流罩和反推整流罩

a 发动机干冷转

冷转过程中不向燃烧室输送燃油

作用

- 冷却发动机
- 吹去燃烧室积油
- 确认发动机转子能够正常地转动
- 确认起动机和起动空气活门能够正常工作
- 确认发动机的最大冷转转速以确保后续的发动机起动

b 湿冷转

是在 N2 至少达到 20%时短时间向燃烧室输送燃油

主要用于发动机燃油系统油封以后的解封

c 干或湿冷转注意

排气尾锥有**滑油污迹**是正常

转子主轴承采用篦齿封严收油池的发动机来说，如 CFM56，去收油池润滑发动机主轴承的滑油需要从内涵气流引气到收油池夹层增压封严。

干或湿冷转时转速低，收油池夹层增压空气压力低，特别是后收油池。后收油池夹层中的增压空气压力不足以封严滑油，滑油会从油封严泄漏到夹层中。而夹层底部有余油管路，泄漏的滑油会沿着该余油管路流到排气尾锥中。

3.5 点火测试和反推测试

发动机测试是地面检查发动机性能和工作情况的**重要方法**。常见的测试项目包括有**点火测试、反推测试和 FADEC 测试**等。对于这些测试，当前 FADEC 控制的发动机可以通过座舱中的人机界面，如 CDU（控制和显示组件）或 MCDU（多功能控制和显示组件），向 FADEC 计算机输入指令，然后由 FADEC 计算机自动控制下完成，并能在完成后给出相应的测试结果。

a 点火测试

点火测试的目的是为了保证发动机点火系统能够正常点火

内容包括 A 点火电嘴点火 10 秒，间隔 2 秒后，再 B 点火电嘴点火 10 秒

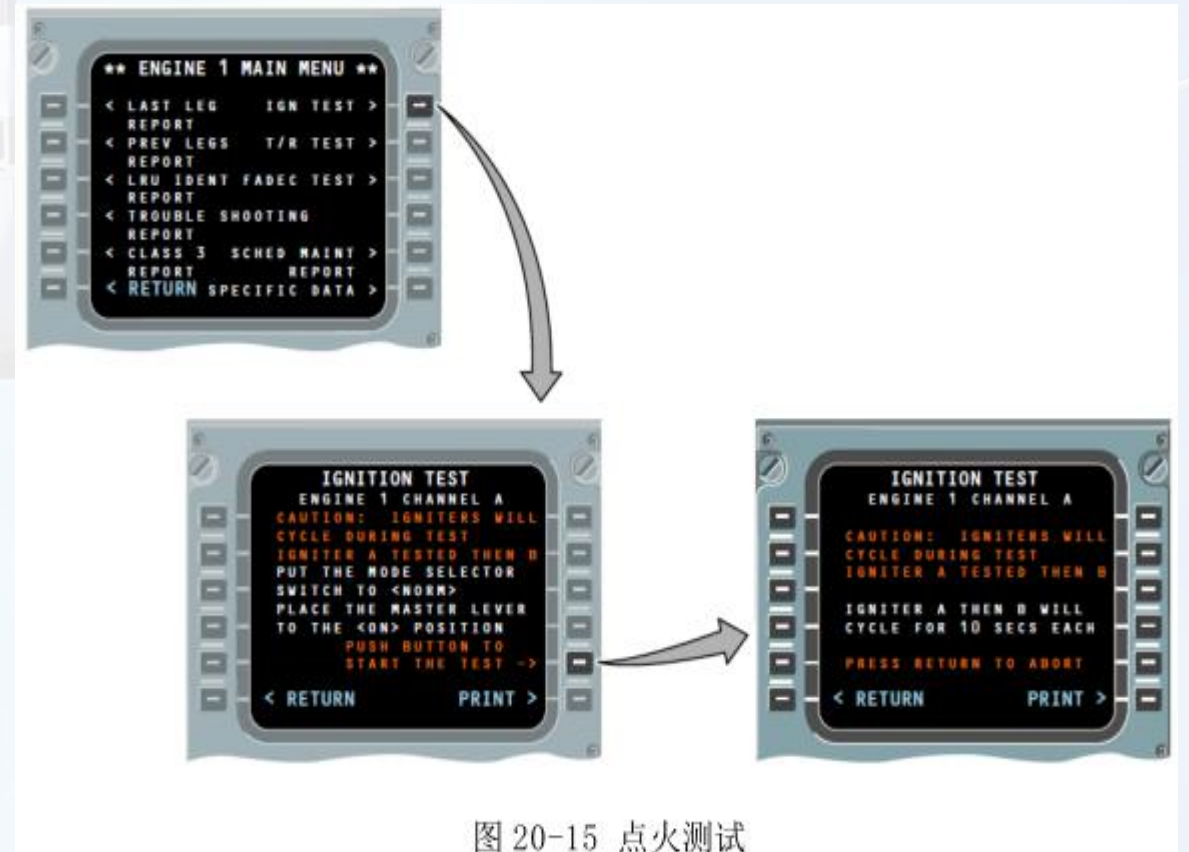


图 20-15 点火测试

b 反推测试

确保反推能够正常展开和收起

- ◆ 确认反推系统提供液压
- ◆ 操纵油门杆移到反推和正推位置，
- ◆ 反推将在 FADEC 计算机的控制之下展开和收起

故障信息

- 反推位置开关故障
- 增压和方向活门电磁阀故障
- 飞机抑制开关故障
- 增压活门位置故障

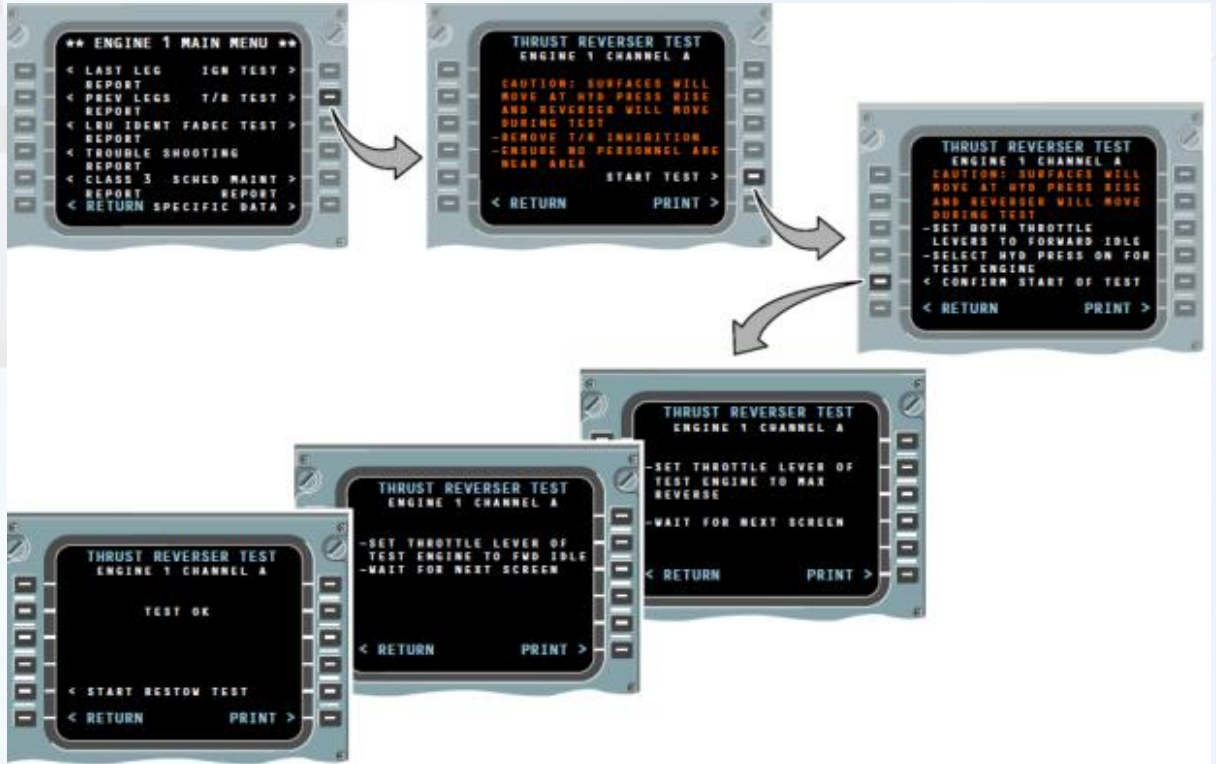


图 20-16 反推测试

通过本次课程的学习，掌握发动机监控，发动机运转与配平，典型发动机系统维护介绍

1. 发动机状态监控参数和作用
2. 发动机振动与配平
3. 发动机航线维护的主要内容、发动机勤务、发动机水洗
4. 发动机无损检测和孔探检查
5. 常见操作（干冷转、湿冷转、反推操作测试、点火测试）



感谢聆听，欢迎指正