

## 罗·罗 RB211 燃气发生器

### 概述 (参考图纸位于本节后面)

双 (2) 转子高压比发动机 - 20 比 1

- 7 级 中压 (中压压气机) N1 参考速度
- 6 级高压 (高压压气机) N2 参考速度
- 在不带有 DLE 的 RB211-24G 上, 装有环形燃烧室, 共有 18 个燃料喷嘴
- 在 RB211-24G DLE 装置上有 9 个燃烧室, 每个上面分配有预定的燃料百分比。

### 基本工作原理和结构 :

推动发动机的燃料被输送到燃烧室, 空气和燃料的燃烧所形成的膨胀推动两个独立的单级涡轮。涡轮通过共轴线传动轴 (一个轴通过另外一个轴的空心转子运转) 与轴流式空气压气机相连接。燃气发生器的两个转子在机械方面是独立的, 以其自身的最佳速度运转, 使中压压气机能够根据需要在燃气轮机装置 (燃气发生器和动力涡轮) 的负荷比较大的情况下, 为燃烧提供更多的压缩空气能量, 从而使装置在运行中尽可能地具有响应性和有效性。

整个的燃气发生器是由 5 个预先平衡的模块组成的组件, 每一模块均可作为独立的装置拆卸 :

- |           |       |
|-----------|-------|
| - 进气模块    | 模块 01 |
| - 中压压气机模块 | 模块 02 |
| - 中机匣模块   | 模块 03 |
| - 高压系统模块  | 模块 04 |
| - 中压涡轮模块  | 模块 05 |

注: “中压”是根据航空发动机术语保留下来的一个词汇。在航空发动机上使用的低压‘风扇’已从发动机的工业应用中取消。

对模块进行预先平衡能够实现完全的互换性, 使主要的部件能够在现场进行更换, 从而缩短了停机时间。

## 它是如何工作的？

燃气轮机的工作周期非常简单。它不像往复式内燃发动机那样利用部件活动的往复运动，因为燃气轮机的燃烧是在体积增加和压力比恒定的情况下发生的，从而避免了在活塞式发动机燃烧时内部压力上升到最高点的情况。因此，可以使用厚度薄、重量轻的材料制造燃烧系统和发动机的很多其它部件。

燃气轮机和活塞发动机都有产生功的四个周期因素。这四个因素是进气、压缩、燃烧和排气。在活塞发动机上，全部四个因素对于每一活塞和燃料分配都是共同的。在燃气轮机上，产生功的每一因素是分开的，但却是连续的。这种情况被称作连续周期。由于没有部件的往复运动和它们在运动中产生的力，所以燃气轮机相比之下，振动低，并能在给定的发动机尺寸和重量的情况下释放出更多的能量。

在燃气发生器的工作周期，气流，或称“工作流体”接收和释放热量，从而产生压力、体积和温度的变化。这是由波义耳和查理提出的物理定律，现简述如下：

*在工作周期的不同阶段，压力的生成和空气的体积与空气在那些阶段的绝对温度成比例。不管使用什么样的手段改变空气状态，这种关系都适用。*

例如，不管是通过燃烧加温，还是通过压缩加温，或者随后被涡轮提取来驱动压气机，热量的变化都直接与在燃气轮机中混合和燃烧的空气和燃气的功的增加或被带走成比例。

在燃气轮机的工作周期中有三个主要条件能引发上述变化：

在压缩过程中对空气做功。它增加空气的压力和温度，减小空气的体积。

在燃烧过程中向空气喷注燃料。它增加空气的温度和体积，而压力几乎保持恒定。

在膨胀过程中，功被涡轮从燃气流中提走来驱动燃气发生器的压气机。它减小压力，增加体积，因此温度下降。

通过燃气轮机的空气温度和压力的变化可以通过下图进行说明：

图表参见英文版

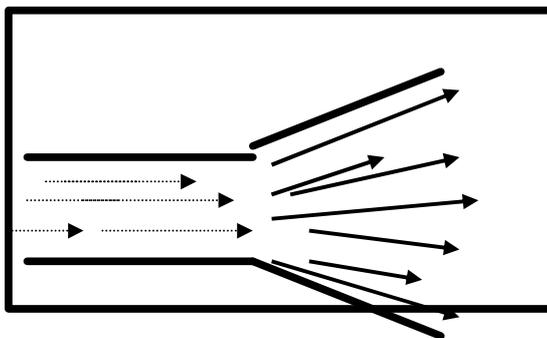
[图表仅用于培训目的]

## 温度、压力和速度图

当空气通过燃气涡轮时，设计需求要求压力和速度变化。例如，在压缩阶段，要求压力升高，但是不要求速度提高。当空气被加热，并且其能量通过燃烧增加后，则要求提高速度，以使涡轮转动。另外还需要实现局部减速，例如在燃烧室中，有必要形成一个低速区，来稳定燃烧。

当需要将速度（动）能转换成压力能时，通道呈喇叭形。

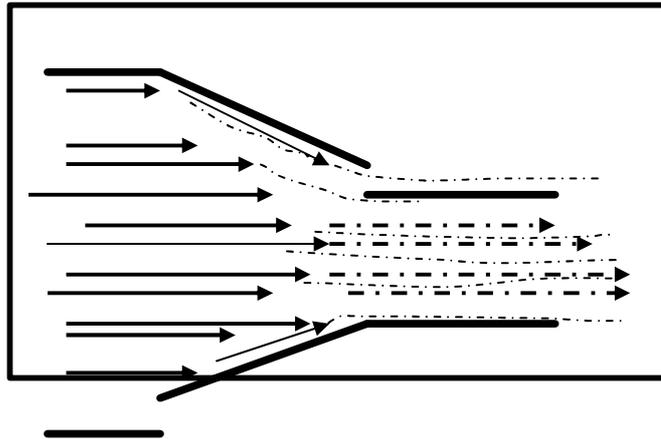
- 速度下降
- 压力增加
- 温度提高



**扩散：速度（动）能转换成压力能**

当需要将燃烧气体的能量转换成速度（动）能时，使用收敛或喷嘴通道。

- 速度提高
- 压力降低
- 温度降低



收敛：压力能转换成速度（动）能。

## 进气模块

材料：整块铝合金铸造

在燃气发生器的玻璃纤维钟形口和头部整流罩与 01 模块连接时，进气直接被导向中压压气机。进气模块还为燃气发生器的前滚柱轴承提供轴承座，为单级实心的可变进气导向片（VIGV）和用来操作活动导向片的液压动作筒提供腔室。进气模块的内外壁由六（6）个径向支柱以同心的方式进行支撑，并按照顺时针的方向进行编号（从从燃气发生器的后部观看），1 号支柱位于模块的中心上部。

另外，这些支柱还钻有小孔，用作其它用途，具体用途如下：

支板 #1 和 #2:

用来输送外管提供的 HP3 空气，为推力减少活塞前面的腔室增压。

支板 #3:

用来向中压压气机的前滚柱轴承输送润滑和“挤压”膜滑油。

支板 #4:

在下部钻孔，使前轴承腔的滑油回到外部导管。

支板 #5:

钻孔是为了穿过中压 (N1) 压气机的三个速度传感器的电缆。

支板 #6:

钻孔用作前轴承腔的通气孔，它通过一个外部导管与一个共同的通气罩连接。

**可调进气导向叶片：**

在进气机匣的后部装有一级 34 个实心的可调进气导向叶片 (VIGV)。导向叶片的位置 通过液压动作筒的控制沿着垂直平面改变。在这一过程中，液压动作筒还需要与燃气轮机的起动和连续操作指令相结合，以便使压气机提供正确的空气流量。用于与负载相关的燃烧和功率要求。34 个导向叶片的可变角度通过三 (3) 个从动液压动作筒进行调整。动作筒上装有 LVDT (线性可变差动变压器) 反馈装置，它对燃气发生器的中压速度的变化作出响应，该速度根据进气温度 (T10 或 T1 标记基准) 进行修正。动作筒圆环的线性行程和 VIGV 的角度变化在低速位置由一个机械挡块进行限动，在高速位置由动作筒的行程限制器的最大范围进行限动。先前在 RB211-24C 燃气发生器上，在装置的中央上方有一个导向叶片操作臂用作延伸杆，它与放气控制阀/活门 (通气活门) 柱接触，以此方法来实现压气机放气活门的工作和与 N1 速度相关的进气导向片的运动和几何形状之间的同步。这种方法没有在 RB211-24G 或者 RB211-24G DLE 燃气发生器上使用。

这种控制是通过 EMS (发动机管理系统) 使用非量纲速度计算完成的。在计算中，N1 除以测定的进气温度 (T1) 的平方根。该温度控制一个电磁通气活门，使得机械放气控制活门失去作用，因此它被拆除。

$$N1/\sqrt{T1}$$

**推力减少**

推力减少系统是为减少位于 03 模块内的中压定位轴承的向前负荷而提供的一种手段，它是使用 HP3 空气通过管路施加一个相反的力来实现的。空气从第三级高压压气机提取，用来撞击安装在中压压气机转子上的推力“活塞”。推力活塞机匣和内外密封圈限制空气撞击旋转活塞的前 (进气) 端，向中压转子施加一个相反的力和向后的负荷。在工作中，施加的压力随着燃气发生器的速度而增大，并抵消中压定位轴承渐增的向前负荷。

在设计上，有意将一部分空气通过推力减少系统的密封圈渗漏出去，并通过机匣法兰盘上的槽流向头部整流罩。因为这部分空气是热的，它流经整流罩表面的小孔，因此在工作中能有效地防止整流罩结冰。这一部分空气最终加入到进入中压压气机的空气中。

## **N1 速度信号**

三个速度传感器装在止推柱塞机匣上。这些传感器检测 27 齿通道，它位于生成 N1 速度信号的旋转柱塞的前缘

## **中压 IP 压气机模块 (02)**

轴流式中压压气机包括一个焊接鼓桶，上面装有七级叶片，由单级中压涡轮带动。转子装在一个铝转子机匣内。该机匣沿着其水平中心线一分为二，允许拆卸机匣的一半，以便检查压气机的叶片。第一级静子导向片和叶片具有低展弦比，有利于应对撞击。

## **中介机匣模块 (03)**

中机匣由铝合金铸造而成。它内装有中压压气机的出口导向片，并为中压和高压转子系统的推力轴承组件和起动机的传动齿轮提供安装座。所采用的轴承布局排除了安装轴间轴承的必要性。

## **高压系统模块 (04)**

六级轴流高压压气机组件由单级高压涡轮驱动。涡轮叶片使用空气冷却，以便实现降低金属温度和提高叶片寿命。压气机鼓桶是一个焊接和用螺栓固定的组件。压气机机匣是由六个用螺栓固定的园环和五级静子导向片构成的组件。导向片的内叶根位于开口箍环上。

短轴安装在第三级轮盘毂的前面，由压气机定位轴承支撑。第六级轮盘后面的延伸部分与高压涡轮盘前面的延伸部分相连接，为压气机提供传动。

燃烧部分包括由同心空气机匣支撑的环形火焰筒组件。机匣将压气机提供的空气导向燃烧室。整个的燃烧室组件被安装在一个外机匣内，它为 18 个火焰筒提供定位。双机匣布局生成的表面金属温度比较低。

## 中压涡轮模块 (05)

涡轮机匣内装有中压涡轮喷管导向叶片和中压和高压滚柱轴承支撑组件。中压涡轮转子通过一个穿过高压系统的轴与中压压气机相连接。

### 具体描述

#### 压气机

中压和高压部分被安排在独立的共轴线传动轴上。每一部分由一个单级涡轮驱动。两个轴均被监控，并且通过控制中压轴的速度来保持所需要的功率。高压轴的速度随着负荷和燃油控制而变化。这种安排使每个转子都能在其最佳的速度上运行。

中压压气机包括七级轮盘，用电子束焊接到鼓桶结构上。钛制叶片的使用大大提高了抗锈蚀能力。

高压压气机是六级，包括两个电子束焊接的鼓桶，它们用螺栓固定在第三级轮盘上。叶片用抗腐蚀合金制成，或者涂有涂层，能够在工作温度下提供最大的抗腐蚀能力。

中压和 高压压气机组件通过曲面闭齿结构被分别连接到各自的传动轴上，以便进行模块式的安装和拆卸。

## 放气阀/活门

放气活门安装在中压压气机的后面和高压压气机的中心级，在低速时自动运行，通过将多余的空气排放到大气的方式，向前级提供所需要的流量。放气阀/活门是气动操作，不是渐进型的。

## 轴承

有五个主要的滚珠和棍棒式轴承（中压转子有 3 个轴承；高压转子有 2 个轴承）

每一传动轴由一个位于中机匣的双座圈深嵌的滚珠轴承或者定位轴承支撑。没有轴间轴承。

挤压膜技术被应用到所有的主要轴径轴承上。在轴承外轨道和轴承座之间的薄油膜提供高度的阻尼，从而降低了振动级，提高了部件寿命。

## 标准燃烧系统

燃烧室是全环形的，在性能、重量和长度方面都大大优于其他类型的燃烧室。

设计提供了到达高压压气机出口的流线形的气动延伸，并消除了与管状设计相关的内部连接问题。

燃气轮机燃烧室包括一个围绕燃烧室的空气机匣。在 RB211 上，合金钢空气机匣是包住燃烧室的环形管道。

## 涡轮

涡轮的每一级都包括一套被称之为喷嘴导向片的静态叶片，后面跟着一套旋转叶片。在喷嘴导向片之间形成的收敛形通道将压力能转换成动能，从而速度增加，压力和温度下降。在转子叶片之间形成的收敛形通道将压力转换成动能，动能再转换成机械功去驱动传动轴。这时，压力、温度和速度下降。

## 排气

燃气发生器产生的热气以紧密连接的布局穿过一个中压涡轮管道去驱动自由式动力涡轮。

## 装配和安装

短小、刚性的外构架允许燃气发生器从涡轮机匣的后法兰盘处安装，并在进气机匣上进行单点定位。短小刚性设计可以使构架的偏离达到最低程度，减少关键的空气密封装置的磨损，从而最大程度地减少性能降级。安装简单大大提高了维护的可达性，并能加快模块或燃气发生器的更换，从而将停机时间降低到最低程度。

## 特有的维修特性

五个预先平衡和可互换的模块的模块式结构维护简单，而且每一模块又细分为基本部件，同时模块的重量都不超过 1765 磅（800 公斤）。模块化设计有下列优点：

1. 允许在现场更换模块。
2. 简化了向交通不方便的偏远现场的运输。所有模块都运输简单方便。
3. 减少了储存备份燃气发生器和备件的可能性。
4. 减少了燃气发生器的停机时间。

RB211 被设计成在系统监控的限度内实施“视情”操作，它：

1. 允许早期发现任何性能的降低。
2. 允许及时诊断故障（或潜在故障的预测）。
3. 允许提前计划任何必要的维修。
4. 减少计划外的停机，并延长维修/大修的间隔时间。

## 密封和冷却空气系统的要求

该系统需要提供具有足够压力的空气，对轴承座进行密封和对内部部件进行冷却。

为最大程度地减少压气机空气流量的能量损失，把部件进行分组是很重要的，这样每一组中的最低空气压力被用作密封和冷却。为此，使用四种不同的空气压力：

A. HP6 空气 (P3)

HP6 空气被用来冷却燃烧室火焰筒、燃烧室内套和高压转子轴。用来冷却燃烧室内套和高压转子轴的空气通过空气限流器和预旋流喷嘴进入高压涡轮叶片，而后向外流动，冷却叶片的内部，然后通过叶片侧面和外缘板上的小孔排放到气流中。用来冷却燃烧室火焰筒的空气穿过高压喷嘴导向片，通过它们的侧面和后缘排放到主气流中。

B. HP3 空气

HP3 空气在燃烧室外壳体之间向后流动到中压喷嘴导向片进行冷却，然后穿过限流器对两个涡轮轴密封装置增压。它还穿过轴承支架，沿着中压涡轮盘的前面流动，并排放到主气流中。

C. IP7 Air (P2)

IP7 空气为内部齿轮箱密封装置增压。它还向后流动去冷却中压涡轮轴和高压压气机轴，然后通过中压涡轮盘后面的一个调节盘冷却盘的后面。

D. IP4 空气

IP4 空气对前轴承密封装置进行增压，并排放到中压压气机的进气口。

## 辅助系统

### 起动系统

燃气发生器的起动是通过高压转子的旋转来实现的。它受起动机马达的直接驱动，并通过激励两个燃烧点火器/燃烧器进行点火。点火器/燃烧器位于外机匣，并凸出到燃烧环里面。

当燃气发生器到达自持速度，传动轴自动与 高压转子脱离。

速度传感部件综合在控制系统中，它们的作用是：

当燃气发生器到达自持速度时，自动切断起动机马达。

通过检测输入到超速释放装置的速度，防止脱离机构发生任何可能的故障。

安装在燃气发生器上的部件：

- 径向驱动轴
- 起动机马达
- 起动机马达速度传感装置

RB211 起动系统的运行适于使用压缩空气、天然气或液压油。

### 燃料控制系统

向燃气发生器提供燃料由一个调节系统来进行调节，该调节器没有装在燃气发生器上。

在燃气发生器上安装的部件有：

- 燃烧器和燃料供应总管的供应管
- 电磁速度传感器
- 压力传感器
- 排气温度热电偶

## 润滑和液压油系统

润滑和液压油由一个没有装在燃气发生器上的系统提供。该系统向燃气发生器轴承提供润滑油，向燃料系统调节阀/活门动作筒和可调进口导向叶片动作筒提供液压油。与 RB211 的所有连接都是在燃气发生器的连接板上完成的。

安装在燃气发生器上的部件有：

- 分配器
- 供油管路过滤器
- 铁屑探测器

## 仪表、跳机装置和告警

### A. 排气温度

排气的气流温度由 17 个三元件热电偶测量。这些热电偶提供温度的直观指示，同时它们还向跳机装置输送信号。如果排气温度超过预定值，跳机装置将切断燃气发生器的工作。

### B. 振动测量

振动测量在传感器处进行。这些传感器安装在燃气发生器的前、中和后机匣上。

### C. 润滑油压力的差动压力

燃气发生器的滑油压力差动压力从一个开孔处测量。该开孔位于过滤器壳体和接头部件的下方。

### D. 速度

转子速度由 3 个中压和 4 个高压电磁传感器测量。这些传感器为转速和燃料系统控制的直观指示提供信号。

## 带有干式低排放燃烧系统的 RB211 燃气发生器 - DLE

工业 RB211 DLE 燃气发生器是以气体为燃料的源自航空的燃气轮机，它采用干式低排放（DLE）燃烧技术对氧化氮和一氧化碳的排放同时进行控制。这种燃气发生器有两个转子，以高压比进行工作。第一中压转子包括一个与单级涡轮相连接的七级轴流式压气机。与其同心的是高压转子，它包括一个六级压气机和单级涡轮。燃烧系统具有 9 个单独的径向安装的燃烧室，在压气机和涡轮段之间采用了多系列级、预混合贫燃料燃烧技术。两个转子在机械方面是独立的，从而使每个转子都能在其最佳速度上运转。

预混合贫燃料燃烧技术能把燃烧温度控制在必要的范围内，但需要燃料的分级配置提供调节，以避免熄火。系列燃料分级配置提供最广泛的燃烧稳定边际，因此也是提供最广泛的工作范围。

为实现向慢车和低功率操作加速，一种常规的扩散火焰系统被综合到燃料喷嘴。另外，配有引燃式点火装置，以确保可靠的起动。

因此，两级燃烧室具有四个独立的燃料供给：

- |    |         |    |         |
|----|---------|----|---------|
| 1. | 引燃式点火装置 | -- | 仅用于点火   |
| 2. | 中心扩散    | -- | 用于低功率运行 |
| 3. | 一级预混合 } | -- | 用于低排放   |
| 4. | 二级预混合 } |    | 运行      |

为达到需要的燃烧参数，DLE 燃烧系统的安排包括九个径向安装的筒形燃烧室。

起动和从中心扩散向预混合贫燃料燃烧操作转移的燃烧过程的控制是通过综合发动机管理系统（EMS）来实现的。这样能确保在不同的操作条件下取得正确的油气比，从而最大程度地减少排放。

### 起动系统

燃气发生器的起动是通过高压转子的旋转来实现的。它受起动机马达的直接驱动，并通过激励两个高能（HE）点火器进行点火。高能点火器位于每个喷嘴的头部，它们点燃小股的“引燃”气流。引燃燃烧室的火焰再依次点燃中心喷嘴气流。在点火得到确认后，喷嘴气流增加，以取得稳定的慢车状态。

## 燃料控制系统

向燃气发生器提供燃料由一个调节系统来进行调节，该调节器没有装在燃气发生器上，它对电—液压致动的燃料阀提供独立的控制。这种燃料阀每一个燃料总管上有一个。燃料供给的调节在 EMS 内完成。

安装在燃气发生器上的部件：

- 燃料喷嘴、供应管和供应总管
- 电磁速度传感器
- 压力传感器
- 排气温度热电偶

## 润滑和液压油系统

润滑和液压油由一个没有装在燃气发生器上的系统提供。该系统向燃气发生器轴承提供润滑油，向燃料系统调节活门动作筒和可变进口导向片动作筒提供液压油。与 RB211 的所有连接都是在燃气发生器的连接板上完成的。

安装在燃气发生器上的部件有：

- 分电器
- 供油管路过滤器
- 铁屑探测器
- 3 进口导向叶片动作筒

## 技术特性 / RB211-24G

### 尺寸

长度 : 2.9 米  
最大直径 : 1.7 米

### 重量

基本干重 : 2604 公斤  
燃气发生器加支座 : 3320 公斤

### 压气机

类型 : 轴流双转子  
(组合转子)  
级数 : 中压 7 级  
: 高压 6 级  
剖分线 : 水平/垂直  
正常运行转速 : 6643 转/分钟(中压)  
: 9445 转/分钟(高压)  
最大叶尖速度 : 355 米/秒  
最大连续速度 : 6720 转/分钟(中压)  
: 9550 转/分钟(高压)

### 涡轮

级数 : 2 级  
剖分线 : 垂直  
正常运行转速 : 6643 转/分钟(中压)  
: 9445 转/分钟(高压)  
最大叶尖速度 : 525 米/秒  
最大连续速度 : 6720 转/分钟(中压)  
: 9550 转/分钟(高压)

### 燃烧室

类型 : 单环形  
燃烧室数目 : 18

### 轴承

径向型 : 滚柱 (挤压膜)  
推力型 : 双滚柱  
每个轴上的数量 : 中压 3  
: 高压 2

<u>慢车转速</u>	:	3250 转/分钟(中压)
<u>最大工作温度</u> (EGT)	:	770 ? C
<u>最大振动</u>	:	25 毫米/秒 平均速度
<u>正常振动</u>	:	低于 21 毫米/秒平均速度
<u>正常振动告警</u>	:	3.5 毫米/秒平均速度，在初始正常运转级以上
<u>润滑油压力</u> 最大供油	:	在 350 igph 和 60C 时为 7.6 到 8.3 巴
<u>滑油消耗率</u> 平均	:	0.19 升/小时
最大	:	0.75 升/小时

## 技术特性 / RB211-24G DLE

### 尺寸

长度	:	2.9 米
最大直径	:	2.18 米

### 重量

基本干重	:	3100 公斤
燃气发生器加支座	:	4000 公斤

### 压气机

类型	:	轴流双转子 (组合转子)
级数	:	中压 7 级 高压 6 级
剖分线	:	水平/垂直
正常运行转速	:	6643 转/分钟(中压) 9445 转/分钟(高压)
最大叶尖速度	:	355 米/秒
最大连续速度	:	6720 转/分钟(中压) 9550 转/分钟(高压)

### 涡轮

级数	:	2 级
剖分线	:	垂直
正常运行转速	:	6643 转/分钟(中压) 9445 转/分钟(高压)
最大叶尖速度	:	525 米/秒
最大连续速度	:	6720 转/分钟中压)

: 9550 转/分钟(高压)

### 燃烧室

类型 : 径向安装的预混合贫油燃烧系列级燃烧室  
燃烧室数目 : 9  
喷嘴数目 : 每个燃烧室一套  
点火器数目 : 每个燃烧室两个

### 轴承

径向型 : 滚柱 (挤压膜)  
推力型 : 双滚柱  
每个轴上的数量 : 中压 3  
: 高压 2

慢车转速 : 3250 转/分钟(中压)

最大工作温度  
(EGT) : 780 ? C

临界速度 : 工作范围以外

最大振动 : 25 毫米/秒 平均速度

正常振动 : 低于 21 毫米/秒平均速度

正常振动告警 : 3.5 毫米/秒平均速度, 在初始正常运转级以上

### 润滑油压力

最大供油 : 在 350 igph 和 60C 时为 7.6 到 8.3 巴

### 滑油消耗率

平均 : 低于 0.19 升/小时