



快速 起动

从静止加速到3万转
只需 2.6 秒

如何快速启动直升机发动机，以便在紧急情况下使其用作冗余安全发动机？慕尼黑工业大学的涡轮机械和飞行推进系主任利用受控压缩空气将启动时间缩短了 90%。

出于安全原因，现代直升机通常装配两台涡轮轴发动机。这种冗余设计可以确保当其中一台发动机发生故障，另一台发动机还可以提供必要的动力来维持直升机飞行或启动预防性着陆程序。因此，多发动机直升机在高速飞行和爬升阶段通常具有超额的发动机功率，因为通常只有在起飞和着陆时才会同时启用两台发动机。在其它时间，同时工作的发动机仅在部分载荷范围内运行，因而油耗相对较高（图 1）。现在，发动机运行优化策略希望能降低油耗。

理念：降低油耗

我们计划以受控方式关闭其中一台发动机（指定单发动机工作，ISEO）。这要求另一个发动机能够提高功率输出，从而改善油耗特性。因此能够降低油耗，减少废气排放。这种操作尤其适用于高速的长时间飞行，例如用于海上平台补给飞行或长时间跨大陆

接力飞行。研究表明，在目前的技术水平下，此方法可以节省高达 21% 的燃料。

问题：损失功率

由于在 ISEO 模式下飞行时仅使用一台发动机，这会降低飞行安全性。如果正在工作的发动机发生故障，之前停机的另一台发动机无法立即接管飞行。因为通过标准的启动发电机程序启动发动机需要耗时 26 秒。在这一启动阶段，直升机的主旋翼仅以自旋方式继续旋转，而这种自旋是由于直升机下降时周围流经的气流所致。与此同时，直升机会迅速掉落。假设通常的下降速度为 15 m/s，这样飞机就会掉落 400 多米。只有过了这段时间，重新启动的发动机才能再次提供足够的动力。以 ISEO 模式飞行时，必须考虑飞行高度跌落的因素，因此飞机实际可用的飞行航程会受到限制，但可以通过更快的发动机启动过程得以避免。 >>

解决方案：缩短发动机起动时间

小型直升机燃气轮机通常由电池驱动的电动机起动。因为这种类型的起动器系统针对重量进行了优化，所以它只能为核心发动机，也就是燃气发生器的输出轴提供有限的加速扭矩。电动机与发动机之间的传动齿轮无法提供更高的扭矩。因此，为了缩短发动机的起动过程，需要借助其它方法。其中一个方法是将强大的压缩空气射流引导至核心发动机的径向压缩机叶片的后缘，以快速驱动轴的旋转（图 2）。这种方法非常有效，因为直升机中的大多数涡轮轴发动机在核心发动机轴上都能发挥很大的杠杆作用。

目标：实现可靠的自启动

快速起动系统必须非常可靠，这至关重要。此外，起动时间必须足够短，以平衡整个 ISEO 系统中，快速启动系统所引起的额外重量。除了分析计

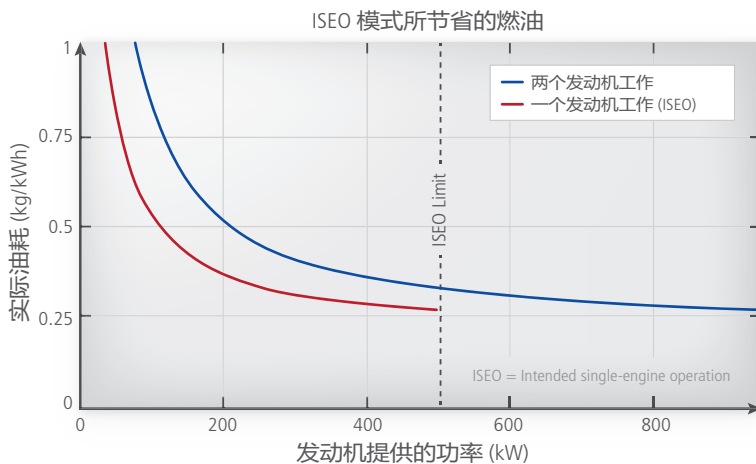
算之外，该大学的研究团队还对这类系统进行了实验。为此，他们在教授实验室的测试台架上使用了 Allison 250-C20B 涡轮轴。在第一次功能测试中，改进之后的径向压缩机外壳上有五个集成的 de Laval 喷嘴（这些特殊形状的喷嘴用于产生高速气流）。一开始，测试台架为喷嘴提供 13 巴的压缩空气。后来，直接使用可以提供 200 巴压力的压缩气罐。

需求和挑战

处理高压并优化发动机控制单元的反应时间是一项很大的挑战。一方面，在快速起动期间，百分之一秒的时间延迟都会产生极大影响。另一方面，受控组件必须快速准确地工作。计算出的快速起动时间仅为 3 秒，在此期间，发动机需要从静止加速到每分钟 3 万转。这相当于核心发动机设计转速的 60%。在此间隔期间，控制器必须执行各种控制和监测

- 1 高压涡轮机：为燃烧室产生的热气体减压，然后驱动压缩机，并通过变速箱驱动附件。最大转速约 50,000 rpm。
- 2 低压涡轮机：在高压涡轮机后对热气体减压，然后使用变速箱推进直升机转子。最大转速约 30,000 rpm；持续功率：298 kW。
- 3 压缩机：由六个轴向以及一个径向功率驱动构成。最大空气率约 1.5 kg/s；最大压缩比：1:7。向燃烧室供应压缩空气。
- 4 带有喷射器件和火花塞的罐形燃烧室。
- 5 燃油计量装置，由 dSPACE 系统控制。
- 6 用于发动机正常起动的起动电机。
- 7 废气扩散器，将废气减压至环境压力。
- 8 电磁涡流制动器，由 dSPACE 系统控制。直升机旋翼仿真，随后执行直升机功率需求的仿真。
- 9 发动机供气。
- 10 瓶装压缩空气（最大 230 巴，15 升）提供快速起动所需的压缩空气。

图 1：在 ISEO 状态下，只有一台发动机在较高负荷下工作，而不是两台发动机在不利的部分负荷下工作，因此燃油效率更高。因此，只有一台发动机工作就能获得两台发动机同时工作所产生的性能，而且油耗较低。



任务。这些任务包括在达到特定转速时控制燃料释放阀或者发送信号关闭压缩空气阀。此外，必须监控一些影响系统安全的变量指数，例如燃烧室后部的气体温度。由于测试操作需要设置各种快速起动参数，dSPACE ControlDesk作为一种图形化的人机交互界面，为此提供了极大的便利，因为它提供了多种选项来配置仪表、显示器、输入掩码等（图 4）。

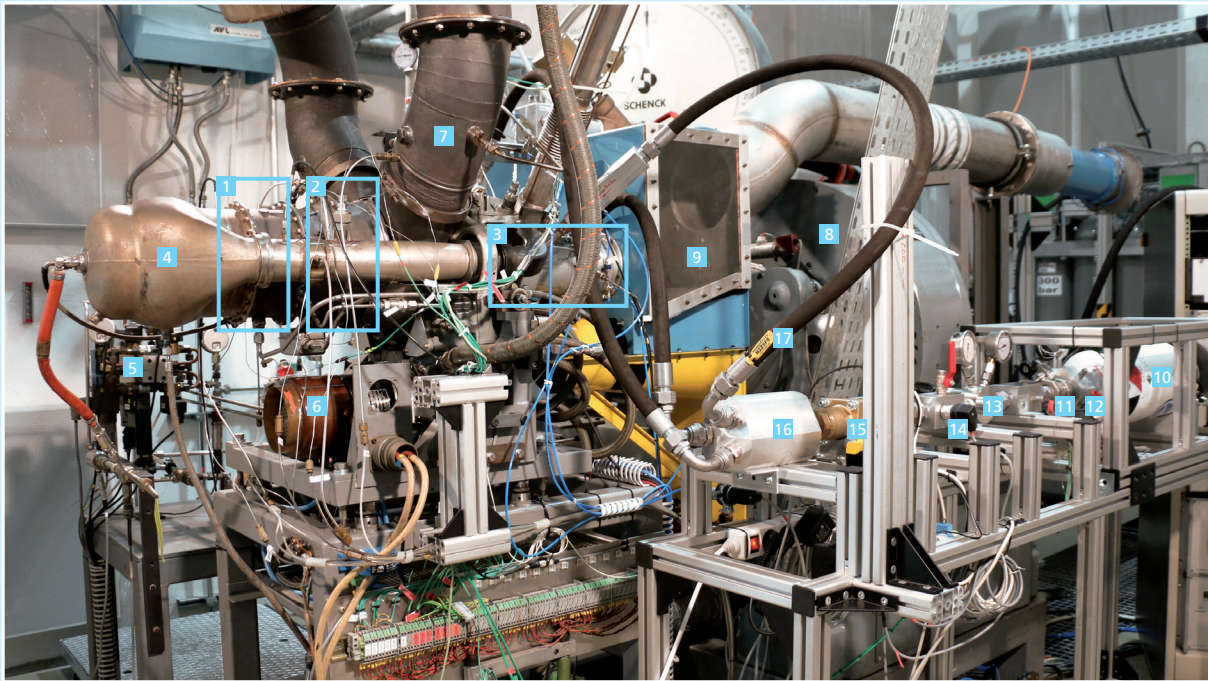


图 2 : Allison 250-C20B 涡轴发动机测试台架图示。

- | | | |
|---|--|---|
| <p>11 用于在气瓶充气时关闭主压力管路的球阀。</p> <p>12 用于气瓶进气阀以及压力和温度测量的适配器。</p> <p>13 可调压力调节器，用于维持喷嘴处固定的输出压力。</p> | <p>14 维护工作期间的转接头，用于受控压力释放以及用于压力和温度测量。</p> <p>15 同轴阀用于释放压缩空气以便快速启动，由 dSPACE 系统控制。</p> | <p>16 三个喷嘴供气管路所在的配气模块。</p> <p>17 喷嘴连接管。</p> |
|---|--|---|

“通过开放且功能强大的 dSPACE 实时系统，我们可以使用 MATLAB/Simulink 快速有效地实现和使用新的控制功能。”

Martin Kerler, 慕尼黑工业大学

预开发控制系统

该大学的团队进行了模型在环测试，以预先测试快速起动控制系统。为此，他们在 MATLAB®/Simulink® 中为发动机的现有准非线性实时状态空间模型添加了起动阶段的模型。根据测量数据，该团队将发动机的常规工作

范围进行了扩展，进一步包括了静止与发动机怠速之间的范围。他们通过实际快速起动系统的一维数值仿真来定义系统基本参数（例如快速加速扭矩），并从中获得重要的控制参数（例如阀门开启时间）。这些值都包括在额外的快速起动控制算法中。这

些算法还规定了必须喷射的燃油量，因此核心发动机可以通过燃烧室中产生的热气体迅速加速。这些早期测试有助于解决全自动快速起动过程中的潜在问题，并验证相关的控制算法。下一步是在试制发动机上实现快速起动。

>>

构建集成控制系统

该大学的团队使用了 dSPACE 系统进行发动机控制。该系统由安装于 PX10 Expansion Box 的双核 DS1007 PPC 处理器板卡、DS2103 多通道 D/A 板卡以及 DS2002 多通道 A/D 板卡构成。32 通道的输出和输入板卡提供了足够的功能，可在发动机和快速启动系统中执行广泛的控制和监测任务。在 Simulink 中建模的控制器被分布到处理器板的两个内核上。其中一个内核会预处理和后处理输出/输入值，并且监测发动机参数。此外，还会集成虚拟 Simulink 发动机模型，从而与真实的发动机同时运行。第二个内核则负责实际的控制任务。因而整个系统能够以毫秒级的速率实现控制任务执行。该团队使用 dSPACE ControlDesk 创建了一个图形化用户界面来控制并监测发动机及快速启动系统。通过用户界面还可以在发动机运行期间改变控制参数，而不必重新

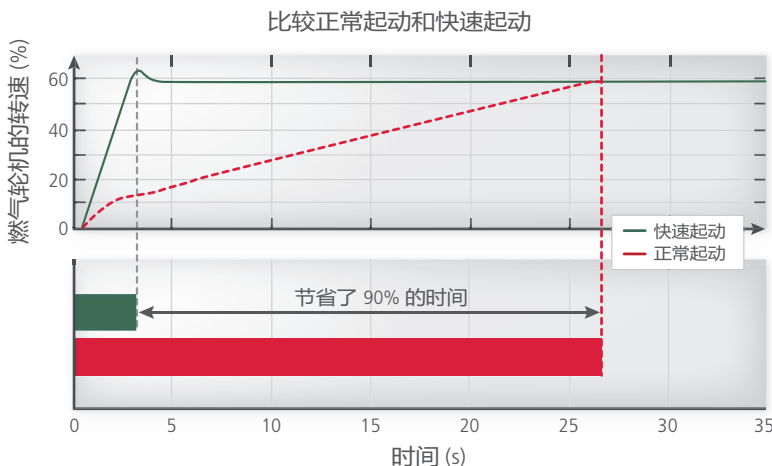
编译发动机控制器。20 多年来，始终与时俱进的 dSPACE 系统（硬件和 ControlDesk）与 MATLAB/Simulink 的组合已成为大学测试平台上测试和研究工作的强大开发工具。该系统还为持续开发任务做了充足的准备，可供长期使用。

首轮运行测试的结果

使用独立的 200 巴压缩空气供应系统对发动机进行首轮运行测试的目的是实现发动机快速启动，更为重要的是确保启动时的安全性和可复现性。压缩空气喷嘴关闭的时间间隔特别巧妙，因为发动机的压缩需要在数毫秒之内进入正常工作。在第一次运行测试后，团队调整了一些参数，从而实现了从非平稳加速到静止空转的稳定过渡。快速启动系统在 20°C 的典型环境温度下，将发动机启动时间减少了 90%，即从 26 秒降低至 2.6 秒。与此同时，核心发动机被加速到每分

- 1 发动机状态显示
- 2 油耗显示
- 3 发动机参数警报显示
- 4 发动机紧急状态控制
- 5 发动机正常控制
- 6 激活/停用快速启动系统
- 7 激活/停用火花塞
- 8 激活/停用启动电机
- 9 选择模型在环或硬件在环仿真
- 10 选择压缩空气来源
- 11 选择正常启动或快速启动
- 12 选择发动机控制：直升机仿真器或测试台架
- 13 设置发动机极限
- 14 发动机重要参数警告信息的显示面板
- 15 发往发动机与快速启动系统的 DA 控制信号显示
- 16 FADEC（全权限数字电子控制系统）输入测量值的 A/D 显示
- 17 排气阀控制面板
- 18 电磁涡流制动器控制面板
- 19 泵检测逻辑控制
- 20 FADEC 的其它显示和选择元件

图 3：涡轮发动机正常启动（红色）与快速启动（绿色）比较。在 2.6 秒内进行快速启动，达到最大速度的 60%。与正常启动所需的 26 秒相比，将启动时间缩短了 90%。



钟 3 万转。压缩空气罐内的压力从 200 巴降至 100 巴，消耗了 1.52 千克压缩空气。

总结与展望

本次运行测试在独立供应压缩空气的情况下能够可靠地实现 300 kW 涡轮轴发动机快速启动。达到的启动时间超过了预测值，理论上可以进一步降低。现在，进一步研究的重点是快速



图 4 : dSPACE ControlDesk 的图形化用户界面清楚地显示了发动机测试中全面的控制和显示参数。

“dSPACE ControlDesk 可清楚地显示与操作发动机相关的所有测量值和控制参数。ControlDesk 极大的灵活性使您可以快速实施新创意。”

Martin Kerler, 慕尼黑工业大学

起动时的热力学燃烧过程、系统工作对磨损和生命周期的影响以及整个直升机动力传动系统的仿真。此外，大学团队希望采用更高的压力和新的喷嘴形状设计进一步测试压缩空气系统，目标在于对重量和体积进行了

优化的起动系统进行测试，使其可以集成到直升机中。dSPACE 的系统在整个开发和测试过程中已经展现了出色的能力，并极大地帮助测试获得成功。

Martin Kerler, 慕尼黑工业大学

Martin Kerler

Martin Kerler 是德国慕尼黑工业大学涡轮机械和飞行推进系统的研究助理，任职至 2017 年 9 月底。

