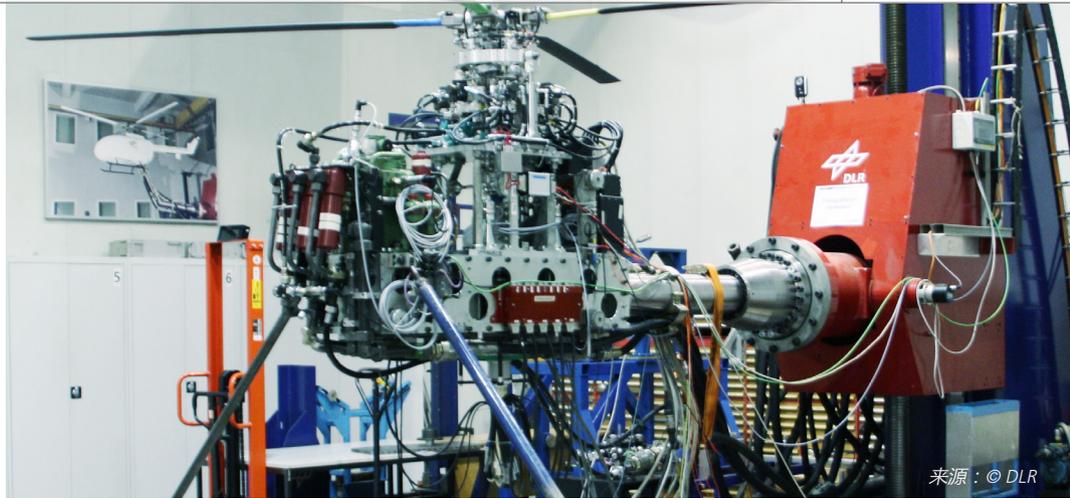


快速旋转的旋翼产生必要的推力让直升机升空，但是噪音震耳欲聋。凭借一种全新的旋翼控制系统，德国航天中心 (DLR) 证实了直升机在飞行当中也能大大降低噪音和振动。



# 敏捷的桨叶

直升机的多滑盘系统主动降低噪音和振动



来源：© DLR

德国航空航天中心测试用于开发直升机旋翼主动控制系统的装置。

**当**直升机向前飞行时，机身向前运动以及旋翼桨叶旋转所产生的气流将会重叠。这样会在旋翼桨盘内产生极不对称的气流状态，从而造成各种空气动力、气动弹性和空气声学效应，例如动态失速、噪音和振动。这些效应通常随着旋翼的旋转频率及其整数倍数（旋翼谐波频率）而定期发生。消除或至少缓解这些效应的一种方法主要集中在直升机的旋翼控制系统上。

### 控制直升机

直升机的主要机械控制装置被称为滑盘，它可以将飞行员命令传输到旋翼桨叶。其方法是将总距操纵（即更改所有主旋翼桨叶的桨距角以改变升力）与周期变矩操纵相结合，以影响正向和侧向推力。后者会在旋翼每次转动一圈时，使桨距角发生变化。

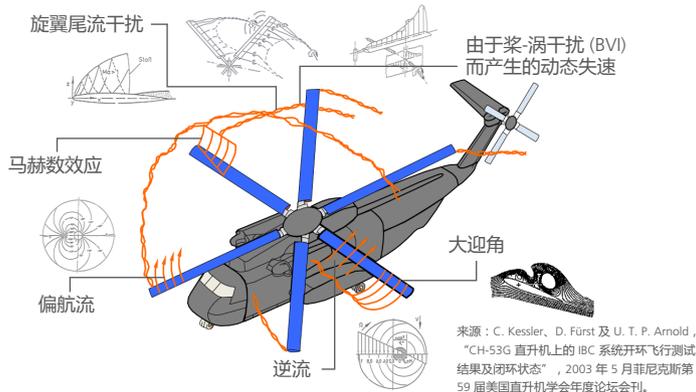
### 应对措施

为缓解不必要的效应，可以按旋翼频率整数倍数和低振幅来模拟旋翼桨片，以修正旋翼桨距角。为减轻振动，在选择控制信号的频率、振幅和相位时要做到通过干涉措施来抵消振动。同时，这一方法还会对

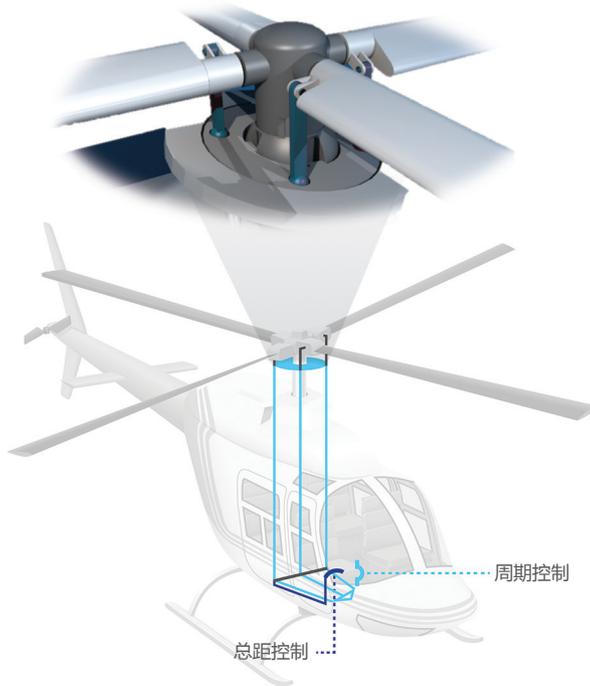
噪音释放和旋翼能耗产生积极影响。传统的直升机控制系统（总距式和周期式）无法有效影响多余的空气动力效应高次谐波，只能用于控制飞行姿态。正因为如此，早在 20 世纪中期，研究人员就尝试通过主动旋翼控制的方式来消除此类现象及其效应。除了由主控制装置在所有桨叶上实施桨距角更改之外，主动旋翼控制还按旋翼频率的某个倍数（旋翼谐波频率）来执行高频率桨距角更改。这样可以极大降低直升机中的振动和噪音辐射，还可以提高推力和升力。

### 主动旋翼控制

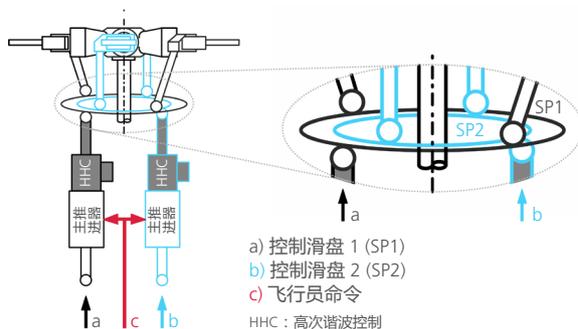
目前实施主动旋翼控制的方法一般都存在明显缺点。通过移动滑盘（由执行机构执行）来改变动态桨距角的系统只能对最多 3 片桨叶的旋翼实施独立桨叶控制 (IBC)。对于目前常见的桨叶数量达到或超过四片的旋翼，这一方法由于滑盘运动学的原因而受到限制。其他系统具有完整的 IBC 功能，但是旋转系统中使用的执行机构需要承受高负荷，并且必须通过集电环为其提供能量和控制信号，对其内部及本身会造成重大挑战。 >>



直升机旋翼在向前飞行时的空气动力现象。



通过滑盘对旋翼桨叶进行总距控制和周期式变距控制，从而使直升机能够垂直和水平飞行。



多滑盘系统的工作原理：一个滑盘控制两片相对的旋翼桨叶。

### 新方法：多滑盘

DLR 荣获专利的多滑盘系统 (META) 已在布伦瑞克的旋翼测试装置上通过了四桨叶旋翼测试，是一种实施主动旋翼控制的新颖方法。电动液压执行机构可使多个同轴滑盘发生高频率移动。随后，滑盘将使旋翼上的各个桨距角实现必要的动态更改。执行机构安装在滑盘下方，而滑盘则各自连接至两片桨叶。使用多个滑盘使系统拥有 IBC 能力，也就是说，可以单独修改每片旋翼桨叶的桨距角，并具有任意控制功能和频率。如此一来，META 既具有现有方法的优点，又克服了它们的缺点。

### 初测装置

在联邦航空研究计划框架内的 VAR-META 项目期间 (VAR-META = 通过多滑盘实施的完全主动旋翼控制)，多滑盘系统已在布伦瑞克市德国航空航天中心的旋翼测试装置上经过了初次测试。在这些测试中，使用了直径约为 4 米的 Bo105 无铰旋翼的马赫比例调整风洞模型。该模型第一次装配了多滑盘系统。经过马赫比例调整之后，气流条件极大反映了实际直升机旋翼的气流条件。但是，这样也会加大旋翼速度。该项目的一项特别挑战是需要控制用于定位和移动两个滑盘的电动液压执行机构。一方面，所有四片旋翼桨叶的必要桨距角更改必须转换为执行机构的相应活塞运动。另一方面，这些执行机构的运动也必须得到主动控制。

来源：© DLR

### 控制器要求

对开环和闭环控制系统的要求比较高：在测试期间，模型的旋翼以 1050 rpm 的速度旋转。因此，从第一到第六旋翼谐波的计划桨叶控制频率会造成执行机构频率范围从 0 Hz（静态位置）达到 105 Hz（约 0.05 毫米），这就要求必须达到很高的控制准确性。执行机构的最大行程为  $\pm 4$  毫米，在旋翼桨叶上对应于大约  $\pm 3.7^\circ$  桨距角。旋翼桨距角始终取决于旋翼当前方位角。因此在旋翼主轴上使用了一个角编码器以生成触发器信号，这些信号可提供关于当前方位角的信息，并由旋翼测试装置的所有开环和闭环控制系统及测量系统使用。为达到所需的控制准确性，多滑盘系统的执行机构每一转将被控制 256 次。在 17.5 Hz 的旋翼频率下，这样会使控制系统达到将近 4.5 kHz 的时钟频率。这意味着六个执行机构的控制及其闭环控制的计算全部必须按此速度完成，其中包括信号处理和分析以及过滤和前馈控制。

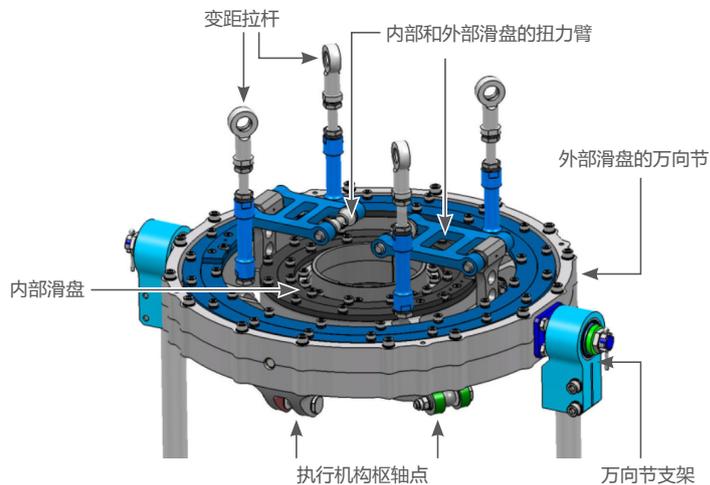
### 开发控制器模型

首先在 MATLAB®/Simulink® 中对整个系统运动学进行了建模，以推导出具有实时能力的控制法则。电控箱所需的执行机构运动通过控制矩阵（其中一些超过 50 列）进行计算，可将单独桨距角修改项（和耦合项）转换为执行机构的相应控制信号。后续的执行机构控制包含一



来源：© DLR

多滑盘系统的原型构造。



多滑盘系统的机械构造。

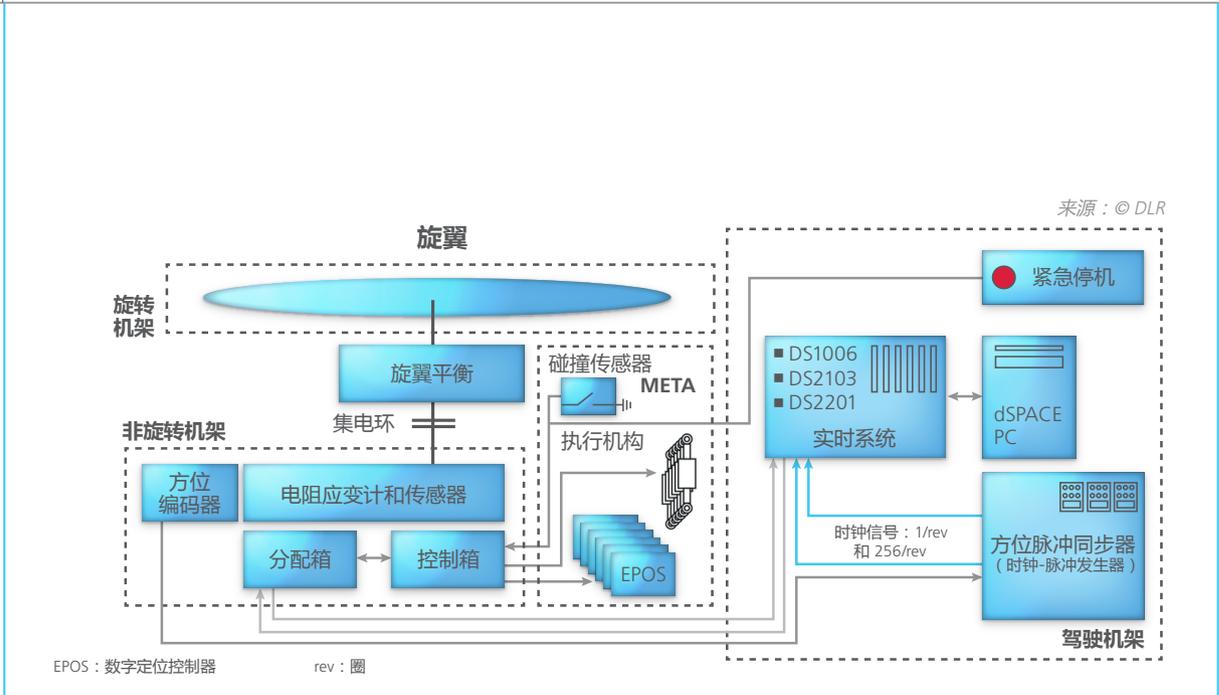
来源：© DLR

个带有前馈环的 PID 控制器。由于此前馈控制包含完整的谐波信号分析和数字式八阶低通滤波器，因此也极其需要同时计算六个执行机构

的控制信号。在 Simulink 中对执行机构模型以及开环和闭环控制进行建模和验证之后，系统必须具有实时能力以在实际测试期间控制硬件。 >>

“凭借强大的 dSPACE 实时系统，我们能够广泛测试转子主动控制算法，而且成功证明了多滑盘概念的功能。”

Philip Küfmann, 德国航空航天中心



测试装置的信号流图。

**设计具有实时能力的控制系统**

多滑盘系统的开环和闭环控制在 dSPACE 系统上实施，该系统带有一个四核 DS1006 处理器板和 DS2103 和 DS2201 I/O 板。测试过程使用了以太网模块，以便能够在测试期间与测量计算机和数据服务器进行通信。在 Simulink 中建模的控制系统

分散到多个处理器内核上。每个内核都用于执行开环控制、闭环控制和其他任务（例如网络通信）。Real-Time Workshop™ 用于编译控制命令，并在 dSPACE 系统上运行这些命令。角编码器的信号用于通过硬件中断来触发程序，使该程序与其余控制和测量硬件同步运行。这

样就可以满足每个控制步骤少于 250 微秒的时钟频率高要求，并达到所需的控制准确性。开发人员可以在运行期间使用 ControlDesk® Next Generation 和其中专门设计的图形用户界面来访问所有重要参数，例如控制器增益、前馈参数、控制频率和振幅。

风洞中的实验装置。





来源：© DLR

风洞测试中的控制和监视系统，两个 ControlDesk 界面（右侧）。

“我们使用 dSPACE ControlDesk 执行所有的测控任务，以便高效、便捷地动态操作 META。”

Philip Küfmann，德国航空航天中心

### 结论和后续措施

布伦瑞克德国航空航天中心对系统的 IBC 能力进行了测试和验证，帮助 VAR-META 项目成功完成。进一步更新和开发硬件及软件之后，2015 年 9 月多滑盘系统在 German-Dutch Wind Tunnels (DNW) 的低速风洞中完成了其首次风洞测试。风洞测试历时九天，在 FTK-META 项目（FTK = 先进滑盘概念）中完成。测试旨在证明主动旋翼控制系统对噪音、振动和性能的影响，以及在各种仿真飞行条件下对多滑盘系统执行初次功能测试。测试证明，使用 META 实施的主动旋翼控制策略最多可以将噪音降低 5 dB，并将（单个组件的）振动降低多达 90%。在快速向前飞行时，所需的旋翼动力最多可减少 4%。在整个测试期间，包含执行机构和 dSPACE 实时 PC 的系统未出现任何操作错

误。在随后的 SKAT（= 利用创新设计实现技术可扩展和风险最小化）项目中，将在新的五桨叶旋翼系统上使用多滑盘系统来研究主动旋翼控制概念。该项目还将测试在 dSPACE 系统上开发的新控制器，用于检测模型上的多余振动，并通过两个滑盘上的相应控制命令来抵消这些振动。■

Philip Küfmann，德国航空航天中心

多滑盘系统由 Berend van der Wall 博士与 Rainer Bartels 先生在 DLR 飞行系统研究所发明，并于 2008 年获得专利（专利号：DE-10-2006-030-089-D）。

Philip Küfmann

Philip Küfmann 在德国布伦瑞克的德国航天中心 (DLR) 飞行系统研究所负责开发多滑盘系统的控制模型和软件。



观看风洞中的 META：  
[www.dspace.com/go/dMag\\_20161\\_META\\_E](http://www.dspace.com/go/dMag_20161_META_E)

