

---

# 基于双边界动态开启时序的整体式固体火箭冲压发动机进气道转级瞬态流动特性与稳定性研究：实验、CFD 模拟及稳定窗口分析 MDPI Aerospace

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42317.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

**基于双边界动态开启时序的整体式固体火箭冲压发动机进气道转级瞬态流动特性与稳定性研究：实验、CFD 模拟及稳定窗口分析 MDPI Aerospace。** 论文标题：Transient Flow Dynamics and Stability of ISRR Inlet During Mode Transition with Dual-Boundary Dynamic Opening: Experiments, CFD, and Stability Window Analysis

论文链接：<https://doi.org/10.3390/aerospace13050472>

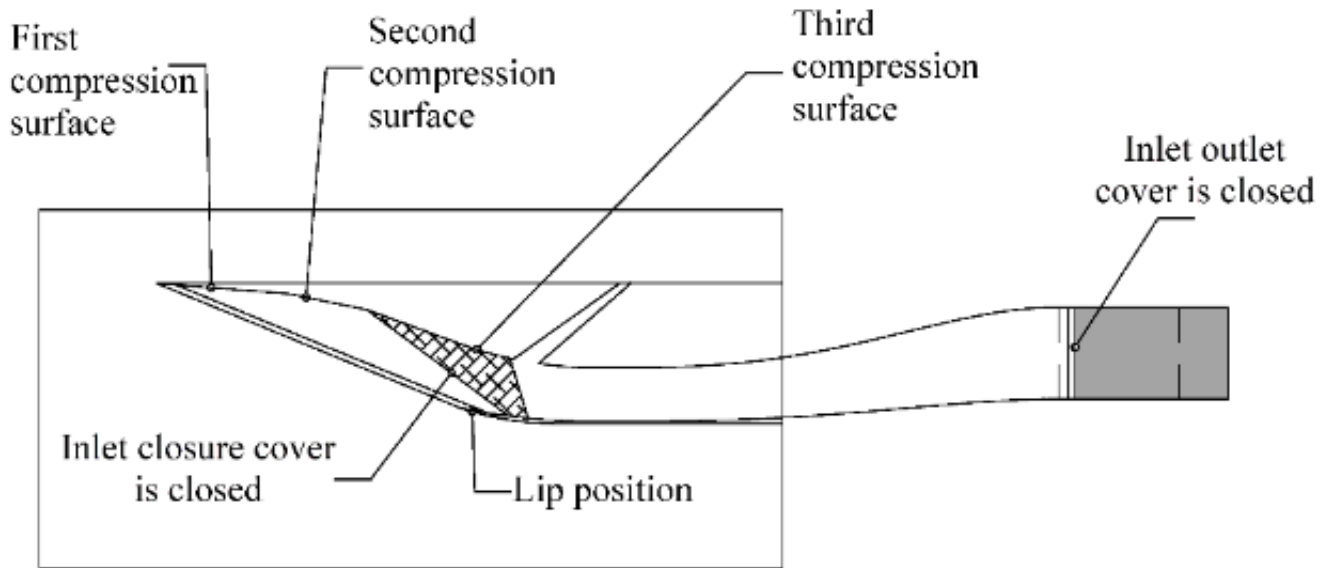
期刊名：Aerospace

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/aerospace>

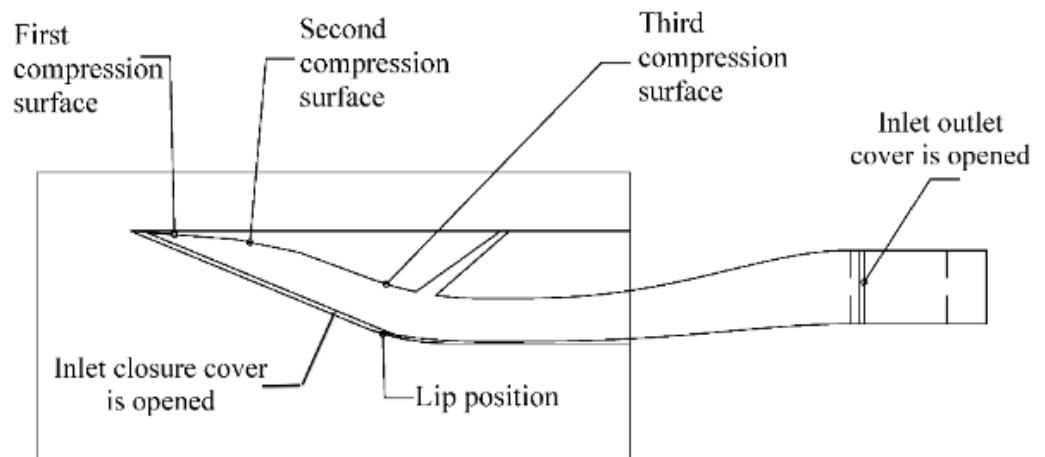
整体式固体火箭冲压发动机（Integral Solid Rocket Ramjet, ISRR）是一种将火箭助推与冲压巡航功能集成于同一发动机内的新型组合推进系统，具有结构紧凑、推重比高、适用于高速远程飞行等优势，在未来高超声速飞行器动力系统中具有重要应用价值。ISRR 通常经历火箭助推、模态转换和冲压巡航三个阶段。其中，转级过程是发动机由封闭高压火箭模式向开放吸气冲压模式转换的关键环节。在这一过程中，进气道入口和出口堵盖需要按照一定时序开启，以建立稳定空气流通通道。然而，由于入口和出口边界状态变化存在时间差，进气道内部会经历激波迁移、压力波传播、流动分离以及复杂非定常耦合过程，严重时可能诱发进气道不起动（Unstart）和强烈压力振荡，降低发动机转级可靠性。

目前，针对超声速进气道转级过程的研究主要集中于单一边界扰动，例如背压变化、来流变化或入口开启过程，而真实工程环境中的入口与出口堵盖通常存在协同开启过程。因此，双边界动态开启条件下，不同开启顺序、开启速度以及飞行条件如何影响瞬态流动稳定性，仍缺乏系统认识。

针对这一问题，来自西安航天动力技术研究所的杨石林博士及其团队在Aerospace期刊发表了文章，开展了整体式固体火箭冲压发动机进气道双边界动态开启研究，采用数值模拟与自由射流试验相结合的方法，建立了入口/出口堵盖动态开启时序参数化模型，系统分析了不同开启策略下的压力响应、激波结构演化以及稳定性边界，为 ISRR 转级控制策略设计提供了新的理论依据。



(a) 转级前封堵状态



(b) 转级后开启状态

图1进气道堵盖工作原理示意图。(a)

转级前封堵状态：入口堵盖与出口堵盖分别密封进气道入口与补燃室接口。(b)

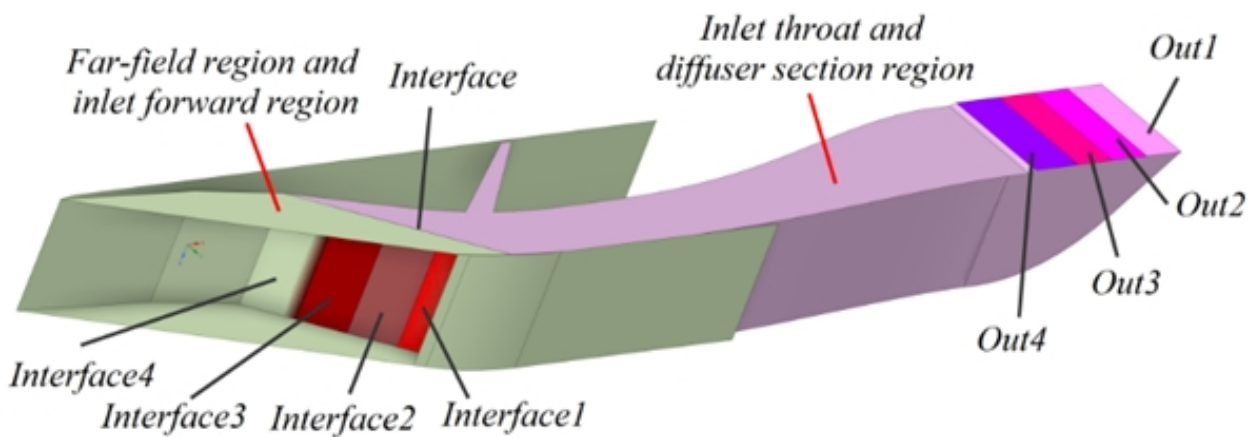
转级后开启状态：进气道入口、出口堵盖打开，进气道与补燃室流路建立。

## 研究过程与结果

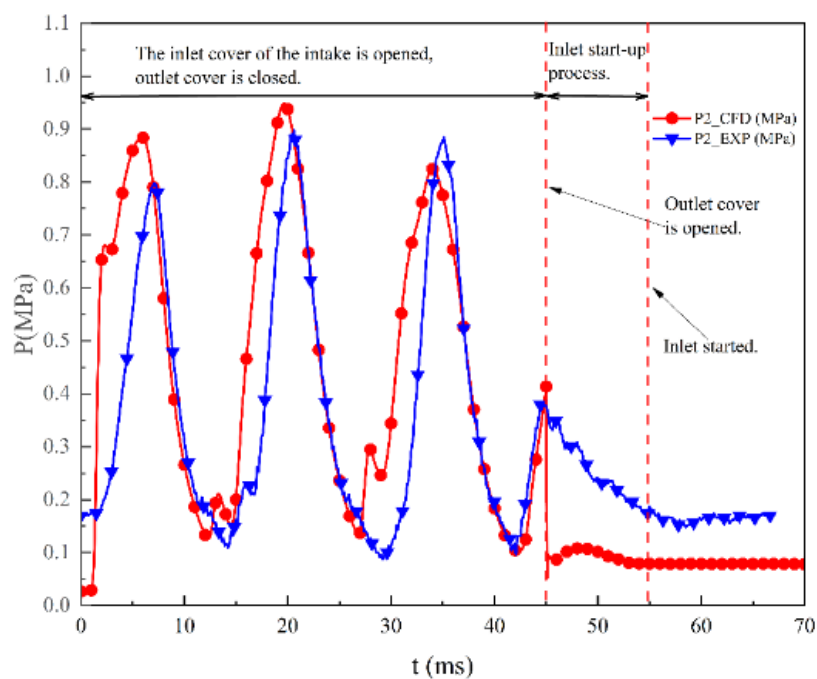
作者首先建立了双边界动态开启模型，引入入口开启时刻、出口开启时刻以及二者之间的时序差  $\Delta t$  作为核心参数。其中：当  $\Delta t > 0$  时，表示入口先开、出口后开，此时进气道初期形成入口开放、出口封闭的盲腔状态；当  $\Delta t < 0$  时，表示出口先开、入口后开，可避免盲腔形成，但可能产生短时间压力过渡过程。

研究对象为设计马赫数 3.3 的四波系超声速进气道，并结合 CFD 模拟与自由射流试验，对两种典型开启模式进行了验证。

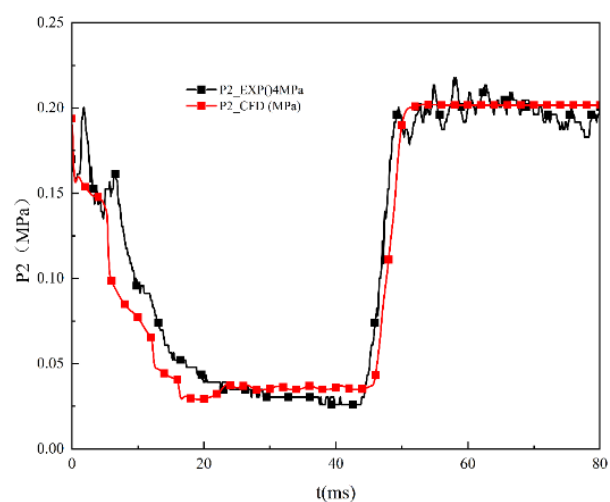
在入口先开模式下，研究发现入口开启后，由于出口仍处于封闭状态，高速来流持续进入进气道内部，使压力不断累积，并形成明显的周期性振荡。在基准工况（高度10 km、马赫数3.0）下：出口压力峰值约为 0.90 MPa，压力振荡主频约为 66.7 Hz，激波串呈现周期性前移与回退特征。CFD 模拟结果与自由射流试验高度吻合，关键压力特征偏差控制在 5%以内，验证了模型对转级瞬态过程预测的可靠性。进一步分析表明，该振荡并非单纯由局部湍流引起，而主要来源于盲腔内部压力波反射、压缩波积累以及入口周期性再吸入过程形成的声学反馈机制，其物理本质类似于超声速进气道中的 buzz 不稳定现象。



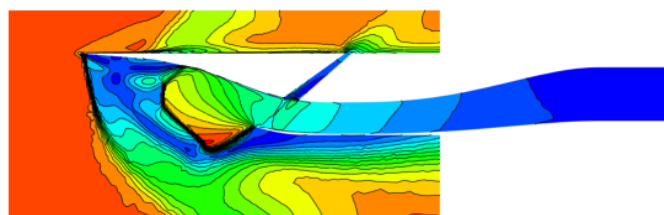
(a) 试验产品 (b) 仿真模型



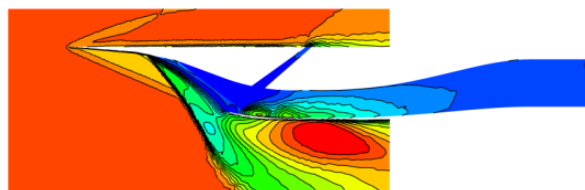
(c) 时序A（入口先开）仿真与试验压强对比



(d) 时序B（出口先开）仿真与试验压强对比



(e) 时序A（入口先开）仿真马赫数云图（8.5ms）



(f) 时序B（出口先开）仿真（11.8ms）

图2时序A（入口先开）与时序B（出口先开）下进气道出口仿真与试验对比

相比之下，在出口先开模式下，出口提前开启能够优先建立下游泄压通道，避免初始盲腔形成，因此明显削弱了周期性压力振荡。但由于入口尚未开启，扩张段内部会出现短时间气塞效应。研究发现：气塞峰值压力约为 0.18 MPa，流场建立时间约为 25 ms，稳定状态下压力比 P2/P1 约为 1.67。虽然出口先开模式存在短时压力过渡，但由于压力扰动能够向下游释放，不易形成持续反馈，因此具有更高的整体稳定性。

飞行条件与开启策略影响规律

研究进一步分析了飞行高度、来流马赫数以及堵盖开启时间对转级稳定性的影响。结果表明，飞行高度升高能够降低环境压力水平，削弱盲腔内部压力积累能力，使压力振荡幅值明显下降。因此，高空条件有利于降低入口先开模式的不稳定风险。而随着来流马赫数增加，激波强度和逆压梯度增强，边界层分离区域扩大，导致压力振荡幅值和频率明显提高。其中，低空高马赫数组合被认为是最不利工况，系统更容易进入强振荡甚至不起动状态。此外，研究发现堵盖开启速度与开启顺序之间存在明显耦合关系。

对于入口先开模式：入口慢开能够降低初始压力冲击；出口快开能够快速释放盲腔压力。因此，该模式下推荐采用入口慢开、出口快开的控制策略。对于出口先开模式：出口快速开启有利于建立泄压通道；入口快速开启能够缩短流场建立时间。因此，该模式更适合采用双侧快速开启策略。

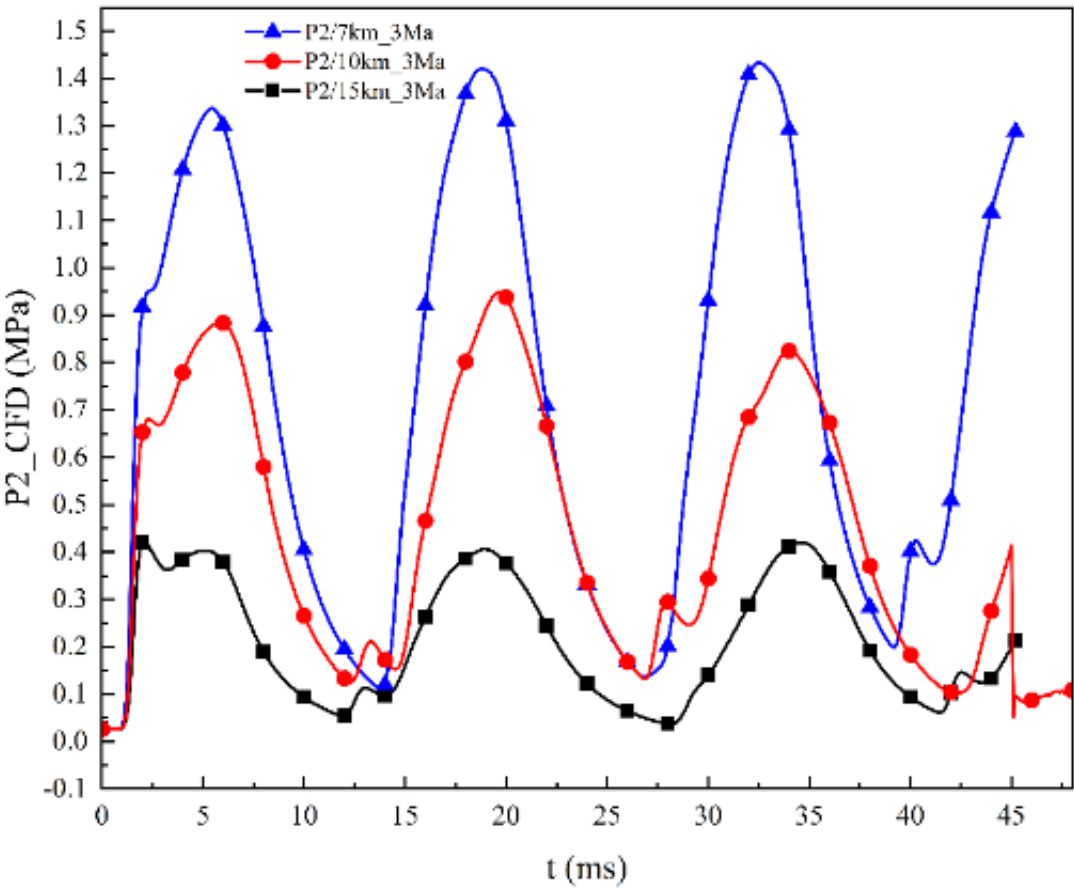


图1

不同飞行高度下进气道出口压力P2的瞬态响应曲线

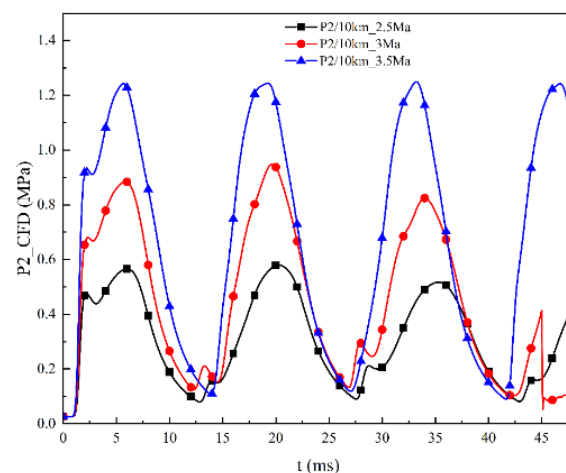


图2 不同来流马赫数下进气道出口压力P2的瞬态响应曲线。

### 稳定窗口图揭示转级控制规律

为了进一步指导工程设计，作者提出了基于时序差  $\Delta t$  和开启时间  $T_{open}$  的稳定窗口图，将不同开启策略映射为稳定区、过渡区和危险区，实现了转级稳定边界的可视化描述。研究发现，随着马赫数升高，稳定窗口明显收窄，系统对开启时序误差更加敏感；而出口先开策略通常位于稳定区域中心，具有更大的安全裕度。稳定窗口图进一步揭示，双边界开启过程具有明显的路径依赖特征。同一开启时间差  $\Delta t$ ，在不同飞行条件下可能产生完全不同的流动响应。因此，传统固定时序控制策略难以满足宽包线飞行需求，需要结合实时飞行状态进行自适应调整。

Cover Opening Time  $T_{open}$  (ms)

---

图5固体火箭冲压发动机转级过程稳定窗口图：展示时序差  $\Delta t$ 、堵盖开启时间与飞行马赫数、飞行高度、入口/出口开启历程之间对进气稳定性的耦合作用规律

## 研究总结

本文围绕整体式固体火箭冲压发动机转级过程中入口/出口堵盖双边界动态开启问题，建立了时序参数化分析方法，并结合 CFD 模拟与自由射流试验，揭示了不同开启路径下进气道瞬态流动演化机制。

## 研究表明：

(1) 开启顺序决定了转级初期压力波传播路径。入口先开会形成盲腔，引发压力波反射叠加和强烈振荡，是导致进气道不起动的高风险模式；出口先开能够破坏压力反馈闭环，提高转级稳定性。

(2) 建立的数值模型能够准确预测转级过程主要流动特征，模拟与试验关键参数偏差均控制在 5% 以内，具有良好的工程适用性。

(3) 飞行条件与开启策略存在显著耦合作用，高马赫数降低稳定裕度，而高空环境有利于抑制压力振荡。

(4) 提出的稳定窗口图为 ISRR 转级控制提供了新的设计方法，可用于指导宽飞行包线条件下的自适应时序优化。

该研究突破了传统单边界扰动分析框架，从双边界协同开启和时序驱动角度揭示了 ISRR 转级过程中的稳定性机理，为未来高性能组合推进系统可靠模态转换提供了重要理论依据。

## 期刊简介：

主编：Konstantinos Kontis, University of Glasgow, Scotland, UK

Aerospace 期刊致力于发表航空航天科学、工程和技术相关的创新研究，涵盖飞行器设计、推进系统、飞行控制、先进材料、空间科学、航空电子、无人机系统 (UAS)、城市空中交通 (UA

---

M)、可持续航空、航空安全以及前沿技术等。鼓励跨学科研究，推动航空航天科技发展，欢迎实验、仿真与理论研究的原创成果及综述。

2025 Impact Factor：2.5

2025 CiteScore：4.8

Time to First Decision：18.5 Days

Acceptance to Publication：2.7 Days

来源：Aerospace

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发