

JF-12 激波风洞喷管起动冲击载荷模型研究*

孟宝清 韩桂来 姜宗林
(中国科学院力学研究所, 100190)

摘要 激波风洞起动过程气动力冲击载荷引起测力系统的振动, 真实气动力信号受振动信号干扰。对振动干扰信号进行剥离首先需要明确起动过程冲击载荷模型。本文通过数值计算对 JF-12 激波风洞 $\phi 1.5\text{m}$ 喷管起动过程进行模拟, 得到尖锥模型上气动力加载过程, 并分析了加载历程走势原因。

关键词: 激波风洞; 冲击载荷; 振动干扰

一、研究背景

激波风洞起动过程的冲击载荷引起测力系统的振动, 受限于激波风洞实验时间, 气动力信号受到振动信号的干扰, 飞行器模型的气动力测量实际上是对一个“动态过程”进行测量, 天平所感知的信号为真实气动力信号与振动信号的叠加。对于类似的超大型激波风洞, 国内外都尚未形成振动干扰气动力测量的解决方法, 实验研究更是缺乏理论的指导和支持, 因此需要建立振动对气动力测量干扰的理论模型。而理论模型建立首先需要对冲击载荷本身的加载形式有较明确的了解。本文应用数值模拟方法, 对 JF-12 激波风洞 $\phi 1.5\text{m}$ 喷管起动过程进行了分析, 获得了喷管起动过程中冲击载荷加载历程曲线。

二、计算模型及方法

2.1 计算模型

计算包括长 8.7m 出口截面 $\phi 1.5\text{m}$ 喷管以及 $\phi 3.5\text{m}$ 试验段。试验段内放置长 1.5m 、半锥角 10° , 攻角为 0 的尖锥模型, 区域如图 1 所示。计算区域网格生成方法: 首先生成初始网格, 在此基础上正交化, 共 240 万网格点。

采用 MPI 并行计算, CPU 核数为 28, 计算时间约 70h。

* 注: 国家自然科学基金(No.11472281)资助项目。

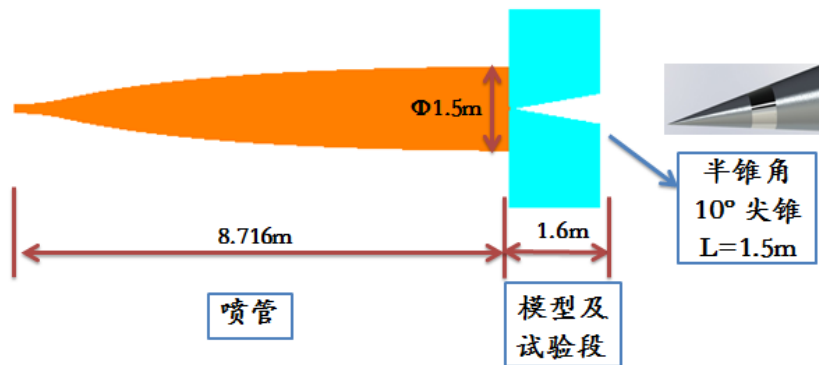


图1 计算区域示意图

2.2 计算方法

控制方程组采用二维轴对称 N-S 方程^[2]，采用有限差分方法。对流项使用 NND 格式离散，黏性项采用中心差分离散。时间项采用一阶 R-K 方法离散，为非定常过程计算。气体模型为量热完全气体， $\gamma=1.4$ ，气体黏性采用 Sutherland 公式计算。

初始条件设置：初始时刻将 5 区总温总压等熵换算至 $Ma=1$ 的状态，赋值给入口，其他区域为静止状态，压力为 50Pa，温度为 300K。边界条件设置：入口为初始时刻将 5 区总温总压等熵换算至 $Ma=1$ 的状态。喷管上壁面、试验段左边界、锥体侧面为固壁无滑移边条。喷管轴线为轴对称边条。出口为超音速出口条件。

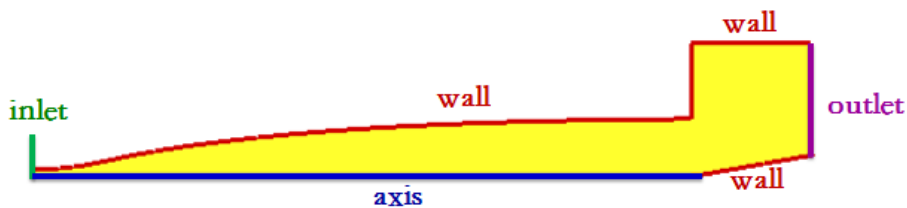


图2 边界条件示意图

三、结果讨论

3.1 起动激波到达锥尖流场分析

起动过程模型气动力变化走势与流场内波系结构以及压力分布有密切联系，在此处对起动激波到达模型锥尖时刻的流场进行分析，流场如图 3 所示，分别给出此时刻的数值纹影图以及压力云图。

流场结构主要包括起动激波、二次激波。在起动激波后紧跟高压区 I 以及低压区 I。在二次激波前后分别有高压区 II 以及低压区 II。此外，相较于高压区 I，高压区 II 的压力更高，且尺度稍大。

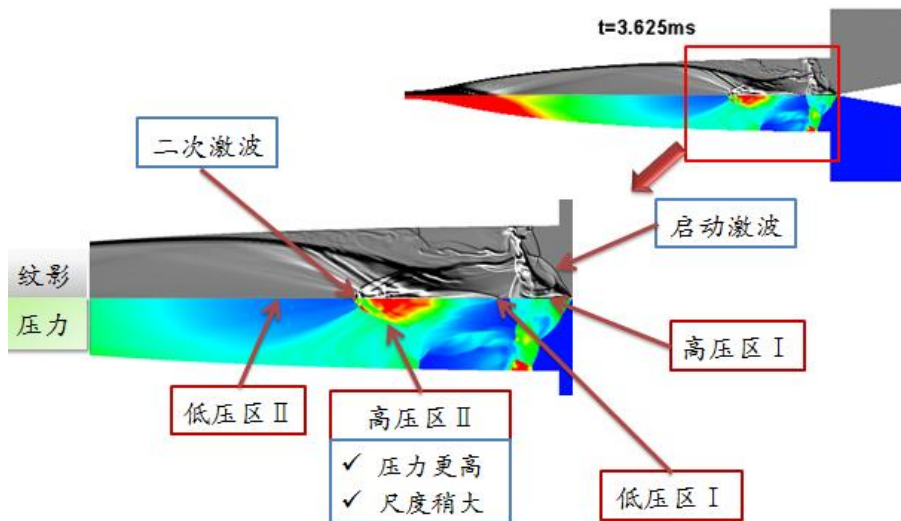


图3 启动激波到达锥尖时刻流场图

3.2 阻力系数 C_d 随时间变化曲线

计算得到 C_d-t 曲线如图 4 所示。结合激波风洞流场波系结构特性及皮托压力随时间衍化情况，将模型冲击载荷曲线走势分为四阶段。以下就各阶段曲线走势原因进行分析。

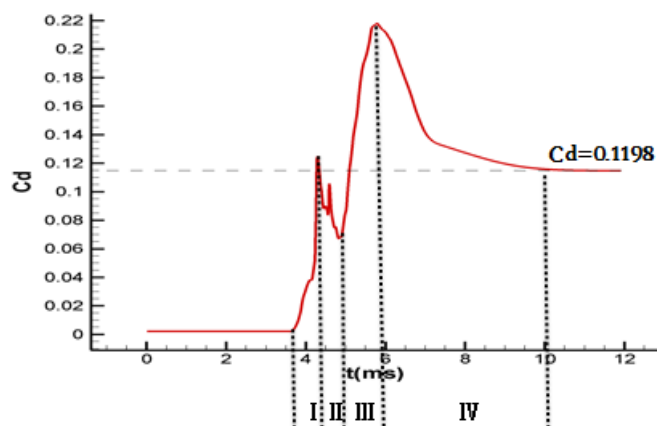


图4 C_d-t 曲线

I 阶段：曲线开始上升，这是由于启动激波以及高压区 I 到达锥体模型并且在锥面上传播，由于高压区 I 压力较高以及在锥面上的作用面积逐渐增加，曲线不断上升。

II 阶段：这一阶段曲线首先呈现下降，之后在上升，最后下降。首先的下降是由于启动激波以及其后的高压区 I 逐渐运动至流场外，曲线开始下降。之后的上升是由于二次激波前的高压区 II 到达尖锥模型。之后曲线的走势是以下两方面效果相对大小的体现：高压区 I 运动至流场外导致阻力系数下降以及二次激波前高压区 II 到达模型导致阻力系数上升。

III阶段：高压区 II 在锥面上传播，作用面积增大，曲线开始上升。由于高压区 II 压力以及尺度较高压区 I 大，曲线上升所达到的峰值比阶段 I 峰值更大。

IV阶段：曲线呈现下降直至流场达到稳定，这主要由于高压区 II 运动至流场外，低压区 II 到达尖锥模型并继续向前传播导致。

进一步来讲，由于 JF-12 激波风洞其它喷管起动流场与图 3 所示的喷管起动流场类似，因此 Cd-t 曲线的定性走势对其他喷管也适用。

四、结论

本文应用数值模拟方法，对 JF-12 激波风洞 $\phi 1.5\text{m}$ 喷管起动过程进行了分析。结合激波风洞流场波系结构特性及压力随时间衍化情况，将模型冲击载荷曲线走势分为四阶段，对气动力曲线走势原因有了更深刻的认识。此外，由于激波风洞起动过程波系结构类似，Cd-t 曲线的定性走势亦适用于 JF-12 风洞其它喷管。

参 考 文 献

- 1 罗也凡，毕志献. 脉冲型风洞用加速度计测力天平[J]. 气动实验与测量控制, 1996, 3(10): 59-64.
- 2 HOFFMANN KA. Computational Fluid Dynamics for Engineers [M]. Engineering Education SystemTM, USA, 1993.