

Abaqus 的 CEL 算法在整流罩平抛仿真

Application of Abaqus' CEL Algorithm in Fairing Forizontal Projection Simulation

薛子旺¹, 杨浩亮¹, 王英诚¹, 明爱珍¹, 杨毅强², 孙良杰¹

Xue Zi-wang¹, Yang Hao-liang¹, Wang Ying-cheng¹, Ming Ai-zhen¹, Yang Yi-qiang², Sun Liang-jie¹

(1.北京中科宇航技术探索有限公司,北京 100076;2.中国科学院力学研究所,北京 100080)

摘要:整流罩的平抛分离方式与旋转分离方式相比,具有罩内包络空间大、可容纳更多卫星、对飞行的干扰小、适应大质量大过载等优势。针对国内无法在真空罐内进行平抛分离试验验证的问题,通过 Abaqus 基于欧拉-拉格朗日流固耦合算法(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)的计算优势进行平抛整流罩数字模拟仿真,为结构设计和平抛技术验证提供支撑。首先建立了整流罩有限元模型的简化方法,基于简化模型进行复杂流固耦合算法,对其真空分离试验进行了仿真预示。基于 CEL 算法的仿真结果能较好地模拟出平抛分离试验,可以作为工程应用提供指导和方法。

关键词:平抛整流罩;流固耦合;CEL 算法

中图分类号:V416.5 **文献标识码:**A

0 引言

从“嫦娥登月”到玉兔月球车登月成功,从“天宫传说”到中国空间站的建立,中国航天把传说变为了现实。从东方红一号,风云系列卫星到北斗全球立体式组网导航定位,从点到线,从线到面建立了为区域和全球服务的卫星体系,中国航天做出了巨大贡献。随着科技发展,发射运载量在 30~120 颗卫星之间,甚至更多颗,实现多星堆栈发射方式。传统技术和结构方式不能满足多星堆栈发射方式,因此需要进行技术探索和研究。

平抛整流罩分离技术是研究和探索课题之一,整流罩平抛可以为卫星提供更大的容积空间,增加卫星容积率;减少整流罩分抛对多星堆栈卫星磕碰概率。国际上主要的火箭,如大力神 IV、阿里安 V、德尔它 IV 等大运载能力的火箭,整流罩分离均采用了平抛分离方式。因此研究整流罩的平抛方式是提升运载能力提升、提高分离可靠性的必然选择。

在火箭穿过大气层后,整流罩完成其保护作用

则立即实施分离,因此整流罩真实的分离环境是真空。若在地面实施真空分离试验,不仅需要大规模真空场地,对试验设备要求严格、耗资巨大、试验成本极高。目前广泛应用的是 CEL 算法模拟仿真,利用数字模拟仿真技术不仅可以节省大量的试验费用,并且快速的调整参数进行对比,验证数字边界条件对试验结果的影响。本研究基于 CEL 算法在整流罩平抛技术方面的应用,主要是整流罩地面分离试验和真空环境的区别、分离作用力大小对分离速度的影响以及分离能量差别带来的影响^[1-2]。

1 整流罩平抛动力学分析

1.1 平抛动力学分析

整流罩分离时,提供两体相对运动推力的为平抛能源装置。一般来说,整个分离过程分为两个阶段:(1)能源装置作用阶段,相对箭体,两分离半罩有一定的加速度;(2)能源装置作用结束,两分离半罩运动速度不再改变,以恒定相对速度运动。

整流罩的平抛分离能源一般为条形无污染炸

收稿日期:2022-10-21

作者简介:薛子旺,高级工程师,参与力箭 1 号整箭振动强度,管路振动疲劳分析工作,从事方向为:固体,液体运载火箭振动强度,管路疲劳,及动力学分析。

药索。美国太空探索技术公司(Space X)秉承简单化、通用化的设计理念,采用了可检可测的非火工气动分离能源装置。

假设分离能源装置提供的推力为 $F_p(t)$, 分离能源作用时间为 T , 则分离能源作用过程中半罩的相对加速度为:

$$a_i = F_p(t_i) / m \quad (1)$$

式中: m 为半罩的质量。

初始时刻半罩的相对速度 $v_0=0$, 则下一时刻, 其相对速度为:

$$v_i = v_{i-1} + a(t_i) \cdot \Delta t \quad (2)$$

则整流罩半罩距离箭体的径向距离为:

$$L_i = L_{i-1} + v_{i-1} \cdot \Delta t \quad (3)$$

在分离能源作用完成后, 半罩继续匀速向外运动, 则:

$$L_i = \int_0^T F_p(t_i) / m dt + v_T(t-T) \quad (4)$$

考虑到外力的合力与半罩质心不重合时, 分离能源的推力作用会产生力矩, 因此整流罩不仅有平移还有绕质心的转动, 从而影响整流罩内部的包络空间。同样, 分离过程半罩的转动角度为:

$$\alpha_i = \int_0^T M(t_i) / J dt + \omega_T(t-T) \quad (5)$$

式中: $M(t_i)$ 为不平衡分离冲量产生的力矩, J 为半罩的转动惯量, ω_T 为分离冲量作用完成时刻半罩的角速度^[3-4]。

若地面试验不在真空环境下进行, 则还应考虑重力和空气阻力的作用。整流罩半罩的受力分析如图 1 所示, 主要包括分离能源的推力 F_p 、地面空气阻力的合力 F_x 和重力 F_y 。

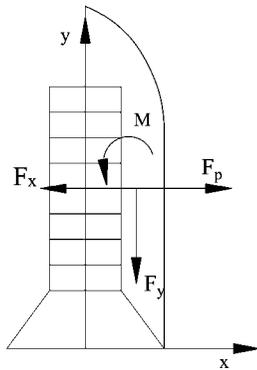


图 1 地面试验半罩受力分析图

地面试验过程中, 整流罩在 x, y 方向上的位移和转动角度如下式所示:

$$\begin{cases} L_{xi} = \int_0^T (F_p(t_i) - F_{xi}) / m dt + v_T(t-T) \\ L_{yi} = g t_i^2 / 2 \\ \alpha_i = \int_0^T M_p(t_i) / J dt + \omega_T(t-T) \end{cases} \quad (6)$$

在地面分离试验中, 可监控整流罩半罩的加速度和位移, 与理论计算和仿真结果进行对照, 从而修正得到真空环境下的运动状态^[5-6]。

如图 2 所示, 在地面试验时, 应特别关注整流罩与载荷的碰撞风险。假设整流罩为刚体, 不考虑结构变形, 其包络曲线为 $y_1=f(x)$, 卫星高度 $y_2=H$ 。在整流罩分离过程中, 其质心由 O_1 点运动到 O_2 ,

位置向量为 $A = \overrightarrow{O_1 O_2} = \begin{bmatrix} L_X \\ L_Y \\ 0 \end{bmatrix}$, 坐标系转换矩阵为:

$$B = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 则半罩的包络曲线在原坐标}$$

系的表达式为:

$$y_1' = B y_1 + A = g(x) \quad (7)$$

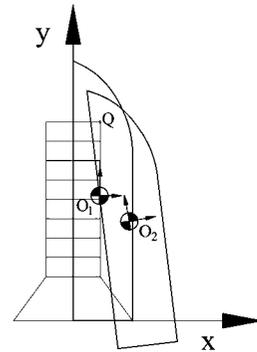


图 2 地面试验半罩运动过程图

易碰点主要是卫星上的 Q 点, 与整流罩之间的最小距离随半罩的运动而变化, 具体可表达为:

$$d(I) = g(x_0) - H \quad (8)$$

1.2 流固耦合 CEL 算法介绍

流固耦合方程由质量守恒, 动量守恒, 和能量守恒以及连续方程构建而成, 欧拉物质界面上锚点和拉格朗日单元边界上节点的相互作用力表示为:

$$F = K_p d_p \quad (9)$$

式中: K_p 为罚函数刚度, 与时间步长, 材料属性相关; d_p 为相对位移矢量。

仅当拉格朗日节点在欧拉材料发生贯穿时才考虑想对作用力, 即是:

$$d^*n > 0 \quad (10)$$

式中： d 为格朗日节点的实际位移； n 为拉格朗日网格外表面法向量。

从上可看出，纯欧拉计算和纯拉格朗日计算都各自的优势，但是也存在一定的缺陷。将二者有机结合可以解决两者都棘手的问题。CEL 算法并采用有限差分法求解带有移动边界的二维流体动力学问题，网格点可以随物质点同步移动，也可以在空间中固定不动。因此 CEL 算法在解决物体碰撞、流体动力学及流体与固体之间的相互作用时，具有明显优势^[7-8]。

2 基于 CEL 算法的平抛仿真分析

2.1 有限元模型介绍

目前我国没有真空整流罩分离试验能力，无法进行飞行环境条件下平抛分离试验。基于 Abaqus/Explicit 显式动力学解决复杂流体-结构之间的相互作用问题时具有强大的优势，将整流罩自身的弹性变形与气动分析进行解耦，对整流罩的结构合理化建模，再进行仿真计算^[9-10]。

本文针对直径 5.2m、长 12.7m 的整流罩项目，整流罩由端头帽、冯卡门锥段、柱段和段框构成，半罩质量为 1220kg。分离能源采用冷气推冲装置，模拟开罩时间为 0.3s。本文仿真主要是模拟地面分离试验工况，考虑气动和重力的影响作用，建立流固耦合模型。

2.2 建模和分析工况

Abaqus/Explicit 显式动力学模型仿真，基于简化模型进行搭建。对整流罩，卫星，适配器以及流场模型进行简化，对整流罩进行柔性体和刚形体模型分析对比，最大变形量为 50mm，相对整流罩整体而言可以忽略不计^[11]。因此使用简化刚体模型求解。可以节约大量计算资源和时间，求解效率得到提高^[12-13]。

(1) 地面试验时，整流罩内的卫星适配器和卫星模拟件均会影响流场的分布，因此建立卫星适配器和卫星的模型。添加材料属性后，卫星适配器和卫星具有质量和惯性特性，如图 3 所示。

(2) 本文采用冷气推冲装置作为分离能源，推冲装置的初始

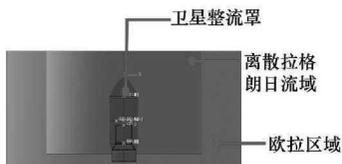


图 3 分析简化模型

推力为 10000N，行程为 120mm，共使用 6 个推冲装置。当推杆完全推出后，推冲装置端头脱离整流罩，不再产生推力作用。单个推冲装置的推力曲线随两半罩之间相对距离的曲线如图 4 所示。

(3) 建立整流罩内、外流场，在流域内离散出整流罩内部空腔和外部附近流场，空气流体体积分数 EVF=1，表示其为流场分析流域，其中流场速度为 0。完成流固耦合模型建立，模拟整流罩在空气中的平抛分离动力学仿真^[5]。

欧拉区域半径为 20m，高为 42m。在内部离散的流畅区域半径为 14m，高同为 42m，网格大小为 0.2m 数量为 62 万网格。

3 结果分析

分析仿真结果发现，在初始分离时，罩内的气体量相对较少：(1) 由于两半罩之间的分离缝隙小，半罩的运动导致罩内的容积变化，而外部的气体无法及时补充进来，从而导致罩内形成一定的负压；(2) 罩内流道的气体流速相对较大，根据伯努利方程，此时罩内的压强小于罩外的压强，形成较大的压强差。这两方面的因素都会在分离的初始阶段阻碍整流罩分离。随着两半罩距离的增加，罩内的气体得到及时补充，罩内压强逐渐增大，因此整流罩受到的气动阻力变小，不为恒定值，随整流罩的运动而变化^[6]。

从图 5 可以看出整流罩分离时，内外流场分界面流速大，外部流场向内部流动，这是由于整流罩在分离时外部流场压强大于内部流场压强，外部空气向内部流动的结果。这预示着地面空气作用对整流罩打开有较大影响，因此提取地面试验和真空环境中的仿真结果进行比较，分析气流数据对整流罩的打开影响作用，为地面试验提供依据，在进行修正后为真空环境分离提供数据支持^[7]。

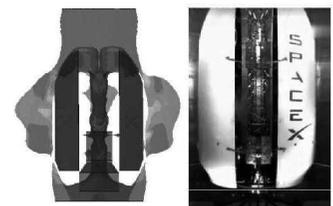


图 5 整流罩分离过程

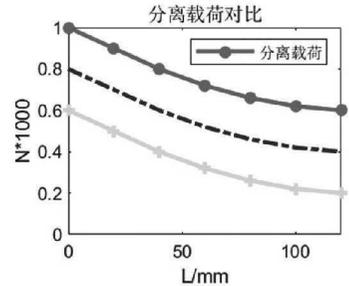


图 4 推力曲线

由图 6 在真空状态刚性分离加速度(a),柔性分离加速度(b),可以看出随着分离载荷增加,分离加速度随着提高。整流罩分离要求快速、果断,分离速度是衡量分离效率和安全性的重要指标。

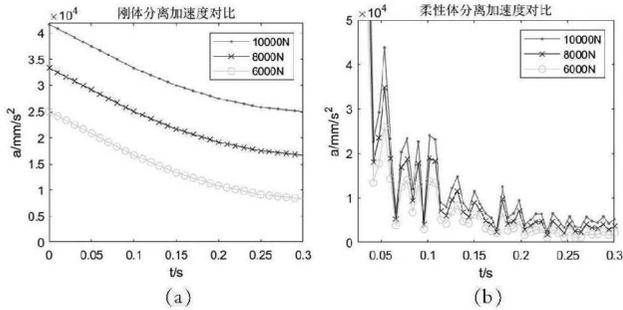


图 6 分离加速度随载荷变化

将工况下整流罩的运动速度如图 7 所示,可见在分离过程中,整流罩在极短时间内被抛出,避免与多星堆栈分离发生磕碰;在飞行真空工况比在地面试验运动速度更快。

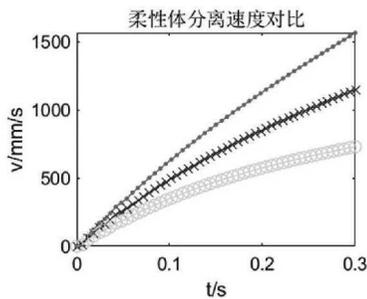


图 7 整流罩分离速度

在冷气推冲力的作用下,整流罩在真空和地面分离时距离迅速上升,真空分离距离比地面大,确保在分离过程中不发生磕碰,见图 8。同时不同大小的分离能量会影响分离距离,通过调整冷气推冲的压强,改变推力,以满足分离系统的需求。

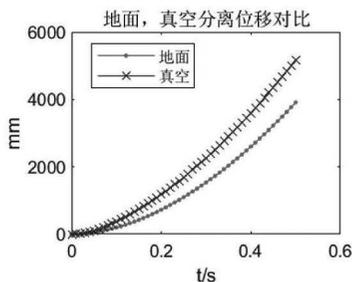


图 8 整流罩分离位移对比

4 结论

在设计和试验前期,通过欧拉-拉格朗日流固耦合算法对整流罩平抛试验进行仿真,可以替代试

验进行数据优化,节约大量试验时间和成本。并且通过仿真结果的数据可以指导设计和优化。因此数据仿真可以得到以下结论:

(1)利用刚体模型计算,能够快速地对整流罩平抛仿真进行模拟,以便快速更新迭代参数进行优化,为分离方案的前期设计提供支撑。

(2)利用复杂流固耦合算法,模拟了地面空气环境中的整流罩分离情况,在真空环境中比在地面分离速度迅速,确保地面仿真设计满足分离要求,为整流罩的地面试验提供依据。

(3)对比了飞行真空环境和地面试验的仿真情况,后续根据地面试验结果,可以有效地对仿真进行修正,以保证飞行环境中整流罩分离的可靠性。

(4)通过流固耦合算法可以优化分离速度和时间,为分离能源,和结构设计提供依据。

参考文献

- [1] 李刚,艾森,唐宵汉,等.Abaqus 的 CEL 算法在整流罩地面分离试验仿真中的应用[C].中国计算力学大会 2014 暨第三届钱令希计算力学奖颁奖大会论文集,2014.
- [2] 程修妍,范博超,荣吉利,等.柔性整流罩地面展开试验仿真分析与飞行状态分离预测[J].兵工学报,2018,39(3):608-617.
- [3] 张大鹏,雷勇军,柳海龙,等.大型柔性整流罩分离特点仿真分析[J].兵工学报,2015,34(22):115-120.
- [4] 李刚,唐宵汉,艾森,等.大型整流罩地面分离仿真预示与试验研究[J].宇航学报,2015,36(7):833-839.
- [5] 艾森.大型整流罩分离仿真研究[D].大连:大连理工大学,2015.
- [6] 崔奇.飞行器整流罩分离的动力学模拟及可靠性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [7] 张大利.火箭整流罩分离分离过程仿真分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [8] 何智航,聂宏,杨春,等.载荷-火箭分离导向机构参数设计及动力学分析[J].宇航学报,2014,35(6):617-624.
- [9] 徐永成,苟永杰,王石刚.某卫星整流罩分离仿真分析[J].上海航天,2009(1):53-56.
- [10] 董寻虎,骆剑.大型柔性整流罩抛罩多体动力学仿真[J].上海航天,2005(5):28-33.
- [11] 马忠辉.大型弹性整流罩分离特点分析[J].中国科学,2009,39(3):482-489.
- [12] 李哲,范学领,孙秦,等.大型整流罩分离动力学简化建模及仿真分析[J].固体火箭技术,2012,35(5):583-587.
- [13] 张小伟,王延荣,谢胜百,等.弹性整流罩分离的流固耦合仿真方法[J].北京航空航天大学学报,2009,35(8):976-979.