



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114112307 B

(45) 授权公告日 2022.08.09

(21) 申请号 202111611453.4

审查员 贺慧兰

(22) 申请日 2021.12.27

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 114112307 A

(43) 申请公布日 2022.03.01

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 刘秋生 李章国 朱志强 解京昌  
林海

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
专利代理师 焦海峰

(51) Int. Cl.

G01M 10/00 (2006.01)

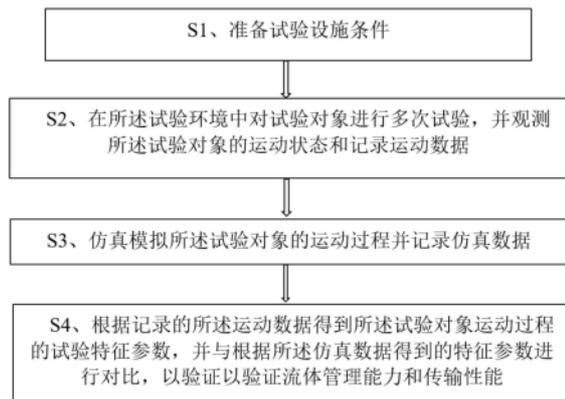
权利要求书3页 说明书14页 附图4页

(54) 发明名称

一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法

(57) 摘要

本发明公开了一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,包括步骤:S1、准备试验设施条件;S2、在所述试验环境中对试验对象进行多次试验,并观测所述试验对象的运动状态和记录运动数据;S3、仿真模拟所述试验对象的运动过程并记录仿真数据;S4、根据记录的所述运动数据得到所述试验对象运动过程的试验特征参数,并与根据所述仿真数据得到的特征参数进行对比,以验证以验证流体管理能力和传输性能。通过本发明模拟方法能够在模拟空间微重力环境中推进剂或流体在 $1.5 \times 10^{-2}g_0$ 至 $1.6 \times 10^{-1}g_0$ 的加速度变化范围的低重力和变重力过程中空间在轨流体与推进剂两相流动力学特征的地基模拟实验研究。



1. 一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、准备试验设施条件;

S2、在试验环境中对试验对象进行多次试验,并观测所述试验对象的运动状态和记录运动数据;

S3、仿真模拟所述试验对象的运动过程并记录仿真数据;

S4、根据记录的所述运动数据得到所述试验对象运动过程的试验特征参数,并与根据所述仿真数据得到的特征参数进行对比,以验证流体管理能力和传输性能;

所述S1包括:

S11、利用微重力落塔设备提供微重力环境;

S12、在所述微重力环境中创建为所述试验对象提供进行变加速运动条件和观测记录条件的装置;

S13、准备试验观测对象和所述试验观测对象的载体;

在所述S13中,所述试验观测对象的载体具体为模拟试验贮箱,所述模拟试验贮箱用于密封贮存试验流体介质,所述试验观测对象为所述试验流体介质;

其中,根据相似性原理,所述模拟试验贮箱设置为两个,包括:大模拟试验贮箱和小模拟试验贮箱,所述试验流体介质包括氟化液FC-72和无水乙醇;

所述相似性原理包括运动相似和几何相似;

所述几何相似的设计原理要求任何工况下模拟试验贮箱与原型贮箱间的无量纲邦德数相等,即满足公式:

$$Bo = \rho a R^2 / \sigma = \rho_m a_m R_m^2 / \sigma_m$$

其中,Bo:邦德数; $\rho$ :液体密度;R:模拟试验贮箱半径; $\sigma$ :液体表面张力;a:环境加速度;m:落塔试验模型,

上述邦德数公式表示流体介质所受重力与表面张力之比,当重力远比液体表面张力小时,表面张力起主导作用;

根据上面级火箭重定位时的加速度a给出的原型贮箱邦德数,求出模拟试验贮箱所需要施加的加速度 $a_m$ ,其中加速度a由重定位推力和火箭上面级质量确定:

$$a_m = a (\rho / \rho_m) (R / R_m)^2 (\sigma / \sigma_m)$$

所述运动相似的原理目的是保持两个模型之间的运动相似,以反映两者之间液体迁移过程所用的时间关系,即重定位时间关系,需要满足流体力学中的无量纲运动相似韦伯数相等,即满足公式:

$$We = \rho R v^2 / \sigma = \rho_m R_m v_m^2 / \sigma_m$$

其中,v, $v_m$ 分别表示真实贮箱和模拟试验贮箱内液体迁移的特征速度,上述韦伯公式表示惯性力与表面张力之比;

对所述韦伯公式作量纲变换使其包含时间项,得到:

$$We = \rho R a^2 t^2 / \sigma = \rho_m R_m a_m^2 t_m^2 / \sigma_m,$$

其中,t, $t_m$ 分别为真实贮箱和模拟试验贮箱内液体迁移的特征时间值。

2. 根据权利要求1所述的一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,其

特征在于,在所述S2中,所述试验对象在所述试验环境中的试验境况分为两类,包括静态工况试验和动态工况试验,且所述试验对象在所述静态工况和动态工况下分别进行多次试验;

在所述静态工况状态下,所述试验对象选用所述大模拟试验贮箱,并选用所述无水乙醇作为试验流体介质;

在所述动态工况状态下,所述试验对象选用所述小模拟试验贮箱,并选用所述氟化液FC-72作为试验流体介质。

3. 根据权利要求1所述的一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,其特征在于,在所述S3中,所述仿真模拟所述试验对象的运动过程为:

根据液体与固体的浸润现象建立理论模型;

再按照建立在欧拉网格下的界面追踪方法求解推进剂自由界面流动问题,通过建立描述流体运动的控制方程,再根据流体力学的无量纲参数邦德方程,重定位各个过程的特征时间值 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_5$ ;

其中,邦德数定义为:

$$B_0 = aR^2/\beta$$

其中, $\beta = \sigma/\rho$ ,

重定位各个过程的各特征时间值分别表示为:

$t_1$ 表示液体到达贮箱底部; $t_2$ 表示喷泉碰撞气-液界面; $t_3$ 表示喷泉碰撞箱顶; $t_4$ 表示液体从箱顶离开; $t_5$ 表示出口及附近区域含气率小于5%;

数值仿真计算得出 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_5$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,在所述S12中,所述装置包括加速度施加模块(2)、光学记录模块(3)和数据采集处理模块(4);

其中,所述加速度施加模块(2)用于给在落舱内自由下落的所述模拟试验贮箱施加沿下落方向的加速度,所述光学记录模块(3)设置在所述模拟试验贮箱的一侧并用于观测所述模拟试验贮箱内试验流体介质的运动过程,所述数据采集处理模块(4)与所述光学记录模块(3)信号连接且用于采集并保存所述光学记录模块(3)观测记录的信息;

其中,所述加速度施加模块(2)对所述模拟试验贮箱施加不同的力产生不同的加速度,所述加速度根据不同尺寸和不同工况条件而定,所述加速度设置为 $a_m$ ,且

$$a_m = a(\rho/\rho_m)(R/R_m)^2(\sigma_m/\sigma)$$

所述 $a_m$ 的选取根据所述模拟试验贮箱的尺寸和实验液体物性参数确定。

5. 根据权利要求4所述的一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,其特征在于,所述加速度施加模块(2)包括长直导轨(21)、载物台(22)和电机驱动单元(23),所述模拟试验贮箱设置在所述载物台(22)上,所述载物台(22)滑动安装在所述长直导轨(21)上,所述电机驱动单元(23)与所述载物台(22)连接并驱动所述载物台(22)移动并带动所述模拟试验贮箱变速运动,所述加速度施加模块(2)连接有外部控制模块(5),所述外部控制模块(5)与所述电机驱动单元(23)连接;

所述外部控制模块(5)用于在接收到触发信号时发送控制指令以调控所述电机驱动单元(23)驱动所述载物台(22)按照设定的运动参数运动,从而给所述模拟试验贮箱施加设定的加速度值。

6. 根据权利要求5所述的一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,其特征在于,所述模拟试验贮箱包括第一半圆箱体(11)和第二半圆箱体(12),所述第一半圆箱体(11)和所述第二半圆箱体(12)通过法兰(8)连接固定,且在所述第一半圆箱体(11)和所述第二半圆箱体(12)端部连接处设置有密封块(9),所述密封块(9)用于紧密对接所述第一半圆箱体(11)和所述第二半圆箱体(12);

其中,所述第一半圆箱体(11)和所述第二半圆箱体(12)设置为无色透明密封罐体且箱体厚度不超过两毫米。

7. 根据权利要求6所述的一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,其特征在于,在所述模拟试验贮箱底部设置有插接底座(7),所述箱体通过所述插接底座(7)安装在所述载物台(22)上,所述插接底座(7)包括连接座体(76)和设置在所述连接座体(76)上安装槽(71)、对插凸起部(72)、安装部(73)、限位块(74)、限位槽(75);

所述安装槽(71)设置在连接座体(76)顶部,所述安装部(73)设置在所述安装槽(71)顶部两侧,且所述安装部(73)通紧固螺栓与所述第一半圆箱体(11)和/或所述第二半圆箱体(12)抵接;

所述限位槽(75)开设在连接座体(76)底部,所述限位块(74)形成于所述限位槽(75)两侧,所述对插凸起部(72)设置在所述限位块(74)上,且所述对插凸起部(72)向所述限位块(74)外侧凸出,在所述载物台上设置有安装座,所述安装座上开设有与所述插接底座(7)底部形状凹凸对应的凹槽,所述对插凸起部(72)对应插接在所述安装座上。

## 一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及推进剂模拟试验技术领域,具体涉及一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法。

### 背景技术

[0002] 根据航天器飞行过程中所受过载的情况,贮箱中流体的运动可分为失重、微重、低重、常重和超重数种工况,目前低重环境下充液贮箱小幅线性晃动的动力学特性研究比较成熟,其理论模型广泛应用于航天器的工程设计。

[0003] 但随着航天器的发展,高定位精度航天器贮箱内的液体晃动面临新问题,航天器具有较高的定位精度,在姿态机动稳定过程中,使得航天器贮箱面临微重力学环境,贮箱内推进剂的表面张力开始显现,可能导致贮箱内推进剂的晃动呈现复杂晃动特性,对平台高精度姿态控制产生影响。尤其是在变加速度的情况下,如何进一步优化推进剂管理,研究推进剂设计间歇沉底的相关影响因素和规律已经成为目前面临的问题。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,以解决现有技术中在微重力变加速情况下研究推进剂管理的技术问题。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明具体提供下述技术方案:

[0006] 一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,包括以下步骤:

[0007] S1、准备试验设施条件;

[0008] S2、在试验环境中对试验对象进行多次试验,并观测所述试验对象的运动状态和记录运动数据;

[0009] S3、仿真模拟所述试验对象的运动过程并记录仿真数据;

[0010] S4、根据记录的所述运动数据得到所述试验对象运动过程的试验特征参数,并与根据所述仿真数据得到的特征参数进行对比,以验证流体管理能力和传输性能。

[0011] 作为本发明的一种优选方案,所述S1包括:

[0012] S11、利用微重力落塔设备提供微重力环境;

[0013] S12、在所述微重力环境中创建为所述试验对象提供进行变加速运动条件和观测记录条件的装置;

[0014] S13、准备试验观测对象和所述试验观测对象的载体。

[0015] 作为本发明的一种优选方案,在所述S13中,所述试验观测对象的载体具体为模拟试验贮箱,所述模拟试验贮箱用于密封贮存试验流体介质,所述试验观测对象即为所述试验流体介质;

[0016] 其中,根据相似性原理,所述模拟试验贮箱设置为两个,包括:大模型贮箱和小模型贮箱,所述试验流体介质包括氟化液FC-72和无水乙醇。

[0017] 作为本发明的一种优选方案,所述相似性原理包括运动相似和几何相似:

[0018] 所述几何相似的设计原理要求任何工况下模拟试验贮箱与原型贮箱间的无量纲邦德(Bond)数相等,即满足公式:

$$[0019] \quad Bo = \rho a R^2 / \sigma = \rho_m a_m R_m^2 / \sigma_m$$

[0020] 其中,Bo:邦德数; $\rho$ :液体密度;R:模拟试验贮箱半径; $\sigma$ :液体表面张力;a:环境加速度;m:落塔试验模型,

[0021] 上述邦德数公式表示流体介质所受重力与表面张力之比,当重力远比液体表面张力小时,表面张力起主导作用;

[0022] 根据上面级火箭重定位时的加速度a给出的原型贮箱邦德数,求出模拟试验贮箱所需要施加的加速度 $a_m$ ,其中加速度a由重定位推力和火箭上面级质量确定:

$$[0023] \quad a_m = a (\rho / \rho_m) (R / R_m)^2 (\sigma_m / \sigma)$$

[0024] 所述运动相似的原理目的是保持两个模型之间的运动相似,以反映两者之间液体迁移过程所用的时间(即重定位时间)关系,需要满足流体力学中的无量纲运动相似韦伯数相等,即满足公式:

$$[0025] \quad We = \rho R v^2 / \sigma = \rho_m R_m v_m^2 / \sigma_m$$

[0026] 其中,v, $v_m$ 分别表示真实贮箱和模型贮箱内液体迁移的特征速度,上述韦伯公式表示惯性力与表面张力之比。

[0027] 对所述韦伯公式作量纲变换使其包含时间项,得到:

$$[0028] \quad We = \rho R a^2 t^2 / \sigma = \rho_m R_m a_m^2 t_m^2 / \sigma_m,$$

[0029] 其中,t, $t_m$ 分别为真实贮箱和模型贮箱内液体迁移的特征时间值。

[0030] 作为本发明的一种优选方案,在所述S2中,所述试验对象在所述试验环境中的试验境况分为两类,包括静态工况试验和动态工况试验,且所述试验对象在所述静态工况和动态工况下分别进行多次试验;

[0031] 在所述静态工况状态下,所述试验对象选用所述大模型贮箱,并选用所述无水乙醇作为试验流体介质;

[0032] 在所述动态工况状态下,所述试验对象选用所述小模型贮箱,并选用所述氟化液FC-72作为试验流体介质。

[0033] 作为本发明的一种优选方案,在所述S3中,所述仿真模拟所述试验对象的运动过程为:

[0034] 根据液体与固体的浸润现象建立理论模型;

[0035] 再按照建立在欧拉网格下的界面追踪方法(VOF法)求解推进剂自由界面流动问题,通过建立描述流体运动的控制方程,再根据流体力学的无量纲参数邦德方程,重定位各个过程的特征时间值,

[0036] 其中,邦德数定义为:

$$[0037] \quad B_0 = a R^2 / \beta$$

[0038] 其中, $\beta = \sigma / \rho$ ,

[0039] 重定位各个过程各特征时间值分别表示为:

[0040]  $t_1$ 表示液体到达贮箱底部; $t_2$ 表示喷泉碰撞气-液界面; $t_3$ 表示喷泉碰撞箱顶; $t_4$ 表示液体从箱顶离开; $t_5$ 表示出口及附近区域含气率小于5%;

[0041] 数值仿真计算得出 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_5$ 。

[0042] 作为本发明的一种优选方案,在所述S12中,所述装置包括加速度施加模块、光学记录模块和数据采集处理模块,

[0043] 其中,所述加速度施加模块用于给在落舱内自由下落的所述模拟试验贮箱施加沿下落方向的加速度,所述光学记录模块设置在所述模拟试验贮箱的一侧并用于观测所述模拟试验贮箱内试验流体介质的运动过程,所述数据采集处理模块与所述光学记录模块信号连接且用于采集并保存所述光学记录模块观测记录的信息;

[0044] 其中,所述加速度施加模块对所述模拟试验贮箱施加不同的力产生不同的加速度,所述加速度根据不同尺寸和不同工况条件而定,所述加速度设置为 $a_m$ ,且

[0045]  $a_m = a (\rho/\rho_m) (R/R_m)^2 (\sigma_m/\sigma)$

[0046] 所述 $a_m$ 的选取根据所述模拟试验贮箱的尺寸和实验液体物性参数确定。

[0047] 作为本发明的一种优选方案,所述加速度施加模块包括长直导轨、载物台和电机驱动单元,所述模拟试验贮箱设置在所述载物台上,所述载物台滑动安装在所述长直导轨上,所述电机驱动单元与所述载物台连接并驱动所述载物台移动并带动所述模拟试验贮箱变速运动,所述加速度施加模块连接有外部控制模块,所述外部控制模块与所述电机驱动单元连接,

[0048] 所述外部控制模块用于在接收到触发信号时发送控制指令以调控所述电机驱动单元驱动所述载物台按照设定的运动参数运动,从而给所述模拟试验贮箱施加设定的加速度值。

[0049] 作为本发明的一种优选方案,所述模拟试验贮箱包括第一半圆箱体和第二半圆箱体,所述第一半圆箱体和所述第二半圆箱体通过法兰连接固定,且在所述第一半圆箱体与所述第二半圆箱体端部连接处设置有密封块,所述密封块用于紧密对接所述第一半圆箱体和所述第二半圆箱体;

[0050] 其中,所述第一半圆箱体和所述第二半圆箱体设置为无色透明密封罐体且箱体厚度不超过两毫米。

[0051] 作为本发明的一种优选方案,在所述模拟试验贮箱底部设置有插接底座,所述箱体通过所述插接底座安装在所述载物台上,所述插接底座包括连接座体和设置在所述连接座体上安装槽、对插凸起部、安装部、限位块、限位槽;

[0052] 所述安装槽设置在连接座体顶部,所述安装部设置在所述安装槽顶部两侧,且所述安装部通紧固螺栓与所述第一半圆箱体和/或所述第二半圆箱体抵接;

[0053] 所述限位槽开设在连接座体底部,所述限位块形成于所述限位槽两侧,所述对插凸起部设置在所述限位块上,且所述对插凸起部向所述限位块外侧凸出,在所述载物台上设置有安装座,所述安装座上开设有与所述插接底座底部形状凹凸对应的凹槽,所述对插凸起部对应插接在所述安装座上。

[0054] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0055] 本发明提供了一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,试验原理是通过观测自由下落落舱内安置的模型贮箱试验液体的形态分布规律,利用流体力学相似性原理,分析和再现空间不同环境下火箭上面级真实贮箱内推进剂在轨的气/液分布和重定位过程,并与数值仿真结果进行比较,最终确定设定工况下推进剂重定位过程中特征

时间参数。

[0056] 包括步骤:S1、准备试验设施条件;S2、在所述试验环境中对试验对象进行多次试验,并观测所述试验对象的运动状态和记录运动数据;S3、仿真模拟所述试验对象的运动过程并记录仿真数据;S4、根据记录的所述运动数据得到所述试验对象运动过程的试验特征参数,并与根据所述仿真数据得到的特征参数进行对比,以验证以验证流体管理能力和传输性能。

[0057] 通过本发明模拟方法能够在模拟空间微重力环境中推进剂或流体在 $1.5 \times 10^{-2}g_0$ 至 $1.6 \times 10^{-1}g_0$ 的加速度变化范围的低重力和变重力过程中空间在轨流体与推进剂两相流动动力学特征的地基模拟实验研究。

## 附图说明

[0058] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0059] 图1为本发明实施例提供的模拟方法步骤流程图;

[0060] 图2为本发明实施例提供的S1的步骤结构示意图;

[0061] 图3为本发明实施例中特征时间值的数值模拟数据和试验数据的对比结果图。

[0062] 图4为本发明实施例中应用到的试验装置结构图;

[0063] 图5为本发明实施例中模拟试验贮箱与插接底座连接示意图;

[0064] 图6为本发明实施例中插接底座的局部结构示意图;

[0065] 图中的标号分别表示如下:

[0066] 1-模拟试验贮箱;2-加速度施加模块;3-光学记录模块;4-数据采集处理模块;5-外部控制模块;6-背景光源;7-插接底座;8-法兰;9-密封块;

[0067] 11-第一半圆箱体;12-第二半圆箱体;21-长直导轨;22-载物台;23-电机驱动单元;31-高速数字CCD;32-模拟CCD;

[0068] 71-安装槽;72-对插凸起部;73-安装部;74-限位块;75-限位槽;76-连接座体;231-伺服电机;232-人机交互界面;233-电机驱动器。

## 具体实施方式

[0069] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0070] 如图1及图2所示,本发明提供了一种微重力-变速环境中推进剂管理的地基模拟试验方法,包括以下步骤:

[0071] S1、准备实验设施条件;

[0072] S2、在准备的试验环境中对试验对象进行多次试验,并观测试验对象的运动状态和记录运动数据;

- [0073] S3、仿真模拟试验对象的运动过程并记录仿真数据；
- [0074] S4、根据记录的运动数据得到试验对象运动过程的试验特征参数，并与根据仿真数据得到的特征参数进行对比，以验证流体管理能力和传输性能。
- [0075] S1包括：
- [0076] S11、利用微重力落塔设备提供微重力环境。
- [0077] A、微重力落塔设施
- [0078] 微重力落塔设施能获得数秒的微重力时间，是进行微重力科学研究最重要、最经济的地基微重力实验设施。试验选取位于中国首都北京中关村的自由落体实验落塔设施（隶属中国科学院力学研究所）。
- [0079] 该落塔的主要技术参数为：
- [0080] 微重力时间：3.6秒；
- [0081] 微重力水平： $10^{-5}g_0$ （双舱）， $10^{-2} \sim 10^{-3}g_0$ （单舱）（其中 $g_0$ 为当地重力加速度）；
- [0082] 实验有效载荷：70kg（双舱），90kg（单舱）；
- [0083] 回收过载： $\leq 15g_0$ （其中 $g_0$ 为当地重力加速度）；
- [0084] B、落舱：
- [0085] 落舱是落塔实验系统中搭载试件的重要专用设备。实验过程中，落舱从83米释放平台自由下落，可获得3.5秒的微重力时间。落舱分为双舱、单舱两种类型，双舱/单舱总实验载荷质量（包括内、外舱重量及用户搭载重量）为630kg，本实施例中，选用单舱型落舱（下称单舱）。
- [0086] 落塔实验单舱特点：单舱适用于对微重力水平要求为 $10^{-2} \sim 10^{-3}g_0$ 的实验研究工作，与双舱相比，单舱的结构要紧凑简单得多。主要是省去了内舱及其与外舱定位对接、不需要抽真空、无内舱锁闭-解锁等功能和工序，组装方便；增加了较大的搭载载荷质量裕度和几何尺寸裕度；试件直接安装在舱内特定台架上。
- [0087] 单舱主要技术参数：
- [0088] 微重力水平（残余加速度）：达到 $10^{-2} \sim 10^{-3}g_0$ 量级；
- [0089] 微重力时间：3.6s；
- [0090] 最大实验载荷重量（包括舱体重量及用户搭载重量）：630kg；
- [0091] 舱内载荷空间（用户实验设备最大有效空间）： $\leq \Phi 850 \times 1500\text{mm}$ ；
- [0092] 用户载荷总重量： $\leq 90\text{kg}$ 。
- [0093] S12、在微重力环境中创建为试验对象提供进行变加速运动条件和观测记录条件的装置，装置设置在落舱内。
- [0094] 装置包括加速度施加模块2、光学记录模块3和数据采集处理模块4，
- [0095] 其中，加速度施加模块2用于给在落舱内自由下落的所述模拟试验贮箱施加沿下落方向的加速度，光学记录模块3设置在模拟试验贮箱的一侧并用于观测模拟试验贮箱内试验流体介质的运动过程，数据采集处理模块4与光学记录模块3信号连接且用于采集并保存光学记录模块3观测记录的信息。
- [0096] S13、准备试验观测对象和试验观测对象的载体。
- [0097] 试验观测对象的载体具体为模拟试验贮箱，模拟试验贮箱用于密封贮存试验流体介质，试验观测对象即为试验流体介质。

[0098] C、推进剂模拟贮箱

[0099] 本落塔试验以流体力学相似准则为理论基础,保证模拟试验贮箱与上面级原型推进剂贮箱之间满足以下两个方面流体动力学相似:

[0100] (1) 几何相似

[0101] 因受落塔试验设备(落舱)的空间尺寸和微重力试验时间限制,一般不可能采用与实物1:1的模型进行落塔实验,而需要根据相似性原理选取和确定专门的缩比试验模型,一般为透明有机玻璃模型以便于试验观测。本试验中将采用2种不同缩比尺寸的小型试验贮箱。设计原理是要求任何工况下模拟试验贮箱与原型贮箱之间的无量纲邦德数(Bond)相等,即满足公式:

$$[0102] \quad Bo = \rho a R^2 / \sigma = \rho_m a_m R_m^2 / \sigma_m \quad (2.1)$$

[0103] 其中,Bo:邦德数; $\rho$ :液体密度;R:模拟试验贮箱半径; $\sigma$ :液体表面张力;a:环境加速度;m(下标):落塔试验模型,

[0104] 公式(2.1)的物理意义是流体介质所受重力与表面张力之比,当重力远比液体的表面张力小时,表面张力起主导作用。

[0105] 根据上面级火箭重定位时的加速度a给出的原型贮箱邦德数,求出模拟试验贮箱所需要施加的加速度 $a_m$ ,其中加速度a由重定位推力和火箭上面级质量确定:

$$[0106] \quad a_m = a (\rho / \rho_m) (R / R_m)^2 (\sigma_m / \sigma) \quad (2.2)$$

[0107] 根据已有的数值仿真结果,选取合适的相似参数,可以保证:在实验设备空间上,有效空间足够缩比模型实验贮箱及配套实验试件及测试,在实验时间上,微重力落塔提供的3.6秒的微重力时间可以满足实验的需求。

[0108] (2) 运动相似

[0109] 本试验在满足模拟试验贮箱内流体与常规上面级真实贮箱内推进剂静平衡位形相似的前提下,即满足邦德数相等之外,还要保持两模型间流体的运动相似,以反映两者之间液体迁移过程所用的时间(即重定位时间)关系。由此,引入另一个无量纲运动相似韦伯(Webber)数相等,即满足关系:

$$[0110] \quad We = \rho R v^2 / \sigma = \rho_m R_m v_m^2 / \sigma_m \quad (2.3)$$

[0111] 其中,v, $v_m$ 分别为真实贮箱和模型贮箱内液体迁移的特征速度。(2.3)式的物理意义是惯性力与表面张力之比。

[0112] 将上式作一下量纲变换使其包含时间项:

$$[0113] \quad We = \rho R a^2 t^2 / \sigma = \rho_m R_m a_m^2 t_m^2 / \sigma_m \quad (2.4)$$

[0114] 其中t, $t_m$ 分别为真实贮箱和模型贮箱内液体迁移的特征时间值。

[0115] 推进剂重定位过程中的模拟试验贮箱液体运动特征时间与火箭上面级真实贮箱内推进剂运动的特征时间关系由下式给出:

$$[0116] \quad t_m = (a / a_m) R / R_m^{1/2} (\rho \sigma_m / \rho_m \sigma)^{1/2} \quad (2.5)$$

$$[0117] \quad \text{或 } t_m = t (R_m / R)^{3/2} (\rho_m \sigma / \rho \sigma_m)^{1/2} \quad (2.6)$$

[0118] 根据相似性原理,本实施方式中模拟试验贮箱设置为两个,包括:大模型贮箱和小模型贮箱。

[0119] 根据试验要求,常规上面级间歇沉底组合推力方案为40N先作用210秒,300N后工

作60秒,此时推进剂贮箱将被施加一定量值的外加重定位加速度。由常规上面级质量、贮箱尺寸和推进剂燃料和氧化剂物性参数可以确定对应的空间重定位加速度 $a$ 和贮箱推进剂系统的Bond数 $Bo$ 如下:

[0120] (a) 一次启动前总质量 $M_1=5860\text{kg}$ ,

[0121] 40N作用时的加速度 $a_1=6.826\times 10^{-3}\text{m/s}^2(6.958\times 10^{-4}g_0)$

[0122] 相应的Bond数为: $Bo-1_1(\text{燃料})=51.77;Bo-1_1(\text{氧化剂})=89.54;$

[0123] 300N作用时的加速度 $a_2=5.119\times 10^{-2}\text{m/s}^2(5.219\times 10^{-3}g_0)$

[0124] 相应的Bond数 $Bo-1_2(\text{燃料})=388.2;Bo-1_2(\text{氧化剂})=671.45;$

[0125] (b) 二次启动前总质量 $M_2=5429\text{kg}$ ,

[0126] 40N作用时的加速度 $a_1=7.368\times 10^{-3}\text{m/s}^2(7.511\times 10^{-4}g_0)$

[0127] 相应的Bond数 $Bo-2_1(\text{燃料})=55.88;Bo-2_1(\text{氧化剂})=96.65;$

[0128] 300N作用时的加速度 $a_2=5.526\times 10^{-2}\text{m/s}^2(5.633\times 10^{-3}g_0);$

[0129] 相应的Bond数 $Bo-2_2(\text{燃料})=419.13;Bo-2_2(\text{氧化剂})=724.84$

[0130] 在落塔试验中,通过落舱内的加速度施加模块2给自由下落的模拟试验贮箱施加沿下落方向的(负)加速度,结合4图所示,

[0131] 加速度施加模块2包括长直导轨21、载物台22和电机驱动单元23,模拟试验贮箱设置在载物台22上,载物台22滑动安装在长直导轨21上,电机驱动单元23与载物台22连接并驱动载物台22移动并带动模拟试验贮箱变速运动,

[0132] 电机驱动单元23包括伺服电机231、可视化的人机交互界面232和电机驱动器233,人机交互界面232和伺服电机231与电机驱动器233连接,人机交互界面232和电机驱动器233与PLC控制器连接。

[0133] 可视化的人机交互界面232用于实验前设置伺服电机231的运行行程和加速度参数,工作人员可通过人机交互界面手动控制参数的设定,此为现有技术,本实施例中不做赘述。电机驱动器233用于在试验过程中驱动伺服电机231运动,伺服电机231用于驱动载物台22和模拟试验贮箱完成试验所需的运动。

[0134] 通过加速度施加模块2对模拟试验贮箱施加不同的力产生不同的加速度,加速度根据不同尺寸和不同工况条件而定,所述加速度设置为 $a_m$ ,且

$$[0135] \quad a_m = a(\rho/\rho_m)(R/R_m)^2(\sigma_m/\sigma) \quad (2.7)$$

[0136]  $a_m$ 的选取根据模拟试验贮箱的尺寸和实验液体物性参数确定。

[0137] 加速度施加模块2连接有外部控制模块5,外部控制模块5与电机驱动单元23连接,加速度施加模块2由外部控制模块5控制启动。外部控制模块5在接收到触发信号时发送控制指令以调控电机驱动单元23驱动载物台22按照设定的运动参数运动,从而给模拟试验贮箱施加设定的加速度值。

[0138] 外部控制模块5包括供电电源和外部触发单元,供电电源给加速度施加模块配电管理,外部触发单元包括计时模块和PLC控制器,计时模块计时达到设定时间将触发PLC控制器发送调控指令以调控加速度施加模块2启动工作。在试验过程中,PLC控制器按照在人机交互界面232内设置的运行行程和运动参数控制电机驱动器233输出动作,从而调控伺服电机231驱动载物台22带动模拟试验贮箱1运动。

[0139] 在本发明实施方式中提供了一种判定微重力状态的方式:即通过时间设定模拟试

验贮箱1是否处于微重力状态。

[0140] 例如,通过优先次实验得到模拟试验贮箱1自由下落t秒后可进入微重力状态,则可在PLC控制器上设定T秒,整个设备气动t秒后,外部输入信号就将信号传递给PLC控制器。

[0141] 因此,具体提供以下实施方式实现上述过程:

[0142] 在PLC控制器中预先设置有用于表示模拟试验贮箱1达到微重力试验状态的预设时间,计时模块用于统计模拟试验贮箱1运动时间,且当计时模块统计的运动时间达到预设时间时,计时模块形成外部触发信号并向PLC控制器发送外部触发信号,PLC控制器接收外部触发信号后形成控制指令,并同时向电机驱动器223、光学记录模块3和数据采集处理模块4发送控制指令以调控光学记录模块2和数据采集处理模块4开始工作。

[0143] 根据上述的相似准则、实际贮箱尺寸和加速度,模拟试验贮箱形状应与常规上面级原型贮箱相似,尺寸缩小比例要综合考虑落塔3.6秒试验时间(不可超过)和变加速度助推系统可使实现的变加速度值(落舱内贮箱行程限制等)。经过综合分析,本试验选用2种不同缩比尺寸的相似模型,见表1

[0144] 表1试验贮箱模型比例与特征尺寸

| [0145]     | 原型贮箱/mm | 大模型/mm | 小模型/mm  |
|------------|---------|--------|---------|
| 内半径R       | 480     | 55     | 35      |
| 内直径 $\phi$ | 960     | 110    | 70      |
| 总高度L       | 1240    | 142.0  | 90.4    |
| 缩比比例H      |         | 1:8.72 | 1:13.71 |

[0146] 结合图4模拟试验贮箱1为采用有机玻璃制作的无色透明密封罐体,模拟试验贮箱1呈柱状,且模拟试验贮箱1法兰偏心设计。

[0147] 具体的,如图5中所示模拟试验贮箱1包括包括半圆形的第一半圆箱体11和第二半圆箱体12,第一半圆箱体11和第二半圆箱体12通过法兰8连接固定,第一半圆箱体11与第二半圆箱体12整体呈柱状且形成的整体箱体1为无色透明密封罐体(第一半圆箱体11和第二半圆箱体12都是独立密封箱体)。

[0148] 为了方便观测记录贮箱内流体形态变化,建议箱体厚度不超过两毫米,以便清晰显示气液位形变化,准确捕捉模拟试验贮箱中间气液界面变化,且最大限度减小光学折射带来的视觉误差。

[0149] 由于两侧两个半周箱体独立密封,第一半圆箱体11和第二半圆箱体12的尺寸相同或不同,本实施方式建议将两个半圆箱体设置为不同尺寸,能够同时观测两个不同尺寸模型内流体张力状态,相比于对一个贮箱进行多次试验,节省试验时间和成本。

[0150] 考虑到两侧箱体尺寸存在差异,法兰8连接处的两侧箱体高度可能不一致,在变速运动时,第一半圆箱体11和第二半圆箱体12容易出现松动而散开,造成观测不稳定,因此本实施方式在第一半圆箱体11与第二半圆箱体12端部连接处设置有密封块9,密封块9用于紧密对接第一半圆箱体11和第二半圆箱体12,提高稳定性。

[0151] 贮箱直接放在载物台上,缺乏固定支撑,在变速运动过程中,容易不稳定,本实施方式通过在贮箱底部设置连接结构,进一步提高稳定性。

[0152] 具体地,在模拟试验贮箱1底部设置有插接底座7,模拟试验贮箱1通过插接底座7安装在载物台22上,如图5和图6中所示,插接底座7包括连接座体76和设置在连接座体76上

安装槽71、对插凸起部72、安装部73、限位块74、限位槽75。

[0153] 安装槽71设置在连接座体76顶部,安装部73设置在安装槽71顶部两侧,且安装部73通紧固螺栓与第一半圆箱体11和/或第二半圆箱体12抵接,以将模拟试验贮箱1固定在插接底座7上。

[0154] 限位槽75开设在连接座体76底部,限位块74形成于限位槽75两侧,对插凸起部72设置在限位块74上,且对插凸起部72向限位块74外侧凸出,在载物台上设置有安装座,安装座上开设有与插接底座7底部形状凹凸对应的凹槽,对插凸起部72对应插接在安装座上,安装更加稳定。通过设置插接底座7,使贮箱能够稳定跟随载物台变速移动,减小因不稳定因素造成的试验偏差,避免试验观测效果。

[0155] D、模型试验液体

[0156] 本试验初步选取氟化液FC-72和无水乙醇(Ethanol)作为试验流体介质,并分别用于不同尺寸贮箱和Bond数工况下。氟化液FC-72和无水乙醇(Ethanol)的主要物性参数见表2。

[0157] 表2试验流体介质物性参数

| 试验介质种类            | 密度, $\rho$<br>Kg/m <sup>3</sup> (20° C) | 表面张力, $\sigma$<br>N/m (20° C) | 粘度, $\mu$<br>Kg/ms (20° C) |
|-------------------|---|-------------------------------|----------------------------|
| [0158] 氟化液(FC-72) | 1680                                    | $1.00 \times 10^{-2}$         | $6.4 \times 10^{-4}$       |
| 无水乙醇<br>(Ethanol) | 789                                     | $2.24 \times 10^{-2}$         | $3.72 \times 10^{-4}$      |

[0159] 上述两种实验液体的表面张力与密度之比分别为:

[0160]  $\beta_{FC-72} = 5.95 \times 10^{-6}$ ; 和  $\beta_{Ethanol} = 2.84 \times 10^{-5}$

[0161] 根据(2.1)式得知,一定Bond数下选用氟化液FC-72可以使落塔试验的变推力加速度值更小,便于在3.6秒落塔微重力时间内实现较大Bond数下重定位过程的试验观测。

[0162] 根据上述原则,考虑到落塔单舱内的空间限制(1500mm),本实施方式中选定的加速度变化范围为 $0.15\text{m/s}^2$ - $1.6\text{m/s}^2$ ,根据不同模型贮箱的具体尺寸和实验液体的物性参数,本实验实施原则为:

[0163] (a) 大模型用于模拟大推力300N对应的大Bond数试验,采用氟化液FC-72作为试验流体介质;

[0164] (b) 小模型用于小推力40N时小Bond数试验,试验液体采用氟化液FC-72;

[0165] (c) 大模型用于小推力40N时小Bond数试验,试验液体采用无水乙醇(Ethanol)。

[0166] S2、试验

[0167] 根据表3的试验参数进行试验,试验装置除包括变推力电推进系统、外部控制器外,试验装置还包括光学观测系统和数据采集系统。

[0168] 光学记录模块包括用于观测模拟试验贮箱1的CCD相机以及用于为CCD相机提供背景光的背景光源6,背景光源6、CCD相机分别设置在模拟试验贮箱1的两侧,CCD相机设有两个且分别为高速数字CCD31、模拟CCD32,高速数字CCD31设有短焦镜头,高速数字CCD31用于正面拍摄模拟试验贮箱1,模拟CCD32用于俯视拍摄模拟试验贮箱1。

[0169] 具体的,高速数字CCD31采用加拿大DALSA公司的CR-GM00-H1020,分辨率为1024\*768\*8bit,像素尺寸为7.4 $\mu\text{m}$ ×7.4 $\mu\text{m}$ ,采集速率最大至117fps,外形尺寸为29×44×67mm<sup>3</sup>,重量小于125g,功耗小于4W,利用千兆网口传输,利用此高速数字CCD31,可将施加推力后储液罐内液体的重定位过程时间分辨尺度精确到0.01s量级。模拟CCD32分辨率为720\*576\*8bit,帧频为25fps。

[0170] 背景光源4选用白色发光片,具体的,背景光源4和高速数字CCD31分别位于模拟试验贮箱1的两侧,同时白色发光片的尺寸选用远大于模拟试验贮箱1的尺寸,使得模拟试验贮箱1的投影可以完全投射在白色发光片上。

[0171] 试验过程中,模拟试验贮箱1需要装入落舱内,则将背景光源4、高速数字CCD31、模拟CCD32均固定入落舱内,模拟CCD32的投影也可完全投射在白色发光片上,使得白色发光片可以完全对高速数字CCD31、模拟CCD32的拍摄提供背景光线。

[0172] 数据采集处理模块4包括与CCD相机信号连接的数据终端,数据终端具体选用笔记本电脑,实际使用过程中,笔记本电脑应选取轻便且隔振的型号,

[0173] 数据终端包括数据采集传输单元、数据存储单元,数据存储单元用于储存数据终端接收的拍摄数据,常规笔记本电脑均具有数据存储功能,固数据存储单元本实施例中不做赘述。

[0174] 数据采集传输单元包括采集软件和传输线缆,用于采集CCD相机的拍摄数据并将拍摄数据传输到数据终端,采集软件可设置采集帧率和采集帧数,将外触发信号触发相机时,采集软件开始控制相机拍摄图片并通过千兆网线缆采集拍摄图片存储在笔记本电脑的内存中。

[0175] 通过两个CCD拍摄,实现多角度观测,清晰反映储液箱内汽/液形位变化和变推力重定位过程,拍摄过程中,通过白色发光片提供光强均匀的背景光,以便于CCD相机拍摄到清晰显示气液两相的分界面的图片。

[0176] 表3

| 工况     | 启动时刻 | 真实贮箱          | 实验介质  | 实验贮箱        | 实验参数  |
|--------|------|---------------|-------|-------------|---|
| [0177] | 一次启动 | 填冲率<br>88.04% | 无水乙醇  | 大模型<br>Φ110 | (1) 第一次实验<br>推力: 40N<br>a=0.84 m/s <sup>2</sup><br>T <sub>0</sub> =1.04s<br>运行距离: 1308mm (导轨总行程)<br>运行时间: 1.76s |
|        |      |               |       |             | (2) 第二次实验<br>推力: 40N<br>a=0.84 m/s <sup>2</sup><br>T <sub>0</sub> =1.04s<br>运行距离: 1308mm (导轨总行程)<br>运行时间: 1.76s |
| [0177] | 一次启动 | 填冲率<br>70.08% | FC-72 | 小模型<br>Φ70  | (1) 第一次实验<br>推力: 40N<br>a=0.27 m/s <sup>2</sup><br>T <sub>0</sub> =0.48s<br>运行距离: 1308mm (导轨总行程)<br>运行时间: 3.11s |
|        |      |               |       |             | (2) 第二次实验<br>推力: 40N<br>a=0.27 m/s <sup>2</sup><br>T <sub>0</sub> =0.48s<br>运行距离: 1308mm (导轨总行程)<br>运行时间: 3.11s |

[0178] 试验结果得到特征时间值,  $T_0$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ , 其中  $T_0$  表示开始加载,  $T_1$  表示液体到达贮箱底部,  $T_2$  表示喷泉碰撞气-液界面,  $T_3$  表示喷泉碰撞箱顶,  $T_4$  表示液体从箱顶离开,  $T_5$  表示贮箱内气泡不再向出液口方向移动。

[0179] 根据相似性原理, 将试验得到的特征时间值反推到真实贮箱推进剂重定位过程中的真实特征时间, 如表4所示:

[0180] 表4火箭上面级贮箱推进剂重定位特征时间

| 重定位工况  | 实验工况        | T1    | T2    | T3    | T4    | 实验液体  |
|--------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| [0181] | 一次启动        | 6.88  | 12.13 | 17.70 | 26.22 | 酒精    |
|        | 88.04%, 40N |       |       |       |       |       |
|        | 二次启动        | 11.23 | 13.30 | 18.92 | 36.22 | FC-72 |
|        | 73.46%, 40N |       |       |       |       |       |

[0182] S3、数值仿真与理论建模

[0183] 当液体与固体接触时,液体会沿着固体表面扩展,这种现象称为液体与固体的浸润现象。通常用接触角来反映浸润的程度,接触角 $\theta$ 反映液体分子和固体分子之间的相互吸引力(附着力)与液体分子间的内聚力的相对大小。当固、液、气三相接触并处于平衡状态时,接触角满足Yong氏方程:

$$[0184] \quad \sigma_{13} = \sigma \cos \theta + \sigma_{12}$$

[0185]  $\sigma, \sigma_{12}, \sigma_{13}$ 分别为气-液、液-固和气-固三种界面的表面张力系数,当温度和气体压力不变时, $\sigma, \sigma_{12}$ 和 $\sigma_{13}$ 均为常数。在这种条件下,上式等价于

$$[0186] \quad \theta = \text{Const}$$

[0187] 如果 $0 < \theta < 90^\circ$ ,表示附着力大于内聚力,液体浸润固体;如果 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ,则附着力小于内聚力,呈现非浸润状态。

[0188] 微重力环境下,由于表面张力的作用静液面一般并非平面,而是表现为一个弯曲界面。气液两相弯曲界面是与两相间的压力差相联系的,由Laplace方程给出。

$$[0189] \quad \Delta p = \sigma C = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

[0190] 其中, $\Delta p$ 为流体界面压力差, $\sigma$ 为表面张力系数, $C$ 为界面的平均曲率, $C = R_1^{-1} + R_2^{-1}$ , $R_1$ 和 $R_2$ 为两个主曲率半径。

[0191] 没有重力(或其它外场)时,压力差 $\Delta p$ 在整个体积中是常数。于是两相的界面形状只取决于接触角 $\theta$ 和表面张力的作用,这是不同于地球上的情况的。在地球上毛细现象一般是流体静压力(重力)和界面力平衡的结果。

[0192] 流体为不可压缩粘性流体,则描述其运动的连续性方程和Navier—Stokes方程分别为

$$[0193] \quad \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

$$[0194] \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \nabla) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau + \vec{g} + \vec{F}_s$$

[0195] 其中 $\vec{g}$ 为重力加速度, $\vec{F}_s$ 为表面张力, $\tau$ 为粘性应力张量,对于牛顿流体

$$[0196] \quad \tau = 2\mu S$$

[0197] 应变率张量 $S$ 由下式给出

$$[0198] \quad S = \frac{1}{2} [(\nabla \vec{v}) + (\nabla \vec{v})^T]$$

[0199] 流体体积由体积函数 $F$ 确定。体积函数的控制微分方程为

$$[0200] \quad \frac{\partial F}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla F = 0$$

[0201] 其中流体体积函数 $F$ ,它定义在每个空间单元上,定义为单元内流体所占体积与该单元可容纳流体体积之比。由定义可知,当单元被流体占满时 $F$ 值为1;空单元时, $F$ 值为0。单元的 $F$ 值为 $0 < F < 1$ 时,该单元含自由表面。

[0202] 边界条件为:在贮箱壁面上满足无穿透无滑移条件,即

$$[0203] \quad \vec{v}_f = \vec{v}_w$$

[0204] 式中: $\vec{v}_f$ 为流体速度; $\vec{v}_w$ 为壁面速度。

[0205] 用二阶迎风格式对方程进行离散,速度与压力耦合采用SIMPLE方法,用有限元方法对问题求解。

[0206] S4、推进剂沉底过程的仿真计算分析

[0207] 常规柱形贮箱容积 $0.7\text{m}^3$ ,柱形贮箱采用半球底,直径 $\phi 880\text{mm}$ ,柱段长度 $570\text{mm}$ 。由于轴对称结构,在数值模拟过程中,采用轴对称的计算模型。

[0208] 邦德数定义为:

$$[0209] \quad B_0 = aR^2/\beta \text{ 其中 } \beta = \sigma/\rho$$

[0210] 重定位各个过程的特征时间分别为:

[0211]  $t_1$ 表示液体到达贮箱底部; $t_2$ 表示喷泉碰撞气-液界面; $t_3$ 表示喷泉碰撞箱顶; $t_4$ 表示液体从箱顶离开; $t_5$ 表示重定位基本结束(出口及附近区域含气率 $<5\%$ )。

[0212] 典型工况数值分析结果如表6:

[0213] 表6推进剂管理数值仿真特征时间表

| 工况 | 推力  | 加速度    | Bo数 | 填充  | t1 | t2 | t3 | t4 | t5  |
|----|-----|--------|-----|-----|----|----|----|----|-----|
| 1  | 600 | 0.0455 | 288 | 80% | 8  | -  | -  | 46 | 140 |
| 2  | 300 | 0.0228 | 144 | 80% | 10 | -  | -  | 86 | 182 |

[0215] 以下是上表中典型工况下,模型贮箱内气液流动过程的详细数值仿真结果和各个不同特征时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_5$ 所对应的气-液界面位形分布。

[0216] 工况1:模拟启动姿控发动机后,推进剂重定位过程的气液界面变化。计算工质为推进剂燃料,填充率80%,沉底推力取600N,对应的邦德数为288。这一部分的数值模拟工作气液初始界面为平面,液体位于箱体上半部分,气体位于箱体下半部分。

[0217] 工况2:模拟启动姿控发动机后,推进剂重定位过程的气液界面变化。计算工质为推进剂燃料,填充率80%,沉底推力取300N,对应的邦德数为144。这一部分的数值模拟工作气液初始界面为平面,液体位于箱体上半部分,气体位于箱体下半部分。

[0218] 根据仿真模拟,得出表7:

[0219] 表7典型模型贮箱仿真计算给出的推进剂重定位特征时间

| 重定位参数                | 工况           | T1    | T2    | T3    | T4    | T5     | 模拟工质  |
|----------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 一次启动<br>88.04%, 300N | 工况 1<br>(大罐) | 5.10  | 5.85  | 6.90  | 13.21 | 78.49  | FC-72 |
| 二次启动<br>70.08%, 40N  | 工况 2<br>(小罐) | 14.84 | 16.64 | 20.46 | 53.81 | 175.32 | FC-72 |

[0221] S5、数值仿真与实验结果比较

[0222] 由全尺寸真实贮箱数值模拟结果可知,在额定工况下贮箱推进剂沉底过程均在210秒内完成,即贮箱推进剂在沉底结束前都是在40N推力作用下。所以本节数值仿真与实验结果比较分为如下两部分:

[0223] 第一部分为对应300N直接沉底工况下,大罐模型数值仿真与实验比较;第二部分

为对应40N沉底工况下,全尺寸模型数值仿真以及小罐模型数值仿真与实验比较。

[0224] 将数值仿真与实验工况得到的特征时间值反推到真实贮箱推进剂重定位过程中的真实特征时间,特征时间的数值、实验对比结果见图3。

[0225] 根据以上过程总结如下:

[0226] 利用“落塔变推力在轨流体管理实验平台”在我国百米落塔开展了某型火箭上面级推进剂重定位动力学过程的微重力模拟试验研究,在3.5秒短时微重力期间内成功实现了微重力环境中不同变加速度(邦德数)条件下贮箱中液体推进剂汽/液界面形位变化过程观测,获得了模拟空间在轨真实工况变化规律的实验数据。完成了静态(第一类工况)和动态(第二类工况)的共计24次落塔试验,获得了9组工况的重定位实验观测图像数据,试验结果分析和与数值仿真结果的一致,获得了大量具有工程指导意义的实验结果,验证了落塔变推力模拟实验分析与试验方法适用于微重力环境中流体重定位等变重力过程和动力学特征参数的实验测试和科学研究,并为我国工程型号设计提供了工程参数和理论依据。

[0227] 本发明的落塔微-变重力流体管理模拟研究与实验技术新方法,可以用于模拟空间微重力环境中推进剂或流体在 $1.5 \times 10^{-2}g_0$ 至 $1.6 \times 10^{-1}g_0$ 的加速度变化范围的低重力和变重力过程中空间在轨流体与推进剂两相流动动力学特征的模拟实验研究,并完全适用与相关的空间推进剂管理工程设计中相关问题的模拟试验验证。该实验研究方法也可以用于其它微重力实验平台(如失重飞机、太空飞船和空间站等)。

[0228] 需要说明的是,在本文中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。

[0229] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

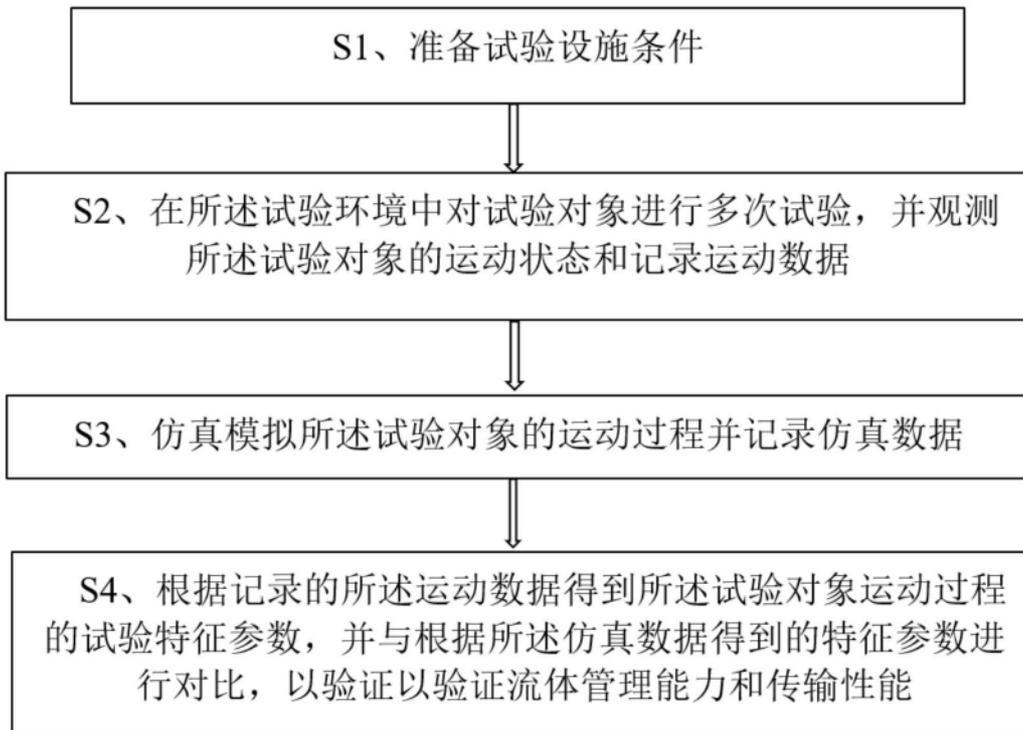


图1

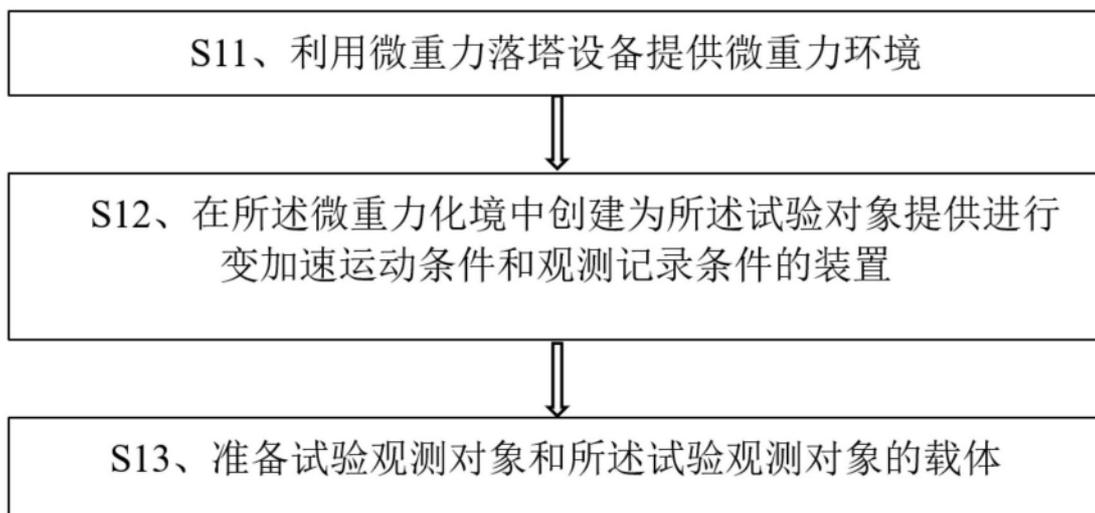


图2

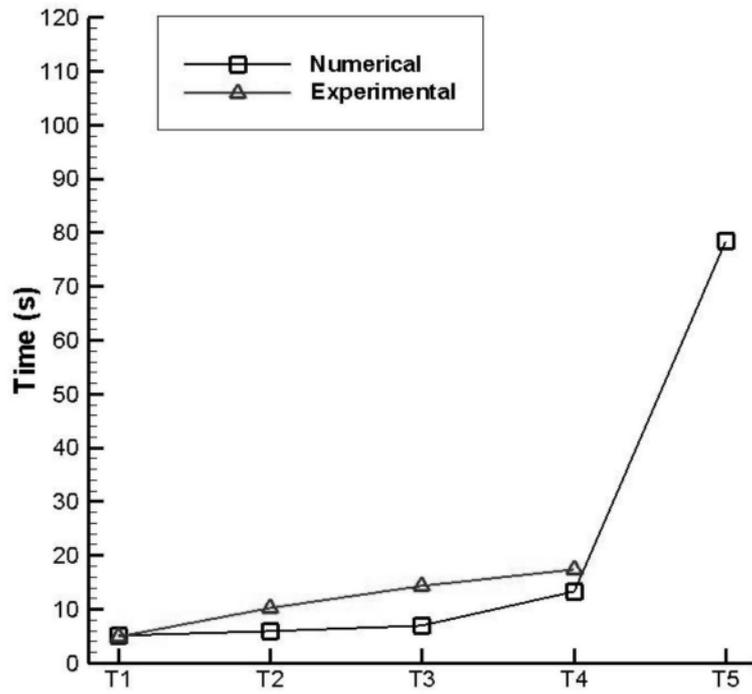


图3

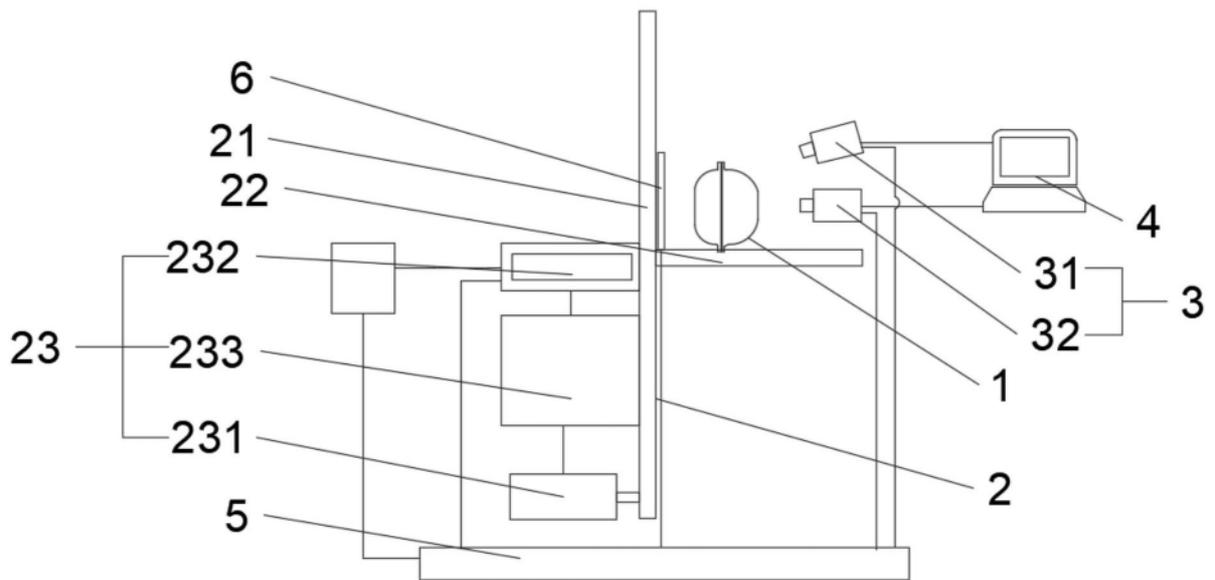


图4

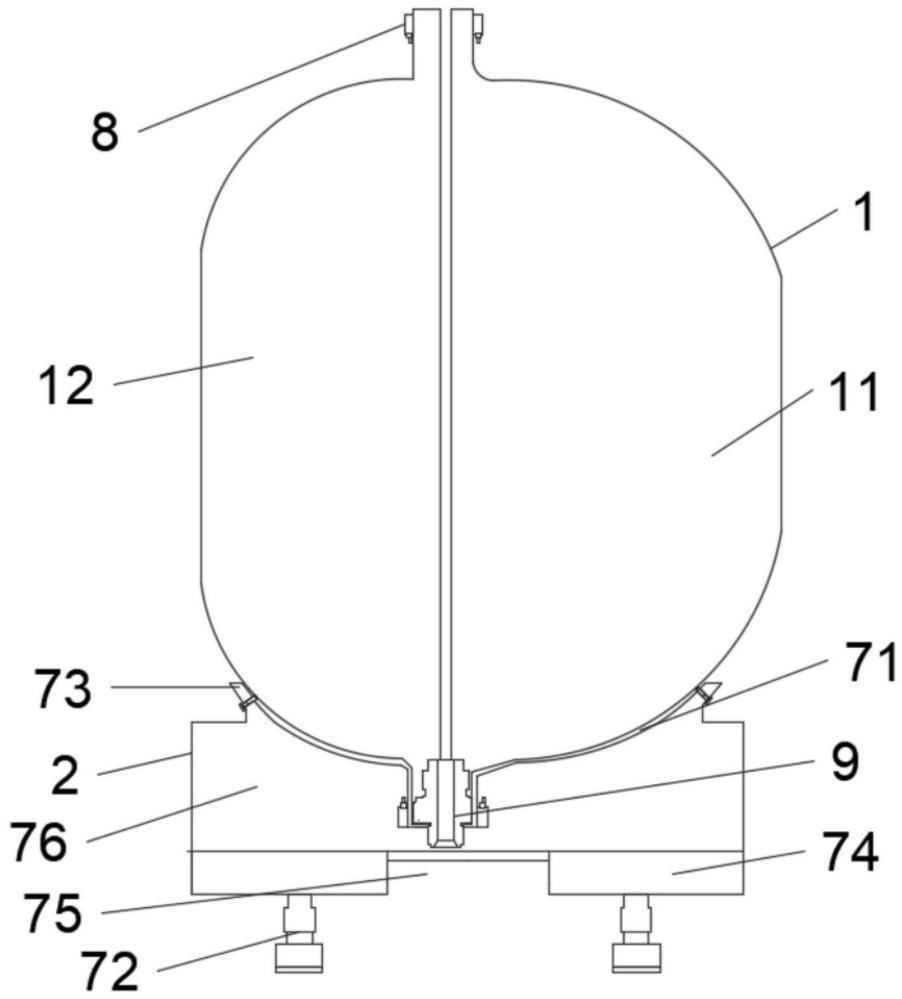


图5

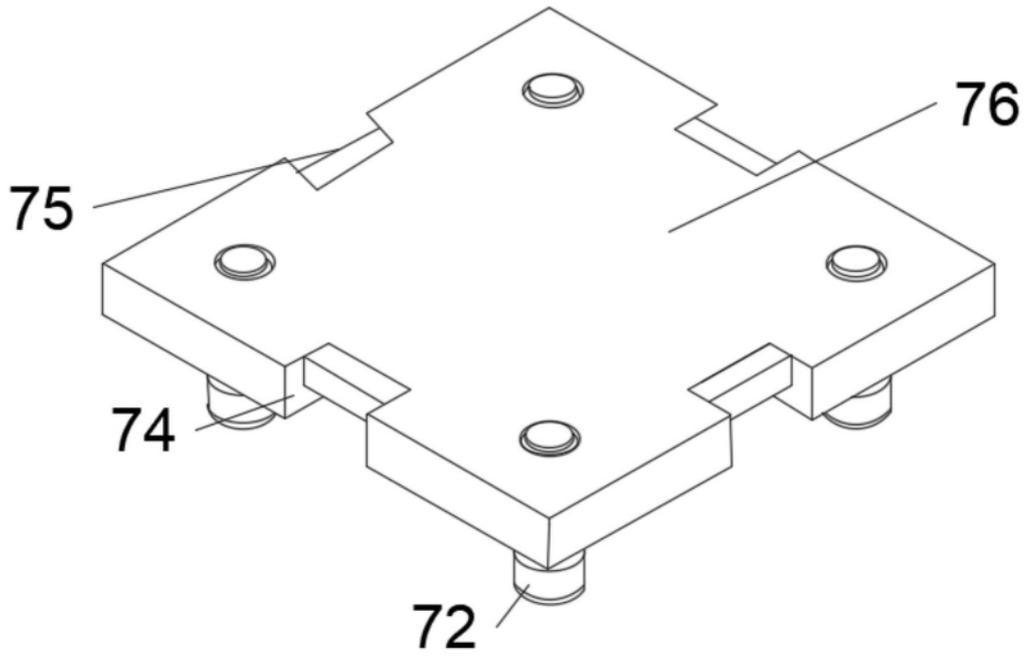


图6