



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105426604 A

(43) 申请公布日 2016. 03. 23

(21) 申请号 201510770555. 9

(22) 申请日 2015. 11. 12

(71) 申请人 中国科学院光电研究院

地址 100094 北京市海淀区邓庄南路 9 号

(72) 发明人 刘强 杨燕初 才晶晶 张衍垒

祝榕辰

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任

公司 11021

代理人 宋焰琴

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

权利要求书5页 说明书12页 附图1页

(54) 发明名称

带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法

(57) 摘要

本发明提供了一种带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法,首先计算大气环境参数及飞艇辐射热环境参数,并基于飞艇几何特征及传热模式,建立飞艇分布温度计算域,然后利用结构化网格离散计算域,建立各微元的质量、动量和能量微分方程,最后根据飞艇艇体材料和太阳能电池特性参数,联立求解计算域内所有微元的方程组,计算飞艇平飞过程分布温度。本发明在带太阳能电池的平流层飞艇设计、材料选择、飞行试验规划、规避潜在危险等方面具有指导意义,可以提高带太阳能电池的平流层飞艇设计一次成功率,缩短带太阳能电池的平流层飞艇设计周期,降低带太阳能电池的平流层飞艇设计成本。



1. 一种带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法,其特征在于,包括:  
 S1,根据飞艇飞行任务需求,计算飞艇飞行参数及飞艇设计参数;  
 S2,测量艇体材料特性参数、太阳能电池特性参数及电池隔热材料特性参数;  
 S3,计算飞艇大气环境参数及飞艇辐射热环境参数;  
 S4,基于飞艇几何特征及传热模式,建立飞艇分布温度计算域,利用结构化网格离散计算域,建立各微元的质量、动量和能量微分方程;  
 S5,根据飞艇艇体材料和太阳能电池特性参数,联立求解计算域内所有微元的方程组,计算飞艇平飞过程分布温度。

2. 根据权利要求1所述的温度计算方法,其特征在于,所述飞艇飞行参数包括飞艇飞行时间、飞艇飞行地点经度 Lon、飞艇飞行地点纬度 Lat、飞艇飞行海拔高度 h 和飞艇飞行空速 v;

所述飞艇设计参数包括飞艇体积 V、飞艇长度 L、飞艇最大直径 D、飞艇表面积 A 和太阳能电池面积  $A_s$ 。

3. 根据权利要求2所述的温度计算方法,其特征在于,所述艇体材料特性参数包括艇体材料表面吸收率  $\alpha$ 、艇体材料表面发射率  $\epsilon$ 、艇体材料面密度  $\rho$  和艇体材料比热容 c;

所述太阳能电池特性参数包括太阳能电池效率  $\eta$ 、太阳能电池表面吸收率  $\alpha_s$ 、太阳能电池表面发射率  $\epsilon_s$ 、太阳能电池面密度  $\rho_s$  和太阳能电池比热容  $c_s$ ;

所述电池隔热材料特性参数隔热材料特性参数包括隔热材料厚度  $\delta_{s1}$  和隔热材料导热系数  $\lambda_{s1}$ 。

4. 根据权利要求3所述的温度计算方法,其特征在于,所述飞艇大气环境参数包括飞艇飞行海拔高度 h 处的大气温度  $T_{Atm}$ 、大气压力  $P_{Atm}$  和大气密度  $\rho_{Atm}$ ,

其中,大气温度  $T_{Atm}$  的数学表达式为:

$$T_{Atm} = \begin{cases} 288.15 - 0.0065 \cdot h & 0 \leq h \leq 11000 \\ 216.65 & 11000 \leq h \leq 20000, \\ 216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000) & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases}$$

大气压力  $P_{Atm}$  的数学表达式为:

$$P_{Atm} = \begin{cases} 101325 \cdot ((288.15 - 0.0065 \cdot h) / 288.15)^{5.256} & 0 \leq h \leq 11000 \\ 22887 \cdot \exp(-(h - 11000) / 6341.62) & 11000 \leq h \leq 20000, \\ 5535 \cdot ((216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000)) / 216.65)^{-34.163} & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases}$$

大气密度  $\rho_{Atm}$  的数学表达式为:

$$\rho_{Atm} = \begin{cases} 1.225 \cdot ((288.15 - 0.0065 \cdot h) / 288.15)^{4.256} & 0 \leq h \leq 11000 \\ 0.3672 \cdot \exp(-(h - 11000) / 6341.62) & 11000 \leq h \leq 20000; \\ 0.0889 \cdot ((216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000)) / 216.65)^{-35.163} & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases}$$

所述飞艇辐射热环境参数包括太阳直接辐射热流  $q_{D,S}$ 、大气散射太阳辐射热流  $q_{A,S}$ 、地面反射太阳辐射热流  $q_{G,S}$ 、大气长波辐射热流  $q_{A,IR}$  和地面长波辐射热流  $q_{G,IR}$ ,

所述太阳直接辐射热流  $q_{D,S}$  的数学表达式为:

$$q_{D,S} = I_0 \cdot \tau_{Atm},$$

其中,  $I_0$  为大气层上界太阳辐射强度,  $\tau_{Atm}$  为太阳直接辐射衰减系数;

所述大气散射太阳辐射热流  $q_{A\_S}$  的数学表达式为:

$$q_{A\_S} = k \cdot q_{D\_S},$$

其中,  $k$  为大气散射系数;

所述地面反射太阳辐射热流  $q_{G\_S}$  的数学表达式为:

$$q_{G\_S} = I_{Ground} \cdot r_{Ground} \cdot \tau_{IR\_G},$$

其中,  $I_{Ground}$  为抵达地球表面太阳直接辐射强度,  $r_{Ground}$  为地球表面反射系数,  $\tau_{IR\_G}$  为地球表面辐射衰减系数;

所述大气长波辐射热流  $q_{A\_IR}$  的数学表达式为:

$$q_{A\_IR} = \sigma \cdot T_{Atm}^4,$$

其中,  $\sigma$  为辐射常数,  $T_{Atm}$  为大气温度;

所述地面长波辐射热流  $q_{G\_IR}$  的数学表达式为:

$$q_{G\_IR} = \varepsilon_{Ground} \cdot \sigma \cdot T_{Ground}^4 \cdot \tau_{IR\_G},$$

其中,  $T_{Ground}$  为地面温度,  $\varepsilon_{Ground}$  为地面发射率。

5. 根据权利要求 4 所述的温度计算方法, 其特征在于, 所述步骤 S4 包括:

建立飞艇及其外流场区域, 利用结构化网格将计算域划分为多个微元, 分析飞艇艇体、太阳能电池、太阳能电池隔热材料、内部氦气微元传热过程, 建立所有微元的质量、动量和能量微分方程;

其中, 计算域内质量、动量和能量微分方程为:

质量微分方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0,$$

动量微分方程:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} \mathbf{u}) - \frac{\partial P}{\partial \mathbf{X}} + S_u,$$

能量微分方程:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_p \mathbf{u} T) = \text{div}(k \cdot \text{grad} T) + S_T,$$

其中,  $T$  是温度,  $\rho$  是密度,  $c_p$  是定压比热容,  $t$  代表时间,  $\mathbf{u}$  代表流体速度矢量,  $k$  是导热系数,  $S_u$  代表动量广义源项,  $S_T$  代表能量广义源项,  $\mu$  是流体的粘度系数,  $P$  是流体压力,  $\mathbf{X}$  指代坐标向量;

其中, 太阳能电池微元  $i$  的能量广义源项表达式:

$$S_{T\_S\_i} = Q_{S\_i\_D} + Q_{S\_i\_Atm} + Q_{S\_i\_IR\_Atm} + Q_{S\_i\_IR} + Q_{S\_i\_Cond},$$

$Q_{S\_i\_D}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{S\_i\_Atm}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{S\_i\_IR\_Atm}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{S\_i\_IR}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{S\_i\_Cond}$  是通过隔热层与艇体的传导换热热量。

太阳能电池微元  $i$  的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下：

吸收太阳直接辐射热量  $Q_{S,i,D}$ ：

$$Q_{S,i,D} = \alpha_s \cdot q_{D,S} \cdot A_{S,i} \cdot F_{S,S}$$

其中， $F_{S,S}$ 是太阳能电池微元  $i$  外表面与太阳直接辐射的辐射角系数， $A_{S,i}$ 是太阳能电池微元  $i$  外表面面积。

吸收大气散射辐射热量  $Q_{S,i,Atm}$ ：

$$Q_{S,i,Atm} = \alpha_s \cdot q_{IR,Atm} \cdot A_{S,i}$$

吸收大气长波辐射热量  $Q_{S,i,IR,Atm}$ ：

$$Q_{S,i,IR,Atm} = \varepsilon_s \cdot q_{IR,Atm} \cdot A_{S,i}$$

对外界环境长波辐射热量  $Q_{S,i,IR}$ ：

$$Q_{S,i,IR} = -\varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_{S,i}^4 \cdot A_{S,i}$$

其中， $T_{S,i}$ 是太阳能电池微元  $i$  的温度。

通过隔热层与艇体的传导换热热量  $Q_{S,i,Cond}$ ：

$$Q_{S,i,Cond} = \lambda_{S,I} \cdot \frac{T_{Emup,S,j} - T_{S,i}}{\delta_{S,I}} \cdot A_{S,i}$$

其中， $T_{Emup,S,j}$ 是艇体微元  $j$  的温度，艇体微元  $j$  被太阳能电池微元  $i$  遮盖；

其中，艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的能量广义源项表达式：

$$S_{T,Emup,S,j} = Q_{Emup,S,j,IR} + Q_{Emup,S,j,Cond}$$

其中， $Q_{Emup,S,j,IR}$ 是吸收艇体内部辐射换热热量， $Q_{Emup,S,j,Cond}$ 是通过隔热层与太阳能电池的传导换热热量。

艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下：

吸收艇体内部辐射换热热量  $Q_{Emup,S,j,IR}$ ：

$$Q_{Emup,S,j,IR} = A_{Emup,S,j} \cdot (G_{Emup,S,j} - J_{Emup,S,j})$$

其中， $G_{Emup,S,j}$ 是投射到艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的辐射热流， $J_{Emup,S,j}$ 是离开微元  $j$  的辐射热流。

其中， $J_{Emup,S,j}$ 可以表达为微元辐射热流和反射热流之和，其表达式：

$$G_{Emup,S,j} = (J_{Emup,S,j} - \varepsilon \sigma T_{Emup,S,j}^4) / (1 - \varepsilon)$$

$$J_{Emup,S,j} = \varepsilon \sigma T_{Emup,S,j}^4 + (1 - \varepsilon) \sum_{k=1}^N J_{Emup,S,j} X_{k,j} \quad (k=1,2,\dots,N)$$

其中， $X_{k,j}$ 是艇体内表面微元  $k$  到艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的辐射角系数。

通过隔热层与太阳能电池的传导换热热量  $Q_{Emup,S,j,Cond}$ ：

$$Q_{Emup,S,j,Cond} = \lambda_{S,I} \cdot \frac{T_{S,i} - T_{Emup,S,j}}{\delta_{S,I}} \cdot A_{Emup,S,j}$$

其中， $T_{Emup,S,j}$ 是艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的温度， $A_{Emup,S,j}$ 是艇体上

半部分被太阳能电池遮盖部分微元 j 的面积。

艇体上半部分未被太阳能电池遮盖部分微元 1 的能量广义源项表达式：

$$S_{T\_Enup\_R,1} = Q_{Enup\_R,1\_D} + Q_{Enup\_R,1\_Atm} + Q_{Enup\_R,1\_IR\_Atm} + Q_{Enup\_R,1\_IR\_E} + Q_{Enup\_R,1\_IR\_I},$$

其中,  $Q_{Enup\_R,1\_D}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{Enup\_R,1\_Atm}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_Atm}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_E}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_I}$  是与艇体内部长波辐射换热热量。

艇体上半部分未被太阳能电池遮盖部分微元 1 的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下：

吸收太阳直接辐射热量  $Q_{Enup\_R,1\_D}$ ：

$$Q_{Enup\_R,1\_D} = \alpha \cdot q_{D\_S} \cdot A_{Enup\_R,1} \cdot F_{Enup\_R,1\_S},$$

其中,  $A_{Enup\_R,1}$  是微元 1 的面积,  $F_{Enup\_R,1\_S}$  是微元 1 与太阳直接辐射的辐射角系数。

$Q_{Enup\_R,1\_IR\_I}$  是与艇体下半部分长波辐射换热热量。

吸收大气散射辐射热量  $Q_{Enup\_R,1\_Atm}$ ：

$$Q_{Enup\_R,1\_Atm} = \alpha \cdot q_{A\_S} \cdot A_{Enup\_R,1},$$

吸收大气长波辐射热量  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_Atm}$ ：

$$Q_{Enup\_R,1\_IR\_Atm} = \varepsilon \cdot q_{A\_IR} \cdot A_{Enup\_R,1},$$

其中,  $\varepsilon$  是艇体材料发射率；

对外界环境长波辐射热量  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_E}$ ：

$$Q_{Enup\_R,1\_IR\_E} = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{Enup\_R,1}^4 \cdot A_{Enup\_R,1},$$

与艇体内部长波辐射换热热量  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_I}$ ：

$$Q_{Enup\_R,1\_IR\_I} = A_{Enup\_R,1} \cdot (G_{Enup\_R,1} - J_{Enup\_R,1}),$$

其中,  $G_{Enup\_R,1}$  是投射到微元 1 的辐射热流,  $J_{Enup\_R,1}$  是离开微元 1 的辐射热流；

其中, 艇体下半部分微元 m 的能量广义源项表达式：

$$S_{T\_End,m} = Q_{End,m\_D} + Q_{End,m\_Atm} + Q_{End,m\_G} + Q_{End,m\_IR\_Atm} + Q_{End,m\_IR\_G} + Q_{End,m\_IR\_E} + Q_{End,m\_IR\_I},$$

其中,  $Q_{End,m\_D}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{End,m\_Atm}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{End,m\_G}$  是吸收地面反射辐射热量,  $Q_{End,m\_IR\_Atm}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{End,m\_IR\_G}$  是吸收地面长波辐射热量,  $Q_{End,m\_IR\_E}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{End,m\_IR\_I}$  是与艇体内部长波辐射换热热量。

艇体下半部分微元 m 的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下：

吸收太阳直接辐射热量  $Q_{End,m\_Atm}$ ：

$$Q_{End,m\_Atm} = \alpha \cdot q_{D\_S} \cdot A_{End,m} \cdot F_{End,m\_S},$$

其中,  $A_{End,m}$  是微元 m 的面积,  $F_{End,m\_S}$  是微元 m 与太阳直接辐射的辐射角系数；

吸收大气散射辐射热量  $Q_{End,m\_Atm}$ ：

$$Q_{End,m\_Atm} = \alpha \cdot q_{A\_S} \cdot A_{End,m},$$

吸收地面反射辐射热量  $Q_{End,m\_G}$ ：

$$Q_{End,m\_G} = \alpha \cdot q_{G\_S} \cdot A_{End,m},$$

吸收大气长波辐射热量  $Q_{End,m\_IR\_Atm}$ ：

$$Q_{End,m\_IR\_Atm} = \varepsilon \cdot q_{A\_IR} \cdot A_{End,m},$$

吸收地面长波辐射热量  $Q_{End,m\_IR\_G}$ ：

$$Q_{\text{End},m\_IR\_G} = \varepsilon \cdot q_{G\_IR} \cdot A_{\text{End},m},$$

对外界环境长波辐射热量  $Q_{\text{End},m\_IR\_E}$ :

$$Q_{\text{End},m\_IR\_E} = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{End},m}^4 \cdot A_{\text{End},m},$$

与艇体内部长波辐射换热热量

$$Q_{\text{End},m\_IR\_I} = A_{\text{End},m} \cdot (G_{\text{End},m} - J_{\text{End},m}),$$

其中,  $G_{\text{End},m}$  是投射到微元  $m$  的辐射热流,  $J_{\text{End},m}$  是离开微元  $m$  的辐射热流。

6. 根据权利要求5所述的温度计算方法,其特征在于,所述步骤S5包括,加载微元的热边界条件,通过微元之间能量数据传递,联立求解微元能量方程组,计算飞艇平飞过程分布温度分布数据。

## 带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于飞艇热控制技术领域,尤其涉及一种带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法。

### 背景技术

[0002] 平流层飞艇具有可定点飞行、滞空时间长和分辨率高等优点,在空中预警、监视监测、民用通信等领域具有广泛应用前景,受到世界各主要强国的高度重视。

[0003] 平流层飞艇在平飞过程中,环境温度、密度、压力、风速、太阳辐射、大气辐射和地面辐射等因素会对飞艇温度特性产生影响。温度过高将提高飞艇内部氦气压力,对飞艇产生重要影响:1、温度过高将改变飞艇艇体材料承力特性、增大飞艇艇体热应力、增大飞艇艇体张力,对飞艇艇体的安全构成严重威胁;2、改变飞艇受力状况,导致飞艇飞行高度波动,干扰飞艇执行任务。因此,准确获知飞艇平飞过程中的温度特性,对飞艇结构设计、材料选择、飞行试验规划、规避潜在危险等方面具有重要意义,而目前还没有一个系统性地计算带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度的计算方法。

### 发明内容

[0004] (一)要解决的技术问题

[0005] 本发明的目的在于,提供一种带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法,可快速而准确地获得带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度数据。

[0006] (二)技术方案

[0007] 本发明提供一种带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法,包括:

[0008] S1,根据飞艇飞行任务需求,计算飞艇飞行参数及飞艇设计参数;

[0009] S2,测量艇体材料特性参数、太阳能电池特性参数及电池隔热材料特性参数;

[0010] S3,计算飞艇大气环境参数及飞艇辐射热环境参数;

[0011] S4,基于飞艇几何特征及传热模式,建立飞艇分布温度计算域,利用结构化网格离散计算域,建立各微元的质量、动量和能量微分方程;

[0012] S5,根据飞艇艇体材料和太阳能电池特性参数,联立求解计算域内所有微元的方程组,计算飞艇平飞过程分布温度。

[0013] (三)有益效果

[0014] 本发明可以快速和准确地获知带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程中的分布温度特性,在带太阳能电池的平流层飞艇设计、材料选择、飞行试验规划、规避潜在危险等方面具有指导意义,可以提高带太阳能电池的平流层飞艇设计一次成功率,缩短带太阳能电池的平流层飞艇设计周期,降低带太阳能电池的平流层飞艇设计成本。

### 附图说明

[0015] 图1是本发明实施例提供的带太阳能电池的平流层飞艇结构示意图。

[0016] 图 2 是本发明实施例提供的带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法流程图。

### 具体实施方式

[0017] 本发明提供一种带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法,其根据飞艇飞行参数、飞艇设计参数、艇体材料特性参数、太阳能电池特性参数及电池隔热材料特性参数,计算大气环境参数及飞艇辐射热环境参数,并基于飞艇几何特征及传热模式,建立飞艇分布温度计算域,利用结构化网格离散计算域,建立各微元的质量、动量和能量微分方程,根据飞艇艇体材料和太阳能电池特性参数,联立求解计算域内所有微元的方程组,计算飞艇平飞过程分布温度。

[0018] 根据本发明的一种实施方式,温度计算方法包括:

[0019] S1,根据飞艇飞行任务需求,计算飞艇飞行参数及飞艇设计参数;

[0020] S2,测量艇体材料特性参数、太阳能电池特性参数及电池隔热材料特性参数;

[0021] S3,计算飞艇大气环境参数及飞艇辐射热环境参数;

[0022] S4,基于飞艇几何特征及传热模式,建立飞艇分布温度计算域,利用结构化网格离散计算域,建立各微元的质量、动量和能量微分方程;

[0023] S5,根据飞艇艇体材料和太阳能电池特性参数,联立求解计算域内所有微元的方程组,计算飞艇平飞过程分布温度。

[0024] 根据本发明的一种实施方式,飞艇飞行参数包括飞艇飞行时间、飞艇飞行地点经度 Lon、飞艇飞行地点纬度 Lat、飞艇飞行海拔高度 h 和飞艇飞行空速 v;

[0025] 飞艇设计参数包括飞艇体积 V、飞艇长度 L、飞艇最大直径 D、飞艇表面积 A 和太阳能电池面积  $A_s$ 。

[0026] 根据本发明的一种实施方式,艇体材料特性参数包括艇体材料表面吸收率  $\alpha$ 、艇体材料表面发射率  $\varepsilon$ 、艇体材料面密度  $\rho$  和艇体材料比热容 c;

[0027] 太阳能电池特性参数包括太阳能电池效率  $\eta$ 、太阳能电池表面吸收率  $\alpha_s$ 、太阳能电池表面发射率  $\varepsilon_s$ 、太阳能电池面密度  $\rho_s$  和太阳能电池比热容  $c_s$ ;

[0028] 电池隔热材料特性参数隔热材料特性参数包括隔热材料厚度  $\delta_{s1}$  和隔热材料导热系数  $\lambda_{s1}$ 。

[0029] 根据本发明的一种实施方式,飞艇大气环境参数包括飞艇飞行海拔高度 h 处的大气温度  $T_{Atm}$ 、大气压力  $P_{Atm}$  和大气密度  $\rho_{Atm}$ ,

[0030] 其中,大气温度  $T_{Atm}$  的数学表达式为:

$$[0031] \quad T_{Atm} = \begin{cases} 288.15 - 0.0065 \cdot h & 0 \leq h \leq 11000 \\ 216.65 & 11000 \leq h \leq 20000, \\ 216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000) & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases}$$

[0032] 大气压力  $P_{Atm}$  的数学表达式为:

$$[0033] \quad P_{Atm} = \begin{cases} 101325 \cdot ((288.15 - 0.0065 \cdot h) / 288.15)^{5.256} & 0 \leq h \leq 11000 \\ 22887 \cdot \exp(-(h - 11000) / 6341.62) & 11000 \leq h \leq 20000, \\ 5535 \cdot ((216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000)) / 216.65)^{-34.163} & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases}$$



[0034] 大气密度  $\rho_{Atm}$  的数学表达式为：

$$[0035] \quad \rho_{Atm} = \begin{cases} 1.225 \cdot ((288.15 - 0.0065 \cdot h) / 288.15)^{4.256} & 0 \leq h \leq 11000 \\ 0.3672 \cdot \exp(-(h - 11000) / 6341.62) & 11000 \leq h \leq 20000 \\ 0.0889 \cdot ((216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000)) / 216.65)^{-35.163} & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases} ;$$

[0036] 飞艇热环境参数包括飞艇辐射热环境参数和对流换热环境参数,所述飞艇辐射热环境参数包括太阳直接辐射热流  $q_{D\_S}$ 、大气散射太阳辐射热流  $q_{A\_S}$ 、地面反射太阳辐射热流  $q_{G\_S}$ 、大气长波辐射热流  $q_{A\_IR}$  和地面长波辐射热流  $q_{G\_IR}$ ,

[0037] 太阳直接辐射热流  $q_{D\_S}$  的数学表达式为：

$$[0038] \quad q_{D\_S} = I_0 \cdot \tau_{Atm},$$

[0039] 其中,  $I_0$  为大气层上界太阳辐射强度,  $\tau_{Atm}$  为太阳直接辐射衰减系数；

[0040] 所述大气散射太阳辐射热流  $q_{A\_S}$  的数学表达式为：

$$[0041] \quad q_{A\_S} = k \cdot q_{D\_S},$$

[0042] 其中,  $k$  为大气散射系数；

[0043] 地面反射太阳辐射热流  $q_{G\_S}$  的数学表达式为：

$$[0044] \quad q_{G\_S} = I_{Ground} \cdot r_{Ground} \cdot \tau_{IR\_G},$$

[0045] 其中,  $I_{Ground}$  为抵达地球表面太阳直接辐射强度,  $r_{Ground}$  为地球表面反射系数,  $\tau_{IR\_G}$  为地球表面辐射衰减系数；

[0046] 所述大气长波辐射热流  $q_{A\_IR}$  的数学表达式为：

$$[0047] \quad q_{A\_IR} = \sigma \cdot T_{Atm}^4,$$

[0048] 其中,  $\sigma$  为辐射常数,  $T_{Atm}$  为大气温度；

[0049] 地面长波辐射热流  $q_{G\_IR}$  的数学表达式为：

$$[0050] \quad q_{G\_IR} = \varepsilon_{Ground} \cdot \sigma \cdot T_{Ground}^4 \cdot \tau_{IR\_G},$$

[0051] 其中,  $T_{Ground}$  为地面温度,  $\varepsilon_{Ground}$  为地面发射率；

[0052] 根据本发明的一种实施方式,步骤 S4 包括：

[0053] 建立飞艇及其外流场区域,利用结构化网格将计算域划分为多个微元,分析飞艇艇体、太阳能电池、太阳能电池隔热材料、内部氦气微元传热过程,建立所有微元的质量、动量和能量微分方程；

[0054] 其中,计算域内质量、动量和能量微分方程为：

[0055] 质量微分方程：

$$[0056] \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0,$$

[0057] 动量微分方程：

$$[0058] \quad \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} \mathbf{u}) - \frac{\partial P}{\partial \mathbf{X}} + S_u,$$

[0059] 能量微分方程：

$$[0060] \quad \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho c_p \mathbf{u} T) = \operatorname{div}(k \cdot \operatorname{grad} T) + S_T,$$

[0061] 其中,  $T$  是温度,  $\rho$  是密度,  $c_p$  是定压比热容,  $t$  代表时间,  $\mathbf{u}$  代表流体速度矢量,  $k$  是导热系数,  $S_u$  代表动量广义源项,  $S_T$  代表能量广义源项,  $\mu$  是流体的粘度系数,  $P$  是流体压力,  $X$  指代坐标向量;

[0062] 其中, 太阳能电池微元  $i$  的能量广义源项表达式:

$$[0063] \quad S_{T,S,i} = Q_{S,i,D} + Q_{S,i,Atm} + Q_{S,i,IR,Atm} + Q_{S,i,IR} + Q_{S,i,Cond},$$

[0064]  $Q_{S,i,D}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{S,i,Atm}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{S,i,IR,Atm}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{S,i,IR}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{S,i,Cond}$  是通过隔热层与艇体的传导换热热量。

[0065] 太阳能电池微元  $i$  的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下:

[0066] 吸收太阳直接辐射热量  $Q_{S,i,D}$ :

$$[0067] \quad Q_{S,i,D} = \alpha_s \cdot q_{D,S} \cdot A_{S,i} \cdot F_{S,S},$$

[0068] 其中,  $F_{S,S}$  是太阳能电池微元  $i$  外表面与太阳直接辐射的辐射角系数,  $A_{S,i}$  是太阳能电池微元  $i$  外表面面积。

[0069] 吸收大气散射辐射热量  $Q_{S,i,Atm}$ :

$$[0070] \quad Q_{S,i,Atm} = \alpha_s \cdot q_{IR,Atm} \cdot A_{S,i},$$

[0071] 吸收大气长波辐射热量  $Q_{S,i,IR,Atm}$ :

$$[0072] \quad Q_{S,i,IR,Atm} = \varepsilon_s \cdot q_{IR,Atm} \cdot A_{S,i},$$

[0073] 对外界环境长波辐射热量  $Q_{S,i,IR}$ :

$$[0074] \quad Q_{S,i,IR} = -\varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_{S,i}^4 \cdot A_{S,i},$$

[0075] 其中,  $T_{S,i}$  是太阳能电池微元  $i$  的温度。

[0076] 通过隔热层与艇体的传导换热热量  $Q_{S,i,Cond}$ :

$$[0077] \quad Q_{S,i,Cond} = \lambda_{S,I} \cdot \frac{T_{Enup,S,j} - T_{S,i}}{\delta_{S,I}} \cdot A_{S,i},$$

[0078] 其中,  $T_{Enup,S,j}$  是艇体微元  $j$  的温度, 艇体微元  $j$  被太阳能电池微元  $i$  遮盖;

[0079] 其中, 艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的能量广义源项表达式:

$$[0080] \quad S_{T,Enup,S,j} = Q_{Enup,S,j,IR} + Q_{Enup,S,j,Cond},$$

[0081] 其中,  $Q_{Enup,S,j,IR}$  是吸收艇体内部辐射换热热量,  $Q_{Enup,S,j,Cond}$  是通过隔热层与太阳能电池的传导换热热量。

[0082] 艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下:

[0083] 吸收艇体内部辐射换热热量  $Q_{Enup,S,j,IR}$ :

$$[0084] \quad Q_{Enup,S,j,IR} = A_{Enup,S,j} \cdot (G_{Enup,S,j} - J_{Enup,S,j}),$$

[0085] 其中,  $G_{Enup,S,j}$  是投射到艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的辐射热流,  $J_{Enup,S,j}$  是离开微元  $j$  的辐射热流。

[0086] 其中,  $J_{Enup,S,j}$  可以表达为微元辐射热流和反射热流之和, 其表达式:

$$[0087] \quad G_{Enup\_S,j} = (J_{Enup\_S,j} - \varepsilon \sigma T_{Enup\_S,j}^4) / (1 - \varepsilon),$$

$$[0088] \quad J_{Enup\_S,j} = \varepsilon \sigma T_{Enup\_S,j}^4 + (1 - \varepsilon) \sum_{k=1}^N J_{Enup\_S,j} X_{k,j} \quad (k=1,2,\dots,N),$$

[0089] 其中,  $X_{k,j}$  是艇体内表面微元  $k$  到艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的辐射角系数。

[0090] 通过隔热层与太阳能电池的传导换热热量  $Q_{Enup\_S,j\_Cond}$ :

$$[0091] \quad Q_{Enup\_S,j\_Cond} = \lambda_{S-I} \cdot \frac{T_{S,i} - T_{Enup\_S,j}}{\delta_{S-I}} \cdot A_{Enup\_S,j},$$

[0092] 其中,  $T_{Enup\_S,j}$  是艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的温度,  $A_{Enup\_S,j}$  是艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的面积。

[0093] 艇体上半部分未被太阳能电池遮盖部分微元 1 的能量广义源项表达式:

$$[0094] \quad S_{T\_Enup\_R,1} = Q_{Enup\_R,1\_D} + Q_{Enup\_R,1\_Atm} + Q_{Enup\_R,1\_IR\_Atm} + Q_{Enup\_R,1\_IR\_E} + Q_{Enup\_R,1\_IR\_I},$$

[0095] 其中,  $Q_{Enup\_R,1\_D}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{Enup\_R,1\_Atm}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_Atm}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_E}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_I}$  是与艇体内部长波辐射换热热量。

[0096] 艇体上半部分未被太阳能电池遮盖部分微元 1 的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下:

[0097] 吸收太阳直接辐射热量  $Q_{Enup\_R,1\_D}$ :

$$[0098] \quad Q_{Enup\_R,1\_D} = \alpha \cdot q_{D,S} \cdot A_{Enup\_R,1} \cdot F_{Enup\_R,1S},$$

[0099] 其中,  $A_{Enup\_R,1}$  是微元 1 的面积,  $F_{Enup\_R,1S}$  是微元 1 与太阳直接辐射的辐射角系数。

[0100]  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_I}$  是与艇体下半部分长波辐射换热热量。

[0101] 吸收大气散射辐射热量  $Q_{Enup\_R,1\_Atm}$ :

$$[0102] \quad Q_{Enup\_R,1\_Atm} = \alpha \cdot q_{A,S} \cdot A_{Enup\_R,1},$$

[0103] 吸收大气长波辐射热量  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_Atm}$ :

$$[0104] \quad Q_{Enup\_R,1\_IR\_Atm} = \varepsilon \cdot q_{A,IR} \cdot A_{Enup\_R,1},$$

[0105] 其中,  $\varepsilon$  是艇体材料发射率;

[0106] 对外界环境长波辐射热量  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_E}$ :

$$[0107] \quad Q_{Enup\_R,1\_IR\_E} = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{Enup\_R,1}^4 \cdot A_{Enup\_R,1},$$

[0108] 与艇体内部长波辐射换热热量  $Q_{Enup\_R,1\_IR\_I}$ :

$$[0109] \quad Q_{Enup\_R,1\_IR\_I} = A_{Enup\_R,1} \cdot (G_{Enup\_R,1} - J_{Enup\_R,1}),$$

[0110] 其中,  $G_{Enup\_R,1}$  是投射到微元 1 的辐射热流,  $J_{Enup\_R,1}$  是离开微元 1 的辐射热流;

[0111] 其中, 艇体下半部分微元  $m$  的能量广义源项表达式:

$$[0112] \quad S_{T\_End,m} = Q_{End,m\_D} + Q_{End,m\_Atm} + Q_{End,m\_G} + Q_{End,m\_IR\_Atm} + Q_{End,m\_IR\_G} + Q_{End,m\_IR\_E} + Q_{End,m\_IR\_I},$$

[0113] 其中,  $Q_{End,m\_D}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{End,m\_Atm}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{End,m\_G}$  是吸收地面反射辐射热量,  $Q_{End,m\_IR\_Atm}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{End,m\_IR\_G}$  是吸收地面长波辐射热量,  $Q_{End,m\_IR\_E}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{End,m\_IR\_I}$  是与艇体内部长波辐射换热热量。

[0114] 艇体下半部分微元  $m$  的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下:

[0115] 吸收太阳直接辐射热量  $Q_{\text{End},m\_Atm}$ :

$$[0116] \quad Q_{\text{End},m\_Atm} = \alpha \cdot q_{D,S} \cdot A_{\text{End},m} \cdot F_{\text{End},m\_S},$$

[0117] 其中,  $A_{\text{End},m}$  是微元  $m$  的面积,  $F_{\text{End},m\_S}$  是微元  $m$  与太阳直接辐射的辐射角系数;

[0118] 吸收大气散射辐射热量  $Q_{\text{End},m\_Atm}$ :

$$[0119] \quad Q_{\text{End},m\_Atm} = \alpha \cdot q_{A,S} \cdot A_{\text{End},m},$$

[0120] 吸收地面反射辐射热量  $Q_{\text{End},m\_G}$ :

$$[0121] \quad Q_{\text{End},m\_G} = \alpha \cdot q_{G,S} \cdot A_{\text{End},m},$$

[0122] 吸收大气长波辐射热量  $Q_{\text{End},m\_IR\_Atm}$ :

$$[0123] \quad Q_{\text{End},m\_IR\_Atm} = \varepsilon \cdot q_{A,IR} \cdot A_{\text{End},m},$$

[0124] 吸收地面长波辐射热量  $Q_{\text{End},m\_IR\_G}$ :

$$[0125] \quad Q_{\text{End},m\_IR\_G} = \varepsilon \cdot q_{G,IR} \cdot A_{\text{End},m},$$

[0126] 对外界环境长波辐射热量  $Q_{\text{End},m\_IR\_E}$ :

$$[0127] \quad Q_{\text{End},m\_IR\_E} = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{End},m}^4 \cdot A_{\text{End},m},$$

[0128] 与艇体内部长波辐射换热热量

$$[0129] \quad Q_{\text{End},m\_IR\_I} = A_{\text{End},m} \cdot (G_{\text{End},m} - J_{\text{End},m}),$$

[0130] 其中,  $G_{\text{End},m}$  是投射到微元  $m$  的辐射热流,  $J_{\text{End},m}$  是离开微元  $m$  的辐射热流。

[0131] 根据本发明的一种实施方式, 步骤 S5 包括, 加载微元的热边界条件, 通过微元之间能量数据传递, 联立求解微元能量方程组, 计算飞艇平飞过程分布温度分布数据。

[0132] 综上所述, 本发明可以快速和准确地获知带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程中的分布温度特性, 在带太阳能电池的平流层飞艇设计、材料选择、飞行试验规划、规避潜在危险等方面具有指导意义, 可以提高带太阳能电池的平流层飞艇设计一次成功率, 缩短带太阳能电池的平流层飞艇设计周期, 降低带太阳能电池的平流层飞艇设计成本。

[0133] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白, 以下结合具体实施例, 并参照附图, 对本发明进一步详细说明。

[0134] 如图 1 所示, 本发明实施例提供的带太阳能电池的平流层飞艇包括飞艇由艇体上半部分 1、艇体下半部分 2、太阳能电池 3、太阳能电池隔热层 4、尾翼 5 和推进装置 6 构成。

[0135] 其中, 飞艇主体由艇体上半部分 1 和艇体下半部分 2 构成, 艇体上半部分顶部铺设太阳能电池 3, 太阳能电池与艇体上半部分之间安装有隔热层 4, 尾翼 5 呈倒 Y 型安装于飞艇尾部, 推进装置 6 左右对称安装于飞艇两侧。

[0136] 如图 2 所示, 带太阳能电池的平流层飞艇平飞过程分布温度计算方法, 包括:

[0137] 根据飞艇飞行任务需求, 计算出本实施例中的飞艇主要飞行参数如表 1 所示, 主要设计参数如表 2 所示。

[0138]

序号	参数	数值
1	飞行时间	6 月
2	飞行经度 $Lon$	116° E
3	飞行纬度 $Lat$	40°N
4	飞行高度 $h$	20000 m
5	飞行空速 $v$	10 m/s

[0139] 表 1 飞艇主要飞行参数

[0140]

序号	参数	数值
1	飞艇体积 $V$	7000 m <sup>3</sup>
2	飞艇长度 $L$	60 m
3	飞艇最大直径 $D$	14 m
4	飞艇表面积 $A$	2400 m <sup>2</sup>
5	太阳能电池面积 $A_s$	120 m <sup>2</sup>

[0141] 表 2 飞艇主要设计参数

[0142] 测量拟采用的飞艇艇体材料特性参数如表 3 所示；测量太阳能电池特性与太阳能电池隔热材料特性参数如表 4 所示。

[0143]

序号	参数	数值
1	表面吸收率 $\alpha$	0.33
2	表面发射率 $\varepsilon$	0.88
3	面密度 $\rho$	0.13 kg/m <sup>2</sup>
4	比热容 $c$	2000 J/(kg · K)

[0144]

[0145] 表 3 艇体材料特性参数

[0146]

序号	参数	数值
1	太阳能电池效率 $\eta$	0.1
2	太阳能电池表面吸收 $\alpha_s$	0.9
3	太阳能电池表面发射 $\varepsilon_s$	0.9
4	太阳能电池面密度 $\rho_s$	0.46 kg/m <sup>2</sup>
5	太阳能电池比热容 $c_s$	687 J/(kg·K)
6	隔热材料厚度 $\delta_{s-I}$	0.002 m
7	隔热材料导热系数 $\lambda_{s-I}$	0.02 W/(m·K)

[0147] 表 4 太阳能电池与太阳能电池隔热材料特性参数

[0148] 计算飞艇热环境：大气压力、温度、密度。其中，飞艇在海拔高度  $h$  处的大气温度  $T_{Atm}$  (K)、大气压力  $P_{Atm}$  (Pa)、大气密度  $\rho_{Atm}$  (kg/m<sup>3</sup>) 可由公式计算：

[0149] 大气温度随海拔高度  $h$  变化的数学表达式为：

$$[0150] \quad T_{Atm} = \begin{cases} 288.15 - 0.0065 \cdot h & 0 \leq h \leq 11000 \\ 216.65 & 11000 \leq h \leq 20000 \\ 216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000) & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases} \quad (1)$$

[0151] 大气压力随海拔高度  $h$  变化的数学表达式为：

$$[0152] \quad P_{Atm} = \begin{cases} 101325 \cdot ((288.15 - 0.0065 \cdot h) / 288.15)^{5.256} & 0 \leq h \leq 11000 \\ 22887 \cdot \exp(-(h - 11000) / 6341.62) & 11000 \leq h \leq 20000 \\ 5535 \cdot ((216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000)) / 216.65)^{-34.163} & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases} \quad (2)$$

[0153] 大气密度随海拔高度  $h$  变化的数学表达式为：

$$[0154] \quad \rho_{Atm} = \begin{cases} 1.225 \cdot ((288.15 - 0.0065 \cdot h) / 288.15)^{4.256} & 0 \leq h \leq 11000 \\ 0.3672 \cdot \exp(-(h - 11000) / 6341.62) & 11000 \leq h \leq 20000 \\ 0.0889 \cdot ((216.65 + 0.001 \cdot (h - 20000)) / 216.65)^{-35.163} & 20000 \leq h \leq 32000 \end{cases} \quad (3)$$

[0155] 计算太阳直接辐射热流  $q_{D,S}$ ，大气散射太阳辐射热流  $q_{A,S}$ ，地面反射太阳辐射热流  $q_{G,S}$ ，大气长波辐射热流  $q_{A,IR}$ ，地面长波辐射热流  $q_{G,IR}$ ，对流换热环境参数包括飞艇与外部环境的对流换热系数  $h_{Ex}$ ，飞艇与内部氦气的对流换热系数  $h_{In}$ 。

[0156] 太阳直接辐射热流  $q_{D,S}$  是大气层上界太阳辐射强度  $I_0$  与太阳直接辐射衰减系数  $\tau_{Atm}$  的乘积，计算式如下：

$$[0157] \quad q_{D,S} = I_0 \cdot \tau_{Atm} \quad (4)$$

[0158] 大气散射太阳辐射热流  $q_{A,S}$  是太阳直接辐射热流  $q_{D,S}$  与大气散射系数  $k$  的乘积，计算式如下：

$$[0159] \quad q_{A,S} = k \cdot q_{D,S} \quad (5)$$

[0160] 地面反射太阳辐射热流  $q_{G,S}$  是抵达地球表面太阳直接辐射强度  $I_{Ground}$ 、地球表面反射系数  $r_{Ground}$  与地球表面辐射衰减系数  $\tau_{IR,G}$  的乘积，计算式如下：

$$[0161] \quad q_{G,S} = I_{Ground} \cdot r_{Ground} \cdot \tau_{IR,G} \quad (6)$$

[0162] 大气长波辐射热流  $q_{A,IR}$  计算式如下：

$$[0163] \quad q_{A\_IR} = \sigma \cdot T_{Atm}^4 \quad (7)$$

[0164] 其中,  $\sigma$  是辐射常数,  $T_{Atm}$  是大气温度。

[0165] 地面长波辐射热流  $q_{G\_IR}$  计算式如下:

$$[0166] \quad q_{G\_IR} = \varepsilon_{Ground} \cdot \sigma \cdot T_{Ground}^4 \cdot \tau_{IR\_G} \quad (8)$$

[0167] 其中,  $T_{Ground}$  是地面温度,  $\varepsilon_{Ground}$  为地面发射率;。

[0168] 计算域内质量、动量和能量微分方程为:

[0169] 质量微分方程:

$$[0170] \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (9)$$

[0171] 动量微分方程:

$$[0172] \quad \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} \mathbf{u}) - \frac{\partial P}{\partial \mathbf{X}} + S_u \quad (10)$$

[0173] 能量微分方程:

$$[0174] \quad \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_p \mathbf{u} T) = \text{div}(k \cdot \text{grad} T) + S_T \quad (11)$$

[0175] 其中,  $T$  是温度;  $\rho$  是密度;  $c_p$  是定压比热容;  $t$  代表时间;  $\mathbf{u}$  代表流体速度矢量;  $k$  是导热系数;  $S_u$  代表动量广义源项;  $S_T$  代表能量广义源项;  $\mu$  是流体的粘度系数;  $P$  是流体压力;  $\mathbf{X}$  指代坐标向量。

[0176] 建立各微元质量、动量和能量微分方程。其中, 针对质量和动量微分方程, 固体微元域内无流动, 质量和动量微分方程退化; 流体微元质量和动量微分通过联立能量微分方程一起求解。针对能量微分方程, 固体微元的辐射热量、导热热量、内热源是其广义能量源项, 添加广义能量源项作为边界条件即可建立完整的能量微分方程; 流体微元与固体微元边界的热对流换热通过质量微分方程、动量微分方程和能量微分方程联立求解。

[0177] 太阳能电池微元  $i$  的能量广义源项表达式:

$$[0178] \quad S_{T,S,i} = Q_{S,i,D} + Q_{S,i,Atm} + Q_{S,i,IR,Atm} + Q_{S,i,IR} + Q_{S,i,Cond} \quad (12)$$

[0179]  $Q_{S,i,D}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{S,i,Atm}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{S,i,IR,Atm}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{S,i,IR}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{S,i,Cond}$  是通过隔热层与艇体的传导换热热量。

[0180] 太阳能电池微元  $i$  的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下:

[0181] 吸收太阳直接辐射热量  $Q_{S,i,D}$ :

$$[0182] \quad Q_{S,i,D} = \alpha_s \cdot q_{D,S} \cdot A_{S,i} \cdot F_{S,S} \quad (13)$$

[0183] 其中,  $F_{S,S}$  是太阳能电池微元  $i$  外表面与太阳直接辐射的辐射角系数,  $A_{S,i}$  是太阳能电池微元  $i$  外表面面积。

[0184] 吸收大气散射辐射热量  $Q_{S,i,Atm}$ :

$$[0185] \quad Q_{S,i,Atm} = \alpha_s \cdot q_{IR,Atm} \cdot A_{S,i} \quad (14)$$

[0186] 吸收大气长波辐射热量  $Q_{S,i\_IR\_Atm}$ :

$$[0187] \quad Q_{S,i\_IR\_Atm} = \varepsilon_S \cdot q_{IR\_Atm} \cdot A_{S,i} \quad (15)$$

[0188] 对外界环境长波辐射热量  $Q_{S,i\_IR}$ :

$$[0189] \quad Q_{S,i\_IR} = -\varepsilon_S \cdot \sigma \cdot T_{S,i}^4 \cdot A_{S,i} \quad (16)$$

[0190] 其中,  $T_{S,i}$  是太阳能电池微元  $i$  的温度。

[0191] 通过隔热层与艇体的传导换热热量  $Q_{S,i\_Cond}$ :

$$[0192] \quad Q_{S,i\_Cond} = \lambda_{S_I} \cdot \frac{T_{Emp\_S,j} - T_{S,i}}{\delta_{S_I}} \cdot A_{S,i} \quad (17)$$

[0193] 其中,  $T_{Emp\_S,j}$  是艇体微元  $j$  的温度, 艇体微元  $j$  被太阳能电池微元  $i$  遮盖。

[0194] 艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的能量广义源项表达式:

$$[0195] \quad S_{T\_Emp\_S,j} = Q_{Emp\_S,j\_IR} + Q_{Emp\_S,j\_Cond} \quad (18)$$

[0196] 其中,  $Q_{Emp\_S,j\_IR}$  是吸收艇体内部辐射换热热量,  $Q_{Emp\_S,j\_Cond}$  是通过隔热层与太阳能电池的传导换热热量。

[0197] 艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下:

[0198] 吸收艇体内部辐射换热热量  $Q_{Emp\_S,j\_IR}$ :

$$[0199] \quad Q_{Emp\_S,j\_IR} = A_{Emp\_S,j} \cdot (G_{Emp\_S,j} - J_{Emp\_S,j}) \quad (19)$$

[0200] 其中,  $G_{Emp\_S,j}$  是投射到艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的辐射热流,  $J_{Emp\_S,j}$  是离开微元  $j$  的辐射热流。

[0201] 其中,  $J_{Emp\_S,j}$  可以表达为微元辐射热流和反射热流之和, 其表达式:

$$[0202] \quad G_{Emp\_S,j} = (J_{Emp\_S,j} - \varepsilon \sigma T_{Emp\_S,j}^4) / (1 - \varepsilon) \quad (20)$$

$$[0203] \quad J_{Emp\_S,j} = \varepsilon \sigma T_{Emp\_S,j}^4 + (1 - \varepsilon) \sum_{k=1}^N J_{Emp\_S,j} X_{k,j} \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (21)$$

[0204] 其中,  $X_{k,j}$  是艇体内表面微元  $k$  到艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的辐射角系数。

[0205] 通过隔热层与太阳能电池的传导换热热量  $Q_{Emp\_S,j\_Cond}$ :

$$[0206] \quad Q_{Emp\_S,j\_Cond} = \lambda_{S_I} \cdot \frac{T_{S,i} - T_{Emp\_S,j}}{\delta_{S_I}} \cdot A_{Emp\_S,j} \quad (22)$$

[0207] 其中,  $T_{Emp\_S,j}$  是艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的温度,  $A_{Emp\_S,j}$  是艇体上半部分被太阳能电池遮盖部分微元  $j$  的面积。

[0208] 艇体上半部分未被太阳能电池遮盖部分微元 1 的能量广义源项表达式:

$$[0209] \quad S_{T\_Emp\_R,1} = Q_{Emp\_R,1\_D} + Q_{Emp\_R,1\_Atm} + Q_{Emp\_R,1\_IR\_Atm} + Q_{Emp\_R,1\_IR\_E} + Q_{Emp\_R,1\_IR\_I} \quad (23)$$

[0210] 其中,  $Q_{Emp\_R,1\_D}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{Emp\_R,1\_Atm}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{Emp\_R,1\_IR\_Atm}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{Emp\_R,1\_IR\_E}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{Emp\_R,1\_IR\_I}$  是与艇体内部长波辐射换热热量。

[0211] 艇体上半部分未被太阳能电池遮盖部分微元 1 的能量广义源项表达式中各项热



量计算式列述如下：

[0212] 吸收太阳直接辐射热量  $Q_{\text{Enup\_R,1\_D}}$ ：

$$[0213] \quad Q_{\text{Enup\_R,1\_D}} = \alpha \cdot q_{\text{D\_S}} \cdot A_{\text{Enup\_R,1}} \cdot F_{\text{Enup\_R,1\_S}} \quad (24)$$

[0214] 其中,  $A_{\text{Enup\_R,1}}$  是微元 1 的面积,  $F_{\text{Enup\_R,1\_S}}$  是微元 1 与太阳直接辐射的辐射角系数。

[0215]  $Q_{\text{Enup\_R,1\_IR\_I}}$  是与艇体下半部分长波辐射换热热量。

[0216] 吸收大气散射辐射热量  $Q_{\text{Enup\_R,1\_Atm}}$ ：

$$[0217] \quad Q_{\text{Enup\_R,1\_Atm}} = \alpha \cdot q_{\text{A\_S}} \cdot A_{\text{Enup\_R,1}} \quad (25)$$

[0218] 吸收大气长波辐射热量  $Q_{\text{Enup\_R,1\_IR\_Atm}}$ ：

$$[0219] \quad Q_{\text{Enup\_R,1\_IR\_Atm}} = \varepsilon \cdot q_{\text{A\_IR}} \cdot A_{\text{Enup\_R,1}} \quad (26)$$

[0220] 其中,  $\varepsilon$  是艇体材料发射率。

[0221] 对外界环境长波辐射热量  $Q_{\text{Enup\_R,1\_IR\_E}}$ ：

$$[0222] \quad Q_{\text{Enup\_R,1\_IR\_E}} = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{Enup\_R,1}}^4 \cdot A_{\text{Enup\_R,1}} \quad (27)$$

[0223] 与艇体内部长波辐射换热热量  $Q_{\text{Enup\_R,1\_IR\_I}}$ ：

$$[0224] \quad Q_{\text{Enup\_R,1\_IR\_I}} = A_{\text{Enup\_R,1}} \cdot (G_{\text{Enup\_R,1}} - J_{\text{Enup\_R,1}}) \quad (28)$$

[0225] 其中,  $G_{\text{Enup\_R,1}}$  是投射到微元 1 的辐射热流,  $J_{\text{Enup\_R,1}}$  是离开微元 1 的辐射热流。

[0226] 艇体下半部分微元 m 的能量广义源项表达式：

$$[0227] \quad S_{\text{T\_End,m}} = Q_{\text{End,m\_D}} + Q_{\text{End,m\_Atm}} + Q_{\text{End,m\_G}} + Q_{\text{End,m\_IR\_Atm}} + Q_{\text{End,m\_IR\_G}} + Q_{\text{End,m\_IR\_E}} + Q_{\text{End,m\_IR\_I}} \quad (29)$$

[0228] 其中,  $Q_{\text{End,m\_D}}$  是吸收太阳直接辐射热量,  $Q_{\text{End,m\_Atm}}$  是吸收大气散射辐射热量,  $Q_{\text{End,m\_G}}$  是吸收地面反射辐射热量,  $Q_{\text{End,m\_IR\_Atm}}$  是吸收大气长波辐射热量,  $Q_{\text{End,m\_IR\_G}}$  是吸收地面长波辐射热量,  $Q_{\text{End,m\_IR\_E}}$  是对外界环境长波辐射热量,  $Q_{\text{End,m\_IR\_I}}$  是与艇体内部长波辐射换热热量。

[0229] 艇体下半部分微元 m 的能量广义源项表达式中各项热量计算式列述如下：

[0230] 吸收太阳直接辐射热量  $Q_{\text{End,m\_Atm}}$ ：

$$[0231] \quad Q_{\text{End,m\_Atm}} = \alpha \cdot q_{\text{D\_S}} \cdot A_{\text{End,m}} \cdot F_{\text{End,m\_S}} \quad (30)$$

[0232] 其中,  $A_{\text{End,m}}$  是微元 m 的面积,  $F_{\text{End,m\_S}}$  是微元 m 与太阳直接辐射的辐射角系数。

[0233] 吸收大气散射辐射热量  $Q_{\text{End,m\_Atm}}$ ：

$$[0234] \quad Q_{\text{End,m\_Atm}} = \alpha \cdot q_{\text{A\_S}} \cdot A_{\text{End,m}} \quad (31)$$

[0235] 吸收地面反射辐射热量  $Q_{\text{End,m\_G}}$ ：

$$[0236] \quad Q_{\text{End,m\_G}} = \alpha \cdot q_{\text{G\_S}} \cdot A_{\text{End,m}} \quad (32)$$

[0237] 吸收大气长波辐射热量  $Q_{\text{End,m\_IR\_Atm}}$ ：

$$[0238] \quad Q_{\text{End,m\_IR\_Atm}} = \varepsilon \cdot q_{\text{A\_IR}} \cdot A_{\text{End,m}} \quad (33)$$

[0239] 吸收地面长波辐射热量  $Q_{\text{End,m\_IR\_G}}$ ：

$$[0240] \quad Q_{\text{End,m\_IR\_G}} = \varepsilon \cdot q_{\text{G\_IR}} \cdot A_{\text{End,m}} \quad (34)$$

[0241] 对外界环境长波辐射热量  $Q_{\text{End,m\_IR\_E}}$ ：

$$[0242] \quad Q_{\text{End,m\_IR\_E}} = -\varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{End,m}}^4 \cdot A_{\text{End,m}} \quad (35)$$

[0243] 与艇体内部长波辐射换热热量

$$[0244] \quad Q_{\text{End,m\_IR\_I}} = A_{\text{End,m}} \cdot (G_{\text{End,m}} - J_{\text{End,m}}) \quad (36)$$

[0245] 其中,  $G_{\text{End,m}}$  是投射到微元 m 的辐射热流,  $J_{\text{End,m}}$  是离开微元 m 的辐射热流。

[0246] 氦气压力控制范围为：

[0247]  $0 \leq \Delta P_{He} = P_{He} - P_{Atm} \leq 300Pa$  (37)

[0248] 其中,  $\Delta P_{He}$ 是氦气超压量,  $P_{He}$ 是氦气绝对压力,  $P_{Atm}$ 是大气环境压力。

[0249] 氦气质量控制:当飞艇内部氦气超压超过 300Pa 时候,氦气阀门打开,排出部分氦气,至超压量等于 300Pa 时阀门关闭。

[0250] 氦气质量流量计算式为:

[0251] 
$$\frac{dm_{He}}{dt} = A_{v\_He} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{He} \cdot \rho_{He}}{k_{v\_He}}} \quad (38)$$

[0252] 其中,  $\rho_{He}$ 是氦气密度,  $A_{v\_He}$ 是氦气阀门面积,  $k_{v\_He}$ 是氦气阀门流量系数。

[0253] 内部氦气温度和速度通过求解艇体内部流体微元内质量、动量以及能量微分方程获得。

[0254] 输入飞艇设计参数、飞行任务参数,加载微元的热边界条件,通过微元之间能量数据传递,联立求解微元能量方程组,计算飞艇平飞过程分布温度分布数据。

[0255] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

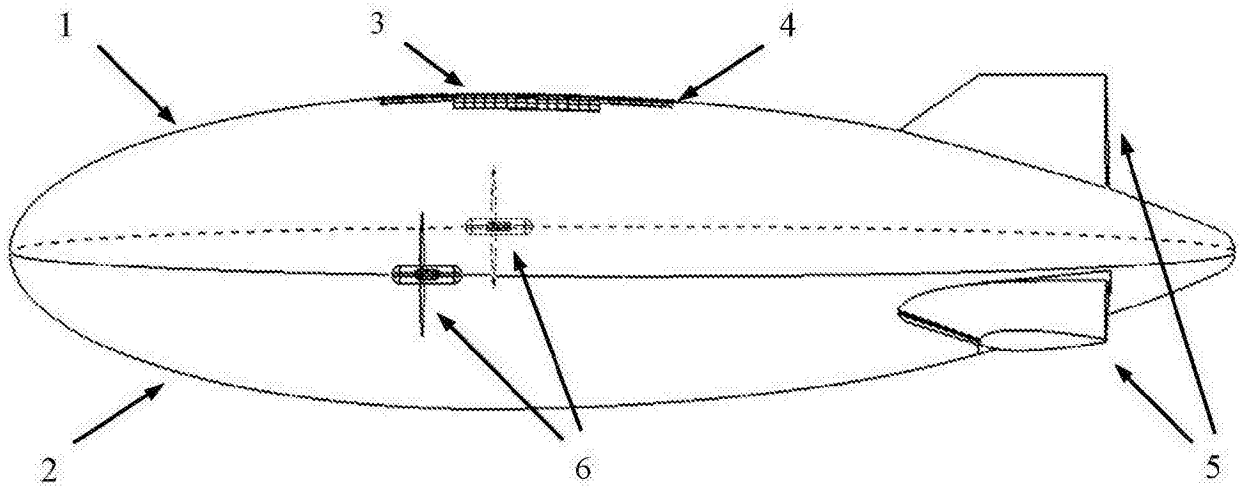


图 1

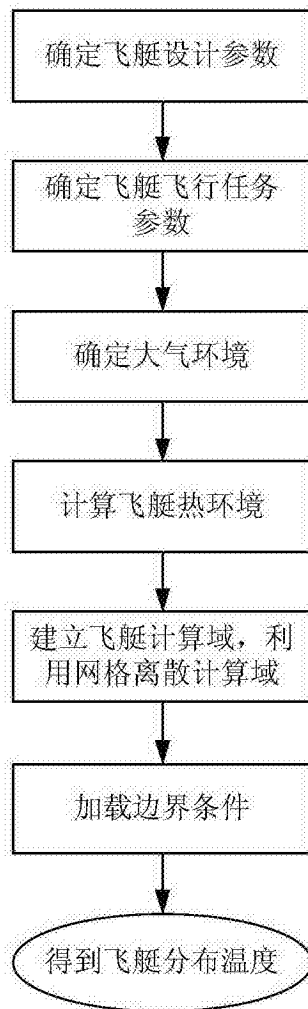


图 2