多舱段载人航天器 CO_2 去除系统性能仿真分析

靳 健 侯永青

(中国空间技术研究院 载人航天总体部, 北京 100094)

摘 要: 多舱段载人航天器通常由主控舱段利用舱间通风对组合体空气环境参数进行集中控制. 利用 Ecosimpro 建立了一种多舱段载人航天器 CO_2 去除系统性能仿真分析模型, 包括舱体模块、乘员模块、CO_2 净化模块、舱间通风模块, 并对三舱段载人航天器 CO_2 去除系统性能进行了计算分析. 结果表明, 当净化装置进风量为 0.007 2 kg/s, 非主控舱段驻留人数达到 6 人时, 会造成非主控舱段 CO_2 分压超出 700 Pa 的指标上限. 此时增大舱间通风量对降低非主控舱段 CO_2 分压的效果并不明显, 有效的控制方式是增大净化装置进风量. 当净化装置进风量增加至 0.011 3 kg/s 时, 非主控舱段 CO_2 分压可降至 700 Pa 以下. 该工作有助于加快载人航天器空气环境控制系统的设计和改进流程.

关 键 词: 载人航天器组合体; 密封舱; 空气环境; 舱间通风; CO_2 去除

中图分类号: V 416.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)10-1349-06

Analysis on characteristics of CO_2 removal system of multi-cabin human spacecraft

Jin Jian Hou Yongqing

(Institute of Manned Space System Engineering, China Acdemy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Air environment of human spacecraft with multi-cabin is usually controlled by one core cabin through inter-cabin ventilation. An integrated simulation model of CO_2 removal system of human spacecraft with multi-cabin was developed with Ecosimpro, including cabin sub module, crew sub module, CO_2 removal sub module, and inter-cabin ventilation sub module. Using this simulation model, the characteristics of CO_2 removal system were analyzed. According to the results, when crew number in cabins without CO_2 removal equipment is up to 6 and air flux into CO_2 removal equipment is maintained at 0.007 2 kg/s, CO_2 partial pressure of cabins without CO_2 removal equipment is beyond upper limit of 700 Pa. In that case, CO_2 partial pressure could not be improved effectively by increasing inter-cabin ventilation flux. However, when air flux into CO_2 removal equipment is increased from 0.007 2 kg/s to 0.011 3 kg/s, CO_2 partial pressure of cabin without CO_2 removal system is reduced below 700 Pa. The work is helpful to accelerate the process of design and improvement of air environment control system of human spacecraft.

Key words: human spacecraft assemble; pressurized cabin; air environment; inter-cabin ventilation; CO_2 removal

执行中长期乘员驻留任务的载人航天器通常是由多舱段在轨组装形成的组合体, 如和平号空间站、国际空间站. 我国的目标飞行器在轨期间也通过交会对接与载人飞船形成两舱组合体. 载人

收稿日期: 2013-11-14; **网络出版时间**: 2014-04-02 10:24; **DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0653

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0653.html

基金项目: 国家重大科技工程专项资助项目

作者简介: 靳 健(1980 -), 男, 北京人, 高级工程师, jinjian0331@126.com.

航天任务过程中,为了保障航天员的生命安全和工作效率,必须在乘员驻留期间严格控制密封舱内的 CO_2 分压水平. 由于各舱段密封舱通过舱门彼此连通,参考国外型号和我国载人航天器型号的设计经验,组合体密封舱 CO_2 分压通常由 1 个或若干个舱段的空气环境控制系统利用舱间通风进行集中控制[1-11].

目前 CO_2 去除系统性能分析方式通常是建立密封舱 CFD 仿真分析模型[12-15],分析密封舱内的 CO_2 分压参数,这种设计方法侧重点在流场分析而不是系统性能分析,存在如下不足:

1) 难以对流场参数外的关键参数进行分析,且容易割裂各个参数间的相互影响;

2) 舱段通常需要建立三维计算模型,由于舱段众多,几何模型建立和网格划分工作量巨大;

3) 为进行众多的参数分析,需计算多个工况,而每个工况计算均需花费较多工时,总计算周期较长;

4) 适合进行稳态分析,进行非稳态计算较为不便.

本文针对某三舱载人航天器组合体,利用参数、代数方程、微分方程对空气环境控制系统各个关键部件的性能进行了描述,从而形成各个部件的数学模型,利用这些部件的数学模型搭建了载人航天器组合体 CO_2 去除系统性能仿真分析模型,分析了乘员位置、乘员人数、舱间通风量、去除系统流量对各舱 CO_2 分压水平的影响.

1 CO_2 去除系统组成说明

本文的研究对象是一个由舱Ⅰ、舱Ⅱ和舱Ⅲ组装形成的三舱段组合体,组合体密封舱 CO_2 分压由舱Ⅰ利用舱间通风进行集中控制,综合参考国际空间站指标要求[8]和我国某在轨载人航天器型号,确定密封舱 CO_2 分压不高于 700 Pa,短时间内 CO_2 分压上限可以达到 1 000 Pa. 模型具体组成如下:

1) 舱体. 舱Ⅰ、舱Ⅱ和舱Ⅲ密封舱容积均为 80 m^3,三舱采用"一"字型组合体.

2) 乘员. 额定乘员 3 人,轮换期间乘员达到 6 人,假定各个乘员代谢参数一致,参考我国前期设计经验,单个乘员的 CO_2 产出速率为 0.041 7 kg/h.

3) CO_2 去除装置. 参考我国前期载人航天器设计经验,舱Ⅰ配备非再生式 LiOH 净化罐和风机组件,风机组件从人区抽取空气进入净化罐去除 CO_2,空气流量可以进行调节,舱Ⅱ和舱Ⅲ不配备 CO_2 净化系统.

4) 舱间通风系统. 在舱Ⅰ配备舱间通风风机和通风软管,利用通风软管将舱Ⅱ的空气抽至舱Ⅰ,舱Ⅰ空气通过对接通道回风至舱Ⅱ. 在舱Ⅱ配备舱间通风风机和通风软管,利用通风软管将舱Ⅲ的空气抽至舱Ⅱ,舱Ⅱ空气通过对接通道回风至舱Ⅲ. 舱间通风量可以进行调节.

综上所述,载人航天器组合体密封舱 CO_2 去除系统组成见图 1.

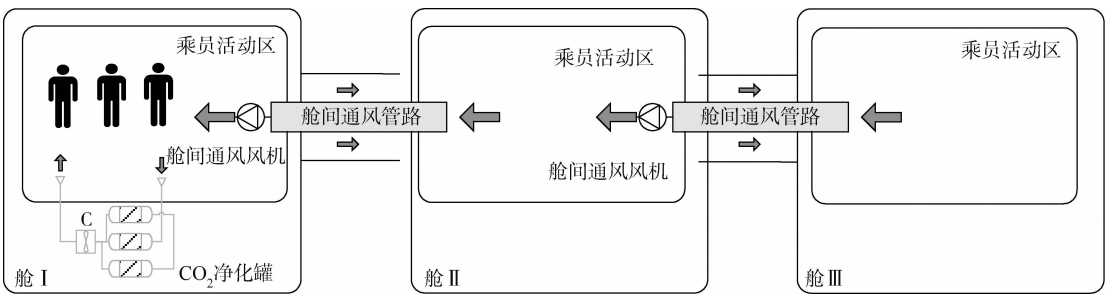


图 1 三舱组合体 CO_2 去除系统组成

Fig. 1 Structure of CO_2 removal system of three-cabin human spacecraft

2 仿真分析模型

本文采用数学分析软件 Ecosimpro 作为载人航天器空气环境控制系统性能集成分析建模的基础平台,该软件是 ESA 官方选用分析工具,曾成功用于国际空间站哥伦布舱空气环境控制系统的设计与在轨性能分析工作,该软件能够对任何可以表示为微分代数方程(DAE)或者常微分方程的动态系统以及离散事件进行建模.

本文利用 Ecosimpro 平台,通过一系列微分代数方程或常微分方程对 CO_2 去除系统各个关键设备性能进行了定义,从而形成各个设备的数学模型. 关键设备的主要控制方程描述如下.

1) 舱体(cabin).

① 空气质量守恒方程:

$$\frac{\mathrm{d}m_j}{\mathrm{d}t} = w_{\mathrm{i}} x_{\mathrm{i},j} - w_{\mathrm{o}} x_{\mathrm{o},j} + w_{1,j} \tag{1}$$

$$M_{\text{air}} = \sum_{j=1}^{N} m_j \tag{2}$$

$$x_{\text{air},j} = m_j / M_{\text{air}} \tag{3}$$

$$y_{\text{air},j} = \frac{x_{\text{air},j}}{M_{W_j}} \Big/ \sum_{l=1}^{N} \frac{x_{\text{air},l}}{M_{W_l}} \tag{4}$$

$$\rho_{\text{air}} = M_{\text{air}} / V_{\text{air}} \tag{5}$$

其中,m_j 是舱内空气中第 j 种组分的质量,kg;w_{i} 是流入舱内的空气质量流量,kg/s;$x_{\text{i},j}$是流入舱内的空气中第 j 种组分的质量分数;w_{o} 是流出舱内的空气质量流量,kg/s;$x_{\text{o},j}$是流出舱内的空气中第 j 种组分的质量分数;$w_{\text{l},j}$是乘员代谢产生的第 j 种空气组分的质量流量,kg/s;M_{air}是舱内空气总质量,kg;N 是舱内空气组分数目;$x_{\text{air},j}$是第 j 种组分的质量分数;$y_{\text{air},j}$是第 j 种组分摩尔分数;M_{W_l}是第 l 种组分的摩尔质量,g/mol;ρ_{air}是舱内空气密度,kg/m^3.

② 空气能量守恒方程:

$$\frac{\mathrm{d}U_{\text{air}}}{\mathrm{d}t} = w_{\text{i}} h_{\text{i}} - w_{\text{o}} h_{\text{o}} + q_{\text{air}} \tag{6}$$

$$u = U_{\text{air}} / M_{\text{air}} \tag{7}$$

其中,U_{air}是舱内空气的内能,J;h_{i} 是流入舱内空气的比焓,J/kg;h_{o} 是流出舱内的空气比焓,J/kg;q_{air}是加入空气的总热流,包括乘员代谢产热、设备向人区的漏热,W;u 是舱内空气的比内能,J/kg.

式(1)~式(7)确定了舱内空气的密度 ρ、比内能 u 和各种组分的摩尔分数 $y_{\text{air},j}$,则舱内空气状态可以确定,舱内气压 P_{air}、空气温度 T_{air}和空气比焓 h_{air}可以通过理想气体相关的方程求出,各种组分的分压如下:

$$P_{\text{air},j} = y_{\text{air},j} \cdot P_{\text{air}} \tag{8}$$

其中 $P_{\text{air},j}$是第 j 种组分的分压,Pa.

③ 两舱间通道内气压:设定等于两密封舱气压 P_{air}中较高的一侧的值.

2) 乘员(crew).

通过模拟乘员的代谢产热、产湿速率、CO_2 产出速率和耗氧速率来模拟乘员的在轨代谢活动,上述代谢产物计入舱体空气质量守恒方程和能量守恒方程相关项目中.

3) LiOH 净化罐.

① 单个净化罐总的 CO_2 净化量控制方程:

$$M_{\text{CO}_2} = x_{\text{L}} \cdot m_{\text{L},0} \tag{9}$$

其中,M_{CO_2}是单个净化罐可处理的 CO_2 总质量,kg;x_{L} 是每千克初始状态的 LiOH 所能去除的 CO_2 质量,kg/kg;$m_{\text{L},0}$是单个净化罐装填的 LiOH 质量,kg.

② CO_2 净化速率控制方程:

$$w_{\text{CO}_2} = 0.9185a \cdot r\left(1 - \frac{x_{\text{L}}}{0.9185a}\right) m_{\text{L},0} \tag{10}$$

其中,w_{CO_2}是 CO_2 净化流速,kg/s;a 是 LiOH 净化罐装填效率,取 0.9;r 是 LiOH 与 CO_2 化学反应速率,s^{-1}.

③ 质量守恒方程:

$$x_{\text{zo},\text{CO}_2} = \frac{w_{\text{zi}} x_{\text{zi},\text{CO}_2} - w_{\text{CO}_2}}{w_{\text{zo}}} \tag{11}$$

其中,$x_{\text{zo},\text{CO}_2}$是流出净化罐的空气中 CO_2 的质量分数;w_{zi}是流入净化罐的空气质量流量,kg/s;w_{zo}是流出净化罐的空气质量流量,kg/s;$x_{\text{zi},\text{CO}_2}$是流入净化罐的空气中 CO_2 的质量分数.

④ 动量守恒方程:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ref}} \cdot \frac{w_{\text{zi}}}{w_{\text{zref}}} \cdot \left|\frac{w_{\text{zi}}}{w_{\text{zref}}}\right| \cdot \frac{\rho_{\text{zref}}}{\rho_{\text{zi}}} \tag{12}$$

其中,Δp 是空气流过净化罐的压差,Pa;Δp_{ref}是空气流过净化罐的参考压差,Pa;w_{zref}是流入净化罐的参考空气质量流量,kg/s;ρ_{zi}和 ρ_{zref}分别是流入净化罐空气的密度和参考密度,kg/m^3.

⑤ 能量守恒方程:

$$\frac{\mathrm{d}T_{\text{b}}}{\mathrm{d}t} = \frac{w_{\text{zi}} h_{\text{zi}} - w_{\text{zo}} h_{\text{zo}} + q_{\text{r}}}{M_{\text{b}} C_{p_{\text{b}}}} \tag{13}$$

其中,T_{b} 是净化罐温度,℃;h_{zi}是流入净化罐空气比焓,J/kg;h_{zo}是流出净化罐空气比焓,J/kg;q_{r} 是化学反应产生的热量,W;M_{b} 是净化罐总质量,kg;$C_{p_{\text{b}}}$是净化罐比热,J/(kg·℃).

4) 组件间接口关系.

① 总质量流量:

$$w = w_{\text{f}} - w_{\text{b}} \tag{14}$$

其中,w 是流过接口的总净质量流量,kg/s;w_{f} 和 w_{b} 分别是顺流和逆流方向总质量流量,kg/s.

② 第 j 种组分质量流量:

$$w_j = w_{\text{f}} x_{\text{f},j} - w_{\text{b}} x_{\text{b},j} \tag{15}$$

其中,w_j 是流体中第 j 种组分的质量流量,kg/s;$x_{\text{f},j}$是第 j 种组分在顺流方向总质量流量中占的质量分数;$x_{\text{b},j}$是第 j 种组分在逆流方向总质量流量中占的质量分数.其中 $x_{\text{f},j}$和 $x_{\text{b},i}$与组分流动方向相关,当组分流动方向为正时,$x_{\text{b},i} = 0$,当组分流动方向为负时,$x_{\text{f,j}} = 0$.

③ 能量流:

$$E = w_{\text{f}} h_{\text{f}} - w_{\text{b}} h_{\text{b}} \tag{16}$$

其中,h_{f} 是顺流方向比焓,J/kg;h_{b} 是逆流方向比焓,J/kg.

三舱载人航天器组合体 CO_2 去除系统模型见图 2.

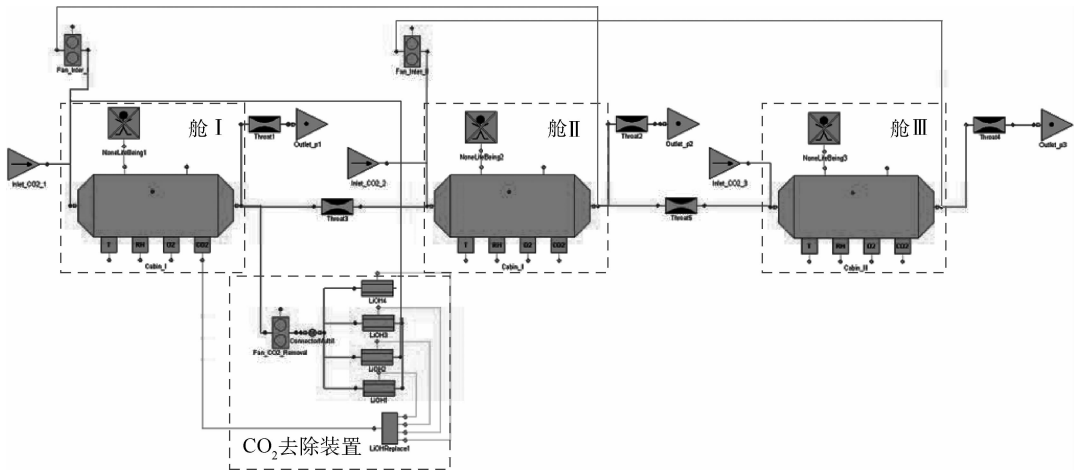


图 2 三舱载人航天器组合体 CO_2 去除系统模型

Fig. 2 Structure of CO_2 removal system of three-cabin human spacecraft

3 结果与分析

利用载人航天器组合体 CO_2 去除系统模型，本文计算分析了乘员位置、乘员人数、舱间通风量、流入去除装置的通风量等参数对密封舱 CO_2 分压的影响.

3.1 乘员所在位置对 CO_2 分压的影响

本文计算分析了 3 名航天员分别驻留在舱Ⅰ、舱Ⅱ、舱Ⅲ过程中，三舱密封舱 CO_2 分压随在轨时间的变化. 计算过程中，舱Ⅰ/舱Ⅱ以及舱Ⅱ/舱Ⅲ的舱间通风量保持为 0.021 kg/s，流入 CO_2 去除装置的空气流量为 0.007 2 kg/s，具体计算流程如下：

1) $T_0 \sim T_0 + 120$ h，3 名航天员驻留在舱Ⅰ；

2) $T_0 + 120$ h $\sim T_0 + 216$ h，3 名航天员驻留在舱Ⅱ；

3) $T_0 + 216$ h $\sim T_0 + 312$ h，3 名航天员驻留在舱Ⅲ.

乘员驻留位置对各舱密封舱 CO_2 分压水平的影响如图 3 所示. 各舱的 CO_2 分压与 CO_2 产出源至去除装置间的输运距离直接相关. 在 $T_0 \sim T_0 + 120$ h 阶段，3 名航天员驻留在舱Ⅰ且 CO_2 由舱Ⅰ来去除，CO_2 产出源至去除装置间输运距离可以认为是 0，三舱 CO_2 分压较为一致，均维持在 320 Pa. 在 $T_0 + 120$ h $\sim T_0 + 216$ h 阶段，3 名航天员驻留在舱Ⅱ，CO_2 产出源也转移至舱Ⅱ，因此，舱Ⅰ的 CO_2 分压在乘员刚离开时短时间下降. 但由于舱Ⅰ需处理的 CO_2 量与 $T_0 \sim T_0 + 120$ h 阶段一致，稳定后舱Ⅰ的 CO_2 分压与 $T_0 \sim T_0 + 120$ h 阶段也一致. 由于舱间通风对 CO_2 的输运能力较强，舱Ⅱ和舱Ⅲ的 CO_2 分压水平一致. 由于舱Ⅱ和舱Ⅲ的 CO_2 需要转移至舱Ⅰ来处理，造成舱Ⅱ和舱Ⅲ的 CO_2 分压要高于舱Ⅰ，维持在 425 Pa. 在 $T_0 + 216$ h $\sim T_0 + 312$ h 阶段，3 名航天员驻留在舱Ⅲ，CO_2 产出源也转移至舱Ⅲ，CO_2 产出源与去除装置间的输运距离进一步加大，造成舱Ⅲ的 CO_2 分压升至 530 Pa，舱Ⅱ的 CO_2 分压与 $T_0 + 120$ h $\sim T_0 + 216$ h 阶段一致，而舱Ⅰ由于需处理的 CO_2 量与 $T_0 \sim T_0 + 120$ h 阶段一致，稳定后舱Ⅰ的 CO_2 分压与 $T_0 \sim T_0 + 120$ h 阶段也一致.

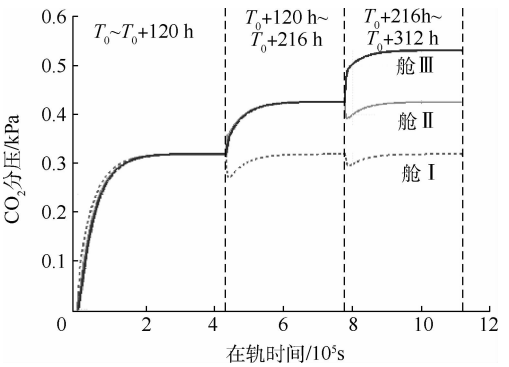


图 3 乘员位置对 CO_2 分压水平的影响

Fig. 3 Influence of crew location to CO_2 partial pressure

综上所述，在上述去除系统参数设定下，三舱 CO_2 分压均满足不高于 700 Pa 的要求，但随着 CO_2 产出源与去除装置间输运距离的加大，CO_2 产出源所在舱体的 CO_2 分压也逐渐加大.

3.2 乘员人数对 CO_2 分压的影响

根据 3.1 节分析可知，航天员驻留在舱Ⅲ时，舱Ⅲ的 CO_2 分压要高于其他工况. 因此，设定航天员驻留在舱Ⅲ，本文计算分析了驻留人数由 3 人逐渐增加至 6 人过程中，三舱密封舱 CO_2 分压随在轨时间的变化. 计算过程中，舱Ⅰ/舱Ⅱ以及舱Ⅱ/舱Ⅲ的舱间通风量保持为 0.021 kg/s，流入

CO_2 去除装置的空气流量为 0.007 2 kg/s,计算流程如下:

1) $T_0 \sim T_0 + 120$ h,3 名航天员驻留在舱Ⅲ;

2) $T_0 + 120$ h ~ $T_0 + 216$ h,4 名航天员驻留在舱Ⅲ;

3) $T_0 + 216$ h ~ $T_0 + 312$ h,5 名航天员驻留在舱Ⅲ;

4) $T_0 + 312$ h ~ $T_0 + 408$ h,6 名航天员驻留在舱Ⅲ.

乘员人数对各舱密封舱 CO_2 分压水平的影响如图 4 所示. 随着航天员人数的增加,各舱 CO_2 分压均随之上升. 由于舱Ⅲ距离 CO_2 去除装置的输运距离最远,舱Ⅲ的 CO_2 分压始终高于其他舱段. 当乘员人数达到 4 人时,舱Ⅲ的 CO_2 分压达到了上限 700 Pa,当乘员人数达到 6 人时,舱Ⅲ的 CO_2 分压超过了 1 000 Pa,舱Ⅱ的 CO_2 分压也超过了 700 Pa.

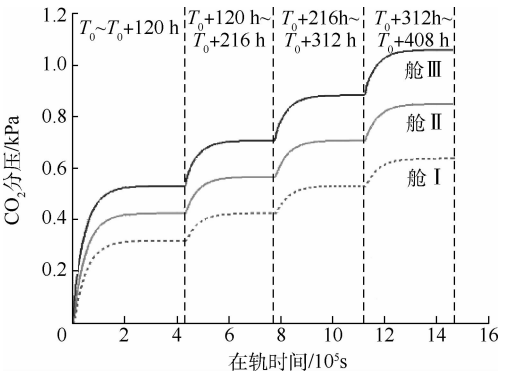


图 4　乘员人数对 CO_2 分压水平的影响

Fig. 4　Influence of crew number to CO_2 partial pressure

综上所述,在上述去除系统参数设定下,4 名乘员驻留在舱Ⅲ时,舱Ⅲ的 CO_2 分压已达上限.

3.3　舱间通风量对 CO_2 分压的影响

根据 3.2 节分析可知,6 名航天员驻留在舱Ⅲ时,舱Ⅲ和舱Ⅱ的 CO_2 分压均超出了指标上限. 本节分析了提高舱间通风量对各舱 CO_2 分压的影响. 计算过程中,6 人驻留在舱Ⅲ,流入 CO_2 去除装置的空气流量为 0.007 2 kg/s,具体计算流程如下:

1) $T_0 \sim T_0 + 120$ h,舱Ⅰ/舱Ⅱ和舱Ⅱ/舱Ⅲ的舱间通风量为 0.021 kg/s;

2) $T_0 + 120$ h ~ $T_0 + 216$ h,舱Ⅰ/舱Ⅱ和舱Ⅱ/舱Ⅲ的舱间通风量为 0.041 kg/s;

3) $T_0 + 216$ h ~ $T_0 + 312$ h,舱Ⅰ/舱Ⅱ和舱Ⅱ/舱Ⅲ的舱间通风量为 0.056 kg/s;

4) $T_0 + 312$ h ~ $T_0 + 408$ h,舱Ⅰ/舱Ⅱ和舱Ⅱ/舱Ⅲ的舱间通风量为 0.07 kg/s.

舱间通风量对各舱密封舱 CO_2 分压水平的影响如图 5 所示. 随着舱间通风量的增加,舱Ⅱ和舱Ⅲ的 CO_2 分压均随之下降,这是因为舱间通风量的增大增加了舱间 CO_2 的传质速率,缩小了各舱 CO_2 分压的差值. 但是由于 CO_2 去除装置所在的舱Ⅰ中 CO_2 分压已经达到了 630 Pa,造成舱Ⅱ和舱Ⅲ在整个计算过程中均在 700 Pa 以上. 当舱间通风量达到 0.07 kg/s 时,舱Ⅱ的 CO_2 分压为 715 Pa,航天员所在的舱Ⅲ CO_2 分压为 780 Pa.

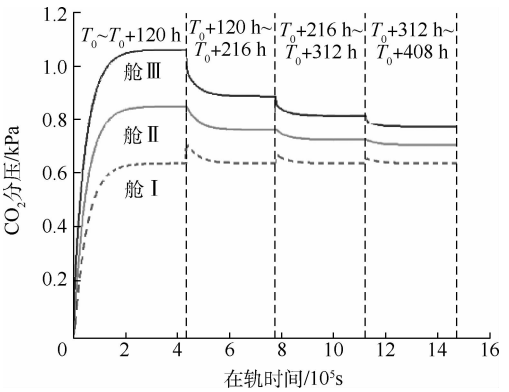


图 5　舱间通风量对 CO_2 分压水平的影响

Fig. 5　Influence of inter-cabin air flux to CO_2 partial pressure

综上所述,由于舱Ⅰ的 CO_2 分压已经接近上限,所以加大舱间通风量虽能降低舱Ⅱ和舱Ⅲ的 CO_2 分压,但是这两个舱段的 CO_2 分压仍然超标.

3.4　去除系统流量对 CO_2 分压的影响

根据 3.3 节分析可知,单纯增加舱间通风量对降低舱Ⅲ和舱Ⅱ CO_2 分压作用有限. 本节分析了提高流入 CO_2 去除装置流量对各舱 CO_2 分压的影响. 计算过程中,6 人驻留在舱Ⅲ,舱Ⅰ/舱Ⅱ以及舱Ⅱ/舱Ⅲ的舱间通风量保持为 0.041 kg/s,具体计算流程如下:

1) $T_0 \sim T_0 + 120$ h,流入 CO_2 去除装置的流量为 0.007 2 kg/s;

2) $T_0 + 120$ h ~ $T_0 + 216$ h,流入 CO_2 去除装置的流量为 0.009 3 kg/s;

3) $T_0 + 216$ h ~ $T_0 + 312$ h,流入 CO_2 去除装置的流量为 0.011 3 kg/s;

4) $T_0 + 312$ h ~ $T_0 + 408$ h,流入 CO_2 去除装置的流量为 0.013 4 kg/s.

流入 CO_2 去除装置通风量对各舱密封舱 CO_2 分压水平的影响如图 6 所示. 随着流入 CO_2 去除装置通风量的增加,各舱 CO_2 分压均随之显著下降,这是因为舱Ⅰ中 CO_2 分压显著下降,带动其他舱段 CO_2 分压也随之下降,当流入 CO_2 去除装置的通风量达到 0.011 3 kg/s 时,舱Ⅲ的 CO_2 分压已经低于 700 Pa 指标要求.

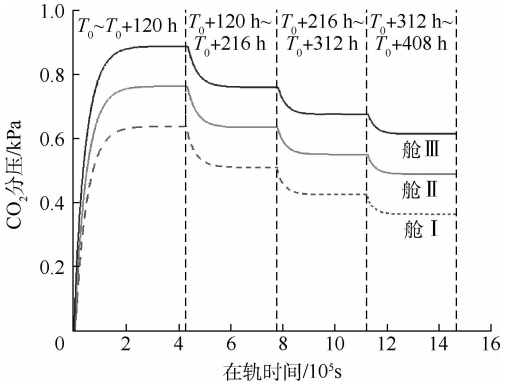


图 6 CO_2 净化装置进风量对 CO_2 分压水平的影响

Fig. 6 Influence of air flux into CO_2 removal equipment to CO_2 partial pressure

4 结 论

本文利用 Ecosimpro 建立了多舱段载人航天器 CO_2 去除系统性能仿真分析模型. 结果表明,通过该模型能够快速准确地得到密封舱内 CO_2 水平随在轨时间的变化趋势,并能够综合考虑各个参数对 CO_2 去除系统性能的影响. 根据本文的计算结果,各个关键参数的取值范围以及对各个密封舱 CO_2 水平的定量影响如下:

1) 非主控舱段 CO_2 分压随 CO_2 产出源至去除装置间输运距离的增加而上升,舱间通风量为 0.021 kg/s,流入 CO_2 去除装置的空气流量为 0.007 2 kg/s 时,3 名航天员驻留在舱Ⅲ时,舱Ⅲ的 CO_2 分压达到了 530 Pa;

2) 各舱 CO_2 分压随着驻留人数的增加而增加,舱间通风量为 0.021 kg/s,流入 CO_2 去除装置的空气流量为 0.007 2 kg/s 时,4 名乘员驻留在舱Ⅲ时,舱Ⅲ的 CO_2 分压已经达到了上限;

3) 舱Ⅱ和舱Ⅲ的 CO_2 分压随着舱间通风量的增加而下降,当舱间通风量达到 0.07 kg/s 时,舱Ⅱ的 CO_2 分压为 715 Pa,航天员所在的舱Ⅲ CO_2 分压为 780 Pa.

4) 各舱 CO_2 分压随着流入 CO_2 去除装置的空气流量增加而下降,舱间通风量为0.041 kg/s,当流入 CO_2 去除装置的通风量达到 0.011 3 kg/s 时,舱Ⅲ的 CO_2 分压已经低于 700 Pa 指标要求.

参考文献 (References)

[1] Larson W J, Pranke L K. Human spaceflight: mission analysis and design[M]. New York: McGraw-Hill, 2000

[2] 林贵平,王普秀. 载人航天生命保障技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:37 - 147
Lin Guiping, Wang Puxiu. Life support technology of manned space craft[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 37 - 147(in Chinese)

[3] 戚发轫. 载人航天器技术[M]. 北京:国防工业出版社,1999:210 - 288
Qi Faren. Manned spacecraft technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 210 - 288(in Chinese)

[4] 范剑峰,黄祖蔚. 载人飞船工程概论[M]. 北京:国防工业出版社,2000:122 - 155
Fan Jianfeng, Huang Zuwei. Introduction to manned spaceship engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 122 - 155(in Chinese)

[5] Antonacci M, Bruno G, Gera G, et al. The design and the verification of the ATV cargo carrier environmental control and life support system and water & gas delivery system[R]. SAE Technical Paper 2000-01-2299, 2000

[6] Anderson G, Martin C E. Evaluation and application of Apollo ECLS/ATCS systems to future manned missions[R]. AIAA-2005-0703, 2005

[7] Mitchell K L, Bagdigian R M, Carrasquillo R L. Technical assessment of MIR-1 life support hardware for the international space station[R]. NASA TM-108441, 1994

[8] Wieland P O. Living together in space: the design and operation of the life support systems on the international space station[R]. NASA/TM-98-206956/VOL1, 1998

[9] 王普秀. 航天环境控制与生命保障工程基础[M]. 北京:国防工业出版社,2003:110 - 156
Wang Puxiu. Foundation of aerospace environment control and life support engineering industry[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 110 - 156(in Chinese)

[10] Wieland P O. Designing of human presence in space: environmental control and life support systems[R]. NASA-1324, 1994

[11] 付仕明,裴一飞,郄殿福. 国际空间站集成 ECLSS/TCS 试验综述[J]. 航天器环境工程,2010,27(4):447 - 451
Fu Shiming, Pei Yifei, Qie Dianfu. Review of integrated ECLSS/TCS tests for ISS[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(4): 447 - 451(in Chinese)

[12] 付仕明,徐小平,李劲东,等. 空间站乘员睡眠区二氧化碳聚集现象[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(5):523 - 526
Fu Shiming, Xu Xiaoping, Li Jindong, et al. Carbon dioxide accumulation of space station crew quarters[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(5): 523 - 526(in Chinese)

[13] 姬朝月,梁新刚,任建勋. 空间站乘员舱内二氧化碳排放的数值研究[C]//第五届空间热物理会议. 北京:中国宇航学会,2000:147 - 150
Ji Chaoyue, Liang Xingang, Ren Jianxun. Simulation study on CO_2 exhaust of crew in space station pressurized cabin[C]// The Fifth Space Thermo-Physics Conference. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2000: 147 - 150(in Chinese)

[14] Lin C H, Son C H. CFD Simulation on the airflow and CO_2 transport in the U. S. Lab: international space station flight 5A configuration[R]. SAE Technical Paper 2001-01-2255, 2001

[15] Lin C H, Son C H, Horstman R H. CFD Studies on the ECLSS airflow and CO_2 accumulation of the international space station[R]. SAE Technical Paper 2000-01-2364, 2000