

直升机核生化防护体系集成设计与仿真

毛晓东, 张策, 王鹤翔, 李洋, 王伟华

(沈阳航空航天大学航空发动机学院, 沈阳, 110136)

摘要 直升机作为国家战略层次的飞行器,其快速进出战场的能力必将在核生化威胁中起到关键作用。为了保障舱内人员的安全,必须对直升机的核生化防护系统进行研究。从系统顶层架构设计出发,基于系统集成手段,设计了一种直升机核生化防护体系。针对各子系统开展了详细构型设计,包括:基于小型高转速电动压气机的气源增压子系统;基于变压吸附原理,可实现机载实时再生的滤毒通风子系统;基于热泵型蒸发制冷循环,利用滑油废热及双蒸发器并联驱动的温度控制子系统;综合座舱超压防护及增压需求的压力调节子系统。基于系统构型,建立了仿真模型,对系统动态性能开展了仿真验证研究。仿真结果表明:在各种极端条件下,舱内压力、温度均满足设计要求。当进入核生化威胁区域时,滤毒通风子系统能够有效吸附有毒物质,吸附床通过机载实时再生,延长了在核生化威胁区域的作业时间,为直升机核生化防护系统设计提供了新的思路。

关键词 核生化防护;直升机座舱;变压吸附;蒸发制冷循环;飞行动态特性

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.01.003

中图分类号 V271.9 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)01-0017-08

Integrated Design and Simulation of Helicopter NBC Protection System

MAO Xiaodong, ZHANG Ce, WANG Hexiang, LI Yang, WANG Weihua

(School of Aero-Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract As a national strategic-level vehicle, a helicopter certainly plays a key role in the nuclear, biological and chemical threat with its ability being capable of rapidly entering and exiting battlefields. To ensure the safety of personnel in cabin, it is necessary to study the NBC protection system of helicopters. In this paper, a helicopter nuclear, biological, and chemical (NBC) protection system is designed in turn from the top-level architecture design of the system based on system integration means. Detailed configuration design is conducted for each sub-system, including air source pressurization sub-system based on a small high speed electric pressurizer, filtration and ventilation sub-system based on the principle of variable pressure adsorption and real-time regeneration on board, temperature control sub-system based on a heat pump-type evaporative refrigeration cycle driven by the use of skidding oil waste heat and parallel drive of double evaporators, and pressure regulation sub-system with integrated cockpit over-pressurization protection and pressurization requirements. Based on the system configuration, a simulation model is established and the dynamic performance of the system is simulated and verified. The simulation results show that under various extreme conditions, both the cabin pressure and the temperature meet the needs of design. While a helicopter enters into the area of NBC threat, the filtration and ventilation subsystem can effective-

收稿日期: 2023-07-23

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1802092)

作者简介: 毛晓东(1984-),男,辽宁大连人,副教授,博士,研究方向为飞行器环控系统。E-mail:maoxiaodong@sau.edu.cn

引用格式: 毛晓东,张策,王鹤翔,等.直升机核生化防护体系集成设计与仿真[J].空军工程大学学报,2024,25(1):17-24. MAO Xiaodong, ZHANG Ce, WANG Hexiang, et al. Integrated Design and Simulation of Helicopter NBC Protection System[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(1): 17-24.

ly adsorb toxic substances, and the adsorbent bed is regenerated in real time by on-board, prolonging the operation time in the NBC threat area. The research provides a new idea for the design of helicopter NBC protection system.

Key words nuclear-biological-chemical protection; cockpit in helicopter; variable pressure adsorption; evaporative refrigeration cycle; flight dynamic characterization

核生化武器曾在一战、二战中使用,近些年也出现在世界各地的恐怖主义袭击中,例如东京地铁沙林毒气袭击^[1]和美国邮政炭疽信件袭击^[2],这两起事件都引起了全世界对化学和生物恐怖主义的严重关注。

目前,世界各国的直升机核生化防护依然以个体防护装备为主。我国国内目前针对直升机核生化防护也同欧美一样,仍处于个体防护阶段^[1-2]。但由于直升机空间狭小,人员密集,个体防护装备不仅会对舱内人员的行动造成不便,其防护效果也会随着时间的推移大打折扣,因此有必要展开集体防护系统的研究。

对集体防护系统的研究始于 20 世纪 60 年代中期,德国科学家首先对集体防护系统进行了初步研究和探索^[3]。我国近些年来基于 CPS 系统进行了改进,对各子系统进行了重新设计规划,为我国舰艇核生化防护系统设计奠定了基础^[4-8]。德国在 20 世纪 80 年代初也研制了自己的核生化战车^[9],其不仅可以在核生化污染环境中自由行驶,还可以对核生化环境中污染气体的类别及含量进行侦测^[10]。

在集体防护系统中,核生化过滤技术是其能否成功实施的关键因素^[11-15]。近些年来,随着可再生吸附技术的发展,各国针对变压吸附及变温吸附在集体防护系统中的应用开展了大量的研究,使得集体防护系统可以实现吸附/脱附循环利用,工作时限得到极大程度的延长。针对可再生吸附系统的研究层出不穷^[16],文献^[17]对 DMMP 的吸附等温线进行了详细研究,对吸附等温线公式中系数 α 进行了规范性的阐述。文献^[18]采用变压吸附手段研究了各种类型的吸附剂对于 DMMP 毒剂的吸附性能差异,结果表明 13X 分子筛对于 DMMP 具有最大的吸附量。美国国防部验证了变压吸附技术在核生化过滤领域的可行性^[19]。

本文基于合理的系统集成,综合考虑气源增压、可再生滤毒通风、舱室温度控制与压力调节,设计了一种直升机核生化防护系统方案及各子系统详细构型。根据设计方案,建立了主要部件的数学模型及系统仿真模型,开展了系统动态性能仿真计算研究,验证了极端条件下系统的性能。

1 系统顶层架构设计

目前,针对直升机的核生化防护系统还没有成型的体系,诸如舰艇的 CPS 系统还不能够很好地应

用到直升机上,对于直升机的核生化防护还只局限于个体防护阶段。为了弥补直升机核生化防护领域的空白,本文从顶层架构出发,通过系统集成,设计了一种直升机核生化防护体系。系统整体架构设计及工作流程如图 1 所示。舱外空气进入后,系统根据外界环境条件判断所需工作模式,通过阀门控制,实现工作模式的切换。纯净的气体通过混合室后进入舱室温度控制系统进行温度控制,最终送至设备舱及座舱。压力调节系统根据舱内压力变化及座舱压力制度,实时进行调节。

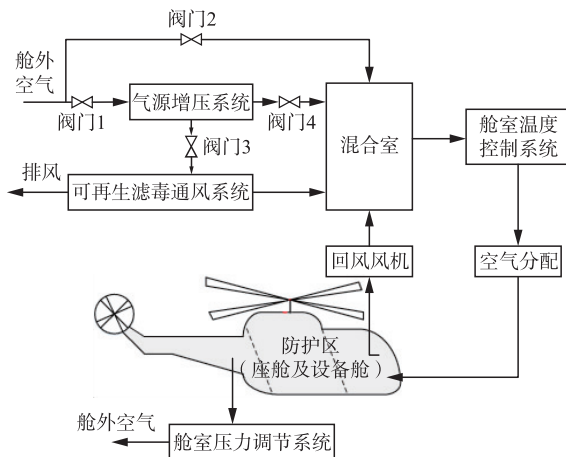


图 1 直升机核生化防护系统顶层架构设计

2 子系统设计

2.1 气源增压子系统构型设计

针对气源增压子系统设计,考虑后续可再生滤毒通风系统需要高压气源,因此采用小型高转速电动压气机。吸附过程的温度通常需要在常温附近,因此采用燃油冷却器对增压后的高温气源进行冷却。子系统构成及工作流程如图 2 所示。通过阀门控制,实现自由通风模式(蓝色)、无防护加压供气模式(红色)、超压防护模式(紫色)切换。

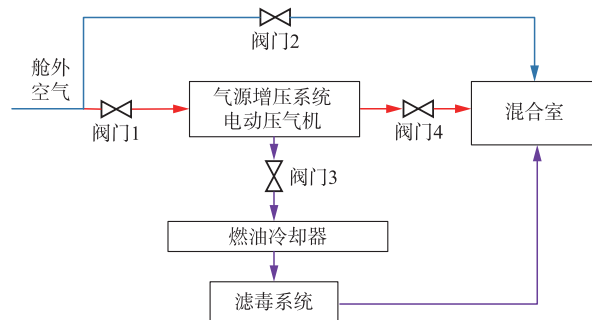


图 2 气源增压子系统构型设计

2.2 可再生滤毒通风子系统构型设计

本文基于变压吸附原理,设计了可再生滤毒通风子系统如图 3 所示。

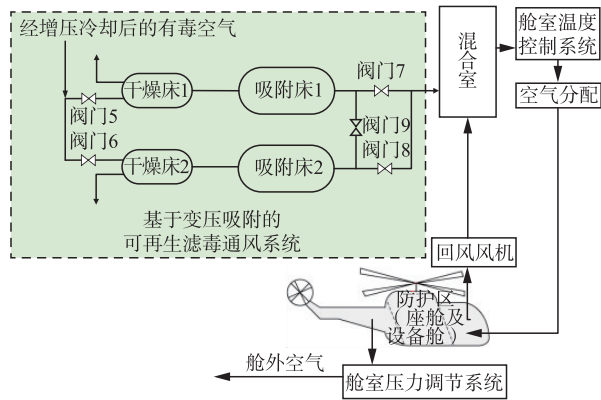


图 3 基于变压吸附的可再生滤毒通风子系统构型设计

干燥床中的干燥介质采用硅胶,吸附床中的吸附介质采用 13X 分子筛。吸附过程采用双床循环方式,吸附床 1 首先在高压状态下吸附有害物质,吸附饱和后,切换至脱附状态,通过常压气体反向冲洗脱附,将所吸附毒剂排向舱外。此时吸附床 2 开始

进行吸附,如此往复循环实现机载实时可再生,满足连续不间断的滤毒通风过程。

2.3 舱室温度控制子系统构型设计

本文基于热泵型蒸发制冷循环、滑油废热再利用、两舱综合温度控制技术,设计了舱室温度控制子系统构型,如图 4 所示。

混合室提供的洁净空气通过送风风机经座舱换热器换热后供给座舱,实现制冷或加温。送风风机始终处于工作状态,以维持座舱送风需求。电子设备舱无需新鲜空气,故而仅需通过风机实现内部循环,利用设备舱换热器带走热量实现设备舱冷却。制冷模式下,通过座舱和电子设备舱双蒸发器并联驱动设计,可将两舱热量同时带走。供热模式下,仅座舱需要供热,考虑到热泵空调在低温下无法运行的问题,利用滑油废热和电子设备舱热量作为辅助热源,在有效拓宽热泵空调工作温度下限的同时,也实现了设备舱及滑油的冷却。

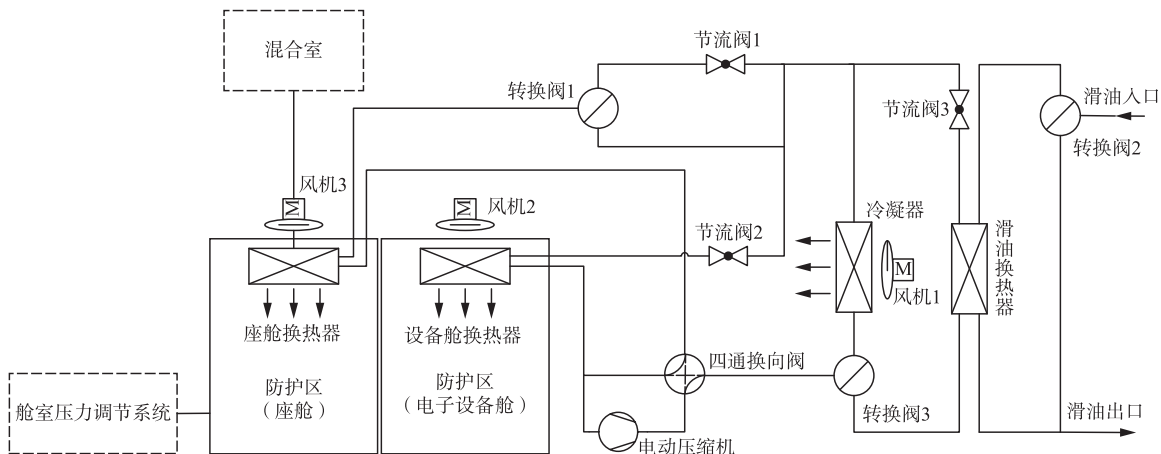


图 4 舱室温度控制子系统构型设计

2.4 压力调节子系统构型设计

2.4.1 数字式压力调节系统构型

对于具备核生化防护功能的直升机,需要对气密座舱采取超压防护功能。而当直升机高海拔飞行时,同样需要对其座舱进行加压。

本文以数字式压调为核心,建立舱室压力调节子系统构型,如图 5 所示。

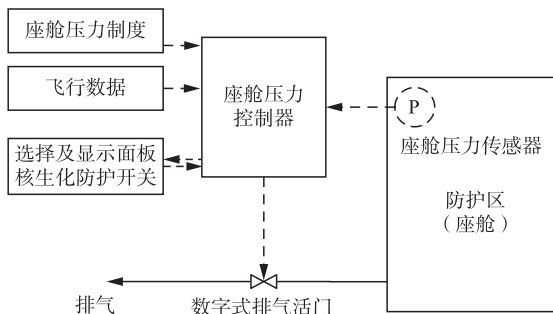


图 5 压力调节子系统构型设计

2.4.2 座舱防护超压值

直升机静止和飞行过程中为了确保外部核生化战剂无法进入舱内,必须保证舱内维持一定的正压,可按式(1)计算:

$$p_w = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (1)$$

式中:K 为空气动力系数,本文中取 1;ρ 为空气密度,选取 -40 °C 极冷天对应的大气密度,约为 1.5 kg/m³;V 为迎风面的法向速度,按 400 km/h 考虑。将相关参数代入式中,可得风压值 p_w 约为 11 276.14 Pa,初步选取座舱超压值为 12 kPa。本文所设计的某型直升机的最大飞行速度指标即为 400 km/h,在此飞行速度范围内,座舱 12 kPa 超压值均满足超压防护要求,对防护效果无影响。

2.4.3 座舱压力制度设计

绝对压力和余压随高度的变化规律称为座舱压

力制度。基于预期设计需求,设计座舱压力制度曲线如图 6 所示,其大气压力以 ISA 1976 为标准。

无超压防护时,座舱压力参照 GJB 646-88 规定,自由通风段内外压差约为 2.3 kPa;定绝压飞行阶段,座舱压力保持 76 kPa 不变。开启超压防护时,超压防护阶段按照所计算防护超压值进行设计,座舱超压值为 12 kPa;定绝压飞行阶段,座舱压力保持 76 kPa 不变。所设计的座舱压力制度满足直升机最大升限 7 km,具有保持直升机座舱压力高度不大于 2.4 km 的能力,当开启核生化防护时,座舱超压值不小于 12 kPa。

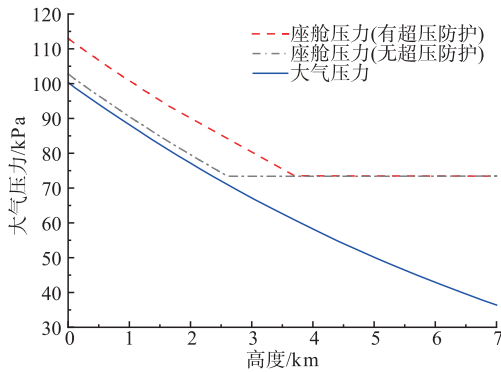


图 6 座舱压力制度曲线

各子系统构型采用模块化设计,通过合理设计的管网进行连接,从而实现功能匹配及工作模式切换。

3 数学模型及仿真模型

本文所设计的集成系统极为复杂,相关部件数学模型很多。受篇幅所限,下文仅针对核心的可再生滤毒通风系统展开描述。气源增压系统、压力调节系统及温度控制系统主要部件的数学模型参照文献[20~22]进行设计。

3.1 气体组分模型

由于直升机需要在各种外环境下飞行,由于环境中是否含有毒气会影响气体的组成成分,因此,对气体组分数学模型的建立至关重要。Van der Waals 状态方程对理想气体的状态方程进行了改进,其表达式为:

$$p = \frac{rT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \quad (2)$$

式中: a 、 b 为与气体种类相关的正系数,通常被称为范德瓦尔常数,不同气体取值不同; r 为比气体常数; v 是比体积; p 、 T 为气体的压力与温度。

气体定压比热容、比焓和比熵的计算式为:

$$c_p = \left(\frac{a_1}{T^2} + \frac{a_2}{T} + a_3 + a_4 T + a_5 T^2 + \right.$$

$$\left. a_6 T^3 + a_7 T^4 + \frac{c_{res}}{r} \right) r \quad (3)$$

$$h = \left(-\frac{a_1}{T} + a_1 \ln(T) + a_3 T + \frac{a_4}{2} T^2 + \right.$$

$$\left. \frac{a_3}{3} T^3 + \frac{a_4}{4} T^4 + \frac{a_7}{5} T^5 + a_8 + \frac{h_{res}}{r} \right) r \quad (4)$$

$$s = \left(-\frac{a_1}{2T^2} - \frac{a_2}{T} + a_2 \ln(T) + a_4 T + \right.$$

$$\left. \frac{a_5}{2} T^2 + \frac{a_8}{3} T^3 + \frac{a_7}{4} T^4 + a_9 + \frac{s_{res}}{r} \right) r \quad (5)$$

式中: a_i ($i=1\sim 9$) 与温度有关,在不同的温度范围,其取值不同; c_{res} 、 h_{res} 、 s_{res} 为状态方程的计算修正项。

3.2 毒剂模型

本文所设计的防护系统,可针对核生化的 3 方面威胁进行防护。其中核威胁及生物威胁主要针对微小的固体颗粒物,而化学威胁主要指化学蒸汽。从活性炭及分子筛的过滤吸附角度来说,对化学蒸汽的吸附要难于对颗粒物的吸附。受篇幅所限,本文仅选择了较为常见的甲基磷酸二甲酯(DMMP)化学毒剂作为系统仿真示例。对于核污染、生物污染和其它化学试剂污染,仅需根据对应的吸附参数修正吸附床模型,即可开展相应工况的仿真研究。

文献[15~16]对 DMMP 进行吸附和脱附试验,得出了 DMMP 在 13X 分子筛中的最佳吸附解吸条件,如表 1 所示。

表 1 DMMP 在 13X 分子筛中的工作条件

参数	值
吸附温度/°C	常温
吸附压力/bar	5
脱附温度/°C	常温
脱附压力/bar	1.013

3.3 吸附床模型

吸附床中吸附剂采用 13X 分子筛,其对 DMMP 的吸附量采用 Langmuir 等温线方程进行计算:

$$\theta = \theta_{max} \frac{\alpha C_{bulk}}{1 + \alpha C_{bulk}} \quad (6)$$

式中: θ 为 DMMP 的实际吸附量,单位:mg/L; θ_{max} 为 DMMP 的理论最大吸附量,单位:mg/L; α 为经验参数,表示 DMMP 的表面亲和力,通常被称为 langmuir 常数,通过查阅相关文献选取 α 为 1.7; C_{bulk} 表示 DMMP 的体积浓度,单位:mg/L。

3.4 干燥床模型

本文设计干燥床模型有 2 种模式:当干燥床上游的湿度低于目标湿度,此时无需去除水蒸气,干燥床仅作为一个简单的压降元件;若干燥床上游的湿度高于目标湿度,此时将去除部分水蒸气,使干燥

床出口的湿度维持目标湿度。被除去的水蒸气冷凝液的质量流量及比焓的计算式如下:

$$dm_1 = dm_{\text{fromUp}} \left(\frac{ah_{\text{up}}}{1+ah_{\text{up}}} - \frac{ah_{\text{T}}}{1+ah_{\text{T}}} \right) (1+ah_{\text{T}}) \quad (7)$$

$$dmh_1 = dm_1 h(P_{\text{up}}, T_{\text{up}}) \quad (8)$$

式中: dm_1 为冷凝液的质量流量,单位: g/s; dmh_1 为冷凝液的比焓,单位: J/kg; dm_{fromUp} 为上游的质

量流量,单位: g/s; ah_{up} 为上游的湿度,单位: g/kg; ah_{T} 为目标湿度,单位: g/kg。 P_{up} 、 T_{up} 分别为干燥床上游压力及上游温度。

3.5 系统仿真模型

以各部件数学模型为基础,基于系统构型,采用 AMESim 仿真平台,建立了直升机核生化防护体系整体仿真模型,如图 7 所示。

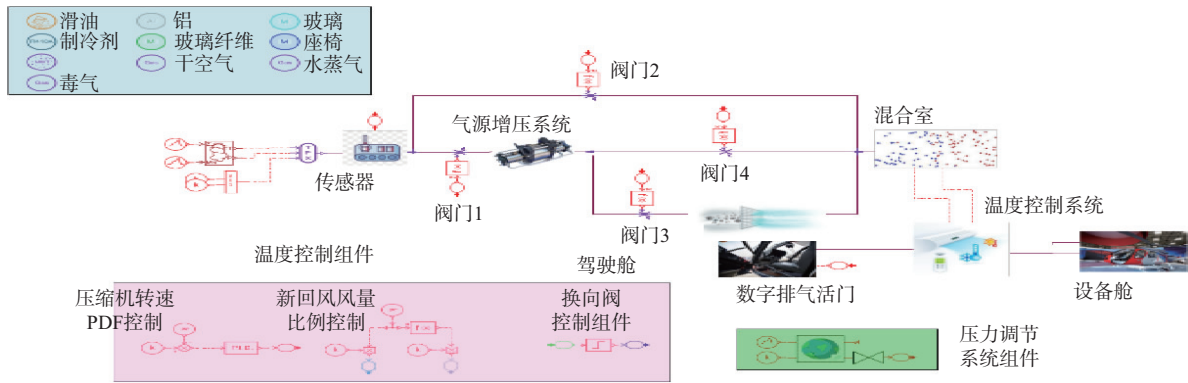


图 7 直升机核生化防护系统仿真模型

4 系统动态性能仿真分析

4.1 仿真条件

由于直升机需要在各种气候条件下执行任务,对此本文设计了 3 种飞行任务:

飞行任务 a: 处于常态,在 ISA 标准大气环境 (15 °C) 下起飞,巡航高度 5 km,飞行任务持续时间 11 000 s; 飞行任务 b: 处于夏季极热状态,采用 ISA +25^[23] 极热条件,在地面环境温度 40 °C 下起飞,巡航高度 2 km,飞行任务持续时间 5 250 s。飞行任务 c: 处于冬季极冷状态,采用 ISA-55^[23] 极冷条件,在地面环境温度 -40 °C 下起飞,巡航高度 2 km,飞行任务持续时间 5 250 s。飞行任务剖面如图 8 所示。

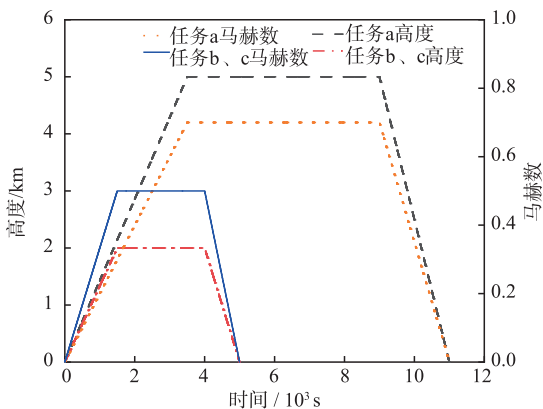


图 8 飞行任务剖面

每种飞行任务均包含无防护模式、开启滤毒通风防护模式 2 种工况。在对各工况进行仿真的过程中各参数具体设置如表 2 所示。针对滤毒通风系统

构型作出如下假设: ① 吸附床 A 首先开始工作; ② 直升机在整个飞行任务过程中均在毒区。

表 2 仿真参数

参数名称	参数值
壁面材质	铝、玻璃纤维
舱室总体积/m ³	4
吸附床吸附速率/(mL/s)	0.4
床层解吸速率/(mL/s)	0.4
吸附床饱和最大吸附量/mL	500
制冷剂	R410A
乘员舱总风量/(kg/s)	1.79
设备舱总风量/(kg/s)	0.5
新风回风比例	1.5 : 7.5
压缩机排量/(cc/rev)	180
压缩机容积效率	0.6
压缩机等熵效率	0.75
压缩机机械效率	0.9
乘员舱换热器尺寸/mm	737×240×70
设备舱换热器尺寸/mm	478×240×70
乘员舱空气侧换热面积/m ²	14.2
乘员舱制冷剂侧换热面积/m ²	0.59
设备舱空气侧换热面积/m ²	9.2
设备舱制冷剂侧换热面积/m ²	0.38

4.2 仿真结果

根据以上飞行包线及相关参数开展仿真计算,仿真结果如图 9~图 11 所示。下文分别从压力调节子系统结果、温度控制子系统结果、滤毒通风子系统结果 3 个方面进行详细分析。

4.2.1 压力调节子系统结果分析

从图 9 可以看出,在飞行任务 a 中,当座舱压力高度小于 2 400 m 时,乘员舱压力在无防护和开启滤毒时与外界大气的压力差分别为 2.3 kPa 和 12 kPa;当座舱压力高度大于 2 400 m 时,座舱余压随飞行高度的上升而逐渐增加,其最大值为 20 kPa。在飞行任务 b、c 中,由于巡航高度小于 2 400 m,座舱余压在无防护时始终保持在 2.3 kPa,在开启滤毒时始终保持在 12 kPa。符合压力制度设计要求。

4.2.2 温度控制子系统结果分析

从图 10 可以看出,当处于无防护状态时:在飞行任务 a 中,座舱温度在上升阶段从 15 °C 逐渐升高,最终升至 22 °C,在巡航阶段始终保持在 22 °C,在下降阶段,由于外界环境温度的变化,舱内温度略有升高但仍保持在舒适温度^[24]范围内;在飞行任务 b 中,座舱温度在上升阶段从 40 °C 降至 22 °C 附近,并在巡航阶段维持该温度,在下降阶段温度略有升高;在飞行任务 c 中,座舱温度在上升阶段从 -40 °C 逐渐升至 22 °C 附近,在巡航阶段维持该温度,在下降阶段,随着外界环境温度的变化,舱内温度略有下降。

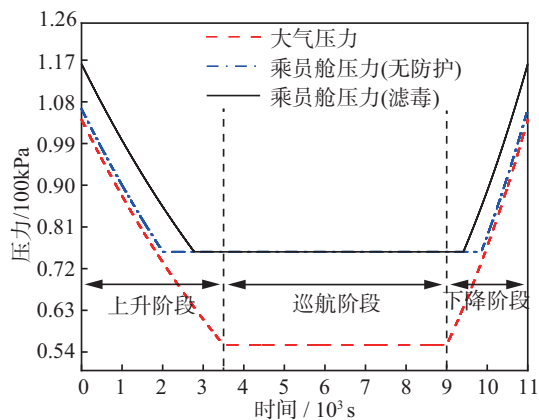
当开启滤毒通风防护模式时,由于滤毒系统的介入,飞行任务 a 中外部空气经过滤毒系统后进入舱内,座舱温度迅速升至 23 °C 左右,在巡航阶段始终保持在 23 °C,在下降阶段,随着环境温度的变化,温度略有波动,但仍保持在指定温度范围内;飞行任务 b 中,舱内温度在上升阶段从 40 °C 迅速降至目标温度范围,进入巡航状态后,温度仍维持在目标温度范围内,在下降阶段,由于外界环境温度的变化温度略有上升;飞行任务 c 中,座舱温度在上升阶段由 -40 °C 逐渐达到 24 °C 左右,在巡航阶段仍维持在目标温度,下降阶段略有下降。

综合比较无防护模式及开启滤毒通风防护模式可以发现,2 种工作模式下,舱内温度均能达到设计要求,但在滤毒模式下,由于滤毒系统的介入,舱内温度可以更快、更好地达到预期设计温度。

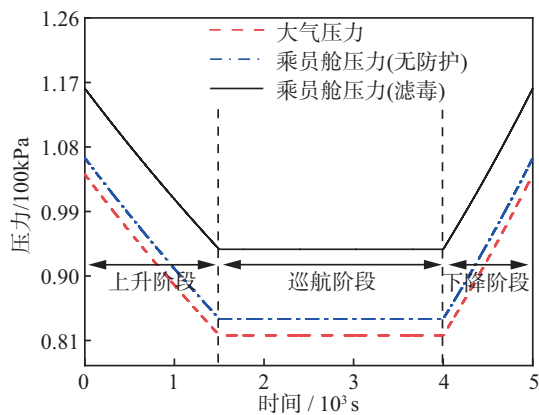
4.2.3 滤毒通风子系统结果分析

从图 11 可以看出,飞行任务 a 中,吸附床 A 内 DMMP 含量首先随着吸附过程的进行迅速升高直至达到饱和,而后吸附床 B 开始吸附,同时吸附床 A 开始脱附,如此往复,直至离开毒区。飞行任务 b、飞行任务 c 同理。

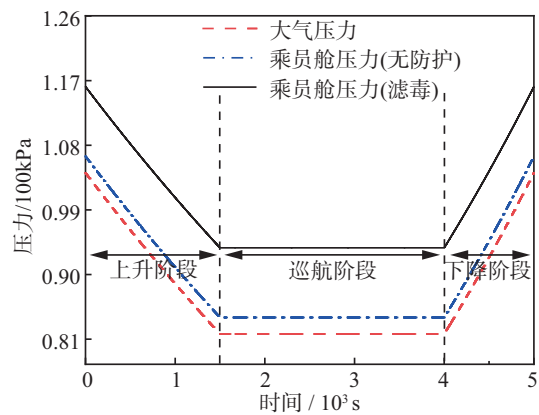
3 种飞行任务下,吸附床 A、吸附床 B 床层内 DMMP 含量呈现交替变化趋势,且 DMMP 最大吸附量达到 498 mg/L,吸附率达到 99.6%,满足设计要求。



(a) 飞行任务 a

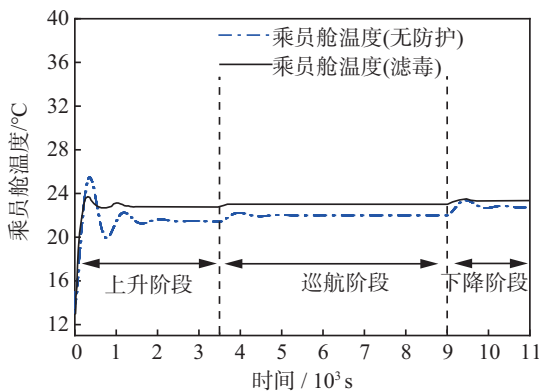


(b) 飞行任务 b

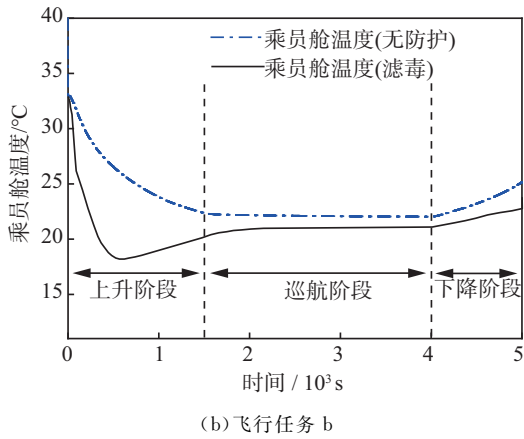


(c) 飞行任务 c

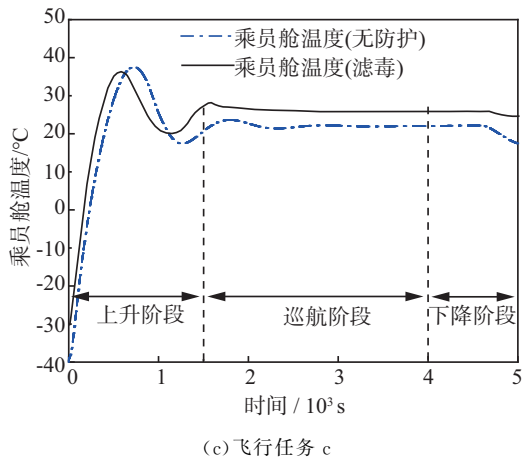
图 9 乘员舱压力变化情况



(a) 飞行任务 a

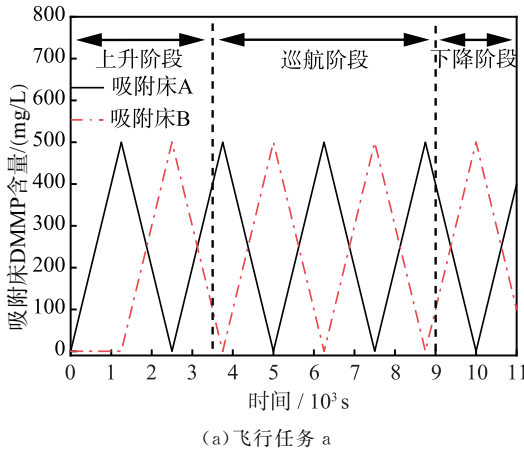


(b) 飞行任务 b

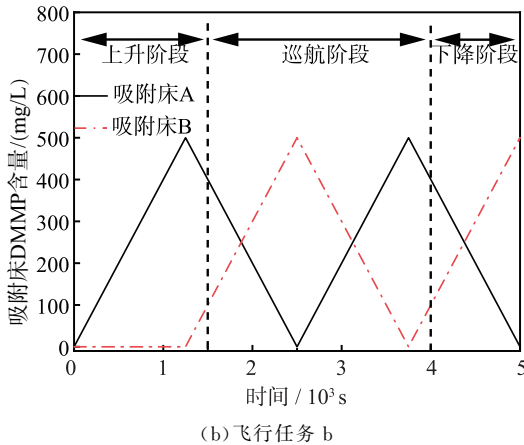


(c) 飞行任务 c

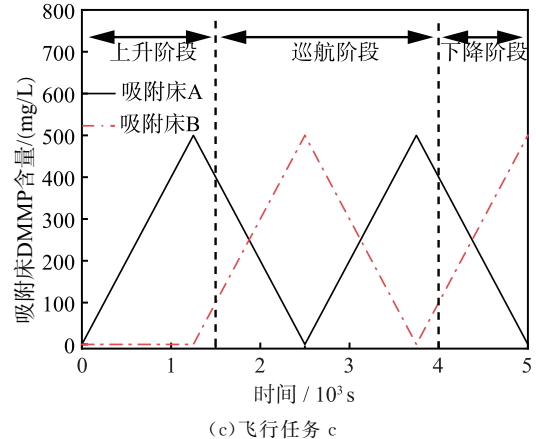
图 10 乘员舱温度变化情况



(a) 飞行任务 a



(b) 飞行任务 b



(c) 飞行任务 c

图 11 DMMP 吸附量变化情况

5 结论

本文针对直升机核生化防护体系,开展了集成设计和仿真计算验证研究,结论如下:

1)从系统顶层架构设计出发,基于系统集成手段,设计了一种直升机核生化防护体系,可综合实现气源增压、滤毒通风、舱室温度控制与压力调节功能。

2)对系统中关键部件的数学模型进行了构建,并建立了直升机核生化防护体系仿真模型,可对全飞行包线下系统的动态特性进行仿真计算。

3)对所设计系统的动态性能开展了仿真验证。仿真结果表明,在各种极端情况下,座舱压力、温度均能满足基本要求,滤毒通风系统可实现机载实时再生,且吸附率达到 99.6%,满足核生化防护基本要求。

参考文献

[1] MASUDA N, TAKATSU M, MORINARI H, et al. Sarin Poisoning in Tokyo Subway[J]. Lancet, 2018, 12(4): 8-15.

[2] ATLAS R M. Bioterrorism: From Threat to Reality [J]. Annual Review of Microbiology, 2022, 56(1): 167-185.

[3] BOERUM R E, BUCK K P. Naval Ship Design Implications of the Collective Protection System[J]. Naval Engineers Journal, 2010, 96(5):29-32.

[4] LIU L, LUO Q. Exploration and Thinking on Collective Protection System of Floating Nuclear Power Plant[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 18(2):4-7.

[5] 方勇. 基于人体工程学的舰船集体防护系统设计[J]. 船海工程, 2016, 45(2):1-3.

[6] 刘秀峰, 喻俊峰, 张益诚, 等. 集体防护区超压建立

- 过程分析 [J]. 船海工程, 2017, 46(3):47-49.
- [7] 方勇. 舰船集体防护系统增压建立时间分析 [J]. 船海工程, 2021, 42(4):112-113.
- [8] 林芑, 王吉, 包剑, 等. 水面舰艇集体防护系统 PID 控制分析 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10(4):118-124.
- [9] 吴磊. 土耳其展示新型“豹”式三防侦察车 [J]. 国外坦克, 2015(3):1-2.
- [10] 王少然. 法国接收 SLATE 狙击手探测系统 [J]. 轻兵器, 2013(7):74-76.
- [11] 方勇. 集体防护系统泄漏量分析 [J]. 船海工程, 2013, 42(4):114-115, 119.
- [12] 郭锦平, 魏世超, 刘志明, 等. 催化氧化滤毒技术的研究进展 [J]. 船海工程, 2022, 15(5):51-54, 58.
- [13] 王英, 廉成强, 齐岩磊. 水面平台核生化防护系统的构建与实现 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(11):175-177.
- [14] 包剑, 罗雯军, 王吉. 集体防护系统超压控制阀性能的数值模拟与优化 [J]. 船海工程, 2018, 47(6):115-119.
- [15] 张家毅, 程代云, 陈升富, 等. 军用变压吸附装置床层动力学数学模型及实验研究 [J]. 防化研究, 2003(1):6.
- [16] SWETHA G, THAKKALLAPALLI G, SHEKAR S, et al. Breakthrough Studies of Methyl Salicylate and DMMP Mixed in Methyl Salicylate with Pressure Swing Adsorption Composed of 13X Molecular Sieves [J]. Defence Life Science Journal, 2016, 28(1):155-162.
- [17] CARR R, COMER J, GINSBERG M D, et al. Microscopic Perspective on the Adsorption Isotherm of a Heterogeneous Surface [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2011, 2(14):804-807.
- [18] KHANDAY W A, MAJID S A, CHANDRA SHEKAR S, et al. Synthesis and Characterization of Various Zeolites and Study of Dynamic Adsorption of Dimethyl Methyl Phosphate over them [J]. Materials Research Bulletin, 2013, 48(11):79-86.
- [19] 杜红霞, 王俊新. 基于可再生吸附的核生化过滤技术 [J]. 船海工程, 2016, 45(2):4-7.
- [20] 朱春玲. 飞行器环境控制与安全救生 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2006.
- [21] 罗坤, 毛晓东, 庞丽萍. 新型直升机热泵空调系统驾驶舱热控性能 [J]. 化工学报, 2020, 71(S1):187-193.
- [22] ZAJACZKOWSKI B, HALON T, KROLICKI Z. Experimental Verification of Heat Transfer Coefficient for Nucleate Boiling at Sub-Atmospheric Pressure and Small Heat Fluxes [J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 52(2):205-215.
- [23] 张秋. 飞机座舱动态热载荷计算研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [24] 毛晓东, 代子杰, 曾文, 等. 基于人体热舒适性评估的直升机空调通风系统优化设计 [J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(1):51-58.

(编辑:陈斐)