

神舟七号飞船出舱活动气闸舱的研制

张柏楠*, 尚志, 潘腾, 金勇, 朱光辰

中国空间技术研究院, 北京 100094

* E-mail: zhangbainan@cast.cn

收稿日期: 2009-05-01; 接受日期: 2009-07-01

摘要 我国研制成功的第一个出舱活动气闸舱——神舟七号飞船气闸舱, 在充分利用现有的技术基础上, 对飞船原有轨道舱从系统方案、总体布局、热控制、泄复压、舱外航天服舱载支持、话音通信、人机工效等方面进行了重新设计, 既可作为 2 人出舱活动气闸舱, 又可兼作 3 人的生活舱. 经过了全面的地面试验验证后, 圆满完成了出舱活动飞行试验, 突破了气闸舱关键技术. 神舟七号飞船气闸舱在技术上有重大创新, 使我国成为世界上第三个独立掌握空间出舱活动技术的国家, 其综合技术达到国际先进水平.

关键词

神舟七号
气闸舱
出舱活动

随着世界载人航天技术的发展, 航天员出舱活动已成为载人航天活动的一个重要组成部分, 对于航天器在轨组装和维修具有重大意义. 气闸舱是实现出舱活动的关键技术之一, 其主要作用是实现空间真空环境与航天器内部大气环境之间的平稳过渡, 支持航天员出舱活动, 为舱外航天服提供供电、供气、温度控制、遥测通信支持.

为实现出舱活动和航天员在轨生活的双重要求, 在充分继承的基础上, 对飞船原有轨道舱进行了重新设计, 解决了出舱与生活带来的矛盾和问题, 使轨道舱既可作为 2 人出舱活动的气闸舱, 又可兼作 3 人的生活舱, 经过了全面的地面试验验证后, 圆满完成了出舱活动飞行试验, 突破了气闸舱关键技术.

1 气闸舱方案设计

神舟七号飞船气闸舱不仅各项功能和技术指标满足任务需要, 而且作为我国第一个出舱活动气闸舱, 其技术起点高, 达到了目前的国际先进水平, 并具有自身的技术特点.

1.1 系统方案设计

1.1.1 技术途径的选择. 根据任务要求, 我国要在 3 年时间内突破出舱活动技术, 完成出舱活动飞行试验. 通过对目前我国载人航天技术基础及未来发展需要进行综合分析, 我国第一个出舱活动气闸舱研制选择了以下技术途径.

1) 以神舟载人飞船为出舱活动平台, 利用原有轨道舱的基本结构, 在保留和扩展轨道舱支持航天员生活的功能基础上, 通过系统化设计增加气闸舱功能. 其优点在于充分利用我国载人飞船的技术基础, 不必重新研制全新的载人航天器, 可缩短研制周期, 降低技术风险, 提高可靠性.

2) 在突破出舱活动气闸舱技术的同时, 瞄准目前气闸舱技术的国际先进水平, 超越俄美两国先突破出舱活动技术再逐步成熟实用的技术途径, 技术水平一步到位, 着眼于载人航天后续任务实际应用. 其优点在于技术起点高, 跨度大, 取得的技术成果可直接应用于我国后续的空间实验室和空间站.

3) 通过系统验证和局部验证相结合的方式对气闸舱设计进行全面试验验证. 出舱活动风险大, 对技术的成熟度和可靠性要求高, 为保证航天员的绝对安全和飞行试验成功, 必须对气闸舱的各项技术方案进行全面的试验考核验证, 充分暴露和解决生活和出舱的矛盾和问题.

1.1.2 技术难点.

1) 需要解决气闸舱兼做生活舱带来的问题, 包括: 总体布局要在有限的空间内兼顾出舱活动和日常工作生活的不同要求; 人体代谢产物和生活用品的低压释气影响气闸舱泄压时间.

2) 需要填补一系列技术空白, 包括: 在有限测控弧段内快速完成气闸舱泄复压的方案及系统设计; 气闸舱快速复压后空气温度的快速恢复; 低压高氧浓度气体环境防火安全性问题; 舱外航天服的机、电、热接口支持; 出舱活动无线语音通信系统设计.

3) 试验验证的充分性和安全性, 对气闸舱泄复压方案、气闸舱与航天员及舱外航天员的匹配性、气闸舱出舱活动人机工效学设计均需要进行系统级试验验证, 低压高氧浓度环境防火安全性等均需要进行专项试验验证.

1.1.3 技术方案. 我国现阶段突破出舱活动技术必须建立在已有的载人航天技术基础之上, 因此与目前国际上主要通过空间站专用气闸舱进行出舱活动的情况不同, 仍以现有的神舟系列载人飞船作为出舱活动平台. 神舟七号飞船根据我国首次出舱活动飞行试验任务要求, 对飞船原有轨道舱进行了重新设计, 作为出舱活动气闸舱, 具备泄复压、舱外航天服贮存运输、舱外航天服支持、出舱活动摄像照明功能, 同时兼作生活舱. 通过需求分析, 气闸舱的系统功能包括结构支持、热控制、泄复压、语音通信、舱外照明与摄像、对 2 套舱外航天服的舱载支持, 其系统功能及子功能组成如图 1 所示, 整体结构如图 2 所示.

1.2 气闸舱总体布局设计

气闸舱的布局设计充分提高空间的利用率, 最大限度地压缩了生活设施占用的空间, 尽可能增大出舱活动空间, 并将紧张的舱内空间在不同任务

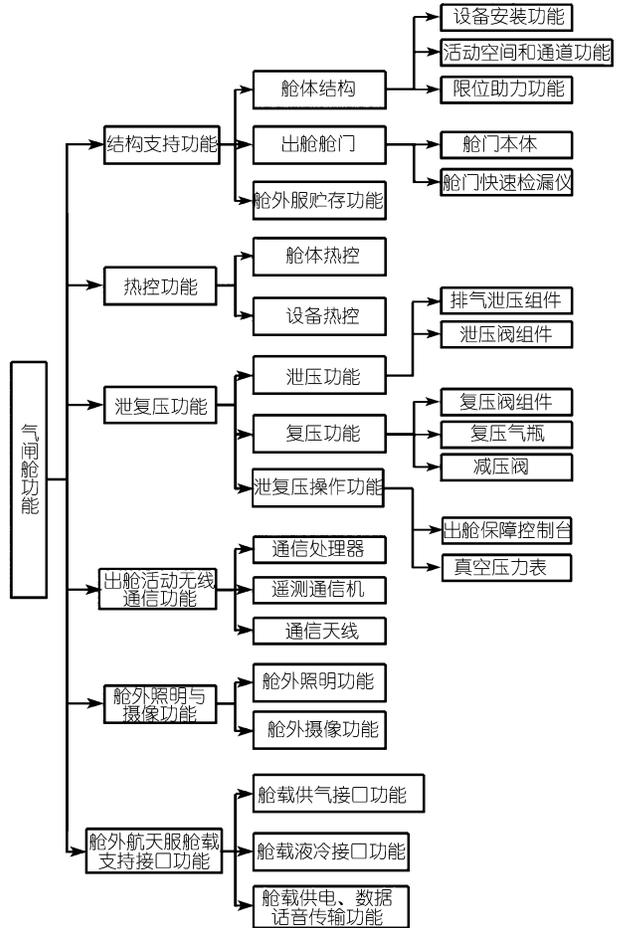


图 1 气闸舱系统功能组成



图 2 神舟七号飞船气闸舱整体结构

阶段动态分配, 适应 2 套舱外航天服发射时打包装船和在轨展开组装使用等两种不同的状态. 上述设计使气闸舱内航天员活动空间达到气闸舱容积的 50%, 满足航天员日常生活和出舱活动的空间需求. 气闸舱舱内布局见图 3.

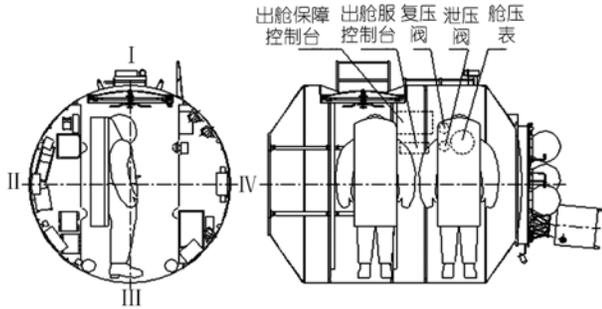


图 3 出舱活动阶段气闸舱舱内布局

出舱活动是航天器与航天员结合最紧密的载人航天任务, 对航天器总体布局的人机工效学要求是最高的. 对出舱过程中需航天员操作的气闸舱泄复压设备和舱外航天服控制设备集中布置在便于观察和操作的位置; 在气闸舱内、外设置了支持出舱活动的扶手和脚限制器等辅助设施, 用于航天员攀扶和钩挂安全系绳. 以上设计充分体现了人机工效学设计思想.

1.3 出舱舱门设计

出舱舱门是出舱活动时航天员出入气闸舱的通道, 直接关系到航天员的生命安全. 其主要功能是保证舱门关闭锁紧后具有可靠的密封性, 机构漏率满足要求, 同时保证舱门开关操作的力较小, 便于航天员失重环境下操作.

1.3.1 舱门开启助力机构设计. 由于出舱活动飞行程序对气闸舱泄压时间有严格限制, 泄压时气闸舱压力不可能降至与舱外真空环境完全平衡. 为此出舱舱门专门设计了开门助力机构, 大大降低了开门操作力, 可在舱门内外有一定压差的情况下开启出舱舱门.

1.3.2 舱门快速检漏仪设计. 舱门快速检漏仪为出舱舱门重要的配套设备, 出舱活动结束后, 供航天员关闭舱门后对舱门进行密封性检查使用. 气闸舱舱门快速检漏仪实现了在正常大气环境和真空环境下均能进行舱门快速检漏, 是我国载人航天器所特有

的技术.

1.4 气闸舱热控设计

与一般卫星的热控设计不同, 气闸舱热控设计应同时满足支持出舱活动和兼作航天员生活舱的多功能需求, 满足舱内大气环境温度和和设备温度指标要求. 气闸舱热控设计采用了主、被动热控措施相结合的方案.

1.4.1 满足气闸舱需求的热控设计. 由于气闸舱复压速度较快, 复压过程中气瓶温度会急剧降低, 气闸舱内大气温度控制的重点是保证复压后空气温度环境, 减小航天员脱舱外服前后的温差变化. 为此, 对复压气瓶采取了热控绝热层包覆和主动电加热的控制措施, 另一方面, 对舱内复压空气进行加热, 使得温度快速提升, 可以保证复压后舱内空气环境温度较快恢复到正常水平.

1.4.2 满足生活舱需求的热控设计. 气闸舱舱体采取绝热设计, 以提高舱内温度; 在无人时将舱内冷凝干燥组件设置为关闭, 当舱内有 2 名航天员时, 将冷凝干燥组件风门开度增大, 以加大降温、除湿能力. 气闸舱热控设计能满足舱内空气温度和湿度指标要求.

1.5 泄复压功能设计

泄复压功能是气闸舱的核心功能, 设计的重点是要在规定的的时间和速率条件下, 完成气闸舱泄复压任务. 由于气闸舱同时兼作生活舱, 所以要充分考虑生活舱对泄复压功能的影响.

1.5.1 功能设计要求.

1) 气闸舱泄压、复压速率应低于人体的生理承受能力.

2) 舱外航天服不能承受外压, 泄复压过程中应始终保持气闸舱压力不超过舱外航天服内部的压力.

3) 综合考虑舱外航天服工作时间、地面测控区覆盖时间等的限制和航天员医学要求, 气闸舱泄压和复压时间分别不能超过 18 min.

1.5.2 系统组成与设备配置. 气闸舱泄复压系统由互相独立的泄压子系统和复压子系统两部分组成, 通过泄复压阀门的开闭操作实现气闸舱泄压和复压及控制压力变化速率, 满足航天员安全性和舱外航天服工作可靠性要求. 阀门的开启、关闭控制以航天

员手控操作气闸舱控制台上的电动按钮实施; 电动操作失效时, 可由气闸舱航天员直接转动阀门手轮进行手动控制。

1) 泄压子系统. 泄压子系统由泄压阀组件、排气泄压组件以及两者之间的连接管路组成, 泄压阀组件和排气泄压组件为串联关系, 只有当两道阀门均打开时, 泄压通道才能打开, 从而实现气闸舱泄压, 提高了系统的安全性. 泄压子系统有效泄压途径可满足气闸舱泄压时间和速率要求。

2) 复压子系统. 复压子系统由复压气瓶、管路、减压阀、复压阀和压力传感器组成, 满足气闸舱由真空到常压复压 2 次的用气要求. 复压子系统采用分组存储并行供气的方式, 两组气瓶和减压阀由 1 个单向阀隔离独立、并行供气, 提高了系统的可靠性. 复压管路途径可满足气闸舱复压时间和速率要求。

3) 泄复压操作人机工效设计. 为便于出舱航天员的操作, 设计了集中的操作界面, 包括气闸舱控制台上的泄复压电控按钮、泄压阀组件操作手轮、排气泄压阀组件操作手轮和复压阀组件操作手轮, 见图 4. 为监视泄复压过程中的气闸舱压力变化, 配置了真空压力表和计时单元, 与泄复压操作界面集中布置, 便于航天员边操作边观察。

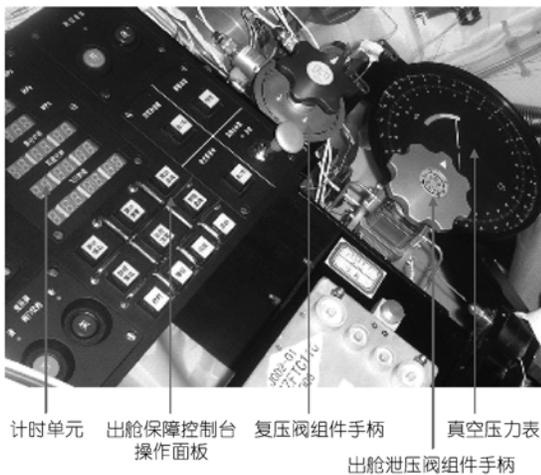


图 4 泄复压操作界面

4) 泄复压程序设计. 泄复压程序设计主要确定泄复压压力变化曲线和泄压结束工作点. 压力变化曲线必须和舱外航天服工作压力曲线配合, 保证任何时候不超过舱外航天服的内部压力; 泄压结束点

的确定必须满足气闸舱开舱门的要求, 又不超过泄压总时间的限定条件. 气闸舱泄压压力低对开舱门有利, 但因气闸舱兼作生活舱, 舱内冷凝水等人体代谢产物在低压段急剧汽化, 使泄压速度变缓, 等待时间远远超出飞行程序允许范围, 因此将泄压结束点确定在水的汽化点以上, 并且不高于出舱舱门开启压力点, 满足开舱门的要求和泄压总时间的限制条件。

1.6 出舱活动无线通信功能设计

气闸舱无线通信功能支持出舱活动时航天员间及与地面间的话音通信, 支持航天员生理遥测参数和舱外航天服工程遥测参数向飞船的传递以及通过飞船向地面传递。

为解决气闸舱狭小空间内的多路径无线传输问题, 实现出舱航天员间、航天员与飞船间高可靠的多点互通信要求, 出舱活动无线通信在航天器上首次应用了码分多址通信与数据传输技术区分 2 个舱外服通信机, 满足出舱航天员间、出舱航天员与飞船间多用户实时通信. 采用频分-扩频通信技术, 具有抗干扰能力强、保密性能高的特点, 同时采用软件无线电技术进行扩频通信实现了产品的数字化、小型化和智能化, 方便气闸舱和舱外航天服上使用。

1.7 舱外航天服支持功能设计

出舱活动过程中, 舱外航天服除依靠自身资源工作外, 还依靠气闸舱提供的资源实现舱载支持工作, 包括舱载供气、液冷换热、舱载供电和有线数据传输 4 部分支持接口. 舱外航天服舱载支持系统与舱外航天服的连接关系如图 5 所示。

1.7.1 舱载供气接口. 舱载供气接口由氧瓶和管路组成, 舱外航天服通过气液复合连接器及软管束与服装控制台连接, 然后通过供氧管路与氧瓶连接, 形成供气通路, 提供航天员着舱外航天服时供氧支持. 服装控制台上还连接应急供氧软管, 在出现服装自主供氧故障时, 可快速与舱外航天服连接实现对舱外航天服的应急供氧。

1.7.2 舱载液冷换热接口. 舱外航天服舱载液冷换热接口支持由服装换热器提供. 服装换热器以气闸舱主动热控流体回路作为冷源, 内部设计成两个独立的换热回路, 分别通过服装换热软管与两套舱外

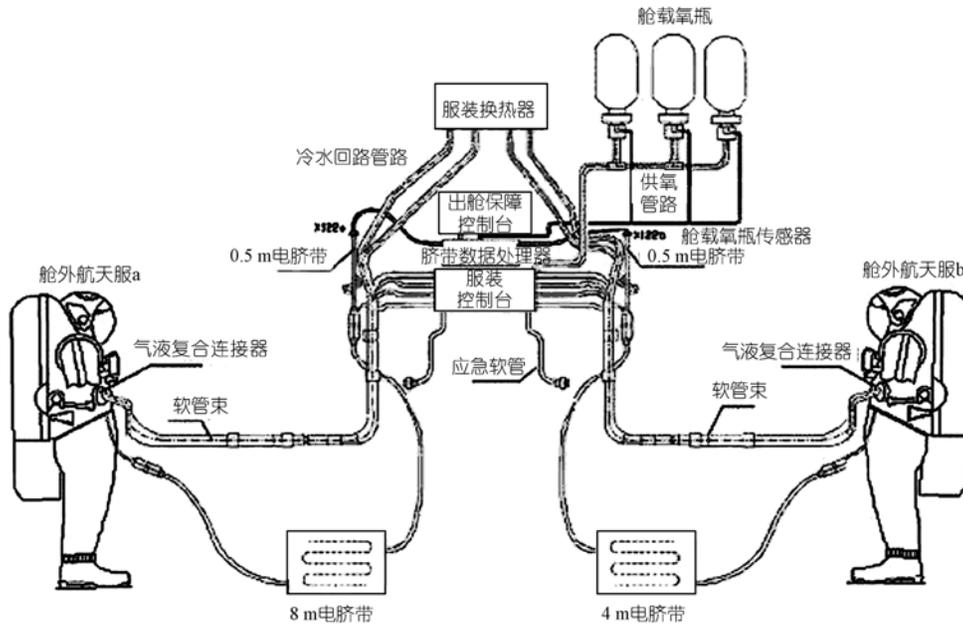


图5 舱外航天服与舱载支持设备连接关系

航天服连接,向舱外航天服液冷回路提供冷却工质,排散两套舱外航天服产生的热量。

1.7.3 舱载供电接口. 气闸舱对舱外航天服的供电接口由脐带数据处理器实现,通过电脐带为其提供供电支持,并具备供电控制和过流保护功能.脐带数据处理器分别设计了与“飞天”、“奥兰-M”舱外航天服不同的供电接口,满足两种舱外航天服的供电需求。

1.7.4 舱载有线数据传输接口. 舱外航天服与气闸舱有线数据传输接口也通过脐带数据处理器实现,主要包括舱外服模拟话音、航天员生理参数、舱外航天服工程遥测参数.舱外航天服话音信号经脐带数据处理器采集后送另一套舱外航天服,并送返回舱话音处理设备,由其送返回舱航天员和推进舱数传机下传地面;地面上行话音也通过脐带数据处理器分送两套舱外航天服,从而实现有线状态下,出舱航天员与返回舱航天员和地面之间互通信.舱外航天服工程遥测参数、航天员生理参数也经脐带数据处理器采集,通过1553B总线直接送推进舱数传机下传地面,实现出舱活动数据的有线传输。

1.8 气闸舱防火安全性设计

载人飞船以往的防火安全措施都是针对正常大

气环境的.在出舱活动过程中,在气闸舱泄压的同时,舱外航天服气密性检查、大流量冲洗、吸氧排氮等过程都会向气闸舱内排出纯氧,导致气闸舱内氧浓度升高,形成低压高氧浓度气体环境.这种出舱活动特有的气体环境对气闸舱防火安全性设计造成影响,需采取氧浓度控制措施。

1.8.1 气闸舱氧浓度安全值确定. 专门进行了不同压力和氧浓度环境的防火安全性试验,确定了各种压力下的氧浓度安全值.该问题属于边缘学科,经调研国内外基本上没有现成的技术资料可供借鉴,此项研究成果不仅为气闸舱的防火安全性设计提供了依据,还填补了这一领域研究的空白。

1.8.2 气闸舱氧浓度控制措施. 为将出舱活动泄压过程中气闸舱氧浓度控制在安全指标以内,专门设计了氧浓度预控方案,由航天员操作气闸舱泄压阀和供氮阀,进行气闸舱放气和补氮,达到降低气闸舱初始氧浓度的目的,使气闸舱内气体环境的防火安全性和医学指标均满足要求。

2 气闸舱系统验证试验

由于出舱活动任务的特殊性,以往飞船和其他航天器的所有大型试验均不能完全覆盖气闸舱的各

项功能, 因此专门安排了针对气闸舱功能特点的专项试验, 对气闸舱系统设计进行了全面、充分的考核验证, 为首次出舱活动飞行试验打下了坚实的基础。

2.1 气闸舱泄复压试验

在充分认识和分析气闸舱兼作生活舱带来影响的基础上, 全面真实地模拟出舱前气闸舱的状态, 提前暴露和验证了人体代谢产生的水分的低压气化、非金属材料的低压释气等问题, 通过气闸舱泄复压试验证明泄复压方案和系统设计合理, 泄复压性能满足设计要求, 试验结果与飞行试验吻合。

2.2 真空环境下气闸舱与航天员及舱外航天服联合试验

该试验是我国首次有人参与的真空试验, 通过研制紧急复压系统和快速营救通道, 保证了被试人员的安全。通过试验验证了气闸舱功能以及与航天员、舱外航天服的协调性、接口匹配性和出舱活动程序安排的合理性, 同时对气闸舱泄复压系统操作界面进行人机工效学验证。

2.3 出舱活动人机工效学水下验证试验

为了在接近于真实的在轨失重条件下验证气闸舱布局及辅助设施对航天员出舱活动的支持能力以及手动操作项目的可操作性, 用结构和布局与正样状态一致的试验气闸舱进行了有人参与的水下试验, 该试验在国内尚属首次。经试验验证, 气闸舱空间、设备布局、辅助设施设计满足出舱活动人机工效学要求。

3 与当前国际水平的综合比较

出舱活动气闸舱的技术水平主要体现在出舱活动支持能力上, 具体衡量标准包括一次出舱活动的人数、使用的舱外航天服型号和种类等。

人类历史上首次外层空间出舱活动是 1965 年 3 月 18 日由前苏联航天员列昂诺夫完成的。此次出舱活动使用的气闸舱是“上升 2 号”飞船的“伏尔加”型气闸舱, 该气闸舱为柔性充气式结构, 发射时以折叠收拢状态固定在飞船返回舱舱门外, 出舱前充气展开。“伏尔加”型气闸舱结构较简单, 只能支持 1 名航天员出舱, 使用的舱外航天服为“鸢”型脐带式舱外航天服^[1,2]。

目前国际上的出舱活动任务基本上通过空间站

的气闸舱完成, 比较典型的气闸舱有俄罗斯的“和平”号空间站气闸舱、国际空间站气闸舱等, 其内部结构见图 6 和图 7。其共同特点是均为专用气闸舱, 专门用于出舱过程中的泄压、复压, 舱外航天服运输、装配、测试和航天员在轨日常工作、生活均安排在其他舱室; 一次可支持 2 名航天员出舱; 均能支持功能完备、体积、重量较大的舱外航天服, “和平”号空间站气闸舱可支持 2 套“奥兰-M”自主式舱外航天服, 国际空间站气闸舱可支持 2 套“奥兰-M”或 2 套美国舱外航天服^[3,4]。



图 6 “和平”号空间站气闸舱



图 7 国际空间站气闸舱

虽然我国首次出舱活动仍以载人飞船作为平台, 但与前苏联首次出舱活动使用的“上升 2 号”飞船“伏尔加”型气闸舱相比, 神舟七号飞船气闸舱功能完备, 技术指标较高。与目前国际上典型气闸舱相比, 神舟七号飞船气闸舱具备了基本相当的技术性能, 可同时支持 2 种型号自主式舱外航天服, 同时还具备其他气闸舱所没有的舱外航天服运输功能和生活舱功能。因此我国的第一个出舱活动气闸舱技术起点高, 达到了目前的国际先进水平, 并且具有自主创新的中

国特色.

4 飞行试验情况

2008年9月25日21时10分神舟七号飞船发射升空;9月27日航天员翟志刚在刘伯明协助下从气闸舱实现了我国第一次在轨出舱活动;9月28日气闸舱与返回舱分离,气闸舱任务完成,返回舱载3名航天员安全着陆,我国首次出舱活动飞行试验任务圆满成功.

在飞行试验过程中,气闸舱完全按预定飞行程序支持航天员及舱外航天服完成了出舱活动的各项工作.出舱活动飞行试验结果表明,气闸舱设计合理,各项功能工作正常,对出舱活动圆满完成起到了重

要的保障作用.

5 结束语

神舟七号飞船出舱活动气闸舱是完成我国第一次航天员空间出舱活动的气闸舱,在气闸舱生活舱一体化设计、压差条件下的舱门开启助力、真空环境下舱门快速检漏、高可靠密封舱泄复压控制、低压高氧浓度环境防火安全、有人参与的真空试验等技术方面有重大创新,拥有多项自主知识产权,实现了我国载人航天技术领域的跨越式发展,使我国成为世界上第三个独立掌握空间出舱活动技术的国家,其技术成果可应用于后续我国载人航天任务.气闸舱综合技术达到国际先进水平.

致谢 作者对中国载人航天工程办公室和各相关单位在研究中的帮助表示感谢.

参考文献

- 1 Shayler D J. 太空出舱. 北京: 中国宇航出版社, 2007
- 2 朱仁璋, 王鸿芳, 王晓光, 等. 舱外活动气闸技术综述. 载人航天, 2008, 2: 12—27
- 3 朱仁璋, 王鸿芳, 王晓光. 舱外活动系统述评. 航天器工程, 2008, 17(6): 1—10
- 4 陈善广, 唐国全, 吴斌. 航天员出舱活动技术. 北京: 宇航出版社, 2007