

文章编号:0253-4339(2019)05-0155-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.155

多功能军用飞机地面液冷车研制与实验

盛健 张华 吴兆林 豆斌林 周志钢

(上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093)

摘要 为满足新型战机在地面待飞时对机载液冷系统的地面保障需求,本文设计开发并试制了飞机地面液冷车,分别对电源动力系统、冷却液输送系统、制冷加热系统(单级蒸气压缩制冷循环+电加热器)、电气控制系统和车载底盘及厢体 5 部分进行了实验研究。结果表明:样车实现了液冷车补液、液冷车内循环、液冷车对机载液冷系统的加液/排液和外循环供液保障等功能。在环境温度为 5 °C 的外循环制热和 30 °C 的外循环制冷时,使机载液冷系统达到设定温度(制热时加热至 15 °C,制冷时冷却至 10 °C),分别需要 24 min 和 20 min,冷却液循环体积流量为 200 L/min,温度波动在±0.5 °C 以内。

关键词 飞机地面保障;压缩式制冷系统;载冷剂

中图分类号:TB657;V351.3

文献标识码:A

Design and Experimental Study on Multifunction Liquid Cooling Camion for Military Aircrafts

Sheng Jian Zhang Hua Wu Zhaolin Dou Binlin Zhou Zhigang

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract To satisfy the ground support requirements of the airborne liquid cooling system for aircraft repair or airport-related training, a new kind of multifunction ground liquid cooling camion for military aircrafts was designed and developed. This camion comprises five main parts, namely power supply system, coolant circulation system, cooling and heating system (single-stage vapor compression refrigeration cycle and electrical heater), electric control system, vehicle chassis, and body. Results showed that the functions of coolant supplementation to the liquid cooling camion, coolant internal circulation in the liquid cooling camion, coolant addition and drain for liquid cooling system on board, and hot/cold coolant external circulation from the liquid cooling camion to the liquid cooling system on board, are achieved in the sample liquid cooling camion. Moreover, the liquid cooling system satisfied the setting temperatures of 15 °C and 10 °C in the heating and cooling modes after 24 min and 20 min, respectively. Accordingly, the environmental temperatures of heating and cooling were 5 °C and 30 °C, whereas the coolant flow was 200 L/min for both modes, with a temperature fluctuation of ±0.5 °C.

Keywords aircraft ground support; compression refrigeration system; secondary refrigerant

随着我国军用预警机和第 4 代战斗机等先进战机的研制与列装,机载精密电子设备越来越多,功率大而热流密度高。机载环境控制系统必须采用 40 号或 65 号军用航空冷却液作为载冷剂,来冷却电子设备。当机舱内温度过低时,机载设备启动前需要地面保障设备提供温度较高的冷却液进行预热,以达到启动温度要求^[1-2]。当飞机在地面进行训练、检修时,由于飞机发动机不启动,因此机载环控系统(机载液冷系统)停止工作,需要地面保障设备(飞机地面液冷车)向飞机机载液冷系统输送相同种类和浓度的冷却液,输入冷却液的温度、体积流量、压力和洁净度等参数应达到机载液冷系统的要求^[3-6]。

飞机液冷车是一种新型飞机环境控制地面保障装备,主要控制参数是飞机液冷车向飞机供给冷却液的温度、压力、体积流量和洁净度。对飞机液冷车供液温度的精确控制,不仅可保证机载电子设备保持高效稳定工作,还可降低其故障率并延长工作寿命。

1 功能要求

我国地域宽广,机场气候环境差异大,飞机液冷车必须适应多变的环境和保障参数要求,保证高可靠性,满足多种飞机尤其是特种飞机环境控制需求。飞机液冷车高度较低,而飞机较高,最高落差达 9 m。

由于飞机机载液冷系统管路狭长而曲折,内阻很高,因此液冷车供液压力必须克服上述阻力,将足够的冷却液输送给飞机各冷却单元。冷却液中的固体颗粒直径要小于 40 μm ^[7-9]。液冷车还应具有补液和加液/排液等保障功能^[10]。液冷车工作环境适应性要求如表 1,淋雨、霉菌、盐雾和沙尘等需满足《GJB 2643 A—2011 飞机空调车通用规范》^[11]。主要保障技术指标如表 2^[12-13]。

补液模式:飞机液冷车车载液冷系统冷却液不足时,从地面冷却液容器吸取冷却液以补充至一定液位,一般为车载冷却液储液罐 3/4 液位。

表 1 飞机液冷车环境适应性指标

Tab.1 Environmental suitability index of liquid cooling camion of military aircraft

指标	数值
环境干球温度/℃	-40~50
环境湿度/%	≤95(30℃时)
海拔高度/m	≤4 000

表 2 飞机液冷车战术技术指标

Tab.2 Tactical and technical index of liquid cooling camion of military aircraft

指标	数值
供液流量/(m^3/h)	≥12
供液温度/℃	10~30(连续可调)
供液压力/MPa	≥1.0(12 m^3/h 时)
尘埃直径/ μm	≤40
运行方式	全自动控制
单次连续工作时间/h	≥4
平均故障间隔时间/h	≥300

内循环模式:用户设定飞机液冷车冷却液温度后,液冷车系统启动并进行内循环,将车载液冷系统内冷却液处理至设定温度。

外循环供液保障模式,分制冷和制热,即根据环境和飞机保障要求,液冷车自循环达到设定温度后,自动切换为外循环模式,向飞机输送冷液或热液或先供热液预热,待机载电子设备正常工作后再供冷液进行降温冷却。

加液模式:飞机机载液冷系统内冷却液不足时,由飞机液冷车向其补充冷却液,至一定液位。排液模式则相反,指当飞机机载液冷系统需检修时,由飞机液冷车将其冷却液全部排空并存储。

2 液冷车方案

2.1 总体设计

由于战时战机停机位置不确定,飞机液冷车应具有机动保障能力,因此必须集动力自给、冷却液输送与冷热调节、自动控制于一体的移动保障装备。图 1 所示为飞机液冷车的结构,主要有 5 部分:1)电源动力系统;2)制冷加热系统;3)液体输送系统;4)电气控制系统;5)车载底盘及厢体。飞机液冷车的所有设备全部安装在车厢内,因此设备的布置必须考虑飞机液冷车的行驶安全、运行安全、空气流道、重量分配及可维修性等。

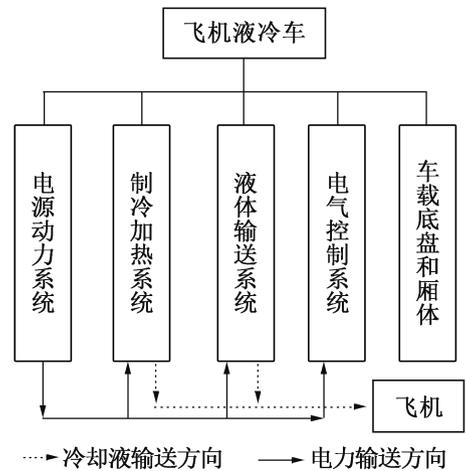


图 1 飞机液冷车的结构

Fig.1 The structure of liquid cooling camion of military aircraft

2.2 电源动力系统

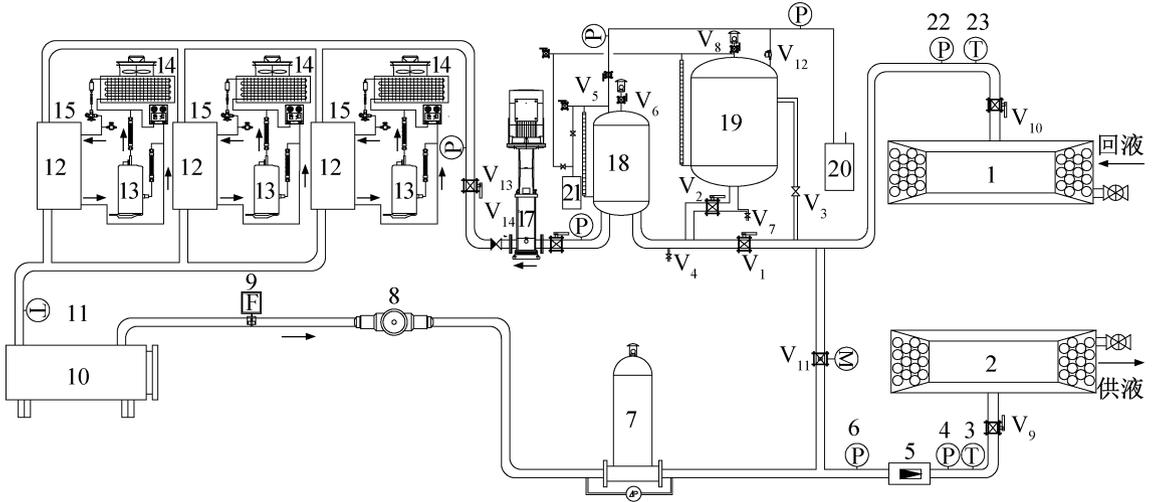
车载电源动力系统包括柴油发动机和发电机,控制子系统等。在外场时,电气控制系统、循环泵、制冷压缩机及风机、电加热器等设备均由柴油发电机组提供电源动力。根据飞机液冷车不同运行模式下启动设备的总功率确定柴油发电机组的总功率,样车采用 75 kW 柴油发电机组。飞机液冷车还设置市电插口,用于在内场(机堡、维修车间等)使用,直接接入市电,而不启动柴油发电机组,一方面减少柴油发电机组的使用频率、减少故障并降低能耗;另一方面避免在内场使用柴油发电机组而带来噪声和尾气污染。两种电源输入方式通过控制系统进行切换。

2.3 液体输送系统

液体输送系统主要包括循环泵、膨胀水箱、储液罐、补液泵、真空泵、供液/回液软管及卷盘和控制阀门等。由于飞机机载液冷系统充注 65 号军用航空冷却液,因此飞机液冷车也使用 65 号军用航空冷却液。

图 2 所示为飞机液冷车工作原理。通过循环泵、补液泵、真空泵、电动蝶阀及电磁阀等组合控制来实现飞机液冷车的补液、内循环、加液、排液和外循环供

液保障等功能模式。按照飞机液冷车战术技术指标要求,车载冷却液通过供液和回液软管分别与飞机进液和出液接口连接,形成封闭冷却液循环系统。



- 1 回液卷盘;2 供液卷盘;3 供液温度传感器;4 供液压力传感器;5 供液体积流量计;6 供液压力表;7 冷却液过滤器;
- 8 视液镜;9 靶式流量开关;10 管道式电加热器;11 蒸发器出口温度传感器;12 板式蒸发器;13 压缩机;
- 14 冷凝器;15 热力膨胀阀;16 蒸发器入口压力表;17 循环泵;18 膨胀水箱;19 储液罐;
- 20 真空泵;21 补液泵;22 回液压力传感器;23 回液温度传感器。

图 2 飞机液冷车工作原理

Fig.2 Schematic diagram of liquid cooling camion of military aircraft

内循环时,液冷车供液/回液管电磁阀 V_9 和 V_{10} 关闭而旁通电动蝶阀 V_{11} 全开。如设定温度低于环境温度,控制程序则根据计算所需制冷量,启动相应数量制冷系统模块进行降温,超出的制冷量由管道式电加热器进行热补偿;如设定温度高于环境温度,则制冷系统不启动,管道式电加热器对冷却液进行加热,直至达到设定温度。管道式电加热器分为多组,采用 PLC 控制器的 PID 算法,并通过固态继电器对电加热器输出功率进行精确调节。

外循环模式时,冷却液经车载循环泵加压后,经单向阀 V_{13} ,按同程管路设计,体积流量均分并进入 3 个板式蒸发器,冷却降温(外循环制冷模式时),再汇合后进入管道式电加热器,进行热量补偿至设定温度,经靶式流量开关、视液镜和过滤器后,调节电动蝶阀 V_{11} 的开度以调节旁通冷却液体积流量,使供液达到设定体积流量,送入飞机,承担机载电子设备等热负荷后,再流入车载液冷系统的膨胀水箱,由循环泵吸入,如此循环往复。通过车载冷却液系统中旁通电动蝶阀和变频循环泵调速实现对冷却液体积流量和压力的调节^[14]。

当飞机液冷车停止向飞机提供地面保障时,供/回液软管与飞机接口脱除连接,由电动供/回液卷盘收回飞机液冷车。

2.4 制冷加热系统

飞机液冷车制冷系统采用单级蒸汽压缩式制冷循环,具有技术成熟、结构紧凑、效率高等优点^[15],制冷剂选用 R134a。利用低压液态制冷剂在板式蒸发器内汽化吸热,使板式换热器另一侧的冷却液温度降低,为连续制冷,汽化后的低压过热制冷剂气体,由制冷压缩机吸入并压缩后,在风冷冷凝器内等压冷凝为高压过冷液态,再节流降压为气液两相制冷剂进入板式蒸发器制冷。

环境适应性是军用飞机液冷车的关键技术指标,特别是极端高温和低温时,制冷系统必须能够稳定运行。而蒸发侧工况变化较小,要求制冷系统冷凝压力应处于一个较为稳定的工作区间。当环境温度过低时,设计了高压调节阀和差压调节阀集成的冷凝压力调节装置,确保制冷系统稳定运行。当环境温度过高引起压缩机排气温度过高而处于危险状态时,系统设计了旁通喷液冷却装置,以消耗部分制冷量为代价来确保压缩机处于安全工况。

制冷系统采用模块化设计,设置 3 套完全相同的制冷系统,均按总制冷量的 1/3 配置。制冷系统模块化设计可分散系统故障风险,即使有一套制冷系统发生故障,另两套正常运行仍可满足保障要求。因此,模块化设计对战时应急保障有重大意

义,还具有部件互换特性,提高设备可靠性和兼容性,减少备品备件种类,有效缩小军事保障的配件规模和维修难度^[16]。

2.5 控制系统

飞机液冷车控制系统应具有足够的稳定性、快速调节、温度控制精度高、经济运行和高可靠性等。采用可编程控制器(programmable logic controller, PLC)连接温度、压力和体积流量等传感器,并对所有设备及电路进行控制,以实现冷却液的温度、体积流量和压力进行监测、显示和调节控制^[17-18]。

通过人机界面选择运行模式,设定冷却液体积流量、温度等;显示当前运行状态、温度、体积流量和压力等信息。发生故障时,控制系统自动进行保护、发出报警信息并存储,用于查询历史故障。

2.6 底盘及厢体

飞机液冷车的底盘和车厢体分别为列装二类底盘和钢骨架钢蒙皮车厢体。车厢体 4 个侧面采用冲压格栅封板,便于散热防雨;顶部为制冷系统冷凝器及风机,设置气动百叶封板,在开机时自动开启,停机时自动关闭,提高防雨性能。

3 实验结果

图 3 所示为飞机液冷车的样车。实验工况下,进行样车的补液、内循环、加液/排液和外循环供液保障等。由于条件限制,液冷车不可能与飞机对接进行性能实验,因此在飞机液冷车环境模拟实验室中建设航空液体实验室,搭建飞机机载液冷模拟系统,如图 4 所示,以便测试飞机液冷车的性能^[19]。

实验前,将液冷车的供液和回液软管分别连接到机载液冷系统模拟装置的冷却液进/出接口,将模拟装置膨胀水箱的液位传感器的信号采用航空插头接



图 3 飞机液冷车样车

Fig.3 The liquid cooling sample camion of military aircraft

入液冷车控制系统中。

3.1 内循环模式实验

在制冷模式和制热模式下,设定冷却液温度和体积流量后,开启手动蝶阀 V_1 和 V_{14} ,电动蝶阀 V_{11} 全开,启动液冷车,检测柴油发电机组、循环泵、制冷机组、电加热器等是否正常启停和稳定运行,体积流量调节阀能否按设定值开启至相应开度,冷却液温度能否控制在设定温度范围内。经过多次实验,液冷车均正常启动和稳定运行;在环境温度 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,将液冷车冷却液处理至设定温度($5\text{ }^\circ\text{C}$ 时加热至 $15\text{ }^\circ\text{C}$, $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时制冷至 $10\text{ }^\circ\text{C}$) 分别需要 16 min 和 11 min。

3.2 补液模式实验

液冷车补液时,开启手动蝶阀 V_1 和 V_2 以及电磁阀 V_6 和 V_8 ,关闭电磁阀 V_5 和 V_{12} ,启动补液泵,当膨胀水箱和储液罐的液位均达到高液位($3/4$ 液位)时,补液泵停机,补液完成。实验证明,液冷车控制程序能够自动检测车载冷却液液位并驱动补液泵和相关阀门进行补液运行。

3.3 加液/排液模式实验

加液模式时,关闭手动蝶阀 V_1 、电磁阀 V_5 和 V_{12} ,打开手动蝶阀 V_2 和球阀 V_3 以及电磁阀 V_6 、 V_8 、 V_9 和 V_{10} 。为保证加液过程中顺利将机载液冷

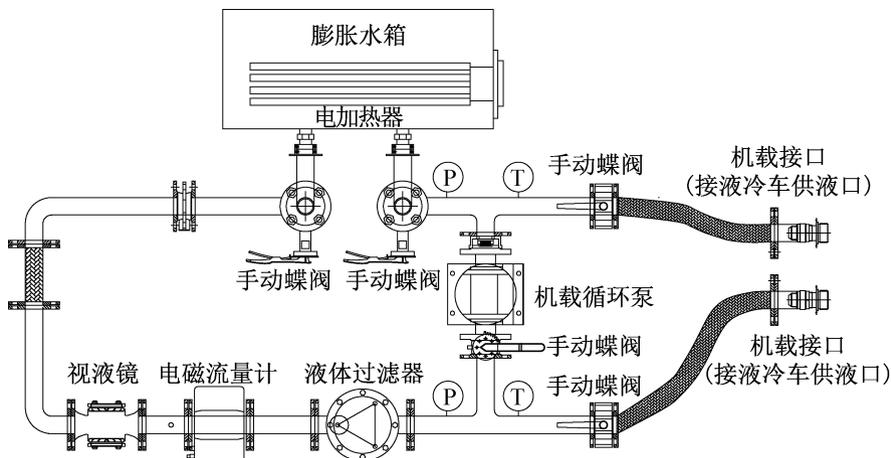


图 4 飞机机载液冷模拟系统

Fig.4 The simulation system of airborne liquid cooling

系统内的空气排除以及加液压力保持在机载液冷系统各设备的安全压力以下,液冷车控制程序通过调节循环泵转速及电动蝶阀 V_{11} 开度,以控制加液体积流量维持在 30 L/min 左右,供液管出口压力 ≤ 0.6 MPa。加液实验中,9 min 后模拟装置膨胀水箱液位达到 3/4,发出液位达到的开关量信号,液冷车循环泵停机,同时关闭供液和回液管路上的电磁阀 V_9 和 V_{10} 。

排液模式时,先打开电磁阀 V_7 和 V_8 ,将液冷车储液罐放空。关闭 V_6 、 V_7 和 V_8 ,打开 V_5 和 V_{12} ,启动真空泵,将储液罐抽到 30 kPa 真空,然后关闭真空泵和电磁阀 V_{12} ,打开手动蝶阀 V_1 和 V_2 以及球阀 V_3 ,打开电磁阀 V_9 和 V_{10} ,模拟装置中冷却液因高差和负压,迅速流向液冷车储液罐,当液冷车流量计检测到流量为 0 时,则排液完成,关闭电磁阀 V_9 和 V_{10} 。

实验表明,液冷车控制程序能够自动控制循环泵、真空泵及电磁阀等设备,实现冷却液的加液和排液功能。

3.4 外循环供液保障模式实验

模拟装置的高位水箱中设置 65 kW 电加热器,以模拟机载电子设备的发热,来测试液冷车的冷却能力。图 5 所示为外循环制冷模式和制热模式运行参

数。制冷模式实验工况:环境室温度为 30 °C,设定冷却液温度为 10 °C,体积流量为 200 L/min,机载液冷模拟装置热负荷为 60 kW。制热模式实验工况:环境室温度为 5 °C,设定冷却液温度为 15 °C,体积流量为 200 L/min,模拟装置冷却液初始温度为 5 °C,高位水箱电加热关闭,通过液冷车供给热液来加热模拟装置的冷却液,并升温至 15 °C。

由图 5 可知,制冷模式启动后,测量回液温度达到设定值,即模拟装置的冷却液温度降至 10 °C,需要 20 min,之后小幅振荡并最终稳定在 (10 ± 0.5) °C。制热模式启动后,测量到回液温度达到 15 °C,需要 24 min,之后小幅振荡并最终稳定在 (15 ± 0.5) °C。

4 结论

本文设计开发了多功能军用飞机地面液冷车,并试制了样车。飞机液冷车系统进行了液冷车补液、液冷车冷却液内循环、液冷车对飞机机载液冷系统的加液/排液和外循环供冷/热液保障等功能的测试,得到如下结论:

1) 飞机液冷车启动时间短,数据监测、显示和报警等内容充分,制冷系统模块化设计,自动化程度和可靠性高。

2) 飞机液冷车的补液、加液和排液模式时,分别能够使飞机液冷车车载液冷系统补液达到储液罐 3/4 液位,飞机机载液冷系统储液罐加液达到 3/4 液位和将机载液冷系统冷却液排空。

3) 飞机液冷车在环境温度 5 °C 和 30 °C 时,内循环模式将液冷车冷却液处理至设定温度(5 °C 加热至 15 °C,30 °C 制冷至 10 °C)分别需要 16 min 和 11 min。相同工况下,外循环模式将飞机机载液冷系统处理至设定温度时分别需要 24 min 和 20 min。冷却液温度控制精度为 ± 0.5 °C。

4) 飞机液冷车的功能及运行特性达到了基本战术技术指标,但系统流程仍需进行优化研究,减少阀门数量,尤其是手动阀门的数量,降低操作难度和出错率。

本文受国防基础科研计划(TSXX20180917057-C),上海市地方高校能力建设项目(18060502600)和上海市大学生创新创业训练计划项目(SH2018019)资助。(The project was supported by the Defense Industrial Technology Development Program (No. TSXX20180917057-C) and the Capacity Building Plan for Some Non-military Universities and Colleges of Shanghai Scientific Committee (No. 18060502600) and the Innovation and Entrepreneurship Training Program of Shanghai for College

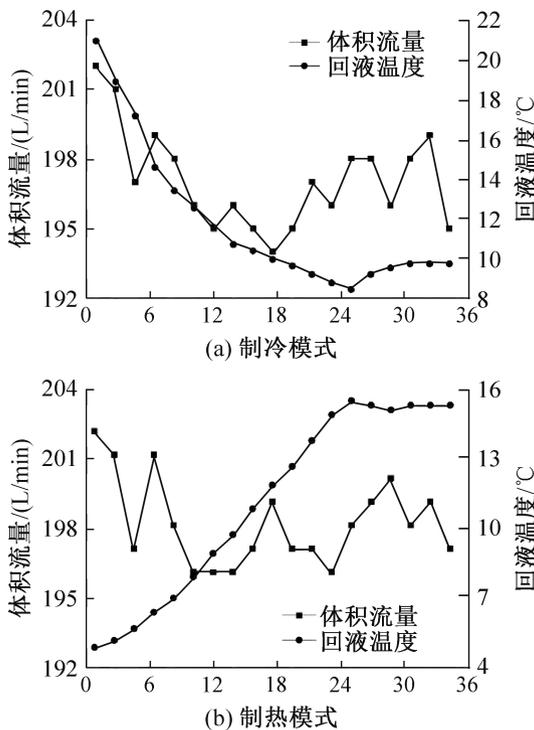


图 5 外循环制冷模式和制热模式运行参数

Fig.5 Operating parameters of cooling mode and heating mode in external circulation

Student (No. SH2018019).)

参考文献

- [1] 刘宝霞, 范斌. 飞机地面保障设备的发展趋势[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2000, 17(2): 84-86. (LIU Baoxia, FAN Bin. The development direction of airplane ground support equipment[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2000, 17(2): 84-86.)
- [2] 朱春玲, 宁献文. 用于机载大功率电子设备的新型液冷环控系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 203-207. (ZHU Chunling, NING Xianwen. Liquid cooling system for high-powered avionics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautical & Astronautics, 2005, 37(2): 203-207.)
- [3] 唐华杰, 吴兆林, 周志刚. 飞机地面空调车和军用飞机地面液体冷却车的应用及发展[J]. 流体机械, 2006, 34(2): 72-75. (TANG Huajie, WU Zhaolin, ZHOU Zhigang. Application and development of self-propelled air-conditioning vehicle for airplane and liquid-cooling vehicle for military aircraft[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(2): 72-75.)
- [4] 张科, 周志钢, 吴兆林. 飞机地面加液冷却车的应用与发展[J]. 流体机械, 2009, 37(12): 80-84. (ZHANG Ke, ZHOU Zhigang, WU Zhaolin. Research on application and development of the liquid-supply and cooling camion [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(12): 80-84.)
- [5] 曹智, 陈耀东. 飞机地面液冷车的设计与实现[J]. 企业技术开发, 2016, 35(1): 28-29. (CAO Zhi, CHEN Yaodong. Design and implementation of ground liquid cooling vehicle for a certain type of aircraft[J]. Technological Development of Enterprise, 2016, 35(1): 28-29.)
- [6] 李旭, 吴勇川, 胡方亮, 等. 航空地面空调液冷综合保障车研制[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(5): 55-59. (LI Xu, WU Yongchuan, HU Fangliang, et al. Development of aviation ground air-conditioning and liquid-cooling support cart [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017, 31(5): 55-59.)
- [7] 李旭, 雷金果, 张永亮. 不同工况下飞机液冷车制冷换热系统 PID 控制的建模与仿真[J]. 装备环境工程, 2017, 14(9): 1-5. (LI Xu, LEI Jinguo, ZHANG Yongliang. Modeling and simulation of PID control for refrigeration heat exchange systems of aircraft liquid-cooling carts in different working conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(9): 1-5.)
- [8] 李旭, 雷金果, 张永亮. 基于多模型专家 PID 控制的飞机液冷车温控系统建模与仿真[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(3): 75-79. (LI Xu, LEI Jinguo, ZHANG Yongliang. Modeling and simulation of temperature control system for aircraft liquid cooling vehicle based on multiple model expert PID control[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017, 31(3): 75-79.)
- [9] 马兰, 齐社红, 李艳娜. 飞机液冷系统增压膨胀组件性能仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(增刊): 21-27. (MA Lan, QI Shehong, LI Yanna. Simulation of performance for pressurized expansion unit in aircraft LCS [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(Suppl.): 21-27.)
- [10] 孙稚因. 军用飞机多功能加液冷却车的优化设计[D]. 上海: 上海理工大学, 2007. (SUN Zhiyan. Senior design for multifunction liquid-cooling camion of military aircraft [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2007.)
- [11] 飞机空调车通用规范: GJB 2643A—2011[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2011. (General specification of air conditioning cart for aircraft: GJB 2643A—2011[S]. Beijing: General Armament Department Military Standard Publishing Department, 2011.)
- [12] 林锦荣. 自行车式军用飞机液冷车的研制[D]. 上海: 上海理工大学, 2005. (LIN Jinrong. Design and production of liquid-cooling trailer of military aircraft [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2005.)
- [13] 周志钢, 吴兆林, 张华. 机场地面专用空调设备制冷试验工况的讨论[J]. 暖通空调, 2015, 45(1): 42-46. (ZHOU Zhigang, WU Zhaolin, ZHANG Hua. Discussion on cooling test conditions of ground air conditioning equipment for airports[J]. Journal of HV & AC, 2015, 45(1): 42-46.)
- [14] 崔永龙, 施红, 陈常栋. 飞机液冷系统的流量测量及计算[J]. 价值工程, 2017(15): 85-88. (CUI Yonglong, SHI Hong, CHEN Changdong. Flow measurement and calculation of aircraft liquid cooling system[J]. Value Engineering, 2017(15): 85-88.)
- [15] 祁成武, 尹本浩, 王延, 等. 基于压缩制冷的便携式特种电子设备冷却系统[J]. 制冷学报, 2017, 38(1): 95-100. (QI Chengwu, YIN Benhao, WANG Yan, et al. A portable cooling system based on compression refrigeration [J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(1): 95-100.)
- [16] 李旭, 雷金果, 魏东涛, 等. 飞机液冷车套管式换热器设计与仿真[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(4): 75-79. (LI Xu, LEI Jinguo, WEI Dongtao, et al. Design and simulation of double-pipe heat exchanger for aircraft liquid cooling carts [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017, 31(4): 75-79.)

(下转第 166 页)

- (1): 22–25. (GUO Zengyuan, CHENG Xinguang, XIA Zaizhong. Principle of minimum heat transfer potential dissipation and its application in thermal conductivity optimization[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (1): 22–25.)
- [16] 廖胜明. 跨临界二氧化碳制冷循环参数优化[J]. 长沙铁道学院学报, 1997, 15(4): 41–45. (LIAO Shengming. Optimization of reciprocal carbon dioxide refrigeration cycle parameters [J]. Journal of Changsha Railway Institute, 1997, 15(4): 41–45.)
- [17] 吕静, 马逸平, 曹科, 等. 水冷套管式 CO₂ 气冷器的设计及实验研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(2): 113–118. (LYU Jing, MA Yiping, CAO Ke, et al. Design and exper-

imental study on CO₂ water-cooled tube-in-tube gas cooler [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(2): 113–118.)

通信作者简介

吕静, 女, 副教授, 上海理工大学环境与建筑学院, (021) 55270275, E-mail: lvjing810@163.com。研究方向: 制冷空调系统节能技术, 二氧化碳热泵系统的性能。

About the corresponding author

Lü Jing, female, associate professor, School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, +86 21-55270275, E-mail: lvjing810@163.com. Research fields: energy saving technology of refrigeration and air conditioning system, performance of carbon dioxide heat pump system.

(上接第 160 页)

- [17] 高涛, 吴兆林, 周志钢. 基于 PLC 的液冷系统自动控制[J]. 自动化仪表, 2006, 27(9): 57–60. (GAO Tao, WU Zhaolin, ZHOU Zhigang. PLC based automatic control for liquid-cooled chiller[J]. Process Automation Instrumentation, 2006, 27(9): 57–60.)
- [18] 李旭, 雷金果, 张永亮. 飞机液冷车阀门自动控制系统设计[J]. 船舶电子工程, 2017, 37(9): 37–40. (LI Xu, LEI Jinguo, ZHANG Yongliang. Design of the automatic control system of valve in aircraft liquid cooling vehicles [J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(9): 37–40.)
- [19] 龚永奇, 邓建, 董程源, 等. 飞机地面空调保障装备模拟负载设计[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(6): 79–81. (GONG Yongqi, DENG Jian, DONG Chengyuan, et al. Dummy load design of aircraft ground air conditioning

support equipment [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2016, 30(6): 79–81.)

通信作者简介

盛健, 男, 博士, 实验师, 上海理工大学能源与动力工程学院, (021) 55272869, E-mail: sjhvac@163.com。研究方向: 特种制冷与空调系统, 飞机环境控制地面保障技术。

About the corresponding author

Sheng Jian, male, Ph. D, experimentalist, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 21-55272869, E-mail: sjhvac@163.com. Research fields: special refrigeration and air-conditioning system, ground support technology for aircraft environmental control.