高立龙, 陈嵩, 郑耿峰. 机器人热控技术研究现状综述[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(5): 737-749

机器人热控技术研究现状综述

高立龙[1]，陈嵩[2]，郑耿峰[1,2]
（1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108; 2. 福建省特种设备检验研究院, 福州 350008）

摘要: 现今, 采用机器人代替人类完成各种危险的任务已经成为一种趋势。然而, 机器人在高温环境下的应用受到热控技术发展的严重制约。本文首先介绍了机器人内部热敏感器件及相应的温控研究工作, 进而对近年来机器人热控技术的发展现状进行了综述与分析, 最后对高温环境下机器人热防护的关键问题和技术应用分别进行了探讨与展望。

关键词: 机器人; 热控; 高温; 热防护
中图分类号: TP242 **文献标志码:** A
DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20220285 **文章编号:** 1003-8728(2024)05-0737-13

A Review of Thermal Control Technologies for Robots

GAO Lilong[1], CHEN Song[2], ZHENG Gengfeng[1,2]
(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Special Equipment Inspection and Research Institute, Fuzhou 350008, China)

Abstract: Currently, robots are being adopted widely, instead of human beings, to carry on the jobs under the dangerous circumstances. However, applications of the robots with high-temperature conditions are hindered seriously by the development of thermal control techniques. Firstly, the main thermal sensitive devices of robots and the corresponding thermal management researches are introduced. Secondly, the development status of the thermal control techniques for robots in recent years is expounded in detail. Finally, the key issues which should be settled for the thermal protection of robots in high-temperature are discussed and the possible applied technologies are prospected.

Keywords: robots; thermal control; high temperature; thermal protection

随着机器人用途的扩大以及性能的提升, 热控问题成为阻碍机器人发展与实际应用的问题之一。机器人能够帮助人类完成生产自动化、灾难救援、宇宙空间探测等任务。其中, 各类应急救援行动更是对智能机器人有着迫切的需求, 搜救、破拆、消防灭火等特种机器人的应用是现代救援装备的发展趋势之一, 受到政府与各大科研机构的重视[1]。然而, 作为一种智能机电设备, 机器人包含许多对温度敏感的器件, 当温度超出这些器件合适的工作范围, 就会引发热失控使机器人工作不稳定甚至损坏。在 2011 年日本福岛核事故救援行动中, 机器人 Quince 由于电机驱动器过热而自动报停[2]。同样, 在人类对金星的探索中, 由于设备无法承受金星表面高温高压等恶劣环境, 目前生存时间最长的 Venera 13 着陆器也仅能存活 127 min[3]。

当机器人需要被实际投放在应急救援等工作

收稿日期: 2022-03-26
基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1310704)、国家工信部智能制造综合标准化与新模式专项(GXSP20181001)及福建省特种设备检验研究院项目(FJTJ2019023)
作者简介: 高立龙, 硕士研究生, 97524230@qq.com
通信作者: 郑耿峰, 高级工程师, 硕士生导师, 博士, 214871134@qq.com

中，由热引起的机器人工作可靠性问题开始受到国内外研究人员的关注[4-6]。一方面，这些工况经常伴随着恶劣的环境，如高温、高湿、低温、粉尘以及核辐射等，考验机器人的防护性能，对机器人的温控非常不利[7-12]；另一方面，面对实际应用，机器人的机动灵活性还需要得到大幅提高（目前救援机器人呆滞的机动性导致实战能力不强），未来更高功率密度的输出、整机轻量化、结构紧凑化等对散热系统的设计带来挑战[13-15]。其中，高温环境更是导致各类机器人热控难题的常见工况，直接限制了机器人在高温环境下的应用。合格的机器人热控系统设计能保证机器人在高温等恶劣条件下使用的可靠性，是拓展机器人的使用范围、提高机器人实战性能的关键技术之一。

本文根据已有机器人热控相关文献，首先从机器人热控中应关注的主要器件出发，以冷却方式、防隔热结构设计、计算机数值模拟为主要分类，介绍了各学者的相关研究，然后探讨高温环境下机器人热控的关键技术与趋势，为耐高温环境机器人研究提供参考。

1 机器人的主要温度敏感器件

机器人可分为机械部分与电气部分。主要的机械结构如机体、传动机构等在温度的变化下虽然会发生热胀冷缩以及受到热应力的作用，但未造成机构卡死，且对使用精度要求不高时，只要温度低于结构材料相变点，未严重影响材料力学性能，对机械结构的温控要求不高[16]。机械结构更多的是通过合适的耐高温材料选择与结构设计，承担耐热与隔热的作用。然而，各类电子器件、电机及电池等却是对温度敏感的器件，目前机器人热控相关研究也主要集中在这些方面。

1.1 电子器件

机器人的控制系统中分布着大量的电子器件，如控制器、电机驱动器及各类的传感器。电子器件受环境温度与自身产热的影响，当散热不良时有可能产生与温度相关的机械失效（引线疲劳、芯片封装断裂、粘合点疲劳等）、腐蚀失效（金属和键合点腐蚀、封装应力腐蚀）与电气失效（热逸溃、电过载、离子污染、电迁移）[17]。数据统计表明，随着温度的增加，电子元器件的失效率会呈指数增长，超过55%的电子器件失效是由于温度过高而引起[18-19]。表1列出了民用电子器件最高结温的一般规定，对于要求特别长寿命与低维护性的设备而言，平均结温以低于60 ℃为宜[19]。Gao等[20]通过改良机器人散热热沉的结构与安装方式，使电机驱动电路的最高温度减少了25 ℃，保证了油井150 ℃环境下井牵机器人工作的安全性能。

表1 民用电子器件最高结温一般规定[19]

Tab. 1 General rules for maximum junction temperature of civil electronic devices[19]

器件分类	允许的最高结温/℃
硅器件	塑料封装：125～150 金属封装：150～200
锗器件	70～90
Ⅲ-Ⅴ族化合物器件	150～175

1.2 电机

电机是大部分机器人驱动系统的核心部件，负责提供动力源，尤其对于仿人机器人来说，既要求高功率密度的输出，又要求尺寸小、质量轻，以保证机器人的机动性[15, 21-23]。电机由于机械摩擦、铜损、铁损等，在运行的过程中会产生热量，若散热不良温升过高会影响绝缘寿命、运行效率，极限工况下可能会造成磁性材料退磁、电机烧毁等现象，30%～40%的永磁电机因为过热而失效[24]。足够的散热能力不仅保证电机的安全运行，还能突破电机出厂的额定功率或转矩限制，提升机器人的性能[25-26]。Mazumdar等[21]进行了某机器人的电机外壳改进设计，通过暴露电机的背铁，在气隙中嵌入铝环提高散热性能；改进后的电机在自然对流条件下较原来能够提高50%的散热性能，采用风扇冷却时能提高79%，若采用液冷则能提高107%；其研究认为，绕组温度的降低不仅提高了电机运行的安全可靠性，还能减少热功耗，提高能效。

1.3 电池

电池通过将化学能转换为电能为机器人提供能量，特别对于移动机器人来说，是不可缺少的一部分。电池在工作中会产生以焦耳热与化学反应热为主的热量，常见的铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池等，最佳的工作温度范围在20～45 ℃之间，且温度均匀性需在5 ℃以内[27]。在低温条件下，电池内部电阻会增大，放电容量会降低，影响机器人的机动性，更有甚者机器人将无法启动，此时需要采取对机器人加热保温的措施[10]。Cao等[10]使用PTC加热与铝板均温，使高山寒冷地区工作的机器人在−20 ℃环境下的放电容量能达到20 ℃环境下的93%，较没有热管理系统的电池能提高接近40%的放电容量，提高了机器人在寒冷环境工作的可靠性。而当

温度过高时, 不仅会影响电池寿命, 还有可能产生燃烧、爆炸等危险[28]。由此可见, 电池热管理技术, 是保证移动电动设备性能与安全运行的关键。

2　机器人热控技术分类

2.1　冷却技术

冷却技术可以分为主动冷却与被动冷却。主动冷却需要耗能元件提供动力, 如风扇、水泵等; 被动冷却不需要额外的动力元件, 通过自然自发的散热降温, 如自然散热、相变材料冷却等。

2.1.1　风冷

风冷设计简单、成本低, 工质获取便捷, 是应用最广的冷却方式。风冷包括自然对流散热与强迫风冷两种形式。自然对流散热由流体受温度影响导致的密度差引起, 只适用于热流密度不超过 0.8 W/cm^2 的器件散热, 而强迫风冷空气流动强劲, 散热效果可达到自然散热的 5 ~ 10 倍, 应用更为广泛[29]。曹涛等[30] 利用风扇冷却结合隔热层与热辐射反射层复合热防护结构, 解决了变电站巡检机器人在高温环境下无法正常运行的问题。Noh 等[31] 提出了一种采用旋转电机同心堆叠式的模块化驱动器, 利用单个风扇就能冷却串联在一起的执行器模块, 减少了冷却组件, 使该结构具有高热容、低热阻的特点, 在强制风冷条件下, 该执行器所能承受的最大施加电流可达到额定电流的 3 倍。Akawung 等[13] 通过在电机转子与外壳上设计通风孔洞, 利用电机本身转子转动造成的压差提供气体流动的动力, 节省了本该使用风扇在机器人内部占据的空间, 降低了机器人的负载。

在满足机器人使用要求的前提下, 风冷是最经济可靠的散热方法之一, 普通工况下可尽可能的使用风冷散热。但风冷散热受环境温度影响较大, 且提高风速会造成系统噪音增加。因而, 风冷设计时需要着重考虑风机的选型与风道的设计, 合理的散热结构能减少风扇的数量, 从而降低机器人的故障率与噪声。

2.1.2　液冷

液体冷却方式常见的有循环流动式、浸没式、喷射式。浸没式与喷射式多属直接接触, 在高功率密度电子器件散热应用较多[32-33]。目前有关机器人散热中最常见的液冷为间接接触的循环液冷。典型的循环液冷如图 1 所示。相较于风冷, 循环液冷在风扇与热源间增加了冷板、流体回路、泵和膨胀箱等设备, 结构相对复杂。由于液体的导热系数与热容比气体高, 液冷可适用于更高热流密度的场合。

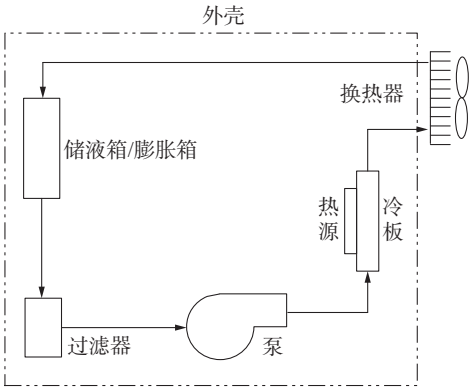


图 1　常见循环液冷系统[34]

Fig. 1　Common circulating liquid cooling system[34]

Urata 等[15] 使用循环水冷为仿人机器人的电机和电机驱动器散热, 通过控制温升, 突破了电机原有的使用性能, 输入电流能提高 5 倍, 在一项跳跃试验中, 电机的输出功率能达到额定功率的 7.5 倍。液冷系统的水泵、储液箱等多出的附件使得冷却系统的质量有很大的增加, 对于质量有要求的移动机器人而言, 需要权衡散热能力与质量所增加的负载。液冷系统过小无法及时排走热量, 过大又会过于增加机器人的负载, 导致产生过多的热量而降低液冷系统的冷却效率[23]。为减少机器人液冷系统质量, Karng 等[35] 采用聚碳酸酯与铝替代铜, 使水冷板单位质量的传热性能得到提升, 从而降低了结构的重量。

上海交通大学的研究人员对托卡马克腔内高温、真空、强磁与核辐射环境的内窥机械臂, 采用了水冷热防护[36-41], 其结构如图 2 所示。将冷却铜管缠绕在需要防护的相机、电机及其编码器等组件与机械手外壳结构之间, 由管道中的冷却水带走高温环境侵入的热量以及自身元件产生的热量, 试验表明, 机械臂能够在 100 ℃ 环境温度下正常工作。机械臂的串联结构对末端负载有严格的要求, 采用水冷虽然考验系统的附加质量, 连杆之间的不断运动还要求冷却管道需要有可靠的连接与密封, 但却是实现机器人在高温环境下长期运行的有效方法。钱炳锋等[42] 使用铝为外壳设计了一个带水冷系统的焊接机器人结构光传感器, 通过适当的调节流量, 能够应对不同的环境温度长时间工作。传感器靠近焊缝, 使用反射性能好的铝为外壳以增大辐射热阻可省去表面涂层的应用, 但铝的导热系数也高, 需要权衡环境热传导侵入热量的影响。当需要进一步提高循环液冷的散热能力时, 可在液体中加入高导热系数的纳米颗粒, 或使用微通道冷板, 或采用低沸点工质进行流动沸腾换热等方法[43-45]。

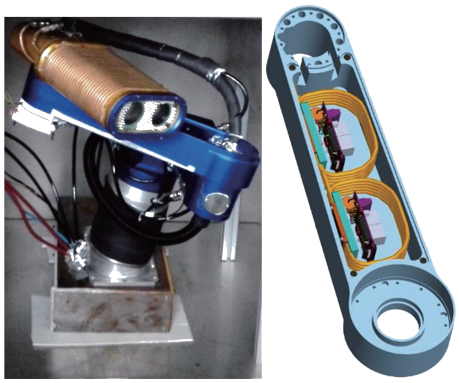


图 2 螺旋循环水冷热防护[36]

Fig. 2 Thermal protection[36] for spiral circulating water cooling

2.1.3 相变冷却

物质发生相状态之间的转变时，需要吸收或释放潜热，可以在很小的温度变化范围内实现很大的传热量。常见的有液气相变(蒸发与冷凝)与固液相变(融化与凝固)。利用相变进行冷却的优势是材料自身吸收热量，不需要环境提供额外的冷源，不受环境温度的限制，同时还减少了主动冷却部件的能耗。

1)液气相变

液气相变吸热是已知最有效的传热方式，如水蒸发时的吸热量，理论上是温升为 10 ℃ 的液体水吸热量的 58 倍[19]。Hochberg 等[46] 直接将吸收满液体的羊毛布套在经改造电机的散热片上，验证了液体蒸发在机器人电机上的冷却效果，在机器人模拟 RoboCup 比赛游戏的工况中，添加散热片的电机在仅自然对流冷却下较未改造电机可延长运行时间 3 min，而加入蒸发冷却后可以完成整场游戏而不过热，且温升降低了约 30 ℃。这样的散热设计重量较原来的电机仅重了 2%，但是没有持续为散热片补充水分的措施，只能保证一段时间内的稳定运行。日本东京大学研发出一款会“流汗”的仿人机器人“Kengoro”，其研究人员注意到仿人的“骨架”表面与内部有充分的空间没有得到利用，设计了一种双层多孔骨骼结构，电机直接安装在这种骨架上，作为支撑件的同时，骨架内部设计有冷却水道与表面的微孔相连，水分可以通过毛细作用相变蒸发造成一种“发汗”的效果冷却电机，发汗原理如图 3 所示[22]。同样，基于“流汗”蒸发降温的思路，美国康奈尔大学的研究人员研发了一种能在高温下自动“出汗冷却”的流体弹性体致动器[47]，3D 打印的手指状致动器由水凝胶制成，水凝胶上带有随温度的变化自动扩张或收缩的微孔，高温条件下，内部液压流体经扩张的微孔流出，通过蒸发吸收热量，而当温度降低后，微孔则会收缩限制液体的流失。虽然这种散热方案会造成液压执行器的效率降低与液压工质的流失，但为软体机器人的弹性体材料导热率低、散热困难，提供了温度调节方法。

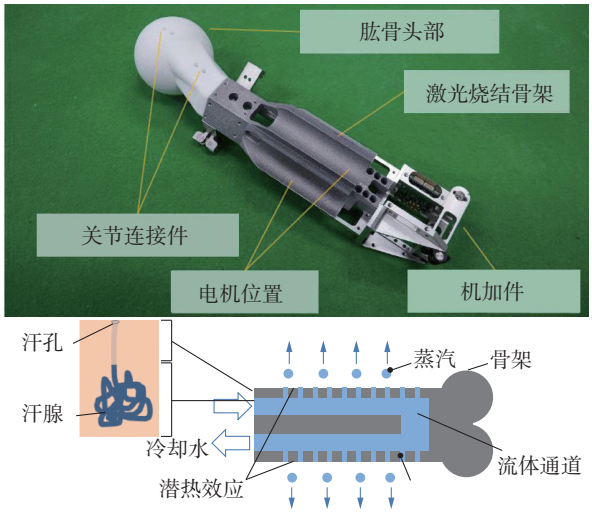


图 3 “Kengoro”的流汗原理[22]

Fig. 3 Sweating principle of “Kengoro”[22]

上述利用蒸发带走热量的应用虽然比较新颖，但存在着补液机制未完善或工质泄露等不足。事实上，液气相变中更常使用的是热管。热管由蒸发段、绝热段、冷凝段组成，通过蒸发与冷凝实现热量的高效传递，如图 4 所示。热管布置灵活，可将处在结构复杂、空间紧凑处的发热元件热量导出，再辅以其他方式散热。Lee 等[48] 研究了船体结构中的焊接机器人暴露在由焊接产生的金属粉尘和烟气中的热防护问题，将伺服电机的驱动模块设置在密闭腔内并使用热管将热量带至外部散热片进行冷却，同时使用压缩空气与风扇对散热片降温，及时吹走可能沉积在翅片中的粉尘，防止因有效散热面积减小造成的散热效率降低。由于热管冷凝段通常需要配以主动冷却方式，如风扇冷却，才能有效的把热量排至环境，因此热管的主要作用是传热而不是散热，需要提供额外的冷源。

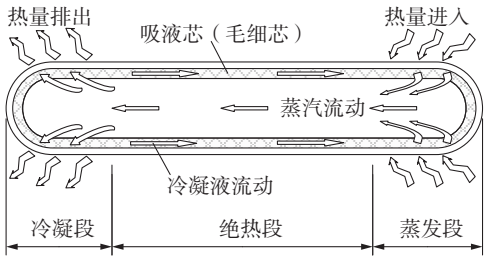


图 4 热管结构示意图[17]

Fig. 4 Schematic diagram of heat pipe structure[17]

2)固液相变

固液相变冷却无运动部件，结构简单，安全可靠，运行和维护成本低，能够较好解决短时或周期性

高热流的设备温控问题[19]。华东理工大学的韩延龙等研究了核救灾机器人工作在高温、高湿与核辐射环境下的电子设备热防护问题[32, 49-51], 主要方法为使用相变材料石蜡制成储热冷板, 作为电机驱动器等发热元件的热沉, 通过融化吸收热量; 并在密封电机驱动器等电子器件的箱体结构中也填入相变材料吸收来自环境的热量, 将隔热与吸热相辅, 延长了机器人在恶劣环境下的工作时间, 其实验示意与防护结构如图 5 所示。100 ℃ 环境温度下, 6 个电机驱动器可工作 164 min, 与常温无热防护相比能提高 1 倍以上工作时间[51]。

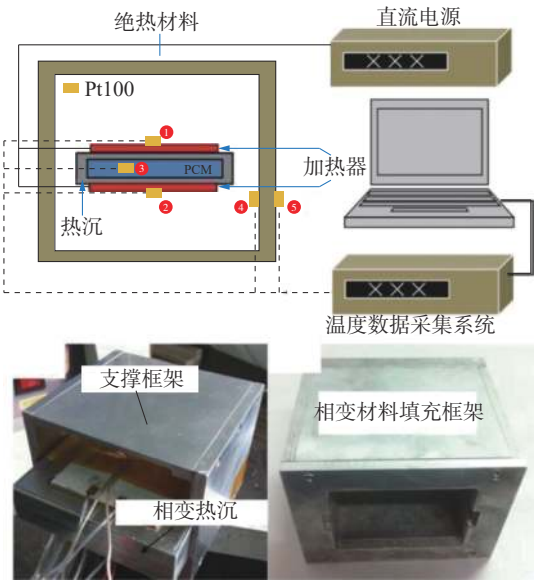


图 5　相变材料热管理系统示意与实物[50]

Fig. 5　Schematic diagram and physical diagram of thermal management system of phase change materials[50]

固液相变冷却的弊端是, 当相变材料完全融化时, 无法继续散热, 设备温度会快速升高。为了使相变材料能长时间工作, 需要将固液相变冷却与其他主动冷却方式结合在一起。有研究人员采用热管与相变材料相结合的方式对锂电池进行温控, 电池的热量先经由热管再传至相变材料, 实现相变材料与电池的分离, 当相变材料耗尽, 系统温度高于设定值时, 启动额外的风扇制冷[52]。将相变材料与被温控器件分离的好处是, 即使材料完全融化, 器件周围的空间还有一定的散热能力, 可降低设备烧毁的风险。类似的, 也可将相变材料与水冷结合, 相变材料能起到降低能耗与热缓冲的作用, 而水冷又可提供长时间的大量散热, 防止相变材料完全融化而丧失冷却能力[53]。而对于相变材料与空气冷却结合的情况, 有研究表明, 当对流换热系数处于一定范围时, 混合的散热器才能够优于纯相变材料或纯空气冷却[54]。虽然主动冷却方式的配合使用能延长相变材料的温控时间, 但这意味着环境提供冷源, 高温环境下并不适用。

2.2　产热控制与优化

产热的控制与优化从热量产生的源头考虑机器人的温控。一是系统监控温度, 判断将要发生过热时, 设法控制机器人的功率输出(例如使机器人“慢”下来), 防止过热发生不可逆的损坏。二是通过优化机器人的姿态、运动、移动路径或者优化部件结构等, 尽可能减少功率元件的热耗, 减轻下游冷却系统的负担。Moore 等[14] 提出一种“温度感知操作”的概念, 通过热模型预测当前操作规划下机器人将要达到的温度, 从而提醒操作人员或机器人自主系统重新规划操作或采取措施来防止过热。该模型能够预测 20 min 内的系统温度, 并且精度能够达到 4 ℃ 以内。Heller 等[55] 采用闭环控制, 根据电机与环境的温度, 控制液冷泵的输出功率与电机的转速来影响产热, 使机器人在恶劣环境下执行任务的时间超过对应的开环控制系统且不发生过热。在散热困难的恶劣环境下, 冷却系统自身的功耗对于机器人温控来说也是一种负担, 闭环反馈能够优化这种功耗。为了实现不断电状态下仿人机器人的快速热恢复, Jorgensen 等[56] 通过构建机器人姿态、产热、温升之间的模型, 研究了机器人最快实现热恢复的姿态问题。实验表明, 其算法在机器人一只腿部温度升至危险区域时, 能够调整机器人至最佳姿态, 使该腿部较传统姿态更快速的降温。在结构方面, 孙敬颈等[57] 以温升为目标函数, 采用遗传算法对空间机械臂制动器线圈的导线直径与线圈匝数进行了优化设计, 结合实验结果其线圈温升降低了约 20 ℃, 减少了线圈发热对机械臂长期工作的影响。从以上文献能够看出, 产热的控制与优化能够同时兼顾温控与节能。对于高温等环境下有温控时间限制的机器人来说, 如果能够降低产热, 可以减缓机器人内部热容的吸热过程, 一定程度上延长操作时间。

2.3　热防护结构

热防护结构考虑的是高温环境下设备的耐热与隔热的能力, 在航空航天领域[58] 有成熟的发展, 一些概念与设计思路可以借鉴至高温环境下机器人的防热结构中运用。

2.3.1　隔热式结构

隔热式结构利用隔热材料(导热系数不大于 0.08 W/(m·K)), 阻隔环境热量对机器人的侵入。传统隔热材料有陶瓷纤维隔热毡、软木、石棉等, 新型隔热材料有气凝胶、真空绝热板等。陶瓷隔热毡的耐高温性能好, 使用温度可达 1 260 ℃; 气凝胶导热系数更低,

常温为 0.015 W/(m·K)，但耐温性较差(<650 ℃)[59]。真空绝热板导热系数能低至 0.001 5 W/(m·K)，在同等隔热效果下，厚度仅为传统材料的十分之一，能够节省空间，是十分高效的隔热材料[60]，但使用温度范围仅在−50 ~ 70 ℃[61]。由于外界高温与内部温度的要求，需要隔热层产生大范围的温降，不同隔热材料耐高温性能不同，一般将不同温度区间的优势材料组合使用。隔热材料从固体导热角度阻碍热流，对于辐射传热则可以通过运用合适的热控涂层来调整表面的热辐射性质进行温控[62]。Alhaza 等[63] 在一室内消防救援机器人中提出多层隔热结构的设计，最外层的银涂层负责反射高温环境的热辐射，能减少 50% 的热量；第二层铝板负责承受载荷；第三层为导热系数低的不可燃材料；第四层为空气，空气导热系数低，抑制其对流时可视为绝热材料；第五层为一种隔热板；综合效果能使机器人在 700 ℃ 的环境下承受 60 min。虽然气凝胶、隔热毡等隔热材料具有极低的热导率和密度，可以实现轻量化的结构，但力学性能差，无法单独作为外防热结构，需要有额外的承载件。隔热结构抵御了外界的高温，而内部产热器件的温控方法在 Alhaza 的文章[63] 中并未介绍，采取合适的散热技术应能使机器人的工作时间延长。

2.3.2 吸热式结构

隔热结构不能实现对热流的完全阻隔，且在材料拼接或连接固定处存在热短路效应。而吸热式结构同时利用材料的热容吸收热量，能够进一步减少热量的流入。热量可分别通过显热与潜热存储。显热存储要求材料比热容大、导热率高，如铍、铜、石墨等，由于热量的吸收与质量成正比，显热存储在结构轻量化上存在不足，不推荐使用[58]。潜热存储涉及材料的固液相变，由于材料相变时会吸收大量的潜热，相变材料在储能和温控领域已有广泛的应用，将相变材料与热防护结构结合也成为一种趋势[64]。韩延龙[51] 在核救灾机器人的电子元件密封腔框架中填入相变材料石蜡，通过融化吸热减少了环境热量的入侵。利用吸热式结构的放热过程，还能够对低温环境器件进行隔热保温。赵帅[65] 在低温冷库巡检机器人的温控系统中使用了真空隔热瓦减少热量流失，并辅以相变材料凝固放热及主动电加热使得机器人能在低温环境下可靠运行。

2.3.3 一体化结构

传统热防护结构采用冷、热分开式的设计，热结构阻隔热流而承载性能不足，冷结构承受载荷但隔热性能较差，冷、热结构仅实现单一功能，结构效率低[66]。夹层结构比强度、比刚度高，抗冲击性能好，常见的有波纹夹芯结构、蜂窝夹芯结构、皱褶夹芯结构等[64, 67]，在夹芯与面板之间填充隔热材料，可实现防热/承载一体化设计，如图 6 所示。由于夹芯结构腹板处有明显的热短路效应，为了提高防热性能，夹芯结构需要加厚隔热层或做其余改善，如镂空腹板、多层级腹板、结合相变材料吸热等方式[66-67]。一体化结构较于普通平板结构，力学性能更优，隔热性能更佳，空间利用率高，且更轻量化，在一些高温设备的外壳防护结构上有良好的应用前景。

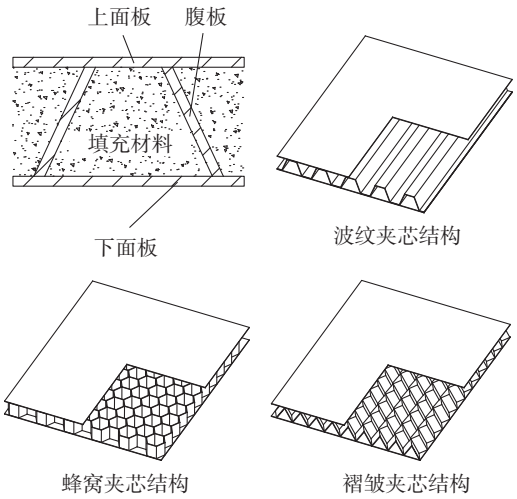


图 6 一体化热防护结构[64, 66]

Fig. 6 Integrated thermal protection structure[64, 66]

2.4 数值模拟的应用

传统的热设计采用样机测试与经验公式计算方法，不仅完全依赖于工程师的经验，且后续的产品优化需通过多次的样机测试与调整，经验依赖性大、开发周期长、成本高[68]。通过计算机数值模拟进行热仿真，可无实物对热设计进行模拟验证，并根据图像化界面能对整体温度分布有直观清晰的把握。图 7 为空间机械臂的热仿真分析图像，能够为热试验做先期指导，再结合热试验验证热设计的合理性[69]。

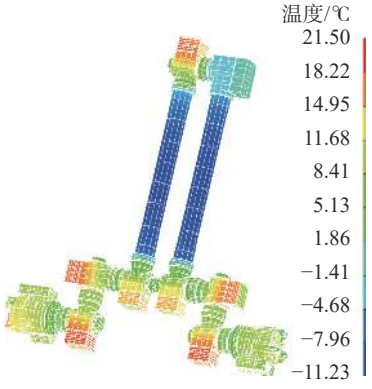


图 7 空间机械臂热分析图像[69]

Fig. 7 Thermal analysis image of space manipulator[69]

利用计算机进行热仿真, 可直接对不同设计方案进行试错, 降低理论分析门槛, 便于非专业的热设计工程师得出满足要求的方案。Kannan 等[70] 运用 FloTHERM 对四足机器人内部 12 个电机控制器的散热进行了研究, 通过改变控制器的布局与风扇配置来寻找合适的散热设计, 合理的方案较不合理的方案可减少 73 ℃ 的温升, 并使温度分布更均匀。

由于数值模拟是虚拟仿真, 不像试验测试那样需要具体的实物与复杂的操作, 所以仿真分析可降低试验成本与工作量。为了优化某工业机器人控制器内原有的散热翅片, Matysiak 等[71] 用 Fluent 软件进行仿真分析, 通过尝试不同的翅片数量、翅片高度, 风机是鼓风或是抽风, 改变空气出入口的位置, 得到了关于优化尺寸或是优化散热的结果。在其仿真算例结果中, 维持原有的散热能力条件下, 能减少 37% ~ 47% 的散热器体积; 当仅改变翅片数目与高度时, 温度能够下降 26% ~ 30%; 而风扇模式与出入口位置也变化时, 温度能够下降 38% ~ 42%[71]。吕遥等[72-73] 利用 Fluent 软件对液压外骨骼机器人不同的油箱结构散热进行仿真, 并在油箱外增加翅片来扩展散热面积, 达到了不增加油箱质量的条件下, 增强液压油散热的目的。

一些实际问题情况复杂, 难以进行分析求解, 计算机强大的数据处理与计算能力便于处理复杂问题。谢戈辉等[8] 使用 Fluent 仿真分析了焦炉测温机器人在高温气流下的防护问题, 通过设计冷却风道, 采用大风吹散高温气流的思路, 使机器人底部高温区域从 61.09% 下降至 10.88%, 平均温度下降 22.04%, 且通过试验验证了风道设计的合理性。随着计算机算力的不断提高, 流动与传热模拟的准确性不断增强, 数值模拟在热控设计过程已经起着十分重要的作用, 通过仿真分析与试验验证结合, 热设计过程能够更经济与便捷。

3　高温环境机器人热控的问题与展望

3.1　关键问题

高温环境直接导致热控难题, 又有迫切需要机器人应用的需求, 如核操作、核救灾机器人[39, 51], 消防救援机器人[11, 63], 空天探测机器人[3], 高温车间或设备的维护[8] 等等。高温环境给热设计带来了难题。

1)热量的隔绝与散发之间的矛盾

因为高温环境的热量会自发的通过热传导、热对流、热辐射传递给机器人, 所以必须要采用隔热措施对机器人进行热防护。然而这种热流阻隔是双向的, 在阻隔环境热流侵入的同时, 机器人内部自身的产热也无法对外排放, 造成了机器人隔热与散热的矛盾。当高温环境仅在有限的且固定的较小空间中时, 可通过类似上海交大研发的托卡马克内窥机械臂[36] 一样, 利用循环的冷媒将热量从高温环境带至低温环境排放。而当高温环境范围大, 机器人又属于移动型时, 采用循环冷却的方法则并不合适。就目前已有的热控方法中, 采用相变材料吸热储能, 将热量封存在机器人内部, 待机器人回到低温环境再对外排放热量是一种行之有效的方法。在这方面, 选择合适的相变材料, 研制潜热更大、性能更稳定的相变材料是关键。然而使用这种温控方式的时候, 机器人的工作时间必然是有限制的。

2)热路的适时打开与切断

热防护结构理论上隔绝了机器人内部与外部环境的热量交换, 在高温环境中能起到防护作用, 而当机器人回到常温环境工作时, 若内部器件的温控方式与高温环境下一样(如使用相变材料吸热), 那么机器人在常温环境下也有运行时间限制, 温控效率太低。华东理工研究的核救灾机器人[51] 相变温控时间约 3 h, 从常温区进入高温区需要 20 ~ 30 min, 往返则需要 40 ~ 60 min, 有大量的温控时间浪费在了常温区。如何实现机器人自主调节温控要求, 即在常温环境能打开与外界环境的热交换, 排出热量, 而当机器人进入高温环境时, 自动切断热流, 隔绝环境高温, 是提高与完善高温环境机器人热控的关键问题之一。

3)材料的耐高温能力

当环境的温度特别高, 如需要长时间在火场内工作的消防救援机器人, 那么就不能不考虑材料的耐高温能力。图 8 为北京力升高科有限公司研发的高温消防机器人, 能在 1 000 ℃ 高温环境下工作 30 min 以上。在如此高的温度下, 材料发生的热变形可能导致机构的卡死或一些关键部件(如轴承、液压机构等)的损坏。且金属材料达到一定的温度, 就会发生组织转变, 改变材料的力学性能。由于在实际运用时, 不像在热处理车间中能够对温度与时间进行控制, 材料的强度、韧性、刚度等力学性能可能会变差。机构设计时合理的间隙预留, 材料的高温稳定性、抗高温疲劳能力是高温环境机器人外部机构可靠工作的关键。



图8 耐高温消防机器人[74]

Fig. 8 High temperature resistant fire fighting robot[74]

4)执行机构至电机的防隔热问题

机器人在高温环境中执行任务,由于必须保证执行机构的空间运动性能,这些执行机构必然会被暴露在高温环境中无法使用隔热结构覆盖,如车轮、履带、抓手或工作臂等。这些机构可以本体采用耐高温材料设计,但必须通过传动机构与电机接触相连,容易产生高效的热通路,使环境热量沿着传动机构侵入隔热系统对电机及内部器件产生影响。如何减少从这些机构传至内部电机的热量,且同时保证电机动力输出的效率与可靠性是对电机防护的关键。

3.2 耐高温机器人热控技术的展望

随着技术的发展与高温环境需求的不断增强,机器人耐高温工作的能力必将不断提高。通过前文的总结分析,本文认为高温环境机器人热控技术的发展会有以下趋势:

1)相变为主的冷却技术的应用

相变散热在电子器件、锂电池热管理等相关领域有大量的研究,被认为是具有良好应用前景的温控技术。由于相变是自发的被动过程,能够不依赖环境温度通过储热达到散热效果,尤其适合用于处理高温设备散热与隔热之间的矛盾。对固液相变材料而言,还普遍存在着导热系数低、相分离、过冷以及需要长时间放热凝固恢复储热能力等问题。储热装置的研究需要聚焦在复合导热率的提高、快速放热或储热模块快速更换等方面。对于液气相变,采用消耗型方法,理论上应能比固液相变表现出更好的温控性能,且在工质完全消耗后可直接补充,能更方便的解决热恢复问题。但在实际应用中除了解决泄露问题外,还需注意蒸气排散途径与隔热间的关系,以及可能的体积剧烈变化引发的安全问题。另一方面,由于纯相变温控时间有限的局限性,相变材料与其余主动冷却方式相结合的研究将不断增强。

2)真空绝热为主的隔热技术的应用

当环境温度上升到几百甚至上千摄氏度,现有的隔热材料在机器人这种较小尺度设备上已经无法有效的解决隔热问题。通过抽真空的方式,能够最大程度的减少热传导与热对流,再通过多层反射屏能够层层减少辐射热流。商博峰[75]在测井仪器中应用该技术,使其在200 ℃环境中具有良好隔热效果,等效导热系数达到了0.000 7 W/(m·K),这是现今任何隔热材料都无法比拟的。在整体隔热达标的同时,为保证结构的刚度以及减少结构拼接处的漏热,夹芯结构与相变材料吸热辅助减少热流的应用具有良好的前景。

3)热二极管与热开关等装置的应用

热二极管即单向传热装置或热开关可以解决高温与常温不同散热方式的要求[51],常温环境下内部器件通过此装置散热,当环境高温时切断该热流路径阻隔外界高温。如两相流回路热管可在环境低温时实现液气相变的循环,而在环境高温时中断流动过程,因为蒸气导热系数低,热管管壁薄,导热截面极小,可看成热路被切断,从而实现单向传热[19]。而热开关则可通过主动驱动(磁、电等)或被动驱动(材料的热膨胀、热磁效应、记忆合金等)的方法实现导热面的接触与分离或其它传热方式的连接与断开[76-77]。目前这类装置在航天领域得到应用,工作温度与传/隔热能力存在一定的范围,对于高温环境下的应用还需要探索和研究。

4 结论

综上所述,机器人内部存在着电子元器件、电机、电池为主的温度敏感器件。常见冷却方式以自然散热、强迫风冷、循环液冷为主。普通工况采用自然散热即可,对于高功率工况可采用强迫风冷或循环液冷。当机器人在极端环境或工况下,常规散热技术将难以满足需求,存在热控设计难点与应用限制。虽然目前在这方面的研究已经有一定进展,但还需要更多的探索。

不同的高温环境应用都具有其特殊性,普遍上都需要具备良好的隔热防护,解决外部隔热与内部器件散热的矛盾、热路的适时打开与切断、暴露在环境中材料的耐高温能力、执行机构至电机的防隔热等关键问题。相变冷却技术传热量大,在散热与隔热方面都能有所作为。一体化热防护结构较普通钣金结构有更优的抗冲击性与隔热性,多层真空绝热技术能够最有效的阻隔热流传递。热二极管与热开关等装置或能够较好地解决不同环境散热的调节问题。耐高温环境机器人的研究对推动机器人技术的发展有重要作用。应急救援、高温环境生产与高

温特种设备维护等不断增加的现实需求也为高温环境机器人的发展提供了机遇与挑战。

[参考文献]

[1] 董炳艳, 张自强, 徐兰军, 等. 智能应急救援装备研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(11): 1-25.
DONG B Y, ZHANG Z Q, XU L J, et al. Research status and development trend of intelligent emergency rescue equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(11): 1-25. (in Chinese)

[2] NAGATANI K, KIRIBAYASHI S, OKADA Y, et al. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots[J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30(1): 44-63.

[3] 赵宇鹓, 刘建忠, 邹永廖, 等. 金星探测研究进展与未来展望[J]. 地质学报, 2021, 95(9): 2703-2724.
ZHAO Y Y, LIU J Z, ZOU Y L, et al. Progress and future prospects of Venus exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(9): 2703-2724. (in Chinese)

[4] 韩延龙, 栾伟玲, 张衍, 等. 电子器件热防护技术及在核机器人中的应用[J]. 核科学与工程, 2015, 35(1): 112-122.
HAN Y L, LUAN W L, ZHANG Y, et al. Thermal control technologies of electronic devices and their applications on nuclear robots[J]. Nuclear Science and Engineering, 2015, 35(1): 112-122. (in Chinese)

[5] SEVINCHAN E, DINCER I, LANG H X. A review on thermal management methods for robots[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 140: 799-813.

[6] SEVINCHAN E, DINCER I, LANG H X. Investigation of heat transfer performance of various insulating materials for robots[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 131: 907-919.

[7] 王康, 张沛, 林云成, 等. 采样机械臂关节月表环境适应性设计[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(5): 482-489.
WANG K, ZHANG P, LIN Y C, et al. Environmental adaptive design of joint for a lunar surface sampling arm[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(5): 482-489. (in Chinese)

[8] 谢戈辉, 郭文亮, 韩念琛, 等. 基于 CFD 的焦炉测温机器人冷却风道结构设计[J]. 煤炭技术, 2018, 37(12): 217-220.
XIE G H, GUO W L, HAN N C, et al. Structural design of cooling air duct for measuring temperature rail-mounted robot of coke oven based on CFD analysis[J]. Coal Technology, 2018, 37(12): 217-220. (in Chinese)

[9] YOSHIIKE T, KURODA M, UJINO R, et al. Development of experimental legged robot for inspection and disaster response in plants[C]// 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2017: 4869-4876.

[10] CAO J N, LI C Y, HUANG D X, et al. Research of thermal management technology for battery of robot working in alpine region[C]// 2016 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI). Jinan, China: IEEE, 2016: 1-4.

[11] 王哲夫. 火灾救援机器人电子器件热防护技术研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021.
WANG Z F. Research on thermal protection technology for electronic devices of fire rescue robot[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2021. (in Chinese)

[12] 许礼进, 冯海生, 方雄灿, 等. 工业机器人电气控制柜的热流场分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(15): 32-36.
XU L J, FENG H S, FANG X C, et al. Thermal flow field analysis of industrial robot control cabinet[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(15): 32-36. (in Chinese)

[13] AKAWUNG A F, FUJIMOTO Y. Design and evaluation of airflow cooling system for high-power-density motor for robotic applications[C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA: IEEE, 2020: 1715-1721.

[14] MOORE B J, ATKINS E, TILBURY D. Thermal modeling for temperature aware operations in field robots[C]// ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference Joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference. Fort Lauderdale, Florida, USA: ASME, 2012: 509-518.

[15] URATA J, HIROSE T, NAMIKI Y, et al. Thermal control of electrical motors for high-power humanoid robots[C]// 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Nice, France: IEEE, 2008: 2047-2052.

[16] 李法设. 高温机械臂冷却技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

LI F S. Research of cooling technology of high temperature robot arm[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese)

[17] SHABANY Y. 传热学: 电力电子器件热管理[M]. 余小玲, 吴伟烽, 刘飞龙, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013.
SHABANY Y. Heat transfer: thermal management of electronics[M]. YU X L, WU W F, LIU F L, trans. Beijing: China Machine Press, 2013. (in Chinese)

[18] HE Z Q, YAN Y F, ZHANG Z E. Thermal management and temperature uniformity enhancement of electronic devices by micro heat sinks: a review[J]. Energy, 2021, 216: 119223.

[19] 余建祖, 高红霞, 谢永奇. 电子设备热设计及分析技术[M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
YU J Z, GAO H X, XIE Y Q. Thermal design and analysis technology of electronic equipment[M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2008. (in Chinese)

[20] GAO S, TAO A H, CHENG J J, et al. Thermal management solutions for a traction robot for use in downhole extreme conditions[C]// 2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Las Vegas, NV: IEEE, 2016: 113-117.

[21] MAZUMDAR A, SPENCE S J, HOBART C, et al. Improving robotic actuator torque density and efficiency through enhanced heat transfer[C]// Proceedings of the ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference. Minneapolis, Minnesota, USA: ASME, 2016: V002T26A004.

[22] KOZUKI T, TOSHINORI H, SHIRAI T, et al. Skeletal structure with artificial perspiration for cooling by latent heat for musculoskeletal humanoid Kengoro[C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, Korea (South): IEEE, 2016: 2135-2140.

[23] ZHU T Y M, HOOKS J, HONG D. Design, modeling, and analysis of a liquid cooled proprioceptive actuator for legged robots[C]// 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Hong Kong, China: IEEE, 2019: 36-43.

[24] 汤勇, 孙亚隆, 郭志军, 等. 电机散热系统的研究现状与发展趋势[J]. 中国机械工程, 2021, 32(10): 1135-1150.
TANG Y, SUN Y L, GUO Z J, et al. Development status and perspective trend of motor cooling systems[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(10): 1135-1150. (in Chinese)

[25] KAMINAGA H, KO T Y, YORITA S, et al. Enhancement of mechanical strength, computational power, and heat management for fieldwork humanoid robots[C]// 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). Cancun, Mexico: IEEE, 2016: 786-793.

[26] PAINE N, SENTIS L. Design and comparative analysis of a retrofitted liquid cooling system for high-power actuators[J]. Actuators, 2015, 4(3): 182-202.

[27] 饶中浩. 基于固液相变传热介质的动力电池热管理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
RAO Z H. Research on power battery thermal management based on solid-liquid phase change heat transfer medium[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)

[28] WU W X, WANG S F, WU W, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 262-281.

[29] 张健. 电力电子器件及其装置的散热结构优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHANG J. Study on heat dissipation structure optimization of power electronic device and equipment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[30] 曹涛, 孙大庆, 杨墨, 等. 变电站智能巡检机器人散热系统分析[J]. 机械设计与制造, 2012(9): 161-163.
CAO T, SUN D Q, YANG M, et al. Substation inspection robot based on intelligent analysis of cooling system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(9): 161-163. (in Chinese)

[31] NOH J, LEE J, YANG W, et al. Design of a concentrically stacked modular actuator with forced air cooling for multi-DOF robotic systems[J]. Energies, 2018, 11(11): 2947.

[32] BIRBARAH P, GEBRAEL T, FOULKES T, et al. Water immersion cooling of high power density electronics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118918.

[33] WU R K, HONG T, CHENG Q Y, et al. Thermal modeling and comparative analysis of jet impingement liquid cooling for high power electronics[J].

International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 42-51.

[34] 孙柯. 核救灾机器人电子器件热防护系统研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
SUN K. Research on thermal protection system of electronic device for nuclear disaster relief robot[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

[35] KARNG S W, LEE S W, HWANG K, et al. Performance measurement of liquid-cooled cold plates for humanoid robot cooling[C]// Proceedings of ASME 2007 InterPACK Conference collocated with the ASME/JSME 2007 Thermal Engineering Heat Transfer Summer Conference. Vancouver, British Columbia, Canada: ASME, 2007: 767-772.

[36] 陈坦. 托卡马克腔高温辐射环境下内窥机械臂关键单元部件研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
CHEN T. Research on key components of Tokamak in-vessel inspection manipulator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016. (in Chinese)

[37] CHEN T, ZHANG W J, YUAN J J, et al. Design of cooling system for inspection manipulator and analysis based on experiment[J]. Industrial Robot:An International Journal, 2016, 43(2): 231-240.

[38] YUAN J J, CHEN T, LI F S, et al. Active cooling system for Tokamak in-vessel operation manipulator[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, 98-99: 1696-1700.

[39] 吴诚骁. 托卡马克腔特种环境下内窥机械臂闭环主动冷却系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
WU C X. Research on active close-loop cooling system for ITER inspection robot arm under hazardous environment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)

[40] 吴诚骁, 袁建军, 张伟军. 高温机械臂闭式水冷循环系统设计以及实验[J]. 机电一体化, 2015, 21(4): 57-61.
WU C X, YUAN J J, ZHANG W J. Implementation and experiment of closed-loop water cooling system for robot arm[J]. Mechatronics, 2015, 21(4): 57-61. (in Chinese)

[41] 李法设, 袁建军, 张伟军. 高温检测机械臂的相机水冷罩传热分析和仿真[J]. 机电一体化, 2014, 20(4): 33-36.
LI F S, YUAN J J, ZHANG W J. Thermal analysis and simulation of water-cooled camera cover of high-temperature detecting robot arm[J]. Mechatronics, 2014, 20(4): 33-36. (in Chinese)

[42] 钱炳锋, 吴婷, 张栋, 等. 带冷却系统的焊接机器人结构光视觉传感器[J]. 上海电机学院学报, 2010, 13(3): 144-146.
QIAN B F, WU T, ZHANG D, et al. Structured light vision sensor with cooling system on welding robot[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2010, 13(3): 144-146. (in Chinese)

[43] FANG Y D, YANG W L, XU D, et al. Experimental investigation on flow boiling characteristics of R1233zd(E) in a parallel mini-channel heat sink for the application in battery thermal management[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 178: 121591.

[44] EL-KHOULY M M, EL BOUZ M A, SULTAN G I. Experimental and computational study of using nanofluid for thermal management of electronic chips[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102630.

[45] YADAV V, BAGHEL K, KUMAR R, et al. Numerical investigation of heat transfer in extended surface microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 93: 612-622.

[46] HOCHBERG U, DIETSCHE A, DORER K. Evaporative cooling of actuators for humanoid robots[C]// 8th Workshop on Humanoid Soccer Robots, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Atlanta: IEEE, 2013.

[47] MISHRA A K, PAN W Y, GIANNELIS E P, et al. Making bioinspired 3D-printed autonomic perspiring hydrogel actuators[J]. Nature Protocols, 2021, 16(4): 2068-2087.

[48] LEE D. Development of modularized airtight controller for mobile welding robot working in harsh environments[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(5): 410-417.

[49] 栾伟玲, 韩延龙, 张晓霓, 等. 用于核救灾机器人的电机驱动器安全防护[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 9-15.
LUAN W L, HAN Y L, ZHANG X N, et al. Safety protection of motor driver in nuclear rescue robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 9-15. (in Chinese)

[50] HAN Y L, LUAN W L, JIANG Y F, et al. Protection of electronic devices on nuclear rescue robot: passive

thermal control[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 224-230.

[51] 韩延龙. 基于相变材料的核救灾机器人电子器件热防护研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
HAN Y L. Phase change material based thermal management for electronic devices on nuclear rescue robot[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)

[52] ZHANG W C, QIU J Y, YIN X X, et al. A novel heat pipe assisted separation type battery thermal management system based on phase change material[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 165: 114571.

[53] ZHANG W C, LIANG Z C, YIN X X, et al. Avoiding thermal runaway propagation of lithium-ion battery modules by using hybrid phase change material and liquid cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 184: 116380.

[54] KALBASI R. Introducing a novel heat sink comprising PCM and air - Adapted to electronic device thermal management[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 169: 120914.

[55] HELLER E B, YOUCEF-TOUMI K. Analysis and control of a thermal management system for robots in temperature-restricted environments[C]// 2014 American Control Conference (ACC). Portland, Oregon, USA: IEEE, 2014: 3335-3340.

[56] JORGENSEN S J, HOLLEY J, MATHIS F, et al. Thermal recovery of multi-limbed robots with electric actuators[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2): 1077-1084.

[57] 孙敬颋, 史士财, 陈泓, 等. 空间机械臂电磁制动器温升最优设计及热真空实验[J]. 机器人, 2012, 34(2): 170-175.
SUN J T, SHI S C, CHEN H, et al. Temperature rise optimization design and thermal vacuum experiment on coil of space manipulator electromagnetic brake[J]. Robot, 2012, 34(2): 170-175. (in Chinese)

[58] 欧阳金栋, 刘慧慧, 邓进, 等. 高超声速飞行器结构热防护技术现状综述[J]. 教练机, 2017(1): 39-43.
OUYANG J D, LIU H H, DENG J, et al. Research status of structural thermo protection technology for hypersonic speeding missile[J]. Trainer, 2017(1): 39-43. (in Chinese)

[59] 黄文宣, 邱慧, 刘峰, 等. 深空探测器防热承力一体化大底结构研究[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(6): 19-25.
HUANG W X, QIU H, LIU F, et al. Research on thermal-structural integrated heatshield structure for deep space explorer[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2019, 40(6): 19-25. (in Chinese)

[60] 陈照峰, 张俊雄, 王伟伟, 等. 真空绝热板技术的研究现状及发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 1-16.
CHEN Z F, ZHANG J X, WANG W W, et al. Review of vacuum insulation panel technology and its development[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 1-16. (in Chinese)

[61] 温永刚, 王先荣, 杨建斌, 等. 真空绝热板 (VIP) 技术及其发展[J]. 低温工程, 2008(6): 35-39.
WEN Y G, WANG X R, YANG J B, et al. Vacuum insulation panel technology and its development[J]. Cryogenics, 2008(6): 35-39. (in Chinese)

[62] 侯彬. 航天器热控涂层研究进展[J]. 现代雷达, 2021, 43(1): 86-90.
HOU B. Research progress on thermal control coatings for spacecraft[J]. Modern Radar, 2021, 43(1): 86-90. (in Chinese)

[63] ALHAZA T, ALSADOON A, ALHUSINAN Z, et al. New concept for indoor fire fighting robot[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2015, 195: 2343-2352.

[64] 徐世南, 吴催生. 高超声速飞行器热防护结构研究进展[J]. 飞航导弹, 2019(4): 48-55.
XU S N, WU C S. Research progress on thermal protection structure of hypersonic vehicle[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(4): 48-55. (in Chinese)

[65] 赵帅. 超低温冷库巡检机器人热管理装置的实验研究和数值模拟[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
ZHAO S. Experimental research and numerical simulation of thermal management system of the ultra-low temperature cold storage inspection robot[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020. (in Chinese)

[66] 曹晨宇, 王睿星, 邢晓冬, 等. 含相变材料热防护结构一体化设计与试验[J]. 宇航学报, 2019, 40(3): 352-361.
CAO C Y, WANG R X, XING X D, et al. Design and experimental investigation of integrated thermal protection structure containing phase change material

layer[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(3): 352-361. (in Chinese)

[67] 孟松鹤, 杨强, 霍施宇, 等. 一体化热防护技术现状和发展趋势[J]. 宇航学报, 2013, 34(10): 1295-1302.
MENG S H, YANG Q, HUO S Y, et al. State-of-arts and trend of integrated thermal protection systems[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(10): 1295-1302. (in Chinese)

[68] 李承隆. 电子产品热设计及热仿真技术应用的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
LI C L. Research on the application of thermal design and thermal simulation technology of electronic products[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)

[69] 石进峰. 空间机械臂热控制关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
SHI J F. Research on key techniques of thermal control for space robotic arm[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[70] KANNAN N, SHAH N, AGONAFER D, et al. Design, optimization and thermal analysis of motor-controllers in a quadruped robot[C]// Proceedings of the ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference & Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems. Portland, Oregon, USA: ASME, 2011: 257-262.

[71] MATYSIAK L, PLATEK R. Analytical, numerical, and experimental study of a robot controller with a forced cooling system[J]. Heat Transfer Research, 2019, 50(2): 195-216.

[72] 吕遥, 邓斌. 液压外骨骼机器人油箱结构优化[J]. 机床与液压, 2019, 47(21): 56-59.
LYU Y, DENG B. Structure optimization of hydraulic exoskeleton robot reservoir[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(21): 56-59. (in Chinese)

[73] 吕遥. 液压外骨骼机器人油箱散热性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
LYU Y. Research on heat dissipation performance of oil tank for hydraulic exoskeleton robot[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

[74] 央视频. 超硬核“网红”灭火机器人 经历 1000℃ 高温还能到处跑[EB/OL]. (2019-10-19)[2021-12-06]. https://www.bilibili.com/video/BV18E411k7df?spm_id_from=333.999.0.0.
MOBILE C M G. The super-hard-core "network celebrity" fire-fighting robot can still be operated normally after suffering a high temperature of 1000 ℃[EB/OL]. (2019-10-19)[2021-12-06]. https://www.bilibili.com/video/BV18E411k7df?spm_id_from=333.999.0.0. (in Chinese)

[75] 商博锋. 相变材料导热强化及其在高温测井仪热管理中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
SHANG B F. Thermal enhancement of phase change material and its application in thermal management of high-temperature logging tools[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[76] GUO L, ZHANG X S, HUANG Y, et al. Thermal characterization of a new differential thermal expansion heat switch for space optical remote sensor[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 1242-1249.

[77] 郭亮, 张旭升, 黄勇, 等. 空间热开关在航天器热控制中的应用与发展[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(1): 216-229.
GUO L, ZHANG X S, HUANG Y, et al. Applications and development of space heat switches in spacecraft thermal control[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 216-229. (in Chinese)