

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.045

电动汽车超充桩冷却系统设计

张辉^{1a,1b}, 徐慧^{1a}, 王鹏超^{1a}, 龚玉梅^{1a}, 范振宇²

(1. 台州职业技术学院 a. 汽车学院; b. 汽车关键零部件精益智造研究所, 浙江 台州 318000;

2. 浙江银轮机械股份有限公司, 浙江 台州 317200)

摘要:针对电动汽车超级充电桩运行时快速升温而引起的热安全问题,设计一种高效散热的冷却系统。基于强迫风冷和液冷技术,综合考虑尺寸、质量和散热性能要求,合理布置冷却系统机械机构,提出简单实用的电气控制策略,以充电枪线温升和冷却液温升为控制对象,实现全工况下满足散热需求。基于 CFD 数值模拟,对冷却系统风侧和液侧流场、温度场进行分析,通过性能试验验证仿真模型的有效性。研究结果表明:风侧流场畅通性好,可有效规避热风回流问题;散热器液侧通道流量分布均匀,平均质量偏差 2.44%;冷却系统试验散热量高于设计要求 13.7%。为超充桩冷却系统研究提供有参考价值的工程实践。

关键词:电动汽车;超充桩;冷却系统;风冷;液冷

中图分类号:U469.72 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0236-05

Design of Cooling System for Electric Vehicle Super Charging Pile

Zhang Hui^{1a,1b}, Xu Hui^{1a}, Wang Pengchao^{1a}, Gong Yumei^{1a}, Fan Zhenyu²

(1. Taizhou Vocational and Technical College, a. Auto College; b. Institute of Lean Manufacturing for Key Automotive Components, Taizhou 318000, China; 2. Zhejiang Yinlun Machinery Co., Ltd., Taizhou 317200, China)

Abstract: To address the thermal safety issues caused by rapid temperature rise during the operation of electric vehicle ultra-fast charging piles, a cooling system with efficient heat dissipation is designed. Based on forced air-cooling and liquid-cooling technologies, comprehensively considering the requirements of size, weight, and heat dissipation performance, the mechanical structure of the cooling system is reasonably arranged, and a simple and practical electrical control strategy is proposed. Taking the temperature rise of the charging cable and the coolant as control objects, the heat dissipation requirements are met under all operating conditions. Based on CFD numerical simulation, the air-side and liquid-side flow fields and temperature fields of the cooling system are analyzed, and the validity of the simulation model is verified through performance tests. The results show that the air-side flow field has good smoothness, effectively avoiding the problem of hot air recirculation; the flow distribution in the liquid-side channels of the radiator is uniform, with an average mass deviation of 2.44%; the heat dissipation capacity of the cooling system in the test is 13.7% higher than the design requirement. This provides a valuable engineering practice reference for the research of cooling systems for ultra-fast charging piles.

Keywords: electric vehicle ;super charging pile; cooling system; air cooling; liquid cooling

0 前言

发展新能源汽车产业是实现碳达峰、碳中和“双碳目标”的重要途径之一,而电动汽车是我国新能源汽车市场的主要类型。影响电动汽车发展的两大主要因素为里程焦虑和充电焦虑^[1]。近年来,随着电池技术和电池热管理技术的发展,电动汽车续航里程不断提高,乘用车能够达到 400~600 km,里程焦虑的问题已得到基本解决。而受制于充电桩内部元器件功率、散热效率等问题,快

速充电一直未有成熟的解决方案。续航 400 km 的电动汽车,慢充需要 6~10 h,快充也需要 1~2 h,难以满足车主对充电效率需赶上加油效率的需求,车主充电焦虑依然存在^[2]。

目前,新能源车企对充电端的布局已转向超级充电(简称超充)并加速扩张,如特斯拉、小鹏汽车、蔚来汽车、广汽埃安等均已在全国范围内铺开超充站点。超充采用大功率直流充电,能够实现充电 10~15 min,续航里程达到 400 km 以上,其特点是高电压、大电流,输出功率高达 350 kW。

基金项目:浙江省教育厅科研项目(Y202147319);2023 年度高校国内访问工程师“校企合作项目”(FG2023224)

第一作者简介:张辉(1988—),男,浙江台州人,讲师,工程师,硕士,研究方向为汽车冷却系统设计,597824852@qq.com。

在大功率充电工况下,短时产生大量热量,散热问题将会严重影响超充电桩的运行可靠性和安全性^[3]。超充电桩的热管理系统已成为新能源汽车行业新一轮的技术竞争焦点。本文针对某款电动汽车超充电桩产品冷却系统进行设计,充电电流达到 500~800 A,散热功率 3 kW。根据产品运行工况特点、内部结构特征、散热特性要求,对超充电桩冷却系统结构和参数进行设计,建立仿真模型,对冷却系统在强迫空气对流工况下的风侧、液侧流场和温度场进行数值仿真优化,并进行样机试验验证,从而为超充电桩冷却系统设计提供有参考价值的工程实践。

1 超充电桩冷却系统总体方案设计

超充电桩运行时,充电枪端子和充电枪线会在短时间内产生大量热损耗,加上桩体内部空间限制,对冷却系统设计提出了更高要求。液冷技术是利用低温冷却介质与发热元器件进行直接或间接换热,在循环流动中带走热量,保证元器件维持在合适的工作温度区间。液体的换热效率和比热容远高于气体,相较于传统的风冷,液冷散热效率更高。对于封闭狭窄的桩体内部散热,更适合采用液冷系统。图 1 是采用冷却措施的充电枪端子示意图,图 2 是大功率冷却型直流充电枪线示意图^[4-5]。

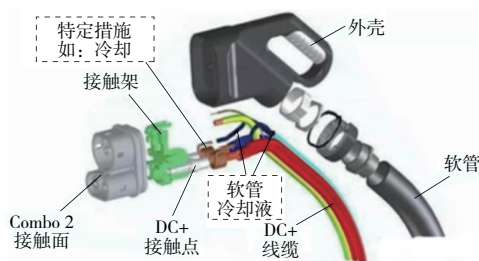


图 1 采用冷却措施的充电枪端子

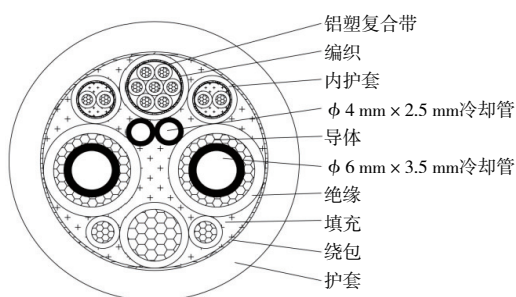


图 2 大功率冷却型直流充电枪线

超充电桩冷却系统的核心要求是在全工况下给

充电枪线提供合适温度和流量的冷却液,以保证在充电过程中,充电枪线相对于环境温度的温升不超过 35℃。冷却系统工作原理如图 3 所示。冷却系统进液管、出液管与充电枪线出液管和进液管连接形成闭合回路,冷却液在水泵驱动下进行散热循环,充电枪线将产生的热量传递给循环的冷却液,冷却液再把热量传递到散热器,然后散热器通过电子风扇吸风实现持续散热。在此过程中,冷却系统通过传感器对进、出液温度实时采集,根据采集的温度实时调整泵和风扇的转速,实现散热功率的实时调整,使得充电枪端子和充电枪线维持在合适的工作温度区间,从而保证超充电桩安全、稳定工作。



图 3 超充电桩冷却系统工作原理图

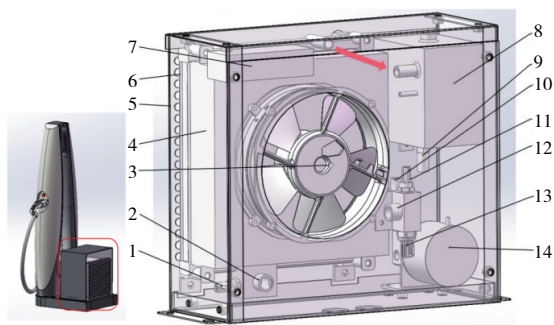
2 超充电桩冷却系统结构与参数设计

超充电桩冷却系统开发的核心工作包括机械结构设计、电气控制设计及参数选择。

2.1 冷却系统机械结构设计

超充电桩桩体空间紧凑,冷却系统轮廓尺寸边界为:435 mm×155 mm×410 mm(长×宽×高),对机械结构设计提出了更高的集成化和小型化要求。冷却系统主要由散热器、风扇、水泵、膨胀壶、温度传感器、压力传感器、泄压阀等部件组成,如图 4 所示。冷却系统散热循环过程为:膨胀壶 8 内的冷却液在水泵 14 驱动下,经出液管口 12 进入充电枪线内部冷却管,从而对充电枪端子和枪线进行冷却,然后经进液管口 2 流入散热器,在冷却风扇 3 的强制气流冷却后,冷却液流回膨胀壶 8。膨胀壶 8 和水泵 14 之间安装了过滤器 9,避免杂质颗粒进入枪线造成堵塞。出液管口 12 上设有温度传感器 11、压力传感器 13 和泄压阀 10,能实时检测冷却液的出液温度和压力,压力过高需通过泄压阀 10 向膨胀壶 8 进行泄压。进液管口 2 上的温度传感器 1 实时检测枪线冷却管内部温度,并输出信号给控制器 7,通过控制器智能调整风扇和水

泵转速,保证枪线温升符合正常运行允许范围。



1—温度传感器(进液端);2—进液管口;3—风扇;4—导风罩;
5—防尘网;6—散热器;7—控制器;8—膨胀壶;9—过滤器;
10—泄压阀;11—温度传感器(出液端);12—出液管口;
13—压力传感器(出液端);14—水泵。

图4 冷却系统机械结构设计图

通风系统的合理布置对于散热效率具有决定性影响。强迫对流风冷的散热能力远高于自然对流风冷,超充电桩采用桩体后侧装备吸风风扇的强迫风冷,在风扇抽风作用下,桩外低温空气经防尘网5后,与散热器进行热交换,热空气进入导风罩4,经风扇直接排出桩外,有效避免热空气回流,以及对桩内其它电子元器件的热影响。

2.2 冷却系统电气控制设计

冷却系统运行时需要实时采集传感器信息、异常故障信息,调节风扇和水泵转速,并与超充电桩端进行通信。冷却系统控制器功能原理如图5所示。需采集散热器进液口温度、出液口温度和压力、膨胀壶液位等信息;把采集到的冷却液当前温度与设定的温度上限值进行比较,使用控制算法得到风扇和水泵的目标转速,进而调节风扇转速和水泵转速;需采集风扇故障、水泵故障、温度传感器故障、压力传感器故障、温度过高、压力过高、压力过低、液位过高、液位过低等异常信息。冷却系统控制器发送工作信息给超充电桩控制器,同时接受超充电桩控制器发送的指令,通信方式为RS485 串行异步半双工,RS232 串行异步全双工,电平控制^[6-7]。

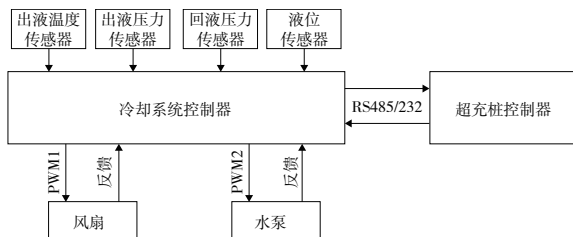


图5 冷却系统控制器原理图

3 超充电桩冷却系统仿真分析

超充电桩冷却系统风侧和液侧流场分布的合理性很大程度上决定了散热效率。采用CFD数值模拟计算对流场均匀性进行分析。流体流动数值模拟分析过程采用的控制方程为不可压缩流动的质量、动量、能量守恒方程^[8]。

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2)$$

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h - k \frac{\partial T}{\partial x_j}) = u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; u 为流体速度; x 为空间坐标; p 为流体的静压; τ 为应力张量; h 为流体的比焓; k 为流体的导热系数; T 为流体的热力学温度;下标 i,j 为坐标轴方向。

3.1 风侧流场分析

风侧流场分析模型如图6所示,综合考虑仿真精度和计算速度,简化三维模型,省略对气流和散热影响不大的部件。超充电桩系统模型采用六面体结构网格,对防尘网、进风口、散热器风道、出风口等关键部位进行局部加密,网格总数为1278万。求解模型采用Realizable $k-\varepsilon$,标准面壁函数(standard wall functions),风量计算为Fan边界^[9]。

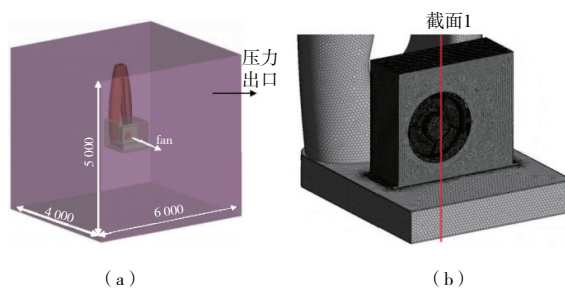


图6 风侧流场分析模型

风扇是冷却系统强迫对流散热的风量来源,最高转速下的风扇特性曲线设置为CFD数值模拟计算的边界条件,风扇特性曲线如图7所示。以超充电桩许用最高环境温度 50°C 作为分析的空气入口温度,计算系统风量和压力损失,确定风扇

最大静压为 162.25 Pa,最大流量为 745.94 m³/h,如图 8 所示。

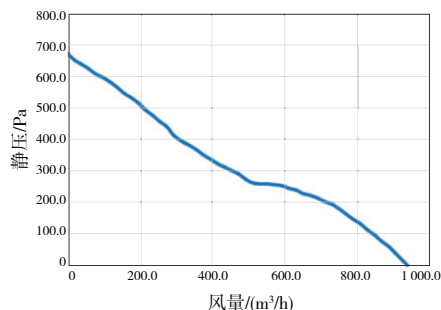


图 7 风扇特性曲线

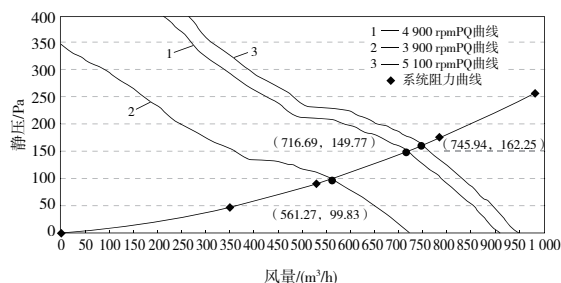


图 8 冷却系统风量和压力校核结果

仿真计算得到超充桩的风侧流场分布和温度场分布,如图 9—图 12 所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。由图 9 和图 10 可知,冷却系统风侧流场分布较为均匀,散热器芯体压力损失和出风口排气损失是系统阻力的主要来源。散热器芯体是热交换场所,芯体阻力越大,散热器散热能力越强,但会降低系统总体风量,两者需要综合考虑;而排气损失大是由于出气口截面收缩,气流速度加快而造成的。图 11 和图 12 展示了风侧流场的畅通性,很好地规避了热风回流问题,保证了系统的散热效率,通风系统风侧最高温度出现在风扇处,为 64.1℃。

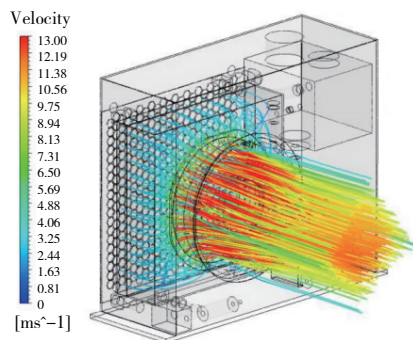


图 9 风侧空气速度云图

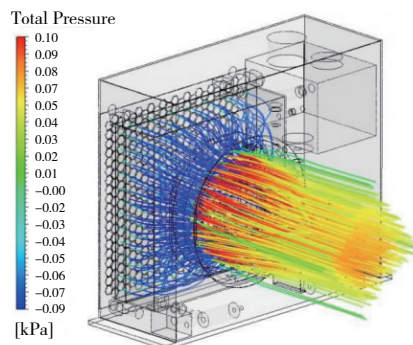


图 10 风侧空气压力云图

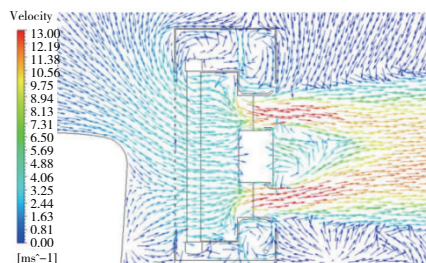


图 11 截面 1 风侧空气速度矢量云图

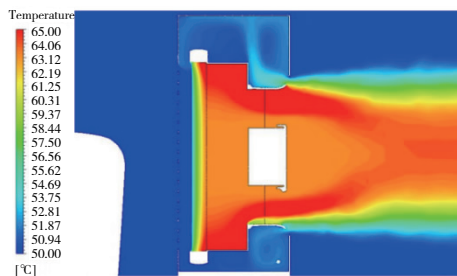


图 12 截面 1 风侧空气温度云图

3.2 液侧流场分析

冷却系统液侧流场分析重点关注液侧阻力和散热器通道流量均匀性。分析模型采用六面体结构网格,对进出管口、管路等关键部位进行局部加密,网格总数为 569 万。求解模型采用 Realizable $k-\varepsilon$, standard wall functions。压降分析时,进液端延长段设置质量流量入口(mass flow inlet);出液端延长段设置压力出口(pressure outlet)。

由图 13 和图 14 可知,冷却系统液侧阻力主要集中在进出液管口,这是由于枪线内部冷却通道管径小,通道截面突变所造成的。冷却液进口温度 70℃ 时的冷却系统液侧阻力仅为 12.5 kPa,远小于超充桩系统 700 kPa 的总阻力要求,占比很小,说明液侧阻力主要集中在充电枪线区域。图 15 表明散热器通道流量分布均匀,最大

偏差为 5.02%, 最小偏差为 -5.08%, 平均偏差值 2.44%, 有利于充分发挥散热器的散热能力。

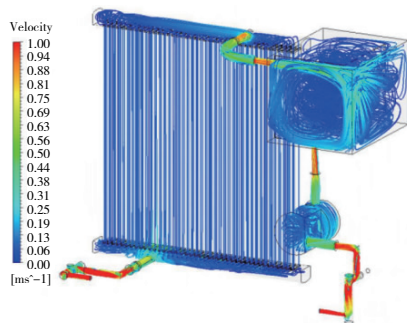


图 13 液侧冷却液速度云图

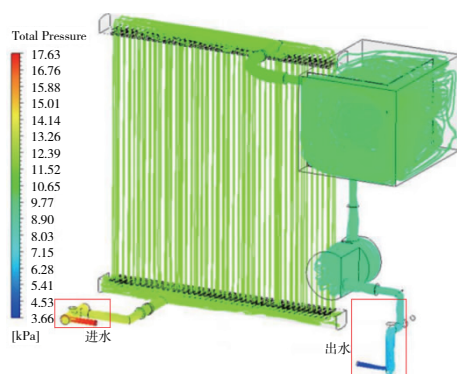


图 14 液侧冷却液压力云图

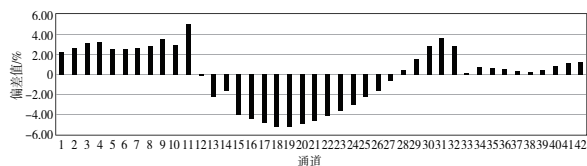


图 15 散热器通道流量分布图

4 超充电桩冷却系统性能试验

为验证冷却系统设计的合理性, CFD 数值模拟分析模型的有效性, 依据主机性能测试要求, 对冷却系统进行性能试验。性能试验装置如图 16 所示。根据冷却液流量和冷却风量设定值分别调节水泵和风扇转速。表 1 为性能测试参数及试验结果, 冷却液流量 3.48 L/min, 冷却风量 707.75 m³/h, 在环境空气温度 36℃ 时, 冷却液进出口温差 15.5℃, 冷却系统测试换热量 3.32 kW。转换为标准设计工况要求, 环境空气温度 50℃, 冷却液进口温度 85℃, 冷却系统散热量达到 3.41 kW, 高于超充电桩散热量 3 kW 的设计要求 13.7%。通过液侧流场分析可知, 冷却系统自身的液侧阻力占超充电桩系统总阻力仅约为 2%, 其变动量对系统总

阻力影响很小。

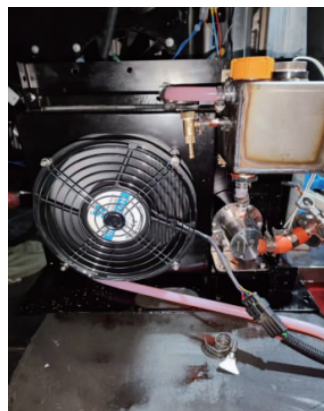


图 16 冷却系统性能试验装置

表 1 冷却系统性能测试参数及试验结果

参数	数值
环境空气温度/℃	36
冷却液	50% 乙二醇/50% 水
冷却液流量/(L/min)	3.48
冷却风量/(m ³ /h)	707.75
冷却液进口温度/℃	69.90
冷却液出口温度/℃	54.40
测试换热量/kW	3.32

5 结语

针对超充电桩端子和充电枪线短时间快速升温的热安全问题, 通过理论设计、仿真分析和试验验证相结合的研究方式, 设计了一种快速散热的冷却系统:

1) 基于强迫风冷、液冷技术的冷却系统工作原理, 配合电气控制, 实现在全工况下给充电枪线提供合适温度和流量的冷却液, 以保证在充电过程中, 枪线相对于环境温度的温升不超过 35℃。

2) 基于 CFD 流体动力学数值模拟分析, 研究冷却系统风侧和液侧流场、温度场分布, 风侧流场的畅通性和液侧流场的均匀性, 验证了冷却系统设计的合理性。

3) 性能试验结果表明冷却系统实际散热量高于设计要求 13.7%, 验证了冷却系统工作原理的高效性, 和 CFD 数值模拟模型的有效性, 可以有效指导超充电桩冷却系统设计。

参考文献:

- [1] 柯俊. 大功率充电连接器冷却系统换热特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.

(下转第 246 页)

电压下,驱动器的最大 $\varepsilon_{\max}$ 达到了 11.30%。在 150 g 负载、10 kV 电压下,驱动器的最大 $S_{p,\max}$ 达到 12.5 W/kg。对 0.9 ml 液体含量的驱动器做峰值牵引力和峰值机械功测试分析表明,在 200 g 负载、10 kV 电压的条件下,驱动器的 $W_{\text{cum},\max}$ 最大达到 3.85 mJ。对仿关节力臂进行驱动实验表明,在空载、驱动电压为 10 kV 的条件下,关节在力臂 H 为 69 mm 处可达到的实际最大峰值角度为 2.06° 。在未来的研究中,通过给驱动器串联变速机构、将多个驱动器并联等方法可以在一定程度上提高动杆的实际最大峰值转动角度,进一步推进电液混合驱动器应用。

参考文献:

- [1] Connolly F, Walsh C J, Bertoldi K. Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(1): 51-56.
- [2] Haines C S, Lima M D, Li N, et al. Artificial muscles from fishing line and sewing thread [J]. Science, 2014, 343(6173): 868-872.
- [3] Asaka K, Okuzaki H. Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives [M]. Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [4] Chen Z, Shatara S, Tan X B. Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer-metal composite caudal fin [J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(3): 448-459.
- [5] Jo C, Pugal D, Oh I K, et al. Recent advances in ionic polymer-metal composite actuators and their modeling and applications [J]. Progress in Polymer Science, 2013, 38(7): 1037-1066.
- [6] Chu W S, Lee K T, Song S H, et al. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(7): 1281-1292.
- [7] Sun D C, Tong L Y. Modeling and analysis of curved beams with debonded piezoelectric sensor/actuator patches [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(8): 1755-1777.
- [8] Acome E, Mitchell S K, Morrissey T G, et al. Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance [J]. Science, 2018, 359(6371): 61-65.
- [9] Rothmund P, Kirkman S, Keplinger C. Dynamics of electrohydraulic soft actuators [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(28): 16207-16213.
- [10] Mitchell S K, Wang X R, Acome E, et al. An easy-to-implement toolkit to create versatile and high-performance HASEL actuators for untethered soft robots [J]. Advanced Science, 2019, 6(14): 1900178.
- [11] Yoder Z, Kellaris N, Chase-Markopoulou C, et al. Design of a high-speed prosthetic finger driven by peano-HASEL actuators [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2020, 7: 586216.
- [12] Washington A, Su J, Kim K J. Actuation behavior of hydraulically amplified self-healing electrostatic (HASEL) actuator via dimensional analysis [J]. Actuators, 2023, 12(5): 208.
- [13] Hu Q L, Jiang C J, Xie Y, et al. Rigid electrodes enhance the strain and force output of Peano-HASEL actuators [J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(25): 254103.

收稿日期: 2024-03-25

(上接第 240 页)

- [2] 郭江平, 陶兴安, 樊鹏飞. 电动汽车直流充电桩散热系统优化分析 [J]. 中国机械, 2022(27): 98-100.
- [3] 王军, 谷腾飞, 于庆瑞, 等. 电动汽车充电桩电源模块热仿真分析 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47(11): 1-5.
- [4] 陈帅雨, 取立群, 柯志欣, 等. 液冷充电系统及液冷电缆的研究设计 [J]. 电线电缆, 2024, 67(3): 18-21.
- [5] 任金玲, 崔久德, 赵凯斌, 等. 一种大功率冷却型直流充电桩电缆的研制 [J]. 电线电缆, 2020, 63(3): 18-20, 24.
- [6] 陈熙, 陈慧敏, 程林, 等. 大电流液固冷却充电模块系

统设计 [J]. 中国粉体技术, 2022, 28(6): 78-90.

- [7] 李雪利. 新能源汽车充电桩热管理系统控制器研发 [D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- [8] 侯春光, 许玉婷, 韩颖, 等. 基于正交试验法的功率模块优化对直流充电桩散热影响研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2019(8): 32-37, 77.
- [9] 李沛聪, 葛宁. 级环境下转/静干涉对涡轮转子叶片前缘气膜冷却的影响 [J]. 机械制造与自动化, 2026, 55(1): 265-270.

收稿日期: 2024-10-30