

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.052

户外电动汽车直流充电机散热设计

杜戴宁^{1,2}, 林元华^{1,2}, 严代智^{1,2}

(1. 南瑞集团有限公司 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 阐述一款大功率风冷直流充电机的散热设计方法。针对直流充电机户外应用场景, 开展太阳辐射对整机温升影响的研究; 基于晴天太阳辐射模型, 分析户外设备太阳辐射时内部温升算法; 借助仿真软件, 对太阳辐射时充电机的内部温升进行模拟; 设计模拟地面太阳辐射环境试验, 完成整机测试。从理论算法、仿真模拟及试验测试三个维度, 验证本产品散热设计方法的可靠性。

关键词: 直流充电机; 太阳辐射; 热设计; 温升计算

中图分类号: TM910.6 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)04-0289-05

Heat Dissipation Design of DC Charger for Outdoor Electric Vehicle

DU Daining^{1,2}, LIN Yuanhua^{1,2}, YAN Daizhi^{1,2}

(1. State Grid Electric Power Reserch Institute, NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper introduces the heat dissipation design method of a high power air-cooled DC charger. According to the outdoor application scenarios of products, the influence of solar radiation on the temperature rise of the whole machine is studied. Based on the sunny solar radiation model, the internal temperature rise algorithm of outdoor equipment under solar radiation is analyzed, and the internal temperature rise of charger under solar radiation is simulated with the aid of simulation software. Ground solar radiation environment test is designed and simulated, and complete machine testing is completed. The reliability of the proposed method is verified through theoretical algorithm, simulation and experimental test.

Keywords: DC charger; solar radiation; thermal design; temperature rise calculation

0 引言

在“碳达峰、碳中和”大背景下^[1-2], 近年来电动汽车及其配套充电设备得到大力发展^[3-5], 而充电桩的散热问题则是充电桩进一步发展的关键^[6]。根据可靠的统计数据可知, 导致产品故障的原因主要有三个方面, 其中最主要的就是电子器件所处的环境湿度以及内部的温升状况, 其余两个分别是结构设计及材料选用的合理性。根据电子产品故障分析数据显示, 有 55% 的失效是设备的温度高于其极限温度导致的, 在电子元器件产品的热设计中, 温度每提高 2℃, 失效率提升 10%^[7]。

目前常用的制冷模式有 4 种: 自然散热、强制散热、空调制冷、液冷。综合考虑其可靠性和成本

等因素而采用强迫冷却的散热方式较多^[8]。本文研究对象是一款 60 kW 风冷式直流充电机。通过理论计算、数值模拟以及试验测试, 验证了 60 kW 直流一体式充电机的热可靠性^[9]。总结了一套设计方法, 为产品的可靠性设计及改进提供了依据, 缩短了产品的研发周期, 具有一定的实际工程应用价值。

1 散热设计与太阳辐射计算

60 kW 直流一体式充电机主要发热器件是 4 个 15 kW 的功率模块, 效率为 95%, 单个模块满功率运行产生 750 W 热损耗, 整机热损耗按照 3 000 W 估算。充电模块集中安装在设备的中间部位, 两两排列, 上下放置。风道及装配示意如图 1 所示。

基金项目: 国网电力科学研究院有限公司科技项目(524609240021)

第一作者简介: 杜戴宁(1993—), 男, 江苏南京人, 工程师, 硕士, 研究方向为电力电子设备结构及热设计, 2415367821@qq.com。

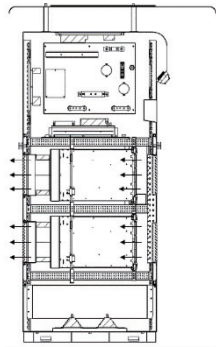


图1 风道及装配示意图

1.1 散热方式的选择

根据冷却方式的选择原则可知,通常当热流密度在 $0.08 \sim 0.32 \text{ W/cm}^2$ 之间时采用强迫风冷,经计算热流密度为 0.28 W/cm^2 。因此对于该款充电机采用风冷散热^[10]。

1.2 风机选型设计

根据系统热耗和温升要求进行风机的选型,通过以下公式进行风机风量计算。

$$q_v = \frac{3600Q}{\rho C_p \Delta t} \quad (1)$$

式中: q_v 为风机冷却风量, m^3/h ; Q 为系统内部散热量, W ; ρ 为空气定性温度下的密度, kg/m^3 ; C_p 为空气定性温度下的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; Δt 为系统设计温升, $^\circ\text{C}$,一般在 $5^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ 之间。

风量按照 1.5~3 倍的余量计算,系统需要的风量为 $1280 \text{ m}^3/\text{h}$,单个风机无法提供这么大风量,选取单个最大风量 $920 \text{ m}^3/\text{h}$ 、最大静压 180 Pa 的 EBM 轴流风机,采用双风机并联的方式提升系统风量。

1.3 晴天太阳辐射模型

在进行户外设备设计时要同时考虑性能、防护等级以及热设计的需求。户外设备在晴天条件下正常运行时除了要将内部功率元件产生的热量以对流、导热以及辐射的形式向外排出外,内环境还会受到太阳辐射的影响,产品内部温度因此升高,所以需要考虑阻隔太阳辐射的问题。太阳辐射主要以太阳直射辐射、地面反射辐射、地面长波辐射以及大气长波辐射为主,其中太阳直射辐射占总太阳辐射的 95%。为了对户外设备正常工作时内部温升的情况进行估计,引入了太阳能领域的晴天太阳辐射模型,对内部温升进行估算^[11-12]。

1) 地理方位角的计算

a) 太阳赤纬角 δ ,其定义为赤道所处的平面

同太阳和地心之间连线的夹角。

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360(284+n)}{365} \right] \quad (2)$$

式中 n 为积日,以 1 月 31 号为例,其积日为 31,表示日期在年内的顺序号。

b) 太阳时角 ω ,单位时间地球自转的角度定义为时角 ω ,规定正午时角为 0,上午时角为负值,下午时角为正值,地球自转一周 360° ,对应的时间为 24 h,即每小时相应的时角为 15° 。

c) 太阳高度角 α ,指某地太阳光线与通过该地与地心相连的地表切面的夹角。太阳辐射强度和太阳高度角有直接关系,当夹角为 0° 时太阳辐射强度最小,角度为 90° 时强度最大。

$$\sin \alpha = \sin \delta \sin \gamma + \cos \delta \cos \gamma \cos \omega \quad (3)$$

式中 γ 为所处地区的纬度。

d) 太阳方位角 ψ ,其用于定位太阳方位的角度即太阳方位角,专业定义为太阳光线在地表的投影与当地的子午线直接的夹角。

$$\sin \psi = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\cos \alpha} \quad (4)$$

2) 晴天太阳辐射模型的建立

a) 大气层外的太阳辐射强度:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (5)$$

式中 G_{sc} 为太阳常数, $1367 \text{ W}/\text{m}^2$;

b) 大气层外切平面上瞬时太阳辐射强度:

$$G_o = G_{on} \cos \alpha \quad (6)$$

c) 晴天太阳直射透过比:

$$\tau_b = \frac{G_{cb}}{G_o} = a_0 + a_1 \exp \left(-\frac{k}{\cos \alpha} \right) \quad (7)$$

式中: G_{cb} 为地面太阳辐照度; $a_0 = r_0 a_0^*$; $a_1 = r_1 a_1^*$; $k = r_k k^*$, r_0 、 r_1 、 r_k 为修正因子,根据气候类型由表 1 确定。

表1 修正因子

气候类型	r_0	r_1	r_k
热带	0.95	0.98	1.02
中纬度夏季	0.97	0.99	1.02
寒带夏季	0.99	0.99	1.01
中纬度冬季	1.03	1.01	1.00

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(5 - h_0)^2 \quad (8)$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - h_0)^2 \quad (9)$$

$$k^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - h_0)^2 \quad (10)$$

式中 h_0 为海拔高度, km 。

根据以上公式可以计算出 $G_{cb}=\tau_b G_0$,将实际太阳辐射转换成数学模型,建立空间直角坐标系,把地面太阳辐射分解成 x 、 y 、 z 3个方向上的分量。

$$G_{cb}=G_x+G_y+G_z \quad (11)$$

式中 G_x 、 G_y 、 G_z 分别为东方、南方和上方的分量值。

最后根据 $P=G_xhd+G_yhl+G_zld$ 计算户外设备受到的太阳辐射的总辐射量 $^{[13-15]}$,其中 h 为户外设备的高度; l 为户外设备的长度; d 为户外设备的宽度。从上式可知,总辐射量 P 与 n 、 ω 以及 γ 3个变量有关。

以南京为例,将南京的地理位置代入(北纬 32° ,海拔 20 m),夏季中午 12 点,设备尺寸按照 $740\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 1\,700\text{ mm}$ 估算,得到 $\delta=18.17^\circ$, $\omega=0.55\text{ rad}$, $\alpha=58.9^\circ$, $\psi=67^\circ$, $G_{on}=1\,327.58\text{ W/m}^2$, $G_0=685.7\text{ W/m}^2$, $\tau_b=0.69$, $G_{cb}=476.3\text{ W/m}^2$, $G_x=96.12\text{ W/m}^2$, $G_y=226.4\text{ W/m}^2$, $G_z=407.8\text{ W/m}^2$ 。最终得到设备受到太阳辐射的总辐射量 $P=470.8\text{ W}$ 。

1.4 内部温升计算

1) 辐射传热系数 α_{rad} 的计算

$$\alpha_{rad}=5.67\frac{\left(\frac{T_w}{100}\right)^4-\left(\frac{T_a}{100}\right)^4}{T_w-T_a} \quad (12)$$

式中: T_w 为机壳外壁的绝对温度,根据仿真值取 355 K ; T_a 为环境空气的绝对温度,此处取 323 K ; 计算得 $\alpha_{rad}=8.86\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。

2) 对流换热系数的选取如表2所示。

表2 对流换热系数表

风速/(m/s)	$\alpha_{ka}/(\text{W/m}^2\cdot\text{K})$
0.3	3.3
0.5	4.5
1.0	7.0
3.0	15.0
5.0	25.0
10.0	38.0
20.0	66.0

3) 风机带走热量的计算:

$$Q_{fan}=\frac{q_v\times\rho\times C_p\times\Delta T\times 0.65}{3\,600} \quad (13)$$

式中: q_v 为风机的体积流量, m^3/h ; ρ 为 50°C 时干空气的密度, 1.093 kg/m^3 ; C_p 为 50°C 时干空气的比热容, $1.005\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$; ΔT 取 12°C ; 因此

$$Q_{fan}=2\,618\text{ W}。$$

4) 机柜综合换热系数的计算:

$$k=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ka}}+\frac{1}{\alpha_{ki}}+\frac{s}{\lambda}} \quad (14)$$

式中: λ 为机柜的导热系数,304不锈钢导热系数为 $16\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$; s 为机壳厚度, 0.002 m ; 带入计算柜体综合换热系数 $k=3.5\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。

5) 有效换热面积 F 的计算(即除底面外的其余5个面表面积):

$$F=2HW+2HD+WD \quad (15)$$

式中: H 为机柜的高度, 1.7 m ; W 为机柜的宽度, 0.74 m ; D 为机柜的深度, 0.4 m ; 因此 $F=4.172\text{ m}^2$ 。

6) 机柜内部渗出的热量 Q_{out} 计算:

$$Q_{out}=KF(T_a-T_i) \quad (16)$$

式中: T_i 为机柜内部平均温度,取 12°C ; 计算得到 $Q_{out}=175.2\text{ W}$ 。

7) 机柜内部剩余热量计算:

$$Q_L=Q_T-Q_{fan}-Q_{out} \quad (17)$$

式中: Q_L 为机柜内部剩余热量, W ; Q_T 为4个电源模块总共热损耗, $3\,000\text{ W}$; Q_{out} 为机柜内部渗出的热量,因此,机柜内部剩余热量计算结果为 $Q_L=3\,000-2\,618-175.2=206.8\text{ W}$ 。

8) 单层壁机壳的内部温度估算:

$$t_i=\frac{\overline{A_E}(G_xhd+G_yhl+G_zld+\dot{q}_iF)}{F(\alpha_{ka}+\alpha_{rad})}+\frac{\dot{q}_i}{\alpha_{ki}}+t_a \quad (18)$$

式中: $\overline{A_E}$ 为机壳的吸收系数,取 0.55 ; $\dot{q}_iF$ 为内部热损耗(Q_L), W ; F 为机壳参与换热的有效面积, m^2 ; α_{ka} 为机壳外部对流换热系数, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$,如表2所示; α_{ki} 为机壳内部对流换热系数, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$; α_{rad} 为辐射传热系数, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$; t_a 环境温度,设置为 50°C 。

针对 60 kW 直流一体式充电机单层结构特征,对其进行太阳辐射情况下的理论温升估算。将太阳辐射的总辐射量 470.8 W 代入式(18),结合设备尺寸,计算得 $t_i=62.7^\circ\text{C}$,即设备内部的平均温升 $\Delta t=12.7^\circ\text{C}$ 。

1.5 整机热仿真分析

对现有的直流充电机结构模型进行简化,借助热仿真软件,对整机进行高温 50°C 、风机全速状态下的仿真,获取系统内部的温度场和速度场分布,关注系统内部的环境温升。由于该直流充电机有户外应用场景,因此,加入了太阳辐射仿真,模拟设备处于北半球夏季时内部的温升情况。

首先进行高温 50℃ 下不考虑太阳辐射的仿真。热量集中在充电模块中,因此充电模块内部温度较高,充电机内部平均温升在 7℃ 上下。风道内部流场较为均匀,平均流速在 1.5 m/s 上下,速度较大的地方主要集中在充电模块进风口以及左侧门风机的进出口处。

在此基础上,开启太阳辐射模型,设定设备所处的地理位置为北纬 32°,时间为 8 月中旬中午 12 点,太阳辐照强度 1 120 W/m²,充电机前门朝南,同时对材料的发射率和吸收系数进行设置,不锈钢表面喷涂后反射率 0.6,表面处理后的金属结构件吸收率为 0.55。

没有太阳辐射作用时充电机内部平均温升为 7℃,加入太阳辐射后,内部平均温升为 12.5℃。可知,加入太阳辐射对设备内部温升的影响为 5.5℃。有无太阳辐射对整机内部速度场的影响不大。因此,太阳辐射对整机内部温度的影响较大,是户外设备进行热设计时必须考虑的因素。

2 试验

按照 GB/T 2423.24—2013 中的程序 A,24h 一周期,其中模拟辐射 8h,黑暗 16h,按标准重复,进行一个周期的试验,总辐照量为 8.96 kW·h/m²。将充电机置于模拟太阳辐射光谱源的试验环境中,试验期间充电机始终上电,当试验开始 2h 后,开启负载,模拟充电机满功率充电状态,此时开启辐射;试验进行 10h 后,关闭负载,同时辐射关闭。试验中设定的照射期间温度上限为 (50±2)℃,在照射开始前 2h 对试验箱升温,在黑暗期,试验箱内的温变速率不能过快,温度下限 25℃^[16]。试验中,采用 TP1000 测温电阻通过数据采集器监控内部温升^[17]。

测试原理如图 2 所示。试验过程中实时记录的辐照强度值、输出电压以及输出电流数据如图 3 所示。测试环境如图 4 所示。

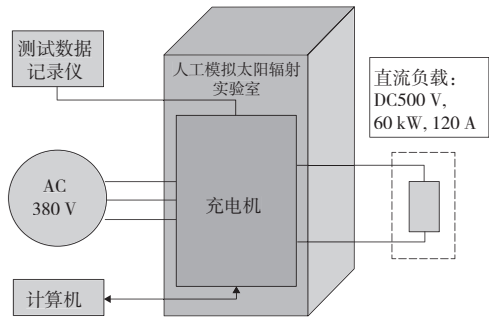


图 2 测试环境原理示意图

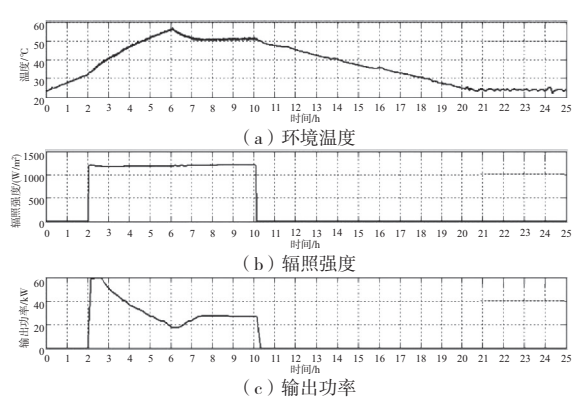


图 3 测试环境及充电机运行状态曲线

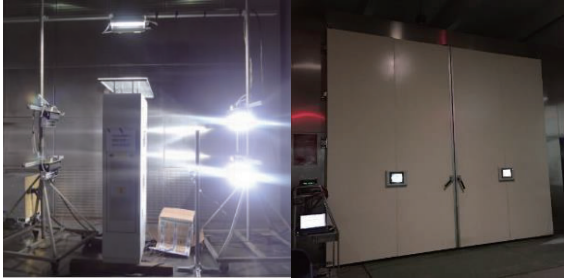


图 4 测试现场

表 3 是在进行人工模拟太阳辐射 (50℃, 1 120 W/m²) 试验过程中关键测点的温升数据。从表 3 中可知,关键件熔断器温度合理,从测点 5 可知,充电模块进风口温升合理,风道设计通畅,无明显回流。

表 3 内部温升测试数据		单位:℃
测点	测温对象	温升
1	控制盖板前部上方 20 mm	13.00
2	电气控制板几何中心上方 50 mm	12.75
3	熔断器表面温度	27.5
4	直流接触器正极表面	17.00
5	充电模块进风罩几何中心	3.00
6	环境温度	-

重点关注充电机内部环境温升,测点 1 作为内部环境温度测点,可知设备满功率运行有太阳辐射时内部环境的温升为 13℃,满足 15℃ 的温升极限要求。

根据人工模拟太阳辐射的实测数据,结合温升理论计算结果,及热仿真评估数据,可知 3 种方式的数据相对误差在 5% 以内,一致性较高,验证了本散热设计方法的可靠性。误差对比如表 4 所示。

表4 误差对比

项目	温升/℃	误差/%
热仿真	12.5	3.8
理论计算	12.7	2.3
实际测试	13.0	—

3 结语

本文介绍了一款大功率风冷直流充电机的散热设计方法。基于晴天太阳辐射模型,建立了一套户外产品内部温升的理论计算方法,通过数值模拟及试验测试手段,验证了本方法的正确性。为同类型产品提供了设计参考,同时验证了本产品的可靠性。

通过人工模拟太阳辐射试验,在 GB/T 2423.24—2013 标准测试环境下,内部环境温升 13℃,其中太阳辐射对内部环境温升影响为 5.5℃ 左右。同时,掌握了充电模块在特定太阳辐射强度影响下满功率运行的可行性及连续工作的时间特性。

参考文献:

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8): 2806-2819.
- [2] 汪春艳. “双碳”目标下新型能源电力系统的关键技术和发展前景[J]. 通讯世界,2024,31(9):91-93.
- [3] 刘虎,张建洲. 电动汽车充电桩技术的发展策略分析[J]. 集成电路应用,2023,40(4):368-369.
- [4] 徐达成,谢鑫,朱涵,等. 各国电动汽车交流充电桩应用标准解读及技术发展趋势[J]. 汽车与新动力,2023,6(2):5-10.

- [5] 杨雪蛟. 电动汽车交流充电桩的充电安全分析研究[J]. 环境技术,2023,41(1):77-82.
- [6] 陈伟明,胡铭杨. 电动汽车直流充电桩散热系统的设计[J]. 自动化应用,2024(15):165-167,170.
- [7] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M].3 版. 北京:高等教育出版社,1998.
- [8] 赵俊杰,杨相玉,赵媛. 电动汽车直流充电桩散热系统设计[J]. 汽车知识,2022(4):71-73.
- [9] 徐维新,电子设备可靠性热设计指南[M]. 北京:电子工业出版社,1995.
- [10] 余建祖. 电子设备热设计及分析技术[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [11] 马志宏,李金国,张景飞. 电子设备太阳辐射模拟试验分析与探讨[J]. 环境技术,2007,25(6): 11-13,17.
- [12] 陈彦,李晓峰,刘剑,等. 太阳辐射对户外密闭箱体热影响的试验研究[J]. 环境技术,2023,41(5): 44-49,58.
- [13] DUFFIE J A, BECKMAN W A, WOREK W M. Solar engineering of thermal processes[J]. Journal of Solar Energy Engineering,1994,116(1):67-68.
- [14] 俞春林,童星星. 基于晴天太阳辐射模型的电力户外机柜热估算与仿真[J]. 华电技术,2015,37(9): 72-74,76,80.
- [15] 张素宁,田胜元. 太阳辐射逐时模型的建立[J]. 太阳能学报,1997,18(3):38-42.
- [16] 秦杰,张清点,孔玉梅,等. GJB 150.7A—2009 太阳辐射试验方法研究与分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2024,42(5):127-134.
- [17] 卢改林,高红斌,马小霞. 热工基础及流体力学[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,2018.

收稿日期:2024-07-10

(上接第 272 页)

- [9] 王忻,吉祥雨,韩博衍,等. 城市轨道交通低碳节能技术下牵引供电系统仿真分析[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(10):79-84.
- [10] 陈志,赵文娟,杨湘彦,等. 考虑列车整车接地的牵引电机轴电压和轴电流分析与抑制措施[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(8):12-20.
- [11] 钟麦英,王钦,彭涛,等. 高速列车牵引传动系统运行状态监测技术综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(2):88-97.
- [12] 罗川川,马兴,刘锦洋,等. 计及列车节能运行影响的

城轨储能系统最优化容量配置[J]. 电工电能新技术,2024,43(9):11-22.

- [13] 贺虎成,汪沁,张晨阳,等. 采煤机牵引系统双电机功率平衡控制策略[J]. 控制理论与应用,2023,40(1):121-131.
- [14] 孙振耀,马光同,徐帅,等. 轨道车辆永磁牵引电动机控制技术综述[J]. 铁道学报,2023,45(6):26-40.
- [15] 刘钦生,陈雅岚,万欣,等. 基于列车运行多模型的能耗仿真计算[J]. 都市快轨交通,2024,37(2):47-53.

收稿日期:2024-11-11