

doi: 10.7690/bgzd.2025.11.017

分布式气溶胶碘取样仪整机设计与性能提升

夏永震, 郑 皓, 张 伟, 王 欣
(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 为解决传统取样设备在实际应用中面临诸多局限问题, 以分布式气溶胶碘取样仪 AS-1001X+为研究对象, 设计一种兼具高效采样、低功耗、强环境适应性与高便携性的设备。以气体动力学、颗粒捕集理论及模块化设计思想为核心支撑, 梳理气溶胶采样与碘吸附的底层机制—气溶胶颗粒通过惯性碰撞、布朗扩散等物理过程被滤纸捕获, 而碘蒸气则依托物理吸附与化学吸附的复合作用被碘盒截留。采用模块化设计理念将设备划分为采样、动力、控制等独立模块, 通过模块间的低耦合接口设计提升系统灵活性, 并构建以能量效率优化为目标的低功耗架构。性能数据与优化结果表明: 该设备的运行时长、采样效率、环境适应性与便携性均显著优于同类设备。

关键词: 分布式气溶胶碘取样仪; 模块化设计; 低功耗; 采样效率; 环境适应性; 便携性

中图分类号: TP23 **文献标志码:** A

Design and Performance Improvement of Distributed Aerosol Iodine Sampler

Xia Yongzhen, Zheng Hao, Zhang Wei, Wang Xin
(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: In order to solve the limitations of traditional sampling equipment in practical application, the distributed aerosol iodine sampler AS-1001X + is taken as the research object to design a device with high efficiency sampling, low power consumption, strong environmental adaptability and high portability. Based on gas dynamics, particle trapping theory and modular design idea, the underlying mechanism of aerosol sampling and iodine adsorption was combed, that is, aerosol particles were captured by filter paper through inertial collision, Brownian diffusion and other physical processes, while iodine vapor was retained by iodine box relying on the combination of physical adsorption and chemical adsorption. The modular design concept is used to divide the equipment into independent modules such as sampling, power and control, and the low coupling interface design between modules is used to improve the flexibility of the system, and a low power architecture is constructed with the goal of energy efficiency optimization. The performance data and optimization results show that the running time, sampling efficiency, environmental adaptability and portability of the device are significantly better than those of similar devices.

Keywords: distributed aerosol iodine sampler; modular design; low power consumption; sampling efficiency; environmental adaptability; portability

0 引言

在核设施固定监测、应急救援等场景中, 传统气溶胶碘取样设备长期存在体积庞大、空间适应性差的问题, 难以在狭窄环境或野外快速部署; 同时, 高功耗特性导致其在无市电供应的应急场景中续航能力不足, 采样组件切换复杂则严重影响现场操作效率, 极端环境下的稳定性也无法满足实际需求。

为解决上述问题, 笔者以分布式气溶胶碘取样仪 AS-1001X+为研究对象, 基于气体动力学、颗粒捕集理论及模块化设计思想, 构建低功耗系统架构, 开展整机设计与性能优化研究。通过明确气溶胶采样与碘吸附的核心机制, 划分功能模块并优化硬件选型, 结合紧凑型结构与轻量化材料设计, 提升设备的采样效率、环境适应性与便携性^[1]。

1 理论基础与设计原则

1.1 气溶胶采样原理与碘吸附机制

气溶胶 (Aerosol) 是指悬浮在气体介质中的固态或液态颗粒所组成的气态分散系统。这些固态或液态颗粒的密度与气体介质的密度可以相差微小, 也可以悬殊很大^[2]。气溶胶颗粒大小通常在 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$, 但因为来源和形成原因范围很大, 如: 花粉等植物气溶胶的粒径在 $5 \sim 100 \mu\text{m}$ 、木材及烟草燃烧产生的气溶胶, 其粒径通常为 $0.01 \sim 1\ 000 \mu\text{m}$ 。

气溶胶采样包含惯性碰撞、布朗扩散等多种复杂物理过程。在惯性碰撞过程中, 较大粒径的粒子在高速气流作用下, 由于自身惯性, 会偏离气流流线, 直接撞击到采样器的收集表面从而被捕获。例如, 在工业废气采样中, 那些粒径较大的粉尘颗粒

收稿日期: 2024-10-10; 修回日期: 2024-11-22

第一作者: 夏永震 (1991—), 男, 甘肃人。

就主要通过惯性碰撞被采集下来。

布朗扩散则是对于微小粒子而言,由于气体分子的热运动,粒子会不断受到气体分子的随机撞击,从而做无规则的布朗运动,在这个过程中,粒子有机会扩散到采样表面并被吸附。像是大气中粒径极小的纳米级颗粒,就主要通过布朗扩散实现采样。

在碘吸附机制方面,物理吸附依靠分子间的范德华力,吸附过程相对较弱且可逆。当碘分子靠近吸附剂表面时,会因范德华力被吸附在表面。化学吸附则涉及化学键的形成,吸附过程更为稳定且不可逆。例如,某些吸附剂表面的活性位点会与碘分子发生化学反应,形成化学键,从而将碘牢牢吸附住^[3]。不同的吸附剂对碘的吸附能力和吸附方式有所不同,比如活性炭对碘主要是物理吸附,而一些金属氧化物对碘可能既有物理吸附又有化学吸附。

1.2 模块化设计理论与功能划分原则

模块化设计理论以功能独立性与接口标准化为核心,通过将复杂系统分解为可独立设计、制造、维护的模块,提升系统的灵活性与可扩展性。AS-1001X+的模块化设计遵循功能内聚、接口松耦合原则,将整机划分为采样模块、动力模块、控制模块、显示模块等独立单元。采样模块包含可拆卸的 $\phi 50\text{ mm}/\phi 100\text{ mm}$ 开放式与管道式取样头,通过快速接头实现不同场景下的取样模式切换,而动力模块采用内置无刷真空系统,与采样模块通过标准管路接口连接,模块间的低耦合性。

接口松耦合强调模块之间通过简洁、标准化的接口进行交互,降低模块间的相互依赖程度。例如在计算机硬件系统中,显卡与主板通过标准的PCI-E接口连接,无论显卡如何升级换代,只要接口标准不变,就能与主板正常通信,提高了系统的可扩展性和兼容性。

在模块划分的优化算法上,常见的方法是根据系统功能和数据流向进行划分。先对系统的整体功能进行拆解,分析每个功能所涉及的数据输入输出关系,将紧密相关的功能和数据归为一个模块。

功能划分原则基于设备全生命周期管理需求,将整机功能分解为核心功能与辅助功能。核心功能模块包括取样头组件、流量计量系统、动力系统,其中取样头组件负责气溶胶与碘的捕集,流量计量系统采样体积的准确性,动力系统提供稳定气流动力。辅助功能模块包括供电模块、数据存储模块、通信模块,供电模块支持220 VAC mains与便携式

移动电源切换,数据存储模块实现每2 min自动保存采样数据,通信模块通过RS-232/RS-485接口实现远程数据传输^[4]。

1.3 低功耗系统架构设计方法

低功耗系统架构设计以能量效率优化为核心,通过硬件选型、功耗管理策略与系统集成实现设备在不同工况下的能耗控制^[5]。AS-1001X+的低功耗设计首先体现在硬件层面:内置无刷真空动力系统采用PWM调速技术,相比传统有刷电机减少机械摩擦损耗,2级增压叶片设计在保证80~500 L/min大流量的前提下,将额定功率控制在400 W。

风机作为影响流量的关键部件,其功耗与流量紧密相关。如果要增大流量,风机需要输出更大的功率,例如在通风系统中,当需要更快地排出室内污浊空气时,风机转速提高,功耗也随之上升^[6]。所以在满足采样流量需求的同时,要合理设计风机的性能参数,选择高效的风机类型,以此来降低功耗。

系统架构采用动态功耗分配策略,根据采样模式自动调节功耗。在定量采样模式下,设备达到预设体积后自动进入休眠状态,休眠功耗低于10 W;断电记忆功能重启后从断点继续采样,避免重复启动能耗。智能热式质量流量计采用热式传感器,无运动部件。

设备采用碳纤维结合复合材料作外壳,在保障防腐、防盐蚀性能下,将整机重量控制在2.5 kg,配合220 VAC兼容移动电源的供电设计,使设备可在无市电场景下通过便携式电源持续运行。这种低功耗架构不仅满足核设施固定监测的长时间运行需求,更适用于应急救援、野外采样等电力供应受限场景^[7]。

2 整机设计方案

2.1 紧凑型结构与散热优化

紧凑型结构设计以功能优先级、空间占用率双维度为核心,如图1所示通过组件布局算法实现最小体积约束。按模块功能重要性排序:动力模块(提供气流动力,需靠近采样模块减少管路损耗)、控制模块(核心逻辑单元,需避免电磁干扰)、采样模块(直接接触样品,需预留气流缓冲空间),再根据各模块的尺寸参数(动力模块120 mm×80 mm,控制模块100 mm×60 mm)进行嵌套式布局——将控制模块嵌入动力模块与外壳之间的间隙,使纵向空间重叠率提升40%,最终实现整机尺寸压缩至

220 mm×160 mm×98 mm。



图 1 产品外形

散热设计融合传热学中的“路径最短化”原则：内部采用“星状散热网络”，以动力模块为热源中心，通过 0.5 mm 厚的铜质导热片连接控制板与外壳，使热量传导路径缩短至 80 mm (传统设计平均 150 mm)；同时在模块间隙预留 3 条楔形气流通道的截面尺寸从 5 mm 渐变至 10 mm)，利用伯努利效应加速空气流动——当动力系统运行时，气流在通道内流速提升至 1.2 m/s，带走 60% 的热量。碳纤维外壳的热扩散系数 (0.8 W/(m·K)) 是传统塑料的 3 倍，配合表面激光雕刻的微沟槽 (深度 0.2 mm，间距 2 mm)，进一步扩大散热面积，使设备在 45 °C 环境下核心部件温度稳定在 65 °C 以下。

2.2 低功耗硬件选型与移动电源适配

无刷真空动力系统的功耗控制基于效率-流量匹配理论：电机选用 12 槽 14 极设计，其效率曲线在 200-400 L/min 区间保持 90% 以上 (传统有刷电机仅 75%)，当流量从 80 增至 500 L/min 时，功率从 120 W 线性升至 390 W，而非呈平方关系增长 (因采用矢量控制算法实时调整相位角)。

移动电源适配遵循能量守恒模型：22 000 mAh (80 Wh) 移动电源的实际可用能量为 64 Wh (考虑 80% 转换效率)，在 200 L/min 流量下设备功耗 210 W，理论续航为 64 Wh ÷ 0.21 kW ≈ 304 min，实测 6.5 h (390 min) 的偏差源于动态功耗策略。

2.3 独立可拆卸质量流量计模块设计

独立可拆卸质量流量计模块采用模块化封装设计，将流量计核心组件集成于独立单元，通过标准化接口与整机控制系统连接。这种设计使模块与设备主体的拆装无需复杂工具，仅通过简单操作即可完成，大幅提升维护与校准的便利性。在需要计量校准的场景中，可单独拆卸流量计模块送检，避免整机运输带来的磕碰损耗。

模块内部采用定制化智能热式质量流量计，其工作基于热传导效应，通过测量气体流过加热元件

时的热量损失确定质量流量，再换算为标准大气压和温度下的体积流量。

模块的结构设计充分考虑稳定性与耐用性。外壳采用高强度材料封装，内部电路经过防震处理，能应对运输与现场使用中的振动冲击。接口部分采用防腐蚀设计，在长期使用中保持良好的电气连接与气密性，避免因接口问题影响流量计量精度^[8-9]。

模块内部封装铂电阻加热丝 (直径 0.05 mm) 和 2 个对称布置的热电偶传感器 (间距 5 mm)，加热丝维持在 120 °C 恒温状态。当气流通过时，上游传感器温度 (T_1) 低于下游 (T_2)，温差 (ΔT) 与流速呈负相关——流速每增加 100 L/min， ΔT 减少 0.8 °C (在 80-500 L/min 范围内线性度误差小于 2%)。为消除环境温度影响，模块内置 PT1 000 温度补偿芯片，实时修正加热功率 (温度每波动 1 °C，功率调整 0.5%)。

将实测质量流量通过理想气体状态方程转换为标况体积流量，具体通过内置的 lookup 表实现一预先存储 -20 °C ~ 45 °C 范围内的密度修正系数，例如 25 °C 时空气密度 1.2 kg/m³，当实测温度为 45 °C (密度 1.1 kg/m³)，流量显示值自动乘以 1.09 修正。模块与主机的连接采用镀金 pin 针 (接触电阻小于 10 mΩ) 和氟橡胶密封圈 (耐温 -40 °C ~ 200 °C)，确保在 10 kPa 气压差下无漏气，计量精度保持在 ±1.5%。

2.4 组合式采样头切换机构研发

组合式采样头切换机构以多场景适配为目标，设计兼容多种规格与类型的取样头。机构支持 $\phi 50$ 和 $\phi 100$ mm 2 种规格的开放式取样头，适配同规格的管道式取样头与碘取样头，满足气溶胶与碘的同步或单独取样需求。不同类型的取样头通过统一的机械接口与切换机构连接，安装后的密封性与稳定性，避免因连接问题影响采样效率。

切换机构采用快速接头设计，使取样头的更换无需专业工具，操作人员可在现场快速完成不同取样模式的切换。从开放式环境空气取样转换为管道内气体取样时，只需拆卸原有取样头，通过标准快速接头连接管道式取样头与目标管道，即可完成部署。

机构设计中融入同步采样功能，支持组合式气溶胶/碘取样头工作，实现同一时段内对气溶胶颗粒与碘蒸气的同步捕集。如图 2 所示取样头在顶部的布局设计，既保证 2 种取样介质的独立气流畅径，

又避免相互干扰，各自的采样效率不受影响。

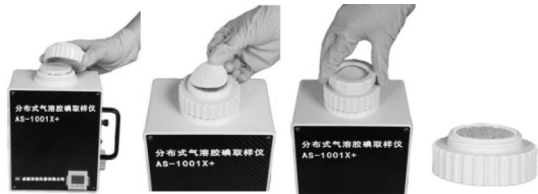


图 2 取样

2.5 碳纤维复合材料外壳轻量化设计

采用“30°/-30°/0°”交替铺层方式(共 8 层，总厚度 2 mm)，使纵向拉伸强度达 800 MPa(传统铝合金仅 600 MPa)，而质量仅 180 g(同体积铝合金 350 g)。通过 3 点弯曲测试验证：在跨度 100 mm 的支撑下，外壳可承受 50 N 载荷(相当于 5 kg 重物)而无永久变形，满足野外搬运需求。

碳纤维表面经硅烷偶联剂处理，形成厚度 0.5 μm 的 SiO₂ 保护层，可抵御 10%硫酸溶液的侵蚀(24 h 喷淋后质量损失小于 0.1%)；基体采用环氧树脂，其分子链中的醚键可排斥氯离子，在 5%氯化

钠溶液中浸泡 72 h 后，外壳绝缘电阻保持 100 MΩ 以上。外壳内侧设计网格状加强筋(截面 2 mm×2 mm)。

材料本身具备防酸、防盐蚀特性，能抵御核设施周边可能存在的腐蚀性气体或液体侵蚀，保护内部核心部件不受损害。外壳表面经过特殊处理，可耐受-20 ℃~45 ℃的温度变化与 95%以下的湿度环境，设备在高温、低温、潮湿等复杂条件下正常运行，延长设备的使用寿命^[10]。

3 性能测试与优化

3.1 功耗测试与动态调节策略验证

实验验证设备在不同运行模式及流量下的功耗表现，评估动态功耗分配策略的有效性，如表 1 所示。测试覆盖连续采样模式、定量采样模式(含休眠状态)，在 80~500 L/min 流量范围内设置 5 个梯度流量点，每个流量点持续运行 2 h，记录实时功耗；模拟断电后重启场景，监测断点续采时的功耗变化。

表 1 功耗测试与动态调节策略验证表

运行模式	流量/(L/min)	平均功耗/W	峰值功耗/W	休眠功耗/W	断点续采初始功耗/W	2 h 总能耗/kWh
连续采样	80	120	135	—	—	0.24
连续采样	200	210	230	—	—	0.42
连续采样	350	305	320	—	—	0.61
连续采样	500	390	410	—	—	0.78
定量采样(休眠前)	350	302	318	8.5	300	0.32(含 1 min 休眠)
定量采样(休眠前)	500	388	405	9.2	385	0.40(含 1 min 休眠)

由表 1 数据分析显示：连续采样时功耗随流量增大呈线性上升，500 L/min 时平均功耗 390 W，低于额定功率 400 W，表明动力系统能效设计达标；定量采样模式下，休眠功耗稳定在 8.5~9.2 W，较运行状态降低 97%以上，动态调节策略显著降低非工作状态能耗；断点续采初始功耗与中断前差异小于 5 W，说明功耗过渡平稳，无瞬时高能耗冲击，验证了低功耗架构的稳定性。

3.2 采样效率与流量稳定性实验

实验通过模拟含放射性气溶胶(粒径 0.1~10 μm)与碘蒸气(元素碘、有机碘混合)的气流环境，测试不同滤纸/碘盒规格下的采样效率，并在 80~500 L/min 流量范围内连续监测 12 h，评估流量稳定性。采样效率通过捕集量与初始量的比值计算，流量稳定性以每小时流量波动系数(标准差/平均值)衡量，如表 2 所示。

表 2 采样效率与流量稳定性实验表

滤纸/ 碘盒规格	流量/ (L/min)	气溶胶捕 集效率/%	元素碘捕 集效率/%	有机碘捕 集效率/%	12 h 平均 流量/(L/min)	流量波动 系数/%	最大流量 偏差/(L/min)
φ50 mm 滤纸	80	92.3	—	—	79.8	1.2	±1.5
φ50 mm 滤纸	500	90.1	—	—	498.6	1.8	±8.2
φ100 mm 滤纸	350	95.7	—	—	349.2	1.5	±5.3
φ50 mm 碘盒	80	—	98.5	91.2	79.6	1.3	±1.8
φ50 mm 碘盒	500	—	97.8	89.5	497.9	2.1	±9.5
组合采样(φ50 mm 滤纸+碘盒)	350	93.2	98.1	90.8	348.8	1.6	±5.7

由表 2 数据分析表明：φ100 mm 滤纸的气溶胶捕集效率(95.7%)高于 φ50 mm 滤纸，大规格滤纸对颗粒的截留能力更优；碘盒对元素碘的捕集效率

(97.8%~98.5%)显著高于有机碘，印证化学吸附对极性较强的元素碘效果更优；12 h 流量波动系数均低于 2.1%，最大偏差小于±9.5 L/min，说明流量

计量系统稳定性良好，满足采样体积准确性要求；组合采样时各效率指标无明显下降，证明切换机构未对气流产生干扰。

3.3 散热性能与环境适应性评估

实验在高低温湿热试验箱中进行，如表 3 所示。

表 3 散热性能与环境适应性评估

环境温度/℃	环境湿度/%	动力模块温度/℃	控制板温度/℃	运行状态	外壳喷淋后外观	喷淋后功能测试
-20	30	5	8	正常	-	正常
-20	95	6	9	正常	-	正常
25(常温)	60	38	32	正常	-	正常
45	30	62	55	正常	-	正常
45	95	65	58	正常	-	正常
25	60	-	-	-	无腐蚀、无变形	流量、通信正常

由表 3 数据分析显示，在极端温度与湿度条件下，动力模块与控制板温度均低于临界阈值(动力模块 70℃、控制板 60℃)，散热设计有效保障部件稳定运行；-20℃低温环境下设备无启动故障，45℃高温高湿(95%)环境下无短路或性能衰减，验证宽温域适应性；外壳经酸、盐蚀喷淋后无外观损伤，功能完全正常，证明碳纤维复合材料的防护性能达标，满足核设施等复杂环境的使用需求。

表 4 便携性指标量化分析表

重量/kg	尺寸/mm ³	单人搬运 100m/s	壁挂式 安装/min	三脚架 安装/min	小拖车 安装/min	移动电源 续航/h	运输后 功能状态
2.5	220×160×98	45	8	5	10	6.5	正常
对比同类产品(均值)	450×280×180	70	15	12	20	4.2	部分需校准

由表 4 数据分析表明：设备重量仅 2.5 kg，较同类产品轻约 40%，单人搬运 100 m 耗时 45 s，便携性优势显著；尺寸仅为同类产品的 1/2，尤其厚度 98 mm 的设计大幅降低空间占用；安装时间均短于同类产品，三脚架安装仅需 5 min，体现快速部署能力；移动电源在 200 L/min 流量下续航 6.5 h，满足野外长时间采样需求；运输后功能无异常，而同类产品部分需重新校准，说明设备结构抗震设计更优，综合便携性指标达到行业领先水平。

4 结论

从性能数据来看：设备在功耗控制方面表现突出，连续采样时 500 L/min 流量下平均功耗仅 390 W，低于额定功率 400 W；定量采样模式下休眠功耗低至 8.5~9.2 W，较运行状态降低 97%以上，配合移动电源可实现 6.5 h 续航，满足低功耗与长时运行需求；采样效率上，φ100 mm 滤纸对气溶胶的捕集效率达 95.7%，φ50 mm 碘盒对元素碘的捕集效率大

模拟-20℃~45℃温度范围(每 5℃一个梯度)及 30%~95%湿度范围(每 20%一个梯度)。设备以 350 L/min 流量连续运行 4 h，监测内部核心部件(动力模块、控制板)温度及运行状态；测试外壳防酸、防盐蚀性能，通过 10%硫酸溶液、5%氯化钠溶液喷淋 24 h 后观察外观及功能变化。

3.4 便携性指标量化分析

本部分通过量化指标评估设备便携性，测试内容包括整机重量、尺寸参数、搬运难度(单人搬运 100 m/s)、不同安装方式的部署时间(从开箱到正常运行)、移动电源续航能力(200 L/min 流量下)及运输抗震性(模拟三级公路运输颠簸后功能检测)，如表 4 所示。

于等于 97.8%，且组合采样时效率无明显衰减，验证复合吸附机制与切换机构的可靠性；环境适应性测试表明，设备在-20℃~45℃温度范围及湿度小于等于 95%的环境中可稳定运行，动力模块与控制板温度均低于临界阈值，碳纤维外壳经酸、盐蚀测试后无损伤，满足复杂环境使用要求；便携性方面，2.5 kg 的重量与 220 mm×160 mm×98 mm 的尺寸仅为同类产品的 1/2，三脚架安装时间仅需 5 min，运输后功能无异常，显著优于同类设备。

参考文献：

[1] 雷小兵, 曲广卫. 分布式气溶胶和碘取样仪[C]//辐射防护分会 2012 年学术年会论文集, 2012.

[2] 吴平韬. 气态流出物取样系统性能试验与分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2022.

[3] 刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 高光谱分辨率激光雷达测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究[J]. 大气科学, 2003, 27(1): 115-122.

- [4] 王坤俊, 常森, 侯建荣, 等. 一种用于放射性气溶胶及气态碘采样的多路试验装置: CN202010114990. 7[P]. CN111220428A[2025-06-26].
- [5] 刘玉田, 王伟华. 便携式碘/气溶胶采样器(HH02-IS42/B型)[P]. 2015[2025-06-26].
- [6] 陈祥磊, 程肿, 王益元, 等. 一种气载放射性监测仪: CN201610706233. 2[P]. CN106291655A[2025-06-26].
- [7] 段桐丹. 燃煤电厂周边大气中颗粒物及碘的浓度变化特征研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [8] 徐思琦, 谢周清, 刘崴, 等. 大气气溶胶中溴、碘总量及其形态的提取和测定[J]. 分析化学, 2010, 38(2): 219-224.
- [9] 陈森彬, 曹阳, 王子军, 等. 氧气湿化装置的设计改进及预防气溶胶传播的研究[J]. 中国医疗设备, 2010, 25(1): 26-29.
- [10] 张志龙, 傅翠明, 李静, 等. PING-50 型放射性气溶胶、碘和惰性气体监测系统的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(4): 390-396.

(上接第 46 页)

3 结束语

笔者提出了一种基于深度神经网络的数据中心光互连网络中消除资源冗余的迭代方法。通过实验结果可知: 应用该方法后, 网络的空间缩减比最高可以达到 0.55, 说明该方法可以有效滤除网络资源冗余, 提高网络空间的利用率, 使其在数据中心光互连网络的资源分配和管理中具有广阔的应用前景。

展望未来, 可以探索如何将网络流量、带宽利用率、延迟、丢包率等多维度指标融入深度神经网络模型的评估体系中。这些指标能够全面反映网络资源的实际状态, 从而帮助模型更准确地识别冗余信息, 优化资源分配。此外, 该方法还可以应用于其他领域, 如计算机网络、智能交通等, 为相关领域的研究提供了新的思路和方法。

参考文献:

- [1] 俞立平, 舒光美. 一种期刊评价指标数据冗余消除法——独立信息测度[J]. 现代情报, 2023, 43(5): 114-122, 167.
- [2] 高翔. 基于贝叶斯网络的车辆定位冗余信息过滤方法研究[J]. 河南科技, 2022, 41(23): 23-27.
- [3] 陈泽, 邬桐, 左晓军, 等. 基于知识图谱的电力网络安全漏洞挖掘系统设计[J]. 制造业自动化, 2023, 45(7): 100-105, 110.
- [4] ALHUSSAN A A, TOWFEK S K. 5G Resource Allocation Using Feature Selection and Greylag Goose Optimization Algorithm[J]. Computers, Materials & Continua, 2024, 80(7): 1179-1201.
- [5] 孙影. 云计算环境下数据库冗余信息消解研究[J]. 长江信息通信, 2023, 36(7): 91-94.
- [6] 赵江, 何洋. 基于关联规则的柴油发电机组故障录波数据冗余点过滤算法[J]. 电工技术, 2023(6): 219-222.
- [7] 徐正海, 左信, 吴露, 等. 基于有偏卡尔曼的双冗余热电阻数据滤波方法[J]. 化工自动化及仪表, 2023, 50(2): 188-193.
- [8] 郭勤, 曾辉, 李慧玲. 基于数据驱动的光纤网络冗余节点状态调度方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(10): 162-166.
- [9] 刘宏, 何鸿燊, 何江. 基于狮群优化极限学习机的数据融合算法[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(2): 321-327.
- [10] HUSSEIN H I, ANWAR S A, AHMAD M I. Imbalanced Data Classification Using SVM Based on Improved Simulated Annealing Featuring Synthetic Data Generation and Reduction[J]. Computers, Materials&Continua, 2023(4): 547-564.
- [11] 秦金祥, 杨萌. 基于平衡二叉树的数控机床数据去重备份算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 548-552.
- [12] 段誉, 王加刚, 孙磊, 等. 针对无人机自主飞行的大气数据冗余容错设计[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(6): 75-78, 98.
- [13] 韩彦武. 一种 Nand Flash 错误数据冗余替换方法[J]. 中国集成电路, 2023, 32(9): 57-59.
- [14] 商俊燕, 丁辉, 胡学龙. 基于 XGBoost 的无线传感器网络冗余数据检测算法[J]. 传感技术学报, 2022, 35(11): 1568-1572.
- [15] 姜姗, 高远, 许玉龙. 基于果蝇算法的空间数据库位置冗余数据查询[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 437-440, 481.
- [16] 王欣, 雷璐, 李小欢, 等. 基于深度神经网络的人工智能交互式学习系统[J]. 电子设计工程, 2022, 30(22): 73-77.
- [17] 余旭阳, 严慧峰, 向颖, 等. 变负荷模式下电力多级冗余数据精细化校验算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(3): 496-502.