

# 3U-VPX 板卡风冷散热结构中风道布局优化与气流均匀性提升研究

李怡豪

贵州航天计量测试技术研究所 贵州 贵阳 550009

**【摘要】**：针对 3U-VPX 板卡风冷散热结构中风道排布不合理、气流分布失衡导致的散热效能不足问题，本文以强化板卡散热稳定性与运行可靠性为核心导向，结合 3U-VPX 板卡的结构规格及实际散热需求，优化风道拓扑构型，设计适配板卡布局的导流构造与通风走向，通过仿真分析与试验验证相结合的方式，改善板卡内部气流分配状态，缩减局部气流滞留盲区与流速差值。研究结果显示，优化后的风道布局可有效提升气流均匀程度，降低板卡核心器件的最高温度，能够满足 3U-VPX 板卡在高负荷工况下的散热需求，为同类板卡风冷散热结构的设计与优化提供理论依据和工程借鉴。

**【关键词】**：3U-VPX 板卡；风冷散热；风道布局优化；气流均匀性

DOI:10.12417/3041-0630.26.07.030

## 引言

3U-VPX 板卡作为嵌入式系统的核心部件，广泛应用于工业控制、航空航天等高端领域，其运行稳定性直接决定整个系统的可靠程度。随着板卡集成度的不断提升、运算负荷的持续加大，发热密度显著攀升，风冷散热作为其主流散热形式，风道排布的合理性与气流的均匀程度已成为制约散热效能的核心因素。不合理的风道排布易形成气流滞留盲区，导致核心器件局部过热，进而缩短板卡的服役寿命。基于上述背景，本文围绕 3U-VPX 板卡风冷散热结构的风道布局优化与气流均匀性提升开展研究，衔接前期研究目标与核心思路，为后续的结构设计、仿真分析及试验验证筑牢基础，助力强化板卡的散热性能与长期运行稳定性。

## 1 3U-VPX 板卡风冷散热结构现状及气流均匀性问题分析

3U-VPX 板卡风冷散热结构现阶段普遍沿用传统平行直风道构型，风道排布与板卡内部器件布局契合度欠佳，通风走向未结合核心发热器件分布特征进行针对性设计，致使气流在板卡内部流转时极易产生紊乱。当前板卡风冷系统进、出风口多采取对称设置，缺乏高效导流构造，气流进入风道后流速分布失衡，进风口邻近区域流速偏快，板卡中部及边缘则易形成气流滞留区，难以对核心发热器件实现有效包裹式散热。此外，风道内壁光滑度不足、器件安装间隙不合理等因素，进一步加重气流分配不均，导致板卡不同区域器件温度差值显著，核心运算器件因局部热量积聚无法及时散发，长期运行易出现性能衰减，限制了其在高负荷场景的稳定应用，也凸显出优化风道布局、提升气流均匀性的迫切需求。

## 2 3U-VPX 板卡风冷风道布局优化设计与气流调控方法

### 2.1 适配器件分布的风道拓扑结构优化

结合 3U-VPX 板卡标准规格与内部器件排布规律，摒弃传统平行直风道设计，采用非对称风道拓扑优化方案，使风道布局与核心发热器件分布精准匹配。根据 CPU、FPGA 等核心器件的安装位置与发热强度，调整风道走向与截面尺寸，将风道分为核心散热段、过渡段与出口段<sup>[1]</sup>。核心散热段对应发热器件区域，适当扩大截面以降低流速，延长热交换时间；过渡段采用渐变截面，避免气流突变紊乱；出口段优化截面形状，减小出风阻力，保证气流顺畅排出。同时合理规划风道与接口、安装座的位置，预留足够通风间隙，避免器件遮挡气流路径，从结构设计上为气流均匀分布提供支撑。

### 2.2 导流结构的设计与参数适配

为进一步改善气流分配的均匀性，在风道内部增设针对性导流构造，着力解决气流紊乱、滞留死角等突出问题。风道进风口处设置弧形导流板，引导气流平稳汇入风道，规避气流冲击造成的流速失衡现象；核心发热器件上方布置微型导流片，依据器件发热范围合理调整导流片的倾斜角度与间距规格，将气流精准导向发热区域，缩减局部气流滞留死角。导流结构选用轻量化、低风阻材质加工制作，避免增加风道整体风阻负荷，同时优化导流结构表面光滑程度，降低气流流动过程中的摩擦阻力，保障气流在风道内部平稳流转，实现对板卡各区域的全面均匀覆盖。此外，结合板卡整体结构特点，将导流结构与板卡壳体采用一体化设计模式，避免额外占用板卡内部空间，确保板卡的集成度与结构稳定性不受影响。见图 1 所示：

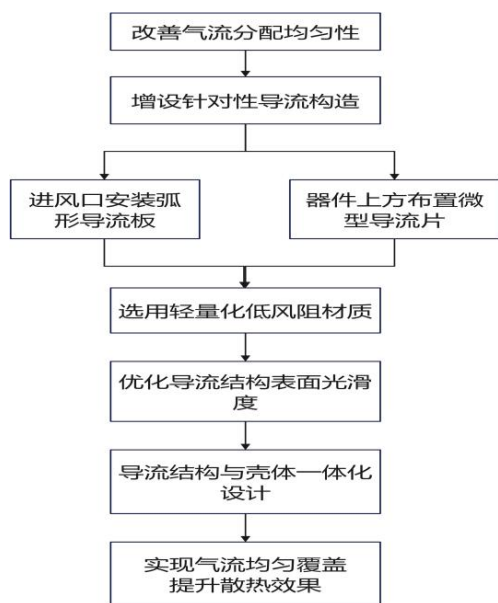


图1 导流结构设计参数适配流程

### 2.3 气流流速的动态调控方法

针对不同工况下板卡发热强度的差异特征，设计气流流速动态调控方案，达成气流均匀性与散热效率的协同提升目标。结合板卡运行负荷的实时变化，通过调控散热风扇的转速参数，动态适配风道内的气流流速：板卡处于低负荷运行状态时，适度调低风扇转速，在降低能耗的同时，规避气流流速过高引发的分配失衡问题；高负荷运行阶段，提升风扇转速以增加气流流量，保障核心发热器件产生的热量能够及时散发<sup>[2]</sup>。此外，在风道关键位置布置气流监测节点，实时捕捉气流流速与分布状态，依据监测数据灵活调整导流结构的工作状态，及时修正气流分配偏差，确保板卡在各类运行工况下，风道内气流均能维持均匀分布态势，有效破解局部过热难题，强化板卡的散热稳定性。

## 3 风道布局优化效果的仿真与试验验证

### 3.1 仿真模型搭建与参数设置

依托3U-VPX板卡真实结构尺寸、器件排布方式以及经优化的风道与导流构造，搭建三维仿真模型，精准还原板卡内部风道走向、导流结构形态与核心发热器件的发热属性。仿真模型运用流体力学分析手段，设定贴合实际工况的边界条件，涵盖进风口气流初始流速、环境温度、核心器件发热功率等核心参数，保障仿真结果具备真实度与参考价值。模型针对风道内

壁、导流结构表面开展精细化建模，还原表面光滑程度与几何外形，同时保留器件安装间隙与气流流通路径，规避模型过度简化带来的仿真误差，为后续气流分布与温度场分布的仿真分析提供精准模型基础。

### 3.2 气流分布与温度分布仿真分析

依托已构建的仿真模型开展气流分布与温度分布仿真研究，重点观测风道内部气流流通状况、流速分布特征以及板卡各区域元器件的温度变化情况。仿真过程中采集风道内不同点位的的气流流速信息，解析气流在核心散热段、过渡段与出口段的流动规律，识别并排查气流滞留盲区与流速紊乱问题，检验风道拓扑结构与导流结构对气流分配的调控效能<sup>[3]</sup>。同步监测核心发热器件与板卡整体的温度场分布，记录各区域元器件温度参数，剖析温度分布与气流分布之间的内在关联，判定气流均匀程度对板卡散热效能的作用效果，借助仿真数据直观展现风道布局优化后的气流与温度场状态。

### 3.3 实物试验验证与结果分析

构建与仿真环境匹配的实物试验平台，选取规格参数与仿真模型一致的3U-VPX板卡、散热风扇及导流构件，按优化后的风道排布完成装配。试验中，模拟板卡各类运行负荷下的工作状态，借助气流测速装置采集风道内各关键节点气流速率，利用温度检测仪器实时采集核心器件与板卡表面温度信息，将实测数据与仿真数据进行对照分析。试验与仿真结论吻合度较高，风道内气流流动平顺，无显著气流滞留区域，板卡各区域元器件温度场分布均匀，核心发热器件热量可快速散发，能够满足板卡高负载工况运转需求，也证实了风道布局优化策略与气流调控方式具备可靠实践价值。

## 4 结语

本文围绕3U-VPX板卡风冷散热风道布局与气流均匀性问题开展系统研究，剖析现有风道结构存在的气流分配失衡、局部散热欠缺等短板，构建适配器件分布的风道拓扑构型，设计配套导流构造与气流调控方案，并通过仿真分析与实物试验完成效果验证。研究形成的风道优化策略可有效改善板卡内部流场分布状态，使热量传递更为均衡，为高密度嵌入式板卡的风冷散热设计提供可行思路。相关研究成果可直接应用于同类电子设备散热结构改进，进一步强化高集成度板卡在复杂工况下的运行稳定性与环境适配能力。

## 参考文献

- [1] 曹博涛,谭礼斌,苏宁,等.风冷发动机冷却流道设计及散热性能提升[J].科学技术与工程,2023,23(35):15084-15090.
- [2] 雷磊,周宇,高冬平,等.大功率速调管收集极高效强迫风冷散热系统的设计[J].强激光与粒子束,2022,34(06):26-32.
- [3] 封振,刘明祥,王磊.风道尺寸对设备强迫风冷散热性能的影响分析[J].工程机械,2022,53(03):44-49+9.