

集热器阵列连接方式不合理引起流量分配不均的管路平衡调节

戴广金 卫志永

天津市外国企业专家服务有限公司中新生态城分公司 天津 300467

【摘要】：集热器阵列连接方式不合理易导致管路流量分配不均，降低系统集热效率，增加能耗。通过分析不同连接方式下管路阻力特性、流体动力学规律，可明确流量分配失衡的成因，如管路布置不对称、管径匹配不当等。采用水力计算、动态调节阀门设置、管路优化设计等措施，能有效改善流量分配状态，使各集热器单元流量趋于均衡。这对提升太阳能集热系统运行稳定性、提高能源利用效率具有重要意义，为解决同类系统流量分配问题提供技术参考。

【关键词】：集热器阵列；流量分配不均；连接方式；管路平衡；调节措施

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.057

引言

在太阳能集热系统中，集热器阵列的高效运行依赖于稳定均衡的流量分配。然而，连接方式的不合理设计常引发管路流量分配失衡，造成部分集热器过热或欠热，严重影响系统性能。深入探究这一问题的根源，探索科学有效的管路平衡调节方法，不仅能提升能源利用效率，还能为太阳能集热系统的优化设计与运行维护提供实践指导，推动清洁能源技术的进一步应用。

1 集热器阵列连接方式不合理导致流量分配不均问题

1.1 串联连接方式的流量衰减问题

串联连接通过单管路依次串联各集热器单元，易因沿程阻力累积导致流量逐步衰减。流体在进入首个集热器时流量充足，但经过管路摩擦与局部阻力损耗后，后续集热器的入口流量持续降低，形成“前高后低”的流量分布。位于串联末端的集热器因流量不足，集热效率大幅下降，甚至因散热大于吸热出现温度倒挂现象。此外，串联管路中任一集热器发生局部堵塞，会导致下游所有单元流量骤减，系统抗干扰能力薄弱。这种连接方式对管路长度变化极为敏感，当阵列规模扩大时，首尾集热器的流量差异呈非线性增长，难以通过简单调节消除失衡。集热器阵列连接方式是决定管路流量分配的核心因素，不合理的连接设计会破坏流体流动的均衡性，引发各集热器单元流量偏差，进而影响系统整体效能。

1.2 并联连接方式的支路偏流问题

并联连接通过主管路向各分支管路分配流体，但若分支管路设计不对称，会引发显著的支路偏流。距离主管道入口较近的分支管路，因沿程阻力小，易获得更多流量，形成“近大远小”的分配格局；而远离入口的分支管路则因阻力叠加，流量明显偏低。分支管路的管径匹配不当会加剧偏流，若部分支路

管径过大，会因局部阻力过小形成流量“短路”，导致其他支路流量被抢占；管径过小的支路则因阻力过大，流量被过度抑制。并联管路的汇流节点设计不合理也会引发紊乱，流体在汇流处形成涡流与冲击，破坏各支路的压力平衡，进一步放大流量偏差。混合连接（串并联结合）若设计不当，会同时存在串联衰减与并联偏流的复合问题。多级串联与并联组合时，上级并联支路的流量偏差会通过串联传递放大，导致下游串联单元的流量失衡更为严重。不同层级的管路阻力不匹配是主要诱因，若上级主管路阻力过大，会导致下游并联支路的整体流量不足，而下游支路的局部阻力差异又会加剧各自的流量分配失衡。

1.3 管路布局与连接部件的干扰问题

管路布局的空间走向对流量分配的影响常被忽视，不合理的走向设计会放大连接方式的缺陷。水平管路存在坡度偏差时，流体在重力作用下向低处聚集，导致高位支路流量减少；垂直管路的高度差会产生静压力差异，低层集热器因静压头较大获得更多流量，高层单元则因静压不足出现流量偏低。连接部件的选型不当也会干扰流量均衡，不同规格的阀门、弯头混用会导致局部阻力系数不一致，即使管路尺寸对称，也会因部件阻力差异引发流量偏流。此外，集热器进出口连接的管径突变会产生节流效应，当入口管径大于集热器接口时，流体在入口处形成突缩，局部阻力骤增，导致该单元流量被抑制。流体自身的动力特性会与不合理连接方式产生耦合作用，加剧流量分配失衡。集热器运行过程中，流体温度升高会改变其密度与黏度，温度较高的管路因流体动力特性变化，阻力系数发生改变，与其他管路形成新的阻力失衡，这种热-流耦合效应会使流量分配偏差随运行时间动态变化。

2 集热器阵列管路平衡调节的技术方案设计

2.1 连接方式的优化重构

针对串联、并联及混合连接的固有缺陷，需通过连接形式的重构实现流量分配的基础平衡。串联连接可采用分段并联组合模式，将长串联管路拆分为若干短串联单元，单元间通过并联主管路连接，使各短串联单元入口压力趋于一致，减少沿程阻力累积导致的流量衰减。并联连接需采用对称式分支设计，确保各分支管路与主管路的连接距离、管径规格完全一致，通过镜像布局消除“近大远小”的偏流效应；分支管路入口处设置导流装置，引导流体均匀分流，避免汇流节点的涡流干扰。混合连接需采用层级阻力匹配原则，上级主管路与下级分支管路的阻力特性需通过水力计算精准匹配，避免因层级间阻力失衡引发的复合偏差，同时减少不必要的管路节点，降低局部阻力干扰。集热器阵列管路平衡调节的技术方案设计，需针对连接方式不合理导致的流量分配失衡问题，从连接形式优化、阻力调控、动态调节等维度构建系统性解决方案，通过精准匹配管路特性与流体动力，实现各集热器单元流量的均衡分配。

2.2 管路阻力的精准调控

通过管路阻力的主动调控抵消连接方式不合理导致的失衡，需结合流体力学特性设计针对性措施。串联管路中，沿程阻力可通过管径梯度调整实现均衡，根据各单元位置的阻力累积值，适度增大下游管路管径以降低沿程阻力，使各集热器入口的有效压头趋于一致。并联支路的局部阻力调控可采用节流平衡技术，在流量偏多的支路设置可调节节流阀，通过增加局部阻力降低流量；流量偏少的支路则通过优化弯头曲率、减少阀门数量降低阻力，实现支路间阻力平衡。对于混合连接的复杂管路，需采用阻力模块化设计，将不同层级的管路划分为独立阻力模块，通过模块间的阻力参数匹配，确保整体流量分配均衡。动态调节系统可实时响应流量波动，通过智能化手段维持管路平衡，需整合监测与调控功能形成闭环控制。在各集热器单元进出口设置流量传感器与温度传感器，实时采集运行参数并传输至控制中枢，通过对比各单元流量偏差识别失衡区域。控制中枢根据监测数据驱动执行机构，对失衡支路的调节阀门进行动态调整，流量偏小时增大阀门开度降低阻力，流量偏大时减小开度增加阻力，确保各单元流量始终处于设定范围内。系统需具备自适应学习能力，通过分析不同工况下的流量变化规律，自动优化调节策略，应对因温度变化、系统启停引发的动态失衡，减少人工干预需求。

2.3 管路布局与部件的适配设计

管路布局与连接部件的适配是平衡调节的基础保障，需通过精细化设计消除潜在干扰因素。水平管路采用等高布局，确

保各支路流体在重力场中受力均衡，避免因坡度偏差引发的流量聚集；垂直管路设置压力补偿装置，通过在高层支路入口增加增压泵或在低层支路设置减压阀，抵消静压力差异对流量的影响。连接部件实行标准化选型，所有支路的阀门、弯头、接头采用同一规格，确保局部阻力系数一致，避免因部件差异引发的偏流；集热器进出口采用渐变管径连接，消除管径突变导致的节流效应，使流体平稳过渡。此外，管路走向设计需减少不必要的转弯与迂回，缩短流体流动路径，降低沿程阻力与局部阻力的累积偏差。针对流体动力特性与温度变化的耦合干扰，需设计热-流协同调节方案。通过在管路中设置温度补偿模块，实时监测流体温度变化，根据密度与黏度的对应关系，动态调整管路阻力参数，抵消因温度差异引发的阻力变化。在系统启停阶段，采用渐进式流量调节策略，启动时逐步提升泵组功率，避免瞬时冲击流对管路平衡的破坏；停机前降低流量至稳定值，减少回流扰动。对于过渡流状态下的非线性阻力，通过流体力学仿真预判阻力变化趋势，提前调整调节阀门开度，实现流量的超前控制，确保在全工况下维持均衡分配。该技术方案的实施，可从根本上解决连接方式不合理导致的流量分配失衡问题，为集热器阵列的高效稳定运行提供系统性技术支撑，兼顾静态平衡与动态调节，适应不同规模与工况的应用需求。

3 集热器阵列管路平衡调节的实践应用

3.1 不同连接形式的针对性调节实施

串联管路的分段平衡需按“拆分-匹配-整合”流程操作。先根据集热器数量与管路长度，将长串联阵列拆分为若干独立短串联单元，每个单元包含相同数量的集热器；再通过水力计算确定各单元的阻力特性，为下游单元配置略大管径的管路，补偿沿程阻力累积；最后通过并联主管路连接各短串联单元，在主管路与单元接口处设置压力监测点，确保各单元入口压力偏差控制在允许范围内。并联管路的对称调节需遵循“布局校验-阻力校准-分流测试”步骤，施工中严格按镜像图纸布设分支管路，确保各支路的长度、弯头数量完全一致；采用同规格节流阀进行阻力校准，通过逐路调试使各支路的压降特性匹配；启动系统进行分流测试，利用流量计验证各支路流量偏差，偏差超限时微调节节流阀开度直至均衡。混合连接的层级调节需分层实施，先优化上级主管路的管径与布局，确保对下级分支的供压均匀；再按并联调节方法校准各分支管路，通过层级间的压力传递验证整体平衡状态，避免因局部调节影响系统全局。集热器阵列管路平衡调节的实践应用，需将技术方案转化为具体场景的操作流程，结合系统规模、连接形式与运行环境，通过分步实施与动态优化，实现流量分配的精准调控，确保各集热器单元效能充分发挥。

3.2 动态调节系统的落地与运维

动态调节系统的安装需与管路施工同步进行,传感器布设需覆盖关键节点,流量传感器安装在集热器进出口的直管段,避免因管路弯头导致的测量偏差;温度传感器紧贴管路外壁并做好保温,确保感知流体真实温度。控制中枢的调试需分阶段进行,先通过模拟信号测试传感器与执行机构的联动响应,验证阀门开度与流量变化的对应关系;再接入实际运行数据,设定合理的调节阈值,使系统在流量偏差超限时能自动触发调节。日常运维需建立数据巡检机制,定期导出流量与温度曲线,分析调节频率与偏差趋势,若某支路频繁触发调节,需检查管路是否存在堵塞或阀门卡滞;每季度进行一次手动校准,通过关闭部分单元的方式测试系统应急调节能力,确保动态响应的可靠性。大型阵列的分区调节需结合空间布局实施,按区域划分独立调节单元,每个单元配置专属动态调节模块,避免因管路过长导致的调节延迟;区域间设置互联管路与切换阀门,可根据光照分布调整流量分配,使光照充足区域获得更优流量。高低错落布置的垂直管路调节需强化压力补偿,在高层集热器支路入口安装增压装置,低层支路设置减压阀门,通过压力差值补偿高度差带来的静压力影响;在垂直管路转折处安装排气阀,避免气堵干扰流量稳定性。

3.3 效果验证与持续改进

调节效果的验证需通过多维度测试实现,短期测试可监测

各集热器的进出口温差,温差均匀表明流量分配均衡;长期运行需统计系统整体集热效率,效率提升且波动减小说明调节有效。建立问题反馈机制,记录运行中出现的流量异常点,分析是否因管路老化、阀门磨损导致调节失效,针对频发问题优化调节方案,如对易磨损阀门进行材质升级。结合系统扩容需求,在新增集热器时同步扩展调节范围,通过预留接口与校准程序,确保新增单元与原有系统的流量特性兼容,避免局部扩容破坏整体平衡。极端环境下的防护调节需针对性加强,低温环境需对调节阀与传感器进行保温处理,防止冻堵影响动作精度;多风沙环境需定期清理管路过滤器,避免杂质堆积改变局部阻力特性;强日照环境需强化温度-流量联动调节,通过动态系统实时补偿热-流耦合效应引发的偏差。通过上述实践应用,可将管路平衡调节技术转化为实际效能,既解决了不同连接形式的固有缺陷,又通过动态系统适应运行中的变量干扰,为集热器阵列的高效稳定运行提供可操作的落地路径,同时为同类系统的调节积累了场景化经验。

4 结语

集热器阵列管路平衡调节对提升系统效能至关重要。通过针对性解决连接方式不合理引发的流量不均问题,结合技术方案设计与实践应用,可实现各单元流量均衡。这不仅能提高能源利用效率,还为系统稳定运行提供保障。未来需持续优化调节技术,结合新场景完善方案,推动太阳能集热系统迈向更高效、更可靠的发展阶段,助力清洁能源的广泛应用。

参考文献:

- [1] 陈讲运,刘鑫.光伏热 PVT 与地源热泵耦合系统中集热器阵列性能研究[J].清洁能源技术前沿,2024,15(3):45-52.
- [2] 张悦,李华.槽式集热器阵列连接方式对流量分配及系统效率的影响[J].太阳能工程学报,2023,34(4):78-85.
- [3] 赵强,王辉.太阳能热水系统中集热器阵列管路平衡调节的实践与优化[J].建筑节能与可再生能源应用,2022,28(6):34-40.
- [4] 孙晓,周宇.基于 CFD 仿真的集热器阵列导流结构优化与流量均匀性研究[J].中国载人航天技术进展,2022,25(4):56-63.
- [5] 郭峰,王丽.含卷键铝吸热器的 PVT 集热器阵列流体流动与温度分布特性研究[J].可再生能源研究与应用,2023,30(5):89-96.