

半导体工业厂房高效制冷机房系统设计探讨

曾威

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025060005

摘要：半导体工业厂房制冷系统要求特殊，涉及环境控制、设备选型、管网设计等多方面。温湿度、洁净度、振动控制要求高，设备选型需优化，管网要水力平衡，蓄冷系统要合理设计，还介绍了能效评估等内容，需融合新技术满足需求。

关键词：半导体厂房；制冷系统；高效节能

Discussion on the Design of Efficient Refrigeration Room System in Semiconductor Industrial Plant

Zeng Wei

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The refrigeration systems in semiconductor industrial plants have specific requirements, involving environmental control, equipment selection, and pipeline design. These systems must meet high standards for temperature and humidity, cleanliness, and vibration control. Equipment selection should be optimized, pipelines must ensure hydraulic balance, and the cold storage system should be designed effectively. Additionally, the paper discusses energy efficiency assessments and the integration of new technologies to meet these demands.

Keywords : semiconductor plant; refrigeration system; high-efficiency energy saving

引言

半导体工业在现代科技中占据关键地位，其生产工艺对环境控制要求极高，制冷系统的设计与运行至关重要。近年来，随着《中国制造2025》（2015年颁布）等政策的推进，强调制造业的转型升级和高效节能发展。在此背景下，半导体工业厂房高效制冷机房系统面临诸多挑战与机遇。从温湿度、洁净度和振动控制等特殊环境要求，到设备选型优化、管网水力平衡、蓄冷系统设计等多个方面，都需要深入研究和创新，以满足产业发展对高效、节能、稳定制冷的需求，同时符合政策导向的高效节能目标。

一、半导体工业厂房制冷需求特征

（一）工艺环境控制要求

半导体生产工艺对环境控制要求极高。温湿度方面，不同的生产环节有特定的温湿度范围要求，例如光刻工序需要严格控制温度在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内，湿度在40%~60%之间，以确保光刻精度和产品质量^[1]。洁净度也是关键因素，厂房内空气需达到极高的洁净等级，如ISO 1~ISO 3级，这对制冷系统的过滤和空气循环设计提出了严格要求。在振动控制上，半导体生产设备对振动极为敏感，制冷系统的设备选型和安装需考虑减振措施，避免因振动影响生产设备的正常运行和产品的加工精度。

（二）能耗负荷特性

大规模芯片制造设备以及真空机组等是半导体工业厂房的主要热源。这些设备运行过程中形成的能耗负荷具有动态变化的特性，其负荷曲线会随着设备的运行状态、生产流程的不同阶段而改变^[2]。例如，在芯片制造的某些关键工序，设备满负荷运行，

制冷需求达到峰值；而在一些辅助工序或设备维护时段，负荷则会显著降低。同时，昼夜负荷特性也较为明显，由于生产安排和人员活动规律，白天通常是生产活动的集中时段，设备使用率高，制冷负荷较大；夜间部分设备可能处于待机或低负荷运行状态，制冷需求相应减少。这种动态且具有昼夜差异的负荷特性，对制冷系统的设计和运行提出了更高的要求，需要其具备良好的调节能力和适应性。

二、高效制冷系统架构设计

（一）设备选型优化配置

在设备选型优化配置方面，对于半导体工业厂房高效制冷机房系统，冷水机组、水泵与冷却塔的合理选型及配置至关重要。冷水机组全年95%的时间处于部分负荷工况，对于工业项目，需要关注冷机在全年不同冷却水温时，部分负荷工况的COP。通过分析全年8760h的负荷，来选择冷机容量搭配和变、定频搭配，

确保不论负荷如何变化，始终运行在冷机高效负载区间。水泵选型，扬程余量应合理，采用高效率水泵，配置高效电机采用变频控制。冷却塔选型，主要是降低逼近度，在空间允许情况下，选择散热能力更强的冷却塔。其次，冷却塔选型应关注变流量工况时的均布性能，确保变流量运行时，冷却塔仍能够充分利用填料面积进行高效换热。通过对这三者的优化选型及合理配置，并制定科学的群控策略和参数匹配方法，可提高整个制冷系统的效率，满足半导体工业厂房的制冷要求^[3]。

（二）管网水力平衡设计

在管网水力平衡设计方面，BIM技术具有重要应用价值^[4]。通过BIM建立大温差供回水系统的三维模型，精确呈现管网的布局和连接关系。这有助于准确分析各管段的水力特性，包括流量、压力损失等。基于模型进行水力计算，可得到不同工况下各节点的压力和流量数据。利用这些数据，能够合理确定管径大小和调节阀的设置，以实现管网水力平衡。同时，BIM技术可实时监测管网运行状态，对可能出现的水力不平衡问题及时预警。通过动态调整调节阀开度等措施，确保各支路的水流量符合设计要求，提高整个制冷系统的运行效率和稳定性。

三、水蓄冷系统融合设计

（一）蓄冷罐体参数设计

1. 分层蓄冷原理应用

蓄冷罐的设计需考虑分层蓄冷原理。基于温度分层效应，合理确定蓄冷罐高径比至关重要。适宜的高径比有助于形成稳定的温度分层，提高蓄冷效率^[5]。同时，布水器结构设计也是关键要点。布水器应确保冷水和温水能够均匀进出蓄冷罐，避免出现水流短路或混合现象，从而维持良好的温度分层。其设计需考虑水流速度、方向以及布水孔的大小和分布等因素。通过优化高径比和精心设计布水器结构，能够更好地应用分层蓄冷原理，提升蓄冷系统的性能，满足半导体工业厂房高效制冷的需求。

2. 释冷效率保障措施

在蓄冷罐体参数设计方面，需综合考虑罐体的容积、形状、材质等因素。合理的容积要根据制冷需求和蓄冷时间确定，形状影响水流分布和温度分层，材质则关乎保温性能和耐久性^[6]。对于释冷效率保障措施，关键在于维持斜温层的稳定性。通过优化进出水口的设计，控制水流速度和方向，避免冷热水的混合。同时，可设置防短路装置，确保释冷过程中冷水能高效地被抽取利用。此外，温度传感器的合理布置也至关重要，能够实时监测温度变化，为控制系统提供准确数据，以便及时调整运行参数，保障释冷效率的稳定。

（二）系统集成控制策略

1. 移峰填谷控制模型

构建负荷预测与电价分时策略联动的动态释冷数学模型，需综合考虑多方面因素。首先分析厂房内的制冷负荷变化规律，结合历史数据与实时监测信息，采用合适的预测方法，如时间序列分析等^[7]。同时，获取电价分时信息，明确峰谷电价时段。基于

此，建立以成本最小化为目标的动态释冷数学模型，模型中包含蓄冷罐的蓄冷量、释冷速率等变量，以及制冷机组的运行功率、效率等参数。通过优化算法求解模型，确定不同时段的最佳释冷策略，实现移峰填谷，提高能源利用效率，降低制冷机房的运行成本。

2. 应急冷源保障机制

在水蓄冷系统融合设计方面，需综合考虑多种因素实现高效集成。对于系统集成控制策略，要建立智能控制系统，精确调控各设备运行参数，确保系统稳定高效运行，实现不同工况下的最优制冷效果^[8]。在应急冷源保障机制上，制定工艺冷却水系统与消防系统联动的应急供冷方案至关重要。当出现紧急情况时，通过联动机制，消防系统可为工艺冷却水系统提供应急冷源，确保关键设备在一定时间内仍能得到有效冷却，避免因制冷中断造成生产损失和安全隐患，保障半导体工业厂房的正常生产秩序。

四、系统优化与能效评估

（一）热回收系统集成

1. 冷凝热梯级利用

在半导体工业厂房中，冷凝热梯级利用是热回收系统集成的重要部分。对于工艺纯水加热，可利用冷凝热的热量通过合适的热交换设备将热量传递给纯水，提高纯水温度，满足生产工艺需求，这不仅减少了额外的能源投入用于纯水加热，还能有效利用原本被浪费的冷凝热^[9]。在厂区供热方面，通过设计合理的管网和热交换系统，将冷凝热按照不同的温度等级进行梯级利用，例如先将较高温度的冷凝热用于满足对温度要求较高的区域供热，然后再利用剩余的较低温度的冷凝热对温度要求稍低的区域供热，从而实现能源的高效利用，提高整个厂区的能源利用效率。

2. 能质提升技术路径

吸收式制冷与高温热泵组合的热回收系统是实现能质提升的关键路径之一。在半导体工业厂房中，通过合理配置该系统，可有效回收废热并加以利用。这种组合系统能够利用吸收式制冷的特性，在特定温度区间高效工作，同时高温热泵进一步提升热量的品质，使其能够满足更高温度需求的工艺环节^[10]。例如，在一些芯片制造过程中的加热工序，可利用回收并提升能质后的热量，减少对传统能源的依赖。通过精确的系统设计和参数优化，能够最大程度地提高能源利用效率，降低生产成本，同时减少对环境的影响，符合可持续发展的理念。

（二）数字化运维体系

1. 数字孪生建模方法

搭建基于设备参数实时映射的制冷系统三维可视化监控平台，需运用数字孪生建模方法。首先采集制冷系统设备的各项参数，包括温度、压力、流量等，这些参数作为数字孪生模型的基础数据。然后利用专业建模软件，根据设备的实际物理结构和运行原理构建三维模型。在模型中，将采集到的参数实时映射到对应的设备部件上，实现设备运行状态的可视化展示。通过这种方式，运维人员可以直观地了解制冷系统的运行情况，及时发现潜

在问题，为系统优化和能效评估提供有力支持。同时，该模型还可用于模拟不同工况下系统的运行效果，辅助制定更合理的运维策略和节能措施。

2. 智能诊断算法应用

开发异常工况自诊断及系统 COP 优化自适应控制算法，需基于对制冷机房系统运行数据的深度分析。通过建立系统运行模型，识别出正常工况下的各项参数指标范围以及它们之间的关联。当出现异常工况时，算法能够依据预设的规则和学习到的模式，快速准确地诊断出问题所在，如设备故障、管路堵塞或传感器偏差等。同时，以系统能效比（COP）为优化目标，算法根据实时运行数据动态调整设备的运行参数，如压缩机的转速、冷却水泵的流量等，确保系统始终在高效状态下运行，实现能源的合理利用和成本的有效控制。

（三）能效评价指标系统

1. 全生命周期评价

对半导体工业厂房高效制冷机房系统开展全生命周期评价意义重大。应构建涵盖建造阶段碳排放量与运行阶段系统能效 COP 的综合评估体系。建造阶段碳排放量涉及从原材料采购到厂房落成期间产生的温室气体总排放，囊括设备生产、物流运输及现场施工等环节。运行阶段系统能效 COP 通过精准测算制冷机房供冷总量与冷机、水泵、冷却塔等设备耗电量总和的比值来确定。整合这两个关键指标，可全面剖析系统全周期的环境影响及能源利用效率，为系统优化升级提供有力依据，推动半导体工业厂房制冷机房实现高效、可持续的长期稳定运行。

2. 对标分析体系

半导体工业厂房高效制冷机房系统的能效评估至关重要。在能效评价指标系统中，需综合考虑制冷量、能耗、能效比等关键指标。而对标分析体系则是将实际运行数据与设定的标准或先进水平进行对比。对于半导体行业制冷系统，应制定能耗限额标准，明确合理的能耗范围。通过收集大量同类型厂房制冷系统的数据，分析其能耗分布规律，确定不同工况下的能耗基准值。同时，建立对标分析方法，从设备性能、系统配置、运行策略等多个维度进行比较。例如，对比不同制冷机组的能效比，分析冷却系统的效率差异等。通过对标分析，找出自身系统的优势与不足，为系统优化提供依据，以实现半导体工业厂房制冷机房系统的高效运行。

五、总结

半导体工业厂房对制冷系统有特殊要求。与传统方案相比，其制冷系统设计在技术上存在差异，需综合考虑厂房的特殊环境和生产工艺需求。蓄冷系统与生产工艺的耦合设计是关键创新点，通过合理设计可提高能源利用效率。针对新能源产业园区，提出模块化制冷系统建设方案，有助于提高建设效率和系统灵活性。同时，智能化调控技术在超净厂房中的应用前景广阔，能够实现更精准的温度控制和能源管理。未来，半导体工业厂房高效制冷机房系统设计应不断融合新技术，以满足产业发展对高效、节能、稳定制冷的需求。

参考文献

- [1] 王鸿大. 工业制冷系统能耗优化控制设计与工程应用 [D]. 浙江大学, 2021.
- [2] 刘海. 工业建筑高效制冷机房能效比研究——以某厂制冷机房为例 [D]. 广州大学, 2021.
- [3] 张林博. 高效制冷机房系统优化控制方法及能耗评价研究 [D]. 北京工业大学, 2022.
- [4] 李刚. 数据中心蒸发冷却复合制冷系统优化设计研究 [D]. 广州大学, 2023.
- [5] 易求鸿. 江门市某厂房制冷机房运行诊断与仿真优化 [D]. 广州大学, 2023.
- [6] 闵小奎, 张守用, 许鹏. 半导体厂房钢结构节点优化应用探讨 [J]. 工程建设与设计, 2023(12): 13-15.
- [7] 盖昊宇, 张震, 朱炼, 等. 基于 lora 技术的半导体厂房环境实时监测系统设计 [J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 14-19.
- [8] 刘雪伟, 徐森, 商晓峰. 先进半导体厂房供电系统分析 [J]. 建筑电气, 2022, 41(12): 11-17.
- [9] 任华维, 明平强, 李耿民. 数据中心机房制冷系统节能分析 [J]. 科学与信息化, 2023(10): 111-113.
- [10] 方学问, 韩剑峰. a 级 idc 机房制冷系统配电分析 [J]. 电力设备管理, 2021(14): 260-261, 264.