

电子厂房洁净区压差控制分析

王伯圣

上海精泰机电系统工程有限公司

DOI:10.12238/ems.v7i6.13843

[摘要] 本文针对电子厂房洁净度控制问题,重点研究了压差控制在千级以上、万级和十万级洁净厂房中的应用。通过分析电子厂房洁净度等级标准及影响因素,探讨压差控制的基本原理和方法。研究设计适用于不同洁净度等级的压差控制系统,并对其性能进行测试和优化。结果表明,合理的压差控制策略能有效维持电子厂房洁净度,提高产品质量和生产效率。本研究为电子厂房压差及洁净度控制提供了理论依据和实践指导,对提升电子制造业工艺水平具有重要意义。

[关键词] 电子厂房; 压差控制; 洁净度; 千级以上; 万级; 十万级; 空气过滤; 气流组织

引言

随着电子技术飞速发展,电子产品制造工艺对生产环境的要求日益严格。电子厂房为电子产品生产的重要场所,其洁净度直接影响产品质量和效率。洁净环境控制措施中,压差控制因其变数大、高效、可靠的特点而备受关注。本文重点探讨压差控制在电子厂房洁净度控制中的应用,重点分析千级以上、万级和十万级洁净度厂房的压差控制策略。

压差控制通过维持不同洁净等级区域间的压差梯度,有效防止洁净度等级低的区域向洁净度等级高的区域扩散污染颗粒,是保证电子厂房洁净度的重要手段。不同洁净度等级的厂房对压差控制的要求各不相同,如何设计合理的压差控制系统以满足不同洁净度需求,为当前电子厂房制造业面临的重要课题。本研究通过理论分析和实验、实践验证,旨在为电子厂房压差控制提供科学依据和实践指导,从而提升电子产品的生产质量和效率。

1. 电子厂房洁净区洁净度等级及影响因素

电子厂房的洁净度等级是衡量生产环境的重要指标,直接关系电子产品的成品率和可靠性。目前国际上一般采用 ISO 14644-1 标准对洁净室进行分级,其中千级以上、万级和十万级是电子厂房中常见的洁净度等级。要求每立方英尺空气中 $\geq 0.5\mu\text{m}$ 的颗粒数:百级洁净区不超过 100 个,千级洁净区不超过 1000 个,万级洁净区不超过 10000 个,十万级洁净区不超过 100000 个。这些等级对应不同电子厂房生产工艺要求,如千级以上常用于半导体制造,万级适用于精密电子元件生产,而十万级则多用于一般电子组装。

影响电子厂房洁净度因素多,主要包括洁净室环境、空气过滤效率、气流组织、人员活动、设备运行、工艺原材料及生产工艺等。其中,空气过滤系统是维持洁净度的基础,HEPA 高效过滤器和 ULPA 超高效过滤器能有效去除空气中微粒。气流组织则决定了洁净空气的分布和污染颗粒过滤效率,常见的气流模式有单向流和非单向流。人员活动是洁净室内最大的污染源,通过严格的更衣程序和人员管理可减少人为污染。设备运行产生的颗粒物和气体污染物也需要通过局部排风等措施加以控制。工艺原材料及生产工艺产生的颗粒物,可通过改进研发原材料选材、改进生产工艺控制产生颗粒物的数量。洁净室环境主要温湿度环境、换气次数、压差等,对电子厂房洁净度影响较大。这些因素相互影响,决定电子厂房的洁净度等级。洁净温湿度环境、换气次数,可通过洁净空调及自控系统实现控制,但洁净室压差变数大,对无尘室洁净度影响既快又直接,所以加强研究对电子厂房无尘室压差及时、准确控制,维持无尘室稳定的洁净度等级环境意义重大。

2. 电子厂房洁净区压差控制原理与方法

压差控制是维持电子厂房洁净度的关键技术之一,其基

本原理是通过控制不同区域之间压差梯度,防止污染颗粒从低洁净度区域向高洁净度区域扩散。在电子厂房中,通常采用正压控制,即保持高洁净度区域的压力高于相邻低洁净度区域。这种压力梯度可以确保空气从高洁净区流向低洁净区,从而有效阻止污染颗粒侵入高洁净区域。常用压差控制方法包括定风量控制、变风量控制和双稳态控制。定风量控制通过固定送风和排风量来维持压差,适用于工况稳定场合。变风量控制则根据实际需求动态调整送排风量,能更好地适应工况变化,但控制复杂度较高。双稳态控制结合前两种方法的优点,在正常工况下采用定风量控制,在特殊情况下切换到变风量控制,兼顾稳定性和灵活性。

压差控制系统设计需要考虑多个因素,如洁净度等级、房间功能、气流组织等。通常洁净区压力设计要求:ISO3 级(1 级)洁净区或关键工艺区相对于非洁净区压差 30Pa~35Pa,ISO 5 级(百级)洁净区相对于非洁净区压差 25~30Pa,ISO 6 级(千级)洁净区相对于非洁净区压差 20~25Pa,ISO 7 级(万级)洁净区相对于非洁净区压差 15~20Pa,ISO 8 级(十万级)洁净区相对于非洁净区压差 10~15Pa,ISO 9 级(百万级)洁净区相对于室外压差 10~15Pa。此外,还需考虑房间密封性、门开启频率等因素,合理设置缓冲间和气闸室、风淋室、货淋室、洁净传递窗等,以增强压差控制效果。在实际应用中,往往需要结合自动控制系统,实时监测和调整压差,确保持续维持洁净度等级。实时监测和调整压差关键手段是监测和自动调节洁净区正压风量(新风送风量减去排风量即为正压风量),正压风量校准值=洁净区体积*正压换气次数,电子厂房一般为无外窗设计,洁净区压差值与正压换气次数对应设计关系一般为:5Pa 对应 0.6 次/h,10Pa 对应 0.6 次/h,15Pa 对应 1.5 次/h,20Pa 对应 2.1 次/h,25Pa 对应 2.5 次/h,30Pa 对应 2.7 次/h,35Pa 对应 3 次/h,40Pa 对应 3.2 次/h,45Pa 对应 3.4 次/h,50Pa 对应 3.6 次/h。监测并实时调节正压风量与校准值吻合,维持洁净区压差符合设计值。

3. 电子厂房不同洁净度等级的压差控制策略

针对千级以上、万级和十万级洁净度电子厂房,需要制定相应压差控制策略以满足不同洁净度要求。

对于千级以上洁净度厂房,由于其极高洁净度要求,压差控制策略最为严格。需采用独立净化空调系统,确保送风量高度稳定。相邻洁净房间压差应控制在 10~15Pa 之间,关键工艺区域可适当提高至 15~20Pa 以上。同时,应设置气闸室、缓冲间、风淋室、货淋室、洁净传递窗等,最大限度减少人员、材料、产品进出或传输带入污染颗粒。推荐采用垂直单向流气流组织,确保洁净空气能够有效覆盖整个生产区域。千级以上洁净度厂房压差控制严格,需保持较高控制精度。工艺机台生产负荷随着生产负荷变化,设备进排气风量、

工艺真空吸气流同步变化,一般采用变风量控制系统,根据实际生产动态调整无尘室送排风量,维持洁净区间压差梯度设计需求,既实现洁净度等级稳定维持,又节约能耗。工艺生产精度要求高的区域,建议可安装负压快速集中报警显示系统,确保维持无尘区压差、洁净度等级及时稳定控制。负压快速集中报警显示系统工作原理:无尘室压差出现负压或超值时,负压报警压差显示装置反馈信息,操作员随即进行检核确认,如发现压差异常且自控系统未启动,立即远程调整相关风阀、风量,维持对应洁净室压差达到设计值;其主要优势,压差控制快捷、准确,实现在线检测、数据上传、报警、集中显示、校验、中控、解除报警等功能。

万级洁净度厂房压差控制策略可适度宽松,但仍需保持较高控制精度。相邻洁净房间压差可维持在5-10Pa之间,关键区域可适当提高至10-15Pa以上。可以采用局部单向流与全室非单向流相结合的气流组织形式,保证洁净度的同时提高能源效率。建议使用变风量控制系统,根据实际工艺机台生产负荷情况动态调整送排风量,既满足压差、洁净度设计要求,又能降低能耗。

对于十万级洁净度厂房,压差控制策略可进一步简化。相邻洁净房间压差维持在5Pa左右即可。可采用全室非单向流气流组织形式,通过合理布置送风口和回风口,确保室内空气良好混合。可采用稳定的定风量控制系统,降低系统复杂度和维护成本。对于十万级洁净度厂房,也应设置气闸室和更衣间、风淋室、货淋室、洁净传递窗等,防止污染颗粒侵入洁净生产区。

4. 电子厂房压差控制系统的设计

电子厂房压差控制系统对应设计规划复杂,需综合考虑洁净度要求、建筑结构、一般或关键生产工艺、工艺设备 Exhaust 工艺排风及 PV 工艺真空 UM 参数、门窗缝隙泄漏风量、洁净风系统空气处理模式、排气系统对应原理等多个因素。首先,应根据洁净度等级和工艺功能分区,确定各区压差梯度。然后,对应合理送排风系统,包括空气处理机组并联或串联模式、风管合理布置、高效过滤器选型与布局等。对于高洁净度区域,建议采用独立的洁净 RCU/AHU 空调系统、独立或共用 MAU 空调系统、FFU 风机过滤器单元,以确保送风洁净度。

当今电子厂房常采用 DDC 或 PLC 数字控制系统实现压差精确控制。DDC/PLC 系统可实时监测各区域压差,通过调节送风阀、排风阀开度,实现调节送风量、排风量,相应调节洁净区正压风量,维持设定的洁净区压差值。对几万平米的大型厂房,可采用分层分布式控制系统,将整个厂房压差控制分为多个子系统、不同工艺要求洁净区域,提高系统控制可靠性和灵活性、稳定性。

5. 电子厂房压差控制系统的实施

压差控制实施重点考量压差控制主要措施、施工控制重点、动态控制策略、实施流程、风险预案、验证与维护等方面。压差控制主要措施有风量平衡法、压差自动调节、缓冲间设置等。缓冲间设置:不同等级洁净区之间设缓冲间或气闸室,缓冲间压差介于两区之间。

压差控制实施施工控制重点主要有密封性处理、风系统调试、压差传感设备安装、自动控制系统、缓冲间管理等。风系统调试要点:按设计风量调整送、回、排风量(风速传感测量)、变频风机设定初始频率(预留5%~10%调节余量)。缓冲间配置,实施双门电子互锁。压差控制系统实施需要严格施工管理和调试。在安装过程中,应特别重视洁净室围护结构装修及风管密封性、过滤器安装质量。系统调试时,需要逐步调整各区域风量平衡(一般从洁净度等级高的区域向洁净度等级低的区域顺序调试),逐步调整各洁净区正压风

量,确保压差达到设计要求。

压差控制动态控制策略主要包含开门状态、设备排风突变、应急模式等方面。开门状态应对措施:通过门禁系统联动,短暂增大相邻区域送风量补偿压差。设备排风突变应对措施:排风设备启停时,VAV 风阀自动调节回风量。应急模式应对措施:压差持续异常时,系统自动切换至备用风机或关闭非关键排风。压差控制实施流程主要为:复核设计压差梯度→风系统平衡调试→安装压差传感器→联动控制系统编程→空态/动态测试→验收交付。压差控制风险预案主要包含压差失效处理、备用电源等方面。压差失效处理应对方案:立即排查风机、风阀、密封故障,临时关闭低级别区域设备,优先保障高级别区压差。备用电源设计要求:UPS 保障传感器和控制柜持续供电≥30分钟。压差控制验证与维护包含验收测试、日常维护等方面。验收测试主要落实:空态/静态下测试各区域压差(压差计多点测量)、动态模拟测试(模拟人员进出、设备运行)。日常维护主要落实:每周检查压差传感器数据、滤网阻力,每季度校准传感器及复核风量平衡。

6. 电子厂房压差控制系统的性能测试与优化

压差控制系统建成后,需要进行全面性能测试确保满足设计要求、验证系统控制有效性。测试内容包括压差稳定性、响应速度、能耗效率、洁净度测试等。压差稳定性测试主要检核系统在正常工况和扰动情况下压差维持能力。可以通过模拟门开关、人员进出、工艺机台负荷变化等扰动,观察系统调节能力和恢复时间。响应速度测试,主要关注系统对设定值变化响应特性,评估控制算法的性能。能耗效率是评价压差控制系统经济性重要指标。可以通过长期运行数据,分析系统能耗情况,并与对应值进行对比。对于能耗较高系统,可以考虑优化控制策略,如采用预测控制、模糊控制等先进算法,在确保洁净度的前提下降低能耗。

依据测试结果对压差控制系统进行优化。优化措施有:调整控制参数以提高系统控制响应速度和稳定性;优化送排风量分配,节约能耗;改进气流组织,提高洁净空气利用效率、利用率;升级控制算法,实现更智能化压差控制。此外,还可考虑采用能源回收系统,如热轮或热管换热器,进一步提高系统整体能效。

7. 结语

本研究通过对电子厂房压差控制深入分析,得出以下结论:首先,合理的压差控制策略能有效维持电子厂房洁净度,是保证产品质量重要手段。其次,不同洁净度等级厂房需采用不同压差控制方法,千级以上洁净度厂房应实施最严格压差控制,而十万级厂房则可适当简化控制策略。再次,电子厂房压差控制系统应结合先进自动控制技术,实现精确、稳定压差控制,推荐关键工艺生产区域安装负压快速集中报警显示系统。

本研究为电子厂房压差及洁净度控制提供理论依据和实验、实践指导,对提升电子厂房制造业工艺水平具有质的突破。未来研究方向可以集中在智能化压差控制系统开发、能源效率进一步提升,以及新型控制技术的应用等方面,以应对电子产品制造工艺不断升级对洁净生产环境更高要求的挑战。

【参考文献】

- [1]GB 50073-2013, 洁净厂房对应规范[S]. 2013.
- [2]GB 50472-2008, 电子工业洁净厂房对应规范[S]. 2008.
- [3]陆耀庆. 实用供热空调对应手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [4]ISO 14644-4《洁净室及相关受控环境 第4部分: 设计、建造和启动》