

# 风机过滤单元性能指标参考限值与初期设备优选

张爽, 张万毅, 徐浩然, 陈旭, 李晨林, 王威, 林忠平

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为填补风机过滤单元(fan filter units)的研究及标准中未提供设备最优选择方式的空缺, 基于积累的大量FFU性能测试数据以及国内半导体行业的用户要求提出FFU各性能指标的参考限值, 并提出利用层次分析法(AHP)将设备性能定性评估进行量化求解, 计算各指标所占权重, 合理对FFU设备进行初期优选。总结测试数据发现, 常规工况下风机过滤单元的性能逐年提升, 表现为设备能耗显著降低、面风速均匀性更优、设备稳定性更强、噪声更小。各性能指标明确主观重要性后经层次分析法进行权重计算, 能耗性能指数EPI权重最大, 面风速均匀性权重次之, 过滤器阻力等指标权重较小。结合FFU设备性能测试结果, 利用层次总排序计算出权重占比最大的设备为最优设备。

**关键词:** 风机过滤单元; 性能指标限值; 层次分析法; 指标权重; 优选

中图分类号: TU834.8

文献标志码: A

## Performance Index Reference Limits and Initial Selection Optimization of Fan Filter Units

ZHANG Shuang, ZHANG Wanyi, XU Haoran, CHEN Xu, LI Chenlin, WANG Wei, LIN Zhongping  
(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To fill the gap in research and standards on fan filter units (FFU), this paper proposed the reference limits of each performance index of FFU based on both the accumulated multitude of testing data of commercial FFUs and the user requirements of domestic semiconductor industries. After the subjective importance of each performance index is determined, the weight calculation was conducted by adopting the analytic hierarchy process (AHP). Summarizing the test data, it is found that the performance of the fan filter units under

normal working conditions has been improved year by year, which is shown by the significant reduction of equipment energy consumption, better uniformity of surface wind speed, stronger stability of equipment, and lower noise. After the subjective importance of each performance index was clarified, the weight was calculated by the analytic hierarchy process. The weight of energy performance index (EPI) is the largest weight, followed by the airflow velocity uniformity, the filter resistance, and others. In combination with the performance test data of FFUs, the device with the largest weight ratio was calculated as the optimal device by using the total hierarchical ranking.

**Key words:** fan filter unit(FFU); performance index limits; analytic hierarchy process (AHP); index weight; optimal selection

风机过滤单元(FFU)主要由风机、箱体、过滤器及配套电控元件组成, 其安装灵活节省空间, 节能效果显著<sup>[1]</sup>。在工业洁净室中, 生产设备的可靠性很大程度上取决于生产环境的洁净度, 而FFU用在洁净生产线和组装式洁净室等场合可有效控制生产环境洁净度<sup>[2]</sup>。随着我国微电子(尤其是液晶显示面板)、生物医药等行业的迅速发展, 市场对FFU的需求量不断增加。因设备制造时采用部件和生产工艺的差异, 不同厂家所生产的FFU设备性能参差不齐<sup>[3-4]</sup>, 如何判断FFU性能合格与否并进而选择性能最优的FFU产品成为业界难题。

目前已有不少学者围绕FFU的空气动力性能与能耗性能展开FFU的性能评估研究, 李钊利用生命周期评价(LCA)方法对市场中的FFU进行生命周期内的能耗分析, 并提出过滤器的最佳更换周期<sup>[5]</sup>。FFU设备能耗可基于风机相似律或设备余压

收稿日期: 2021-10-06

第一作者: 张爽(1997—), 女, 博士生, 工学学士, 主要研究方向为水雾环境下纤维滤料动态过滤特性。

E-mail: zhangs123ny@163.com

通信作者: 林忠平(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为室内污染物控制及空气洁净技术。

E-mail: zplin99@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

与能耗的关系进行计算,一定条件下有效减少FFU设备的性能测试工作,但不同系列FFU设备之间性能差异明显<sup>[6-7]</sup>,计算方法仍受限。此外,近些年对FFU设备的性能优化工作也在不断推进。FFU的箱体结构较大程度影响出风均匀性<sup>[8]</sup>,安装导流板、采用渐扩流道、设置均流板、改变均流板孔隙等措施均能起到改善FFU出风效果<sup>[9-10]</sup>。采用无下隔板、向内挡板及斜向上挡板的FFU节能性良好<sup>[11]</sup>。FFU设备结构与离心风机性能不断被优化,使得FFU的性能不断提高。

行业标准《风机过滤机组》(JG/T388—2012)提到了FFU部分基本性能参数在额定风量下的要求值,如1200×1200mm(4ft×4ft),额定风量为2000m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,机外静压分为≥50Pa标准型和≥120Pa高静压型,输入功率根据机外静压(标准型和高静压型)分别要求≤330W和≤450W等<sup>[12]</sup>。但随着用户要求的提高以及FFU产品性能的不不断提升,目前国内一线品牌产品相应工况下的功率已远低于该标准中的功率限值,因此该标准所提出的性能参数与实际差距较大。另一方面,当不同厂家的FFU展现出不同的“优势性能指标”时,怎样合理进行选择可以有效确保选用最优产品以满足用户需求,经验不足的人员对此较有困难。因此有必要提出FFU各性能指标详细的参考限值和各重要指标之间所占权重的计算方法来更好地进行产品性能评估,而层次分析法是一种可以将主观判断进行定量分析继而进行合理商品选择的有效方式<sup>[13]</sup>。

因此,考虑到FFU设备性能各具优势以及对应标准中尚未给出全面的指标参考限值,基于积累的大量FFU测试数据与经验,提出FFU设备能耗性能指数(energy performance index, EPI)、空气动力效率、整机效率、面风速均匀性、声强、振动速度、电流谐波畸变率(谐波)、压降、过滤器效率等性能指标参考限值及现阶段较优产品的性能水平,结合层次分析法给出计算各性能指标权重的方法,并以3种FFU设备为例对具有不同性能优势的FFU设备进行初始阶段最优选择,帮助终端用户选择更符合洁净室需求的FFU设备,解决多指标条件下选择不一致的问题。

## 1 FFU性能指标参考限值

一般而言,FFU的主要性能参数指标包括:风量、功率、空气动力效率、整机效率、EPI、面风速

均匀性、噪声。随着使用要求的不断提高,用户对FFU设备的电流谐波畸变率、振动速度、过滤器阻力、过滤器效率、漏风量的关注度越来越高。近期,中国制冷与空调工业协会(CRAA)发布了关于FFU性能试验方法的团体标准《风机过滤单元实验方法》(T/CRAA 435—2020),将以上性能指标的检测方法进行规范<sup>[14]</sup>。

笔者实验室曾负责数10个面板及半导体项目(包括京东方、华星光电、惠科、中电熊猫、天马、三星、柔宇、Intel、信利等)的FFU测试与评估工作,实验室进行FFU性能检测中使用的试验台如图1所示,基于终端用户的实际需求以及大量FFU样品的测试数据提出1200mm×1200mm(4ft×4ft)规格FFU在典型应用工况条件(0.45m·s<sup>-1</sup>@100Pa)下各指标对应的参考限值并展示现阶段国内较优的FFU产品的性能水平(表1),以补充JG/T388—2012标准中FFU性能指标参考值,为FFU设备的生产和优化提供参考。以EPI为例,图2反映了2009—2018年所测试的769台FFU样品中0.45m·s<sup>-1</sup>面风速(余压0~150Pa)工况条件下的EPI水平,进一步从图2数据中选取2015—2018年同规格FFU在同工况(0.45m·s<sup>-1</sup>@100Pa)条件下的测试数据来代表近些年国内FFU设备EPI的发展,如图3可见,市场中FFU设备整体性能水平有所提高。

## 2 层次分析法进行FFU综合性能评估

### 2.1 建立层次结构模型

在不同FFU供应商之间进行产品最优选择时,通过比较所有设备在相同工况条件下的各项性能指标,很容易得到单一性能指标下产品间的优劣,但综合主要性能指标判断不同产品的优劣排序较为困难。根据项目需求选择最优FFU设备时,需要基于哪些性能指标以及明确各指标之间的相对重要性即各指标在FFU设备优选时所占的权重,目前还没有广泛接受的方法。层次分析法(A analytical Hierarchy Process, AHP法)可将定性分析和定量计算相结合,能够有效解决决策规划过程中多指标的最优化选择问题<sup>[15]</sup>。

基于标准《风机过滤单元实验方法》(T/CRAA 435—2020)所涉及的FFU相关性能指标,假定各性能指标的主观重要性(实际应用中各性能指标相对重要性排序需获得专家或终端用户认可后作

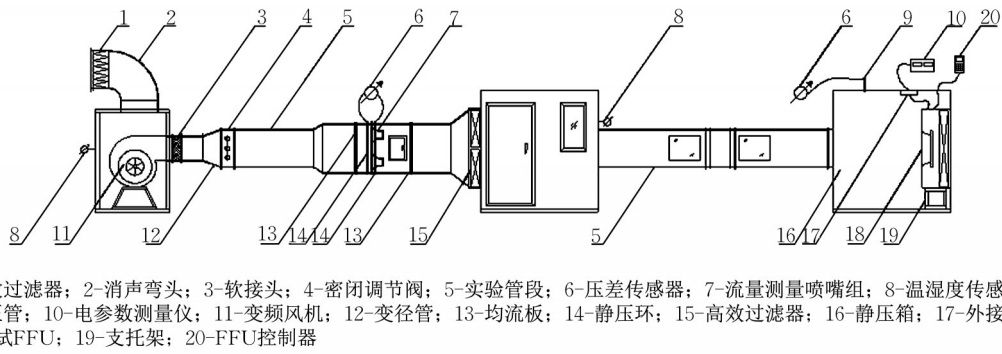


图1 FFU性能测试试验台示意

Fig. 1 Schematic diagram of FFU performance test bench

表1 各性能指标参考限值及较优性能范围

Tab. 1 Reference limits of each performance index and better performance range

性能指标	参考限值	较优性能范围
能耗性能指数(EPI)	$\leq 8W \cdot (Nm^3 \cdot min^{-1})^{-1}$	$\leq 6.5W \cdot (Nm^3 \cdot min^{-1})^{-1}$
空气动力效率	$\geq 20\%$	$\geq 25\%$
整机效率	$\geq 45\%$	$\geq 55\%$
过滤器阻力 <sup>1)</sup>	玻纤 $\leq 110Pa$ ; PTFE $\leq 90Pa$	玻纤 $\leq 90Pa$ ; PTFE $\leq 70Pa$
过滤器效率 <sup>2)</sup>	H13、H14或U15	H13、H14或U15
面风速均匀性	$\leq 20\%$	$\leq 15\%$
振动速度(四点均值)	$\leq 1.0 mm \cdot s^{-1}$	$\leq 0.8 mm \cdot s^{-1}$
声强 <sup>3)</sup>	$\leq 58dB(A)$	$\leq 54dB(A)$
电流谐波畸变率 <sup>4)</sup>	$\leq 15\%$	$\leq 8\%$

注: 1) 过滤器阻力给出的参考限值及较优性能范围以滤材进行区分, 过滤效率包含当前FFU使用高效或超高效过滤器常见等级(H13、H14或U15)。2) 过滤器最易穿透粒径效率(MPPS)效率应满足要求。3) 声强受设备转速影响明显, 不同设备在 $0.45m \cdot s^{-1}$ @100Pa工况下对应的转速不同。4) 电流谐波畸变率受风机及控制模块影响。

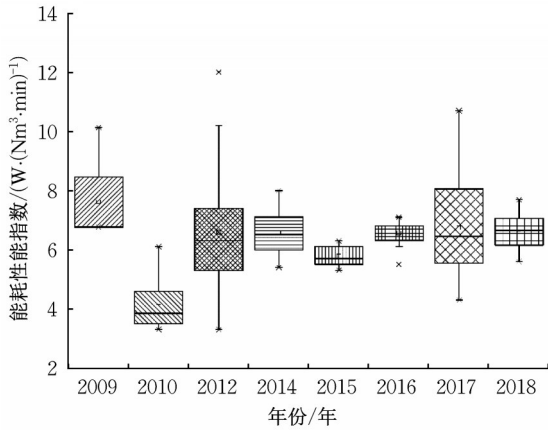


图2  $0.45m \cdot s^{-1}$ 所有余压点的能耗性能指数历年数据分布  
Fig. 2 Distribution of EPI of all residual pressure points over the years at  $0.45m \cdot s^{-1}$

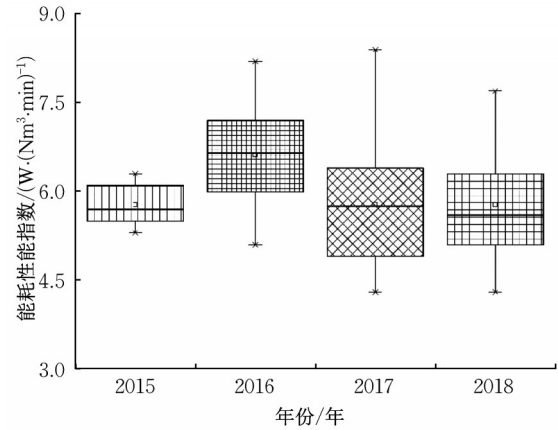


图3  $0.45m \cdot s^{-1}$ @100Pa的能耗性能指数历年数据分布  
Fig. 3 Distribution of EPI at  $0.45m \cdot s^{-1}$  and 100Pa over the years

为计算依据), 以实验室测试的FFU设备进行优选为例, 尝试将层次分析法应用在多性能指标设备的最优化选择中。由于过滤器效率是确保室内生产环境满足工艺要求的关键, 因而是参与产品竞选的前提条件, 功率、功率因数、风机转速及整机效率可以通过其他相关性能指标反映, 因此在重要性比较中,

不再将这些参数列入性能指标间相对重要性的比较范围。根据用户需求, 对各FFU进行性能评估时基于以下指标并予以相应的标号: 过滤器阻力( $A_1$ )、EPI( $A_2$ )、面风速均匀性( $A_3$ )、电流谐波畸变率( $A_4$ )、振动速度( $A_5$ )、声强( $A_6$ )、空气动力效率( $A_7$ )。一般地, 由于FFU需要长期不间断运行以保障生产空间

的洁净度,其对室内空气洁净度的控制及其运行能耗成本是终端用户最为关心的2个要素。对于单台FFU设备,FFU能耗性能指数EPI则直接决定设备的基础运行成本。高效或超高效空气过滤器的效率及面风速均匀性都会直接影响室内空气洁净度,但前者起决定性作用且因其作为产品合格的基本准入指标而不在本研究讨论范畴;因此在本研究所涉及FFU指标中,EPI最为重要,面风速均匀性次之。相比较而言,空气动力效率、振动速度及声强3个指标分别对FFU实际运行能耗、运行时对环境及工艺设备的影响及洁净室噪声具有影响,重要程度相对EPI及面风速均匀性弱些,但这3个指标之间的相对重要程度不容易界定,一般给出同等权重。由于过滤器阻力对运行能耗的影响可在EPI中反映,风机电流谐波畸变率一般使用情况下也均满足限值或安全需求,因此这2个指标重要程度相对最低。综上,本研究将FFU各性能指标的重视度由大到小排序

为:EPI、面风速均匀性、空气动力效率以及振动速度以及声强、过滤器阻力以及电流谐波畸变率,并结合产品层构建层次结构模型。

基于某项目3台不同厂家生产的相同尺寸的FFU(分别表示为 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ )在相同工况下测试结果进行FFU设备初期优选,各性能参数测试结果详情见表2。从测试结果看,这3台FFU设备在同工况下性能测试结果差异明显且各具优势,如设备 $F_1$ 具有良好的面风速均匀性,设备 $F_2$ 空气动力效率高但声强较大。这主要因为不同厂家在设备生产过程中使用的材料、设备元件、箱体结构、生产加工工艺不同造成的。

### 2.2 FFU设备最优化选择计算

利用层次分析法进行FFU设备初期选择时,最重要是对各参考指标重要性进行主观判断(构造判断矩阵),再利用数学方法获得指标权重、最优产品。

表2 3种FFU设备测试结果

Tab. 2 Results of three tested FFU

产品	过滤器阻力/ Pa	EPI/(W·(Nm <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> )	面风速均匀性/%	电流谐波畸变 率/%	振动速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	声强/dB(A)	空气动力效率/%
F <sub>1</sub>	72	7.9	11.2	4.8	0.5	57.1	21.4
F <sub>2</sub>	52	5.9	12.0	2.7	0.3	57.5	29.3
F <sub>3</sub>	68	7.0	15.0	3.6	0.3	54.9	24.6

在主观排序计算中,需要对成对指标之间的重要性比较判断,并根据一定的比例标度构造判断矩阵,采用的比例标度如表3所示。

表3 比例标度

Tab. 3 Proportional scale

标度	含义
1	表示2个元素相比具有同样的重要性
3	表示2个元素相比前者比后者稍重要
5	表示2个元素相比前者比后者明显重要
7	表示2个元素相比前者比后者强烈重要
9	表示2个元素相比前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	因素 <i>i</i> 比 <i>j</i> 比较的判断 $a_{ij}$ ,则因素 <i>j</i> 与 <i>i</i> 比较的判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$

在第1层问题中有 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 各指标,则构造的判断矩阵 $A$ 可以表示为

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $a_{ij}$ 表示纵列 $A_i$ 与横列 $A_j$ 相比的结果。

计算判断矩阵的最大特征根和特征向量可使用和积法对矩阵进行求解,计算步骤如下:①将判断矩

阵 $A$ 每一列正规化

$$b_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{ik}, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

②将 $B=(b_{ij})_{n \times n}$ 按行相加。③将步骤②所得的行和向量正规化,得排序权重向量 $w$

$$w_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m b_{ij} \quad (3)$$

④将权向量 $w$ 左乘矩阵 $A$ ,求解最大特征值 $\lambda_{\max}$ 存在且唯一

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (4)$$

⑤判断两两指标之间的标度比例是否满足一致性,需要进行一致性检验。定义一致性指标CI为 $(\lambda - n)/(n - 1)$ ,CI为零,有完全的一致性;CI接近于零,有满意的一致性;CI越大,不一致越严重。为了衡量一致性指标的大小,引入随机一致性指标RI,RI是多次( $>500$ 次)重复进行随机判断矩阵特征值的计算后取算术平均值得到的,如表4所示, $N$ 越大表示判断矩阵出现一致性偏离的可能性越大。考虑一致性偏离是由随机原因造成,因此在检验判断矩阵是否具有满意的一致性时,通常将一致性指标CI与随机一致性指标RI的比值即一致性比率(检验系数)是否足够小来决定是否通过一致性检验。检验系

数:CR为CI与RI比值,一般认为一致性比率CR小于0.1时,认为判断矩阵中不一致程度在容许范围内,可通过一致性检验。否则需要重新调整构造判断矩阵,即对 $a_{ij}$ 进行调整,直到一致性检验通过即可。⑥层次总排序。计算某一层所有因素对于最高层(总目标)相对重要性的权值为层次总排序,即指标层 $n$ 个元素对评价总目标的排序为 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 。产品层对上层各指标的层次单排序为 $b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{mj}$  ( $j=1, 2, 3, \dots, n$ ),产品层的总排序 $W$ (产品层第 $m$ 个产品对总目标的权值为: $W_m = \sum_{j=1}^n a_j b_{mj}$ 。

$$W_1 = a_1 b_{11} + a_2 b_{12} + \dots + a_n b_{1n}$$

$$\dots \quad (5)$$

$$W_m = a_1 b_{m1} + a_2 b_{m2} + \dots + a_n b_{mn}$$

基于以上计算过程,将FFU各性能指标或各产品之间某一性能指标下的性能优劣所构造的判断矩阵先进行每一列正规化后求行和、再正规化获得权重向量,在一致性满足的条件下,根据层次总排序的计算方式将每一性能指标的权重与每一产品各指标所占权重相乘,继而得到各产品在综合评估下分别占的权重,权重越高代表FFU设备在该确定的指标重要性排序中的优势越明显。

表4 随机一致性指标

Tab. 4 Random consensus index

N	RI	N	RI	N	RI
1	0	4	0.90	7	1.32
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24	9	1.45

根据确定的各性能指标的重要性排序和层次分析法的比例标度,以重要性较弱的过滤器阻力( $A_1$ )和电流谐波畸变率( $A_4$ )2个指标为对比基准,将其余指标分别与之进行重要性比较并予以相应的标度值。相比之下,EPI( $A_2$ )强烈重要,标度定为7;面风速均匀性( $A_3$ )明显重要,标度定为5;空气动力效率( $A_7$ )、振动速度( $A_5$ )、声强( $A_6$ )稍重要,标度均定为3。之后按照式(1)至(5)求解,表5至13对计算结果即各性能指标( $A_{index}$ )之间和产品之于每一指标构建的判断矩阵、各指标(产品)权重及一致性检验结果进行汇总。

由表5可知,各指标权重计算最大特征值 $\lambda_{max} = 7.0$ ,CI为0,CR为0,因此一致性检验系数CR小于0.1,各指标构造判断矩阵的不一致性在容许范围内。此外,由表6至表12可见,各个指标下3个产品权重各不相同,但最大特征值 $\lambda_{max} = 3.0$ 及一致性检验结果相同,判断矩阵一致性均通过检验。由

表5 各指标权重分析

Tab. 5 Analysis of the weight of each index

$A_{index}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	权重
$A_1$	1	1/7	1/5	1	1/3	1/3	1/3	0.043 5
$A_2$	7	1	7/5	7	7/3	7/3	7/3	0.304 3
$A_3$	5	5/7	1	5	5/3	5/3	5/3	0.217 4
$A_4$	1	1/7	1/5	1	1/3	1/3	1/3	0.043 5
$A_5$	3	3/7	3/5	3	1	1	1	0.130 4
$A_6$	3	3/7	3/5	3	1	1	1	0.130 4
$A_7$	3	3/7	3/5	3	1	1	1	0.130 4

表6 指标过滤器阻力( $A_1$ )的各产品权重

Tab. 6 Weight of each product at filter resistance ( $A_1$ )

产品	$F_1$	$F_2$	$F_3$	权重
$F_1$	1	1/3	1/2	0.166 7
$F_2$	3	1	3/2	0.500 0
$F_3$	2	2/3	1	0.333 3

表7 指标能耗性能指数( $A_2$ )的各产品权重

Tab. 7 Weight of each product at energy performance index ( $A_2$ )

产品	$F_1$	$F_2$	$F_3$	权重
$F_1$	1	1/3	1/2	0.166 7
$F_2$	3	1	3/2	0.500 0
$F_3$	2	2/3	1	0.333 3

表8 指标面风速均匀性( $A_3$ )的各产品权重

Tab. 8 Weight of each product at airflow velocity uniformity ( $A_3$ )

产品	$F_1$	$F_2$	$F_3$	权重
$F_1$	1	3/2	3	0.500 0
$F_2$	2/3	1	2	0.333 3
$F_3$	1/3	1/2	1	0.166 7

表9 指标电流总谐波( $A_4$ )的各产品权重

Tab. 9 Weight of each product at total harmonic distortion of electric current ( $A_4$ )

产品	$F_1$	$F_2$	$F_3$	权重
$F_1$	1	1/3	1/2	0.166 7
$F_2$	3	1	3/2	0.500 0
$F_3$	2	2/3	1	0.333 3

表10 指标振动速度( $A_5$ )的各产品权重

Tab. 10 Weight of each product at vibration velocity ( $A_5$ )

产品	$F_1$	$F_2$	$F_3$	权重
$F_1$	1	1/2	1/2	0.200 0
$F_2$	2	1	1	0.400 0
$F_3$	2	1	1	0.400 0

表13可见,各产品在该性能指标评估体系下的权重可用式(5)计算得来。从指标层看,各指标的权重与各指标的重要性排序一致。其中EPI权重最高,过滤器阻力和谐波权重较小,表明终端用户对能耗的

表11 声强( $A_6$ )产品权重分析Tab. 11 Weight of each product at sound intensity level ( $A_6$ )

产品	$F_1$	$F_2$	$F_3$	权重
$F_1$	1	2	2/3	0.333 3
$F_2$	1/2	1	1/3	0.166 7
$F_3$	3/2	3	1	0.500 0

表12 指标空气动力效率( $A_7$ )产品权重分析Tab. 12 Weight of each product at aerodynamic power ( $A_7$ )

产品	$F_1$	$F_2$	$F_3$	权重
$F_1$	1	1/3	1/2	0.166 7
$F_2$	3	1	3/2	0.500 0
$F_3$	2	2/3	1	0.333 3

表13 各指标下不同FFU产品权重

Tab. 13 Weights of different FFU products under each index

产品	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	产品权重
$F_1$	0.166 7	0.166 7	0.500 0	0.166 7	0.200 0	0.333 3	0.166 7	0.265 0
$F_2$	0.500 0	0.500 0	0.333 3	0.500 0	0.400 0	0.166 7	0.500 0	0.407 0
$F_3$	0.333 3	0.333 3	0.166 7	0.333 3	0.400 0	0.500 0	0.333 3	0.327 0

关注度最高,过滤器阻力和谐波的关注度相对较低。从产品层看,3个不同厂家的同规格FFU设备, $F_2$ 权重最大,因此终端用户在确定的权重体系下,综合各性能指标可知, $F_2$ 设备可视为最优选择。但需要注意的是,用户在获得FFU设备的测试结果后,必须根据项目实际需求确定性能指标主观重要性排序,之后结合AHP计算方法,综合所选指标对不同FFU设备进行对比,继而获得该评价标准下的最优产品。

### 3 结论

根据用户需求及大量FFU性能检测结果提出FFU常用性能指标参考限值并总结FFU设备可达到的较优水平,为FFU设备生产和优化提供数据支撑。另一方面,提出利用层次分析法对FFU设备进行初期优选,解决多指标情况下主观判断不一致导致选择困难的问题,并以某项目3台FFU为例计算各参考指标的权重,确定最优选择。主要结论如下:

(1) 总结实验室大量FFU性能测试结果发现,近年来国内FFU设备性能水平整体有所提高。

(2) 提出了FFU的主要性能指标包括能耗性能指数、空气动力效率、整机效率、面风速均匀性、声强、振动速度及谐波畸变率的分级参考限值,为FFU相关标准的制订提供基础支撑。

(3) 层次分析法能够将定性问题转换为定量分析,用户可结合比例标度和各性能指标相对重要性主观排序,利用数学方法定量计算各指标以及每一指标下各产品权重,结合层次总排序获得最符合要求的设备。

(4) 由于不同洁净厂房需求存在差异,各终端用户在应用层次分析法选择最合适的FFU设备时,

需要根据具体项目实际需求对各性能指标的相对重要性进行主观排序,并保证排序结果受认可。

#### 作者贡献声明:

张爽:进行研究构思、整理数据、起草论文。

张万毅:对主要学术性内容提出建议、做出修订。

徐浩然:参与设备性能测试、2016年之前数据的选取、整理。

陈旭:参与设备性能测试、2016年之前数据的选取、整理。

李晨林:参与设备性能测试、2016年之后数据的选取、整理。

王威:参与设备性能测试、2016年之后数据的选取、整理。

林忠平:对重要学术性内容提出建议、做出修订。

#### 参考文献:

- [1] 汪小霞. FFU送风方式在净化空调系统中的应用[J]. 能源研究与利用, 2005(6):40.  
WANG Xiaoxia. Application of FFU ventilating mode in purifying air-conditioning system [J]. Energy Research and Utilization, 2005(6): 40.
- [2] 贾琼, 林忠平, 高乃平. 典型风机过滤单元(FFU)性能分析与评价[J]. 洁净与空调技术, 2017(2):1.  
JIA Qiong, LIN Zhongping, GAO Naiping. The performance analysis and evaluation of typical fan filter unit [J]. CC&AA, 2017(2):1.
- [3] XU T. Characterization of minienvironments in a clean room: Design characteristics and environmental performance [J]. Building & Environment, 2007(42): 2993.
- [4] 林忠平, 肖小野, 潘冬梅, 等. 风机过滤单元(FFU)的性能试验研究[J]. 建筑科学, 2008(24): 51.  
LIN Zhongpin, XIAO Xiaoye, PAN Dongmei, et al. Experimental study on the performance of fan filter unit [J].

- Building Science, 2008, (24): 51.
- [5] 李钊, 林忠平, 吴昌甫, 等. 风机过滤单元生命周期能耗分析[J]. 洁净与空调技术, 2011(3): 54.  
LI Zhao, LIN Zhongping, WU Changfu, *et al.* The LCA for fan filter units' energy consumption [J]. CC&AA, 2011 (3): 54.
- [6] 王登, 陈思华, 林忠平. 风机过滤单元(FFU)空气动力及能耗性能预测研究[J]. 洁净与空调技术, 2018(100): 5.  
WU Deng, CHEN Sihua, LIN Zhongping. Research on the prediction of aerodynamic performance and energy consumption of FFU[J]. CC&AA, 2018(100): 5.
- [7] 陈天柱, 张鑫, 林忠平. 风机过滤单元的能耗估算模型[J]. 洁净与空调技术, 2020(2):102.  
CHEN Tianzhu, ZHANG Xin, LIN Zhongping. Research on a new energy consumption estimation formula of fan filter unit [J]. CC&AA, 2020(2): 102.
- [8] 林忠平, 肖小野. 风机-过滤器单元结构组件对其性能影响的初步探讨[J]. 暖通空调, 2010(40): 144.  
LIN Zhongpin, XIAO Xiaoye. Preliminary study of fan-filter unit performance relating to the constituent components [J]. HV&AC, 2010(40): 144.
- [9] HU C S, CHUAH Y K, HUANG S C. Performance comparison of axial fan and fan-filter unit (FFU) type clean rooms by CFD [J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108 (1): 1014.
- [10] 贾琼. 风机过滤单元(FFU)结构优化及性能探究[D]. 上海: 同济大学, 2017.  
JIA Qiong. The structure optimization and performance research of fan filter unit (FFU) [D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [11] 王燕芹. 风机过滤单元内部结构的优化及性能检测台的研制[D]. 天津: 天津大学, 2011.  
WANG Yanqin. The optimization of the internal structure of the fan filter unit and the development of the performance test bench[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 风机过滤器机组: JG/T388—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Fan filter unit: JG/T388—2012 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd, 2012.
- [13] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18 (5): 148.  
GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Senior engineer study and applications of analytic hierarchy process [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5):148.
- [14] 中国制冷空调工业协会. 风机过滤单元试验方法[S/OL]. [2021-10-05]. <http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?930.html>.  
China Refrigeration and Air Conditioning Industry Association. Testing fan filter units [S/OL]. [2021-10-05]. <http://www.chinaacac.cn/chinaacac2/news/?930.html>.
- [15] 赵焕臣. 层次分析法: 一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.  
ZHAO Huanchen. Analytic hierarchy process: A simple new decision method[M]. Beijing: Science Press, 1986.