

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.01.017

出风罩结构改型设计对多翼离心风机性能的影响

林圣全¹, 丁云斌¹, 李嘉渊², 谢林君³

(1. 浙江友邦集成吊顶股份有限公司, 浙江 海盐 314300; 2. 海盐县科学技术局, 浙江 海盐 314300;
3. 浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:为了改善小型多翼离心风机出口存在的气流死角及大面积旋涡现象,在原风机结构基础上通过调整出风罩倾斜角对其进行改型设计,并结合数值模拟和实验测量的方法,研究出风罩改型设计对多翼离心风机性能的影响。结果表明:根据出口气流组织分布特点对出风罩倾斜角作相关调整,能够有效改善风机内部流体流动情况,减小旋涡强度及其影响区域,增大有效流通面积进而达到提高风机性能及优化噪声的效果。分析改型前后风机气动性能和噪声测试结果可知,改型风机出口静压提升约20 Pa,最大全压效率较原型机提升约4.7%。同时,由于出风罩倾斜角度的增加减小了叶轮出流对风机出口左侧壁面的冲击,从而使风机气动噪声得到控制,各频段A计权声压级平均降低3.5 dB。研究结果证明该出风罩结构改型设计方法不仅能提高风机性能,还能达到降低噪声的效果,具有一定工程应用价值。

关键词:多翼离心风机;出风罩倾斜角;降噪;有效流通面积;ANSYS FLUENT 软件

中图分类号:TH432 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)01-0088-06

Influence of Exhaust Hood Retrofit Design on Performance of Multi-Blade Centrifugal Fan

LIN Shengquan¹, DING Yunbin¹, LI Jiayuan², XIE Linjun³

(1. Zhejiang Youpon Integrated Ceiling Co., Ltd., Haiyan, Zhejiang 314300, China;

2. Haiyan County Science and Technology Bureau, Haiyan, Zhejiang 314300, China;

3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to improve the airflow dead angle and large-area vortex phenomenon at the exit of the small multi-blade centrifugal fan, the exhaust hood angle was adjusted on the basis of the original fan structure. And combined with numerical simulation and experimental measurement methods, the influence of the exhaust hood modification design on the performance of the multi-blade centrifugal fan was studied. The results show that according to the distribution characteristics of the outlet air distribution, the relative adjustment of the inclination angle of the exhaust hood can effectively improve the flow of the fluid inside the fan, reduce the vortex intensity and its influence area, and increase the effective circulation area to improve the performance of the fan and optimize the effect of the noise. Analysis of the aerodynamic performance and noise test results of the fan before and after the modification shows that the static pressure of the modified fan outlet is increased by about 20 Pa, and the maximum total pressure efficiency is about 4.7% higher than that of the prototype. At the same time, due to the increase of the inclination angle of the exhaust hood, the impact of the impeller outflow on the left wall surface of the fan outlet is reduced, so that the aerodynamic noise of the fan is controlled, and the sound pressure level of the A-weight is reduced by 3.5 dB on average. The research results show that the modified design method of the hood can not only improve the performance of the fan, but also achieve the effect of reducing noise, which has certain engineering application value.

Keywords: multi-blade centrifugal fan; exhaust hood angle; noise reduction; effective circulation area; ANSYS FLUENT

收稿日期:2018-07-28;修回日期:2018-11-29

第一作者简介:林圣全(1974),男,浙江瑞安人,浙江友邦集成吊顶有限公司技术总监,友邦智能家居研究院副院长,海盐县创新团队领军人物,主要从事集成吊顶、风机的研究设计。E-mail:lsq88@126.com

多翼离心风机因其大流量系数、高压力系数,以及低噪声等特点在国民经济建设及日常生活中发挥着十分重要的作用^[1]。但由于多翼离心风机叶轮外径大、蜗壳宽度小,叶轮与蜗壳不匹配,导致蜗壳内气体流动分离严重,风机效率低^[2]。因此,如何在有限空间内设计出低噪声、高效率的多翼离心风机,对拓宽风机应用范围、发展节能环保型产品具有重要意义。

目前国内外学者对多翼离心风机的研究主要集中在集流器^[3]、蜗壳型线^[4]、蜗舌^[5]以及叶轮^[6]的改型设计,而对出风罩结构的研究尚不多见。课题组以某抽油烟机用多翼离心风机为研究对象,通过改变出风罩壁面倾斜角,研究出风罩结构对多翼离心风机性能的影响。

1 风机模型及其数值模拟方法

1.1 风机模型及网格的划分

原风机模型为抽油烟机用小型单进气多翼离心风机,具体结构图如图1所示。其中叶轮采用翼型叶片,风机主要结构参数为:蜗壳宽度 $b_1 = 82 \text{ mm}$, 叶轮内径 $D_1 = 180 \text{ mm}$, 叶轮外径 $D_2 = 210 \text{ mm}$, 叶片进口安装角 $\beta_{1A} = 73^\circ$, 叶片出口安装角 $\beta_{2A} = 160^\circ$, 叶片数 $z = 32$, 风机设计转速 $n = 1\ 000 \text{ r/min}$ 。

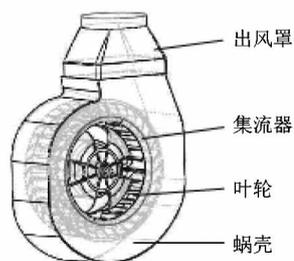
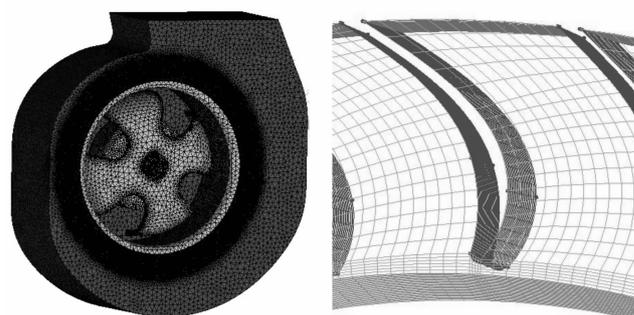


图1 原风机结构

Figure 1 Original fan structure

将多翼离心风机计算模型划分为4个区域:风机进口、风机出口、蜗壳区域以及叶轮区域。另外,为保证风机进出口气流得到充分发展^[7],在利用SolidWorks进行三维建模时将进出口段分别进行适当地加长处理。由于气体在多翼离心风机内部为非常复杂的三维非对称流动^[8],而风机的网格质量和数量均会对CFD数值计算结果造成影响,因此采用ANSYS/ICEM软件对计算模型进行混合网格的划分,其中蜗壳采用适应性较强的非结构化四面体网格,而叶轮和进出口区域则采用质量高、网格数量少、有利于提高计算精度并缩短计算时间的六面体网格^[9],具体网格形式如图2所示。为保证计算结果的准确性,分别对蜗壳壁面和叶轮叶片进行边界层加密,并根据湍流模型

近壁方程的要求保证各区域网格 y^+ 在 $30 \sim 70$ 范围内。



(a) 蜗壳四面体网格

(b) 叶轮六面体网格

图2 网格模型

Figure 2 Grid model

为避免网格误差对数值计算结果造成影响,通过设计不同密度的网格,对原风机模型进行网格无关性验证,具体结果如表1所示。从表中可知,当网格数为3 246 751时风机流量已达最大值,继续增大网格密度对数值模拟结果准确性的提升贡献不大,因此,综合考虑计算精度和计算效率,网格4的预测结果较为合理,最终确定整个计算域的网格数为3 246 751。

表1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence verification

序号	网格数	风量 $Q / (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
1	1 324 675	187
2	1 946 734	203
3	2 462 186	246
4	3 246 751	260
5	3 863 265	261
6	4 129 756	259

1.2 计算方法和边界条件设置

利用CFD商业软件ANSYS FLUENT 17.0对多翼离心风机进行三维数值模拟计算,边界条件设置为压力入口和压力出口,采用 $k-\omega$ SST 双方程计算模型,并基于压力隐式求解,定义叶轮区域为动参考系模型 (moving reference frame, MRF),且绕 z 轴旋转,其它区域为静区域。定义叶轮叶片所有吸力面和压力面为移动壁面,并设置旋转方式为旋转跟随运动。压力速度耦合离散格式分别选择SIMPLE算法和PRESTO!格式;能量方程、动量方程以及湍流耗散方程均采用二阶迎风格式,根据流体运动连续方程,设置 X, Y 和 Z 方向上的速度分量及湍流计算中 k 和 ε 的收敛残差均为 10^{-4} 。

1.3 气动性能试验原理及其设备

风机性能测试在空气性能试验台上完成,具体装

置如图3所示。待测风机通过连接器与性能测试装置相连,风机出口气流依次通过连接器、十字整流器、扩压段、减压筒及变直径孔板后流出。性能试验基于孔板法测量,通过更换不同直径大小的孔板测量各个工况点的动态测试数据。实验过程严格遵循 GB/T 17713—2011^[10] 外排式吸油烟机空气性能试验方法进行,被测风机在额定频率及额定电压下工作,并在稳定运行 1 h 后进行测量,以减小测量误差,提高试验准确度。

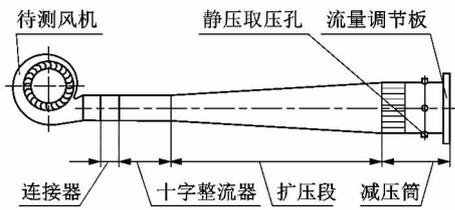


图3 气动性能试验装置

Figure 3 Pneumatic performance test device

为验证数值计算结果的可靠性,将试验过程中部分运行工况进行数值模拟计算,并将结果绘制成如图4所示静压-流量性能曲线。试验过程中静压取4次测量值的平均值。

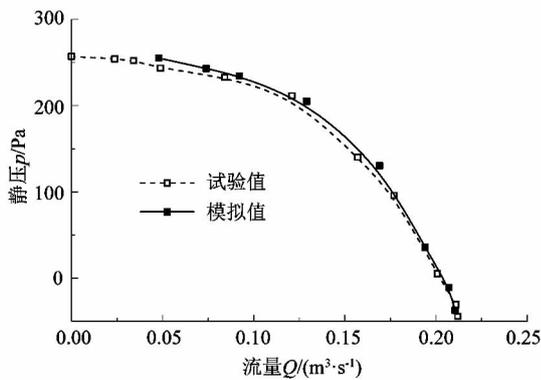


图4 原风机性能曲线

Figure 4 Original fan performance curve

分析图4可知,试验测量与数值模拟所得静压均随流量的增大呈线性下降,两者整体趋势基本一致,且相对误差保持在6%以内。分析误差原因为:小流量工况下,由于出口回流较大,风机内部能量损失增多,其中泄漏损失减少流量,而由于气体黏性及流道形状不同导致的摩擦损失及涡流损失则会降低风机实际压力,导致数值模拟与实验测量存在一定偏差,但随流量的增加,两者误差逐渐减小,性能曲线趋于重合。由此证明文中数值计算模型及计算方法是合理的,其预测风机性能的结果具有一定的可信度。

2 模拟结果与分析

根据数值计算结果得知原风机在 $n = 1\ 000\ \text{r/min}$ 设计工况点下风量 $Q_{\text{BEP}} = 260\ \text{m}^3/\text{h}$,为研究不同工况下风机内部流体流动特性,选定 $0.6Q_{\text{BEP}}$, Q_{BEP} 及 $1.4Q_{\text{BEP}}$ 3种流量工况进行分析。图5为不同工况点下,1/2倍叶高处截面在半径 $r = 110\ \text{mm}$ 处叶轮出口径向速度沿方位角 φ 的分布,其中图5(a)给出了具体的监测位置。从图5(b)中可看出,叶轮出口径向速度沿轴向分布很不均匀,3种工况下径向速度均在方位角 30° 区域附近出现陡降,并逐渐降至负值,说明风机出口附近区域存在回流现象,叶轮叶道处于堵塞状态,气体流动情况不理想。

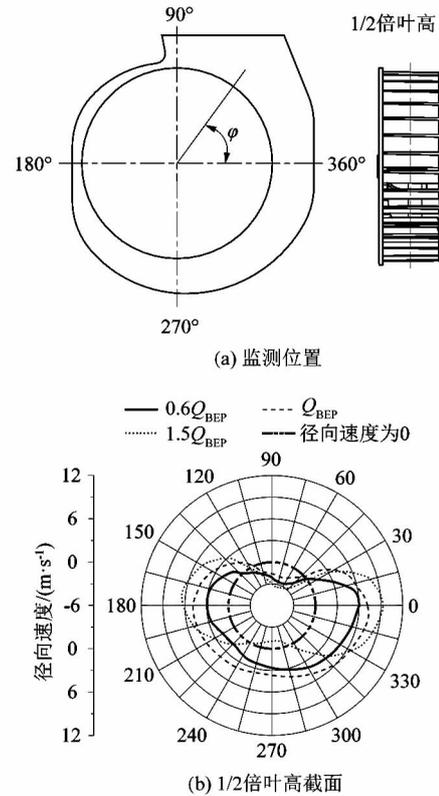


图5 不同工况叶轮出口径向速度分布

Figure 5 Radial velocity distribution of impeller outlet under different working conditions

为了更好地研究风机内部流体流动情况,图6给出了设计工况点下原风机出口速度流线图。从图中可知,原风机内部流场紊乱,流体流动情况较差。受蜗壳出口倾斜角度的影响,气流经叶轮旋转加速后出流存在一定速度角,从而对蜗舌侧出风罩壁面(区域A)形成冲击,导致气流死角及大面积旋涡的产生,风机出口有效流通面积减小。而出口气流组织的恶化,进一步加大了蜗舌区域的回流程度,部分流体通过蜗舌间隙

重新流入蜗壳,另一部分则直接流回叶轮通道进入风机内部,与正在加速的气流发生正面冲击,导致叶轮通道堵塞、出现明显的反向二次流现象。另外,由图中区域B流线分布情况知,出风罩侧壁靠近蜗舌附近区域翻转的气流与风机出口气流混合后径向速度增大,整体向出风罩外侧壁方向偏移,并逐渐演化为出风罩侧壁翻转气流与风机出口主气流2股流体向上螺旋攀升,增大了风机内部流动损失,并对风机风量产生影响。

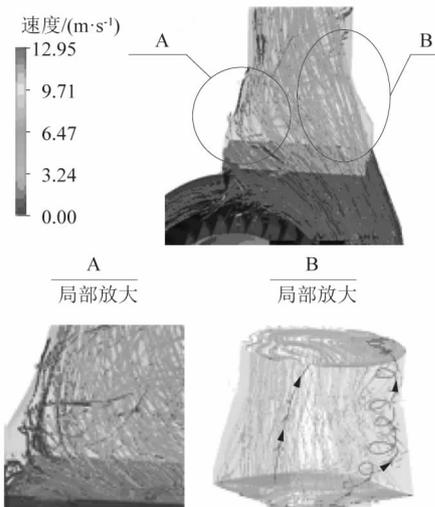


图6 原风机出口处速度流线图

Figure 6 Speed stream diagram at exit of original fan

3 出风罩改型设计

由原风机数值模拟结果可知,出风罩倾斜角度对风机出口气流组织分布有着重要影响,为了防止风机出口气流死角产生,课题组在原出风罩结构的基础上保持出风口面积大小不变,将出风罩左侧倾斜角逆时针增大至90°,而右侧与蜗壳壁面平齐,优化后出风罩型线如图7所示。

图8为 Q_{BEP} 流量下风机出口静压分布。从图中可知,改型前传统出风罩区域压力变化剧烈,压力梯度较大,而将出风罩倾斜角度进行适当调整后,经叶轮加速后的气流对风机出口左侧壁面的冲击减小,出风口区域压力分布较原风机均匀。另外,从图中可看出改型后风机出口区域低压区面积明显小于原风机,由此说明改型后出口总压增大,风机效率增加,其内部流体流动状况得到有效改善。

研究表明,气动噪声来源于涡的拉伸与破裂^[11],根据涡声方程

$$\left. \begin{aligned} [c_0^{-2}(\partial^2/\partial t^2) - \nabla^2]D &= \text{div}(\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}); \\ D &= p/\rho + \frac{1}{2}\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{v}, \boldsymbol{\omega} = \nabla \times \boldsymbol{v}. \end{aligned} \right\}$$

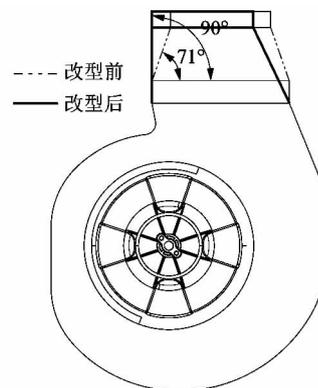


图7 改型前后出风罩型线对比
Figure 7 Comparison of hood type before and after modification

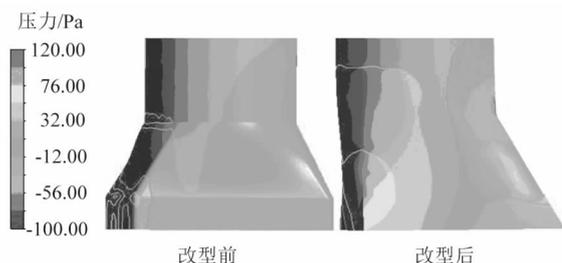


图8 改型前后风机出口压力云图
Figure 8 Fan outlet pressure cloud map before and after modification

式中: c_0 为流体绝对速度, D 为流体总焓, p 为压力矢量, ρ 为介质密度, $\boldsymbol{\omega}$ 为流动涡矢量, \boldsymbol{v} 为速度矢量。

方程左边微分式表示声波在非均匀流体中传播,而方程右边为涡声源,即涡声理论中辐射噪声与流场中涡量的大小、变化及运动情况有关。

图9、图10给出了不同工况点下,改型前后风机在观测截面处风机出口附近区域的涡量等值线图,图中涡量单位为 s^{-1} 。对于二维流体速度矢量,其涡量定义为

$$\omega_z = \partial u/\partial y - \partial v/\partial x。$$

式中: u, v 为二维速度分别在 x, y 坐标轴上的分量^[12]。

分析图9、图10可知,出风罩倾斜角调整后风机出口涡量明显减小,各工况涡量强度均得到不同程度减弱,其中 Q_{BEP} 流量下出风罩左侧大涡量区域已得到基本消除,且涡量最大值减小约 $305 s^{-1}$ 。另外, $0.6Q_{BEP}$ 及 $1.4Q_{BEP}$ 流量下大涡量范围也在一定程度上缩小,最大值分别由改型前的 $1052.63 s^{-1}$ 和 $1315.79 s^{-1}$ 降低至 $736.84 s^{-1}$ 和 $884.24 s^{-1}$ 。由此说明出风罩改型设计可以有效减小旋涡强度及其影响区域,增大有效流通面积进而达到优化噪声的作用。

图 13 为 1/3 倍频下改型前后风机声压级分布图。从图中可以看出,出风罩的改型设计能有效抑制原风机呈宽频分布的涡流噪声,各频率段改型风机的 A 计权声压级均低于原风机,且在中频段表现明显,平均降噪 3.5 dB,风机总噪声得到控制。

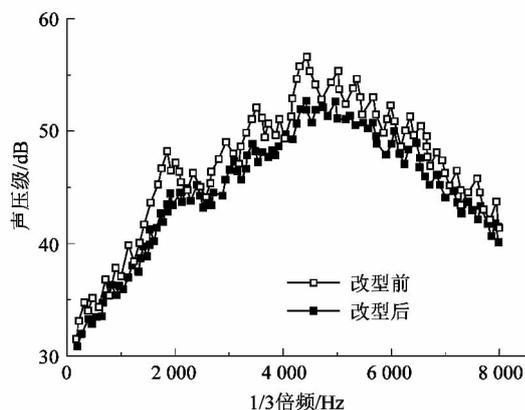


图 13 噪声分布对比

Figure 13 Noise distribution comparison

5 结论

1) 原风机数值计算和试验测量结果整体趋势一致,两者相对误差保持在 6% 以内,证明本文数值计算模型对多翼离心风机性能的预测结果具有一定可信度。

2) 根据出口气流组织分布情况进行出风罩倾斜角的调整,改型后的风机出口总压增大,压力分布较原风机均匀,各工况风机出口涡量强度得到不同程度的减弱,其中 Q_{BEP} 流量下出风罩左侧大涡量区域已基本消除,涡量最大值减小约 305 s^{-1} 。

3) 试验测量结果表明,出风罩的改型设计不仅能

提升风机气动性能,还能达到一定程度的降噪效果,其中出口静压提升约 20 Pa,最大全压效率较原型机提升约 4.7%,各频段平均降噪 3.5 dB。

参考文献:

- [1] 韩非非,席德科.多翼离心风机数值计算及改进设计研究[J].机械科学与技术,2010,29(8):992.
- [2] 王珂,据亚平,张楚华.基于分组模型及仿生蜗舌的多翼离心风机设计[J].工程热物理学报,2017,38(8):1671.
- [3] 魏铭,熊仲营,刘小民,等.集流器结构对多翼离心风机气动性能影响的研究[J].西安交通大学学报,2018,52(9):109-117.
- [4] 李艳,赵付,卢傅安,等.变螺旋角方法离心风机蜗壳型线数值优化[J].应用力学学报,2012,29(4):398-403.
- [5] 刘小民,魏铭,杨罗娜,等.内凹式蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声影响的研究[J].西安交通大学学报,2017,51(12):128-135.
- [6] 何立博,姜涛,李志锋,等.多翼离心风机叶轮的正交设计与试验分析[J].流体机械,2016,44(9):7-11,30.
- [7] 周水清,李辉,王军,等.多翼离心风机气动噪声的数值分析[J].工程热物理学报,2014,35(4):670.
- [8] BALLESTEROS-TAJADURAR R, COLON F I G, VELARDE-SUAREZ S, et al. Numerical model for the unsteady flow feature of a squirrel cage fan [C]//ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Vail Colorado, USA; ASME, 2009: 173-183.
- [9] DARVISH M, FRANK S. Toward the CFD simulation of sirocco fans: from selecting a turbulence model to the role of cell shapes [C]//Proc of International Conferences on Fan Noise, Technology and Numerical Methods. Senlis, France; Institute of Mechanical Engineers, 2012: 20-25.
- [10] 宁波方太厨具有限公司,中山华帝燃具股份有限公司.吸油烟机:GB/T 17713—2011 [S] [2018-07-31]. <http://www.doc88.com/p-4753468369985.html>.
- [11] 周水清,王军,王兴双.Bezier函数型弯叶片的轴流风扇气动性能研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(3):108.
- [12] 蒋博彦,刘辉,王军,等.多翼离心风机小流量工况流动特性 PIV 研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(5):98-101.

[信息·简讯]

· 产品信息 ·

西门子推出全新 Simotics HV C 风冷电机

西门子推出 Simotics HV C 风冷系列高压电机完善了 Simotics HV C 平台,该紧凑型高压电机家族功率最高可达 3.2 MW。创新的冷却设计概念,将散热筋和冷却管巧妙地组合起来,优化了电机的温度分布,从而显著提高功率密度。凭借其振动优化设计、坚固的外壳设计,Simotics HV C 风冷电机大幅提高了可靠性。该新型高压电机采用封闭式内部循环(IC 411),适用于无爆炸危险区域(安全区域)以及低爆炸危险区域(2 区和 22 区)所涵盖的 Ex ec 和 Ex tc 防爆类型。电机可通过 Simotics Connect 600 连接盒连接到 Sidrive IQ 数字平台:因此电机数据可上传至云端进行分析,并根据结果优化电机系统。紧凑型电机广泛用于能源、化工、水泥、造纸和纸浆以及采矿等行业的泵、风机、压缩机、挤出机、磨粉机、搅拌机、密炼机、输送机 and 辊磨机等设备上。

高压电机的散热筋外壳中集成了经过数十年使用考验的冷却管元件,附加的新型冷却风扇设计改善了电机冷却效果——与传统冷却方法相比,这一设计大大降低了电机的内部温度。它使得电机设计更加紧凑和轻质,在不改变整体尺寸的情况下,性能可提高多达 15%,并延长组件的使用寿命。高度灵活的电机设计使其能够根据每个项目的需求与客户接口匹配,例如,连接线可以安置在许多不同的位置。得益于标准化设计和基于防爆款或非防爆款紧凑型风冷电机的管理原则,整个使用周期的成本都可降低——从规划和采购,到工程设计和工厂集成,再到服务、仓储和备件管理。维护和维修间隔延长可提高驱动系统的可用性,从而提高整个工厂的开工率。西门子的 Simotics HV C 风冷电机在现有的隔爆型和水套冷却设计上进行了拓展。

(朱建芸)