

大中型高效电机后倾式离心风扇的优化设计

刘 庆, 王 超, 田德见

(东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘 要: 优化设计高效、高性能的电机外风扇是提高大中型高效电机效率的关键措施之一。通过分析离心风扇风压-风量特性, 提出后倾式离心风扇的优化设计方法。对比分析了某项目 YXKK710-4 高效电机优化前后离心风扇的性能, 并对优化前后离心风扇对电机效率、噪声和温升的影响进行了试验研究。结果表明, 优化后的风扇更接近工作点, 效率、噪声等性能指标更优, 验证了所提后倾式离心风扇优化设计方法的合理性和可靠性, 可为提高电机效率和性能及研制系列高效电机提供思路和指导。

关键词: 高效电机; 离心风扇; 优化设计

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0087-06

doi: 10.12177/emca.2020.088

Optimal Design of the Centrifugal Fans with Backward Blades for Large and Medium High-Efficiency Motor

LIU Qing, WANG Chao, TIAN Dejian

(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Dongfang Electric Corporation, Deyang 618000, China)

Abstract: Design and optimization of high-performance external fans are important to improve the efficiency of large and medium high-efficiency motors. We propose an optimal design method of centrifugal fans with backward blades by analyzing the characteristics of centrifugal fans. Taking a YXKK710-4 high-efficiency motor as the object, the performance and working point of the centrifugal fan are analyzed, and the effects of the centrifugal fan on the efficiency, noise and temperature rise of the motor are tested. The results show that in comparison with the original design, the optimized centrifugal fan is closer to the working point, and the performance data such as efficiency and noise are better. The rationality and reliability of the proposed method are verified. This research can provide guidance for the improvement of motor performance and efficiency, and for the development of series high-efficiency motor products as well.

Key words: high-efficiency motor; centrifugal fan; optimal design

0 引 言

随着国家能源结构转型升级, 电力行业节能减排需求不断提高, 高效电机的应用已成为提升用电侧设备效率的主要节能方式。电机损耗主要包括电气损耗和机械损耗。电气损耗以铜耗、铁耗为主, 一般通过有效利用材料、优化电磁设计等方法来降低。机械损耗主要包括风摩损耗和轴承

损耗。研究表明^[1], 离心风扇的风摩损耗约占电机总损耗的 30% ~ 40%, 转速越高风摩损耗占比越大。因此, 优化电机离心风扇结构设计是开发高效电机的重要途径。

电机的通风冷却通常主要研究的是冷却风量与损耗的合理分配, 而高效电机的开发则需要通过合理的通风冷却结构设计, 包括离心风扇的合理化设计和针对性改进优化, 进一步降低风摩损

收稿日期: 2020-04-29; 收到修改稿日期: 2020-07-01

作者简介: 刘 庆(1987—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电动机设计开发与应用。

耗,提高通风效率,从而提高电机效率。文献[1-2]用有限元方法分析对比了不同型式的离心风扇的性能;文献[3]将常用在中小型异步电机中的高效后倾式离心风扇应用到 YKK355-630 系列高压三相异步电机中。后倾式离心风扇风量大、涡流损耗小、效率比其他型式的风扇高,已被广泛应用于电机冷却系统设计。文献[4-6]总结了离心风扇的传统设计方法。文献[7]应用流体动力学对离心风扇进行优化设计,对比分析了流体动力学计算方法和传统计算方法的结果。相关研究结果表明,利用传统的经验公式计算误差大,无法满足高效电机精细化设计和效率提升的要求,有限元分析软件已成为高效电机离心风扇设计的必备工具。

本文以 YXKK710-4 空空冷高效电机为研究对象,简述了电机常用离心风扇结构,在分析离心风扇设计要点及其特征参数的基础上,首先利用计算流体动力学(CFD)技术模拟冷却器管内流阻力特性,然后利用数值分析方法对后倾式离心风扇几何参数进行优化设计,最后对优化前后的后倾式离心风扇进行了试验对比分析。

1 离心风扇结构

风扇是电机通风系统的核心部件,其主要作用是产生足够的风压,驱动冷却气体顺畅地流过电机部件,带走电机运行时产生的热量,达到冷却电机的效果。大中型电机通常采用离心风扇,主要是因为其风压比轴流风扇大。离心风扇由前盘、后盘、叶片和风扇座组成,结构如图 1 所示。

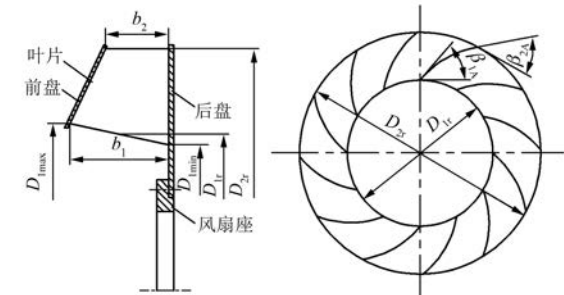


图 1 离心风扇结构

根据叶片出口角度的不同,离心风扇结构可分为径向、前倾和后倾 3 种类型^[4-5,8]。不同叶片出口角度的离心风扇类型对比如表 1 所示。

表 1 不同叶片出口角度的离心风扇类型对比

结构类型	前倾	径向	后倾
示意图			
优缺点	风压大,效率低,噪声大,易形成涡流,工艺复杂	性能介于前倾与后倾之间,工艺简单	效率高,噪声小,风压较小,涡流较小,工艺复杂
使用场合	低速、单向旋转电机(较少采用)	双向旋转电机	高速、单向旋转电机(广泛采用)

按照前盘成型工艺的不同,离心风扇可分为平前盘、锥形前盘和弧形前盘 3 种类型,如图 2 所示。研究表明^[8]:平前盘结构简单,但气体在叶片流道内速度差异大,易形成涡流,流动损失大,效率低,不适用于高效电机开发;弧形前盘可将叶片流道设计成等截面,气体流速均匀,效率高,但制造工艺较复杂;锥形前盘气流效率和工艺性介于平前盘和弧形前盘之间。

综合考虑电机性能指标、风扇工艺性等因素,本文所研究的空空冷高效电机选用前盘为锥形的

后倾式离心风扇,同时将叶片设计成斜切进口,可减少气流进口冲击损失,进一步提高风扇效率、降低噪声。

2 后倾式离心风扇设计方法

离心风扇设计优化的关键是先确定风扇合适的工作点,再结合电机结构参数设计风扇几何尺寸。

2.1 离心风扇工作点确定

离心风扇的工作点是指冷却系统满足电机高

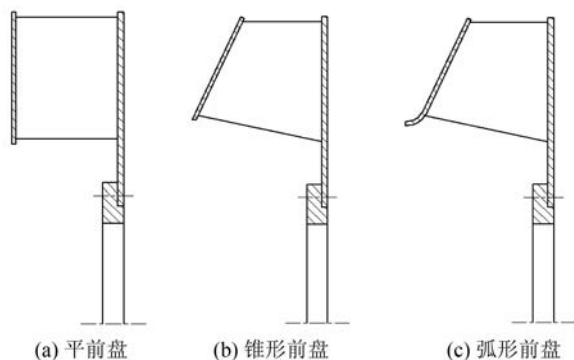


图2 离心风扇前盘类型

效使用性能所需的风压和风量。风量决定离心风扇在单位时间内通过热传递带走电机损耗形成的热量的多少。风量对电机性能的影响至关重要,其大小与电机温升、电机效率成反比,与电机噪声增加成正比。

离心风扇的工作点由风扇的外特性曲线和风路的风阻特性曲线确定,其中风扇风压-流量特性为^[9]

$$H = f(Q) \quad (1)$$

式中: H 为风压, Pa; Q 为风量, m^3/s 。

风路的风阻特性为

$$H = ZQ^2 \quad (2)$$

式中: Z 为风阻, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^3$ 。

联立式(1)和式(2)可得风扇工作点。但实际工程项目中因风路结构复杂,很难计算获得准确的风阻。一般可通过如下方法确定。

(1) 利用 CFD 技术模拟获得空气冷却器内流阻力特性 $\Delta H = f(Q)$ 。

(2) 根据文献[9]提供的公式估算电机风量:

$$Q_{\text{rev}} = \frac{\sum P}{C_{\alpha} \theta_{\alpha}} \quad (3)$$

式中: $\sum P$ 为电机总损耗, kW; C_{α} 为风路平均温度下空气比热, 一般取 $1.1 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; θ_{α} 为空气过流温升, 根据经验可取 $20 \sim 25 \text{ K}$ 。

(3) 根据由式(3)确定的 Q_{rev} , 在空气冷却器阻力特性 $\Delta H = f(Q)$ 曲线上查询对应风量时的空气阻力 ΔH_{rev} , 则风扇的预设工作点为 $(\Delta H_{\text{rev}}, Q_{\text{rev}})$ 。

2.2 离心风扇结构参数确定

离心风扇结构参数主要包含离心风扇结构的几何尺寸和叶片型线, 其中几何尺寸主要包括风扇叶片内径 D_{1f} 、叶片外径 D_{2f} 、叶片进口宽度 b_1 、叶片出口宽度 b_2 、叶片宽度 b 、叶片进口安装角 β_{1A} 、叶片出口安装角 β_{2A} 和叶片数量 N 。

2.2.1 离心风扇结构几何尺寸

离心风扇结构的几何尺寸 $F = [D_{1f}, D_{2f}, b, \beta_{1A}, \beta_{2A}, N]$ 共同决定风扇的性能指标。同时, 风扇几何尺寸的选取需综合考虑电机结构尺寸、电机效率和噪声的影响^[1]。离心风扇结构的几何尺寸 F 确定步骤如下^[3,5]。

(1) 结合电机结构尺寸对风扇主要尺寸 $[D_{1f}, D_{2f}, b]$ 进行初选。为了保证离心风扇有较好的性能, 应满足约束条件:

$$\begin{cases} \bar{l} = \frac{D_{2f} - D_{1f}}{2D_{2f}} = 0.1 \sim 0.2 \\ D_{2f} = (1.1 \sim 1.5) D_{1f} \\ \pi D_{1f} b > 1.5 \times \left(\frac{1}{4} \pi D_{1f}^2 \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{l}$ 为叶片相对长度。

(2) 根据初步选定的风扇尺寸, 按照文献[10]提供的公式核算风量 Q 和风压 H :

$$\begin{cases} Q = \frac{1}{2} \left(\delta_0 \pi D_{2f} \frac{n}{60} \right) (\lambda \pi D_{2f} b) \\ H = \frac{H}{H_0} \eta_0 \rho \pi^2 \left(\frac{n}{60} \right)^2 (D_{2f}^2 - D_{1f}^2) \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为电机转速, r/min ; λ 为考虑叶片厚度对风扇出口有效截面影响的系数; ρ 为空气密度, 一般取 40°C 时的值, 即 $1.18 \text{ kg}/\text{m}^3$; η_0 为风扇空载气动效率; δ_0 为风量修正系数; $\frac{H}{H_0}$ 为实际风压与空载风压之比, 且满足 $\frac{H}{H_0} = 1 - \left(\frac{Q}{Q_{\text{max}}} \right)^2$, 其中 Q_{max} 为风扇短路时, 风压 $H=0$ 时的最大风量。

对于高效电机选用的后倾式离心风扇, 相关参数建议取值见表2。

(3) 对初步选取的风扇主要参数, 根据式(5)求取对应结构尺寸下工作点参数 (H, Q) , 并与预设工作点 $(\Delta H_{\text{rev}}, Q_{\text{rev}})$ 比较, 使其满足如下条件:

表2 参数取值表

参数	取值
λ	0.92
η_0	0.50
δ_0	0.35
H/H_0	0.87

$$\begin{cases} \left| \frac{Q - Q_{\text{rev}}}{Q_{\text{rev}}} \right| \leq 3\% \\ \left| \frac{H - \Delta H_{\text{rev}}}{\Delta H_{\text{rev}}} \right| \leq 10\% \end{cases} \quad (6)$$

若 (H, Q) 满足式(6),则作为选择方案;否则,需返回步骤(1)重新调整参数进行验算,直到满足要求为止。

对后倾式风扇采用锥形前盘、进口斜切方式的风扇结构,风扇结构的几何尺寸需满足:

$$\begin{cases} b_1 + b_2 = 2b \\ b_1 D_{1f} = b_2 D_{2f} \\ D_{1\min} = (0.8 \sim 0.98) D_{1f} \\ D_{1\max} = (1.01 \sim 1.05) D_{1f} \end{cases} \quad (7)$$

由此可确定叶片进出口宽度和进口直径范围。

(4) 确定安装角。离心风扇叶片进出口安装角 $[\beta_{1A}, \beta_{2A}]$ 决定了气体在升压过程中因冲击、分离导致的损失大小。一般进出口安装角按式(8)计算^[11]:

$$\begin{cases} \beta_{1A} = \beta_{1i} + i = \arctan \frac{60Q}{\lambda \pi^2 D_{1f}^2 b n} + i \\ \beta_{2A} = 30^\circ \sim 60^\circ \end{cases} \quad (8)$$

式中: i 为冲角,取值为 $0^\circ \sim 8^\circ$ 。

(5) 确定叶片数。离心风扇叶片的数目 N 与风扇内外径相关,主要影响风扇的效率和刚度。叶片数目 N 过少则导致叶片之间的气体紊乱,效率低,风扇刚度差;反之则会减小有效进风面积,增加摩擦损耗,同样也会导致效率下降。一般叶片数 N 为

$$N \approx (4 \sim 6) \frac{\sin \beta_{2A}}{1 - \frac{D_{1f}}{D_{2f}}} \quad (9)$$

2.2.2 叶片型线

实际工程项目中,综合考虑叶片气动性能和

工艺性,常采用单圆弧叶片形状。经推导,可利用式(10)确定叶片圆弧半径 R 和圆弧所在中心半径 R_0 :

$$\begin{cases} R = \frac{1 - \left(\frac{D_{1f}}{D_{2f}}\right)^2}{4 \left(\cos \beta_{2A} - \frac{D_{1f}}{D_{2f}} \cos \beta_{1A} \right)} D_{2f} \\ R_0 = \sqrt{R(R - D_{2f} \cos \beta_{2A}) + \left(\frac{D_{2f}}{2}\right)^2} \end{cases} \quad (10)$$

3 导流蜗壳

电机离心风扇应用中一般是将离心风扇产生的径向风量直接送入冷却器入风口,不用蜗壳导流,从而会增加气体流动损失并造成紊流。高效电机离心风扇出口处增加蜗壳可为风路提供较好的流道系统,改善风路流道流阻,降低流动损失,提升通风效率,并降低风扇噪声。

为了降低成本和简化结构,离心风扇导流蜗壳采用焊接结构,矩形截面,其计算可采用近似的工程画法——四段圆弧代替螺旋线的等边基元法。

4 设计实例

本文以某项目 YXKK710-4/3 150 kW/10 kV 高效电机为研究对象,对电机离心风扇进行优化设计。对比分析离心风扇优化前后试验结果,验证所提后倾离心风扇设计方法的可靠性和合理性。

4.1 原型风扇

YXKK710-4 高效电机样机采用空空冷却器,经 CFD 模拟获得其阻力-流量特性,结合式(2)确定工作点为(750 Pa, 6.0 m³/s)。外部风扇选用双吸风扇,带导流蜗壳,其结构尺寸如表3所示。

表3 YXKK710-4 高效电机原型风扇设计几何尺寸

参数	取值
D_{1f}/mm	530
D_{2f}/mm	790
b_1/mm	2×165
b_2/mm	2×120
$\beta_{1A}/(^{\circ})$	30
$\beta_{2A}/(^{\circ})$	38
N	11

单吸风扇含1个前盘和1个后盘,有1个进

风口和 1 个出风口;双吸风扇含 2 个前盘和 1 个中盘,有 2 个进风口和 1 个出风口,进风面积较单吸风扇大,支撑刚度相比单吸风扇好。因离心风扇气动特性数值模拟必须针对整机开展,该双吸风扇可等效成 2 台单吸风扇并联,即风压不变、风量叠加。单吸风扇计算模型如图 3 所示。叶轮区域网格剖分如图 4 所示。



图 3 单吸风扇计算模型



图 4 叶轮区域网格剖分

利用 CFD 软件模拟计算得到原型风扇中的速度和压力分布,如图 5 和图 6 所示。计算结果表明,该原型风扇叶片设计不合理,主要表现为叶片进口攻角过大,使得气流在叶片前缘附近发生严重的附面层分离。分离的气流使得叶轮入口的冲击损失明显增加,并导致相邻 2 个叶片空间内发生明显的“涡流”现象,即在叶片低压面附近区域出现明显的逆流,叶片高压面速度明显增加。

4.2 优化设计

根据上述分析,通过减小风扇进口安装角并适当调整其他参数进行优化。对新的风扇结构进行数值模拟和计算校核,基于计算结果继续调整,如此反复即获得较优的风扇设计方案。强度校核结果表明,可以用 1 个单吸风扇代替原双吸风扇。优化后的风扇结构尺寸如表 4 所示。优化后风扇中的速度和压力分布如图 7 和图 8 所示。

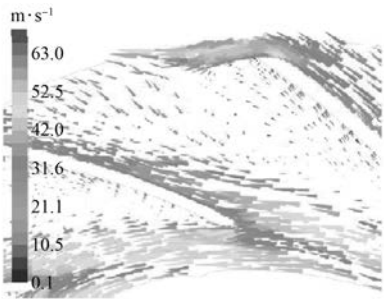


图 5 原型风扇叶轮间速度分布

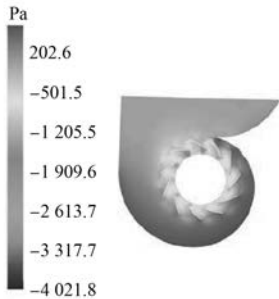


图 6 原型风扇中截面压力分布

表 4 YXKK710-4 优化后风扇设计几何尺寸

参数	取值
D_{1f}/mm	590
D_{2f}/mm	790
b_1/mm	285
b_2/mm	215
$\beta_{1A}/(^{\circ})$	21
$\beta_{2A}/(^{\circ})$	40
N	11



图 7 优化后风扇叶轮间速度分布

比较优化前后叶轮间速度分布和压力分布可知,优化后的风扇叶轮入口流动冲击明显变小,涡流现象基本消失,进口区域压力变化梯度减小。

进一步计算分析获得优化前后离心风扇的风

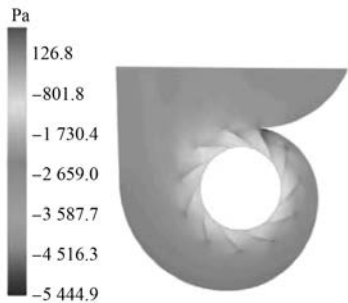


图8 优化后风扇中截面压力分布

压-风量特性及外风路阻力-风量特性,可得到原型风扇和优化后风扇的工作点,如图9、图10和表5所示。

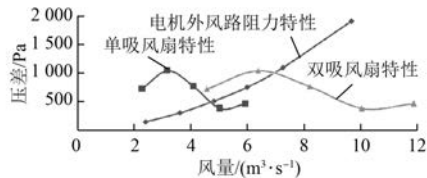


图9 原型风扇风压-风量特性

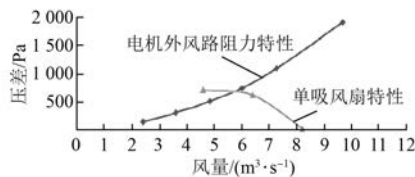


图10 优化后风扇风压-风量特性

表5 离心风扇优化前后工作点

风扇	风量/(m³·s ⁻¹)	风压/Pa	轴功耗/kW
原型风扇	7.0	1 020	10.5
优化后风扇	5.8	700	8.4

由以上分析可见,优化后的离心风扇风压-风量特性曲线变化更为理想,工作点风量更符合需求,且轴功耗下降,进一步表明优化后的离心风扇结构合理、性能优越。

4.3 试验对比分析

为了研究离心风扇优化前后对电机效率和温升的影响,在相同试验条件下,对不同外风扇分别进行试验。试验结果如表6所示。

对比分析原型风扇和优化后风扇的试验结果可知,优化后风扇机械损耗降低 1.9 kW,绕组温

表6 离心风扇优化前后试验结果对比

试验风扇	风压/ Pa	风量/ (m³·s ⁻¹)	轴功 率/kW	绕组 温升/K	噪声/ dB
原型风扇(带蜗壳)	958	7.2	9.7	73.1	113.30
优化后风扇(带蜗壳)	714	5.7	7.8	75.9	111.57
优化后风扇(无蜗壳)	772	5.8	10.1	79.0	113.10

升升高 2.8 K(仍在允许范围之内),噪声降低约 1.7 dB,说明优化后风扇更接近工作点,效率、噪声等性能指标更优。

对比分析优化后风扇中有无蜗壳的试验结果可知,导流蜗壳对外风扇风量影响较小,无导流蜗壳时风压略有上升,电机机械损耗增加 2.3 kW,绕组温升升高 3.1 K,噪声增加约 1.5 dB,说明导流蜗壳可提高通风效率,并降低风扇损耗和噪声。

无论原型风扇还是优化后风扇,试验值均与计算值接近,说明本文提供的后倾式离心风扇设计方法是可行的。

5 结 语

离心风扇是电机冷却系统的关键部件,优化离心风扇是提高电机效率和性能的有效措施之一。本文首先介绍了离心风扇结构,在分析研究了后倾式离心风扇设计方法的基础上,结合 CFD 技术和数值分析方法对某项目 YXKK710-4 高效电机的离心风扇进行了优化。通过试验对比分析,验证了大中型电机采用优化后的后倾式离心风扇可以有效减小电机损耗、提高电机效率和性能。本研究可为系列高效电机的研制提供思路和指导。

【参考文献】

[1] 郑龙平,高静,李光耀. 高压高效电机离心式风扇设计与有限元分析[J]. 防爆电机,2014,49(4): 6.
[2] 宁尚华. 不同形式离心式风扇有限元分析[J]. 防爆电机,2019,54(4): 31.
[3] 汪书苹,赵争鸣,冯奎径. YKK355-630 系列高压三相异步电动机高效风扇的设计[J]. 清华大学学报(自然科学版),2009,49(1): 9.
[4] 刘洋,王丽丽,才庆龙. 异步电动机中离心式风扇的设计[J]. 机械管理开发,2010,25(5): 3.

(下转第 110 页)