

# 工业大风扇用减速电动机的优化设计

黄睿 梁俊虎

( 西门子数控( 南京) 有限公司天津分公司 天津 300000 )

**摘要:** 针对工业大风扇运行的特殊工况, 文中详细介绍对通用减速电动机的设计进行优化, 并在实际应用现场进行安装测试, 进行温升、噪声的数据收集分析, 然后拆解分析零部件状况, 以验证产品优化设计的可行性。

**关键词:** 工业大风扇; 减速电动机; 设计方法; 试验分析

## 0 引言

工业大风扇(其结构见图1)是一款广泛应用于工业厂房、物流仓储、候车室、展览馆、体育馆和商超等高大空间, 作为空间通风及人员降温的常见工业用机器。大型工业风扇最大直径可达7.3m, 采用1.5kW 减速电动机驱动大量的空气, 产生超大面积的自然微风系统, 起到通风和降温的双重功能。

目前, 传统设计上大多采用常规的通用减速电动机作为工业大风扇的驱动装置, 而实际上并不符合工业大风扇运行的特殊性, 因而噪声大、漏油等故障率高发。

本文针对工业大风扇运行的特殊性, 详细介绍了对通用减速电动机的设计进行优化, 解决通用减速电动机所产生的故障问题, 并通过装机试验和拆解分析, 对优化设计的可行性进行了论证。

## 1 优化设计方法概述

### 1.1 通用减速电动机面临的故障问题分析

工业大风扇的最大直径可达7.3m, 扇叶法兰加上6个扇叶的总质量可达110kg, 固定在减速电动机输出轴端, 对输出轴轴承产生向下的轴向作用力; 由于厂房顶部可能带有倾斜角度, 大风扇的架体也会伴有安装倾角, 范围在竖直方向 $\pm 5^\circ$ ; 在密闭大空间使用时, 往往对噪声的要求较高, 需要低于65dB; 工业大风扇主要是在夏天使用, 一般厂房为彩钢板, 阳光直射, 造成减速电动机的使用环境温度较高, 最高可达50℃; 工业大风扇安装在厂房顶部, 需使用升降梯, 维修不方便。

基于以上应用环境, 拟依据标准DIN、ISO、GB及部分工业大风扇厂家的厂标进行优化设计, 设计技术要求: 额定输入功率 $P_1=1.5\text{kW}$ , 采用4极电动机, 频率为20~50Hz, 传动比 $i=28\% \pm 3\%$ , 应用系数 $K_A \geq 1.0$ , 齿轮设计无限寿命, 轴承寿命 $L_{h10} \geq 2000\text{h}$ , 热平衡温度不高于80℃, 噪声检测值不高于65dB, 最大工作倾角为 $\pm 5^\circ$ 。

### 1.2 优化设计方法

通用减速电动机在功能上可以满足工业大风扇的基本要求, 但在承受轴向力、噪声、高温和安装角度方面, 在设计上有所欠缺。图2所示为通用减速电动机齿轮箱内部

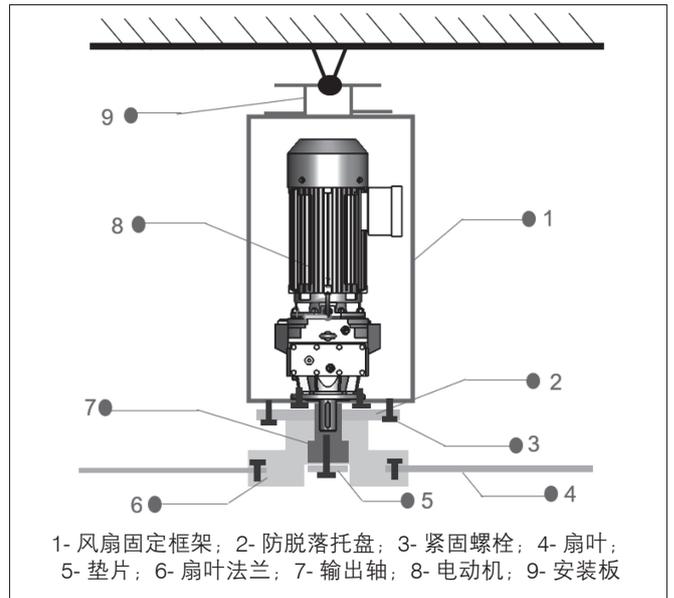


图1 工业大风扇结构图

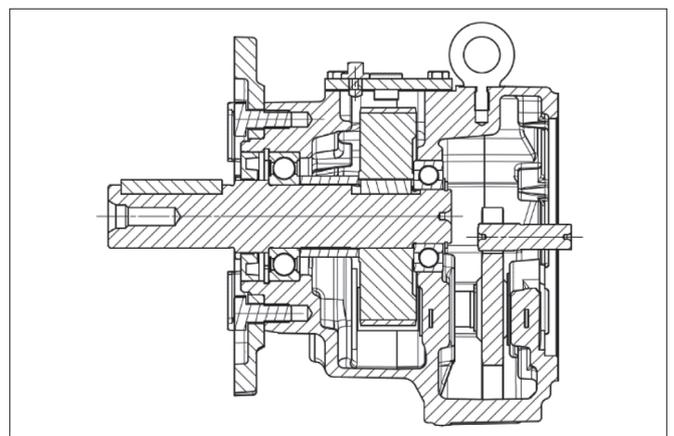


图2 通用减速电动机齿轮箱内部剖视图

剖视图。

#### 1.2.1 针对扇叶质量产生的轴向力进行优化

在工业大风扇停止转动时, 扇叶的重力全部作用于减速电动机的输出轴上; 当工业大风扇转动时, 风力的反作用力(约135N)可以抵消一部分扇叶的重力。

使用通用减速电动机方案时, 输出轴轴承无法承受较

大的轴向力，从而造成轴承可能在短期内失效，主要表现在滚子磨损和外圈滚槽单边磨损等。

针对现场工况，优化输出轴轴承为轴向加强型轴承，计算轴承寿命满足  $L_{10h} \geq 2000h$  的设计要求，计算标准 DIN ISO 281:2010-10。优化后的轴承寿命见表 1。

表 1 优化后的轴承寿命

轴承位置	d/mm	$L_{10h}/h$
#1130	35	7502
#1140	30	4054
#1028	20	8972
#1030	20	7332
#1020	17	9804

1.2.2 针对室内环境低噪声要求的优化

对齿轮优化修形，侧重优化噪声，从齿廓和齿向两方面进行，优化齿面载荷分布，原则为齿面载荷分布平滑均衡，载荷分布结果见图 3 输出级斜齿轮修形结果。

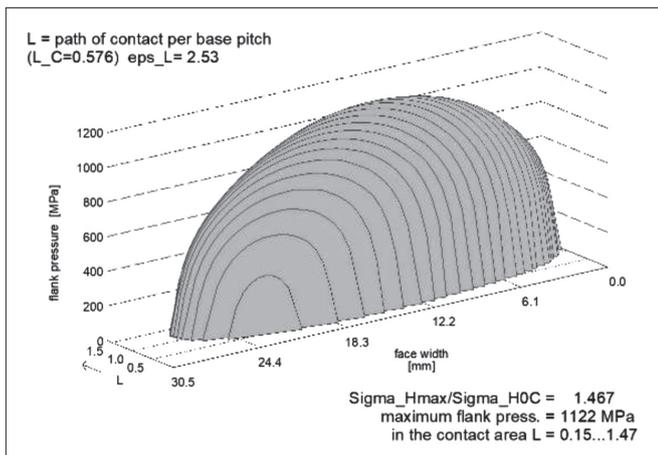


图 3 输出级斜齿轮修形结果

优化后的齿部计算满足设计要求，计算标准 ISO 6336-1 ~ 3:2019-11，优化后齿部安全系数见表 2。

表 2 优化后的齿部安全系数

安全系数	输出级	输入级
SF (Bending)	3.44	1.33
SH (Pitting)	1.59	1.02

1.2.3 针对最高环境温度 50℃ 和工作倾角 ±5° 的优化

主要通过以下几方面进行优化：

(1) 减速电动机标配润滑油为矿物油 CLP ISO VG 220，适用于环境温度 -15 ~ +40℃，且需要每 2 年或每运行 10000h 更换润滑油，优化更换成合成油 CLP ISO PG 220，适用于环境温度 -25 ~ +50℃，每 4 年或每运行 20000h 更换润滑油，同时也减少了更换润滑油的次数，解决了维修不便的难题；

(2) 减速电动机标准竖直安装；

(3) 油位仅能保证在无角度时，所有齿部啮合润滑充

足，通过模型模拟，优化齿轮箱润滑油油量，以满足工作倾角 ±5° 时输入级齿轮啮合可以充分润滑。

1.3 其他特点

除了上述优化设计，该减速电动机的设计还有如下特点：

(1) 使用低噪声设计的变频电动机，考虑到一般工厂的工作时长，电动机能效等级满足 GB 18613-2020 中国能效 CEL 认证的三级（对应 IEC 60034-30-1 标准的 IE3），有效降低使用电量；

(2) 齿类零件满足硬齿面齿轮要求，采用原材料 16MnCr5，经过渗碳淬火处理，表面硬度要求 58 ~ 62HRS，磨齿齿面精度不低于 6 级，提高传动效率和降低噪声；

(3) 配备长寿命组合式油封，减小漏油风险。

2 试验

2.1 安装步骤

为保证测试不受其他未知因素的影响，安装过程需严格遵守操作规程：

(1) 检查工业风扇固定框架的法兰止口尺寸及公差是否符合设计；

(2) 使用 8.8 级螺栓将减速电动机安装到风扇固定框架上；

(3) 使用套装夹具安装扇叶法兰；

(4) 安装风扇固定框架到厂房顶部，使用水平仪尽量保证工业风扇本体的竖直，最多不超过 5° 的倾角；

(5) 电动机接线，含测箱体内部润滑油温度的 PT100 温度传感器接线；

(6) 安装扇叶到扇叶法兰上。

完成安装，具备开机试验条件。

2.2 试验步骤

负荷性能试验，分别在 20Hz、30Hz、40Hz 和 50Hz 荷载条件下进行，需要进行的试验包括温升测试和噪声测试。

温升测试要求油温不超过 80℃。测试期间，温度记录时间间隔为 5min，不同转速的油温起始温度为环境温度。

噪声测试使用手持式噪声仪，站在工业风扇下方，距离工业风扇大约 6m 距离。测试时间为箱体油温达到热平衡，之后如有变化，再行记录。

3 数据分析

3.1 电动机电磁音

电动机电磁音主要来源于反电势谐波，需要通过调整载波频率，改善噪声状态。

现场使用英威腾变频器，PWM 载波频率为 5 ~ 11kHz。通过试验，确定该变频器在  $f_{PWM}$  为 8kHz 时，电磁音基本消除。

3.2 温升数据分析

无风状态下，现场环境温度为 30℃。

以 30Hz 运行的温升试验数据为例，如图 4 所示 30Hz 下达到热平衡的油温曲线，箱体内存油温度为纵坐标  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )，时间为横坐标  $t$  (min)。

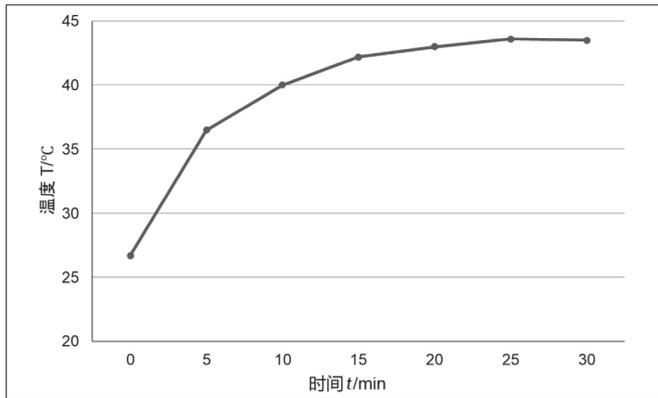


图 4 30Hz 下达到热平衡的油温曲线

减速电动机油温在运行 25min 时趋于稳定，测量油温为  $43^{\circ}\text{C}$ ，满足工况技术要求，热平衡温度不高于  $80^{\circ}\text{C}$ 。

在设计阶段，根据标准 ISO/TR 14179-2-2001《齿轮热性能》第 2 部分的计算方法，可以计算出 30Hz 下运行，使用功率为  $0.85\text{kW}$ ，环境温度为  $30^{\circ}\text{C}$  时，减速电动机箱体内润滑油的热平衡温度为  $(40 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。

考虑到计算过程中的系数选取与实际有一定的误差，产生误差在所难免，但试验结果基本验证计算过程。

### 3.3 噪声分析

减速电动机在各转速下，噪声值均在  $53 \sim 65\text{dB}$ ，期间未发生异响。试验结果满足工况技术要求，噪声检测值不高于  $65\text{dB}$ 。

需要注意的是，使用不同的变频器，可能需要调整载波频率以改善电磁音。

## 4 拆解分析

对测试后的减速电动机做拆解，检查各零部件的状态，分析测试结果。

(1) 放出润滑油，润滑油清澈，无杂质；

(2) 将油样送至润滑油检测实验室，检测外观、运动粘度 ( $40^{\circ}\text{C}$  和  $100^{\circ}\text{C}$ ，检测标准 GB/T 265)、粘度指数 (检测标准 GB/T 2541)、酸值 (检测标准 GB/T 7304)、水分含量 (检测标准 ASTM D 6304) 及各元素分析，各项检测结果均符合可长期使用润滑油状态的标准；

(3) 检查所有齿面，无磨损，且加工纹路清晰可见；

(4) 将所有齿件送至测量室，检测齿形齿向；

(5) 检查所有轴承，无磨损，输出轴轴向加强型轴承滚子无磨损，外圈滚槽单边无磨损痕迹。

综上所述可以看出，各零部件的检测分析结果均符合图纸设计要求，输出级齿轮测齿报告如图 5 所示。

## 5 结语

优化前的减速电动机，由于外部应用的因素，会发

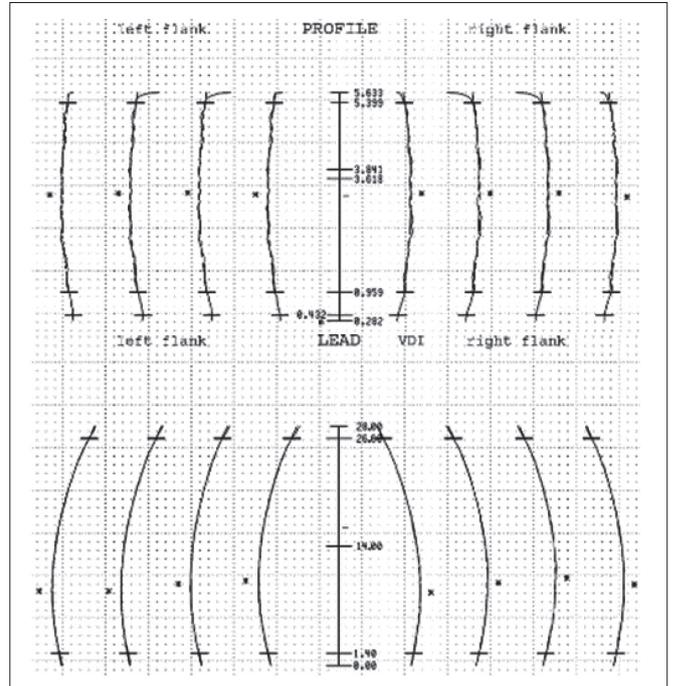


图 5 输出级齿轮测齿报告

生齿轮磨损、黑油及轴承损坏等问题。设计优化后的减速电动机可满足实际工况的多项要求。例如，针对扇叶质量产生的轴向力而进行的轴承优化，避免了轴承的损坏；针对室内环境低噪声要求，对齿面修形的优化，极大地降低了整机的噪声水平；针对最高环境温度  $50^{\circ}\text{C}$  和工作倾角  $\pm 5^{\circ}$ ，对润滑油粘度和箱体内存油量的优化，有效地避免了齿轮磨损和黑油问题的发生。

对于新技术的研究是无止境的。目前了解到工业大风扇行业已有永磁电动机直驱的方案广泛应用，其具有噪声水平更低、安装结构简单等优点。但永磁电动机方案也有其技术不成熟的方面，如高温退磁问题没有解决，整体价格高于减速电动机。笔者会继续对相关方案进行优化，找到更适合此应用的设计。

### 参考文献:

[1] DIN ISO 281:2010-10, Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life[S].  
 [2] ISO 6336-1 ~ 3:2019-11, Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors, Part 2: Calculation of surface durability (pitting), Part 3: Calculation of tooth bending strength[S].  
 [3] GB 18613-2020, 电动机能效限定值及能效等级 [S].  
 [4] ISO/TR 14179-2:2001(E), Gears - Thermal capacity part 2: Thermal load-carrying capacity[S].  
 [5] GB/T 265-1988, 石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法 [S].  
 [6] 朱孝录. 机械传动设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.