

[变频调速]

变频电动机离心式风扇故障分析研究

文/东方电气集团东方电机有限公司 宁文飞 孙小刚

针对变频调速异步电动机离心式风扇后盘与轮毂间焊缝出现裂纹的问题，对该风扇进行强度仿真计算和共振频率仿真计算，找到焊缝裂纹出现的原因。对外风扇结构设计进行改进，改变风扇的固有频率使其远离电动机的共振频率，同时对该风扇结构进行优化，从根本上解决该问题。

电动机的风扇作为冷却系统的一部分，在电动机风路设计中起着重要作用。通过风扇的打风作用，驱动电动机定子线圈铁心、转子笼条端环及铁心产生的热量进入到电动机的冷却设备，在冷却设备内完成热交换，满足绝缘长期安全运行要求。电动机风扇的设计，不仅需要考虑所需的风量、风压等参数，及电动机运行时风扇所带来的风磨损耗，还要考虑到风扇结构设计、强度计算和加工制造工艺。

问题的提出

某变频调速异步电动机，调速运行范围1 350~1 560 r/min，拖动风机负载。电动机采用IC611的冷却方式，在非轴伸端安装有后倾式离心风扇。该风扇主要由后盘、锥形前盘叶片和轮毂组成，剖面图如图1所示。风扇的前盘为5 mm厚钢板，叶片和后盘为3 mm厚钢板Q235，叶片和前盘及后盘、后盘和轮毂间都采用焊接的方式连接。

电动机运行一段时间后，在现场检修时发现，电动机风扇后盘与轮毂之间的焊缝开裂，有肉眼可见的裂纹出现，现场图片如图2所示。该焊缝开裂会引起风扇损坏，电动机外风路热交换不能正常进行，导致电动机温升升高，给电动机

运行带来安全隐患。

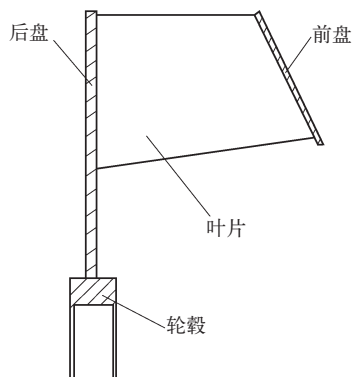


图1 风扇剖面图

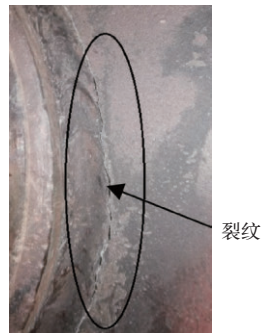


图2 焊缝开裂

从现场图片可以看到，风扇开裂的焊缝在轮毂与后盘之间，其他地方焊缝未发现开裂。一般情况下，焊缝开裂可能是由于风扇强度设计不

够，导致焊缝处受力过大，引起焊缝开裂，所以首先对该风扇的受力进行仿真计算。

风扇的受力分析

对外风扇进行建模，运用有限元仿真软件对外风扇的受力进行计算分析。

1. 材料许用应力标准

风扇的前盘、后盘、叶片和轮毂材料都为Q235钢板，材料的性能参数如表1所示。

表1 风扇材料性能参数

材料名称	弹性模量 /MPa	质量密度 /(kg/mm³)	泊松比	屈服极限 /MPa	强度极限 /MPa
Q235A	2.10 × 105	7.85 × 10 ⁻⁶	0.28	235	370

对于Q235A钢板材料，仿真计算时材料的参考许用应力为

$$S_m = \min(\frac{\sigma_b}{3}, \frac{2}{3}\sigma_s)$$
 (1)

美国ASME标准给出了用有限元法计算应力的一些限制，并将应力分类如下： P_m 是一次薄膜应力； P_1 是一次局部应力； P_b 是一次弯曲应力； Q 是一次薄膜应力+不连续的弯曲应力。

不同类型应力判定标准如下

$$P_m < S_m; P_1 + P_b < 1.5S_m; P_1 + P_b + Q < 3.0S_m$$
 (2)

根据上述标准，计算出风扇材料按ASME标准确定的许用应力如表2所示。

表2

材料名称	材料性能		按ASME标准确定许用应力		
	屈服强度 σ_s	抗拉强度 σ_b	P_m	$P_1 + P_b < 1.5S_m$	$P_1 + P_b + Q < 3.0S_m$
Q235A	235	370	123.3	185	370

2. 模型建立与仿真求解

在仿真软件中建立风扇实体模型，如图3所示。在对风扇进行有限元网格划分时，将结构整体作为分析对象，根据各部分的具体结构形式和位置对结构进行离散和网格剖分。在模型仿真时，对风扇轮毂端面施加轴向和切向约束，仿真工况按照最大转速离心力最大的状态下设定，取工频52 Hz时的额定转速 $n =$

1 550 r/min。

通过仿真计算结果发现，模型最大等效应力为280.3 MPa，最大综合位移1.148 mm，受力最大点位于扇叶边缘偏上部位置，如图4所示，在风扇后盘和轮毂焊缝开裂处受力只有12 MPa。风扇材料的许用应力对比如表3所示，从计算结果可以看出风扇受力满足材料的许用应力标准，风扇的强度设计满足要求。

表3 应力计算结果判定

工况	P_m	$P_1 + P_b$	$P_1 + P_b + Q$
ASME应力分类	111.6	164.9	280.3
ASME标准许用应力	$P_m < S_m = 123.3$	$P_1 + P_b < 1.5S_m = 185$	$P_1 + P_b + Q < 3.0S_m = 370$
是否满足设计	满足	满足	满足

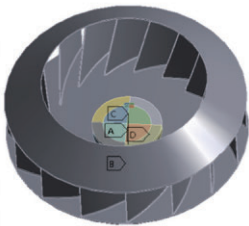


图3 风扇有限元分析模型

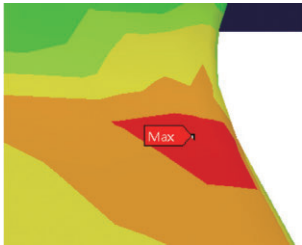


图4 风扇最大受力点

风扇频率分析

考虑到该电动机为变频电动机，由于变频器中的各次谐波与电动机电磁部分的固有谐波相互干扰形成电磁激振力。当电磁力波与电动机结构件固有频率一致或接近时将产生共振现象。发生共振的情况下，电动机风扇将受到持续的共振力作用，对风扇造成损坏，所以对风扇进行振动频率分析。

对该风扇进行仿真计算，得到风扇在静止状态下一阶固有振动频率为47.5 Hz，二阶固有振动频率为48.8 Hz。电动机调速范围在1 350~1 560r/min之间，工作调频范围为45~52 Hz之间，所以静止状态下风扇的固有频率在电动机工作的调频范围内，在电动机在运转过程中会发生共振。为进一步分析在不同转速下

电动机的运行频率和风扇在该转速下的共振频率，输入不同的转速值进行计算，计算结果如表4所示。

表4 风扇在不同转速下的运转频率和共振频率

电动机 转速 $n/(r/min)$	电动机 工作频率 f/Hz	一阶共振 频率 f_1/Hz	二阶共振 频率 f_2/Hz	f_1/f
1 350	45.3	52.4	53.6	1.16
1 400	47	52.7	53.9	1.12
1 450	48.7	53.1	54.3	1.09
1 500	50.4	53.4	54.7	1.06
1 550	52	53.8	55	1.03

通过计算结果发现，在不同转速下风扇的一阶和二阶共振频率都接近电动机运行时工作频率，转速越高离电动机工作频率越近。在工程设计中一般要求 $f_1/f > 1.2$ 才可以避免共振的发生，从计算结果可以看出，在电动机整个调速运行工程中风扇都会发生共振。通过现场运行记录的数据，该电动机在正常工作时风扇端水平方向的振速为1.8 mm/s，垂直方向振速为1.5 mm/s，满足电动机正常运行时国标对振动值要求。对比计算结果与电动机实际运行情况可以推断，风扇共振对电动机振动产生的影响较小，可以满足电动机正常运行的需要，但是风扇在转动过程中却受到持续共振力的作用，引起焊缝裂纹的出现。

问题的处理

通过分析计算，发现风扇与电动机之间的共振是后盘与轮毂之间焊缝开裂的根本原因，所以对风扇的结构进行改进，来改变风扇的固有频率，使风扇的固有频率远离电动机的工作频率。将风扇扇叶和前盘的厚度增加到5 mm，仿真计算得到风扇静止状态下的固有频率为65 Hz，与电动机最高转速下工作频率之比为1.25，远离电动机的工作频率。随着电动机转速的升高，风扇的共振频率也将提高，风扇共振频率与电动机工作频率之比也将随之增大，所以风扇与电动机将不再

发生共振。

另外从风扇的实际生产过程中解到，风扇在焊接完成后要进行校形处理，在校形过程中风扇受到的外力会对风扇轮毂与后盘之间的焊缝产生较大的影响。为解决校形过程中风扇轮毂与后盘连接处的受力问题，对风扇后盘与风扇轮毂之间的连接结构进行改进，由焊接结构更改为铆接的结构。另外轮毂与后盘连接部分整体加工，为防止应力集中加工圆角进行过渡，如图5所示。通过对风扇结构进行优化，从根本上解决了该风扇轮毂与后盘间连接处的安全隐患。

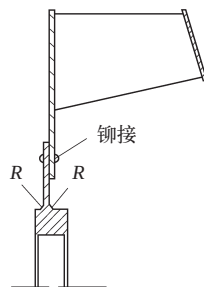


图5 改进后风扇结构

结束语

通过对该问题研究分析发现，对于变频调速电动机，工作频率范围比较宽，在风扇设计时应该考虑风扇固有频率是否在电动机工作频率范围内。如果风扇的固有频率在电动机的工作频率范围内，就有可能产生共振。虽然产生共振对电动机振动的影响不大，电动机的振动可以保持在正常范围内，但是对风扇本身的强度会产生影响，这也是设计人员容易忽略的地方。风扇的后盘与轮毂之间的采用焊接结构有一定的风险，通过结构优化，将轮毂与后盘的连接由焊接结构更改为铆接结构，同时加工过渡圆角消除集中应力，从而在根本上消除了风险源。EA

(收稿日期：2020.01.10)

(编辑：朱金凤)

声 明

《电气时代》杂志唯一投稿渠道

登录电气时代官网 www.eage.com.cn，点击“我要投稿”

咨询电话：68993981