

一种免扭矩仪的电动机轴功率实时测量方法

徐伟专^{1,3},陈洪亮²,黄河³

(1.国防科学技术大学,长沙 410073; 2.浙江广播电视大学缙云分校,缙云 321402;

3.湖南银河电气有限公司,长沙 410073)

摘要: 风机、水泵机组运行效率低下,蕴藏着巨大的节能潜力,效率测量是研究风机、水泵机组节能的前提。轴功率测量是风机、水泵机组中电动机效率及风机、水泵效率测量的关键技术,本文介绍了一种无需扭矩仪的基于三相异步电动机损耗分析法的电动机轴功率测量方法,为风机、水泵机组效率测量提供了一种全新的思路。

1. 风机、水泵机组能耗分析

风机、水泵是量大面广的通用机械耗电设备,据统计,我国目前拥有的风机、水泵每年耗电占全国耗电总量的30%以上,占工业总用电量的50%左右,且很多设备运行效率低、设备陈旧,具有较大的节能潜力。

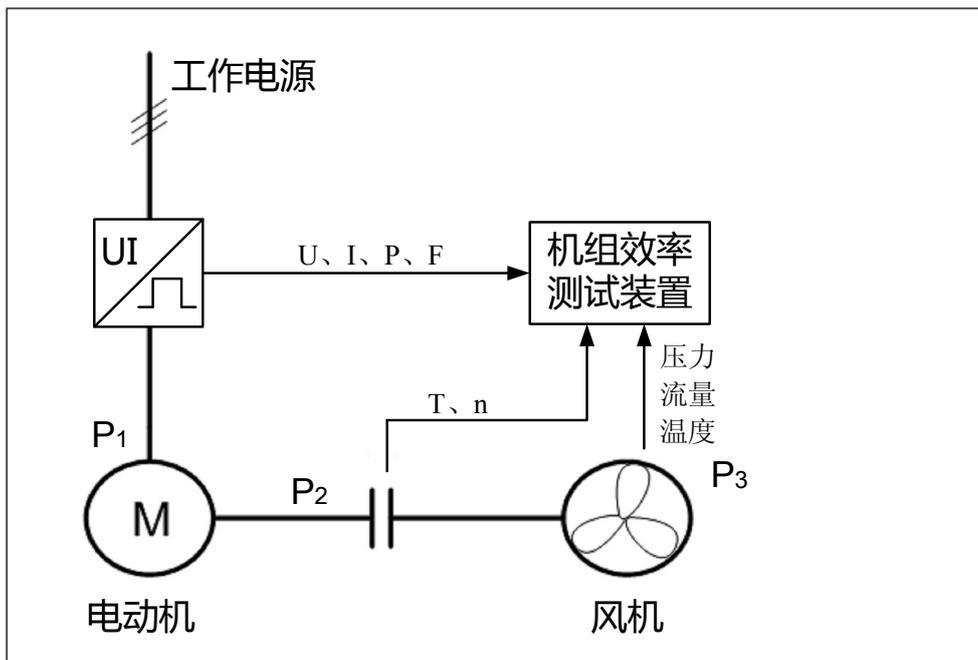
500kW以上的风机、水泵额定效率一般可达80%左右,配套电动机的额定效率可达95%左右,不考虑管网损耗,额定效率可达76%左右,可是,相关统计表明,我国风机的平均运行效率只有30~40%。

机组效率低下,大致有选型不当、功率配置不当、管网布置不合理、调节不当等诸多应用层面的问题,对于选型、功率配置不当、管网配置不合理等问题,经专业指导,可最大限度的优化。调节不当问题,采用变频器驱动,并且采用合理的调节方式,可以很大程度上予以改善。除了应用层面的问题,在负荷变化较大的场合,拖动电机、风机、水泵等会经常远离高效率点运行,导致效率降低,也是效率降低的重要因数。研究高效设备并在宽范围之内保证高效率运行,是真正需要电机、风机和水泵厂解决的核心问题。

节能电机、风机、水泵的研究,节能改造实施及节能改造评价等工作都需要对风机及水泵机组的能效进行评测。电动机的实际运行效率测量,是风机及水泵机组能效评测中的关键技术,本文重点介绍风机和水泵机组中电动机的效率测量方法。

2. 风机和水泵机组效率测量技术现状

风机和水泵机组效率参数包括电动机效率、风机效率及系统效率。下图是目前普遍采用的风机机组效率测试的原理简图，水泵系统类似。



图中，机组由电动机和风机组成，电动机和风机同轴连接，轴上装有扭矩仪，通过测量扭矩和转速，可以计算出轴功率。由于联轴器的损耗可以忽略不计，可以认为电动机的输出功率就是风机的输入功率，都用 P_2 表示。 P_1 和 P_3 的测量技术较成熟，在此不作介绍。

显然，获取了 P_1 、 P_2 和 P_3 ，就可以计算电动机效率，风机效率和机组效率。

但是，有些风机是成套安装的，轴上不能安装扭矩仪，本文要考虑的就是如何在这种情况下准确测量 P_2 。

相关厂家研制了一种无需安装扭矩仪的简易测量设备，该设备事先录入各种型号电机的效率特性曲线，实时测量电机的输入功率，对比效率特性曲线获取电机当前运行效率。其优点是无需扭矩仪，投资小，试验方便。但由于以下原因，准确度较低，目前未被风机和水泵厂广泛采用。

一、同型号或同类型的电机效率曲线与实际电机效率曲线存在差距；

二、效率特性曲线反映的是额定电压和基准工作温度下的效率，实际效率受温度及电网电压波动的影响较大；

三、电机厂家提供的效率曲线是额定频率下的效率曲线，采用变频调速时不适用。

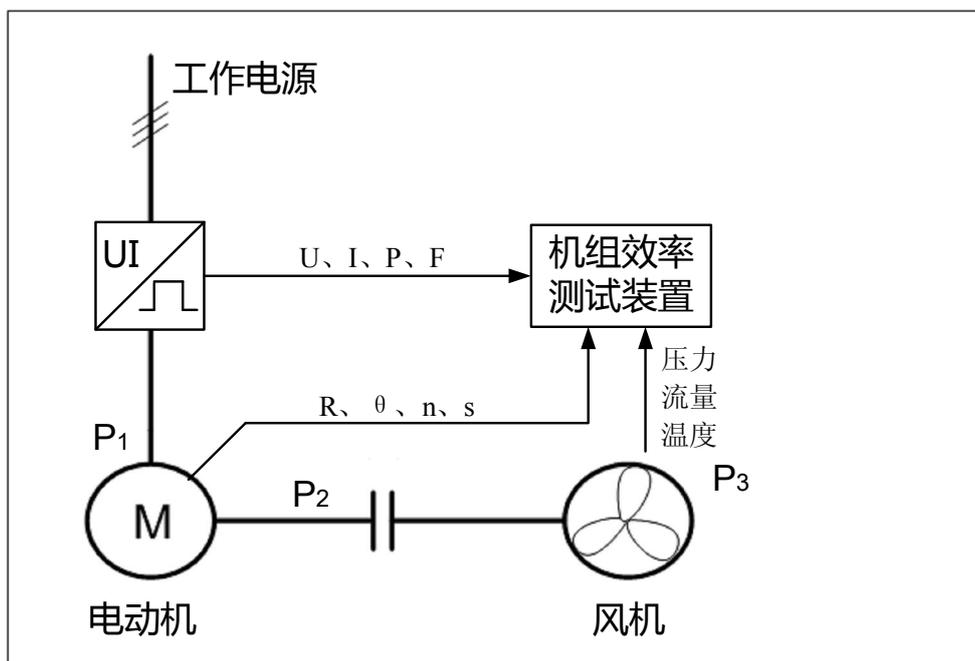
3. 损耗分析法实时测量风机和水泵的轴功率

既然不能直接测量电动机的输出功率。设想在已知输入功率时，若能知道电动机的损耗，那么，输入功率减去损耗就是电动机的输出功率，由此，还可以计算电动机的运行效率。理论和实践都已经证明该设想是可行的，并且可以达到较高的准确度。在电机试验方法中，这种方法称为损耗分析法，损耗分析法是计算高效电机效率的主要方法。

《GB/T1032-2005 三相异步电动机试验方法》（以下简称 GB/T1032）指出：效率高于 80% 以上的电机不宜采用直接测量输出功率计算效率的方法（输入-输出法，简称 A 法）。

《GB18613-2012 中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》明确了电机效率运算采用测量输入输出功率的损耗分析法（B 法）。

本文探讨的电动机轴功率测量方法主要依据 GB/T1032 中的测量输入功率的损耗分析法（E1 法）。其基本思想是利用先进的测试设备、计算机实时测量技术、数据库技术，利用少量的电机出厂试验/型式试验数据，连接必要的测量装置，将风机机组作为电机能效评测的试验平台，实时测量、分析、计算出电动机运行的各种损耗，进而计算出电动机的轴功率，并在此基础上，计算出电动机、风机和水泵的运行效率。机组效率测试装置的原理图如下：



电动机的损耗主要包括铁耗、风摩耗、定子铜耗、转子铜耗和杂散损耗。其中铁耗和风摩耗为恒定损耗，与负载无关。定子铜耗、转子铜耗和杂散损耗为可变损耗，随负载的变化而变化。

电动机的输出功率及效率的计算公式如下：

$$P_2 = P_1 - P_{Fe} - P_{fw} - P_{Cu1} - P_{Cu2} - P_s \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

式中， η —电机效率， P_{Fe} —铁耗， P_{fw} —风摩耗， P_{cu1} —定子铜耗， P_{cu2} —转子铜耗， P_s —负载杂散耗。

P_{Fe} 与 P_{fw} 由电机出厂时提供的空载试验数据获取。

在额定电压下进行空载试验，测量输入功率 P_0 、输入电流 I_0 、直流电阻 R_0 ，可得恒定损耗 P_{con} ：

$$P_{con} = P_{Fe} + P_{fw} = P_0 - 1.5I_0^2R_0$$

在不同输入电压下进行空载试验，采用曲线拟合技术可将 P_{Fe} 与 P_{fw} 分离，获取 P_{Fe} 和 P_{fw} 。

GB/T1032 中， P_{cu1} 和 P_{cu2} 由负载试验获取，负载试验的相关数据均需折算到由热试验获取温升后计算的规定温度。本文目的是实时获取当前效率，以风机作为电机负载，只需在当前负载下计算定子 P_{cu1} 和 P_{cu2} ，需要根据当前温度和测量直流电阻时定子绕组的实际温度换算得出当前定子直流电阻。

$$P_{cu1} = 1.5I_1^2R_t \quad (3)$$

$$R_t = R_c \frac{K1+\theta_t}{K1+\theta_c} \quad (4)$$

$$P_{cu2} = (P_1 - P_{cu1} - P_{Fe})S \quad (5)$$

I_1 为当前输入电流， R_t 为定子绕组当前直流电阻， R_c 为测量到的定子绕组直流电阻、 θ_c 为测量直流电阻时的定子绕组温度、 θ_t 为当前定子绕组温度， $K1$ 为定子绕组导体材料在 0°C 时电阻温度系数的倒数， S 为实时测量的转差率。

额定功率时的负载杂散耗按下式计算：

$$P_{SN} = 0.005P_{IN}$$

注： P_{IN} 为额定输出功率时的输入功率，不同功率电机的比例不同，详细参见 GB/T1032。

不同输入功率下的负载杂散耗按下述公式计算：

$$P_s = \frac{I_1^2 - I_0^2}{I_N^2 - I_0^2} P_{SN} \quad (6)$$

I_1 为实时测量的输入电流， I_N 为额定输入电流， I_0 为额定电压时的空载电流。

4. 影响轴功率测量准确度的关键因素

以某 10kV/500kW 异步电动机的额定参数为例：

电机效率为 95.03%，输入功率为 526.12kW，总损耗为 26.12kW，各项损耗及其占总损耗中的比例分别为：

$P_{Fe}=6.886\text{kW}$ (26.36%) , $P_{fw}=3.949\text{kW}$ (15.12%) , $P_{cu1}=8.533\text{kW}$ (32.67%) , $P_{cu2}=4.121\text{kW}$ (15.78%) , $P_s=2.631\text{kW}$ (10.07%) 。

额定功率时, 各项损耗中, 定子铜耗、转子铜耗及杂散损耗之和约占总损耗的 60%, 铁耗和风摩耗之和约占总损耗的 40%。前者为可变损耗, 后者为恒定损耗。

实际运行时, 电机往往工作在额定功率以下, 恒定损耗不变, 可变损耗变小, 相对而言, 恒定损耗所占比例增大, 并且恒定损耗不能在实际运行中实时测量, 另外, 从式 (5) 可知, 铁耗还影响转子铜耗的计算, 因此, 空载试验数据的完整性及准确度是影响效率计算的最主要因素。

由式 (3) ~ (6) 可知, 输入功率、定子电流、定子绕组冷态电阻、定子绕组温度、转子绕组温度、转差率等参数的准确测量, 是提高可变损耗准确度的关键。

定子绕组温度或定子绕组实时直流电阻是定子铜耗计算的重要因数, 若电机埋置了检温计, 现场测试时, 可利用检温计测量的温度替代绕组温度。厂家试验时, 宜采用停机测量直流电阻的方法。

转差率测量方法可以采用测量转速及供电电源频率的方法, 也可以采用感应线圈法直接测量转差率。前者一般采用编码器、霍尔传感器、光电传感器等, 技术较为成熟, 前提是需要旋转体上安装编码器、齿轮盘、磁钢、反光片等辅助元件, 有时受设备形式或安装方式局限, 不能使用。后者完全免安装, 只要将感应线圈放置在电机附近即可, 但是, 容易受到环境磁场的影响, 在电磁环境较复杂的现场往往不能准确测量甚至失效。

电动机运行效率随负荷变化及供电电压的变化而变化, 上述参数以及风机输出功率相关参数的同步测量及积分运算等方法是提高效率准确度的有效方法。同步测量要求测量上述参数的仪表能够实时输出数据并输出数据相关的时间信息。由于系统需要测量的参量种类较多, 通常是采用几个厂家的仪表进行集成的方法, 难于满足同步要求。考虑到效率是功率的比例, 平均效率可以是能量的比例, 在同步测量的基础上, 采用输入输出功率在一段时间内的积分值的比例计算平均效率, 可以有效的减小偶然误差, 提高效率计算的准确度。

5. 结语

湖南银河电气有限公司专业从事电机能效测评装置研究, 其 AnyWay 系列电机能效评测产品广泛应用于全国各大电机企业及第三方检定机构。在多年从事电机试验台建设过程中, 积累了丰富的电机能效评测的测量方法和技术。其研制的风机机组能效评测装置一方面采用各种先进测量设备及计算机测量技术保证实时测量参数的准确度, 另一方面, 根据大量的各类型电机

试验报表数据，建立了完整的数据库，对于部分缺失数据进行预测或修正，成功解决了风机及机组系统中电机效率实时测量问题，效率误差限值可达 0.5%~2%。该装置既可用于风机企业对风机及机组进行效率测试，也可方便的对运行中的风机机组进行了节能评估，为风机用户更新淘汰低效电机及高耗能用电设备、采用高效节能电机及系统相关节电设备提供有力的数据支持。

参考文献

- 1) 许亚非 风机水泵节能技术途径
- 2) 金惟伟, 李宝金, 陈伟华等 GB/T 1032-2012 三相异步电动机试验方法