

变频器在风洞实验中应用的关键技术研究

惠增宏, 竹朝霞

(西北工业大学翼型研究中心, 陕西 西安 710072)

摘要:介绍了变频器在风洞的飞机模型带动力实验以及飞机螺旋桨实验中的应用。由于实验的特殊性, 所以对变频器的各项性能都有特殊的要求。文中对变频器容量、输出频率、载波频率、压频曲线、频率分辨率以及能耗制动电阻等几个关键技术进行了探讨, 最后简单介绍了对谐波干扰的抑制。

关键词:变频器; 风洞; 螺旋桨实验; 带动力实验

中图分类号: V216.8 **文献标识码:** A

Research on the key technologies of the frequency converter used in wind tunnel test

HUI Zeng-hong, ZHU Zhao-xia

(Center of Aerodynamics Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: When the frequency converter used in wind tunnel test, especially in aircraft model with power or propeller test, there are many special requirements with converter. Such as the capacity of converter, output frequency, carrier wave, curve of voltage-frequency, frequency resolving power, brake resistance which were discussed in this paper.

Key words: frequency converter; wind tunnel; propeller test; aircraft model with power test

0 引言

螺旋桨飞机带动力风洞实验的目的是为了测量螺旋桨对全机气动特性的影响, 为飞机设计提供可靠的实验数据。因此, 只有当风洞实验结果和实物螺旋桨对飞机产生相同的影响时才能应用到实物上去。由于受风洞实验段尺寸的限制, 同时也为了便于对实验状态进行控制, 实验所用的电机一般都是非标的, 其主要特点是尺寸小、功率大、转速高, 其控制电源采用变频器供电。随着电力电子器件的飞速发展和各种控制理论研究的进一步深入, 变频器的各种性能也得到了进一步的提高。但是, 由于风洞实验不同于一般的电力拖动系统, 使得将变频器应用于风洞实验中时也有很多特殊的要求。为了得到可靠的实验结果, 对变频器在风洞实验中应用的一些关键技术进行研

究是很有必要的。

1 变频调速的基本原理

变频调速是交流电机各种调速方式中比较合理、最有发展前途的一种。交流电机转速表达式为:

$$n = \frac{60f(1-s)}{p} \quad (1)$$

式中:

n —电机转速(r/min);

f —电机供电频率(Hz);

s —转差率;

p —电机极对数。

对异步电机而言, 极对数 p 固定, 转差率随负载变化很小(0.02~0.05)之间, 电机转速近似与频率成正比。磁通太弱, 电机铁心没有充分利用, 造成浪费;

• 收稿日期: 2003-05-18

作者简介: 惠增宏(1969-), 男, 陕西富平人, 博士生, 研究方向: 风洞测量与控制。

磁通太强,励磁电流增加,电机过热;在磁通恒定时,不同频率下的电机机械特性硬度变化很小。所以在调速时使气隙磁通保持为恒定值是一个很重要的因素。忽略定子漏阻抗的定子电势方程为:

$$U_1 \approx E_1 = 4.44fW_1K_{w1}\phi \quad (2)$$

式中:

U_1 —定子电压(V);

E_1 —定子感应电势(V);

W_1 —定子绕组匝数;

K_{w1} —绕组系数;

ϕ —气隙磁通(韦伯)。

由(2)式可知,要使电机磁通保持不变,应使 $U_1/f = E_1/f = \text{常数}$,这即为恒磁通变频应当遵循的协调控制条件。从异步电机转矩与磁通的关系可知,当有功电流为额定值、气隙磁通恒定时,电机输出的转矩也保持恒定状态,即为恒转矩调速。在低频时,由于定子阻抗压降影响较大,为了保持磁通近似为恒定值,可采取电压补偿措施,即适当提高定子电压。

当频率升到额定频率以上时,由于电压增加不能超过额定电压,只能保持电机电压为额定值,这将迫使磁通与频率成反比变化,类似于直流电机的弱磁升速,属恒功率调速。

由上可知,变频调速属转差功率不变型调速,效率最高。变频调速可以得到很宽的调速范围,具有很好的调速平滑性和足够硬度的机械特性。采用变频调速时起动电流小,无冲击,可实现电机的软起动。

2 变频调速装置

交流电机变频调速时必须有变压变频电源(VVVF)。从变换的方式看,变频装置可分为直接变频和间接变频两类。直接变频系统将工频交流一次变换为电压及频率可变的交流(又称交—交变频器),间接变频系统又称交—直—交变频系统,即先将工频电源整流成直流,再将直流逆变为电压和频率可变的交流,属二次换能,是目前应用最广的变频形式。其原理简图如图1所示:

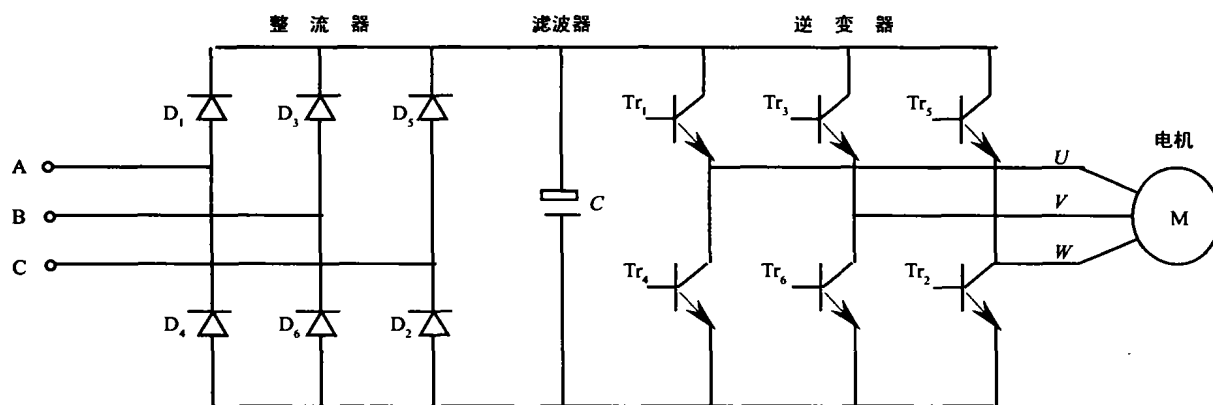


图1 交—直—交变频器主电路原理简图

Fig.1 The main circuit diagram of AC-DC-AC frequency

从变频电源的性质来看,又可分为电压型和电流型两类。对交—直—交变频装置而言,中间的环节采用电容滤波时,能降低电源侧的阻抗,近似为一电压源,故称电压型;当采用电感滤波时,能增加电源侧的阻抗,近似为一电流源,故称电流型。现在应用较多的还是电压型。间接变频装置实现变频变压目前最流行的是脉宽调制(PWM)方式。PWM技术的原理是采用一系列宽度不同、按一系列时间序列排列的等幅脉冲方波来逼近一条正弦曲线,产生接近正弦的电压和电流。调节脉冲的宽度和脉冲列的转换周期,就可以改变输出电压的幅值和频率。

3 螺旋桨飞机带动力风洞实验中的关键技术问题

3.1 变频器容量的选择

在一台变频器只拖动一台电机时,只要使变频器的额定电流大于该电机的额定电流,或者使变频器所适配的电机功率大于该电动机的功率。不过要注意,此时变频器说明书上的电动机多指标准电机。由于螺旋桨飞机风洞实验所用的电机一般都为特殊制造,其效率和功率因数都比标准电机低,所以在选用时应留有一定的裕量。如果某公司的变频器标明的是视在功率,则应使电动机算出的所需视在功率小于变频

器所能提供的视在功率。电动机的视在功率 S (kVA)可由下式计算:

$$S = \frac{P}{\eta \cos \varphi} \quad (3)$$

式中:

P —电动机额定功率(kW);

η —电动机的效率;

$\cos \varphi$ —电动机功率因数。

由于电动机的 P 、 η 和 $\cos \varphi$ 都是在供电电流波形为纯正弦函数关系时得到的,所以在实际应用中应当根据变频器的性能再予以适当修正。

3.2 变频器输出频率和载波频率的选择

一般变频器都标有额定输出频率 f_e 和最大输出频率 f_{\max} 两个指标。但要注意,不能以 f_{\max} 作为和电机匹配的依据。例如某型号变频器标明的 $f_e = 0 \sim 150\text{Hz}$ 、 $f_{\max} = 400\text{Hz}$,在拖动电机运行时,如果电机电压达到 380V,不能将频率调到 400Hz。因为当变频器的输出频率达到 f_{\max} 时,如果不调整载波频率,此时输出电流波形畸变非常严重,导致电机损耗急剧增加,在很短的时间内就会烧坏电机。所以在选择变频器频率时,除要选择 f_e 外,还要看变频器的载波频率能否调整。因为变频器的输出频率由参考信号频率决定,提高逆变器的开关频率可改善输出电流波形,减少高次谐波分量,从而使谐波附加损耗、谐波脉动转矩得到削弱和抑制,降低电机噪音,并提高效率。

3.3 U/f 特性的合理选择

螺旋桨飞机带动力实验中,其负载特性类属风机、泵类负载。由于负载转矩 M_t 基本上与其转速的平方成正比,亦即与其供电频率 f 的平方成正比。此时采用 U/f 的特性为二次方指数曲线(图 2 中的实线)。但是,在风洞实验过程中,我们一般选 $U/f = \text{常数}$ (图 2 中的虚线)。很显然,电机不是运行在最佳状态。这是因为根据实验要求,我们要不断调整桨叶的角度,不同的角度,其负载转矩并不是完全与转速的平方成正比,有的不足二次,有的超过二次,所以选用 $U/f = \text{常数}$ 可以大大地提高实验效率。

3.4 频率分辨率对实验结果的影响

螺旋桨飞机进行带动力实验时,首先根据飞机设计时提供的拉力系数 T_c 和扭矩系数 Q_c 随前进比 λ 的变化曲线选定模型桨叶的安装角 ϕ ,通过实验求出拉力系数与转速的关系曲线。在进行支架干扰和正式实验时,都是根据要求模拟拉力系数,控制电机的

转速就可以进行拉力系数的模拟。飞机模型带动力实验时,其阻力系数结果是由天平测量的阻力分量的系数和螺旋桨名义上的拉力系数两部分构成的,而拉力系数又与转速的平方成正比,若转速控制不准,拉力系数就会产生较大的误差。例如:实验要求测定的拉力系数为 0.2 时,对应螺旋桨的转速是 133r/s,而在吹风实验时,由于转速控制不准而在 134r/s 下采集了数据,这时拉力系数将会有 1.5% 的误差。这个误差反映在阻力测量误差上,就远远超过了要求的实验精度范围。为了达到国军标阻力测量精度为 0.05% 的要求,在转速 133r/s 的情况下,要求误差在 0.034r/s 之内。以 4 极电机为例,则要求输出频率分辨率达到 0.068Hz,才可满足实验精度要求。

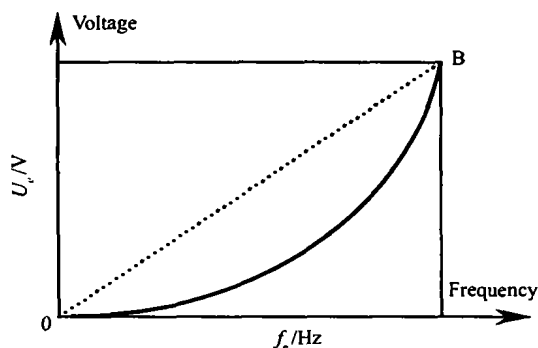


图 2 U/f 曲线

Fig.2 The curve of voltage-frequency

3.5 能耗制动电阻的选择

在风洞实验过程中,由于要求对螺旋桨飞机带动力飞行状态进行模拟,电动机在一定的条件下会工作在发电机状态(负拉力状态或风车状态),这时电动机不是向变频器索取能量,而是向变频器回馈能量,再生的能量使中间电路的电容器(即图 1 中的 C)充电。随着回馈能量的增大,变频器内部的直流滤波电容两端的电压会逐步增高,在一定程度下,滤波电容会因电压过高而击穿。所以,必须在变频器的直流端加装能耗制动电阻,将回馈的能量消耗在制动电阻上,从而起到保护变频器的目的。能耗电阻的容量由再生能量的大小和反复的周期来决定,根据风洞实验经验,一般取为变频器额定容量的 30% 即可。

3.6 谐波干扰的抑制

谐波干扰是变频器在应用过程中不可避免的问题。在螺旋桨飞机带动力风洞实验过程中,拉力和扭矩一般都是采用应变天平进行测量,其输出信号幅度一般都在毫伏级甚至微伏级,所以如何减小变频器干扰对实验数据的影响至关重要。对于变频器而言,除

必须可靠接地外,还可在输出端加装滤波电抗器或采用谐波抑制技术;对于应变天平,其输出最好采用双绞屏蔽线、单端接地方式。同时,尽量使变频器远离应变天平和数据采集系统,对动力供电电源线和天平信号线应垂直交叉布线。

4 结束语

变频调速是异步电动机理想的调速方法,它具有效率高、调速范围宽、精度高、平滑性好等优点,有取代传统的直流调速的趋势。西北工业大学翼型研究中心经过多年的努力,目前已经拥有两台大功率的中频变频器(容量 160kVA,200kVA)以及多台中频电机(电机功率 100kW、38kW、36kW、8kW)用于风洞实验,并探索出一套成熟的实验方法。多年实验表明,本文涉及的变频器在风洞实验应用中的几个关键技术,对改善带动力模型实验结果很有成效。本文可以作为作者的另外一篇论文“高功率密度电机研制的关键技

术及其在风洞实验中的应用研究”的姊妹篇,是根据作者多年在应用变频器和变频电机过程中所积累的经验写成的,希望能起到抛砖引玉的作用。作者相信,随着交流变频调速技术飞速发展,它必将对我国的航空工业和国防工业的发展起到越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 鲍国华 主编.风洞特种实验[M].西安:西北工业大学出版社.1990年5月,144~160.
- [2] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会.低速风洞实验[M].北京:国防工业出版社,2002年7月,157~164.
- [3] 中国石油天然气总公司装备局 编.变频调速应用技术[M].北京:石油工业出版社,1992年1月,32~35.
- [4] 吴忠智,吴加林编著.变频器应用手册[M].北京:机械工业出版社,1995年7月,42~51.