

# 直流低速测速发电机纹波系数测试讨论

张文海,徐丽

(成都精密电机厂,成都 610500)

中图分类号:TM356;TM383.3 文献标识码:E

文章编号:1004-7018(2007)05-0052-03

## 1 引言

直流低速测速发电机纹波系数测试是一个老课题,但至今对其中一些问题仍有不同看法。为了准确、方便地测试这一指标,我们对该课题进行了一些实验与分析,并在此基础上提出自己的看法。今总结出来,供大家参考。

## 2 影响纹波系数的因素

### (1) 每极下实槽元件数的影响

低速直流测速发电机是一种高斜率、低转速的直流测速发电机。要减小其输出纹波系数,每极下的实槽元件数是关键。元件数越多,纹波系数越小。有关理论认为,当每极下的实槽元件数达到8时,纹波系数理论上已可小于1%。当然,这是以元件输出正弦半波而言的,如果元件输出梯形半波,纹波系数比1%稍大一点。为了得出每极下实槽元件数对纹波系数影响的大小,我们在电脑上进行仿真分析,并由此得出一个元件数  $m$  与纹波系数  $K$  的关系:

$$K = \frac{0.6318}{m^2} \quad (1)$$

由式(1),我们便可根据每极下的元件数,计算出该电机的理论纹波系数,如表1所示;图1则是两者之间的关系曲线。图2是对每极下14个实槽元件、元件输出正弦半波的纹波仿真波形,其理论纹波系数为0.32%。图3则是对每极下15个实槽元件、元件输出梯形半波的纹波仿真波形,其理论纹波系数为0.42%。从图2、图3中可以看出,每极下实槽元件数接近,元件输出半波为正弦波比梯形波纹波系数要稍小一些,前者为0.32%,后者为0.42%。

表1 假设磁场波形为正弦波,且采用方型磁钢

元件数 $m$	2	5	6	8	10	11	14
纹波系数 $K/\%$	17.15	2.51	1.73	0.97	0.61	0.51	0.32

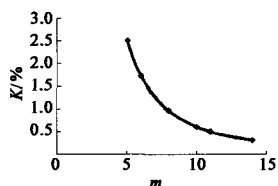


图1

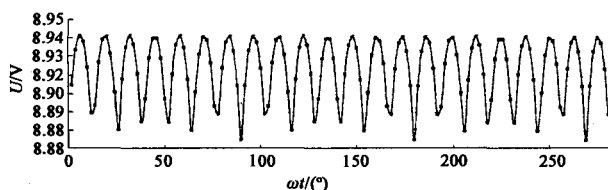


图2

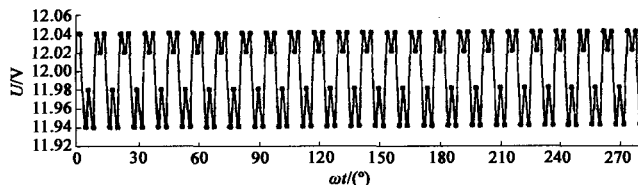


图3

下面,我们以两种电机实测比较,观察每极下实槽元件数对纹波系数的影响。一种为130机座号测速发电机两台,1#电机每极下实槽元件数为13.17,实测纹波系数为0.55%;2#电机每极下实槽元件数为6.58,实测纹波系数为5.5%。另一种为215机座号测速发电机两台,1#电机每极下实槽元件数为10.1,实测纹波系数为0.68%;2#电机每极下实槽元件数为6.58,实测纹波系数为5.6%。两种电机均为每极下实槽元件数少,纹波系数大;每极下实槽元件数多,纹波系数小。证明每极下实槽元件数是影响纹波系数的关键。

既然每极下的元件数越多,纹波系数越小,有理论认为,采用虚槽可以使每极下的元件数倍增,虚槽元件数等于  $m$ ,这样就可以大大改善纹波系数。实际情况并不是这样,因为同一槽中的几个虚槽元件,它们的反电势半波,在相位上并无差别,相互叠加后,只有增大幅值,并无平波作用。而实槽中的元件反电势半波,每相邻两个都有相等的相位差,叠加后,都有平波作用,每极下元件数越多,平波效果越好,纹波系数也越小。因此,采用虚槽,对减小纹波系数并无多大作用,相反却给换向器工艺下线工艺带来很多难度。为了证明上述说法的正确性,我们选择两台同机座号,每极下同实槽元件数但不同虚槽元件数的330#机座号测速发电机作纹波系数测试比较实验。1#电机实槽元件数14.3,虚槽元件数  $14.3 \times 3 = 42.9$ 。2#电机实槽元件数仍为14.3,虚槽元件数  $14.3 \times 2 = 28.6$ 。用式(1)按实槽元件数14.3计算,该两台电机的理论纹波都应0.31%,1#电机实测纹波系数为0.35%,2#电机为0.41%。两台电机的实测纹波系数均与实槽理论纹波系数接近,说明实槽元件数对纹波系数影响最大。而该两台电机的虚槽理论纹波系数,1#电机为  $K = 0.03\%$ ,2#电机为  $K = 0.08\%$ 。两台电机的实测纹波系数均与该理论值相差甚远,可见虚槽对减小纹波系数的作用不大。再看一种430#机座的测速发电机,该电机每极下的实槽元件数为21.7,虚槽元件数为43.4。按式(1)计算,该电机的实槽理论纹波系数为0.1%,虚槽理论纹波系数为0.03%。而实测纹波系数为0.25%,接近实槽理论纹波系数,与虚槽理论纹波系数相差同样很远,亦证明上述结论的正确性。

虚槽虽然对改善低速直流测速发电机的纹波系数作用不大,但我们认为虚槽可以减小换向元件的电感,亦即减小电抗电势,减小附加电流,改善换向。例如前面的330#机座的两台电机,它们每极下的实槽元件数均为14.3,但元件匝数不一样,1#电机为120匝,2#电机为40匝,1#电机的匝数是

2\*匝数电机的3倍,电感 $L$ 则是9倍。但两台电机的实测纹波系数均近似相等。另外采用虚槽可以降低片间电压、防止电位差火花,提高测速机的最高线性工作转速。

### (2) 齿槽效应的影响

直流发电机的磁场波形,就是每极下元件的反电势半波波形。无论磁场波形是正弦波还是梯形波,电枢齿槽磁阻的变化,都会引起磁场波形的脉动。每极下电枢有多少齿槽,磁场波形就要脉动多少次,由此引起元件反电势半波跟踪这种脉动,一般称齿槽效应。显然齿槽效应会对直流测速发电机纹波系数造成影响,因这种脉动是叠加在元件反电势半波上的。为了减小这种影响,电机设计中,在工艺许可的条件下,应尽可能增加每极下的齿槽数,以使齿槽磁阻变化细化。这样在同样转速下,可使齿槽效应引起的脉动频率升高,脉动幅值降低,减小对纹波系数的影响。当然,每极下齿槽数的增加,即可降低齿槽效应对脉动幅值的影响,又可增多每极下的实槽元件数,对平波有好处,两种作用都可使纹波系数减小。另外,采用斜槽或斜磁钢的方法,细化磁阻变化,降低脉动幅值,也可减小齿槽效应对纹波系数的影响。电枢齿槽设计成奇数,保证总槽数 $z$ 与磁极数 $2p$ 之间无公约数,也是为了减小齿槽效应对纹波系数的影响。其它,如增大气隙、磁路充分设计饱和,减小槽口宽度,都能减小齿槽效应对纹波系数的影响。

### (3) 换向的影响

直流测速发电机换向时,换向元件都要被电刷短路,从而引起电压脉动,影响纹波系数。一般,电刷在几何中性线上,对纹波系数影响不大;如果电刷位置不在几何中性线上,由换向引起的电压脉动对纹波系数的影响很大。例如:一种320\*机座的直流测速发电机,电刷在几何中性线上时,实测纹波系数只有0.41%(每极实槽元件数10.07),有意将电刷偏移几何中性线一个角度,再实测纹波系数则变大到3.1%,可见换向对低速直流测速发电机的纹波系数影响很大。有的直流测速发电机,实测纹波系数有一边小,一边大的现象。这就是因为这类电机正、反方向几何中性线不重合,有一定偏差,一个方向换向好,对纹波系数影响小,测出的纹波系数小;另一个方向的换向差,对纹波系数影响大,测出的纹波系数大。低速直流测速一般要采用全额电刷,基中一个作用就是为了改善换向,另一个作用则使绕组对称。

## 3 纹波系数与驱动转速有无关系

无关。从前面的叙述已知,直流测速发电机的纹波系数主要受每极下的元件数影响,当每极下的实槽元件数为8时,理论纹波系数 $<1\%$ ,那么测试低速直流测速发电机的纹波系数,既可在低速下测试,也可在高速(最高允许工作转速)下测试,测试结果应该一样。然而,GB/T4997-93《永磁式低速直流测速发电机》国家标准规定,低速直流测速发电机的纹波系数测试,应在稳速转台上用3 r/min左右的驱动转速测试。我们认为,低转速下测试纹波系数很不合理。其原因是,精度高的稳速转台,高速下能保证平均转速、瞬时转速均稳定。而低速(每分钟几转以下)只能保证平均转速稳定,不能保证瞬时转速稳定,哪怕加了一个大惯量盘。而我们测试测速发电机的纹波系数,则需要两种转速都很稳定。

实践中,我们用高精度稳速转台测试测速发电机的纹波系数时,总是低速大,高速小,其原因就是转台低速平均转速稳定,而瞬时转速不稳定造成的。下面,我们以两种低速直流测速发电机为例,分析驱动转速高低如何对纹波系数造成影响。一台320\*机座电机,每极下12.07个实槽元件,理论纹波系数为0.43%,而标准中规定纹波系数 $\leq 0.8\%$ ,驱动方式为高精度稳速转台。表2是该电机在转台上由5~40 r/min驱动转速下测试的正、反向各点纹波系数值:

表2

		驱动转速/ $r \cdot \min^{-1}$				
		5	10	20	30	40
正向	直流平均电压/V	24.6	49.2	98.4	147.5	196.7
	纹波电压峰值/V	0.5	0.5	1.0	1.4	1.8
	纹波系数/%	1.0	0.51	0.51	0.47	0.46
反向	驱动转速/ $r \cdot \min^{-1}$	5	10	20	30	40
	直流平均电压/V	24.6	49.2	98.3	147.6	196.7
	纹波电压峰值/V	0.5	0.5	1.0	1.5	1.8
	纹波系数/%	1.0	0.51	0.51	0.51	0.46

从表2中可以看出,即使高精度稳速转台,5 r/min以下测出的纹波系数值也是不真实的,测试值不合格,大于0.8%的要求。而10~40 r/min测出的纹波系数均近似相等,且较小,大大优于指标要求。可见,纹波系数与转速无关的结论是正确的。再看另一台130\*机座电机,每极下13.2个实槽元件,理论纹波系数为0.36%,技术标准要求纹波系数 $\leq 2.5\%$ 。驱动方式不稳速,驱动电机为一台与稳速转台同型号力矩机。表3是该电机由17~69 r/min各种驱动转速下正、反向各点纹波系数值:

表3

		驱动转速/ $r \cdot \min^{-1}$				
		17	27	35	51	69
正向	直流平均电压/V	5.02	7.92	10.99	15.15	20.26
	纹波电压峰值/V	0.075	0.094	0.120	0.170	0.235
	纹波系数/%	0.74	0.59	0.54	0.56	0.58
反向	驱动转速/ $r \cdot \min^{-1}$	17	27	35	51	69
	直流平均电压/V	5.1	8.0	10.95	15.15	20.35
	纹波电压峰值/V	0.070	0.100	0.120	0.170	0.220
	纹波系数/%	0.68	0.63	0.55	0.56	0.54

从表3中可以看出,即使不用稳速转台,直接用大机座号力矩机驱动测量纹波系数,17~69 r/min测试值也近似相等,且近似等于理论纹波系数。可见高速下测纹波系数更合理,且更方便。需要说明的是:测试中我们发现,一些转速较高,每分钟几百转以上的力矩—测速发电机组,转速越高,测试出的纹波系数越大,而无稳定不变点。究其原因,是机组电枢的动平衡不好,转速越高,振动越厉害,由此影响纹波系数随转速增高而变大。

## 4 纹波电压怎样测试更合理

(1) 有人认为,测量直流测速发电机的纹波系数,应是测量纹波电压的有效值与直流输出电压的平均值之比。实际上,造成系统误动作的,并不是纹波电压的有效值,而是纹波电压的峰值。而且,纹波电压并不是正弦波,而是很复杂的波形,峰值与有效值之间的关系也不是 $\sqrt{2}$ 的关系,用测纹波电压有效值的方法计算纹波系数的方法是不符合使用实际的,行业内早已否定了这种方法。后来,美国 Ellecto-Craft 公司提出测纹波电压峰值与输出直流电压平均值之比计

算纹波系数的方法,是公认最精确的方法,且符合使用实际。目前低速直流测速发电机国家标准,也规定用此法测量纹波系数。

(2) 用什么仪器读纹波电压峰峰值好?

国家标准规定,低速直流测速发电机纹波系数用函数记录仪测量,读取纹波电压峰峰值。函数记录仪频率响应低,只能用于低速测量。如果在高速下测量纹波系数,则应用记忆示波器,记忆示波器有自动读数功能,能很方便地读出纹波电压的峰峰值,但不能用普通示波器。普通示波器只具观察功能,不具测量功能,虽然也能读数,但误差较大,不适合测量。

(3) 美国 Electro-Craft 公司测量纹波系数,要在直流输出两端接阻容滤波器,以排除干扰。而国标测量方法中却无此规定。我们认为,测量纹波系数应该加滤波器,因火花干扰和其它一些干扰会影响测出的纹波电压峰峰值,使用中也要将其滤掉。实践中,我们在直流输出两端并联一只  $0.056 \mu\text{F}$  电容,并将电机机壳接地,能很好地将干扰旁路,又不会对纹波电压造成衰减,影响测试的准确性。事实上,国标规定的方法虽然不接滤波器,而函数记录仪本身就是滤波器。

## 5 几点建议

综上所述,我们提出如下几建议:

(上接第 22 页)

表 1 国内外智能电动执行器性能比较

	德国 PS 公司 PSQ701/AMS03	奥地利 Schiebel 公司 SMARTCON	浙江金华自动化仪表 FZ	本智能电动执行器
放大器	4~20mA 模拟驱动	4~20 mA 模拟驱动	4~20 mA 模拟驱动	全数字驱动
驱动电机	三相异步电机	单相异步电机	单相异步电机	三相同步电机
驱动力矩	<6000 N·m	<800 N·m	<600 N·m	<6 000 N·m
机械变速	多级变速,体积大	多级变速,体积大	多级变速,体积大	单级变速,体积小
通信接口	RS232	现场总线	无	RS232,现场总线

同时该执行器通过自带的外接键盘和液晶显示屏,可以进行菜单式操作;带有现场总线接口可实现远程监控及与计算机联网;采用数字检测技术,控制行程长度可任意设定,可自动调整零点,具有安全状态设置功能。实践证明由该电动执行器构成的控制系统运行可靠,性能高,能实现精确调速和精确定位,控制频率高,具有很强的竞争能力,可广泛应用于各种伺服控制系统和工业生产过程,应用前景广阔。

## 参考文献

- [1] 胡佑德,马东升,张莉松. 伺服系统原理与设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999
- [2] 郭庆鼎,王成元. 直线交流伺服系统的精密控制技术[M]. 北

(上接第 51 页)

(4) 电机输出轴有断裂隐伤。由于电机负荷较重,起停和正反转频繁而使轴金属疲劳所致,因此电机虽然运转正常但没有转矩输出。

(5) 定转子间隙过大。超过规定间隙值的下限,造成整个频率特性下降,对此只能换转子。

(1) 纹波系数与转速无关,测试低速直流测速发电机的纹波系数最好定在高速下测试,这样转台的平均转速与瞬时转速都容易达到稳定。若没有稳速转台,可用一台大机座号的力矩电机直接驱动测速机,高速下也可达到平均与瞬时转速稳定,使测速机的纹波系数测试变得方便与简单,而且也准确。至于高转速定在多少?我们认为定在测速机的 5% 最高转速以上任何一个转速测试均可。

(2) 测试纹波系数时,测速发电机两端应并联一只  $0.056 \mu\text{F}$  滤波电容,将各种干扰旁路,并将机壳接地。 $0.056 \mu\text{F}$  属高通滤波器,不会对纹波电压造成衰减。

(3) 测速机输出直流电压平均值,应用数字电压表读数;纹波电压峰峰值用记忆示波器读数,两者输入阻抗很高,不会对输出造成影响。

(4) 国家标准规定,低速直流测速发电机的纹波系数以小机座号定指标,小机座号指标低,大机座号指标高。我们认为应以每极下的元件数定指标,元件数越多,纹波系数指标越高。小机座号电机只要每极下元件数多,纹波系数同样可做到很小,只是工艺难度比大机座号电机大些。

为进一步提高本刊的编辑质量,请您对此文在读者服务卡上圈上数字代码:  
有价值,请圈 33;没有价值,请圈 34。

京:机械工业出版社,2000

- [3] International Rectifier Corp. High Performance Configurable Digital AC Servo Control IC IRMCK201 Data Sheet [R]. 2003
- [4] Atmel Corporation. 8-bit Microcontroller with 128K Bytes In-System Programmable Flash - ATmega128 [R]. 2004

作者简介:王毅峰(1975-),男,硕士,讲师,主要研究方向为电力电子、智能控制。

温希东(1961-),男,硕士,教授,主要研究方向为自动控制,交流电机步进驱动。

为进一步提高本刊的编辑质量,请您对此文在读者服务卡上圈上数字代码:  
有价值,请圈 13;没有价值,请圈 14。

(6) 电源电压过低,造成出力较大的下降。

(无参考文献)

为进一步提高本刊的编辑质量,请您对此文在读者服务卡上圈上数字代码:  
有价值,请圈 31;没有价值,请圈 32。