

正弦波驱动无刷直流电动机的电势系数

王宗培¹, 韩光鲜², 葛 新²

(1. 珠海运控电机有限公司, 广东 珠海 519000;

2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 电势系数是交流伺服电动机的重要参数, 在电源电压确定的情况下, 它的值直接影响电动机的空载转速和开环机械特性, 从中得出电势系数的值主要取决于交流伺服电动机额定转速的结论。给出了近代超小交流伺服电动机设计的主要途径是取较小值的电势系数, 同时减小定子绕组铜损耗。

关键词: 无刷直流电动机; 电势系数; 正弦波驱动; 交流伺服电动机; 超小惯量

中图分类号: TM 381

文献标识码: A

文章编号: 1001- 6848(2003)03- 0003- 05

EM F Constant of Sine- wave Driving BLDCM

WANG Zong- pei¹, HAN Guang- xian², GE Xin²

(1. Zhuhai Motion Control Motor Co. Ltd., Zhuhai 519000, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract The EM F constant is an important parameter of AC servo. Its value will influence no- load speed and open loop mechanical feature of the motor directly when source voltage is determined. From above, the conclusion that the value of EM F constant is determined mainly by rated speed of AC servo can be drawn. In this paper it is presented that the main method of the design for superminiature AC servo recently is to take EM F constant smaller, and decline the copper losses of stator coil at the same time.

Key words: BLDCM; EM F constant; sine wave drive; AC servo; superminiature inertia

1 引言

电势系数是无刷直流电动机(BLDCM)的基本参数, 它影响各方面的运行性能, 因此电势系数的取值也成为电动机设计所关心的一个重要问题。这里所讨论的正弦波驱动BLDCM 系统是针对通用的交流伺服电动机^[1], 对这类电动机设计问题研究的文章不多, 见到国内较早的资料如文献[2], 仅限于原则性的论述。

从 20 世纪末至今大约不到 5 年的时间内, 国内小功率交流伺服电动机(AC servo)的市场发生很大的变化。首先是国内研制的 AC servo 开始产品化并进入市场; 国外的产品拼命抢占国内市场, 价格逐步下降, 尤其是近 2 年间降幅加大, 与此期间以前相比, 大约只有原价的 50% ~ 60%; 与此同时, 国内 AC servo 的应用系统发展迅速, 对 AC servo 的需求量增长迅速。面对国内不断增长的庞大 AC servo 需求市场, 国外厂商肯定会花大力气来占领它, 这对于国内起步较晚的 AC servo 产品的发展, 形势相当

严峻, 是很大的威胁, 也是很大的挑战。

在这种形势下, 仅靠价格优势求生存和发展不会有很大的出路, 还需要在提高 AC servo 产品品质方面下功夫。这就离不开对 AC servo 理论和设计基本问题的研究。这就是文中的研究背景, 它是作者为发展国产 AC servo 产品, 并提高其品质的一系列研究工作中的一部分。

2 电势系数

BLDCM 的电势系数有两个。一个叫相绕组的电势系数, 不妨用 k_{e1} 表示。它的定义是相绕组旋转电压的幅值与转子角速度的比值:

$$k_{e1} = \frac{\sqrt{2}U_1}{\omega} \quad \text{V s/rad} \quad (1)$$

式中 U_1 ——相绕组的旋转电压, 有效值, V

ω ——转子角速度, rad/s

另一个叫电枢绕组的电势系数, 通常用 k_e 表示。它的定义是电枢绕组的直流旋转电压(U)与转子角速度的比值:

$$k_e = \frac{U}{\omega} \quad \text{V s/rad} \quad (2)$$

收稿日期: 2003- 04- 16

直流旋转电压,是三相绕组旋转电压(U_1)在直
流端的体现,应等于它的全波整流后的值:

$$U = \frac{3}{\pi} k_v \sqrt{2} U_1 = \frac{3}{\pi} k_v k_{e1} \omega \quad \text{V} \quad (3)$$

可见,

$$k_e = \frac{3}{\pi} k_v k_{e1} \quad \text{V s/rad} \quad (4)$$

式中, k_v 为与三相绕组连接有关的系数,等于
线电压与相电压的比值:

$$k_v = \begin{cases} \sqrt{3} & (\text{Y 接}) \\ 1 & (\text{接}) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)表明二种定义的电势系数之间的关系,它
们是同一物理量的二种表示方法,采用哪一种表示
取决于方便和习惯。在厂家产品使用说明书中提供
的,一般是电枢绕组的电势系数 k_e ,这与 AC servo
乃正弦波驱动的 BLDCM 是一致的。且用户主要从
外部来了解电动机的性能和参数。相绕组的电势系
数 k_{e1} ,是由电动机相绕组内部的物理量来定义的,
在对电动机绕组电路进行分析、计算和设计时,应用
起来会感到直观和方便。

3 电势系数与电动机基本性能的关系

对电动机的最基本要求就是输出转矩(T_L)和
转速(n_r),或者较全面是机械特性, $n_r = f(T_L)$,如图
1 所示。电动机要求能在额定输出功率、额定负载
转矩和额定转速条件下连续运行;在额定转速条
件下有一定的过载能力,用最大转矩(T_p)的倍数来
衡量:

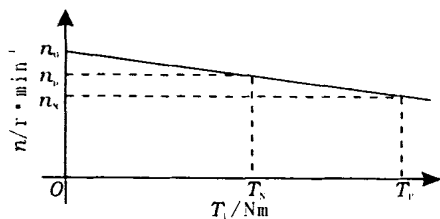


图1 电动机的机械特性(开环)

$$k_p = \frac{T_p}{T_N} \quad (6)$$

在最大转矩情况下只要求瞬时工作;在额定负载
转矩条件下,有一定的超速能力,用最高转速倍数来
衡量:

$$k_n = \frac{n_p}{n_N} \quad (7)$$

AC servo 最大的特点这一是最大转矩倍数要
求高,通常值为 $k_p = 3$ 。 k_n 的值则一般,通常为 $k_n =$
1.2~1.5。所以在设计电动机时,只要考虑能满足前

二条要求,即额定负载连续运行和最大转矩(瞬时)
倍数就可以了。

机械特性如图1所示,是一条随负载转矩增大
而转速下降的曲线。起始点 n_0 为空载转速,由外加
电压和电势系数决定:

$$n_0 = \frac{V_{\infty} 60}{k_e 2\pi} = 9549 \cdot \frac{V_{\infty}}{k_e} \quad \text{r/min} \quad (8)$$

式中, V_{∞} 为驱动器功放桥臂空载时的直流电
压。机械特性曲线下降的斜率主要与电动机相绕组
的电阻(R_{11})和电感(L_{1c})有关,电阻和电感越大,转
速下降得越快。可见,在外加电压一定的条件下,确
定好 k_e 、 R_{11} 和 L_{1c} 的值,电动机的机械特性便确定
了。反过来讲,满足要求的机械特性,就由 k_e 、 R_{11} 和
 L_{1c} 值的设计来保证。其中 k_e 值的影响最大,图2表
示 k_e 取值不同时的机械特性曲线。 $k_e^{(1)}$ 的情况表示
电势系数过大,空载转速稍高于额定转速,高出还不
够,以致负载加到额定转矩时,电动机转速降到 n_N
以下,显然不满足额定功率输出的要求; $k_e^{(2)} < k_e^{(1)}$,
情况会稍好一些,可以获得额定输出功率,但稍有超
载转速便会低于额定值; $k_e^{(3)} < k_e^{(2)}$ 的情况,在 $n = n_N$
条件下有一定的过载能力,但还达不到要求的最大
转矩倍数; $k_e^{(4)} < k_e^{(3)}$ 的情况,刚好能满足要求的最大
转矩倍数; $k_e^{(5)} < k_e^{(4)}$ 时, $n = n_N$ 是过载能力有余量,
比 n_N 高一些的转速情况也有足够的最大转矩倍数。

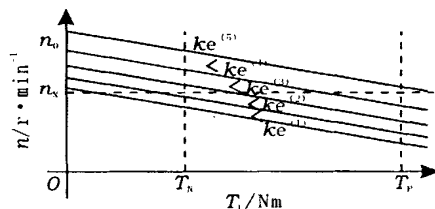


图2 不同电势系数的机械特性

可以看出, n_N 和 k_p 的值基本确定了 k_e 的取值
范围,绕组的电阻和电感参数等则对 k_e 的取值有较
小的影响,常规的 AC servo,一般都是 $k_p = 3$,不论
哪种规格,基本不变。所以实际上 AC servo 的 k_e
值,主要取决它的额定转速值(n_N), n_N 越高, k_e 的
值便越小,当然这是在相同外加电压条件下的结论。表
1 所列为信浓 MB 系列的产品目录数据,电源电压
相同,为三相 200 V,可看出电势系数的值主要与额
定转速有关。 $n_N = 3000 \text{ r/min}$ 的电动机, k_e 约为
0.75 V s/rad; $n_N = 2000 \text{ r/min}$ 的电动机, k_e 约为
1.1 V s/rad; $n_N = 1000 \text{ r/min}$ 的电动机,则 k_e 接近
2.0 V s/rad,与功率大小关系较小。

表 1 信浓MB 系列电势系数(电源三相 200 V)

| 型号 | 额定输出功率 P_N/W | 额定转速 $n/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ | 电势系数 | |
|----------|--------------------------|--|---|-------------------------------|
| | | | $k_e/(\text{V}/\text{k r} \cdot \text{min}^{-1})$ | $k_e/(\text{V s}/\text{rad})$ |
| 3MB 055A | 550 | 1 000 | 175.9 | 1.680 |
| 3MB 100A | 1 000 | 1 000 | 213.6 | 2.040 |
| 3MB 100B | 1 000 | 2 000 | 106.8 | 1.020 |
| 3MB 200B | 2 000 | 2 000 | 119.4 | 1.140 |
| 3MB 300B | 3 000 | 2 000 | 118.3 | 1.130 |
| 3MB 150C | 1 500 | 3 000 | 77.5 | 0.740 |
| 3MB 300C | 3 000 | 3 000 | 78.5 | 0.750 |

4 电势系数与连续输出功率

分析表明, k_e 的值过大时, 电动机的空载转速较低, 负载增大到一定程度时便达不到额定转速, 不能满足额定功率输出的要求, 或不能满足过载能力的要求。如图 2 中所示的情况, 应有:

$$k_e = k_e^{(4)} \quad (9)$$

在设计电动机时, k_e 的值应取它恰为 $k_e^{(4)}$, 稍小于 $k_e^{(4)}$ 还是更小一些, 为了回答这个问题, 需作一些具体的分析。

(1) 电势系数与几何尺寸及电磁负荷的关系。电动机的极对数为 P , 电枢直径为 D , 铁心迭长为 l , 气隙磁密基波幅值为 B_{g1} , 每相绕组有匝数为 N , 则

$$\tau = \frac{\pi D}{2P} \quad (10)$$

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \tau B_{g1} = \frac{1}{P} D B_{g1} \quad \text{Wb} \quad (11)$$

相绕组旋转电压的频率:

$$f_N = \frac{P n_N}{60} \quad \text{Hz} \quad (12)$$

相绕组旋转电压的有效值:

$$U_N = 4.44 f_N \Phi_1 N \quad (13)$$

相绕组的电势系数:

$$k_{e1} = \frac{\sqrt{2} U_N}{\omega_k} \quad (14)$$

考虑到:

$$\omega_k = \frac{2\pi n_N}{60} \quad (15)$$

以及式(13)、(12)和(11), 由式(14)得:

$$k_{e1} = D B_{g1} N \quad (16)$$

近代采用 NdFeB 永磁材料的电动机, 在极距(τ)不是过小的情况下, 不难获得较高的值, 且大致为 0.8~0.9 T。式(16)表明, 在 D 和 l 不变的情况下, 电势系数的值仅与每相绕组的有效匝数(N)有关, 且成正比例。与电动机的极数没有关系。

(2) 绕组电流、绕组电阻与绕组铜损耗。相绕组

的额定电流与电势系数密切相关, 成反比关系。如文献[1]所述为:

$$I_{N1} = \frac{(T_N + T_0)}{2.12 k_{e1}} \quad (17)$$

相绕组的电阻:

$$R_{11} = \rho \frac{N l_w}{q_{cu}} \quad (18)$$

式中 ρ ——铜线的电阻系数

N ——相绕组的匝数

l_w ——每匝长度

q_{cu} ——相绕组的导线截面积

如果让: $m = 3$ ——定子绕组相数, 则:

Z_1 ——定子槽数

S_1 ——定子槽面积

k_s ——槽满率, 表示槽内铜线总截面积与槽面积的比值, 即

$$k_s = \frac{2m N q_{cu}}{Z_1 S_1} \quad (19)$$

于是得:

$$q_{cu} = \frac{k_s Z_1 S_1}{2m N} \quad (20)$$

代入式(18)得:

$$R_{11} = \rho \frac{2m l_w N^2}{k_s Z_1 S_1} \quad (21)$$

相绕组的铜损耗:

$$P_{cu1} = I_{N1}^2 R_{11} \quad (22)$$

考虑到式(17)、(21)和(16)可得:

$$P_{cu1} = \frac{1.335 k_1 \rho}{k_s k_w} \cdot \frac{(T_N + T_0)^2}{(D^2 l) (Z_1 S_1) B_{g1}^2} \quad (23)$$

式中 k_1 ——绕组端部系数, 半匝长度与铁心迭长

之比, $k_1 = \frac{l_w}{2l}$

k_w ——绕组系数, $k_w = \frac{N}{N}$

(3) 连续输出功率。电动机的总损耗, 包括机械损耗(P_m)、铁损耗(P_{Fe})和铜损耗(P_{Cu}), 在磁系统的结构和几何尺寸确定, 且转速一定的情况下:

$$P_m + P_{Fe} = \omega T_o \tag{24}$$

大体上保持不变,铜损耗:

$$P_{cu} = 3P_{cu1} \tag{25}$$

的变化规律可参看式(23)。电动机的连续输出功率受绕组温升的限制,在外形尺寸和结构确定的情况下,热阻的值大体不变,对温升的限定等于总损耗的限定^[3],其中铜损耗的影响很关键。

式(23)的关系很重要,它给出了影响铜损耗的各种重要信息。决定铜损耗的最基本因素,是与电磁转矩平方成正比,与转子体积(D^2l)成反比,与定子槽面积(Z_1S_1)成反比,并与气隙磁密的平方成反比。这就清楚的表明了采用高性能永磁材料的重要性,尤其是对于高效率和小体积的电动机;这个式子中还有几个系数, k_w 一般很接近1,变化的范围很小。 k_t 的值与电动机的长径比有关,短粗的电动机和极数少的电动机要大一些,即从产生较多铜损耗的角度不利一些,细长的电动机则稍有利。铜损耗与槽满率 k_s 成反比,其物理概念是很清楚的,因为定子槽面积乘上 k_s 才是有效面积。正是由于获得较高的 k_s 值对提高AC servo的性能有明显的作用,所以在小功率AC servo的产品中常能见到为此而采用较复杂结构工艺的例子,如将定子铁心的轭部和齿部分开,绕组为从外面套入的成型线圈,还有采用分割式定子铁心结构,定子绕组直接排线缠绕在每个定子齿的铁心上^[4]等;式(23)表明绕组铜损耗与电势系数(k_e)没有直接关系。这说明 k_e 的取值不影响电动机的连续输出功率,以磁系统结构和尺寸不变的情况为例具体说明如下。若减少绕组匝数让 k_e 减小,将使电动机的机械特性沿转速坐标方向上移,提

高电动机的峰值转矩倍数,同时使产生额定转矩的电流变大,但由于绕组匝数减少和导线截面积增大,使电阻减小,因而铜损耗不变,所以连续输出功率不改变。

5 超小惯量AC servo 的设计

对于近代工业控制系统,提高劳动生产率是主要的目标,作为主要执行部件的AC servo,快速和高频动作的要求是相当常见的。满足这种要求的超小惯量AC servo,其最大的设计特点就是取较小的电势系数(k_e),基本设计思想简述如下。

如果图3中曲线(1)表示1台普通小惯量电动机的机械特性,它可以满足额定转速情况下3倍转矩短时过载,且在额定转矩情况下连续工作。在几何尺寸不变的条件下改变电势系数,使 $k_e' < k_e$,则机械特性向上移动后,最大转矩提高到 $T_p' > T_p$,它可以满足更大额定转矩 $T_N' > T_N$ 时有3倍转矩短时过载能力。但是对应 T_N 时的绕组铜损耗要比 T_N 时大,如果连续运行会受到温升的限制,除非原设计的温升有余量。为解决这个问题,从式(23)可看出,最简单的办法就是增大定子槽面积,或增大槽满率(k_s),使绕组铜损耗降下来。

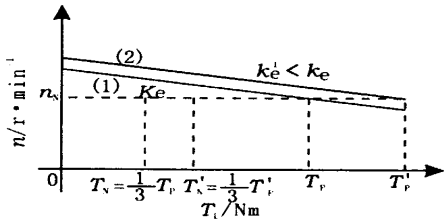


图3 二种电势系数的机械特性

表2 57BL(3)-(ST)系列AC servo 性能参数表

| 参 数 | 型 号 | | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| | A 20- 30 | B 40- 30 | C 60- 30 |
| 额定输出功率 P_N/W | 200 | 400 | 600 |
| 额定电源电压 $V_N/\text{V (AC)}$ | | 220 | |
| 额定转速 $n_N/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ | | 3 000 | |
| 额定转矩 T_N/Nm | 0.637 | 1.273 | 1.910 |
| 峰值转矩(瞬间) T_p/Nm | 1.911 | 3.819 | 5.730 |
| 最高转速 $n_p/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ | | 3600 | |
| 电势系数 $k_e/\text{V} \cdot \text{s/rad}$ | 0.411 | 0.411 | 0.411 |
| 转矩系数 $k_t/\text{Nm} \cdot \text{A}^{-1}$ | 0.411 | 0.411 | 0.411 |
| 转子惯量 $J_r/\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | 0.138×10^{-4} | 0.261×10^{-4} | 0.384×10^{-4} |
| 电枢绕组(线间)电阻 R/Ω | 15.42 | 6.06 | 3.49 |
| 电枢绕组(线间)电感 L/mH | 30.08 | 13.51 | 8.47 |
| 摩擦和磁滞转矩 T_f/Nm | 0.013 83 | 0.018 08 | 0.021 44 |

续表 2 57BL (3)- (ST)系列 AC servo 性能参数表

| 参 数 | 型 号 | | |
|---|------------------------|------------------------|-------------------------|
| | A 20- 30 | B 40- 30 | C 60- 30 |
| 阻尼系数 $\beta/\text{Nm} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$ | 4.831×10^{-5} | 7.403×10^{-5} | 10.689×10^{-5} |
| 额定线电流(有效值) I_N/A | 1.265 | 2.497 | 3.734 |
| 额定线电压(有效值) V_N/V | 119.8 | 114.7 | 112.2 |
| 峰值电流(有效值) I_p/A | 3.686 | 7.334 | 10.992 |
| 额定功率增长率 $Q_N/\text{kW} \cdot \text{s}^{-1}$ | 29.4 | 62.1 | 95.0 |
| 机械时间常数 T_m/ms | 1.26 | 0.936 | 0.793 |
| 电气时间常数 T_e/ms | 1.95 | 2.23 | 2.42 |

按上述思路,可以使 1 台转子尺寸不变的电动机额定功率增大。反过来,如果保持额定功率不变,可以使转子尺寸变小,也就获得转子惯量更小的电动机。表 2 所列 57BL (3)- (ST)系列电动机的性能

参数,就是属于这种体积超小,转动惯量超小的交流伺服电动机,由珠海运控电机有限公司生产,电动机的外形尺寸如图 4 所示。

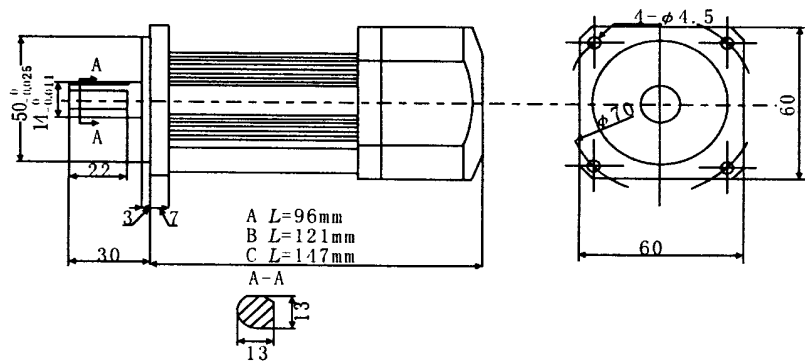


图 4 57BL (3)- (ST)系列 AC servo 外形尺寸图

上述超小惯量 AC servo 产品在国内尚属首例,与有代表性的国外相同规格产品在惯量、重量和外形尺寸的比较如表 3 所示。表中数据表明,我国第一

轮产品的外形略小,转子惯量最小,总体涉及快速性的指标较好。

表 3 400W 超小惯量 AC servo 若干参数对照表

| 参 数 | 转子惯量 $J_r/\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ | 重量 G/kg | 外形尺寸 $/\text{mm}$ | 额定功率增长率 $Q_N/(\text{kW} \cdot \text{s})$ | 机械时间常数 T_m/ms |
|-------------|---|---------------------|----------------------|---|---------------------------|
| 信浓 CC | 0.29 | 1.2 | 60 × 60- 94 | 56 | 0.48 |
| 松下 M S M A | 0.36 | 1.7 | 60 × 60- 123.5 | 45 | 0.59 |
| 运控 57BL (3) | 0.26 | 1.4 | 57 × 57- 121 | 62 | 0.936 |

6 结 论

(1)电势系数的值(k_e 或 k_{el})对 AC servo 的基本特性有显著影响,所以在设计电动机时,它的取值很重要。

(2)AC servo 的电势系数值,主要取决于电源电压和额定转速。

(3)超小惯量 AC servo,可以通过取较小电势系数的值来达到。

参考文献:

[1] 王宗培,韩光鲜,程 智 电流型正弦波驱动BLDCM

稳态运行分析[J],微电机,2003(2).

[2] 李开成,叶妙元 新型交流永磁同步伺服电机设计特点与性能试验[J] 电工技术杂志,1996(3): 5- 7.
[3] 韩光鲜,王宗培,程 智 小容量无刷直流电动机的热阻及连续功率[J],微电机,2002(5): 3- 6
[4] Hideo Hirose, Ryuhei Watabe, Masanobu Tsuji Industrial Brushless Motor M N A S - HYPER Series [J] M atsu shita Journal, 1998, 44(2): 142- 148

作者简介:韩光鲜(1970-),男,博士研究生,从事无刷直流电动机、伺服及步进驱动单元的运行分析及仿真研究。