

无槽无刷直流电动机

王宗培¹, 谢占明², 韩光鲜², 程树康²

(1. 珠海运控电机有限公司, 广东 珠海 519001;

2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 对相同外形尺寸的无槽无刷直流电动机和有槽无刷直流电动机进行性能测试, 并作一些对比和分析, 为对无槽无刷直流电动机的基本技术性能的了解, 提供了一个具体的和实际的例子。对有槽和无槽电动机的热阻进行了测试和对比, 然后从电动机的温升最终限制电动机输出功率的角度出发, 说明同样外形尺寸情况下, 无槽电动机可能会有较大的输出功率。

关键词: 无刷直流电动机; 无槽结构; 热阻; 输出功率

中图分类号: TM 381

文献标识码: A

文章编号: 1001- 6848(2002)04- 0003- 04

Slotless Brushless DC Motor

WANG Zong- pei¹, XIE Zhan- ming², HAN Guang- xian², CHEN G Shu- kang²

(1. Zhuhai Motion Control Motor Co. Ltd., Zhuhai 519001, China;

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

Abstract By testing two brushless DC motors, a slotless one and a slotted one who have the same outer shape and size, making some comparison and analysis, this paper provided a specific and actual example which may be useful for knowing the basic performance of slotless brushless DC motor. By testing and comparing thermal resistance of the slotless and slotted motors and from the fact that motor's temperature rise limits the output power finally. A result that slotless motor may have much output power than slotted one having the same outer shape and size can be obtained.

Key words: brushless DC motor; slotless configuration; thermal resistance; output power

1 引言

将无槽结构引入到无刷直流电动机(BLDCM)中, 做成无槽BLDCM。不仅具有普通BLDCM调速性能好、可靠性高、免维护和无换向火花等优点, 而且消除了齿槽效应, 具有转矩波动小、运行平稳、噪声低、电枢电感小、定位干扰力矩小等一系列优于普通BLDCM的地方, 成为一代很有发展前景的BLDCM, 引起相当大的关注, 国内的文献也有一些反映^[1~4]。文献[5]是针对某些特殊的应用场合, 较早成功地采用和设计了无槽BLDCM的例子。国外也有很多不同的应用例子^[6~8]。

一般, 无槽BLDCM中, 电枢绕组放在定子和转子导磁体之间, 增大了主磁路的磁阻, 使气隙磁密降低, 影响电动机的转矩指标。由于定子没有齿, 定子轭磁路可减少, 转子直径可以增大, 可以弥补转矩的下降。另外, 适当增加永磁体的用量也可弥补一部分

气隙增大的影响。有研究认为, 小直径的电动机(外径小于44.5mm), 无槽结构能获得比有槽结构更大的转矩指标。

在特殊条件下, 例如要求电动机的转矩和功率相对不大, 对电动机的体积限制不严, 而对电动机的控制要求很高的情况下, 采取无槽结构会获得好的效果是没有疑问的, 文献[5]所介绍的就是很好的例子。如果能针对广泛的用途, 设计制造基本技术经济指标与有槽BLDCM相当的无槽BLDCM, 又具有运行更平稳, 控制性能更好的特点, 是很有趣的。这种综合性的对比研究, 影响和制约的因素很多, 在理想条件下对个别问题作理论上的分析研究, 得出的结论往往不一定切合实际。只有在实际生产的条件下, 按工业产品进行设计制造和研究, 才会逐步得出切合实际的认识, 而且随着设计技巧的提高和制造工艺手段和方法的改进, 得到的结论和认识还会发生改变。

本文对相同外形尺寸的1台无槽BLDCM和1

收稿日期: 2002- 06- 11

台有槽 BLDCM 进行实测性能的对比, 会对无槽 BLDCM 增加一些实际和具体的认识, 虽然不一定很全面和精确。

2 试验样机

试验样机的外形尺寸如图 1 所示, 是珠海运控

电机有限公司生产的 57BLA - (ST - 1) 和 57BLA - (SL) 型电动机, (ST) 表示标准(有槽)结构, (SL) 表示精密(无槽)结构。用作对比的二种电动机具有相同的外形尺寸, 定子三相绕组, 转子 8 个(4 对)极, 驱动器直接接 220V 交流电源, 开关型霍尔元件作转角位置检测, 标准 120 导通的驱动方式。

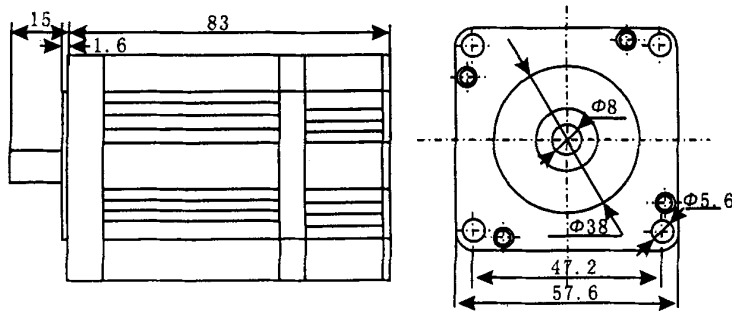


图 1 样机外形图

有槽样机和无槽样机是分别独立设计的工业产品, 没有刻意追求任何预期的比较效果, 因此分析比较较为自然和客观。理论上, 为了比较二种不同结构的优劣, 应分别在不同结构的前提下作出各自的最佳设计, 然后进行比较。但是实际产品设计中绝对的最佳是没有的, 只能认为所选的样机都是成熟的设计, 且出自完全相同的设计水平, 因此进行分析比较基本上是公平的。

2.1 有槽样机的基本技术参数(试验值)

- (1) 相绕组电阻, $R_1 = 31.8\Omega$ 。
- (2) 相绕组电势系数, $k_{e1} = 0.32V \cdot s/rad$ 。
- (3) 相绕组自感, $L_{11} = 115mH$ 。
- (4) 相绕组间互感, $L_{12} = -8mH$ 。
- (5) 静转矩特性, 如图 2 所示, 一相绕组的转矩系数, $k_{t1} = -0.30Nm/A$ 。
- (6) 定位转矩, $T_0 = 0.0054Nm$ 。

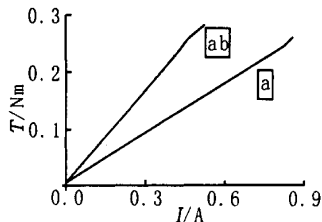


图 2 有槽样机静力矩特性

2.2 无槽样机的基本技术参数(试验值)

- (1) 相绕组电阻, $R_1 = 24.5\Omega$ 。
- (2) 一相绕组的电势系数, $k_{e1} = 0.198V \cdot s/rad$ 。

- (3) 相绕组的自感, $L_{11} = 46.7mH$ 。
- (4) 相绕组间的互感, $L_{12} = -3.5mH$ 。
- (5) 静转矩特性, 如图 3 所示。一相绕组的转矩系数, $k_{t1} = 0.189Nm/A$ 。
- (6) 定位转矩, $T_0 = 0.000Nm$ 。

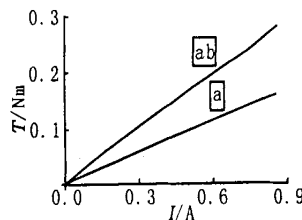


图 3 无槽样机静力矩特性

3 热 阻

电动机的输出功率受它内部(主要是绕组)容许温升的限制, 因此与它的散热性能有关系, 可简化为一个参数——绕组对环境(大气)的热阻(R_{w-a})表示。它的值等于 1W 绕组内的损耗产生的绕组对环境温升的度数()。电动机内部结构不同时, 内部损耗的空间分布不一样, 向外界散热传递的路径不同, 热阻的值自然就会有区别。

热阻测定在相同的条件下进行, 2 台样机分别安装在同样的测试支架上, 在电动机绕组内通恒定的直流电流, 绕组内的损耗等于端电压与电流的乘积, 绕组的温升由电阻法求出, 环境和电动机机壳的温度用温度计测出。

3 1 有槽电机

定子三相绕组串联, 通入 $I = 0.4\text{A}$ 的直流电流, 绕组和机壳的温升曲线如图 4 所示。在达到稳定情况下, 绕组铜损为 $P_{\text{cu}} = 51.7 \times 0.4 = 20.68\text{W}$; 绕组稳定温升, $\tau_{\text{w a}} = 53.64$; 机壳表面温升, $\tau_{\text{k a}} = 29$ 。可得机壳对空气的热阻为:

$$R_{\text{k a}} = 29/20.68 = 1.40 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

绕组对环境的热阻为:

$$R_{\text{w a}} = 53.64/20.68 = 2.59 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

绕组对机壳的热阻为:

$$R_{\text{w k}} = 1.19 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

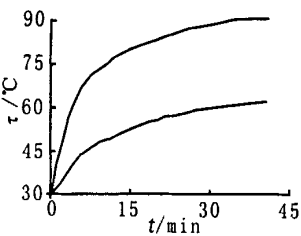


图 4 有槽样机温升变化曲线

3 2 无槽电机

定子三相绕组串联, 通入 $I = 0.5\text{A}$ 的直流电流, 绕组和机壳的温升曲线如图 4 所示。在达到稳定情况下, 绕组铜损为 $P_{\text{cu}} = 50.9 \times 0.5 = 25.45\text{W}$; 绕组稳定温升, $\tau_{\text{w a}} = 46.92$; 机壳表面温升, $\tau_{\text{k a}} = 38$ 。可得机壳对空气的热阻为:

$$R_{\text{k a}} = 38/25.45 = 1.49 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

绕组对环境的热阻为:

$$R_{\text{w a}} = 46.92/25.45 = 1.84 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

绕组对机壳的热阻为:

$$R_{\text{w k}} = 0.35 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

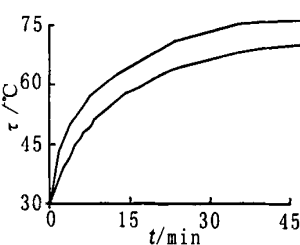


图 5 无槽样机温升变化曲线

以上试验数据表明, 无槽样机绕组对环境的热阻, $(R_{\text{w a}})_{\text{SL}} = 1.84 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, 明显小于有槽样机的值, $(R_{\text{w a}})_{\text{ST}} = 2.59 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ 。如果绕组的容许温升一定, 很明显, 绕组容许的铜损耗与热阻成反比。设绕组容许温升为 70 , 则容许的铜损耗为:

有槽电机: $(P_{\text{cu}})_{\text{mST}} = 70/2.59 = 27.03\text{W}$

无槽电机: $(P_{\text{cu}})_{\text{mSL}} = 70/1.84 = 38.04\text{W}$

电动机在额定运行情况下, 损耗的分布有些不同, 不是全部集中在绕组内, 而是分成铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗。同样的损耗值产生的绕组温升会比全部集中在绕组内时小一些。但是近似地仍可认为电动机额定运行情况下容许的总损耗值也与以上的热阻成反比。如果效率相同, 则发出的连续功率便与热阻成反比, 即

$$\frac{(P_{\text{N}})_{\text{SL}}}{(P_{\text{N}})_{\text{ST}}} = \frac{2.59}{1.84} = 1.41, \quad [(\eta)_{\text{ST}} = (\eta)_{\text{SL}}]$$

或
$$\frac{(P_{\text{N}})_{\text{ST}}}{(P_{\text{N}})_{\text{SL}}} = \frac{1.84}{2.59} = 0.71, \quad [(\eta)_{\text{ST}} = (\eta)_{\text{SL}}]$$

可见, 从容许温升限制的角度得出的结论是, 无槽结构能获得更大的输出功率, 原因是热阻较小。实际上机壳表面对环境的热阻 $(R_{\text{k a}})$ 应相同, 由于有槽结构温度分布稍均匀而略小一些, 主要的差别在于绕组对机壳的热阻。

4 稳态运行特性

表 1 和表 2 分别为 2 台样机负载试验的数据, 总损耗随输出功率变化的特性曲线如图 6a 和 b 所示。参看热阻试验的结果, 按容许绕组平均温升 70 计算, 2 台样机的连续运行功率应为:

$$(P_{\text{N}})_{\text{ST}} \quad 101.6\text{W}$$

$$(P_{\text{N}})_{\text{SL}} \quad 129\text{W}$$

考虑到总损耗不是全部集中在绕组内, 所以实际上温升已有一些余量。电动机的额定功率基本上可按该极限功率确定。有槽样机为 1 台功率接近 100W , 转速接近 4000r/min 的电动机; 无槽样机为 1 台功率接近 120W , 转速约 5000r/min 。效率都约为 80% 。

尽管在普通方波驱动条件下, 电流谐波会引起明显的转矩波动, 但是无槽样机运转起来明显感觉平稳和噪声小。调整范围比较大, 无槽样机最低平稳运行的转速约为 100r/min , 有槽样机则为 250r/min 。

表 1 有槽样机负载试验数据表(电源电压 $V_{\text{ac}} = 233\text{V}$)

T_{L}	n	P_2	V_{s}	I_{s}	P_1	p	η
0	5 814	0	329	0.02	6.58		0

续表 1 有槽样机负载试验数据表(电源电压 $V_{ac}=233V$)

T_L	n	P_2	V_s	I_s	P_1	P	η
0 043 2	5 407	24 46	326	0 08	26 08	1 619	93 79
0 091 8	4 889	47	325	0 16	52	5	90 38
0 135	4 441	62 78	324	0 22	71 28	8 5	88 08
0 183 6	4 281	82 3	323	0 3	96 9	14 6	84 93
0 229 5	3 997	96 06	320	0 37	118 4	22 34	81 13
0 278 1	3 721	108 37	319	0 44	140 36	31 995	77 21
0 318 6	3 523	117 54	321	0 51	163 71	46 17	71 8
0 361 8	3 231	122 415	319	0 61	194 59	72 175	62 91
0 399 6	3 012	126 04	317	0 7	221 9	95 86	56 8
0 437 4	2 780	127 34	314	0 82	257 48	130 14	49 46

表 2 无槽样机负载试验数据表(电源电压 $V_{ac}=220V$)

T_L	n	P_2	V_s	I_s	P_1	P	η
0	9 082	0	311	0 01	3 11	3 11	0
0 037 8	8 027	31 774	309	0 11	33 99	2 216	93 480
0 086 4	6 857	62 04	307	0 23	67 54	5 5	91 857
0 137 7	6 125	88 32	304	0 33	100 32	12	88 038
0 178 2	5 536	103 3	302	0 4	120 8	17 5	85 513
0 216	5 216	117 98	301	0 48	144 48	26 5	81 658
0 251 1	4 864	127 9	300	0 55	165	37 1	77 515
0 286 2	4 419	132 44	298	0 61	181 78	49 34	72 857
0 324	3 984	135 17	298	0 72	214 56	79 39	62 999
0 351	3 822	140 48	298	0 77	229 46	88 98	61 222
0 405	3 262	138 35	295	0 96	283 2	124 85	52 565

表 1、2 中, T_L 负载转矩, Nm; n 转速, r/min; $P_2 = \omega T_L$ 为输出功率, W; V_s 为桥臂电压, V; I_s 为桥臂电流, A; P_1 为输入功率, W; $P = P_1 - P_2$ 为

总损耗; $\eta = P_2 / P_1 \times 100$ 为效率, %。

5 结 论

(1) 无槽无刷直流电动机通过绕组具体结构的特殊设计, 可以减小绕组对机壳的热阻, 从而使电动机绕组对环境的热阻下降, 提高了连续工作的输出能力, 使得在相同体积下无槽电动机的额定功率比有槽电动机大。

(2) 采用开关霍尔元件和普通的方波电流驱动器, 无槽电动机的噪声、运行平稳性和调速范围明显优于有槽电动机。

(3) 为了获得性能更优异的无刷直流电动机, 完善驱动方式是不可避免的, 例如正弦波电流的驱动器, 相关的问题会在以后的文章中探讨。

参考文献:

- [1] 徐成喜 无槽无刷直流伺服电动机的设计及特性分析[J]. 微电机, 1994(6): 13- 15
- [2] 徐成喜 无槽无刷直流电动机及其磁钢最佳工作点的确定[J]. 微特电机, 1995(5): 19- 20
- [3] 沈建新, 陈永校 无槽无刷直流电机及其前期设计[J]. 电工电能新技术, 1997(1): 45- 49
- [4] 董玲生, 孙振华 无槽无刷半绕组直流电动机[P]. 中

(下转第 10 页)

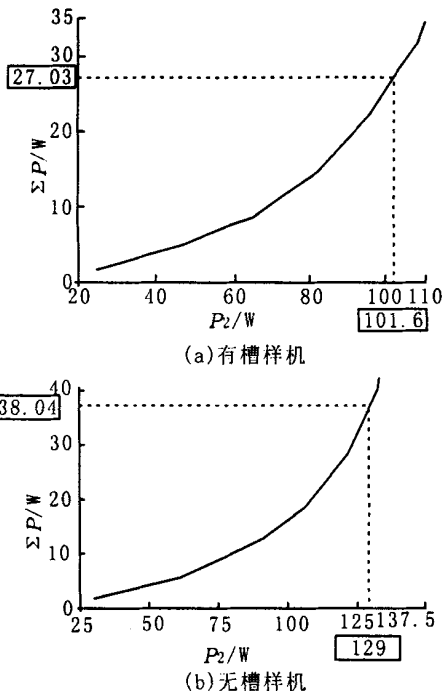


图 6 损耗随输出功率变化曲线

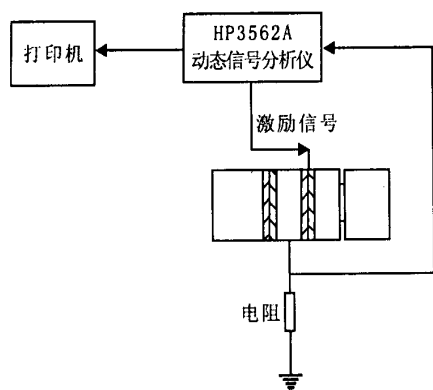


图 5 驱动振子扫频原理图

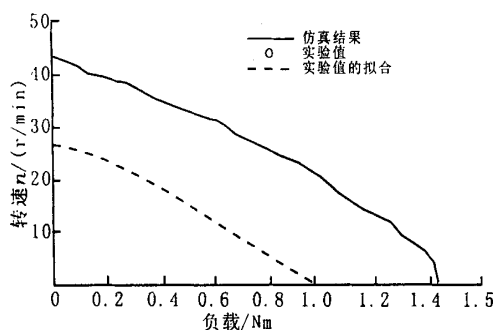


图 6 小电机负载-速度特性

和有限元计算的正确性。

表 2 小电机驱动振子共振频率对比 单位: kHz

项 目	第一阶纵振	第二阶扭振
扫频结果	34.408	34.209
FEM 计算	34.976	33.926
目标值	35.000	35.000

图 6 是小电机输出扭矩致转子转速之间的关系。施加在转子上的预压力为 300N, 施加在纵振压电片和扭振压电片上的电压峰-峰值均为 300V, 电机的最大输出扭矩为 0.25Nm。

从图 6 中可以看出电机的转速随电机负载的增加而下降。电机最大扭矩和无负载转速的实验值

均比仿真值小, 这是因为电机的性能还要继续提高, 有些工艺问题没有解决, 例如电机各部件的接触界面需要精细加工, 定子和转子的接触界面没有贴摩擦材料等。

6 结 语

纵扭型超声电机要求其工作的纵振频率和扭振频率一致或接近, 由于等截面直杆的纵振频率和扭振频率不相等, 必须对电机定子的结构进行设计。有限元分析在电机结构设计中是必不可少的。本文通过有限元分析, 设计的电机定子两个工作频率十分接近, 扫频实验也验证了设计的正确性。电机的研制成功为大直径、大扭矩该型电机的研究打下了基础。

参考文献:

- [1] Minoru Kurosawa, Sadayuki Ueha Hybrid Transducer Type Ultrasonic Motor[J]. IEEE, Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control 1991, 38(2), 193-198
- [2] Yoshiro Tomikawa, Kazunari Adachi, Manabu Aoyagi, et al Some Constructions and Characteristics of Rod Type Piezoelectric Ultrasonic Motors Using Longitudinal and Torsional Vibrations [J]. IEEE, Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1992, 39(5), 600-607.
- [3] M. Aoyagi, Y. Tomikawa New Control Method of Contact Force Between Rotor and Stator on Rod-Type Ultrasonic Motor [J]. IEEE Ultrasonics Symposium, Japan, 1998, 559-563
- [4] Jun Satonobu, Norikazu Torii, Kentaro Nakamura, et al Construction of Megatorque Hybrid Transducer Type Ultrasonic Motor [J]. Jpn. J. Appl. Phys., 1996, 35(9), 5038-5041.
- [5] 胡海岩 机械振动与冲击[M]. 航空工业出版社, 1998, 142-147.

作者简介: 孙合明(1970—), 男, 博士后, 研究方向为结构的动态化设计。

(上接第 6 页)

国专利: CN 2363417, 2000- 02- 09

- [5] 李东富 24SW 01 型无刷直流伺服电动机[J]. 微特电机, 1985(1): 45- 47.
- [6] M. Jufer, C. Peclet, A. Birakicht Electromagnetic High Speed Micromotor [M]. MCS D, 1997: 159- 164
- [7] M. Jufer, G. Heine, N. Hmati Slotless DC Motors for Disc Drives - winding Torque Performance and

Comparison [M]. MCS D, 1997: 271- 280

- [8] C. Peter Cho, William P. Lrol, Lyle Smith Modeling and Simulation of a Novel Integrated Electric Motor/Propulsor [M]. ISCS D, 1998: 41- 46

作者简介: 王宗培(1932—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电机及其控制的教学与研究, 发表论文 200 余篇, 出版教材及专著 6 部。