

小容量无刷直流电动机的热阻及连续功率

韩光鲜¹, 王宗培², 程 智²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 珠海运控电机有限公司, 广东 珠海 519001)

摘 要: 介绍了小容量无刷直流电动机(BLDCM)热阻和热导参数的含义和测量方法。给出BLDCM热阻和热导测量的实例结果, 进行分析后得出热导参数随电动机几何尺寸变化的某些规律。从热导参数与连续输出功率相关的角度分析了BLDCM设计功率与几何尺寸及转速等的关系, 不能单纯从电磁关系确定。

关键词: 无刷直流电动机; 热阻; 温升

中图分类号: TM 381

文献标识码: A

文章编号: 1001- 6848(2002)05- 0003- 04

The Thermo- resistance and Continuous Power of Small BLDCM

HAN Guang- xian¹, WANG Zong- pei², CHEN G Zhi²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Zhuhai Motion Control Motor Co. Ltd., Zhuhai 519001, China)

Abstract: The paper introduced the concepts and their corresponding measuring methods of thermo- resistance and thermo- conductivity of small BLDCM. Some practical testing results of thermo- resistance and thermo- conductivity of small BLDCM are presented. Some rules between the thermo- conductivity and the physical dimension of BLDCM are also presented. From the view of the correlation between the thermo- conductivity and continuous output power, the paper analyzed the relations among the rated power, the physical dimension and the rated speed of BLDCM, which cannot be directly deduced from the point of electromagnetism.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); thermo- resistance; temperature rise

1 引 言

小容量无刷直流电动机应用日广, 它的各项基本技术参数都受到广泛的关注, 如转矩系数、电势系数、绕组电感、运行效率等。热阻(热导)表示电动机的散热能力, 与电动机运行时的温升直接相关, 与电动机的连续输出功率有关, 也是电动机的重要参数之一。可是在国内小电机的文章中, 很少有这方面的研究和讨论。本文不是对该问题的详细分析, 只是从工程的角度对某一机座号的电动机进行实例研究, 从中对小容量BLDCM的热阻(或热导)建立一些定量的概念, 以及对它的一般特性的认识, 对BLDCM的设计者和应用工程师都是很有益处的。

2 绕组对环境(大气)的热阻

在一些BLDCM产品目录的技术指标中, 常常可以看到包含有绕组对环境的热阻 R_{w-a} 这一项, 它

是指BLDCM在堵转情况下绕组的温升(τ_w)与绕组内铜损耗(P_w)之比:

$$R_{w-a} = \frac{\tau_w}{P_w} \quad ^\circ\text{C/W} \quad (1)$$

即每瓦绕组铜损引起的绕组温升值。它的倒数称为热导(Λ_{w-a}):

$$\Lambda_{w-a} = \frac{1}{R_{w-a}} = \frac{P_w}{\tau_w} \quad \text{W}/^\circ\text{C} \quad (2)$$

即绕组对环境单位温差时单位时间内散出的热量。可以看出, 这项参数与绕组的容许温升直接决定了绕组容许的连续堵转电流, 因而决定了连续堵转转矩的值。

如果电动机不是堵转, 在正常运行情况下, 它的连续输出功率也是受到绕组容许温升的限制, 只是这时同样绕组对环境的温升是由电动机的总损耗(P)——包括绕组铜损、铁损、机械损耗等决定的, 与 P 全部集中在绕组内引起的温升会有些区别。如果定义BLDCM运行时的绕组温升与总损耗的比值为电动机的热阻(R_m), 并能给出它的值, 则

收稿日期: 2002- 09- 16

通过这个参数来分析电动机运行问题会很方便。可是 BLDCM 运行时损耗分配状态不断变化, R_m 便没有一个固定的值, 也无法进行实际测定。

小容量 BLDCM 的特点是表面自然冷却, 电动机机壳表面对环境的温升占绕组温升的主要部分; 绕组在电动机定子上, 与机壳之间的温差不大, 热阻较小, 所以电动机内部的损耗如果相同, 即使分布有些变化, 绕组的温升也不会有多少改变。从这一实际情况出发, 有理由用绕组对环境的热阻 (R_{w-a}) 来判断电动机运行情况下的温升, 以及判断容许的连续输出功率, 不会有很大的出入。基于这种分析, 本文所指的电动机的热阻(或热导)都是指的 R_{w-a} (或 Λ_{w-a})。

3 热阻测试实例

实验用的样机是珠海运控电机有限公司生产的 57 机座的 BLDCM, 有三种长度尺寸, 如图 1 所示。实验的目的是为了一般研究分析用, 对实验的条件没有很严格的规定, 实验在室温无通风条件下进行, 电动机安装在公司常用的测试支架上和底板上, 支架的尺寸如图 2 所示。

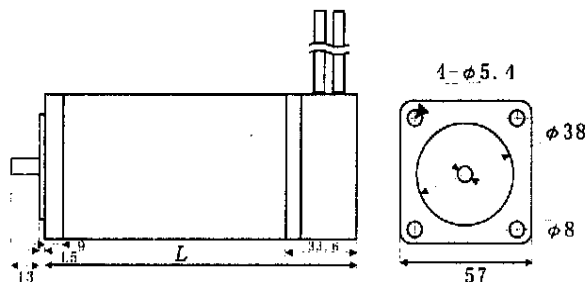


图 1 实验样机的外形尺寸

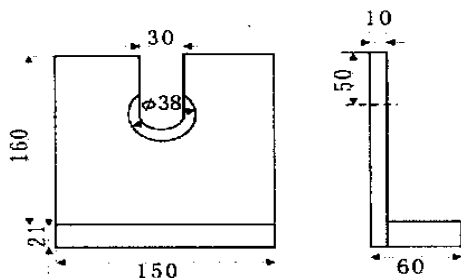


图 2 测试支架尺寸

在 BLDCM 的定子绕组内通以恒定直流电流 (I_w), 测取绕组端电压 (V_w), V_w 随时间的变化反映绕组电阻的变化, 从中可以得出绕组温度及温升的变化及温升的稳定值 (τ_w), 它与相应输入功率 $V_w I_w$ 的比值便是所求的绕组对环境的热阻 R_{w-a} 。应指出的是, 在此绕组温升用电阻法求出, 是绕组的平均温

升。机壳表面的温度用红外点温计测量, 表面温度实际上不均匀, 大体上中间高一些, 二端较低, 为了获得一个较为确定的值, 实验时统一规定测取机壳上大体对应定子铁心中部的温度, 所以获得的实际是机壳的最高温升 (τ_k)。绕组与机壳之间的温差 ($\tau_w - \tau_k$) 是绕组的平均温度与机壳最高温度的差, 以及用它求出的绕组对机壳及机壳对环境的热阻 (R_{w-k} , R_{k-a}) 或热导 (Λ_{w-k} , Λ_{k-a}) 都是一种工程上的参数, 虽然与理论上的参数不完全一致, 但便于工程实践应用, 只要明确它的具体定义, 便不会产生混淆, 用来研究分析工程问题时一样有效。

1 台 57BL-C-10 型电动机, 三相绕组并联, 通以 1A 恒定直流电流。测得绕组及机壳的温升曲线如图 3 所示。可以看出大约经过 1h 的时间, 温升便达到稳定值, 为 $\tau_w = 33.51$, $\tau_k = 28$, 对应的绕组铜损耗为 26.5W, 得: $R_{w-a} = 1.265$ /W, $R_{k-a} = 1.057$ /W, $R_{w-k} = 0.208$ /W。应指出的是电动机的热阻参数因受电机制造工艺和测试环境条件的影响, 会有一定的分散性, 对于某一种型号的电动机, 实际上在某数值范围内, 如果要给出一个明确的值, 则应测一定的台数取它们的平均值, 作为例子, 表 1 给出 57BL-C 型电动机的一组数据。由此求出热阻和热导的平均值同时列于表中。

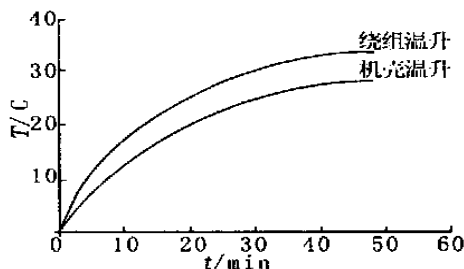


图 3 实测温升曲线示例

用同样的方法测出 57# 机座另二种长度 BLDCM 的平均热阻参数, 一起在表 2 中列出。热导与散热或导热的面积成正比关系, 把它们值与电动机的长度或铁心长度的关系作成曲线时, 应呈线性关系。图 4 的横坐标用铁心的迭长表示, $L=0$ 处的热导值表示与铁心迭长无关的热导分量, 可以称为相应的端部分量 (Λ_0), 例如绕组对环境热导的端部分量 (Λ_{w-a0}), 机壳对环境热导的端部分量 (Λ_{k-a0}) 和绕组对机壳热导的端部分量 (Λ_{w-k0})。随铁心长度变化的部分便称为相应的铁心部分分量 (Λ_L)。图 5 是热导端部分量 (Λ_0) 和铁心部分分量 (Λ_L) 的示意图 ($\Lambda_0 = \Lambda_{01} + \Lambda_{02}$)。于是可得:

表 1 57BL - C 型电动机热阻参数

| No | P_w/W | $\tau_w/$ | $\tau_k/$ | $R_{w-a}/(^\circ\text{C}/\text{W})$ | $R_{k-a}/(^\circ\text{C}/\text{W})$ | $R_{w-k}/(^\circ\text{C}/\text{W})$ |
|-----|----------------|-----------|-----------|---|---|---|
| 1 | 27 | 35.43 | 31 | 1.312 | 1.148 | 0.164 |
| 2 | 27.4 | 35.107 | 30 | 1.281 | 1.095 | 0.186 |
| 3 | 26.9 | 34.45 | 32 | 1.281 | 1.190 | 0.091 |
| 4 | 26.5 | 33.51 | 28 | 1.265 | 1.057 | 0.208 |
| 5 | 31.41 | 44.238 | 40 | 1.408 | 1.273 | 0.135 |
| 平均值 | | | | $R_{w-a}=1.31(^\circ\text{C}/\text{W})$ | $R_{k-a}=1.15(^\circ\text{C}/\text{W})$ | $R_{w-k}=0.16(^\circ\text{C}/\text{W})$ |
| | | | | $\Lambda_{w-a}=0.76(\text{W}/^\circ\text{C})$ | $\Lambda_{k-a}=0.87(\text{W}/^\circ\text{C})$ | $\Lambda_{w-k}=6.25(\text{W}/^\circ\text{C})$ |

表 2 57BL 型电动机的平均热阻参数

| 型 号 | 热阻/($^\circ\text{C}/\text{W}$) | | | 热导/($\text{W}/^\circ\text{C}$) | | |
|----------|----------------------------------|-----------|-----------|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| | R_{w-a} | R_{k-a} | R_{w-k} | Λ_{w-a} | Λ_{k-a} | Λ_{w-k} |
| 57BL - C | 1.31 | 1.15 | 0.16 | 0.76 | 0.87 | 6.25 |
| 57BL - B | 1.52 | 1.33 | 0.19 | 0.66 | 0.75 | 5.26 |
| 57BL - A | 1.81 | 1.57 | 0.23 | 0.55 | 0.64 | 4.31 |

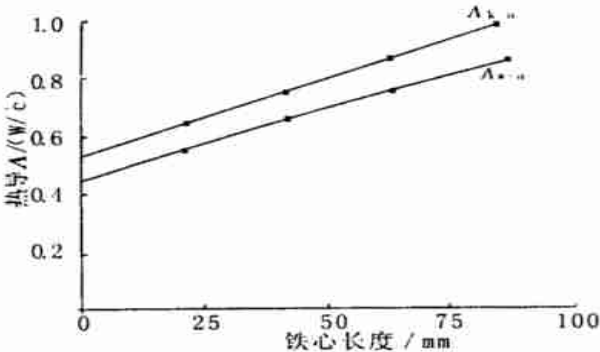


图 4 热导与铁心迭长的关系曲线

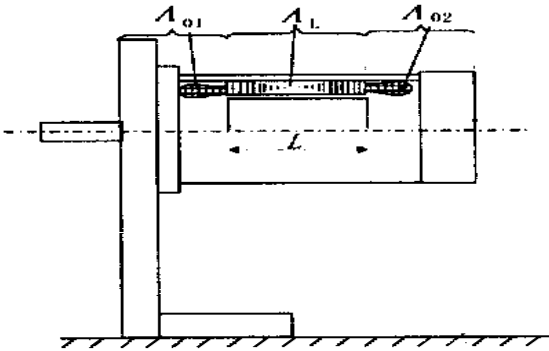


图 5 热导端部分量(Λ_0)和铁心部分分量(Λ_L)示意图($\Lambda_0=\Lambda_{01}+\Lambda_{02}$)

$$\begin{aligned}\Lambda_{w-a} &= \Lambda_{w-a0} + \Lambda_{w-aL} = \Lambda_{w-a0} + k_{w-a} \cdot L \\ \Lambda_{k-a} &= \Lambda_{k-a0} + \Lambda_{k-aL} = \Lambda_{k-a0} + k_{k-a} \cdot L \\ \Lambda_{w-k} &= \Lambda_{w-k0} + \Lambda_{w-kL} = \Lambda_{w-k0} + k_{w-k} \cdot L\end{aligned}\quad (3)$$

将表 2 的数据处理后, 可得:

$$\begin{aligned}\Lambda_{w-a} &= 0.46 + 0.004L \quad \text{W}/^\circ\text{C} \\ \Lambda_{k-a} &= 0.55 + 0.004L \quad \text{W}/^\circ\text{C} \\ \Lambda_{w-k} &= 3.26 + 0.004L \quad \text{W}/^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (4)$$

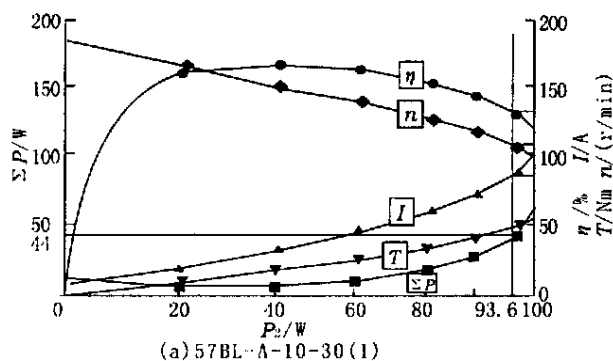
上式中 L 为铁心迭长, 用 mm 为单位, 相应于 A、B、C 型电动机, $L=25\text{mm}$, 50mm 和 75mm 。代入上式或从图 4 曲线可以清楚地看出, 当电动机的铁心迭长成倍增加时, 从电磁关系来看, 电动机的转矩和功率应能成比例地增大, 可是它的散热能力 (热导) 却增加得不多。电动机热导 (或热阻) 参数的这种特性, 一定会影响到系列设计时电动机功率等级以及转速等的确定。

4 热导影响连续运行功率实例及结论

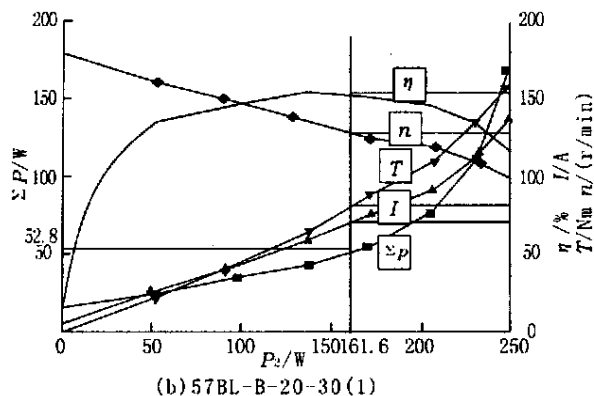
图 6a、b 和 c 所表示为 3 台不同铁心长度 BLDCM 运行特性的实测曲线, 它们标称的额定转速是 $3\,000\text{r}/\text{min}$, 额定功率为 100W 、 200W 和 300W 。从特性曲线看, 这 3 台 BLDCM 输出上述相应的功率没有问题, 通常主要从电磁性能角度考虑也完全正确, 因为三种不同长度电动机的铁心迭长成倍变化, 电磁转矩也按比例增大, 在转速不变情况下, 得出功率成倍增大的结果是很自然的。

可是如果考虑发热的限制会怎样, 先考察 57BL - A - 10- 30(1) 型电动机, 它的绕组对环境的热导为 $\Lambda_{w-a}=0.55\text{W}/^\circ\text{C}$, 按 B 级绝缘绕组平均温升容许值 80 计, 电动机的总损耗应该不超过 $\Sigma P=0.55 \times 80=44\text{W}$, 从图 6a 得相应的输出功率为 93.6W , 与给定的额定值接近。用相同的方法考虑 57BL - B - 20- 30(1) 和 57BL - C - 30- 30(1), 得到由发热限定的连续输出功率分别为 161.6W 和 196.3W , 与给定的额定值 (200W 和 300W) 相差较远。

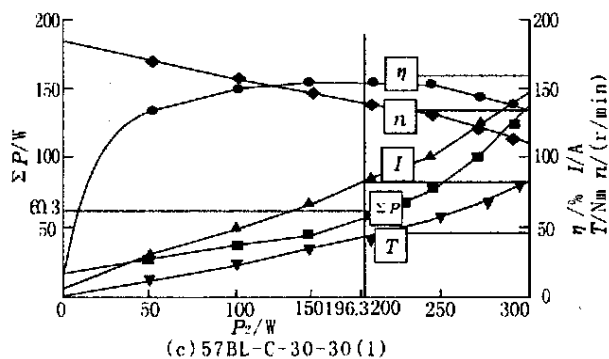
本文的实际数据和分析清楚地表明了小容量 BLDCM 散热能力的特点, 同一机座的电动机, 随着铁心迭长的增加, 散热条件变差。从电磁设计的角度出发, 电动机的电磁转矩可以随铁心迭长成正比增加, 在转速不变的条件下, 功率和损耗 (效率不变时) 随着成正比增长, 热导则增加较慢, 温升便升高达到限定值, 使得 BLDCM 的功率只能按散热能力增大



(a) 57BL-A-10-30(1)



(b) 57BL-B-20-30(1)



(c) 57BL-C-30-30(1)

图 6 运行特性曲线实例

的速度增长。为了获得更大的功率输出,从原则上讲可以从三个方面入手:提高电动机绝缘等级,例如用 H 级绝缘在国外的电机中较普遍。改进电动机设计,提高运行效率。改进电动机结构工艺,使热导增大。BLDCM 绕组对环境的热导主要受二方面的影响,一是机壳对空气的热导,通常设计成有散热筋的机壳可增加该部分热导,另一方面是绕组对机壳之间的热导,这主要取决于绕组的结构和绝缘浸渍工艺等,本文测试用的样机绕组对机壳的散热已作了改善,热导较大,文献[1]中有 1 台 57BL-A 型有槽电机就不一样, R_{w-k} 较大。

对 BLDCM 热导参数的掌握和了解,有利于正确和快速确定电动机改造设计的方案。对于制造厂, BLDCM 的基本规格总是很有限的,可是用户往往会有许多不同要求,例如转速的要求就会在很大的

范围内变化,较一般的可能是每分钟几十转、几百转、几千转、几万转或更高一些。从电磁关系的角度看,对于尺寸一定的电动机,内部电磁负荷基本确定的情况下,可以产生基本上一定的电磁转矩,与电动机的转速没有直接的关系,这说明电动机的输出功率可以随转速升高而成正比增大;但是从另一方面,即散热条件和容许温升的角度,则对于几何尺寸一定的电动机,散热条件和绝缘条件不变的情况下,电动机总损耗限定的值不变,与电动机的转速也没有大的关系,这说明电动机的输出功率基本上不能改变(效率一定时)。实际上,几何尺寸一定的电动机,当它的输出功率受温升和散热条件限时,只能随电动机效率的提高而增大。图 7 示 1 台转速较高,额定转速为 7 500 r/min 的 57BL-A 型 BLDCM。与额定转速 3 000 r/min 的电动机相比,额定转速提高到 2.5 倍,如果保持额定转矩不变,则输出功率也将增

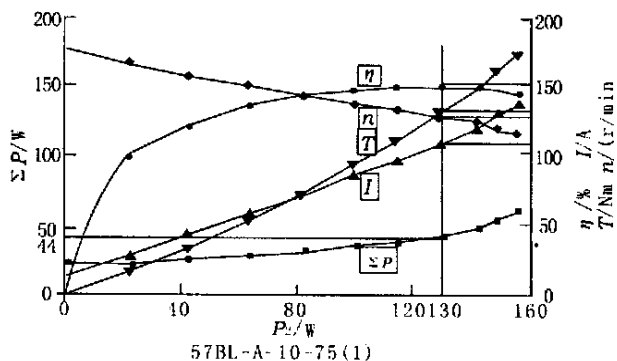


图 7 运行特性曲线实例

至 2.5 倍。但是前面的实例数据表明,3 000 r/min 的 57BL-A 型电动机,输出 100 W 时散热能力已没有余量,增加输出功率时除非提高效率保持总损耗不增加,否则在增大的输出功率下不容许连续运行。图 7 的实例表明,保持同样的损耗值,最大连续输出功率约为 130 W,比 3 000 r/min 的电动机提高了 30% 多。相应的效率为 74.7%,比 3 000 r/min 电动机时的值(68.0%)有所提高。高速电动机输出功率不随转速成比例增长时,转矩有所下降,说明电动机内部电磁负荷降低了,相应地损耗会减小,因而效率提高,当然这是在机械损耗不异常增大的条件下。电动机受发热限定的功率与效率的关系可用下式表示:

$$P_{2m} = \Lambda_{w-a} \tau_{wm} \left(\frac{\eta_h}{1 - \eta_h} \right) \quad (5)$$

对 57BL-A 型电动机, $\Lambda_{w-a} \tau_{wm} = 44 \text{ W}$, $P_{2m} = f(\eta_h)$ 的关系如图 8 所示。应注意的是 η_h 指的是最大输出功率点的效率。

(下转第 19 页)

直流无刷起动磁电机的驱动电路如图 4 所示。T1~T10 为 9014, T11~T13 为 8050, T14~T16 为 8550, M1~M3 为功率 MOS 管, A、B、C 为电机三相绕组。R15~R17 与 C2~C4 构成阻容吸收电路。功率 MOS 管为电压跟随推挽输出驱动, 管耗低。系统通电时, C1 上电压缓慢上升, T10 截止, T4、T5、T6 导通, 确保各功率 MOS 管都处于截止状态, 避免误动作损坏功率 MOS 管。经过几十 ms 延时, T10 导通, T4、T5、T6 截止, 允许电机起动。HA、HB、HC 为 3 个霍尔元件传感器, 传感器为集电极开路输出, 需上拉电阻, 有磁场时输出 0, 无磁场时输出 1。假定通电后 HA 上先有磁场而输出 0, T1 截止, M1 导通, A 相绕组通电, 电机起动; 同时经 R10 使 T9 导通, M3 不能导通, 仅 A 相绕组通电。电机旋转, 当 HB 上有磁场而输出 0 时, T2 截止, M2 导通, B 相通电; 同时 T7 导通, 封锁 A 相。同样 HC 上有磁场而输出 0 时, C 相通电, 由 R12 封锁 B 相。这样周而复始, 电机迅速起动起来。此电路简单、可靠、成本低。

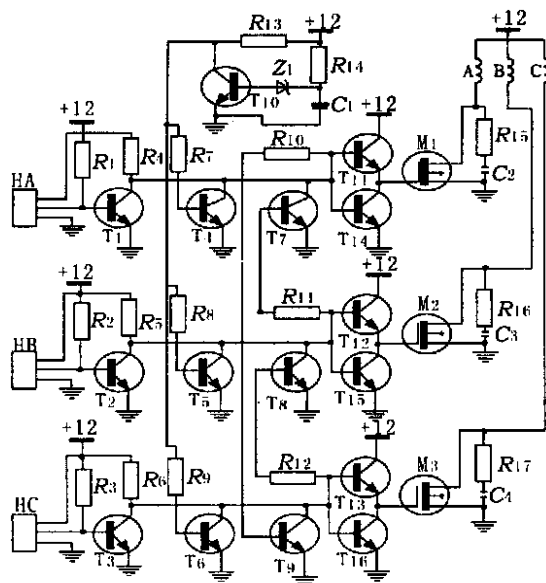


图 4 直流无刷起动磁电机的驱动电路

6 技术指标

所研制的直流无刷起动磁电机适用于 AX100 型摩托车。电机飞轮外径 112mm, 壁厚 4.5mm, 轴向总长度 80mm, 铁心长度 50mm, 空气隙 1.2mm, 磁瓦厚 9mm。三相起动绕组采用 $\Phi 0.9\text{mm}$ 漆包线, 每相有 3 条并联支路, 每条并联支路 48 匝。发电绕组采用 $\Phi 0.8\text{mm}$ 漆包线, 共 56 匝。其主要技术指标为:

(1) 起动性能

起动绕组为短期工作制, 配备 12V、7Ah 铅酸蓄电池。按每 30s 时间间隔起动 1 次, 每次工作 6s 考核。

最小堵转转矩不小于: 5Nm

最大堵转电流不大于: 120A

空载转速不小于: 1200r/min

(2) 发电性能

单相交流发电绕组为连续工作制。要求充电电流在飞轮转速为 2000r/min 时 1.0A, 飞轮的转速为 8000r/min 时 6.0A。

参考文献:

- [1] 陈益广. 摩托车用直流无刷起动磁电机的设计[J]. 微电机, 2000, (6), 6-7.
- [2] 莫会成. 永磁交流伺服电动机的设计特点[J]. 微电机, 1993, (1), 6-9.
- [3] EL - Sharkawi M A. Development of High Performance Variable Structure Tracking Control for Brushless Motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(1).

作者简介: 陈益广(1963-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向电机与控制。

(上接第 6 页)

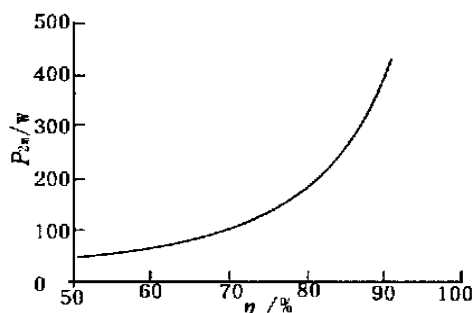


图 8 最大连续功率与效率的关系

参考文献:

- [1] 王宗培, 谢占明, 韩光鲜, 等. 无槽无刷直流电动机[J]. 微电机, 2002, 35(4).

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。