

# 无刷直流电动机电枢等效电阻的实例研究

韩光鲜<sup>1</sup>, 谢占明<sup>1</sup>, 王宗培<sup>1</sup>, 程 智<sup>2</sup>

(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:** 用典型结构和驱动方式的无刷直流电动机的实际数据, 说明了通常认为电枢等效电阻基本上由绕组电阻决定的概念与事实有很大出入。指出换向等效电阻的影响不可忽略, 它的值与电动机的转速成正比, 在转速较高时, 可以达到绕组电阻的若干倍。给出了电枢电阻及其各个分量的实验测定方法。

**关键词:** 无刷直流电动机; 电枢等效电阻; 电枢绕组电阻; 换向等效电阻

中图分类号: TM 381;

文献标识码: A

文章编号: 1001- 6848(2002)01- 0003- 03

## Model Study of Armature Equivalent Resistance in Brushless DC Motor

HAN Guang-xian<sup>1</sup>, XIE Zhan-ming<sup>1</sup>, WANG Zong-pei<sup>1</sup>, CHENG Zhi<sup>2</sup>

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

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

**Abstract** Based on actual data of brushless dc motor with typical structure and drive mode, this paper shows that the conception used to think that armature equivalent resistance is basically determined by winding resistance does not fit the fact. Indicates that the effect of the commutation equivalent resistance should not be neglected, Its magnitude is in proportion to rotate speed of the motor and may be several times of the winding resistance when rotate speed is rather high. An experimental method to test armature resistance is proposed.

**Key words:** brushless dc motor; armature equivalent resistance; armature winding resistance; commutation equivalent resistance

## 1 稳态模型

无刷直流电动机已获得广泛应用, 它的基本理论已相当成熟, 典型结构的方波驱动的永磁无刷直流电动机, 稳态模型与普通直流电动机一样。为<sup>[1,2]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} U &= k_e \omega \\ T &= k_t I \\ V &= R I + U \\ T &= T_f + T_L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $U$  ——电枢旋转电压  
 $k_e$  ——旋转电压(反电势)系数  
 $\omega$  ——转子角速度  
 $T$  ——电磁转矩  
 $k_t$  ——转矩系数  
 $I$  ——电枢电流  
 $V$  ——端电压  
 $R$  ——电枢电阻

$T_f$  ——机械损耗转矩

$T_L$  ——负载转矩

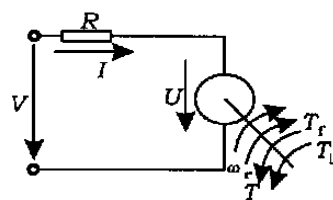


图1 无刷直流电动机的稳态模型简图

通常认为电枢电阻为:

$$R = R_a + R_b \quad (2)$$

$R$  包括绕组直流电阻  $R_a$  与功率管导通电阻  $R_b$  二部分, 并且认为在多数情况下  $IR_b$  与端电压  $V$  相比很小, 可以略去不计。在讨论电枢电阻的测定时, 都是介绍用电桥或欧姆计的方法对绕组电阻进行测试, 并考虑绕组的不同接法及温度影响等<sup>[3]</sup>。

模型表明, 从电路的角度看, 仅为一个回路的简单直流电路, 电路的基本参数也只有一个电枢电阻  $R$ , 电动机的稳态特性当然就与  $R$  密切相关。但是实

收稿日期: 2001- 08- 31

际上稳态模型中的电枢电阻并不是基本上等于绕组电阻那么简单, 只要对任意 1 台无刷直流电动机的稳态运行特性作定量的分析就可以发现。

## 2 样机试验

1 台典型结构和驱动方式的无刷直流电动机, 在直流电压  $V = 50V$  不变的条件下, 测得的一组负载实验数据如表 1 所示。

表 1  $V = 50V$  时样机 1# 的负载实验数据

$T_L/N\cdot m$	$I/A$	$n/(r/m\cdot in)$	$P_2/W$
0	2.29	8300	0
0.17	5.47	7900	140.6
0.34	8.33	7480	266.3
0.54	11.6	7000	395.8
0.74	14.47	6640	514.6

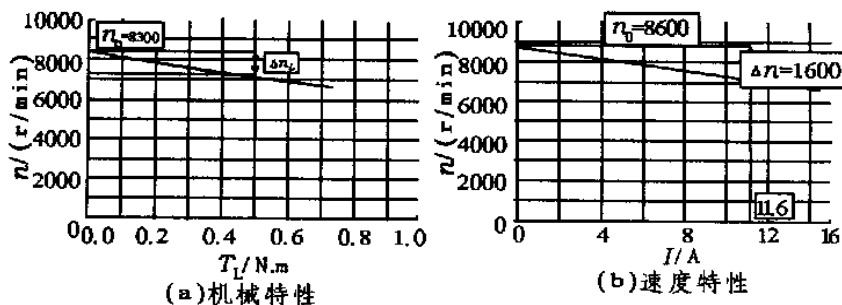


图 2 实验样机 1# 的实测特性曲线示例

可见, 这时电枢电阻的值为:

$$R = \frac{IR}{I} = \frac{9.30}{11.6} = 0.802\Omega \quad (4)$$

1# 实验样机定子三相绕组为 接, 一相绕组电阻用欧姆计测得为  $0.11\Omega$ , 电枢绕组的电阻为:

$$R_a = 0.11 / 0.22 = \frac{0.11 \times 0.22}{0.11 + 0.22} = 0.073\Omega \quad (5)$$

式 (4) 和 (5) 相比较表明, 样机 1# 在所述状态下, 电枢电阻的值 ( $R$ ) 与电枢绕组电阻 ( $R_a$ ) 的值不是同一个数量级, 很难说明电枢绕组电阻基本上能代表电枢电阻的值。实验时, 电源电压严格保持恒定不变, 联接导线的电阻尽量减小, 功率管的导通电阻也很小, 所以就是考虑电枢绕组电路其他各部分电阻的影响, 也根本不能说明实际上电枢电阻的值为什么有式 (4) 表示那么大。

事实上电枢等效电阻除了电枢绕组电阻 ( $R_a$ ) 和功率管的导通电阻 ( $R_b$ ) 以外, 还有一项不可忽视的部分, 即换向等效电阻 ( $R_c$ )。于是:

$$R = R_a + R_b + R_c \quad (6)$$

它的机理与有刷直流电动机相似, 只不过常规

作成曲线如图 2a、b 所示。图 2a 是电动机最基本的机械特性曲线, 负载转矩  $T_L = 0$  时电动机的空载转速  $n_0 = 8300r/m\cdot in$ ; 负载转矩增大时, 电动机的转速下降, 例如  $T_L = 0.5N\cdot m$  时,  $n = 7100r/m\cdot in$ , 转速下降了  $n = 1200r/m\cdot in$ ; 转速的下降反映了电枢电流增大, 电枢电阻压降的增大, 从中即可了解电枢电阻的值。更直观一些, 通过图 2b 的转速特性可知, 它是负载增大时转速与电枢电流的关系。电枢电流为零时, 可得理想空载转速,  $n_0 = 8600r/m\cdot in$ 。转速随电枢电流增大而下降, 例如  $I = 11.6A$  时, 较  $I = 0A$  时, 转速下降的值为  $n = 1600r/m\cdot in$ ; 表明这时电枢电阻压降为:

$$IR = \frac{V}{n_0} \cdot n = \frac{50}{8600} \times 1600 = 9.30V \quad (3)$$

的有刷直流电动机通常换向片数很多, 同时换向元件只占电枢元件的很小一部分, 所以影响很小, 可以不计。作者曾在三槽小型直流电动机的情况下, 对换向等效电阻作过专门的研究, 表明在电枢等效电阻中占有不可忽视的比重<sup>[4,5]</sup>。无刷直流电动机一般具有三相电枢绕组, 与三槽电动机很相似, 而且功率较大, 显得更为突出。  $R_c$  的特点是它的值与转速密切相关。  $R_c$  的值在  $R$  中占较大比重时, 使得  $R$  的值与转速有关, 所以电枢等效电阻的测定需在不同转速下进行。

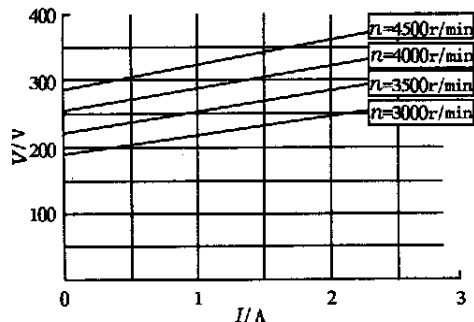
以下是对试验样机 2# 电枢电阻测定的实例。为了保持电动机的转速为某一定值, 增加负载电枢电流 ( $I$ ) 需增高电动机的端电压 ( $V$ ), 这样可获得  $n = \text{const}$  时,  $V = f(I)$  的关系, 称为调整特性, 实测样机 2# 的调整特性如表 2 及图 3 所示。

表 2 样机 2# 调整特性实测数据表

$n = 3000$	$I/A$	2.05	1.68	1.36	0.90	0.43	0.093
	$V/V$	246	237	228	215	203	193
$n = 3500$	$I/A$	2.05	1.73	1.41	0.17	0.69	0.41
	$V/V$	283	276	266	255	243	234

续表2 样机2<sup>#</sup>调整特性实测数据表

$n = 4000$	$I/A$	1.48	1.32	1.06	0.82	0.59	0.37
$(r/min)$	$V/V$	305	300	290	283	274	261
$n = 4500$	$I/A$	0.71	0.60	0.43	0.31	0.13	
$(r/min)$	$V/V$	312	308	302	298	291	

图3 样机2<sup>#</sup>  $V = f(I)$  实测曲线

调整特性曲线的斜率就是该转速下电枢等效电阻的值。测出的调整特性都是一条直线,表明电枢等效电阻的值与电枢电流的值基本无关,表明在这类NdFeB电机中电枢反应的影响很小。不同转速的调整特性则斜率明显不同,求出的等效电阻 $R$ 与转速的关系如图4所示。

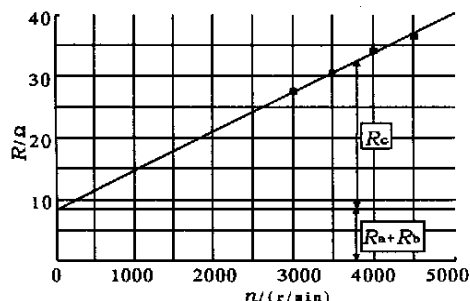
图4 电枢等效电阻实测结果示例(样机2<sup>#</sup>)

图4表明, $R$ 与转速的关系也是一条直线,说明 $R_c$ 的值与转速成正比。延长到 $n = 0$ 处与纵轴相交

可得 $R_a + R_b$ 的值,其中绕组电阻 $R_a$ 容易用电桥测出。样机2<sup>#</sup>实测得:

$$R = 8.23 + 0.00635n \quad (7)$$

可见

$$R_c = 0.00635n \quad (8)$$

样机2<sup>#</sup>定子为接法的三相绕组,相绕组电阻的值用欧姆计测得为 $8.5\Omega$ 。所以

$$R_a = 8.5 / 1.7 = 5.67\Omega \quad (9)$$

在实验样机2<sup>#</sup>中,只要 $n > 1300 r/min$ , $R_c$ 的值便超过 $(R_a + R_b)$ 的和;转速升高时 $R_c$ 的值可以达到 $(R_a + R_b)$ 的若干倍。可见,在无刷直流电动机中,仅用绕组电阻和功率管的导通电阻来表示电枢的等效电阻是不正确的;不计换向电阻 $R_c$ 的影响将无法说明和计算电动机的稳态运行特性。

## 参考文献:

- [1] J. R. Hendershot Jr., T. J. Miller. Design of Brushless Permanent-magnet Motors [M]. Magna Physics Publishing & Clarendon Press, Oxford, 1994, 1-14.
- [2] 王宗培. 永磁直流微电机 [M]. 东南大学出版社, 1992, 146.
- [3] J. R. Hendershot Jr., T. J. Miller. Design of Brushless Permanent-magnet Motors [M]. Magna Physics Publishing & Clarendon Press, Oxford, 1994, 11-4.
- [4] 王宗培, 卢道英, 王小明. 永磁直流微电机电枢等效电阻的研究 [J]. 微特电机, 1988 (4).
- [5] 王宗培. 永磁直流微电机 [M]. 东南大学出版社, 1992, 147-151.

作者简介: 韩光鲜(1970—),男,博士研究生,从事伺服及步进驱动单元的运行分析及仿真研究。

## 电机技术季刊

《电机技术》是由上海市电机技术研究所主办,以“电机制造应用技术”为主的科技期刊(季刊)。刊号ISSN 1006-2807(CN 31-1288TM)。广告经营许可证:3101094000024。本期刊已编入《中国学术期刊(光盘版)》的理工C辑定期出版,并已在中国期刊网全文上网。我刊自1980年创刊的20年中,始终坚持为广大读者和工程建设服务的宗旨,广拓稿源,在稿件选择和审校上精益求精,力求做到准确实用,刊物质量得到不断提高,受到广大读者赞扬和欢迎。在由上海市科委和上海市新闻出版局组织的期刊评审中,获得上海市优秀科技期刊奖。

《电机技术》开辟的栏目有:电机设计、技术交流、绝缘专题、电机试验、双革四新、电动车研究、经验交流、国外文献和市场信息等。为电机领域中从事研究、试制、生产、经营、管理人员及广大爱好者提供服务,并欢迎上述人员来稿。

本刊热诚为生产厂家、科研单位、经销商及配件制造单位等服务,欢迎在本刊刊登广告。

本刊每季末17日出版,大16开本,每期定价5.30元,全年定价21.20元,邮发代号:4-330。欢迎向当地邮局办理订阅手续。邮局订阅不方便者或漏订者可直接与本部联系订阅。

地址:上海市物华路178号

邮编:200086

电话:(021)65135110

传真:(021)65624387

E-mail: emtedit@online.sh.cn