

无刷直流电动机定子绕组的星形和三角形联接

韩光鲜¹, 王宗培², 程 智², 程树康¹

(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: 方波驱动无刷直流电动机(BLDCM)曾被认为应设计成梯形波的 EMF, 因存在显著的 3 次谐波而不宜采用 形绕组联接。在绝大部分研究 BLDCM 的文献中都是把定子绕组按 Y 形联接来分析讨论。因此可能会误认为 BLDCM 定子三相绕组必定是 Y 形联接。文中用实例说明小容量方波驱动 BLDCM 的三相定子绕组一样可以采用 联接, 设计良好的小容量 BLDCM 的 EMF 波形相当接近正弦波。不限定绕组的联接方式, 增加了绕组设计和线规选择的灵活性, 还可以利用 Y 形和 形转换获得双电压等级或双额定转速的 BLDCM。

关键词: 无刷直流电动机; 星形联接; 三角形联接; 绕组

中图分类号: TM 381

文献标识码: A

文章编号: 1001- 6848(2003)01- 0003- 04

Star Connection and Delta Connection of BLDCM Stator Windings

HAN Guang-xian¹, WANG Zong-pe², CHENG Zhi², CHENG Shu-kang¹

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

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

Abstract: In case of square-wave driving, the EMF of BLDCM is usually designed as trapezoidal waveform. Because of the existence of the notable third order harmonic, it is not proper to adopt the delta connection. Most researching literatures of BLDCM are about the star connection ones, so may be taken it for granted that the windings of BLDCM is star connection. The paper proves that the delta connection is also very effective by practical example, and the EMF of the well designed small BLDCM is very near to sine wave. Without the restriction of the windings connecting manner, the windings designing and wire-gauge selecting become more flexible. Meanwhile, the double rated voltage or double rated speed of BLDCM are also easily available by changing the connecting manner between star connection and delta one.

Key words: brushless DC motor (BLDCM); star connection; delta connection; windings

1 BLDCM 定子绕组是否一定是星形联接

BLDCM 的典型结构是定子有三相绕组, 转子为永磁体, 与普通 ACM 的三相绕组没有原则性的区别。ACM 中的三相绕组可以 Y 形或 形联接, 二种接法之间有一定的等效和转换关系。在 BLDCM 的研究资料中, 没有见到对这个问题的特别说明, 可是众多文献给出的电路结构、电流波形等实验结果, 都是针对定子绕组星形接法^[1~4], 好像不言而喻定子绕组一定是星形联接, 使得不少人误认为 BLDCM 的定子绕组不可以采用 形联接。

以上情况也不是没有原因的, 事实上在 BLDCM 的发展过程中, 有一种相当普遍的看法, 认

为方波驱动 BLDCM 应该设计成梯形波的 EMF。梯形波的 EMF 含有较大的 3 次谐波成分, 且在三相绕组内都同相位, 如果将绕组接成 , 会产生较大的 3 次谐波电流(环流), 使得电动机在没有带负载转矩情况下就有相当大的损耗, 影响电动机的运行性能, 在这种情况下, 定子绕组的 联接确实不宜采用。

可是对于小容量 BLDCM 的产品, 要设计成梯形波的 EMF 并不容易, 受到很多因素的制约。而且设计成梯形波 EMF 也不见得对运行性能有多大好处^[5]。实际上设计良好的产品, EMF 都很接近正弦波, 定子绕组 联接也不会产生明显的环流, 不会影响损耗和效率。不限定绕组为 Y 联接, 增加了绕组设计、线规确定的灵活性; Y 和 可以转换, 使得相同线圈的电动机能适应不同的规格, 或者说不同规格要求的电动机, 如电压不同或转速不同等, 可以绕

收稿日期: 2002- 12- 02

制同样的定子线圈,方便生产。本文结合在产品中实际应用作较具体的说明。

2 Y- 等效绕组

在传统的 ACM 中,星形接法的绕组和三角形接法的绕组是完全可以等效替代的,它们之间的匝比为 $\sqrt{3}$ 。如果 Y 接绕组每相的匝数为 N ,导线截面积为 A ,则与它等效的 接绕组的每相绕组匝数和截面积为:

$$\left. \begin{aligned} N' &= \sqrt{3} N \\ A' &= A / \sqrt{3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

相绕组的旋转电压系数(k_{e1})与相绕组的匝数成正比;每相绕组的电阻(R_{11})与相绕组的匝数成正比,与导线截面积成反比;每相绕组的电感(L_{11})和相绕组间的互感(L_{12})与绕组匝数平方成正比。由式(1)可得:

$$\left. \begin{aligned} k_{e1}' &= \sqrt{3} k_{e1} \\ R_{11}' &= 3 R_{11} \\ L_{11}' &= 3 L_{11} \\ L_{12}' &= 3 L_{12} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

另外相绕组的同步电感:

$$\left. \begin{aligned} L_c &= L_{11} - L_{12} \\ L_c' &= L_{11}' - L_{12}' \\ L_c' &= 3 L_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

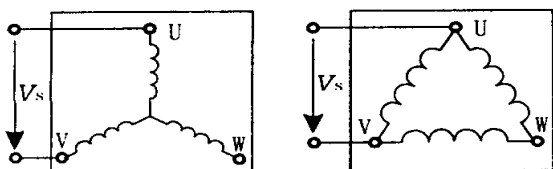


图 1 电枢绕组简化电路示意图

对于正弦波驱动 BLDCM,由于绕组内的电流电压都是正弦波形,与一般 ACM 相同,所以这种 Y- 绕组的等效也是没有问题的。对于方波驱动 BLDCM,典型的 120 导通方式时,每一瞬间总有上、下桥臂各一个功率管导通,若不计换向续流过程,电枢绕组简化原理性电路如图 1 所示。可以看出,电枢绕组旋转电压是以它的线电压来与电源电压平衡的,当然是通过逆变或整流,所以 BLDCM 电枢绕组的旋转电压(EMF)系数(k_e)与相绕组的旋转电压系数之间有如下关系。对 Y 接绕组:

$$k_e = \frac{3}{\pi} \sqrt{3} k_{e1} \quad (4)$$

对等效 接绕组:

$$k_e' = \frac{3}{\pi} k_{e1}' \quad (5)$$

由式(2)、(4)及(5):

$$k_e = k_e' \quad (6)$$

电枢电路的电阻,由图 1 知, Y 接绕组时:

$$R_a = R_{11} + R_{11} = 2 R_{11} \quad (7)$$

对等效 接绕组:

$$R_a' = R_{11}' / (R_{11}' + R_{11}') = \frac{2}{3} R_{11}' \quad (8)$$

由式(2)、(7)及(8):

$$R_a = R_a' \quad (9)$$

同样可得电枢电路的电感:

$$L_a = L_a' \quad (10)$$

式(6)、(9)和(10)表明,方波驱动 BLDCM 三相电枢绕组, Y \leftrightarrow 等效变换的关系式仍保持如式(1)所示。

以上的讨论没有涉及换向续流的能量过程,这个问题大体上可以从电流和电感的值来判断,但不是那么容易一目了然。当然可以用仿真的方法来进行进一步的分析说明,也可以用实验的数据来说明,可能更有说服力,能考虑到众多的实际影响因素。被试电动机是珠海运控电机有限公司生产的 92BL (1) - B - 70 - 30H (ST - 1) 型方波驱动 BLDCM,以及 BLDA - 04211A 1 型驱动器,被试电动机的定子绕组做成 Y 接和 接二种,让它们符合式(1)的等效关系,由于匝数取整和线规的限制,匝数和面积比不可能绝对等于 $\sqrt{3}$ 。实际情况为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{N'}{N} &= \frac{156}{90} = 1.733 \\ \frac{A'}{A} &= \frac{0.38^2 \times 4}{0.41^2 \times 2} = 1.718 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

可以看出,实际比值和 $\sqrt{3}$ 相当接近。实验时 Y 接和 接的样机各取若干台进行测试,提高测试数据的可靠性。图 2 是实测基本特性代表性的比较,从测试数据及图中曲线可以看出:

(1)符合式(1)变化条件的 Y 接和 接等效绕组的 BLDCM,它们的基本特性相一致,差别在同一产品正常分散度以内。

(2)Y 接和 接绕组 BLDCM 的空载电流相同,在 0.21~0.23A 范围内,说明 接法时没有产生明显的 3 次谐波环流。并没有加以特殊设计的 BLDCM,其 EMF 波形的正弦性就较好,没有明显的 3 次谐波,绕组联接便可以任意采用 Y 形或形。

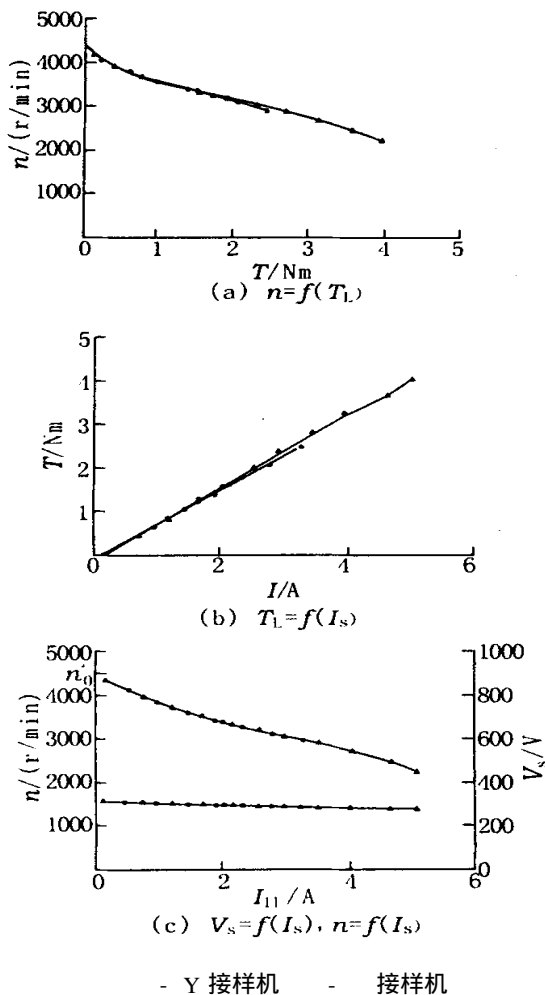


图 2 实测基本特性对比

(3) Y 接和 接法时, 绕组电流的波形不一样, 使得电枢磁势的空间波形不同, 绕组电流换向续流过程不一样, 绕组电流的波形系数有差别, 电动机的机电能量过程, 包括振动和噪声等不会完全一样。进一步的分析、比较和说明超出了本文的范围。

3 双电压等级的 BLDCM

BLDCM 设计的基本规律与常规电动机相同: 电动机的转矩取决于有效材料的体积, 通常用电枢表面的直径(D)和轴向长度(l)表示:

$$T_e = CD^2 l \quad (12)$$

电动机的功率则还与角速度(ω)成比例:

$$P_e = T_e \omega \quad (13)$$

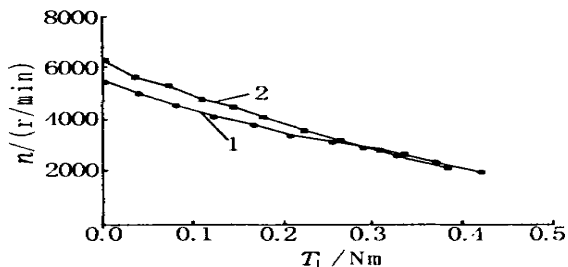
电动机的角速度则取决于它的电源电压和绕组匝数。如果要求电动机的额定转速一定, 则电源电压不同时绕组的匝数不一样, 电压高时绕组匝数较多, 导线截面积较小, 电压低时相反。

若 1 台绕组 Y 接的电动机, 相绕组匝数为 N_1 , 导线截面截为 A_1 , 改成 接后, 这台电动机的等效

Y 接绕组匝数和导线截面积为:

$$\left. \begin{aligned} N_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}} N_1 \\ A_2 &= \sqrt{3} A_1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

即等效于减少了匝数, 增大了截面积, 应适合于较低的电源电压等级, 就是说利用绕组接法的改变, 可以将 BLDCM 设计成适合于二种不同电压等级。图 3 所示是珠海运控电机有限公司生产的 57BL (1) A - (ST- 1) 型电动机实测的机械特性。图中曲线(1)是绕组 Y 接, 电源电压 $V_s = 36V$ (DC) 条件下测出; 曲线(2)是绕组 接, 电源电压 $V_s = 24V$ (DC) 时测得。这是 1 台 $P_N = 90W$, $n_N = 3000r/min$, $T_N = 0.29Nm$ 的电动机, 额定电压为 $V_N = 24/36V$ (DC), 额定电流为 $I_N = 9.0/4.8A$ (DC)。



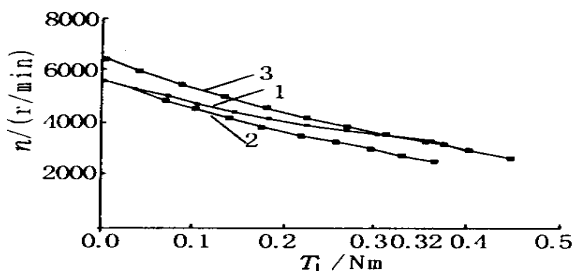
(1) Y 接 36V (2) 接 24V

图 3 双电压 BLDCM 机械特性实例

应指出的是, 双电压电动机的电压比不等于 $\sqrt{3}$, 这是因为, 如果电压比为 $\sqrt{3}$, 二条机械特性的空载转速一样, 但负载增大时转速降不一样, 就不能获得基本上相同的额定转速和额定转矩。电压等级较低对应于 接, 桥臂电流较大, 电源内阻和功率管上的压降很明显会增大, 绕组电阻和换向电阻压降与额定电压的比值增大, 因此同样转矩时的转速降会大一些, 所以要想获得相同的额定转速, 就要让接时的空载转速抬高一些, 这就是电压比 k_v 要小于 $\sqrt{3}$, 例如 $k_v = 1.5$ 左右, 图 3 的例子就是这样。

$$k_v = \frac{36}{24} = 1.5 \quad (15)$$

图 4 表示另一台 BLDCM 机械特性实验曲线, 图中曲线(1)为绕组 Y 接, 电源电压 $V_N = 220V$ (AC) 时的特性。(2)为绕组 接, 电源电压降到 $V_N = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127V$ (AC) 时的特性, 可以清楚地看出, 二条曲线在 n_0 处重合, T_L 增大时, 曲线 2 下降明显比曲线 1 快, 在 $T_L = T_N$ 时转速降低, 输出功率减小。(3)绕组 接, 将电源电压略增加一些, 大约为 $V_N = \frac{220}{1.5} = 147V$ (AC) 时的曲线, 空载转速稍提高了一



(1) $V_N = 220V$ (AC), Y 接 (2) $V_N = 127V$ (AC), 接
(3) $V_N = 147V$ (AC), 接

图 4 双电压 BLDCM 电压比 k_v

些, $T_L = T_N$ 时转速与 Y 接 $220V$ (AC) 时相近, 因此得到大体相同的额定转速和功率。

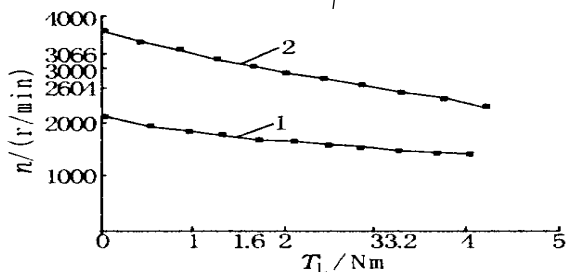
4 双转速的 BLDCM

如果电源电压不变, 将 BLDCM 绕组从 Y 接改成 接, 等效于绕组匝数减少, 电动机的转速便升高, 就是说 1 台 BLDCM 利用绕组接法改变, 可成为具有 2 种转速的电动机, 用实例来说明 2 种转速的比例关系。图 5 是 1 台 92BL (1)C 型电动机实测的机械特性曲线, 其中曲线 (1) 对应绕组 Y 接, 曲线 (2) 对应绕组 接。Y 接绕组时的设计是 1 台 $P_N = 500W$, $n_N = 1500r/min$, $T_N = 3.2N\cdot m$ 的电动机, 改成 接法后, 如果保持额定转矩 $T_N = 3.2N\cdot m$ 不变, 则额定转速提高到 $n_N = 2600r/min$, 转速比大约是:

$$k_n = \sqrt{3} \quad (16)$$

额定功率自然也相应提高, 即功率比大约是:

$$k_p = \sqrt{3} \quad (17)$$



(1) $V_N = 220V$ (AC), Y 接 (2) $V_N = 22V$ (AC), 接

图 5 双转速 BLDCM 转速比 k_n

这种关系是容易理解的, 事实上绕组从 Y 接改为 接后, 旋转电压系数 (k_e) 和转矩系数为 Y 接时的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$, 同样转矩时桥臂电流为 Y 接时的 $\sqrt{3}$ 倍, 输入功率也为 Y 接时的 $\sqrt{3}$ 倍, 在效率大体相同的情况下, 输出功率和转速便都为 Y 接时的 $\sqrt{3}$ 倍, 如式 (16) 和式 (17) 所示。

双转速的 BLDCM 的 k_n 和 k_p 可能会有另外选

择, 例如考虑到电动机的散热能力和绕组温升的限制, 当电动机转速升高时不一定能允许电动机的输出功率与转速成正比增加^[6]。如果 Y 接绕组设计, 对应较低转速额定输出时, 电动机绕组温升已没有多大余量, 那么改为 接后, 电动机的输出功率尽管有很充分的上升空间, 但是受温升限制, 电动机的连续输出功率只能保持与 Y 接较低转速时相近或相等。如果取 $k_p = 1$, 额定转矩与 Y 接时的值相比明显减少, 额定转速便明显升高, 转速比 k_n 也会显著高于 $\sqrt{3}$ 。图 5 中, 若改为 接后仍保持额定功率为 $P_N = 500W$ 不变, 则大体上对应 $n_N = 3000r/min$, $T_N = 1.6N\cdot m$ 的点, 这时的转速比为:

$$k_n = 2 \quad (18)$$

这虽然是个别实例的具体数据, 但有一定的代表性。

5 结 论

(1) 正常设计的小容量 BLDCM 都具有接近正弦波的 EMF, 不用担心 接绕组会引起明显的 3 次谐波环流而影响电动机的性能。

(2) 常规 ACM 电动机中 Y 接和 接绕组等效关系仍适用于 BLDCM。

(3) 不限定 BLDCM 定子三相绕组的联接方式, 增加了绕组设计的灵活性和通用性。

(4) 运用 Y 和 改接可以设计成双电压等级的 BLDCM, 获得相同转速和功率时的电压比约为 1.5。

(5) 运用 Y 和 改接可设计成双转速等级的 BLDCM, 转矩不变时的转速比为 $\sqrt{3}$, 功率不变时的转速比约为 2。

(6) 应指出的一点是, 定子绕组接法改变时, 霍尔传感器的位置需要作相应的调整, 所以上述双电压或双转速 BLDCM 电动机的前提是要配置可调整位置的霍尔位置传感器。

参考文献:

- [1] S. K. Safi, P. P. Acarnley, A. G. Jack Analysis and Simulation of the High-speed Torque Performance of brushless DC Motor Drivers [J] IEEE Proc Electr Power Appl, 1995, 142(3): 191-200
- [2] P. Pillay, R. Krishnan Modeling of Permanent Magnet Motor Drivers [J] IEEE Trans Ind Electr, 1988, 35(4): 537-541

(下转第 39 页)

表 1 三类永磁材料性能参数对比表

名称	$B_r /$ ($\times 10^{-1} \text{T}$)	$H_c /$ ($\times 79.6 \text{kA/m}$)	$(BH) /$ ($\times 7.96 \text{kJ/m}^3$)	B_r 温度系数 /(% /)	居里温度/ 居里温度/	最高工作 温度/	回复磁导 率 μ_r	密度/ (g/cm^3)
铁氧体	3.5~4.1	2~3.8	3~4	-0.18~-0.2	450	300	1.05~1.3	4.5~5.2
稀土钴	8~10	7~8.7	16~24	-0.04~-0.05	700~750	250	1.05~1.1	8~8.3
钕铁硼	10.5~12	>9	24~38	-0.13	300~330	80	1~1.05	7.3~7.55

3 稀土永磁材料在电机制造业中的应用

稀土永磁材料的迅速发展为其应用市场的发展开辟了新的天地,永磁电机作为重要的应用领域约占其用量的 1/3~1/4。其中:

(1) 永磁电动机: 包括无刷直流电动机、同步电动机、力矩电动机、步进电动机等,几何特点可以是永磁定子,永磁转子,永磁体可组成径向、切向、混合式等结构形式。广泛应用于钟表驱动装置、宇航陀螺、动量飞轮、纺织涡轮机、伺服电动机、机床传动装置、喷气发动机的起动机、电气机车推进器、汽车附件电动机、起动机等领域。特别是随着信息时代的到来,计算机已经深入到人们日常生活方方面面,计算机中硬、软及光盘驱动,以及 CD、DVD 中微型直流主轴电机都是采用稀土永磁电机。

(2) 永磁发电机: 包括无刷直流发电机、励磁机交流发电机、脉中发生器,几何特点是永磁转子,广泛应用于转速计、卫星储能飞轮、大型同步涡轮发电机的激磁器、飞机发动机的点火器、飞机主发电机和起动机等领域。应用于航天航空中的永磁发电机主要采用钕钴永磁材料,不仅是因为这类材料磁能积高、可靠性好,而且其工作温度范围也较大(见表 1)。

稀土永磁材料优良的性能,导致了由其制成的电机具有下列优点:

(1) 高磁能积使得同样输出功率时,整机重量减少 30%,同体积输出功率可增大至 50%,同时可减小离心力,提高转速,降低电流强度,减少冷却问题,减少机械轴承问题,电动机中力矩/转子惯性比也较大。

(2) 高剩磁使得气隙磁通密度较高,可节约铜绕

组用量,降低电机成本。

(3) 高矫顽力使得退磁危险降低。对各种磁体几何形状,磁化强度稳定。给定转子外形设计带来方便。

(4) 良好的热稳定性(主要指稀土钴): 使电机工作可靠,无最低工作温度极限,最高工作温度可到 250 (见表 1)。

(5) 价格相对低廉,储量较大(主要指 Nd-Fe-B),使得电机成本较低,可大规模生产和推广。

4 结 论

随着人们对稀土永磁材料研究的不断深入,制造工艺的日益完善,稀土永磁电机的性能将不断改观,向实现小型化、轻量化、精密化、高性能化的目标迈进。其开发和利用必然更上一个台阶,应用领域将进一步延伸、拓展。

展望未来,稀土永磁电机会在电子信息设备、电动车辆、电子和离子来控制等及新兴的高科技产业领域中起到重要作用,在电机制造业中扮演越来越重要的角色。

参考文献:

- [1] 唐苏亚 粘接永磁的发展现状和应用市场[J]. 微电机, 2001(6), 41- 43
- [2] 张 熙 第二届国际钕铁硼永磁讨论会情况简介[D]. 全国第一届永磁材料会议论文, 1986
- [3] 马鹏起 国内外稀土原材料市场的现状和发展趋势 [D]. 全国第一届永磁材料会议论文, 1986
- [4] 陈峻峰 永磁电机[M]. 机械工业出版社, 1983

作者简介: 张传林(1962-),男,高级工程师,主要研究方向为电机设计、工艺及制造。

(上接第 6 页)

- [3] 贺益康,严岚 永磁无刷直流电机稳态特性的状态空间分析[J]. 电工技术学报, 2002(1), 17- 22
- [4] 鲍晓华,刘根,张敬华 永磁无刷直流电动机运行特性的研究[J]. 微电机, 2002, 35(2), 7- 9
- [5] 王宗培,韩光鲜,程智,等 BLDCM 的方波和正弦波驱

动[J]. 微电机, 2002, 35(6), 3- 6

- [6] 韩光鲜,王宗培,程智 小容量无刷直流电动机的热阻和连续功率[J]. 微电机, 2002, 35(5), 3- 6

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。