

变速恒频发电机矢量控制系统仿真分析

孙国霞, 李啸聪, 蔡义明

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 在分析双馈式异步电机数学模型的基础上, 利用 Matlab/Simulink 搭建了系统仿真模型. 通过矢量控制技术进行解耦, 使原动机转速不受电网频率的限制, 采用 SVPWM (空间矢量控制) 方式对转子供电, 实现了变速恒频发电系统. 仿真结果证明了矢量解耦控制方法和 SVPWM 供电方法的有效性.

关键词: 矢量控制; 转差频率; VVVF; SPWM; SVPWM

Simulation of variable-speed-invariable-frequency generator based on vector control technology

SUN Guo-xia, LI Xiao-cong, CAI Yi-ming

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Based on the mathematical model of the wound-rotor asynchronous machine, a system of wound-rotor asynchronous machine has been founded by Matlab/Simulink. Vector control technology is adopted for decoupling, so that the speed of priming mover could shake off the frequency limit of power grid. SVPWM is adopted for feeding the wound-rotor. The reasonability and validity are testified by the simulation results.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.0728027).

Key words: vector control; slip frequency; VVVF; SPWM; SVPWM

中图分类号: TM76; TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)04-0027-04

0 引言

传统绕线式异步电机是通过转子上的滑环与外部电阻相连而改变转子电阻值, 进而改善电机起动和调速性能的一种交流电机。由于电力电子技术的发展, 出现了双馈调速的运行控制方式, 通过外接频率、幅值、相位和相序均可调的交流逆变电源, 使速度调节范围更宽, 电机特性的控制手段也更丰富。在此基础上, 发展出了双馈式异步电机变速恒频发电运行方式, 其基本原理是在转子绕组内通入或馈出转差频率的、幅值和相位可调的交流电流, 保证定子电压的频率、幅值和相位和电网严格一致。

1 系统原理

1.1 变速恒频发电机矢量控制原理

矢量控制技术是交流传动系统实现解耦控制的核心技术。将之应用于变速恒频发电机, 可以实现机电之间的充分解耦, 使原动机转速不受发电机输

出即电网频率的限制, 同时发电机输出电压的频率、幅值、相位也不受转子速度和瞬时位置的影响, 变传统的刚性约束为柔性联系。

按照文献[1]所述建立同步参照系内绕线式异步电机的数学方程, 具体过程在此不赘述。

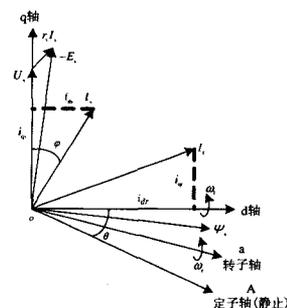


图1 空间矢量关系示意图

Fig.1 Relationship of space vector

取 q 轴与定子电压综合矢量 U_s 重合, 即给定矢量控制约束条件为:

$$u_{ds} = 0, \quad u_{qs} = U_s \quad (1)$$

其中: U_s 为定子电压幅值。可绘出电机在同步速参照系中的矢量图如图 1 所示。

当定子输出功率和功率因素一定时, 可以将定子电流指令值的 d、q 轴分量表示为:

$$\begin{cases} i_{ds}^* = I_s \sin \varphi \\ i_{qs}^* = I_s \cos \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ 为定子功率因数角, I_s 为定子电流幅值, 其值为:

$$I_s = P_1 / (1.5 U_s \cos \varphi) \quad (3)$$

式中: P_1 为定子输出功率。

联立电机的电压、磁链方程以及式(1)、(2)并令微分算子为 0 即可求得转子 d、q 轴电流和电压的稳态值亦即控制指令值为:

$$\begin{cases} i_{dr}^* = (U_s + \omega_1 L_s I_s \sin \varphi + r_s I_s \cos \varphi) / (\omega_1 L_m) \\ i_{qr}^* = (\omega_1 L_s I_s \cos \varphi - r_s I_s \sin \varphi) / (\omega_1 L_m) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{dr}^* = r_r i_{dr}^* + \omega_2^* (L_m i_{qs}^* - L_r i_{qr}^*) \\ u_{qr}^* = r_r i_{qr}^* + \omega_2^* (L_r i_{dr}^* - L_m i_{ds}^*) \end{cases} \quad (5)$$

由此可知, 当电网电压和频率一定时, 严格以转差频率交变的转子电流只是定子功率因数和定子输出功率的函数, 而据此控制转子电流或电压也就可以简单而有效地控制定子电流和电压的幅值和相位, 从而调节电机的输出功率和功率因数。

当电机受到扰动而处在动态过程时, 采用泰勒展开法对式(5)进行线性化展开可以得到转子电压的动态控制方程为:

$$\begin{cases} u_{dr} = u_{dr}^* + \omega_2^* L_m \Delta i_{qs} + r_r \Delta i_{dr} - \omega_2^* L_r \Delta i_{qr} + (L_m i_{qs}^* - L_r i_{qr}^*) \Delta \omega_2 \\ u_{qr} = u_{qr}^* - \omega_2^* L_m \Delta i_{ds} + \omega_2^* L_r \Delta i_{dr} + r_r \Delta i_{qr} + (L_r i_{dr}^* - L_m i_{ds}^*) \Delta \omega_2 \end{cases} \quad (6)$$

综上所述, 可得变速恒频发电系统矢量控制数学仿真模型:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (7)$$

式中: $X = (i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega_2)^T$

$$U = (0, U_s, u_{dr}, u_{qr}, -T_m)^T$$

$$B = \frac{1}{\Lambda} \begin{bmatrix} -L_r & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & -L_r & 0 & L_m & 0 \\ -L_m & 0 & L_s & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_5 \end{bmatrix}$$

$$A = -\frac{1}{\Lambda} \begin{bmatrix} r_s L_r & -a_1 & r_r L_m & a_2 & 0 \\ a_1 & r_s L_r & -a_2 & r_r L_m & 0 \\ r_s L_m & -a_3 & r_r L_s & a_4 & 0 \\ a_3 & r_s L_m & -a_4 & r_r L_s & 0 \\ a_5 i_{qr} & -a_5 i_{dr} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中: $\Lambda = L_s L_r - L_m^2$, $b_5 = \frac{P}{J} \Lambda$, $a_1 = \omega_1 L_s L_r - \omega_2 L_m^2$,

$$a_2 = L_r L_m (\omega_1 - \omega_2), \quad a_3 = L_s L_m (\omega_1 - \omega_2),$$

$$a_4 = \omega_1 L_m^2 - \omega_2 L_s L_r, \quad a_5 = 1.5 p L_m b_5$$

初始条件确定如下:

$$I_{s0} = \frac{2P_{10}}{3U_{s0} \cos \varphi_0}, \quad i_{ds}(0) = I_{s0} \sin \varphi_0,$$

$$i_{qs}(0) = I_{s0} \cos \varphi_0,$$

$$i_{dr}(0) = \frac{U_{s0} + \omega_{10} L_s I_{s0} \sin \varphi_0 + r_s I_{s0} \cos \varphi_0}{\omega_{10} L_m},$$

$$i_{qr}(0) = \frac{\omega_1 L_s I_{s0} \cos \varphi_0 - r_s I_{s0} \sin \varphi_0}{\omega_{10} L_m}.$$

通过上述推导, 得出了变速恒频发电机矢量控制的数学模型。在实际应用中, 往往采用在绕线式转子外接 SPWM 逆变器的方法来保证转子电流按式(4)变化。本文提出了一种新的方案, 采用空间矢量 PWM (SVPWM) 逆变器供电。

1.2 空间矢量 PWM (SVPWM) 逆变器原理

空间矢量 PWM (SVPWM) 是近年来的一个研究热点。采用 SVPWM 设计逆变器, 可以大大减少开关动作次数, 并且有利于数字化实现。

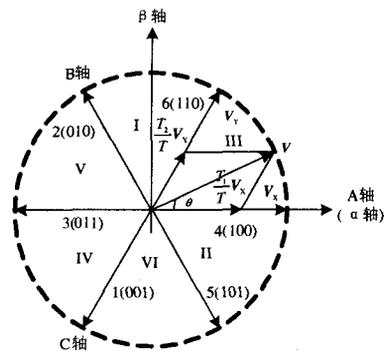


图 2 空间矢量分布图

Fig.2 Space vector distribution

图 2 所示为空间矢量分布图。假设电压矢量 V 位于图中所示位置, 设逆变器开关周期为 T , 则该电压矢量可认为是其所在扇区的两相邻矢量 V_x (顺时针邻侧矢量) 和 V_y (逆时针邻侧矢量) 分别作用

T_1 和 T_2 时间的效果。

值得注意的是, 式 (4) 和 (5) 给出的转子电流和电压的控制表达式是建立在同步坐标系上的, 而图 2 中空间矢量是建立在定子坐标系内, 因此在仿真建模过程中首先要将式 (4) 和 (5) 变化至定子坐标系内。

设 $I_{\text{ref}\alpha}$ 和 $I_{\text{ref}\beta}$ 是将电流参考值变换至定子 α - β 轴后的值。则矢量所处扇区可以通过式(8)计算。

$$\begin{cases} I_{\text{ref}1} = I_{\text{ref}\alpha} \\ I_{\text{ref}2} = \frac{1}{2}(\sqrt{3}I_{\text{ref}\alpha} - I_{\text{ref}\beta}) \\ I_{\text{ref}3} = \frac{1}{2}(-\sqrt{3}I_{\text{ref}\alpha} - I_{\text{ref}\beta}) \end{cases} \quad (8)$$

若 $I_{\text{ref}1} > 0$, 则 $A=1$, 否则 $A=0$; 若 $I_{\text{ref}2} > 0$, 则 $B=1$, 否则 $B=0$; 若 $I_{\text{ref}3} > 0$, 则 $C=1$, 否则 $C=0$ 。扇区号则为 $A+2B+4C$ 。但值得注意的是, 采用式(8)中的定义方法后, 在 d - q 轴系变换至 α - β 轴系时, 需要将位置角滞后 $\pi/2$, 这样才能保证式(8)及扇区判断式的成立。这在文献[3,4]中都没有论证, 本文修正了这一不足之处。

定义状态量:

$$\begin{cases} X = \sqrt{3}I_{\text{ref}\alpha} T / V_{\text{DC}} \\ Y = \left(\frac{3}{2}I_{\text{ref}\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}I_{\text{ref}\beta} \right) T / V_{\text{DC}} \\ Z = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}I_{\text{ref}\alpha} - \frac{3}{2}I_{\text{ref}\beta} \right) T / V_{\text{DC}} \end{cases} \quad (9)$$

则 $\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$ 六个状态量就可以描述空间电流矢量处于任意扇区时其在相邻两个状态量上投影的时间长度。 T_1 和 T_2 长度的确定如表 1 所示。

表 1 T_1 、 T_2 赋值表

Tab.1 Set value

扇区	I	II	III	IV	V	VI
T_1	Z	Y	-Z	-X	X	-Y
T_2	Y	-X	X	Z	-Y	-Z

在仿真程序中, 为了防止 $T_1+T_2>T$ 而发生饱和, 设定若饱和发生则: $T_1=T_1T/(T_1+T_2)$; $T_2=T_2T/(T_1+T_2)$ 。在一般的情况下, $T_1+T_2<T$, 这时就必须合理的安排零矢量 (000) 和 (111), 使在一个周期内开关状态的变化最少。若矢量位置仍如图 4 中所示, 显然 000-100-110-111 是最合理且开关动作次数最少的开关组合序列。

为了合理地安排零矢量并使逆变器能有效跟踪合成矢量, 本文采用“三电平梯升法”, 该方法以三

角波为 PWM 调制的载波, 采用直流调制方法。以图 4 所示情形为例, 设 T_0 为零矢量 (000) (111) 的作用时间, T_1 和 T_2 分别为该扇区两矢量作用时间, 定义 T_a 、 T_b 和 T_c 为梯升直流调制电平。则有:

(1) 对单增模式的三角载波:

$$\begin{cases} T_0+T_1+T_2=T \\ T_a+T_1+T_2\leq T \\ T_b-T_a=T_1 \\ T_c-T_b=T_2 \end{cases}$$

(2) 对连续增/减模式的三角载波:

$$\begin{cases} T_0+T_1+T_2=T \\ T_a+T_1+T_2\leq T \\ T_b-T_a=T_1/2 \\ T_c-T_b=T_2/2 \end{cases}$$

根据上述关系确定 T_a 、 T_b 、 T_c ,

图 3 为连续增/减模式三角载波时应用梯升法示意图。从图中可以看出, 矢量状态 4(100)作用时间为 $2\times(T_b-T_a)=T_1$, 矢量 6(110)作用时间为 $2\times(T_c-T_b)=T_2$ 。且零矢量的插入是实时适式的。

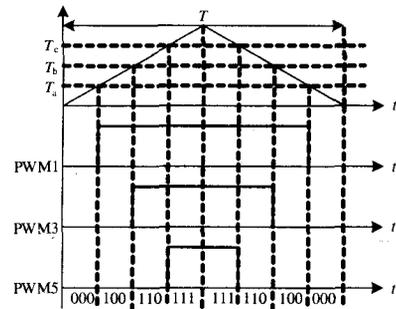


图 3 各开关状态时间分配示意图

Fig.3 Distribution of each switch state

根据“梯升法”原则可以确定在连续增/减模式三角载波时, 整个空间扇区内 T_a 、 T_b 、 T_c 如表 2。

表 2 开关电平分配表

Tab.2 Switch level distribution

扇区	I	II	III	IV	V	VI
T_a	T_{21}	T_{10}	T_{10}	T_{32}	T_{32}	T_{21}
T_b	T_{10}	T_{32}	T_{21}	T_{21}	T_{10}	T_{32}
T_c	T_{32}	T_{21}	T_{32}	T_{10}	T_{21}	T_{10}

表中: $T_{10}=(T-T_1-T_2)/4$; $T_{21}=T_{10}+T_1/2$; $T_{32}=T_{21}+T_2/2$

2 仿真模型的建立

系统仿真框图如图 4 所示。通过矢量算法对系统进行解耦, 得出式 (6) 所示的转子电压动态控制值, 通过 PARK 逆变换即可得到其在定子坐标系内的控制值作为 SVPWM 环节的控制值。而绕线式异

步电机则按式 (7) 建立模型。

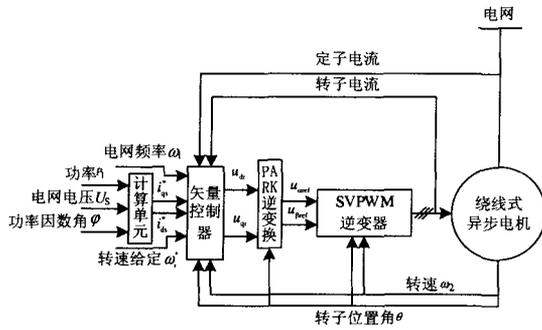


图 4 系统仿真框图

Fig.4 System simulation

SVPWM 逆变器环节按照 2.2 节分析建模, 其仿真框图如图 5 所示。

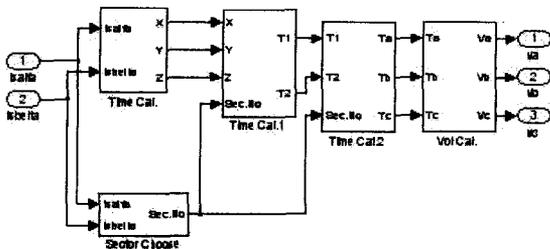


图 5 SVPWM 仿真框图

Fig.5 SVPWM simulation

3 仿真结果

绕线式异步电机参数为 $r_s=3.74 \Omega$, $r_r=3.184 \Omega$, $L_s=0.3042 \text{ H}$, $L_r=0.3107 \text{ H}$, $L_m=0.292 \text{ H}$, 额定电压 220 V, 额定功率 1500 W, 额定转差率 0.05, 额定频率 50 Hz, 额定功率因数 0.9, 极对数为 2, 转动惯量 $0.025 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。仿真内容包括: ①在 0.2 s 时系统输出功率变为 1300 W, 0.6 s 时再变为 1700 W; ②再 0.2 s 时转差率变为 0.1, 0.6 s 时恢复为 0.05。

仿真结果如图 6、7 所示, 所有结果均进行了标么值处理。

图 6 的仿真结果表明, 虽然定子输出功率的瞬间调节幅度大于 10%, 但由此引起的电磁扰动却并不显著, 动态调节和跟踪控制过程小于 0.1 s, 变化也比较平缓, 这实际上已经说明了矢量控制方法的有效性, 而在整个调节过程中速度的变化甚微, 则进一步表明机电之间的解耦是成功的, 控制模型是合理的。

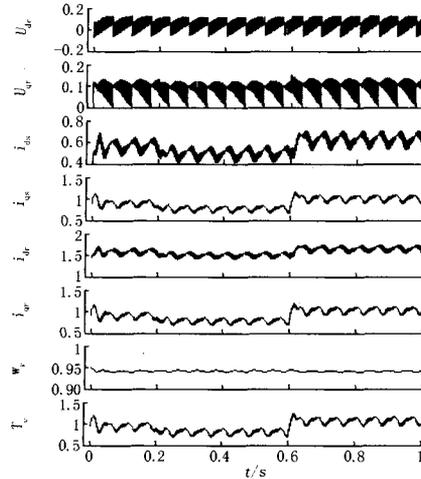


图 6 输出功率从 1500W~1300W~1700W 的动态响应过程

Fig.6 Dynamic response of output power from 1500W~1300W~1700W

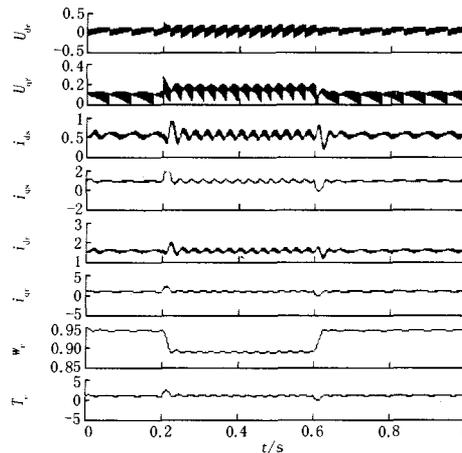


图 7 转差率从 0.05~0.1~0.05 的动态响应过程

Fig.7 Dynamic response of slip from 0.05~0.1~0.05

图 7 的仿真结果表明, 速度变化导致的响应冲击幅度最大, 动态调节和跟踪控制的过程稍长, 这是合理的。但系统最终能够以相对较短的时间平缓地过渡实现转速变化的调控平衡过程, 这也是由于采用矢量控制计数实现了机电解耦的结果。

4 结论

本文在分析了双馈式异步电机的数学模型和其矢量控制理论的基础上, 设计了变速恒频发电机矢量控制系统, 并采用 SVPWM 逆变器的实现方案。仿真结果验证了上述方案上的可行性, 能为实际变速恒频发电机矢量控制系统的设计和调试提供指导。

(下转第 36 页 continued on page 36)

- 21(2):18-23.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. A New Approach to Alarm Processing in Power Systems Based Upon the Set Covering Theory and Tabu Search Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997,21(2):18-23.
- [2] Fukui C, Kawakami J. An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers[J]. IEEE Trans on PWRD,1986,1(4): 83-90.
- [3] Tanaka H, Matsuda S, Izui Y, et al. Design and Evaluation of Neural Network for Fault Diagnosis[A]. In: Proceedings of Second Symposium on Expert System Application to Power Systems (ESAP'89)[C]. Seattle: 1989.378-384.
- [4] Dy Liacco T E, Kraynak T J. Processing by Logic Programming of Circuit-Breaker and Protective-Relaying Information[J]. IEEE Trans on PAS, 1969, 88(2):171-175.
- [5] WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. Fault Section Estimation in Power Systems Using a Genetic Algorithm[J]. Journal of Electric Power Systems Research, 1995,34(3): 165-172.
- [6] WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. A Refined Genetic Algorithm for Fault Section Estimation in Power Systems Using the Time Sequence Information of Circuit Breakers[J]. Journal of Electric Machines and Power Systems, 1996, 24(8): 801-815.
- [7] WEN Fu-shuan, CHANG C S. A New Approach to Fault Diagnosis in Electrical Distribution Networks Using a Genetic Algorithm[J]. Journal of Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12(1): 69-80.
- [8] 文福拴, 韩桢祥, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法第一模型与方法(一)、(二)、(三)[J]. 电力系统自动化学报, 1998, 10(3):1-18.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, et al. An Analytic Model and Genetic Algorithm Based Method for Fault Diagnosis in Power Systems(1)(2)(3)[J]. Proceedings of the EPSA, 1998,10(3):1-18.
- [9] 文福拴, 邱家驹, 韩桢祥. 只利用断路器信息诊断电力系统故障的高级遗传算法[J]. 电工技术学报, 1994, 11(2): 58-64.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, et al. A Refined Genetic Algorithm for Fault Section Estimation Using Information from Circuit Breakers[J]. Journal of Electric Machines and Power Systems, 1994,11(2):58-64.
- [10] 韩桢祥, 钱源平, 文福拴. 基于模糊外展推理和 Tabu 搜索方法的电力系统故障诊断[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999,39(3):56-60.
HAN Zhen-xiang, QIN Yuan-ping, WEN Fu-shuan. Tabu Search Approach to Fault Diagnosis in Power Systems Using Fuzzy Abductive Inference[J]. J Tsinghua Univ (Sci&Tech), 1999,39(3):56-60.
- [11] Glover F, Kelly J, Laguna M. Genetic Algorithms and Tabu Search: Hybrids for Opimization[Z]. Boulder: University of Colorado, 1992.
- [12] 文福拴, 韩桢祥. 计及警报信息时间特性的故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17):6-12.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. A New Fault Diagnosis Model Capable of Dealing with the Temporal Information of Alarm Messages[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(17): 6-12.

收稿日期: 2007-08-03; 修回日期: 2007-08-26

作者简介:

姜伟(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断; E-mail:jiangwei1919@163.com

廖志伟(1973-), 男, 副教授, 当前研究方向为电力系统智能控制和故障诊断;

李文清(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。

(上接第 30 页 continued from page 30)

参考文献

- [1] 辜承林. 机电动力系统分析[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1998.
- [2] 陈坚. 电力电子学—电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [3] 韩安太, 刘峙飞, 黄海. DSP 控制器原理及其在运动控制系统中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 田亚菲, 何继爱, 黄智武. 电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法仿真实现及分析[J]. 电力系统及其自动化

化学报, 2004, (4): 68-71.

收稿日期: 2007-08-16

作者简介:

孙国霞(1978-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统控制技术; E-mail:sunguoxia0424@sohu.com

李啸骥(1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统控制与分析, 农业工程自动化等;

蔡义明(1976-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统控制技术。