

# 异步电动机调压节能技术<sup>①</sup>

贺 香, 周腊吾

(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

**摘 要:** 当异步电动机轻载或空载运行时, 功率因数较低, 适当调节异步电动机端电压, 可以降低能耗实现节能。本文介绍一种基于 R8CL38 单片机的异步电动机自适应调压节能技术, 以最优控制参考模型为基础, 采用模型参考直接自适应方法进行控制。仿真计算结果表明该控制技术节能效果明显, 性能稳定可靠。

**关键词:** 异步电动机; 自适应控制; 调压; 节能

## Variable-Voltage Energy-Saving Technology of Ac Motors by Model Reference Adaptive Control Based on R8CL38

HE Xiang, ZHOU La-Wu

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Three-Phase asynchronous motor's power factor and efficiency are usually very low when the loads are free or light. Regulating the input voltage of motors properly can raise the power factor and reduce the losses, which is a kind of Energy-saving technology. This paper introduces an adaptive control method of three-phase asynchronous motors which is a kind of energy-saving technology based on R8CL38. The reference model with optimum control method is adopted. It can control the voltage of three-phase asynchronous motors directly. Simulation results show the designed energy-saving power controller is effective, and the control system is stable and reliable.

**Key words:** asynchronous motor; adaptive control; voltage-adjusting; energy-saving

众所周知, 日常生活中电机的选型是按照最大负载和最恶劣工况下的功率而定的, 因此大多数情况下异步电动机工作在轻载或不均匀负载工况下, 造成了“大马拉小车”的现象。

现有节能方法可归结为<sup>[1]</sup>: 第一类、优化电机本身结构; 第二类、变频调速节能; 第三类、无功补偿节能; 第四类、调压节能。对于负载不断变化的电机, 前三种方法的成本高, 资金回收周期长, 在一定程度上限制了它们的使用。本文中基于最优控制的模型参考自适应控制系统是通过改变异步电动机定子端的输入电压, 降低电机的铜耗和铁耗, 改善电机运行时的功率因数, 提高效率, 实现节能, 不需要对电机的转速和不稳定性参数进行在线辨识, 从而大大缩短了控制时间, 节能原理比较简单, 易实现且成本较低。

### 1 异步电动机降压节能原理

异步电动机的有功总损耗  $\Sigma p$  由定子铜耗  $p_{cu1}$ 、转子铜耗  $p_{cu2}$ 、定子铁耗  $p_{Fe}$ 、机械损耗  $p_{mec}$  及杂散损耗  $p_{ad}$  等部分组成。异步电动机轻载时, 输出功率减小, 转子铜耗  $p_{cu2}$  会随之减小。但由于电压不变, 铁耗  $p_{Fe}$ 、机械损耗  $p_{mec}$ 、杂散损耗  $p_{ad}$  基本不变。异步电动机的效率是指它的输出功率  $p_2$  和输入的有功功率  $p_1$  之比, 而输出功率  $P_2$  等于输入功率  $p_1$  减去总损耗  $\Sigma p$ , 即:

$$\eta = \frac{P_1 - p_{Cu1} - p_{Cu2} - p_{Fe} - p_{mec} - p_{ad}}{P_1} \times 100\% \quad (1)$$

异步电动机的功率因数是指输入的有功功率和输入的视在功率之比, 即:  $\cos \varphi = P_1 / \sqrt{3}U_1 I_1$  (2)

$U_1$  为异步电动机定子相电压,  $I_1$  为定子相电流。由于励磁电流维持不变, 定子电流有功分量大大减小,

① 基金项目:安徽省教育厅自然科学基金(2005KJ004ZD)

收稿时间:2010-12-11;收到修改稿时间:2011-01-20

定子铜耗  $p_{cu1}$  降低得很少, 电动机效率和功率因数下降。如果在轻载时适当降低定子端电压, 定子端励磁电流减小, 定子铜耗  $p_{cu1}$  降低, 铁损耗  $p_{Fe}$  也随之减小, 从而降低总损耗, 根据式 (1) 和 (2) 可知达到了提高电动机的效率和功率因数的目的<sup>[2]</sup>。异步电动机降压运行时, 节省的有功功率为:

$$\Sigma p = \beta^2 \times (1 - 1/K_u^2) \times [(1/\eta_N - 1) P_N - P_0] + K \times (1 - K_u^2) \times P_N \times (1/\eta_N - 1) \quad (3)$$

其中计算系数  $K = (P_0 - P_{mec}) / \Sigma p$ ,  $\beta$  为负载率,  $K_u$  为调压系数, 异步电动机输入的总功率<sup>[3]</sup>:

$$P_1 = P_2 + \beta^2 [(1/\eta_N - 1) P_N - P_0] + P_0 \quad (4)$$

其中  $\eta_N$  为额定效率,  $P_N$  为额定功率,  $P_0$  为空载损耗, 结合  $P_0 = K_0 P_N$ , 节电率为:

$$Y_m = \frac{\Sigma p}{P_1} = \frac{\Sigma p}{P_2 + \beta^2 p} \quad (5)$$

$$= \frac{(1 - 1/K_u^2) \beta^2 [(1/h_N - 1) - K_0] + K(1 - K_u^2) \times (1/h_N - 1)}{\beta + \beta^2 [(1/h_N - 1) - K_0] + K_0}$$

## 2 基于R8CL38的模型参考自适应节能控制系统

自适应调压节能的工作过程: 事先按照最优控制参考模型计算出对应  $\beta$  的  $K_u$  和最优控制模型输出的功率因数  $\cos \varphi_m$ 。当参考输入  $(\beta, K_u)$  作用于异步电动机和最优控制参考模型的入口时, 异步电动机内部参数的不确定会使异步电动机的功率因数  $\cos \varphi$  和  $\cos \varphi_m$  产生自偏差信号  $e(t)$ , 当  $e(t)$  进入自适应调整回路后, 在自适应律的作用下, 产生适当的反馈控制量  $\Delta K_u$ , 经过 R8CL38 进行调整后直接改变电动机的定子端输入电压  $U'$ , 使异步电动机的输出响应  $\cos \varphi$  与  $\cos \varphi_m$  接近, 直到  $\cos \varphi = \cos \varphi_m$ , 最后当  $e(t) = 0$  时, 自适应调整过程结束, 异步电动机稳定工作。

采用 Y132M-4 型异步电动机, 可用飞升曲线法求得等效的数学模型。不加变频器时, 接入 380V 的交流电压, 根据飞升曲线可求出其传递函数为:

$$G_{p1(s)} = \frac{1}{Ts + 1}, T \text{ 为时间常数} \quad (6)$$

式 (6) 的时域响应为:  $y(t) = 1 - e^{-t/T}$   $t \rightarrow \infty$  时,  $y(t) \rightarrow 1$ ,  $y(t)|_{t=T} = 0.6321$ 。Y132M-4 型异步电动机转速稳定后的电压稳态值为 2.33V,  $2.33 \times 0.6321 = 1.47$ , 1.47 对应横坐标  $T = 0.3647s$ , 因此式 (6) 可写为:

$$G_{p1(s)} = \frac{1}{0.3647s + 1} \quad (7)$$

变频器可等效成一个积分环节, 根据国家变频器使用手册, 选用  $T = 6.5s$ , 变频器的近似数学模型为:

$$G_{p2(s)} = \frac{1}{6.5s} \quad (8)$$

结合式 (7) 和 (8), 可知异步电动机等效数学模型的开环传递函数为:

$$G_{p(s)} = \frac{1}{6.5s(0.3647s + 1)} \quad (9)$$

本次自适应控制不需要超调, 异步电动机的输出电压约为输入电压的 3 倍, 因此增益  $K = 3$ , 得到异步电动机参考模型的二阶闭环传递函数为<sup>[4]</sup>:

$$G_{m(s)} = \frac{1.2655}{s^2 + 2.7420s + 1.2655} \quad (10)$$

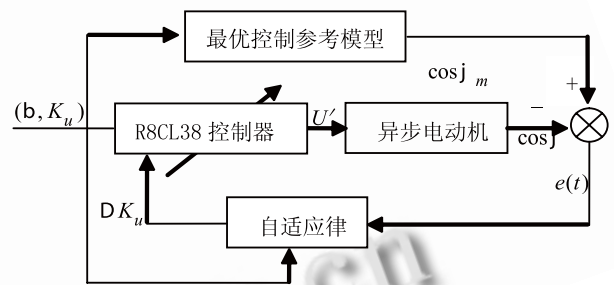


图 1 基于模型参考自适应控制的异步电机调压节能系统框图

图 1 为基于模型参考自适应控制的异步电动机调压节能系统框图<sup>[5]</sup>, 主要由单片机 R8CL38、最优控制参考模型、自适应律、异步电动机等组成, 其中 R8CL38 为 32 位单片机, 自带数据存储器 and A/D 转换电路,  $U'$  为异步电动机定子端输入电压, 是通过检测电压电流的过零时间来完成的, 如图 2 所示。电压过零检测把输入电压转换成同相位的矩形波, 送入 R8CL38 的串行接口 UART0, 此矩形波的下降沿既是触发脉冲的基准信号, 又可作为 R8CL38 软件定时器的开始信号。电流过零检测把电流信号由互感器处理后转换成矩形波, 送入单片机的串行接口 UART1, R8CL38 根据记录的电压和电流过零时间得到功率因数角  $\varphi$ 。

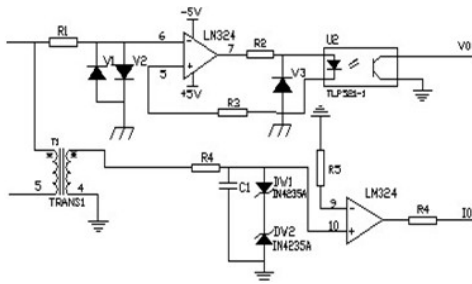


图2 功率因数角检测电路

### 3 基于最优控制的模型参考自适应控制方法

异步电动机调压节能即使可变量耗  $\int_{t_1}^{t_2} (\sum p) dt$  最小。在总损耗中，定子铁耗和机械损耗基本不变，因此可以只考虑定子铜耗和转子铜耗变化的影响，根据变分法和拉格朗日方程<sup>[6]</sup>，即有：

$$\frac{\partial P_r}{\partial K_u} - \frac{d}{dt} \frac{\partial P_r}{\partial K_u} = 0, \text{ 其中 } P_r = p_{Cu1} + p_{Cu2} \quad (11)$$

异步电动机的的基本关系式<sup>[6]</sup>：

$$\left\{ \begin{aligned} \sin \phi_2 &= 1 / \sqrt{\frac{2K_m K_u^2}{\beta} \left[ \frac{K_m K_u^2}{\beta} + \sqrt{\left( \frac{K_m K_u^2}{\beta} \right)^2 - 1} \right]} \\ a &= \frac{\beta}{K_u} \sqrt{\frac{K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}}{K_m K_u^2 + \sqrt{(K_m K_u^2)^2 - \beta^2}}} \\ b &= \sqrt{1 - K_0^2 \left[ 1 - \frac{1}{2K_m (K_m + \sqrt{K_m^2 - 1})} \right]} \frac{K_0}{2K_m (K_m + \sqrt{K_m^2 - 1})} \quad (12) \\ \frac{I_1}{I_N} &= \sqrt{\frac{2K_0 K_u + ab \sin \phi_2}{3 - K_u} + (ab \cos \phi_2)^2} \\ \sum p &= p_{Cu1} + p_{Cu2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_N^2 \left( \frac{I_1}{I_N} R_1 + \frac{I_2}{I_N} R_2 \right) \end{aligned} \right.$$

其中，将式(12)代入(11)中可得异步电动机的最佳调压函数方程为：

$$\begin{aligned} & 4(1+R_1) K_0 \frac{2K_u(3-K_u) + 2K_u^2}{(3-K_u)^3} + \\ & \frac{4bR_1 K_0 \beta^2 \sqrt{(K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}) / (2K_m)}}{K_u(3-K_u)[K_m K_u^2 + \sqrt{(K_m K_u^2)^2 - \beta^2}]} \times \\ & \left[ \frac{4K_u - 9}{2K_m K_u} - \frac{K_u(3-K_u)}{K_m K_u^2 + \sqrt{(K_m K_u^2)^2 - m^2}} \right] \quad (13) \\ & - \frac{b^2 \beta^2 (R_1 + R_2)(K_m + \sqrt{K_m^2 - 1})}{K_m K_u^2 + \sqrt{(K_m K_u^2)^2 - m^2}} \times \\ & \left[ 2K_m K_u + \frac{2K_m^2 K_u^3}{\sqrt{(K_m K_u^2)^2 - m^2}} \right] = 0 \end{aligned}$$

其中  $R_1$  为定子电阻； $R_2$  为转子电阻； $K_m$  为过载系数， $K_0$  为空载电流系数。异步电动机的数学模型是确定的，若将环境中的不确定因素转化为系统模型中的不确定因素，使其数学模型受到部分不稳定参数的影响，便能将异步电动机调压节能控制系统等效成一个确定的控制系统。由于异步电动机工作时其工作参数是随着负载的变化而变化的，方程(13)计算出的  $K_u$  理论值不一定能使异步电动机工作在最佳工作状态下，进一步可以采用模型参考自适应控制方法。

参照异步电动机的最优控制分析方法，其功率因数、负载率和调压系数符合线性模型的特征要求，其线性关系可等效为：

$$\cos \varphi = \gamma_0 + \gamma_1 \cdot \beta + \gamma_2 \cdot K_u, \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2 \text{ 为最小二乘系数} \quad (14)$$

查看国家电机手册，Y132M-4型电机的部分参数如表1所示。 $\beta$ 取经验值  $0.1 \leq \beta \leq 0.29$ ，使用 Matlab 解超越方程(13)，计算出对应的  $K_u$  和最优控制之前异步电动机的功率因数  $\cos \varphi_1$ ，如表2所示，计算精度为 0.001。

表1 Y132M-4型三相异步电动机部分参数

额定功率 $P_N$	额定电压 $U_N$	额定电流 $I_N$	空载电流系数 $K_0$
7.5KW	220V	15A	0.038
额定效率 $\eta_N$	过载电流系数 $K_m$	定子阻值 $R_1$	转子阻值 $R_2$
0.885	2.2	0.687	0.199

表2 异步电动机最优控制下的部分计算结果

$\beta$	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14
$K_u$	0.5044	0.5353	0.5654	0.5945	0.6231
$\cos \varphi_1$	0.3125	0.3357	0.3614	0.3835	0.3976
$\beta$	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19
$K_u$	0.6508	0.6775	0.7037	0.7384	0.7540
$\cos \varphi_1$	0.4172	0.4339	0.4510	0.4708	0.4911
$\beta$	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24
$K_u$	0.7784	0.8018	0.8248	0.8471	0.8686
$\cos \varphi_1$	0.5086	0.5233	0.5366	0.5478	0.5607
$\beta$	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29
$K_u$	0.8899	0.9104	0.9303	0.9499	0.9690
$\cos \varphi_1$	0.5713	0.5801	0.5922	0.6008	0.6117

根据表2和式(14)，利用回归系数的最小二乘参数估计法，有： $\gamma_0 = 1.0493$ ， $\gamma_1 = 0.4714$ ， $\gamma_2 = -0.4954$  从而有  $\cos \varphi = 1.0493 + 0.4714 \cdot \beta - 0.4954 \cdot K_u$  (15)

根据式(14),前后两次自适应调压的偏差信号为:

$$e(t) = \cos \varphi' - \cos \varphi = (\gamma_0 + \gamma_1 \beta' + \gamma_2 K_u') - (\gamma_0 + \gamma_1 \beta + \gamma_2 K_u) \quad (16)$$

$$= \gamma_1 \cdot \Delta \beta + \gamma_2 \cdot \Delta K_u$$

其中  $\cos \varphi'$ 、 $\beta'$ 、 $K_u'$  为上次调压对应的功率因数、负载率和调压系数,将  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  代入式(16),得到:

$$\begin{cases} \Delta K_u = \frac{e(t) - \gamma_1 \cdot \Delta \beta}{\gamma_2} = 0.9516 \cdot \Delta \beta - 2.0186 \cdot e(t), \Delta \beta \neq 0 \\ \Delta K_u = \frac{e(t)}{\gamma_2} = -2.0186 \cdot e(t), \Delta \beta = 0 \end{cases} \quad (17)$$

R8CL38 是实现系统自适应性的关键,在进入自适应调整前,系统先根据最优控制参考模型计算出来的参数将异步电动机输入电压调整到  $(K_u \cdot U_N)$  附近,随后异步电动机受到外界负载率变化的干扰时,产生  $e(t)$  进入到自适应反馈回路中, R8CL38 控制器根据式(17)重新计算电压  $U'$ ,同时 R8CL38 检测到的功率因数角也随之变化,由式(1)可知效率逐步改善,由式(5)得到的节电率  $Y_m$  亦各不相同,整个过程无须设置异步电动机的任何内部参数。

#### 4 仿真及其结果分析

分析异步电动机数学模型,在 Matlab / simulink 环境中建立异步电动机基于模型参考自适应控制的仿真模型<sup>[7]</sup>,如图 3 所示。仿真时设定最优控制参考模型出的功率因数  $\cos \varphi_m = 0.85$ ,信号发生器产生的信号幅值和频率可调,变换  $K_u$  的值可控制调压律的大小。根据表 1 中设置好仿真图中各参数,自适应调节的范围是在  $(K_u \cdot U_N)$  附近的小范围内波动,只需进行少数几次的自适应调整就能将异步电动机的定子端电压调整到最终的稳定运行点,此时  $e(t) = 0$ ,异步电动机的负载利用率最高。调压前后异步电动机的功率因数与负载率的变化关系如图 4,调压后根据式(6)和图 4 的结果可计算出节能率如图 5。图 6 和图 7 为异步电动机  $\beta = 0.23$  时调压前后定子相的电压、电流波形。

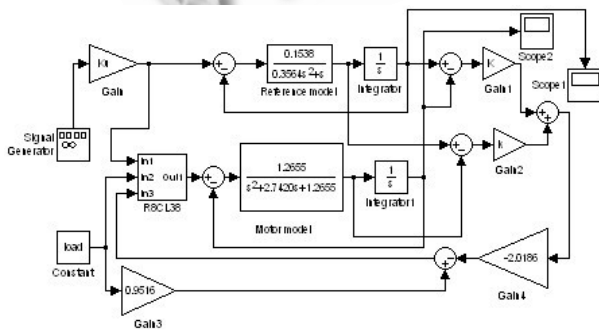


图 3 异步电动机基于模型参考自适应控制的调压仿真模型

从表 2 的数据可知,负载率越低,最佳调压系数就越低。从图 4、图 5、图 6 和图 7 可以得知:

1) 从图 4 可以看出,调压前,负载越轻,功率因数越低,从而异步电动机的效率越低,在轻载或空载的情况下,异步电动机的效率都低于 60%,损耗很大。使用调压节能后,异步电机的定子电流励磁部分相应的下降,转子电流上升,损耗降低,功率因数大幅度提高,况且负载率越低,功率因数越大;多次调整后能使电动机的功率因数与控制目标  $\cos \varphi_m$  保持一致;

2) 从图 5 可以看出,负载率越低,损耗越小,节能效果越明显,当  $\beta = 0.10$  时,根据式(5)和图 4 的仿真结果可得到最大节电率  $Y_m = 0.5111$ 。但当  $\beta \geq 0.26$  以后,调压节电效果不很明显;

3) 对比图 6 和图 7,在失真允许的范围内,可以看出调压后定子相的电压、电流的幅值均减小,电压超前电流的角度缩小,功率因数较调压前增大,与图 4 中的结论吻合,改善了异步电动机的效率和功率因数。

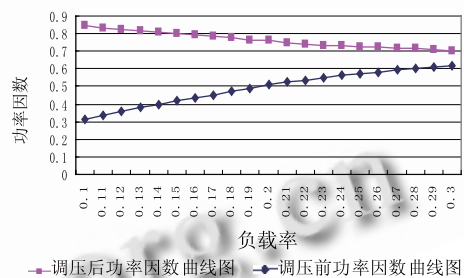


图 4 不同负载率下异步电动机调压前后的功率因数

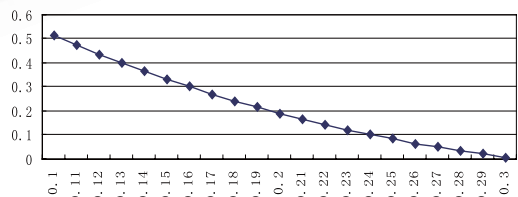


图 5 异步电动机不同负载率下的节能率

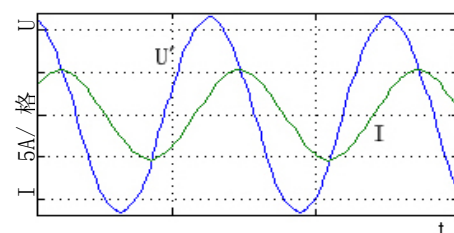


图 6 异步电动机调压前的电压电流波形

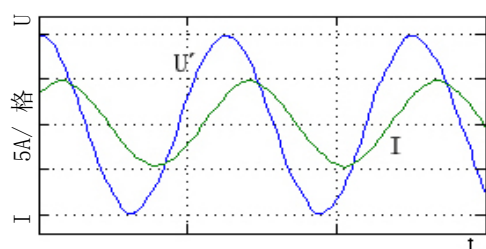


图7 异步电动机调压后的电压电流波形

与其它节能方式相比,基于R8CL38的模型参考自适应节能控制方式有如下优势:

1) 与电容器无功补偿节能的方法相比,R8CL38控制器内含滤波器和谐波抑制电路,能避免谐波放大和谐振,缩小谐波的影响,装备不会因为过度变形的波形而受损,设备利用率和使用周期更长;对于负载不断变化的电机,模型参考自适应控制方法与采用自动投切的电容器组补偿相比,不容易产生过度补偿和过电压的现象,节约成本,提高可靠性。

2) 与变频调速节能相比,基于R8CL38的模型参考自适应节能技术自适应性更强,动态性能较好,调整周期相对更短。变频器在搜索最佳工作点时,需要结合交流异步电动机的参数来进行,这种工作方式对电动机的适应性比较差,其搜索周期通常都大于10秒,有时可达十几分钟。况且如果负载频繁波动,变频调速系统就很难达到稳定状态,其动态性能比较差。突加负载时,还可能因为电压来不及增加到必要的值而堵转。变频调速节能运行方法主要适用于负载转矩较恒定的场合,而本文中提出的方法适应面比较广。

3) 同时,R8CL38节能控制器的成本远低于变频器调速和优化电机机构,资金回收周期比较短。

## 5 结论

该节能保护系统以R8CL38单片机为核心,采用

模型参考自适应控制方法,通过计算不同负载率下的调压系数,得到调压的大致范围,自适应调节过程中以功率因数为控制对象,经过多次调节将异步电动机的定子电压调整到最终的稳定运行点,以达到降压节能的目的。该系统可动态调整电机的供电电压,可使电机运行在最佳经济情况下,特别在轻载情况下节电效果显著,最大节电率可达到51.11%,具有比较客观的经济效益。

## 参考文献

- 1 崔学深,罗应立,杨玉磊,郭艳辉,王昊,刘晓芳.周期性变工况条件下异步电机节能机理及节能途径.中国电机工程学报,2008,28(18):90-96.
- 2 周腊吾,范瑞祥,黄守道.双馈同步电机的功率流分析和效率优化.湖南大学学报,2003,30(2):59-63.
- 3 周新朝.应用相控电动机节电器的节电率计算.电气时代,2006,1(1):94-96.
- 4 Li RH, Zhao JF, Hu B, Xu GQ. Adaptive inverse control of permanent magnet synchronous motor drive in a MICRO-ELECTRIC vehicle. Proc. of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Baoding, Chinese, 2009. 1909-1914.
- 5 Szabat K. Direct and Indirect Adaptive Control of a Two-Mass Drive System—a Comparison. IEEE. Trans. on Computers, 2008,44(1):564-569.
- 6 林少华,易仕敏,孙云莲.自适应控制下不均匀负荷三相异步电动机调压节能研究.机电工程,2004,21(3):34-38.
- 7 Xu GK, Song P, Zhao XC. Research on discrete model reference adaptive control system of electric vehicle. SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Bexco, Busan, Korea, 2006. 2430-2433.