

太阳能电池填充因子随日照强度变化的理论分析与计算

丁金磊¹, 程晓舫¹, 翟载腾¹, 查 1, 茆美琴²

(1. 中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230027;

2. 合肥工业大学教育部光伏系统工程研究中心, 合肥 230009)

[摘要] 根据太阳能电池直流模型和最大功率点数学条件, 推出短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压以及填充因子随日照强度变化的数学关系式; 并选取2个电池分别计算出在不同日照强度下上述电池参数随日照强度的变化率。验证了短路电流和最大功率点电流是近似跟日照强度成正比, 开路电压和最大功率点电压是近似跟日照强度的自然对数成正比。并提出了填充因子随日照强度的变化关系不具有简单的函数形式, 而对不同的太阳能电池其变化关系也迥异。最后用 Multisim 的模拟结果检验了理论分析计算的正确性。

[关键词] 太阳能电池; 日照强度; 输出特性; 填充因子

[中图分类号] TM914.4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742 (2007) 06-0082-06

引言

填充因子是指太阳能电池最大功率与开路电压与短路电流乘积的比值, 是评价太阳能电池输出特性的一个重要参数。它的值越高, 表明太阳能电池的输出特性越趋近于矩形, 光电转换效率越高。目前的研究已证实, 影响太阳能电池输出特性的内部因素中, 串、并联电阻对填充因子的影响最大: 串联电阻越大, 并联电阻越小, 填充因子则随之变小^[1]。而外部因素中对太阳能电池输出特性影响最大的莫过于日照强度。填充因子随日照强度的变化目前还未有清晰的表述。另外, 在工程实际中, 已经注意到日照强度对太阳能电池输出特性的影响: 短路电流和最大功率点电流是跟日照强度成正比, 开路电压和最大功率点电压则跟日照强度的自然对数成正比^[2~4]。这种变化是否可以在数学上给出一个明确的证明, 并以此为基础来研究填充因子随日照强度的变化关系?

作者从太阳能电池直流模型的电流方程出发, 结合最大功率点的数学表述, 为日照强度对太阳能电池

短路电流、开路电压、最大功率点电流、电压的影响做出详细的数学描述, 并研究了填充因子随日照强度的变化特性。

1 理论

太阳能电池直流模型的电流方程表述如下 (实际等效电路如图 1a. 所示):

$$I = m\phi - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

通常太阳能电池的并联电阻 R_{sh} 很大, 使 $\frac{V + IR_s}{R_{sh}}$ 项远远小于其输出电流, 该项可以忽略 (近似等效电路如图 1b. 所示)^[5], 式 (1) 变为

$$I = m\phi - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} \quad (2)$$

其电压方程为

$$V = \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{m\phi - I + I_0}{I_0} \right] - IR_s \quad (3)$$

功率方程为

[收稿日期] 2006-08-108

[基金项目] 教育部光伏系统工程研究中心开放基金资助项目

[作者简介] 丁金磊 (1980-), 男, 安徽庐江县人, 中国科学技术大学热科学和能源工程系博士研究生

$$P = \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{m\phi - I}{I_0} + 1 \right] - I^2 R_s \quad (4)$$

填充因子的定义为,

$$F_F = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (5)$$

要知晓填充因子随日照强度 ϕ 的变化, 则将式 (4) 对 ϕ 求一阶偏导

$$\frac{\partial F_F}{\partial \phi} = \frac{1}{(I_{sc} V_{oc})^2} \left[\begin{array}{l} I_{sc} V_{oc} \left[V_m \frac{\partial I_m}{\partial \phi} + I_m \frac{\partial V_m}{\partial \phi} \right] - \\ I_m V_m \left[V_{oc} \frac{\partial I_{sc}}{\partial \phi} + I_{sc} \frac{\partial V_{oc}}{\partial \phi} \right] \end{array} \right] \quad (6)$$

而要得到式 (6) 则必须先得到 $\frac{\partial I_{sc}}{\partial \phi}$, $\frac{\partial V_{oc}}{\partial \phi}$, $\frac{\partial I_m}{\partial \phi}$ 和 $\frac{\partial V_m}{\partial \phi}$ 的表达式。下面就依次推导短路电流、开路电压和最大功率点电流、电压随日照强度的变化关系式。

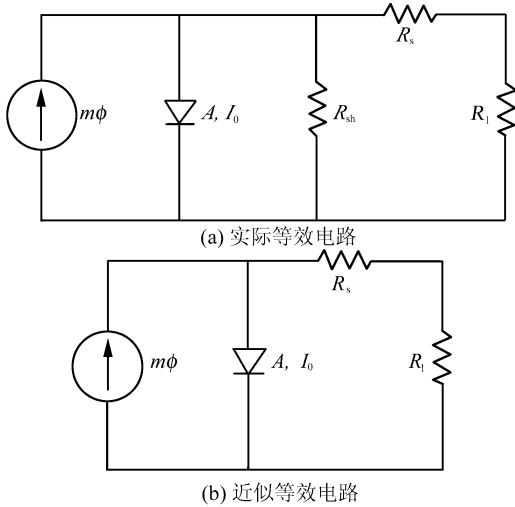


图 1 太阳能电池等效电路
Fig.1 Solar cell equivalent circuit

短路电流由式 (2) 在 $V=0$ 的条件下得到

$$I_{sc} = m\phi - I_0 \left[\exp \left[\frac{qI_{sc} R_s}{AkT} \right] - 1 \right] \quad (7)$$

它对 ϕ 的一阶偏导数为

$$\frac{\partial F_F}{\partial \phi} = \frac{qV_m AkTm(m\phi + I_0) + I_m AkTm [R_s q(m\phi + I_0 - 2I_m) + AkT]}{qI_{sc} V_{oc} [2R_s q(m\phi - I_m + I_0)^2 + AkT(2m\phi - I_m + 2I_0)]} - \frac{mAkTV_{oc} I_m V_m}{(I_{sc} V_{oc})^2 \left[AkT + I_0 qR_s \exp \left[\frac{qI_{sc} R_s}{AkT} \right] \right]} - \frac{AkTmI_{sc} I_m V_m}{q(m\phi + I_0)(I_{sc} V_{oc})^2} \quad (16)$$

为了解日照强度对短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压以及填充因子的影响, 分别根据

$$\frac{\partial I_{sc}}{\partial \phi} = \frac{mAkT}{AkT + I_0 qR_s \exp \left[\frac{qI_{sc} R_s}{AkT} \right]} \quad (8)$$

开路电压由式 (3) 在 $I=0$ 的条件下得到

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{m\phi}{I_0} + 1 \right] \quad (9)$$

它对 ϕ 的一阶偏导数为

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial \phi} = \frac{AkTm}{q(m\phi + I_0)} \quad (10)$$

当太阳电池工作在最大功率点时,

$$\left. \frac{\partial P}{\partial I} \right|_{I=I_m} = 0 \quad (11)$$

把式 (4) 代入式 (11) 中可得,

$$\frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{m\phi - I_m + I_0}{I_0} \right] - \frac{AkTI_m}{q(m\phi - I_m + I_0)} - 2I_m R_s = 0 \quad (12)$$

将式 (12) 对 ϕ 求一阶偏导数, 可获得最大功率点电流随日照强度的变化关系式

$$\frac{\partial I_m}{\partial \phi} = \frac{AkTm(m\phi + I_0)}{2R_s q(m\phi - I_m + I_0)^2 + AkT(2m\phi - I_m + 2I_0)} \quad (13)$$

注意到式 (3) 的形式并代入式 (12) 得

$$V_m - \frac{AkTI_m}{q(m\phi - I_m + I_0)} - I_m R_s = 0 \quad (14)$$

将式 (14) 再对 ϕ 求一阶偏导数, 并将式 (13) 代入化简后, 可获得最大功率点电压随日照强度的变化关系式

$$\frac{\partial V_m}{\partial \phi} = \frac{AkTm [R_s q(m\phi + I_0 - 2I_m) + AkT]}{q [2R_s q(m\phi - I_m + I_0)^2 + AkT(2m\phi - I_m + 2I_0)]} \quad (15)$$

将式 (8), 式 (10), 式 (13) 和式 (15) 代入式 (6), 即可得到填充因子随日照强度的变化关系式

太阳电池直流模型中各参数所具有的数量级 (如表 1 所示), 对式 (8), 式 (10), 式 (13), 式 (15)

和式(16)进行分析。

表1 太阳能电池直流模型参数所具有的数量级

Table 1 Order of solar cell DC model parameters

参数	$m\phi$	I_{sc}	V_{oc}	V_m	I_m	$m\phi - I_m$	I_0	A	R_s	T
数量级	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-7}	10^0	10^{-2}	10^2

式(8)左端的分母项中, $AkT \gg I_0 qR_s \exp\left[\frac{qI_{sc}R_s}{AkT}\right]$, 因此 $I_0 qR_s \exp\left[\frac{qI_{sc}R_s}{AkT}\right]$ 可以忽略, 式(8)可简化为

$$\frac{\partial I_{sc}}{\partial \phi} \approx m \quad (17)$$

该式表明短路电流和日照强度近似成正比, $I_{sc} \propto \phi$ 。

式(10)左端分母项中 $m\phi \gg I_0$, 因此 I_0 可忽略, 式(10)可简化为

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial \phi} \approx \frac{AkT}{q\phi} \quad (18)$$

该式表明开路电压和日照强度的自然对数近似成正比, $V_{oc} \propto \ln \phi$ 。

式(13)左端分母项中, $AkT(2m\phi - I_m + 2I_0) \gg 2R_s q(m\phi - I_m + I_0)^2$, 因此 $2R_s q(m\phi - I_m + I_0)^2$ 可忽略; 而 $m\phi$ 与 I_m 同量级, 且远大于 I_0 , 故 $2m\phi - I_m + 2I_0 \approx m\phi$ 。分子项中同样有 $m\phi \gg I_0$, 故 I_0 可忽略, 式(13)可简化为

$$\frac{\partial I_m}{\partial \phi} \approx m \quad (19)$$

该式表明最大功率点电流也和日照强度近似成正比, $I_m \propto \phi$ 。

式(15)左端分母项采取和式(13)左端分母项相同的近似后简化为 $qAkTm\phi$; 分子项中有 $AkT \gg R_s q(m\phi + I_0 - 2I_m)$, 故 $R_s q(m\phi + I_0 - 2I_m)$ 可忽略, 式(15)可简化为

$$\frac{\partial V_m}{\partial \phi} \approx \frac{AkT}{q\phi} \quad (20)$$

该式表明最大功率点电压也和日照强度的自然对数近似成正比, $V_m \propto \ln \phi$ 。

将式(17), 式(18), 式(19)和式(20)代入式(6)中可得填充因子随日照强度变化关系的近似简化式,

$$\frac{\partial F_F}{\partial \phi} \approx \frac{1}{(I_{sc} V_{oc})^2} \left[\begin{array}{l} I_{sc} V_{oc} \left[V_m m + I_m \frac{AkT}{q\phi} \right] - \\ I_m V_m \left[V_{oc} m + I_{sc} \frac{AkT}{q\phi} \right] \end{array} \right] \quad (21)$$

由于 I_{sc} 和 I_m , V_{oc} 和 V_m 具有相同的数量级, 不可将它们约去, 因此式(21)不可再进一步简化。从式(21)可以看出, 填充因子随日照强度的变化不象 I_{sc} , V_{oc} , I_m 和 V_m 随日照强度那样成简单的数学关系, 而可能随太阳能电池参数的不同而有所差异。

2 计算及实验模拟

接下来以 Phang 等^[6]和 Charles 等^[7]研究过的2个太阳能电池为例(其模型参数列于表2), 计算日照强度对太阳能电池输出特性的影响。

先用式(6), 式(8), 式(12)和式(14)分别计算出不同日照强度下, 短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压的大小, 再分别代入式(7), 式(9), 式(13), 式(15)和式(16)中计算出短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压以及填充因子在不同日照强度下随日照强度的变化率列于表3。

从表3中可以看出, 短路电流和最大功率点电流随日照强度的变化率近似等于 m , 开路电压、最大功率点电压随日照强度的变化率则近似等于 $\frac{AkT}{q\phi}$, 而填充因子随日照强度的变化则无简单的线性关系。

表2 太阳能电池电性参数

Table 2 Device model parameters of a plastic solar cell

序号	$m/m^2 \cdot V^{-1}$	$I_0/\mu A$	A	$R_s/m\Omega$	T/K
太阳能电池1	0.1023×10^{-3}	0.1036	1.5017	68.26	300
太阳能电池2	0.5610×10^{-3}	5.514	1.7168	77.69	307

表 3 太阳电池 I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m 和 F_F 受日照强度的影响

Table 3 Influence of insolation to I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m and F_F

序号	$\phi/w \cdot m^2$	$\frac{\partial I_{sc}}{\partial \phi} / m^2 \cdot V^{-1}$	$\frac{\partial V_{oc}}{\partial \phi} / m^2 \cdot A^{-1}$	$\frac{\partial I_m}{\partial \phi} / m^2 \cdot V^{-1}$	$\frac{\partial V_m}{\partial \phi} / m^2 \cdot A^{-1}$	$\frac{\partial F_F}{\partial \phi} / m^2 \cdot A^{-1}$	$\frac{AkT}{q\phi} / m^2 \cdot A^{-1}$
太阳电池 1	1 000	1.02×10^{-4}	3.89×10^{-5}	9.42×10^{-5}	3.04×10^{-5}	1.80×10^{-6}	3.89×10^{-5}
	800	1.02×10^{-4}	4.86×10^{-5}	9.42×10^{-5}	3.94×10^{-5}	5.06×10^{-6}	4.86×10^{-5}
	600	1.02×10^{-4}	6.48×10^{-5}	9.41×10^{-5}	5.42×10^{-5}	1.07×10^{-5}	6.48×10^{-5}
	400	1.02×10^{-4}	9.71×10^{-5}	9.39×10^{-5}	8.39×10^{-5}	2.26×10^{-5}	9.71×10^{-5}
	200	1.02×10^{-4}	1.94×10^{-4}	9.36×10^{-5}	1.72×10^{-4}	6.13×10^{-5}	1.94×10^{-4}
太阳电池 2	1 000	5.61×10^{-4}	4.55×10^{-5}	4.92×10^{-4}	1.05×10^{-5}	-4.51×10^{-5}	4.55×10^{-5}
	800	5.61×10^{-4}	5.68×10^{-5}	4.95×10^{-4}	2.04×10^{-5}	-4.19×10^{-5}	5.68×10^{-5}
	600	5.61×10^{-4}	7.58×10^{-5}	4.97×10^{-4}	3.73×10^{-5}	-3.57×10^{-5}	7.58×10^{-5}
	400	5.61×10^{-4}	1.14×10^{-4}	4.99×10^{-4}	7.12×10^{-5}	-2.16×10^{-5}	1.14×10^{-4}
	200	5.61×10^{-4}	2.27×10^{-4}	4.99×10^{-4}	1.72×10^{-4}	2.79×10^{-5}	2.27×10^{-4}

为了验证上述计算的准确性，再用 Multisim 分别模拟出这两个太阳电池短路电流、开路电压、最

大功率点电流、电压以及填充因子随日照强度的变化，(见图 2)。

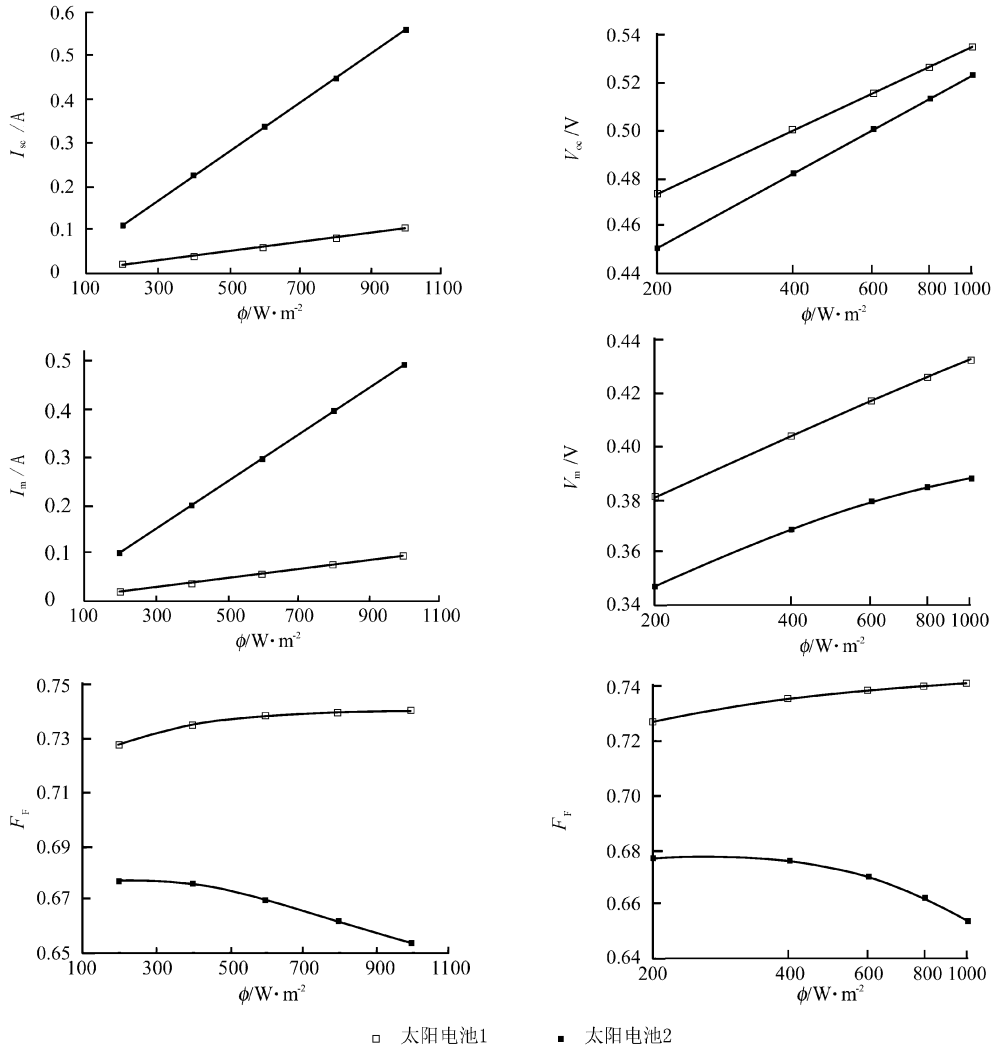


图 2 日照强度对 I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m 和 F_F 的影响

Fig.2 Influence of insolation to I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m and F_F

Multisim 是 Electronics Workbench 发布的一套交互式电子电路多功能模拟测试仿真软件, 是一套完整的系统设计工具, 其强大功能包含元器件编辑、电路图绘制、电路工作状况测试、电路特性分析, 为业界最成功的一款模拟软件。运用它可以方便地设置太阳能电池的性能参数, 构建太阳能电池测试模拟电路。

从图 2 的模拟结果可以看出, 对于太阳能电池 1 和 2, 它们的短路电流和最大功率电流都近似跟日照强度成正比, 开路电压和最大功率点电压则都跟日照强度的自然对数近似成正比, 而填充因子则由于太阳能电池参数的差异而不随日照强度成一致性变化。也即是说, 填充因子和日照强度不具有简单的函数关系。实验模拟结果与理论分析计算相吻合。

3 结论

基于太阳能电池直流模型和最大功率点数学条件, 推导出短路电流、开路电压、最大功率点电流、电压以及填充因子随日照强度变化的关系式。选取 2 个电池分别计算出它们随日照强度的变化率。验证了短路电流和最大功率点电流是跟日照强度成正比, 开路电压和最大功率点电压是跟日照强度的自然对数成正比, 而填充因子则不随日照强度成简单的函数关系。Multisim 的模拟结果也证明了理论分析计算的正确性。

符号表:

A : 二极管理想因子

I : 电流, A

V : 电压, V

m : 光电转换系数, m^2/V

ϕ : 日照强度, W/m^2

F_f : 太阳能电池填充因子

k : 玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} J/K$

q : 电子电荷常数, $1.6 \times 10^{-19} C$

P : 功率, W

R : 电阻, Ω

T : 温度, K

下标:

s: 太阳能电池串联内阻标识

sh: 太阳能电池并联内阻标识

0: p-n 结反向饱和电流

m: 输出最大功率时电路参量标识

oc: 太阳能电池开路标识

sc: 太阳能电池短路标识

参考文献

- [1] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 35~40
- [2] 京特·莱纳, 汉斯·卡尔. 太阳能的光伏利用[M]. 余世杰, 何慧若译. 合肥: 合肥工业大学, 1991. 17~20
- [3] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 31
- [4] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 30~40
- [5] Singh V N, Singh R P. A method for the measurement of solar cell series resistance [J]. J Phys D, 1983, 16: 1823~1825
- [6] Phang J C H, Chan D S H, Philips J R. Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters [J]. Electronics Letters, 1984, 20: 406~408
- [7] Charles J P, Abdelkrim M, Muoy Y H, Mialha P. A practical method of analysis of the current-voltage characteristics of solar cells [J]. Solar Cells, 1981, 4: 169~178

Theoretical analysis and calculation for filling factor of solar cell varying along with illumination intensity

Ding Jinlei¹, Cheng Xiaofang¹, Zhai Zaiteng¹, Zha Jun¹, Mao Meiqin²

(1. Department of Thermal Science and Energy Engineering of University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Research Center for Photovoltaic System Engineering Ministry of Education, Hefei Industry Technology University, Hefei 230009, China)

[Abstract] Based on the solar cell DC model and the mathematic expression of maximum power point, the equations describing short circuit current, open circuit voltage, maximum power current, voltage and filling

factor varying along with the illumination intensity are deduced and calculated with two real solar cells data. The fact that short circuit current and maximum power current are proportional to the illumination intensity, and open circuit voltage and maximum power voltage are proportional to the natural logarithm of illumination intensity is certified. The relation of filling factor varying along with the illumination intensity is not a simple functional expression and effected by the solar cell model parameters is present. A simulated experiment is established to valid the theoretic analysis and calculating by Multisim.

[**Key words**] solar cell; illumination intensity; output characteristics; filling factor

(cont. from p.81)

[3] Shen Z, Andrews J G, Evans B L. Optimal power allocation in multiuser OFDM systems [A]. Proc IEEE Global Communications Conference [C]. San Francisco CA, 2003. 337~341

allocations for OFDM systems in a fading channel [J]. IEEE Globecom, 2003, (2): 858~862

[5] 杨大成, 等编著. 移动传播环境[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003

[4] Jiho J, Lee K B, Lee Y H. Transmit power and bit

A Study on Resource Fairness Scheduling Algorithms for the OFDMA Systems

Zhang Dongmei¹, Xu Youyun^{1,2}, Cai Yueming¹

(1. *Institute of Communications Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China;*

2. *Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*)

[**Abstract**] The paper studied the radio resource fairness scheduling for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Multiple Access (OFDMA) systems which was supporting several different services. After deeply analyzing a classical resource scheduling algorithm, which maximize the worst user's capacity, an improved algorithm which can evidently enhance the fairness performance was proposed. Simulation results show that the improved algorithm can keep a better fairness performance under different application environment, and can more strictly guarantee the required data rate for different service.

[**Key words**] OFDMA; radio resource scheduling; sub-carrier allocation; power allocation