

发光二极管结温测量的经验模型研究

苗洪利 周晓光 周长友 任浩然 田庆震

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 基于发光二极管(LED)结温的正向电压测量法,建立以结温与正向电压及电流组成的联合多项式作为经验模型。该模型克服了传统正向电压法的局限性和繁琐性,可适用指定类型 LED 在任意散热环境下的在线结温测量。在由电压、电流为变量组成的二次多项式六参数模型基础上,分别进行了各种组合形式的最小二乘拟合并对模型计算值进行标准差评判,最终确定一种四参数模型为最优经验模型。对确定的模型进行了基于实测数据的有效性分析,结果表明:结温的模型计算值与实测值拟合良好。在已确定模型的前提下,存在误差的主要原因是采样数据间隔太大且不均匀导致拟合残差增大。可提高采样数据密度和剔除不良数据进行重复拟合以提高模型的有效性。

关键词 光学器件;半导体照明;经验模型;LED 结温;正向电压法;最小二乘法

中图分类号 TN312.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100313

Study on Empirical Model in Junction-Temperature Measurement of LED

Miao Hongli Zhou Xiaoguang Zhou Changyou Ren Haoran Tian Qingzhen

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract An empirical model of joint polynomial, with respect to direct voltage-current and junction temperature, based on direct voltage measuring method, is presented. The empirical model is applicable in on-line measurement of junction temperature of light emitting diode (LED) for appointed type in any heat dissipation environment, and the limitation and complication of conventional direct voltage measuring method is modified. On the basis of six-parameter empirical models consisting of variables of voltage-current, every parameter combination is respectively applied to the least squares fitting and the standard deviation criterion. Eventually, the result indicates that four-parameter model is an optimum empirical model. Validity analysis based on the actually measured value demonstrates that the actual values fit well with the calculated values. Under the premise of the defined model, the error is produced by the large intervals and uneven characteristics of data. Improved empirical model is carried out by enhancing the density of sampled data, relinquishing the bad data, and duplicated fitting.

Key words optical devices; solid-state lighting; empirical model; junction temperature of LED; direct voltage method; least square method

OCIS codes 230.2090; 120.6780; 330.7326

1 引 言

发光二极管(LED)结温是指 p-n 结的温度,但通常由于器件芯片具有很小的尺寸,常把 LED 芯片的温度定义为结温。功率型 LED 的性能受结温的影响极大,直接影响其发光效率、显色指数、色温、主波长、色坐标及使用寿命^[1~4]。由于 LED 封装器件体积小、内部结构复杂,难以用温度计直接准确测量其内部温度分布^[5]。如何快速、精确地测量在工作条件下

的 LED 结温在理论和实际应用中都有重要意义。

国内外检测结温的方法大多是红外热像法、电学参数法、光热阻扫描法、光功率法及微电偶接触法等^[6~10]。红外热像法通过测量器件工作时芯片上表面红外辐射的二维温度分布,只能测量未封装的器件。其中比较简便的方法有管脚温度法,蓝白比法和正向电压法^[11]。正向电压法是利用 LED 电运输的温度效应,通过测量恒定工作电流下的正向电

收稿日期: 2011-04-22; 收到修改稿日期: 2011-05-03

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2010DM009)资助课题。

作者简介: 苗洪利(1964—),男,硕士,副教授,主要从事半导体照明方面的研究。E-mail: oumhl@ouc.edu.cn

压来确定结温,正向电压愈小结温愈高且两者基本呈线性关系。正向电压法被认为是目前较精确的结温测试方法。该方法选取 10 mA 以下的脉冲小电流作为定标电流,通过测定标电流下 LED 各温度场的瞬间开启电压并与温度拟合,得到电压温度系数 K 和拟合方程^[12,13]。任意工作电流下该类型 LED 结温的测量,则需将工作电流瞬间转换成定标小电流并测量两端电压,将其代入拟合方程即可得到工作电流下的结温,该方法会由于电路切换而带来测量误差。当然,可以在工作电流下拟合出温度电压线性方程,再利用此方程测该电流下的结温。显然,实现快速实时测量,上述方法不可行。

根据肖克莱二极管伏安特性的理论模型^[14],结温与电压、电流均存在一定关系。但从理论公式计算结温十分困难,因为公式中的多个系数无法获得。因此,本文以正向电压法为基础,寻求结温与工作电流和工作电压的联合函数关系,建立经验数学模型,以解决在任意电流下指定类型 LED 结温的在线快速、准确测量。

2 实验设计与数据采集

2.1 实验系统及测量方法

在测量电压温度系数 K 时,采用小电流是因为只有在几毫安的脉冲电流下才基本没有加热效应。通电后正向电压基本稳定,用普通电压表即可测得。本文采用自行编制的基于 LabVIEW 的快速数据采集系统 (DAQ)^[15],可用毫秒级的采样周期完成电压的测量。即使在大电流下通电后正向电压随结温升高会急速下降,但快速采集系统可以捕捉到瞬间开启电压。

精选 4 只伏安特性基本一致的某公司生产的大功率白光 LED 作为测试样品,将 4 只 LED 串联接入恒流源电路,并将 LED 置入温度可调的恒温箱中,实验系统如图 1 所示。

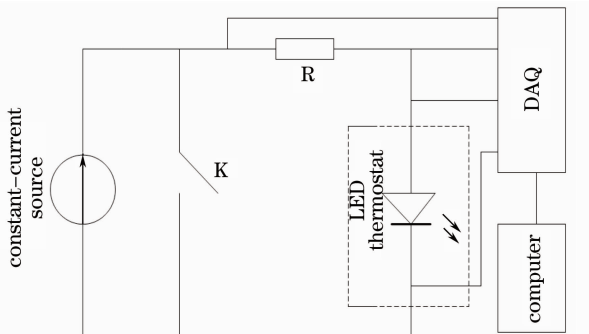


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

为避免开关的冲击电流影响,采用常闭式开关。测到 4 只 LED 串联总电压后再平均,能够减小测量误差。

2.2 数据采集

1) 将待测样品置于恒温箱中,分别设定测试温度为:从 20 °C~100 °C 间隔 10 °C。每次切换温度都需要恒温 10 min,使得 p-n 结内外温度平衡。这时,可视恒温箱环境温度为 p-n 结通电前的初始温度 T_0 。该温度应从置于恒温箱中的独立温度计精确读数,不采用恒温箱前面板设定温度值。

2) 调节恒流源电流输出为:从 10, 20, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300 和 350 mA, 共 10 档。

3) 对应固定电流下的每一个初始温度 T_0 , 启动数据采集系统,设置采样周期为 1 ms。在接通恒流源瞬间采集正向初始电压 V_0 。

以 350 mA、在室温下采集电压波形示例(图 2),图中峰值电压即为 4 只 LED 在恒流源开启瞬间的正向初始电压,平均后即可得到单只 LED 的 V_0 。对于该类型 LED 进行了 3 组独立的测量,根据逐点测试数据绘出结温与电压关系,图 3 是其中 1 组的测试结果。

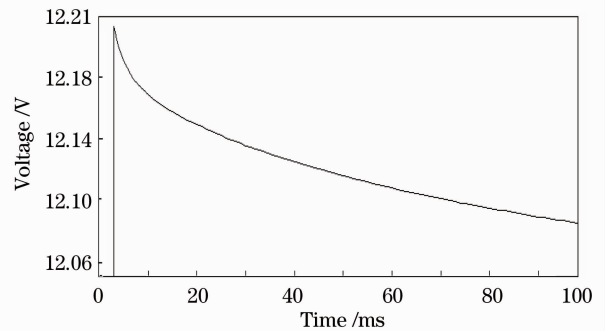


图 2 LabVIEW 系统采集电压信号

Fig. 2 Sampling of the voltage signal by LabVIEW system

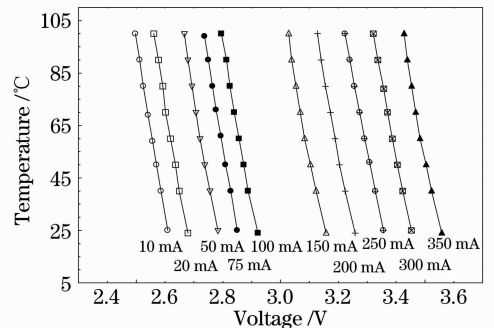


图 3 结温与电压关系曲线

Fig. 3 Relation curve of junction temperature and voltage

从图 2 看出,由于采样周期设定为毫秒级,故可在接通电源的瞬间,从采集信号波形上能快速准确地测出对应此时结温(与环境温度视为相同)的电压值。由图 3 实测数据得到,在不同电流下的结温与正向电压呈负线性关系,其中斜率就是在该电流下的电压温度系数 K 的倒数,截距的值与初始状态有关。在理论上,电压温度系数与电流有关,但在毫安级影响很小,实测结果也说明了这一点。对应 200 mA 工作电流的线性拟合关系式如为

$$T = -586V + 1931, \quad (1)$$

该式可适用在 200 mA 电流下稳定平衡状态时结温的测定。即测得工作稳定时的正向电压值,代入(1)式即得结温值。显然,每一个电流都各自对应一个线性关系式,尽管斜率基本接近,但由于电流不同导致初始状态不同,而不能形成一个适用任意电流的通用表达式。

如果要测量任意电流下结温,需要采用小电流快速切换法。把 LED 从工作电流状态迅速切换到已知温度电压关系式的小电流(如 10 mA)下测量瞬间电压。由于热惯性效应,在快速切换过程后,小电流下瞬间测得的电压对应的结温可视为刚脱离大电流时的结温。这种方法虽然正确,但在实际测量中十分繁琐,并不实用。因而,本文建立了多参数模型。

3 模型建立及分析

3.1 建模依据

在数学上,任何复杂函数都可以化作简单函数的组合,即用幂级数(也称泰勒级数)的部分和近似代替这个复杂函数。理论和实验均表明,结温是电压和电流的复杂函数,将结温模型设定为电压和电流以及这两个变量的各种组合形成的泰勒展开式,并将展开式限制在二次,可得

$$T = a_1 + a_2V + a_3I + a_4V^2 + a_5I^2 + a_6IV, \quad (2)$$

式中 T 为结温, V 为正向电压, I 为工作电流。 $a_1 \sim a_6$ 为各项系数,在本研究中称为参数。

在多项式最小二乘拟合中,结温可以用如下形式表示为

$$T = \sum_{i=1}^p a_i X_i + \epsilon, \quad (3)$$

式中 ϵ 为拟合残差, a_i 为与结温 T 有关的 X_i 变量的参数, X_i 为电流、电压或者它们的任意组合。根据实测的温度、电压、电流值可拟合出参数 a_i , 即

$$\hat{a} = (X^T X)^{-1} X^T T. \quad (4)$$

确定了参数就完成了模型的建立。但经验模型并不唯一,二次展开的六参数完整形式并不一定是最优组合。需要分析拟合残差进行最优模型的筛选。

3.2 优选模型

对于(2)式,保留常数项 a_1 。由于电流、电压对结温的联合影响,(2)式的组合从三个参数起,可以得到 10 个三参数模型,10 个四参数模型,5 个五参数模型,1 个六参数模型,共计 4 组 26 种形式,如表 1 所示。表中“√”号表示在二次多项式(2)中参数项的选择。

对各组合形式分别按照(4)式进行最小二乘拟合,并根据拟合残差求实测结温值与模型计算值间标准差 S 。标准差表示了计算值和实测值的偏离程度,其值越小则说明计算值和实测值越贴近,拟合效果越好。再对 3 组同类型 LED 测试结果分别拟合发现, S 的总体变化趋势一致,说明建模依据的测试数据具有可重复性,其中 1 组的计算结果如表 1 所示。

从表 1 可以清楚地看到:在三参数组合中,只有包含 a_1, a_2, a_3 项的组合,标准差较小,得到该组中最好的经验模型。即经验模型中需要保留常数项和电流、电压的一次项。理论与实测结果都曾看到结温与电流、电压存在线性关系。在四参数组合和五参数组合中,在包含以上 3 项的组合中标准差 S 都是更小的,说明必须在包含 a_1, a_2, a_3 项组合的基础上增加二次项,而二次项恰好表达的是功率项。从理论上讲,结温由热量决定,而热量又直接与 I^2, V^2, IV 组成的功率项密切相关。

四参数组合中,追加任意一个二次项,效果都有明显改善,加第五项 I^2 后标准差最小。五参数组合中,在前三参数基础上,每加两项二次项效果趋好。但与四参数最优组合相比,没有明显差异。而六参数完整组合中,虽然标准差略小一些,同样无明显改善,说明变化趋于稳定。当然,从理论上讲,展开式的次数越高,结果越接近真实。从包含三次项的若干组合的拟合结果看,普遍偏好一些,但都没有显著改善。

参数越多,运算量越大。以经验模型的参数最少、效果最佳原则,可认为最优经验模型为

$$T = a_1 + a_2V + a_3I + a_5I^2, \quad (5)$$

表 1 各种参数组合的标准差 S

Table 1 Standard deviation S among various parameter combinations

Parameter combination	Number	$T=a_1$	$+a_2V$	$+a_3I$	$+a_4V^2$	$+a_5I^2$	$+a_6IV$	S
Three-parameter	1	✓	✓	✓				17.93
	2	✓	✓		✓			23.80
	3	✓	✓			✓		22.79
	4	✓	✓				✓	20.70
	5	✓		✓	✓			22.85
	6	✓		✓		✓		23.98
	7	✓		✓			✓	23.09
	8	✓			✓	✓		22.55
	9	✓			✓	✓	✓	19.42
	10	✓				✓	✓	23.91
Four-parameter	11	✓	✓	✓	✓			13.04
	12	✓	✓	✓		✓		10.81
	13	✓	✓	✓			✓	11.37
	14	✓	✓		✓	✓		19.13
	15	✓	✓	✓	✓		✓	14.28
	16	✓	✓	✓		✓	✓	11.91
	17	✓		✓	✓	✓		11.17
	18	✓		✓	✓		✓	11.81
	19	✓		✓		✓	✓	17.03
	20	✓			✓	✓	✓	11.09
Five-parameter	21	✓	✓	✓	✓	✓		10.81
	22	✓	✓	✓	✓		✓	10.42
	23	✓	✓	✓		✓	✓	10.81
	24	✓	✓		✓	✓	✓	11.05
	25	✓		✓	✓	✓	✓	10.97
Six-parameter	26	✓	✓	✓	✓	✓	✓	10.02

参数值如下： $a_1 = 1291.71$ ； $a_2 = -487.53$ ； $a_3 = 1981.42$ ； $a_5 = -1856.95$ ， V 为正向电压， I 为工作电流。

(5)式可适用该测试类型单只 LED 或多只组成灯具在工作电流许可范围内的任意环境温度和散热条件下的在线结温测量。对于不同厂商、不同类型 LED 的结温模型确定，需要重新采集数据。以拟合后的标准差为依据，只需按表 1 中 11, 12, 13, 21,

22, 23, 26 七种模型组合中优选即可。

3.3 模型有效性分析

以实测数据作为模型有效性的检验依据。计算选定的四参数最优模型在各电流段的标准差 S，如表 2 所示。选取 10 mA 和 350 mA 段电流的结温实测值与模型计算值比较，如图 4 所示，同时绘制电流、电压及温度三维图，如图 5 所示。

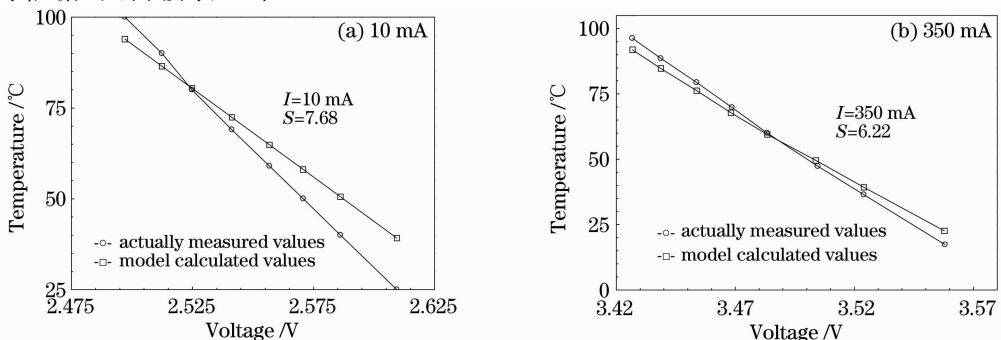


图 4 结温实测值与模型计算值比较

Fig. 4 Comparison of actually measured values and model calculated values of junction temperature

表2 电流分段结温实测值与模型计算值标准差

Table 2 Standard deviation between actually measured values with piecewise current method and model calculated values of junction temperature

Current /mA	Standard deviation S
10	7.68
20	10.44
50	6.97
75	8.43
100	17.72
150	20.29
200	5.32
250	6.11
300	7.19
350	6.22
Full	10.81

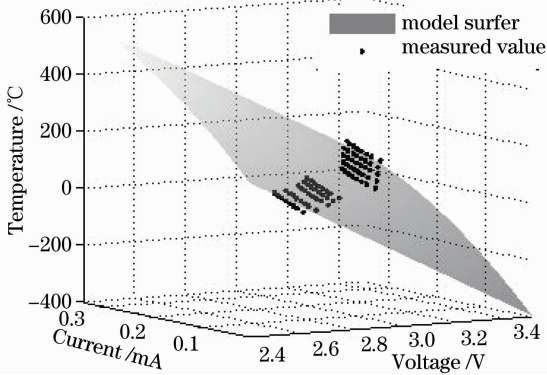


图5 结温实测值在模型计算值面的分布三维图

Fig. 5 Three-dimensional distribution figure of actually measured values of junction temperature in model calculated values surface

从表2可看出,各电流段的标准差不同,说明模型的拟合效果并不均匀,总体偏差较大。这个结果与采样数据密度有关,本模型的电流、温度采样间隔均较大且不均匀是重要原因。即使采样数据不够精细,但在各参数个数及最佳模型的选定上是可靠的,足够精细的采样数据只会使4个模型参数值更加准确,使总体标准差更小。

表2中100 mA和150 mA的标准差出现异常(17.72和20.29),可能与采样间隔大且不均匀有关(图3)。在采样电流密度增大的情况下,可将部分异常数据剔除后再重新拟合。

从图4可看到10 mA和350 mA两段的结温拟合情况。由于350 mA段比10 mA段的标准差小,故拟合的效果明显要好。同时还看出,尽管存在误差,但变化趋势稳定,属于系统误差,通过改善模型参数值,可以提高模型准确度。

从图5三维图看到,10个电流段的全部实测结温值(图中散点)基本分布在模型计算值面的附近。说明总体拟合具有良好的效果。

4 结 论

基于正向电压法,建立LED结温与正向工作电压、工作电流的联合多项式的模型。在六个参数模型的基础上,对26种参数组合通过拟合后标准差进行分析筛选,确定四参数 a_1, a_2, a_3, a_5 构成的二次项模型为最优经验模型。该模型可适用于指定类型LED在各种环境下的在线结温测量。不需要获得电压温度系数,克服了传统测量方法中的局限性和繁琐性。针对该模型的计算值,进行了基于实测数据的有效性分析,结果表明:结温的模型计算值与实测值拟合度良好。存在误差的原因是采样温度和采样电流间隔太大且不够均匀。要得到更精确的经验模型,一方面提高采样数据密度,另一方面要对拟合后的电流段进行标准差检验,剔除不良数据重新拟合,降低总体标准差以提高经验模型有效性。尽管模型不能通用于所有类型LED,但建模方法和数据处理方法是普遍适用的,同时也为新类型LED的结温建模缩小了优选范围。

参 考 文 献

- 1 M. R. Krames, O. B. Shchekin, R. Mueller-Mach *et al.*. Status and future of high-power light emitting diodes for solid-state lighting[J]. *J. Display Technol.*, 2007, **3**(2): 160~175
- 2 Fei Xiang, Qian Keyuan, Luo Yi. Junction temperature measurement and luminous properties research of high-power LED[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(3): 289~292
费翔, 钱可元, 罗毅. 大功率LED结温测量及发光特性研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(3): 289~292
- 3 Chen Huanting, Lu Yijun, Chen Zhong *et al.*. Analysis of thermal spreading boards for high-power AlGaInP red LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 805~810
陈焕庭, 吕毅军, 陈忠等. 大功率AlGaInP红光LED散热基板热分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 805~810
- 4 Wu Haibin, He Sumei, Wang Changling. Experimental research on the mechanism of causing fast luminous attenuation of white lamp-LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1363~1367
吴海彬, 何素梅, 王昌铃. 导致单管型白光发光二极管快速光衰的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1363~1367
- 5 Yu Binhai, Wang Yaohao. Junction temperature and thermal resistance restrict the developing of high power LED[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2005, **26**(6): 761~766
余彬海, 王焱浩. 结温与热阻制约大功率LED发展[J]. *发光学报*, 2005, **26**(6): 761~766
- 6 Y. Xi, E. F. Schubert. Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(12): 2163~2165
- 7 Gu Yimin, N. Narendran. A non-contact method for determining junction temperature of phosphor-converted white LEDs[C]. *SPIE*, 2004, **5187**: 107~114

- 8 Wen Huaijiang, Mou Tongsheng. The measurement of LED junction temperature and thermal capacity using pulse current[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(7): 53~59
温怀疆, 牟同升. 脉冲法测量LED结温、热容的研究[J]. *光电工程*, 2010, **37**(7): 53~59
- 9 Zhang Wanlu, Li Wenyi, Chen Yuyang *et al.*. Measurement of LED junction temperature in working circuit [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2008, **19**(4): 48~51
张万路, 李文宜, 陈郁阳 等. 用大电流测量功率型白光LED结温的方法研究[J]. *照明工程*, 2008, **19**(4): 48~51
- 10 Song Haipeng, Wen Jimin, Zeng Xiongwen *et al.*. Research of pulse injection method for measuring LD chip temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 407~410
宋海鹏, 温继敏, 曾雄文 等. 测量激光器结温的脉冲注入法研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 407~410
- 11 Chen Ting, Chen Zhizhong, Lin Liang *et al.*. Methods for determining junction temperature of GaN-based white LEDs[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2006, **27**(3): 407~411
陈挺, 陈志忠, 林亮 等. GaN基白光LED的结温测量[J]. *发光学报*, 2006, **27**(3): 407~411
- 12 Li Bingqian, Bu Liangji, Gan xiongwen *et al.*. Research on the relationship of the change in forward voltage with temperature of light emitting diode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1349~1351
李炳乾, 布良基, 甘雄文 等. LED正向压降随温度的变化关系研究 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1349~1351
- 13 Zhang Haibing, Lü Yijun, Li Kaihang. Research on voltage temperature coefficient of high power light-emitting diodes[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(12): 1580~1583
张海兵, 吕毅军, 李开航 等. 功率型LED电压温度系数的研究 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(12): 1580~1583
- 14 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540
丁德强, 柯熙政. 一种通用白光LED数学发光模型研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 15 Zhou Changyou, Miao Hongli, Bai Shengmao *et al.*. Measuring junction temperature and luminous attenuation of LED based on LabVIEW [J]. *Microcomputer Information*, 2010, **26**(9): 102~103
周长友, 苗洪利, 白生茂 等. 基于LabVIEW的LED结温与光衰监测系统[J]. *微计算机信息*, 2010, **26**(9): 102~103