

基于Bezier曲线的CIGS薄膜光伏电池*I-V*曲线简单拟合方法

师楠¹, 朱显辉², 苏勋文²

(1. 黑龙江科技大学 工程训练与基础实验中心, 黑龙江 哈尔滨 150022;

2. 黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要:精准的光伏电池输出数学模型是研究光伏系统的必要条件,然而由于厂家提供的数据有限,铜铟镓硒(CIGS)薄膜光伏电池的输出数学模型是包含若干未知参数的非线性特性曲线。因此提出仅利用厂家提供的有限数据,对CIGS薄膜光伏电池的电流-电压输出特性曲线,即*I-V*曲线进行拟合。首先利用Bezier曲线选取函数控制点,对CIGS薄膜光伏电池的*I-V*曲线进行拟合;然后找出Bezier曲线控制点位置与CIGS薄膜光伏电池的填充因子之间的函数关系;最后,利用4种新型CIGS薄膜光伏电池对该函数关系进行验证,并对结果进行了对比分析。分析结果表明,所提方法对4种CIGS薄膜光伏电池的*I-V*曲线的拟合方法的平均相对误差均小于0.8%,验证了所提方法的有效性。

关键词:CIGS薄膜光伏电池;*I-V*特性;Bezier曲线;控制点;函数关系

中图分类号:TM 914.4

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108005

0 引言

薄膜光伏电池和传统的硅基电池相比,具有节省材料、理论效率高和便于安装等优点,因此备受重视,被称为第2代光伏电池技术,其正在成为当前光伏电池产业的主要发展方向之一^[1-2]。

目前铜铟镓硒(CIGS)薄膜光伏电池是薄膜光伏电池中效率最高的模块之一。据不完全统计,截至2019年5月,凯盛科技和神华等企业的CIGS商业化模块的光电转换效率约为16%,汉能集团的CIGS模块的实验室光电转换效率已达到了22.9%^[1]。CIGS模块的商业化进程正处于起步阶段,虽然目前市场份额不多,但发展迅猛。

CIGS等薄膜光伏电池从生产材料到制备工艺等均与硅基电池有较大的差异,该差异导致CIGS模块的电流-电压输出特性与硅基光伏模块不同^[3-4]。鉴于CIGS薄膜光伏电池的电流-电压输出特性曲线(即*I-V*曲线)是进行光伏最大功率点跟踪、故障检测和经济效益评估的必要前提,对其进行研究具有重要的理论和现实意义^[5]。

在CIGS模块商业化进程的起始阶段,CIGS模块*I-V*曲线的建模问题得到了重点关注。例如文献[6]利用现场实测的方式给出了CIGS模块的*I-V*曲线的特点;文献[7-8]分别分析了老化和阴影对CIGS模块输出特性的作用效果;文献[9]讨论了温度对CIGS模块输出特性的影响规律;文献[10]提出了一种利用四参数超越方程描述CIGS模块输出特性的方法,文献[11]利用简化超越方程求解CIGS模块的*I-V*曲线,并尝试利用最大功率点对精度进行校验,但文献[10-11]采用的迭代等数值求解方法需要大量的仿真时间;文献[12]通过大量实测数据探讨了双二极管模型中二极管的扩散电流和复合电流随辐照度的变化规律,文献[13]提出了一种无需实验,仅利用厂商给定数据的差分进化算法计算双二极管模型的7个未知参数,文献[12-13]重点是对CIGS模块的超越方程的未知参数进行求解,并未给出对应的*I-V*曲线,因此无法直接应用于最大功率点跟踪等工程实践中。

为解决上述问题,本文利用Bezier曲线优良的数据拟合能力,提出一种利用2条二阶Bezier曲线直接拟合CIGS薄膜光伏电池的*I-V*曲线的简单方法,并以通过弦截法迭代求解的数值结果为基准,将拟合结果和文献[10]的建模结果进行了对比分析,验证了所提方法的准确性。和已有的CIGS薄膜光伏电池建模方法相比,本文所提方法无需任何实验测试数据,也无需对超越方程的参数进行迭代等数值求解,仅利用厂商数据即可直接给出CIGS薄膜光伏电池的*I-V*曲线,计算简单、耗时较短,且精度较高。

收稿日期:2020-08-31;**修回日期:**2021-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677057);黑龙江省省属高校基本科研业务费项目(2019-KYYWF-0730);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2017144)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677057), the Fundamental Research Funds for the Universities in Heilongjiang Province(2019-KYYWF-0730) and the University Nursing Program for Young Scholars with Creative Talents in Heilongjiang Province(UNPYSCT-2017144)

1 基于Bezier曲线的光伏电池建模方法

文献[14]提出了利用Bezier曲线拟合光伏电池 I - V 曲线的方法,本节对其进行简要说明。

1.1 采用2条Bezier曲线拟合 I - V 曲线的基本思路

Bezier曲线拟合的基本思路是利用一条光滑曲线逼近预先确定的空间数据点位置,由伯恩斯坦基函数构造的Bezier曲线表达式 $\varphi(x, y)$ 如式(1)所示。

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=0}^m \varphi_i(x_i, y_i) \frac{m!}{(m-i)!i!} t^i (1-t)^{m-i} \quad (1)$$

$$B_{i,m}(t) = \frac{m!}{(m-i)!i!} t^i (1-t)^{m-i} \quad (2)$$

式中: m 为Bezier曲线的阶数; $\varphi_i(x_i, y_i)$ 为Bezier曲线中的控制点; $0 \leq t \leq 1$; $B_{i,m}(t)$ 为伯恩斯坦基函数。

给定式(1)中的控制点 $\varphi_i(x_i, y_i)$, t 取 $[0, 1]$ 范围内的任一数值都可以得到1个 $\varphi_i(x_i, y_i)$, 遍历 $[0, 1]$ 范围内的 t 值后,即可得到Bezier曲线的轨迹。

由Bezier曲线的端点性质可知,当 $t=0$ 和 $t=1$ 时, $B_{i,m}(t)=1$, 则式(1)满足:

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \varphi_0(x_0, y_0) & t=0 \\ \varphi_m(x_m, y_m) & t=1 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)表明Bezier曲线通过且仅通过第1、 $m+1$ 个控制点,即Bezier曲线通过其起点和终点。

为了保证Bezier曲线通过CIGS薄膜光伏电池的短路电流点、最大功率点和开路电压点,以一条Bezier曲线拟合CIGS薄膜光伏电池的 I - V 曲线的最大功率点左侧的输出特性,并将短路电流点和最大功率点作为本条Bezier曲线的起点和终点;以另一条Bezier曲线拟合 I - V 曲线的最大功率点右侧的输出特性,并将最大功率点和开路电压点作为该条Bezier曲线的起点和终点,以得到较好的拟合效果。

1.2 Bezier曲线控制点的讨论

进一步分析式(1)可知,Bezier曲线的阶数 m 越大,控制点的数量和曲线的计算就越复杂。考虑到一阶Bezier曲线为一条直线,无法满足要求,为保证计算的简单性,本文采用二阶Bezier曲线对CIGS薄膜光伏电池 I - V 曲线进行拟合。

2条Bezier曲线相交于最大功率点,保证2条曲线在交点处的平滑过渡,对CIGS薄膜光伏电池的最大功率点跟踪和性能评估至关重要。为此,本文所提方法构造经过最大功率点,且与经过开路电压点和短路电流点的直线平行的直线,在该直线上寻找Bezier曲线控制点。通过在所构造的直线上选取2条二阶Bezier曲线的控制点,使2条Bezier曲线在交点处的一阶导数均为0,满足一次导数相等的条件,确保了2条Bezier曲线的平滑过渡。

为了进一步明确Bezier曲线的控制点对曲线的影响规律,给出基于不同控制点得到的二阶Bezier

曲线如图1所示。图中, L 为连接开路电压点 $K_U(V_{oc}, 0)$ 和短路电流点 $K_I(0, I_{sc})$ 的直线, V_{oc} 、 I_{sc} 分别为开路电压点的电压值、短路电流点的电流值; L_p 为经过最大功率点 $K_p(V_m, I_m)$ 的直线,且 L_p 与 L 平行, V_m 、 I_m 分别为最大功率点对应的电压、电流值; L_G 为假定的实际光伏 I - V 曲线。以最大功率点 K_p 右侧曲线为例,分别以最大功率点 $K_p(V_m, I_m)$ 和开路电压点 $K_U(V_{oc}, 0)$ 作为二阶Bezier曲线的起点和终点,选取 L_p 上的 C_1 和 C_2 作为控制点时,可分别得到Bezier曲线 L_{C_1} 和 L_{C_2} 。由图1可见,控制点与最大功率点 $K_p(V_m, I_m)$ 的距离越小,所得Bezier曲线的凹特性越显著,否则凸特性就越显著;最大功率点左侧的Bezier曲线的拟合效果和右侧类似,此处不再赘述。

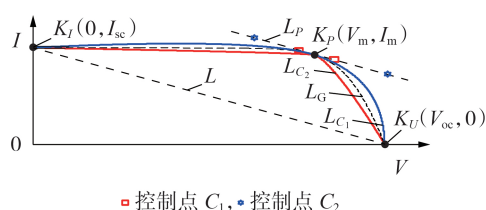


图1 基于不同控制点得到的Bezier曲线

Fig.1 Bezier curves based on different control points

由上述分析可知,通过选择适当的控制点可以找到能够较好地拟合CIGS薄膜光伏电池的 I - V 曲线的Bezier曲线,从而精确刻画CIGS薄膜光伏电池的输出特性。

2 定端点弦截迭代求解的参考基准

为了讨论Bezier曲线对CIGS薄膜光伏电池 I - V 曲线的拟合效果,需给出误差分析的参考基准。文献[15]已经考察了以迭代求解的数值结果作为误差分析基准的可行性。本节基于五参数超越方程,同样利用迭代法求解CIGS薄膜光伏电池的 I - V 曲线,并将迭代求解的数值结果作为分析Bezier曲线拟合误差的基准。

若要求解CIGS薄膜光伏电池 I - V 曲线的数值解,则需要已知超越方程的5个未知参数,但厂商数据手册并未给出这5个未知参数的值^[16]。为此,首先利用定端点弦截迭代算法对超越方程的5个未知参数进行求解。忽略影响较小的常数项后,CIGS薄膜光伏电池的超越方程形式如式(4)所示。

$$I = I_{ph} - I_0 e^{\frac{V + IR_s}{N_s V_t}} - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (4)$$

$$V_t = \frac{KTA}{q} \quad (5)$$

式中: I_{ph} 为光生电流; I_0 为二极管暗电流; N_s 为串联电池数; R_s 为二极管串联电阻; R_p 为二极管并联电阻; V_t 为PN结热电压; K 为Boltzmann常数; T 为二极

管结温(单位为 K); A 为二极管品质因子; q 为电子电量。

为求解式(4)中的 I_{ph} 、 I_0 、 R_s 、 R_p 和 A ,将厂商数据手册给定的短路电流点 $K_I(0, I_{sc})$ 和开路电压点 $K_U(V_{oc}, 0)$ 代入式(4)可得:

$$I_{ph} = I_0 e^{\frac{V_{oc}}{N_s V_t}} + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (6)$$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 e^{\frac{I_{sc} R_s}{N_s V_t}} - \frac{I_{sc} R_s}{R_p} \quad (7)$$

将式(6)代入式(4)可得:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{N_s V_t}} - e^{\frac{V + IR_s}{N_s V_t}} \right) + \frac{V_{oc} - V - IR_s}{R_p} \quad (8)$$

将式(6)代入式(7),鉴于 $I_{sc} R_s \ll V_{oc}$,忽略 R_s 可得:

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_p} \right) / e^{\frac{V_{oc}}{N_s V_t}} \quad (9)$$

将最大功率点 $K_P(V_m, I_m)$ 代入式(4)可得:

$$I_m = I_{ph} - I_0 e^{\frac{V_m + I_m R_s}{N_s V_t}} - \frac{V_m + I_m R_s}{R_p} \quad (10)$$

将式(4)、(5)代入式(8)中,消去二极管暗电流 I_0 和光生电流 I_{ph} ,可得:

$$V_t = (V_m + I_m R_s - V_{oc}) / \left[N_s \ln \frac{(I_{sc} - I_m)(R_p + R_s) - V_m}{I_{sc}(R_p + R_s) - V_{oc}} \right] \quad (11)$$

由 $K_P(V_m, I_m)$ 处功率对电压的导数为 0 可得:

$$R_s = \left[\frac{V_{oc} - V_m + N_s V_t \ln(V_m N_s V_t - I_m N_s V_t (R_p + R_s))}{(I_{sc} R_p - V_{oc} + I_{sc} R_s)(I_m R_s - V_m)} \right] / I_m \quad (12)$$

根据短路电流点 $K_I(0, I_{sc})$ 处电流对电压的导数等于 $-1/R_p$ 可得:

$$R_p = \frac{N_s V_t (R_p + R_s) + R_s (I_{sc} R_p - V_{oc} + I_{sc} R_s) e^{(I_{sc} R_s - V_{oc})/(N_s V_t)}}{N_s V_t + (I_{sc} R_p - V_{oc} + I_{sc} R_s) e^{(I_{sc} R_s - V_{oc})/(N_s V_t)}} \quad (13)$$

基于式(6)、(9)、(11)~(13)可求解 CIGS 薄膜光伏电池的超越方程的 5 个未知参数。其中,式(11)~(13)为隐函数形式,需要以定端点弦截法进行求解。定端点弦截法是一种以牛顿迭代为基础的改进数值计算方法,其基本思路是利用 2 个确定点之间的差商代替牛顿迭代法中的一阶导数,以避免复杂的偏导数求解过程,其迭代求解通式见式(14)。

$$X(k+1) = X(k) - \frac{f(X(k))}{f(X(k)) - f(X(0))} (X(k) - X(0)) \quad (14)$$

式中: $X(k)$ 和 $X(k+1)$ 分别为第 k 次和第 $k+1$ 次迭代解, $k=1, 2, \dots$; $X(0)$ 为迭代初始值; $f(\cdot)$ 为待求解的函数。

利用定端点弦截法对 CIGS 薄膜光伏电池超越

方程参数进行迭代求解时,需要对式(11)~(13)进行适当的变换,将 V_t 、 R_s 和 R_p 代替式(14)中的 X ,即可实现 V_t 、 R_s 和 R_p 的迭代求解。以 R_s 为例,定端点弦截法需要 2 个初值,所以需要预先给定 $R_s(0)$ 和 $R_s(1)$,定端点弦截法求解流程图见附录 A 图 A1。

利用定端点弦截法对 7 种不同的 CIGS 薄膜光伏电池的超越方程进行求解,得到超越方程的 5 个未知参数的求解结果如表 1 所示。

表 1 CIGS 薄膜光伏电池的超越方程的未知参数求解结果

Table 1 Solutions of with unknown parameters for transcendental equation of CIGS thin-film photovoltaic cells

型号	R_s / Ω	R_p / Ω	A	I_0 / A	I_{ph} / A
FLEX100	0.21	91.58	1.008	2.28×10^{-5}	6.41
SS1114140K	4.09	508.64	1.928	3.34×10^{-5}	2.67
SP3S-220	1.87	279.45	1.883	5.93×10^{-5}	4.43
CdF-1000E1	2.82	891.22	1.558	0.76×10^{-5}	2.11
CIGS-3000A1	0.48	306.74	1.547	1.80×10^{-5}	6.11
CIGS-1000F	3.90	779.73	1.589	0.97×10^{-5}	2.16
SKALA140	1.77	1700.80	1.363	0.15×10^{-5}	2.51

利用表 1 可以得到参数已知的 CIGS 薄膜光伏电池的超越方程形式。值得注意的是,此时需再次利用定端点弦截法对参数已知的超越方程进行迭代求解,才能得到 CIGS 薄膜光伏电池的 I - V 曲线的数值解,并将其作为 Bezier 曲线的拟合误差分析基准。该过程与超越方程的未知参数求解过程类似,本文不再赘述。

3 Bezier 曲线控制点拟合规律

基于第 1 节中的方法,利用 Bezier 曲线对表 1 中的 CIGS 薄膜光伏电池的 I - V 曲线进行拟合,通过调节控制点的位置,得到不同精度的 I - V 曲线,从中选择精度最高的 I - V 曲线作为最佳拟合结果。以迭代计算结果为基准,分析最佳拟合结果的误差,结果如表 2 所示。表中, $e_{\max}$ 和 e_{av} 分别为拟合最大相对误差和平均相对误差。由表 2 可见,Bezier 曲线对 7 种不同的 CIGS 薄膜光伏电池的拟合最大相对误差均小于 1.8%,平均相对误差均小于 1%,达到了较高的拟合精度。

表 2 Bezier 曲线拟合误差

Table 2 Error of Bezier function fitting

型号	$e_{\max} / \%$	$e_{av} / \%$	型号	$e_{\max} / \%$	$e_{av} / \%$
FLEX100	1.09	0.91	CIGS-3000A1	1.62	0.73
SS1114140K	1.58	0.43	CIGS-1000F	1.36	0.46
SP3S-220	1.41	0.63	SKALA140	1.19	0.54
CdF-1000E1	1.73	0.72			

为探索拟合结果最佳的 Bezier 曲线的控制点分布规律,给出基于某控制点得到的 Bezier 曲线如图 2

所示。图中, $K_{IC}(V_c, I_c)$ 为控制点, (V_c, I_c) 分别为控制点的坐标; $O_1(V_o, I_o)$ 为过 $K_{IC}(V_c, I_c)$ 所作的横轴的垂线与过 $K_P(V_m, I_m)$ 所作的纵轴的垂线的交点, (V_o, I_o) 为交点的坐标。

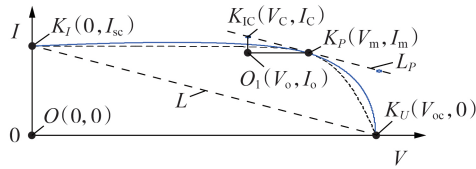


图2 基于某控制点得到的Bezier曲线

Fig.2 Bezier curves based on a control point

由第1节分析可知,Bezier曲线控制点的位置决定了曲线的凹凸程度,在图2所示情况下,控制点距离最大功率点 $K_P(V_m, I_m)$ 越远,Bezier曲线的凸特性越显著。同时,考虑到光伏电池的填充因子 F_{FF} 是能够全面表征 CIGS 薄膜光伏电池 I - V 特征的系数,满足:

$$F_{FF} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (15)$$

由图2可以看出, $\triangle K_I O K_U$ 和 $\triangle K_{IC} O_1 K_P$ 呈相似关系,因此,可按照相似三角形的性质确定Bezier曲线控制点的位置,以简化分析和计算过程。

综合分析上述因素,本文选取控制点 $K_{IC}(V_c, I_c)$ 与最大功率点 $K_P(V_m, I_m)$ 的距离 L_{ICP} 以及短路电流点 $K_I(0, I_{sc})$ 与开路电压点 $K_U(V_{oc}, 0)$ 的距离 L_{IU} 之比作为纵坐标,以 F_{FF} 作为横坐标,得到 $K_P(V_m, I_m)$ 左、右两侧曲线控制点位置与 F_{FF} 之间关系的拟合规律如图3所示。图中, λ_l 和 λ_r 分别为 $K_P(V_m, I_m)$ 左、右侧的 L_{ICP} 与 L_{IU} 之比。

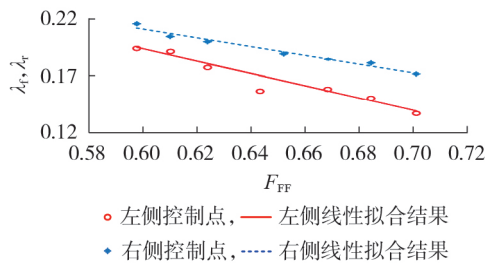


图3 7种CIGS薄膜光伏电池控制点拟合规律

Fig.3 Fitting law of control points of seven CIGS thin-film photovoltaic cells

进一步给出 λ_l 、 λ_r 与 F_{FF} 之间的拟合规律分别如式(16)、(17)所示。

$$\lambda_l = -0.5426 F_{FF} + 0.5194 \quad (16)$$

$$\lambda_r = -0.3846 F_{FF} + 0.4420 \quad (17)$$

基于式(16)、(17)可以得到最大功率点左、右侧控制点与最大功率点的距离,进而得到控制点的坐标,从而得到对应的Bezier曲线用于拟合CIGS薄膜光伏电池的 I - V 曲线。本文方法无需进行任何实验,

仅利用厂商数据手册给定的参数即可有效拟合不同厂家和型号的CIGS薄膜光伏电池的 I - V 曲线。

4 拟合规律的验证

为验证式(16)、(17)所示的拟合规律,重新选取4种不同厂家和型号的CIGS薄膜光伏电池的 I - V 曲线进行拟合,4种电池的型号、参数如表3所示。

表3 4种CIGS薄膜光伏电池的型号和参数

Table 3 Types and parameters of four CIGS thin-film photovoltaic cells

型号	I_{sc} / A	V_{oc} / V	I_m / A	V_m / V	F_{FF}
LINION 90 F	1.80	72.2	1.64	56.20	0.7092
PowerMax®4.4	2.59	80.7	2.38	6.41	1.7700
MS125GG	7.35	25.2	6.41	19.50	0.6784
CIGS130	2.10	106.0	1.77	74.00	0.5884

将本文的拟合结果与文献[10]的求解结果进行对比分析。文献[10]利用简化的四参数模型和迭代求解建立了CIGS薄膜光伏电池的输出特性曲线,具体形式如式(18)所示。

$$I = I_{sc} - I_{sc} e^{\frac{qV_{oc}}{N_s AKT}} e^{\frac{V + IR_s}{N_s AKT} - 1} \quad (18)$$

式中: R_s 和 A 的计算公式分别如式(19)和式(20)所示。

$$R_s = \frac{\frac{N_s AKT}{q} \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) + V_{oc} - V_m}{I_m} \quad (19)$$

$$A = \frac{q(2V_m - V_{oc})}{N_s KT \left(\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right)} \quad (20)$$

将厂商给定的数据代入式(18)——(20)中,可得到CIGS薄膜光伏电池 I - V 曲线的超越方程,利用MATLAB的fsolve函数进行迭代求解,即可得到文献[10]的求解结果。

基于表3中的厂商给定参数,利用式(16)、(17)分别确定2条二次Bezier曲线控制点位置,进而利用Bezier曲线实现CIGS薄膜光伏电池的 I - V 曲线拟合。将所得Bezier曲线和文献[10]的求解结果与本文第2节所得的参考基准进行对比,结果如图4所示。进一步分析图4中的Bezier曲线拟合结果和文献[10]的求解结果与参考基准的误差,结果如表4所示。

由表4可见,本文方法对4种CIGS薄膜光伏电池的 I - V 曲线的拟合最大相对误差小于2%,平均相对误差小于0.8%,均小于文献[10]对应的误差。另外,本文方法针对1000个数据点的平均计算时间为72 ms,文献[10]方法针对501个数据点的平均计算时间为20.4 s。可见,与传统方法相比,本文方法不仅精度更高,且计算过程简单、耗时更短,降低了计算成本。

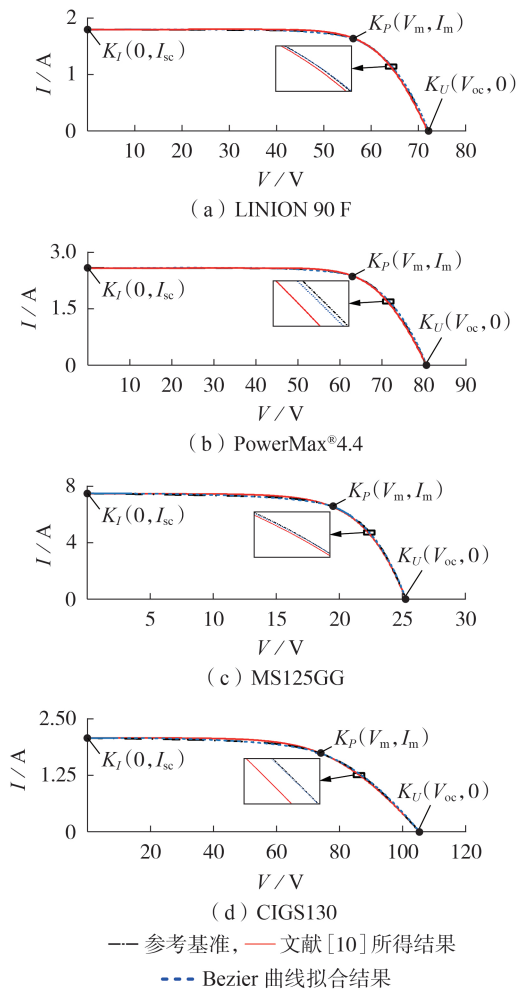


图4 4种CIGS薄膜光伏电池的拟合结果
Fig.4 Fitting results of four CIGS thin-film photovoltaic cells

表4 4种CIGS薄膜光伏电池的拟合误差
Table 4 Fitting errors of four CIGS thin-film photovoltaic cells

型号	$e_{\max} / \%$		$e_{\text{av}} / \%$	
	本文方法	文献[10]方法	本文方法	文献[10]方法
LINION 90 F	1.56	3.48	0.43	1.82
PowerMax®4.4	1.94	2.97	0.72	1.74
MS125GG	1.12	4.63	0.51	2.41
CIGS130	1.67	5.34	0.69	2.75

5 结论

本文主要利用厂商给定数据,采用Bezier曲线拟合CIGS薄膜光伏电池的*I-V*曲线并进行验证,主要贡献如下:

1)明确了利用2条二阶Bezier曲线对CIGS薄膜光伏电池的*I-V*曲线进行拟合的思路,进一步探讨了控制点位置对Bezier曲线形状特点的影响效果;

2)构建了定端点弦截迭代算法的误差分析基准,并分别实现了对CIGS薄膜光伏电池超越方程中

的未知参量和CIGS薄膜光伏电池*I-V*曲线的数值求解;

3)研究了2条二阶Bezier曲线最优控制点位置与CIGS薄膜光伏电池填充因子之间的函数关系,提出了一种CIGS薄膜光伏电池*I-V*曲线拟合方法,该方法简单准确且无需迭代等复杂数值计算,仅需厂商数据手册提供的开路电压、短路电流和最大功率点数据即可进行拟合。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汪飞,徐新蔚,吴春华. 光伏微型逆变器拓扑结构研究与分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):24-33.
WANG Fei, XU Xinwei, WU Chunhua. Research and analysis of photovoltaic micro-inverter topology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 24-33.
- [2] ZIDANE T E K, ADZMAN M R B, TAJUDDIN M F N, et al. Optimal configuration of photovoltaic power plant using grey wolf optimizer: a comparative analysis considering CdTe and c-Si PV modules[J]. Solar Energy, 2019, 188: 247-257.
- [3] STUCKELBERGER M E, NIETZOLD T, WEST B M, et al. How does CIGS performance depend on temperature at the micro-scale?[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2018, 8(1): 278-287.
- [4] BERMUDEZ V. Economical and operational issues for CIGS in the future PV panorama[J]. Solar Energy, 2017, 146: 85-93.
- [5] COYLE D J, BLAYDES H A, NORTHEY R S, et al. Life prediction for CIGS solar modules part 2: degradation kinetics, accelerated testing, and encapsulant effects[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013, 21(2): 173-186.
- [6] CAÑETE C, CARRETERO J, DE SIDRACH CARDONA M. Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions[J]. Energy, 2014, 65: 295-302.
- [7] OTT T, WALTER T, HARISKOS D, et al. Accelerated aging and contact degradation of CIGS solar cells[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 3(1): 514-519.
- [8] KHAING H H, LIANG Y, HTAY N N M, et al. Characteristics of different solar PV modules under partial shading[J]. International Journal of Energy and Power Engineering, 2014, 8(9): 1418-1422.
- [9] LUBOŃ W, PEŁKA G, MARZALEK K, et al. Performance analysis of crystalline silicon and CIGS photovoltaic modules in outdoor measurement[J]. Ecological Chemistry and Engineering S, 2017, 24(4): 539-549.
- [10] ALKAZZAR A A. Behavior of four solar PV modules with temperature variation[J]. International Journal of Renewable Energy Research, 2016, 6(3): 1091-1099.
- [11] ORIOLI A. An accurate one-diode model suited to represent the current-voltage characteristics of crystalline and thin-film photovoltaic modules[J]. Renewable Energy, 2020, 145: 725-743.
- [12] WERNER B, KOŁODENNY W, PROROK M, et al. Electrical modeling of CIGS thin-film solar cells working in natural conditions[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(9): 2583-2587.
- [13] OLANIPEKUN M U, MUNDA J L, CHEN H W, et al. Estimation of maximum power generated from CIGS photovoltaic modules under non-uniform conditions[J]. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2014, 3(3): 318-324.
- [14] 师楠,周苏荃,李一丹,等. 基于Bezier函数的光伏电池建模[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2195-2200.

SHI Nan, ZHOU Suquan, LI Yidan, et al. PV cell modeling based on Bezier function[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2195-2200.

[15] ELBASET A A, ALI H, ABD-EL SATTAR M. Novel seven-parameter model for photovoltaic modules[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 130: 442-455.

[16] 韩伟, 王宏华, 陈凌, 等. 光伏组件参数拟合及输出特性研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 100-107.

HAN Wei, WANG Honghua, CHEN Ling, et al. Research on parameter fitting and output characteristics of PV module[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 100-107.

作者简介:



师楠

师楠(1982—),女,河南南阳人,讲师,硕士,主要研究方向为新能源发电技术及电网调度(**E-mail**:snhit@sina.cn);

朱显辉(1975—),男,黑龙江海伦人,讲师,博士,主要研究方向为新能源应用技术(**E-mail**:zhu_xianhui@sina.com);

苏勋文(1976—),男,山东日照人,教授,博士,主要研究方向为新能源并网的振荡问题(**E-mail**:suxunwen@163.com)。

(编辑 任思思)

Simple fitting method for *I-V* curve of CIGS thin-film PV cell based on Bezier curve

SHI Nan¹, ZHU Xianhui², SU Xunwen²

(1. Engineering Training and Fundamental Experiment Center, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China; 2. School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: The accurate output mathematical model of PV (PhotoVoltaic) cell is a necessary condition for the study of PV system. However, due to the limited data provided by PV cell manufacturers, the output mathematical model of CIGS (Copper Indium Gallium Selenium) thin-film PV cell is a nonlinear characteristic curve with several unknown parameters. Aiming at this problem, it is proposed to fit the current-voltage output characteristic curve, i.e. *I-V* curve of the CIGS thin-film PV cell only by applying the limited data provided by manufacturers. Firstly, the function control points are selected by Bezier curve and the *I-V* curve of CIGS thin-film PV cell are fitted. Secondly, the function relationship between the position of control points of Bezier curve and the filling factor of CIGS thin-film PV cell is found out. The function relationship is verified by four new CIGS thin-film PV cells, and the verification results are compared and analyzed. The analytical results show that the average relative fitting errors of the proposed method for CIGS thin-film PV cells are less than 0.8%, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: CIGS thin-film PV cells; *I-V* characteristic; Bezier curve; control point; function relationship

附录 A

图 A1 为定端点弦截迭代流程图。图中， $K_{\max}$ 为最大迭代次数。

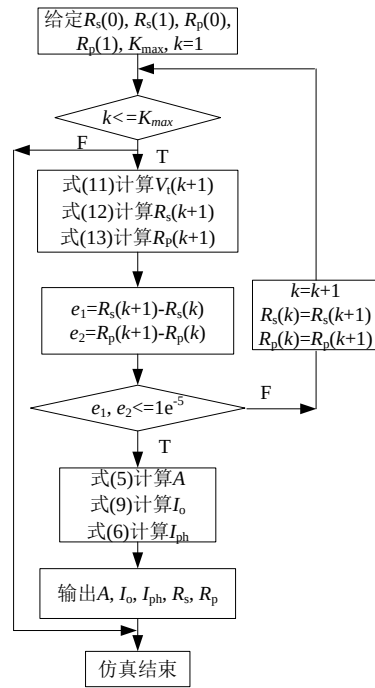


图 A1 定端点弦截迭代流程图

Fig A1 Flowchart of fixed end chord iteration