

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007218

CdTe 组件输出特性显式模型拟合规律*

师楠¹, 朱显辉²

(1. 黑龙江科技大学工程训练与基础实验中心 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学电气与控制工程学院 哈尔滨 150022)

摘要:为给出简单、准确的碲化镉(CdTe)光伏组件输出特性曲线显式模型,提出利用两条2阶Bezier函数轨迹分别拟合组件输出特性最大功率点左、右两侧曲线的思路,分析了控制点对Bezier函数的影响规律,明确了最优控制点的存在性,计算了7种不同厂家和型号CdTe组件最优控制点下的Bezier建模结果,利用相似三角形理论,找出了Bezier函数最优控制点位置与组件填充因子之间的拟合规律,建立了描述CdTe光伏组件输出特性的显式模型;最后,利用4种新CdTe组件对所提规律进行验证,并以迭代结果为基准和已有模型进行了对比分析。结果表明,基于Bezier函数的CdTe组件建模方法的平均相对误差在0.49%~1.5%之间,而现有模型的精度的平均相对误差在2.45%~9.19%之间,论证了所提模型的简单性和正确性。

关键词: CdTe 组件; 特性曲线; Bezier 函数; 控制点; 拟合规律

中图分类号: TH7 TM914.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Fitting law of CdTe module output characteristic curve based on explicit model

Shi Nan¹, Zhu Xianhui²

(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: To give a simple and accurate explicit model for the output characteristic curve of cadmium telluride (CdTe) photovoltaic modules, the idea of using two second-order Bezier function trajectories to fit the left and right side curves of the maximum power point of the module output characteristics is proposed. The influence rule of the control point on the Bezier function is analyzed, and the existence of the optimal control point is defined. Then, the optimal output characteristics of seven CdTe modules from different manufacturers and types are given. According to the Bezier modeling results under the control points, the fitting law between the optimal control point position of Bezier function and the module filling factor is found out by using the similar triangle theory, and an explicit model describing the output characteristics of CdTe photovoltaic modules is established. Finally, four new CdTe modules are used to evaluate the proposed rules, and the iterative results are compared with the existing models. Experimental results show that the average relative error of CdTe module modeling method based on Bezier function is between 0.49% and 1.5%, while the average relative error of existing models is between 2.45% and 9.19%, which demonstrates the simplicity and correctness of the proposed model.

Keywords: CdTe module; characteristic curve; Bezier function; control point; fitting law

0 引言

碲化镉(CdTe)组件属于第二代光伏电池技术,与第一代晶硅相比,不仅具有薄膜化、柔性化等优点^[1],同时拥有更好的弱光响应性和较高的发电效率,发展势头迅猛^[2]。随着市场规模的扩大,对CdTe组件输出特性准确

建模的需求也日益迫切。

光伏电池输出电流-电压特性曲线的构建,不仅是光伏组件发电性能分析的重要前提,也是运行维护和收益评估的必要基础^[3]。CdTe组件的材料,生产制备与其他光伏电池不同,导致其输出曲线也存在一定差异^[4-5]。近期,文献[6]分析了同一建模方法对不同光伏组件的建模精度,明确指出同一模型应用于不同类型组件时,会产

收稿日期:2020-12-09 Received Date: 2020-12-09

* 基金项目:国家自然科学基金(51677057)、黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017144)项目资助

生较大的误差。

上述最新成果尚未引起重点关注。当前,光伏模型多是力图给出一种对所有类型均有效的通用型建模方法,并未针对某一具体组件类型进行研究,无法准确刻画不同类型组件的输出特性。

单二极管模型是一种典型的光伏组件电路拓扑,其所描述的输出电流—电压关系为包含着串、并联电阻,二极管理想因子和反向饱和电流,光生电流等5个未知参数的超越方程。研究组件输出的电流—电压关系,需要首先计算上述5个未知参数。

由于未知参数包含在超越方程中而无法直接利用代数方法计算。并且,厂商给定的数据只能列写4个等式,同样无法满足5个未知参数的求解条件。为此,利用迭代等数值计算方法求解5个未知参数^[7];或通过假定某一个未知参数的值等预先简化手段,进而采用解析方法给出其余4个未知参数的解^[8-9];或以元启发算法^[10-12]等求解未知参数的方法得到了重视。采用上述一种或几种参数求解方法的组合^[13],是获取组件输出电流—电压超越方程未知参数的主要手段。但正如文献^[14]所指出的,该类参数求解方法仅能给出超越方程的参数计算结果,无法直接描述组件的电流—电压特性,为给出组件输出的电流—电压曲线,仍需再次利用迭代等数值计算方法对参数已知的超越方程进行求解。而迭代求解不仅对初值敏感,也存在着不易收敛的弊端。

为简化建模过程,对直接给出光伏电池输出特性解析表达式的显式模型关注程度日益提高。比如,文献^[14]利用 Lambert 函数直接给出超越方程的解,该方法需要在求解精度和计算时间取得平衡,但二者很难兼顾;文献^[15-17]分别提出了基于形状参数的光伏组件显式建模方法,文献^[18]给出了一种基于标么值的组件输出特性曲线的幂函数拟合方法,但文献^[15-18]均需要实测数据的支撑。文献^[19]和^[20]分别利用泰勒级数以及多项式给出了光伏组件 I-V 曲线的显式模型,但是该类方法仍然需要首先利用迭代法计算超越方程的参数。文献^[21]利用厂商数据手册直接给出了光伏组件的显式模型,但其建模结果存在着一定的误差。

为此,本文针对 CdTe 这一特定光伏组件,通过发掘 2 阶 Bezier 函数控制点与光伏组件填充因子之间的拟合规律,给出输出特性曲线的显式模型。并以牛顿拉夫逊迭代数值解为基准和已有建模方法的误差进行了对比,证明了所提显式模型具有建模简单和精度较高的特点。

1 Bezier 函数建模思路

Bezier 函数是一种利用控制点构造曲线的方法,在预先确定曲线的起点和终点后,通过控制点的设置和调

整,可以实现任意复杂曲线的准确模拟,被广泛应用于轨迹规划和计算机绘图等领域^[22]。

Bezier 函数 $f(x, y)$ 具有如下形式:

$$f(x, y) = \sum_{k=0}^n f_k(x_0, y_0) \frac{n!}{(n-k)! k!} t^k (1-t)^{n-k} \quad (1)$$

式中: n 为 Bezier 的阶数; $f_k(x_0, y_0)$ 为曲线控制点坐标; $f(x, y)$ 为轨迹坐标; $t \in [0, 1]$, $k = 0, 1, \dots, n$ 。

在 t 从 0~1 之间按照一定步长变化时,式(1)所得结果即为 Bezier 函数对应的轨迹。且在 $k=0$ 和 $k=n$ 时, $f(x, y)$ 的计算结果为 $f_0(x, y)$ 和 $f_n(x, y)$, 分别对应着 Bezier 函数的起点和终点。

结合 CdTe 组件输出特性曲线的特点,进一步对式(1)进行分析,可以得到如下结论。

1) 由式(1)可知,Bezier 函数的轨迹必然通过起点和终点,而短路电流、开路电压以及最大功率点同样是光伏组件输出特性曲线的必经点。因而,本文采用两条 Bezier 函数分别拟合 CdTe 组件最大功率点左、右两侧的输出特性曲线,并分别以短路电流点和最大功率点,最大功率点和开路电压点作为两条 Bezier 函数的起点和终点,以保证拟合结果和光伏组件输出特性的一致性。

2) 式(1)表明 Bezier 函数的繁琐程度随控制点的数量(对应着阶数)的增多而增加,通过对组件输出曲线的特点进行分析可知,2 阶 Bezier 函数可以在简化计算的同时,保证拟合结果的精度。为此,本文采用两条 2 阶 Bezier 函数对光伏组件最大功率点左、右两侧的输出特性曲线分别拟合。

3) 为保证两条 Bezier 函数轨迹能够在最大功率点平滑连接,根据导数连续性定理,在经过最大功率点,且与开路电压和短路电流直线的平行线上确定控制点的位置,满足在拼接点(最大功率点)处的导数连续性条件,即可确保两条 2 阶 Bezier 函数在拼接点处的平顺性。

4) 由式(1)可知,给定起点和终点的情况下,在过最大功率点,且与开路电压和短路电流连线平行线选取控制点,控制点的位置决定了 2 阶 Bezier 函数轨迹的走向,图 1 所示为不同控制点下的 Bezier 函数轨迹。图 1 中, $p_1 - p_4$ 分别为过最大功率点 (V_m, I_m) 的直线 l_s 上的控制点, l_0 为连接开路电压和短路电流点的直线,且 $l_0 \parallel l_s$ 。 $W_{p1} - W_{p4}$ 分别对应着控制点为 $p_1 - p_4$ 时的 Bezier 函数,虚线为组件实际输出特性曲线。

以 (V_m, I_m) 左侧为例进行分析,当控制点与点 (V_m, I_m) 的距离增加时,Bezier 函数轨迹的凸度也增大,并且,随着两点间距离的进一步增加,Bezier 函数轨迹从输出特性曲线的上部转移到下部。

通过对图 1 的分析,可以得到一条重要推论:

5) 随着控制点与最大功率点距离的变化,Bezier 函

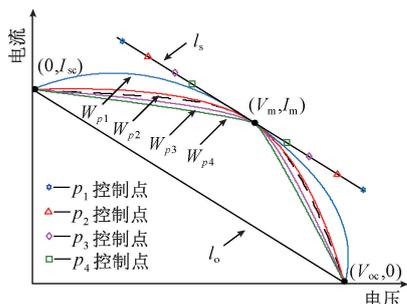


图1 不同控制点的 Bezier 函数

Fig. 1 Bezier curves at varying control point

数轨迹的凸凹形状也随之变化,不同形状的 Bezier 函数对 CdTe 组件特性曲线具有不同的拟合效果。则必然存在着一个最优控制点 p_{op} ,在 p_{op} 作用下 Bezier 函数轨迹与左侧曲线具有最佳的拟合效果,对应着最小拟合误差。

最大功率点右侧的拟合过程与左侧类似,只需将 Bezier 函数的起点改为最大功率点,终点改为开路电压点即可,不再赘述。

综上所述,利用两条 2 阶 Bezier 函数分别对 CdTe 组件的输出特性曲线进行拟合是可行的。

2 Bezier 函数误差分析基准的构建

为对后续章节所提 Bezier 函数建模结果的精度进行分析,需首先给出误差计算的基准。文献[23]的结果表明,利用牛顿迭代计算光伏电池特性方程隐函数的数值解,可以作为误差分析的基准。

本节亦采用与文献[23]相同的思路,首先利用牛顿拉夫逊算法求解 CdTe 组件所包含的 5 个未知参量;然后,再次利用牛顿迭代算法计算隐函数方程的电流和电压变量(参量已知),并将得到的数值结果用于误差分析。

CdTe 组件输出特性隐函数为:

$$I = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{V + IR_s}{N_s V_t} - 1\right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2)$$

式中: I_{ph} 为光生电流; I_0 为二极管饱和暗电流; N_s 为串联光伏电池数; R_s 和 R_p 分别为等效的串、并联电阻。 V_t 为结热电压,可表为玻尔兹曼常数 K , 二极管开氏温度 T 和理想因子 A , 电量 q 的函数。

$$V_t = \frac{KTA}{q} \quad (3)$$

忽略常数项,将 $(v_{oc}, 0)$, $(0, I_{sc})$, 分别代入式(2),则:

$$I_{ph} = I_0 \exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad (4)$$

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{N_s V_t}\right) - \frac{I_{sc} R_s}{R_p} \quad (5)$$

再次将式(4)代入式(2),则:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) - \exp\left(\frac{V + IR_s}{N_s V_t}\right) \right] + \frac{V_{oc} - V - IR_s}{R_p} \quad (6)$$

同样,将式(4)代入式(5),且忽略 $I_{sc} R_s$ 后,则:

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_p}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right)} \quad (7)$$

将 (V_m, I_m) 代入(2)可得:

$$I_m = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{N_s V_t}\right) - \frac{V_m + I_m R_s}{R_p} \quad (8)$$

将式(2)、(3)代入式(6)中,适当变换后,得到:

$$V_t = \frac{V_m + I_m R_s - V_{oc}}{N_s \ln\left(\frac{(I_{sc} - I_m)(R_p + R_s) - V_m}{I_{sc}(R_p + R_s) - V_{oc}}\right)} \quad (9)$$

由 (V_m, I_m) 处的导数为 0, 有:

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_m + N_s V_t \ln(V_m N_s V_t - I_m N_s V_t (R_p + R_s))}{I_m (I_{sc} R_p - V_{oc} + I_{sc} R_s) (I_m R_s - V_m)} \quad (10)$$

以 $(0, I_{sc})$ 点对电压的导数等于 $-1/R_p$, 构造第 5 个约束条件, 得到:

$$R_p = \frac{N_s V_t (R_p + R_s) + R_s (I_{sc} R_p - V_{oc} + I_{sc} R_s) \beta}{N_s V_t + (I_{sc} R_p - V_{oc} + I_{sc} R_s) \beta} \quad (11)$$

式中: $\beta = \exp((I_{sc} R_s - V_{oc})/N_s V_t)$ 。

利用式(4)、(7)、(9)~(11)可给出 CdTe 组件特性方程隐函数的 5 个未知参数的解。

进一步分析上述 5 个等式的特点可知,式(9)~(11)为包含 V_t 的隐函数方程,式(4)、(7)为代数方程,因而,仅需对式(9)~(11)迭代计算即可。对于式(10)、(11)迭代过程中所涉及到偏导数,计算如下:

$$g'(R_s) = \frac{-N_s V_t}{V_m - I_m (R_p + R_s)} - \frac{N_s V_t [V_m - I_m (R_p + R_s)]}{I_m [V_m - I_m (R_p + R_s)]} - 1 \times \frac{I_m (I_{sc} (R_p + 2R_s) - V_{oc}) - I_{sc} V_m}{[I_{sc} (R_p + R_s) - V_{oc}] [I_m R_s - V_m]} \quad (12)$$

$$g'(R_p) = \frac{N_s V_t + R_s I_{sc} \beta}{N_s V_t + \alpha} - \frac{I_{sc} \beta (\gamma + R_s \alpha)}{(\gamma + \alpha)^2} - 1 \quad (13)$$

式中: $\alpha = \beta [I_{sc} (R_s + R_p) - V_{oc}]$, $\gamma = N_s V_t (R_s + R_p)$ 。

迭代的具体步骤为:

1) 给定迭代初值: $R_s = 0 \Omega$, $R_p = 1000 \Omega$, $V_t = 0 \Omega$, 设置 N_{max} 为最大迭代次数, $N_{max} = 10^7$;

2) 计算 R_s, R_p : 若 $N \leq N_{max}$ 为真, 利用式(9)、(11)和(12)分别计算 $V_t, R_s (n+1)$ 和 $R_p (n+1)$; 若 $N > N_{max}$, 显示迭代失败并退出;

3) 分析和判断 R_s, R_p 求解结果的误差: 令 $error = \max[abs(R_{s,p}(n+1) - R_{s,p}(n))]$;

4) 循环迭代: 若 $error \leq 10^{-5}$, 利用式 (3)、(5) 和 (7) 分别计算二极管理想因子 A , 饱和暗电流 I_0 和光生电流 I_{ph} ; 否则, 令 $n = n + 1, R_p(n) = R_p(n + 1), R_s(n) = R_s(n + 1)$ 并跳转到步骤 2), 循环进行。

以 CdTe 光伏组件 XRD-144 W 为例, 利用上述步骤计算其参数如下: $R_s = 0.945\ 1\ \Omega, R_p = 103.31\ \Omega, A = 1.840\ 8, I_0 = 1.346\ 9 \times 10^{-4}\ A, I_{ph} = 5.350\ 2\ A$ 。

基于所得的参数结果, 再次采用牛顿迭代法求解式 (2) 的隐函数, 即可得到组件的输出特性曲线, 如图 2 所示。

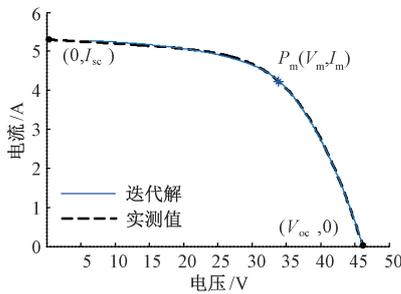


图 2 XRD-144 W 计算结果与实测结果

Fig. 2 XRD-144 W results of measured and computed

图 2 中实线为牛顿迭代法求得的隐函数的电流-电压解, 虚线为标准条件下的厂商测试结果。

进一步分析图 2 可知, XRD-144 W 组件迭代求解结果的最大相对误差为 0.06%, 平均相对误差约为 0.02%, 具有较好的精度。证明了以牛顿拉夫逊迭代隐函数求解结果作为误差分析基准的可靠性。

3 CdTe 组件的控制点拟合规律研究

3.1 最优控制点下的 Bezier 函数建模

以 Bezier 函数的 5 个结论为基础, 对不同厂家和型号的 CdTe 组件进行 Bezier 建模, 具体步骤为:

1) 以厂商数据手册给定的短路电流点为起点, 最大功率点为终点, 在经过最大功率点且平行于开路电压和短路电流连线的直线上确定初始控制点 p_0 , 按照式 (1) 计算 Bezier 函数;

2) 利用牛顿拉夫逊迭代计算该组件输出特性隐函数方程的未知参量, 以所得的未知参量为基础, 再次利用牛顿拉夫逊迭代计算该型号组件输出特性曲线的数值解, 并以该数值解为基准, 分析 Bezier 函数的误差;

3) 按照一定的步长改变 Bezier 函数控制点的位置, 得到新的控制点 p_1 , 并保持起点和终点不变, 计算新控制点下的 Bezier 函数, 重新利用步骤 2) 进行误差分析;

4) 重复步骤 3), 并对所得误差进行对比, 找出误差最小时最大功率点左侧 Bezier 函数控制点所在的位置;

5) 将起点改为最大功率点, 终点改为开路电压点, 重复上述步骤, 找出误差最小时最大功率点右侧 Bezier 函数控制点所在的位置。

利用上述步骤, 对 7 种不同厂家和型号的 CdTe 组件进行建模, 得到最优控制点时误差最小 Bezier 函数轨迹的拟合结果如图 3 所示。

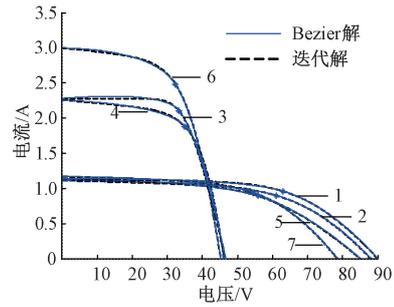


图 3 Bezier 函数结果与迭代结果

Fig. 3 Results of Bezier functions and iteration

图 3 中, 实线代表最优控制点下不同 CdTe 组件的 Bezier 函数解, 数字代表具体的组件型号。虚线代表牛顿拉夫逊的数值解。

表 1 中给出了利用牛顿拉夫逊算法对组件隐函数方程未知参量的计算结果, 组件型号与数字的对应关系也如表 1 所示。

表 1 CdTe 组件参数迭代结果

Table 1 Parameter iterative results of CdTe modules

序号	型号	I_{ph}/A	$I_0/(10^{-5}\ A)$	R_s/Ω	R_p/Ω	A
1	CTS260	1.149 6	0.839 9	11.6	1 380.6	1.653
2	FS55	1.147 6	5.646 3	10.5	675.4	1.985
3	AV70	2.280 7	$1.176\ 7 \times 10^{-4}$	3.6	12 324	0.912
4	AB65	2.268 2	4.737 5	0.8	220.3	1.826
5	ATF 50	1.131 7	1.866 8	16.1	831.8	2.567
6	Apollo980	3.027 1	6.484 2	1.7	184.5	2.843
7	CX50	1.187 0	4.603 0	9.1	635.2	1.936

进一步对图 3 中 Bezier 函数轨迹的拟合精度进行分析, 结果如表 2 所示。

表 2 的第 1~2 列为 CdTe 光伏组件的型号及其与图 1 中序号的对应关系; 第 3~6 列为厂商给定 CdTe 组件数据; 第 7~8 列给出了最优控制点下的拟合误差, 其中 e_{max} 为最大相对误差, e_{av} 为平均相对误差。

由表 2 可见, 7 种 CdTe 光伏组件的最大相对误差均小于 1.9%, 平均相对误差均小于 1%, 拟合效果较好。

表2 CdTe 组件的拟合误差
Table 2 Fitting errors of CdTe module

序号	型号	I_{sc}/A	V_{oc}/V	I_m/A	V_m/V	$e_{max}/\%$	$e_{av}/\%$
1	CTS-260	1.14	90.0	0.96	63.0	1.04	0.25
2	FS-55	1.13	88.0	0.90	61.0	1.08	0.45
3	AV70	2.28	46.6	2.10	33.4	1.32	0.62
4	AB-65	2.26	46.1	1.88	35.0	1.59	0.90
5	ATF 50	1.11	85.0	0.89	56.0	1.47	0.53
6	Apollo-980	3.00	45.2	2.48	32.3	1.80	0.47
7	CX-5	1.17	78.5	0.94	54.5	1.06	0.21

3.2 最优控制点分布规律

为研究 Bezier 函数控制点位置的分布规律,给出选取某一控制点时的位置如图4所示。

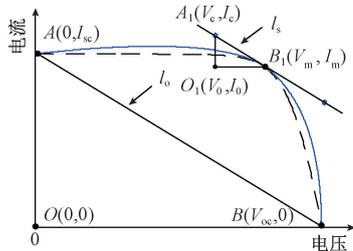


图4 CdTe 组件控制点三角形

Fig. 4 Control points triangle of CdTe modules

由图4可以看出, $\triangle AOB \cong \triangle A_1O_1B_1$, 鉴于控制点位于过最大功率点且平行于开路电压和短路电流连线的平行线上, 因此, 可按照相似三角形的性质确定控制点坐标, 以简化控制点位置的分析 and 计算过程。

CdTe 组件输出特性最大功率点左侧是一条从短路电流点 $A(0, I_{sc})$ 平滑变化到最大功率点 $B_1(V_m, I_m)$ 的曲线, 也就意味着该曲线变化情况与 $(0, I_{sc})$ 和 (V_m, I_m) 存在着某种联系。同样, 类似的关联也存在于最大功率点右侧曲线的 (V_m, I_m) 和 $(V_{oc}, 0)$ 之间。

综合考虑到上述机理, 并兼顾计算过程的简单性和普适性, 本文选取控制点 $A_1(V_1, I_1)$ 到最大功率点 $B_1(V_m, I_m)$ 的长度 $L_{A_1B_1}$ 与短路电流点 $A(0, I_{sc})$ 到开路电压点 $B(V_{oc}, 0)$ 长度的比作为纵坐标, 以 CdTe 组件输出特性的填充因子 FF 作为横坐标, 寻求二者之间的拟合规律, 结果如图5所示。

进一步给出左、右两侧控制点位置与填充因子 FF 之间的线性拟合关系式 l_f 如下:

$$l_f = -0.8057FF + 0.6716 \quad (14)$$

$$l_f = -0.5386FF + 0.5282 \quad (15)$$

基于式(14)、(15)所给规律, 不需要任何实验测试

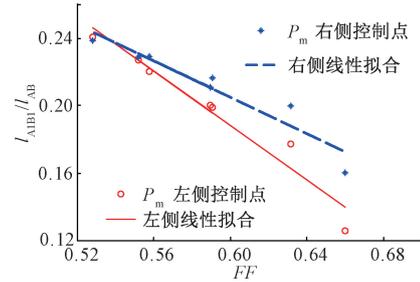


图5 CdTe 组件控制点拟合规律

Fig. 5 Fitting law of control points of CdTe modules

环节, 只需按照数据手册给定参数即可给出不同厂家和型号的 CdTe 组件输出特性的显式模型。

4 拟合规律的对比较证

为充分论证所提拟合规律的普适性, 另外选取4种新的不同厂家和型号的 CdTe 组件, 并将该4种 CdTe 组件的 Bezier 建模结果与文献[21]所提模型进行对比较证。

选择文献[21]模型的原因是, 该文所提光伏组件的建模方式与本文类似, 是目前为数不多的仅需要厂商给定数据, 直接利用简单的代数方程即可给出光伏组件输出特性的显式建模方法。

文献[21]所提的光伏电池显式模型, 其最大功率点左侧电流 I_l 与电压 V_l 的关系满足:

$$I_l = I_{sc} \left[1 - \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \left(\frac{V_l}{V_m} \right)^{\frac{I_m}{I_{sc} - I_m}} \right] \quad (16)$$

最大功率点右侧电流 I_r 与电压 V_r 的关系满足:

$$I_r = I_m \frac{V_m}{V_r} \left[1 - \left(\frac{V_r - V_m}{V_{oc} - V_m} \right)^\eta \right] \quad (17)$$

其中,

$$\eta = (I_{sc}/I_m) [I_{sc}/(I_{sc} - I_m)] [(V_{oc} - V_m)/V_{oc}] \quad (18)$$

4种新 CdTe 组件的型号如表3前5行所示。

基于表3中的前5行的 $FF, I_{sc}, V_{oc}, I_m, V_m$ 数据, 利用式(14)、(15)分别确定 Bezier 函数在最大功率点左、右两侧控制点位置, 进而利用式(1)显式模型给出 CdTe 组件的建模结果。

利用表3后5行给定的 R_s, R_p, I_{ph}, I_0, A 等参数, 进行牛顿迭代计算, 并将所得数值解作为基准, 结果如图6所示。

图6中实线为 Bezier 显式模型的计算结果, 虚线为牛顿迭代数值解。

表 3 新 CdTe 组件参数

Table 3 Parameters of new CdTe modules

	S4-77	RSI-210 W	CX3Pro100/3	XRD-144
FF	0.702 0	0.704 9	0.697 1	0.587 6
I_{sc}/A	3.91	3.50	2.34	5.30
V_{oc}/V	28.0	86.0	61.5	46.2
I_m/A	3.66	3.12	2.09	4.36
V_m/V	21	68	48	33
R_s/Ω	1.03	0.77	1.23	0.95
R_p/Ω	15 515.03	809.40	1 025.50	100.30
I_{ph}/A	3.910 3	3.503 3	2.342 8	5.350 2
$I_0/(10^{-5} A)$	1.600 2 $\times 10^{-5}$	0.498 9	0.283 5	13.468 7
A	0.844 2	1.298 0	1.431 0	1.840 8

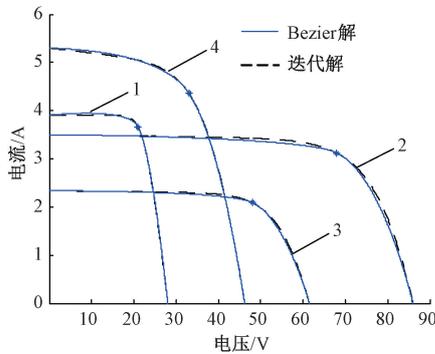


图 6 Bezier 模型计算结果

Fig. 6 Calculation results of the Bezier model

文献[21]利用表 3 中第 2~5 行厂商给定的 I_{sc} 、 V_{oc} 、 I_m 、 V_m 参数,首先以式(18)计算 η ,结果如表 4 中第 1 行所示。

然后再采用式(16)计算最大功率点左侧特性,采用式(17)计算最大功率点右侧特性,进而得到整个输出特性曲线。利用文献[21]所提方法计算 4 种 CdTe 光伏组件的输出特性如图 7 所示。

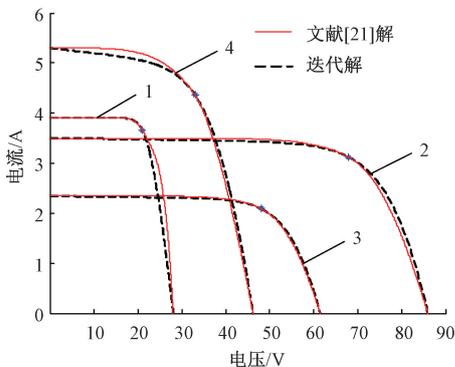


图 7 文献[21]模型计算结果

Fig. 7 Calculation results of the model in document[21]

图 7 中用实线表示文献[21]的显式模型结果,同样用虚线表示牛顿迭代数值解。

需要说明的是,在图 6 和 7 中牛顿迭代数值解所计算的输出特性曲线由 500 个数据点构成。为对比两种建模方法的精度,以图 6、7 中牛顿拉夫逊数值解的 500 个数据对为基准,计算 4 种不同厂家和型号 CdTe 组件输出特性的显式建模误差,结果如表 4 中第 2~5 行所示。

表 4 新 CdTe 组件参数及误差

Table 4 Parameters and errors of new CdTe modules

	S4-77	RSI-210 W	CX3Pro100/3	XRD-144
η	4.177	2.163	2.300	1.958
$e_{Bav}/\%$	0.77	1.41	1.27	0.49
$e_{15av}/\%$	9.19	2.56	2.45	3.15
$e_{Bmax}/\%$	4.64	9.23	8.47	4.35
$e_{15max}/\%$	53.64	20.93	20.66	15.04

表 4 中 e_{Bav} 和 e_{Bmax} 分别为 Bezier 结果的平均相对误差和最大相对误差, e_{15av} 和 e_{15max} 分别为文献[21]所提显式模型的平均相对误差和最大相对误差。Bezier 显式模型的平均相对误差在 0.49%~1.5%之间,而文献[21]的平均相对误差在 2.45%~9.19%之间;Bezier 显式模型的最大相对误差在 4.35%~9.23%之间,文献[21]的最大相对误差在则达到了 15.04%~53.64%。

其中,两种模型对 CX3Pro100/3 电池型号的误差计算结果最接近,Bezier 显式模型的平均和最大相对误差分别为 1.27%和 8.47%,文献[21]的平均和最大相对误差分别为 2.45%和 20.66%,本文所提模型的精度比文献[21]分别提高了约 1.18%和 12.19%。

而对于 S4-77 型号电池而言,Bezier 显式模型的平均和最大相对误差分别为 0.77%和 4.64%,文献[21]的平均和最大相对误差分别为 9.19%和 53.64%,本文所提模型的精度比文献[21]分别提高了 8.42%和 49%。

可以看出,本文所提 Bezier 函数的显式模型不仅具有计算简单的优点,和同类方法相比较,也具有较好的精度。

5 应用前景分析

光伏的用户大致可分为科研人员、维护人员和使用者 3 类。不同用户对光伏发电的关注点也各不相同,其中,研究人员主要关注光伏发电准确的量化结果,维护人员更倾向于保证光伏系统的正常运行,而使用者则希望得到简单、可行的光伏输出特性获取方法。

对于科研人员而言,为应对光伏高比例并网的必然趋势,需要对含光伏组件的电力系统进行动态仿真分析,

此类仿真分析的时间一般为秒或毫秒级。为减小仿真计算时间,加快仿真进程,需要利用简单、快速准确的光伏组件输出特性曲线模型。因此,传统的电力系统动态仿真方法常采用等效电路模型简化的手段,以提高系统的动态响应。但该类简化方法难免为系统分析带来一定误差。利用本文所给显式模型,以式(14)和(15)即可实现CdTe组件的快速建模,可为含光伏电网的动态仿真提供可靠的基础。

对于维护人员而言,检测光伏组件运行时的电压和电流是保证光伏正常工作的必要手段。常见的检测方法是以传感器为主,通过对光伏组件不同状态下的电压和电流的检测结果进行分析和处理,以判断和分析光伏发电的运行状态,一般所需传感器的数量较多,增加了光伏发电的运维成本。Bezier函数的光伏组件建模方法,可为维护人员提供光伏组件准确的电压和电流计算结果,并作为判断光伏模块运行状态的标准,能够极大地减小系统的运行和维护成本。

对于使用者而言,虽然厂商给定的数据手册中包含输出特性曲线。然而,该特性曲线并未直接给出曲线的数据,而是以曲线的图片的形式呈现,为得到准确的数据结果,使用者需借助专业的图片—数据转换软件,将图片转换成数据;或基于MATLAB、Mathematica等仿真软件对输出特性曲线进行求解,以便于评估光伏发电的投资收益。上述两种方法不仅需要购买昂贵的商业软件,同时对用户理论知识的要求也较高,无疑增加了光伏发电市场化的难度。利用光伏组件的显式建模方法,以简单的代数计算即可给出组件的出力计算结果,有助于用户对光伏投资的收益进行简单评估,可加快光伏发电的市场化进程。

可见,所提显式CdTe建模方法的应用前景,包括了不同用户的不同用途,具有较好的理论和现实意义。

6 结 论

针对薄膜光伏电池中碲化镉(CdTe)光伏组件,提出了仅利用厂家数据手册的Bezier函数建模方法,给出了输出特性的显式模型。主要贡献如下:

首先,将Bezier函数轨迹与光伏组件输出特性曲线特点紧密结合,提出了利用两条2阶Bezier函数分别建模CdTe组件最大功率点左、右两侧输出特性曲线的思路。

其次,推导了牛顿拉夫逊迭代算法的CdTe组件隐函数未知参量的求解过程,给出了隐函数方程未知参数和输出特性曲线的数值解。

最后,找出了两条2阶Bezier函数最优控制点位置与CdTe组件填充因子之间的拟合规律,给出了简单、准确的CdTe组件输出特性显式模型。

参考文献

- [1] ZIDANE T, ADZMAN M B, TAJUDDIN M, 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.
- [2] 唐圣学,刁旭东,陈丽,等.光伏发电系统直流串联微弱故障电弧检测方法研究[J/OL]. *仪器仪表学报*, 2021: 1-11[2021-6-5]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20210402.1607.026.html>.
TANG SH X, DIAO X D, CHEN L, et al. Study on detection method of weak series DC fault arc in PV power generation systems[J/OL]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021: 1-11[2021-6-5]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20210402.1607.026.html>.
- [3] 范思远,王煜,曹生现,等.积灰对光伏组件输出特性影响建模与分析[J/OL]. *仪器仪表学报*, 2021, 1-10[2021-6-5]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20210511.1647.002.html>.
FAN S Y, WANG Y, CAO SH X, et al. Effect modeling and analysis of dust accumulation on output characteristics of photovoltaic modules[J/OL]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021: 1-10[2021-6-5]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20210511.1647.002.html>.
- [4] ABBASSI R, ABBASSI A, JEMLI M, et al. Identification of unknown parameters of solar cell models: A comprehensive overview of available approaches[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018(90): 453-474.
- [5] AMEOUCHE B, SICOT L, GUESSOUM A, et al. Experimental analysis of the maximum power point's properties for four photovoltaic modules from different technologies: Monocrystalline and polycrystalline silicon, CIS and CdTe[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013(118): 124-134.
- [6] SANTIAGO P, JAVIER C, ELENA R M, et al. Assessment of explicit models for different photovoltaic technologies[J]. *Energies*, 2018, 11(6): 1-22.
- [7] ET-TORABI K, NASSAR-EDDINE I, OBBADI A, et al. Parameters estimation of the single and double diode photovoltaic models using a Gauss-Seidel algorithm and analytical method: A comparative study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017(148): 1041-1054.
- [8] TOLEDO F J, BLANES J, GALIANO V, et al. Two-step linear least-squares method for photovoltaic single-diode model parameters extraction[J]. *IEEE Transactions on*

- Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6301-6308.
- [9] WEI D, WEI M, CAI H, et al. Parameters extraction method of PV model based on key points of I-V curve[J]. Energy Conversion & Management, 2020(209): 1-8.
- [10] 吴忠强, 刘重阳. 基于 IHHO 算法的光伏电池工程模型的参数辨识[J]. 计量学报, 2021, 42(2): 221-227.
WU ZH Q, LIU CH Y. Parameter identification of photovoltaic cell engineering model based on IHHO algorithm[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(2): 221-227.
- [11] YE H W C, HUANG C L, LIN P, et al. Simplex simplified swarm optimisation for the efficient optimisation of parameter identification for solar cell models[J]. Iet Renewable Power Generation, 2017, 12(1): 45-51.
- [12] JADLI U, THAKUR P, SHUKLA R D, et al. A new parameter estimation method of solar photovoltaic[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2018, 8(1): 239-247.
- [13] CHIN V J, SALARM Z, ISHAQUE K. An accurate and fast computational algorithm for the two-diode model of PV module based on a hybrid method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6212-6222.
- [14] POLO J, MARTIN-CHIVELET N, ALONSO-GARCIA M C, et al. Modeling I-V curves of photovoltaic modules at indoor and outdoor conditions by using the Lambert function[J]. Energy Conversion & Management, 2019(195): 1004-1011.
- [15] LIU L, LIU W, ZHANG X, et al. Research on the novel explicit model for photovoltaic I-V characteristic of the single diode model under different splitting spectrum[J]. Results in Physics, 2019(12): 662-672.
- [16] ZHANG Y, GAO S, GU T. Prediction of I-V characteristics for a PV panel by combining single diode model and explicit analytical model[J]. Solar Energy 2017(144): 349-355.
- [17] PAVAN A M, VERGURS S, MELLIT A, et al. Explicit empirical model for photovoltaic devices experimental validation[J]. Solar Energy, 2017(155): 647-653.
- [18] DAS A K. An explicit J-V model of a solar cell using equivalent rational function form for simple estimation of maximum power point voltage[J]. Solar Energy, 2013(98): 400-403.
- [19] LUN S X, DU C J, SANG J S, et al. An improved explicit I-V model of a solar cell based on symbolic function and manufacturer's datasheet[J]. Solar Energy, 2014(110): 603-614.
- [20] WEI D, WEI M, CAI H, et al. Parameters extraction method of PV model based on key points of I-V curve[J]. Energy Conversion and Management, 2020(209): 1-8.
- [21] PINDADO S, CUBAS J. Simple mathematical approach to solar cell/panel behavior based on datasheet information[J]. Renewable Energy, 2017, 103: 729-738.
- [22] 余伶俐, 龙子威, 周开军. 基于贝塞尔曲线的机器人非时间轨迹跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1564-1572.
YU L L, LONG Z W, ZHOU K J. Non-time trajectory tracking method based on Bezier curve for robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1564-1572.
- [23] SHONGWE S, HANIF M. Comparative analysis of different single-diode PV modeling methods[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2017, 5(3): 938-946.

作者简介



师楠(通信作者), 2004年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2007年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 现为黑龙江科技大学讲师, 主要研究方向为新能源发电技术及电网调度。

E-mail: shinan12000@163.com.

Shi Nan (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Harbin University of Science and Technology in 2004 and 2007, respectively. She is currently a lecture at Heilongjiang University of Science and Technology. Her main research interests include new energy generation technologies and power system dispatch.



朱显辉, 2000年于东北农业大学获得学士学位, 2006年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为黑龙江科技大学讲师, 主要研究方向为可再生能源可靠性和控制、光伏系统设计。

E-mail: zhu_xianhui@sina.com

Zhu Xianhui received his B. Sc. degree from Northeast Agriculture University in 2000, received his M. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2006, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a lecture at Heilongjiang University of Science and Technology. His main research interests include reliability and control for renewable energy, and PV system design.