

近海漂浮式光伏系统发电量测算方法研究*

李鑫, 晁刚, 徐庆跃, 魏鹏冲

中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 上海 200063

摘要: 漂浮式光伏技术作为一种新兴的海上光伏解决方案, 能助力沿海地区能源结构转型, 拓宽海上资源利用空间, 具有广阔的发展前景, 有望为国家提出的“3060”战略提供重要支撑。针对目前尚缺乏对近海漂浮式光伏发电量测算方法研究的现状, 文章基于目标海域波浪运动及其他海洋环境特征, 提出了近海漂浮式光伏发电量测算模型。首先, 基于波浪力学及浮体水动力学理论, 以目标海域波陡(d)为小值(波高 h /波长 $l \leq 1$)作为边界条件, 采用辐照能效率(η)和时均倾角(ε)来量化波浪对光伏组件的长期影响, 得到规则波作用下的倾斜面等效辐照量目标函数; 其次, 鉴于海水反射、蒸发、对流作用, 考虑组件背面及水面冷却效应的影响, 引入背面辐照量实用化计算公式及水面冷却效应因子, 以表征光伏组件背面及水面冷却效应正向增益; 最后, 与目标场址进行实际测算对比, 结果显示测算数值与理论数值相差在 10%以内, 符合预期差值限度。

关键词: 近海漂浮式光伏; 发电量测算; 辐照能效率; 时均倾角; 正向增益

中图分类号: P751 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2025)05-0179-10

Research on power generation calculation methods for offshore floating photovoltaic systems*

LI Xin, CHAO Gang, XU Qingyue, WEI Pengchong

East China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China

Abstract: As an emerging offshore solar solution, floating photovoltaic technology can support the energy transition in coastal regions, expand the utilization of marine resources, and has broad development prospects. It is expected to provide significant support for the country's “3060” dual-carbon strategy. To address the current lack of research on power generation calculation methods for offshore floating photovoltaic systems, this study proposes a power generation calculation model based on the wave dynamics and other marine environmental characteristics of the target sea area. First, based on wave mechanics and floating body hydrodynamics, and considering the steepness of the target sea area d as a small value (wave height h / wave length $l \leq 1$) as a boundary condition, the study uses the irradiation energy efficiency η and the time-averaged tilt angle ε to quantify the long-term impact of waves on photovoltaic modules. This yields an equivalent irradiance objective function for the inclined surface under regular wave action. Second, considering seawater reflection, evaporation, and convection, the influence of module backside and water surface cooling effects is incorporated. A practical calculation formula for backside irradiance and a water surface cooling effect factor are introduced to characterize the positive gains from the module backside and water surface cooling. Finally, a comparison with field measurements at the target site demonstrates that the calculated values deviate from the theoretical values by less than 10%, which falls within the expected margin of error.

Key words: offshore floating photovoltaic; power generation calculation; irradiance efficiency; time-averaged tilt angle; positive gain

收稿日期: 2024-09-09; 修订日期: 2024-10-22。殷波编辑

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重点研发项目(CEEC2022-ZDYF-04)

作者简介: 李鑫(1988—), 男, 黑龙江省大庆市人, 高级工程师, 从事海洋能源发电研究。email: 2781@ecepdi.com

通信作者: 李鑫。email: 2781@ecepdi.com

Received date: 2024-09-09; Revised date: 2024-10-22. Editor: YIN Bo

Foundation item: China Energy Engineering Corporation Limited Key Research and Development Program (CEEC2022-ZDYF-04)

Corresponding author: LI Xin. email: 2781@ecepdi.com

开发绿色能源是我国能源发展战略的重要组成部分之一。作为重要一环,海洋面积广袤,蕴含的海洋能十分丰富,可开发利用的海洋能具有多种形式,愈发成为研究热点(Sun et al, 2022; Xu et al, 2023; Pan et al, 2024)。近年来,以漂浮式光伏(floating photovoltaic, FPV)为代表的海上光伏发电系统逐渐引起业界关注(张木梓等, 2020),一些世界上最新和最具代表性的漂浮式光伏发电系统项目如雨后春笋般被制造出来(Shi et al, 2023)。

我国大陆海岸线长 $1.84 \times 10^4 \text{ km}$, 按照理论研究,可安装海上光伏的海域面积约为 $7.1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。按照 1/1000 的比例估算,可安装海上光伏装机规模超过 70GW (李华军等, 2022)。虽然近海漂浮式光伏电站仍面临着一些技术和环境上的挑战,需要进一步的研究和探索(宋肖锋等, 2020; 肖福勤等, 2020),譬如海洋生物附着损耗、海鸟排泄物污染、组件清洗等难题。但近海漂浮式光伏电站作为一种新兴的发电模式,具有广阔的发展前景和潜力,在拥有广阔水域资源背景的中国,近海漂浮式光伏电站在可预见的未来具备良好开发条件。随着技术的不断进步和成本的降低,近海漂浮式光伏电站有望成为海上光伏走向深蓝的支点。

然而,目前已报道的漂浮式光伏发电系统相关研究主要集中在个别项目或园区的生态环境影响和经济效益分析等方面,尚缺乏对近海漂浮式光伏发电量估计的成熟方法。如以往研究从性能角度对漂浮式光伏发电系统发电量和经济性进行了评估(孙杰, 2017),漂浮式光伏发电系统相比同条件地面光伏发电系统,发电量高约 5%~7%,但成本比地面电站高约 5%~12%。

光伏发电系统发展规划与项目开发亟须更加科学精准的评估方法作为支撑。

本研究分析近海漂浮式光伏发电系统的环境特征,得出海洋环境中影响光伏发电系统发电量的特有因素。其中,海洋波浪周期性运动、海水反射率高、海水蒸发、热传导等因素起主要作用。基于上述分析,本研究基于波浪力学与浮体水动力学理论,引入辐照能效率(η)和时均倾角(ε)表征近岸波浪运动影响,同时考虑光伏组件背面增益、海水反射增益、海洋生物附着、强风强浪等因素,提出近海漂浮式光伏发电量测算模型。本研究依托提出的模型进行测算对比,结果显示测算值与理论值相差在 10%以内,表明该模型具备较好精度,为后续相关海洋工程开展提供潜在支撑。

1 一般倾斜平面上太阳辐照能接收分析

地面物体接收太阳光主要包括 3 种情形:第一,太阳光无遮挡的直接照射;第二,由于云层及其他空气小分子的遮挡而造成的四向散射;第三,太阳光照射到地面,由其他物体造成的反射。因此,整个光伏方阵倾斜面接收的太阳辐照量(E_t)(单位: $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)主要包括 3 个部分(Padovan et al, 2010),即倾斜面太阳直射辐照量(E_{td})、倾斜面太阳散射辐照量(E_{ts})、倾斜面太阳反射辐照量(E_{tr}),有:

$$E_t = E_{td} + E_{ts} + E_{tr} \quad (1)$$

根据光伏组件排布情况分析,由图 1 可以看到,一般倾斜平面光伏组件接受的散射主要包括天空各向同性及环太阳散射;反射主要包括前后排组件以及地面反射。

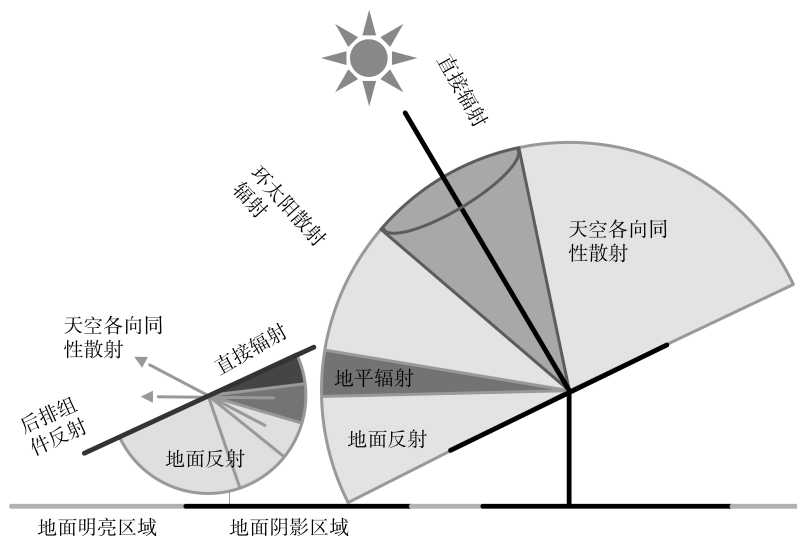


图 1 3 种太阳辐照示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three types of solar irradiation

倾斜平面上的辐照量是水平平面上辐照量的函数分量, 需要得到入射光线与倾斜平面之间的几何关系和水平平面辐照能的计算方法, 以此得到倾斜平面的辐照能。

1.1 固定倾斜面的辐照能接收分析

首先, 需要明确几个角度概念: β 为倾斜平面与水平大地之间的夹角, 规定以南向为正, 北向为负; γ_n 为倾斜平面的方位角, 规定自北向出发, 顺时针方向为正; δ 是指地球中心和太阳中心连线与地球赤道平面的夹角, 称赤纬角; α 是指地球表面上的某点和太阳的连线与地平线之间的夹角, 称太阳高度角; γ 是指地球表面上的某点与太阳的连线在地平面上的投影和正南方向之间的夹角, 称太阳方位角。其中, 入射阳光与一般倾斜平面法线之间的夹角 θ 可表示为:

$$\cos \theta = (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \cos \gamma_n \sin \beta \sin \delta) + (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \cos \gamma_n \sin \beta) \cos \delta \cos \omega \quad (2)$$

式中: φ 为组件安装地纬度, ω 为时角, 有:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (3)$$

进一步, 对于朝向正南的任意倾斜平面, $\gamma_n = 0$, 有:

$$\cos \theta = \sin(\varphi - \beta) \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega \quad (4)$$

倾斜面太阳直射辐照量(E_{td})主要与水平面太阳直射辐照量(E_{hd})有关, 二者关系可表示为(卓自想等, 2023):

$$K = \frac{E_{td}}{E_{hd}} \quad (5)$$

式中: K 为太阳直射辐照倾斜因子。

水平地面直射辐照量(E_{hd})可通过国家气象网站查询得到。工程中太阳直射辐照倾斜因子(K)的计算式为(Liu et al, 1960; 陈正洪等, 2013; 江娥, 2015):

$$K = \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (6)$$

由散射辐照原理可知, 理论精确计算地球表面的太阳散射辐照能是很困难的, 通常工程计算时假设太阳散射各分量具备各向同性, 该条件下倾斜面太阳散射辐照量(E_{ts})与水平面散射辐照量(E_{hs})的关系为:

$$E_{ts} = \frac{1 + \cos \beta}{2} E_{hs} \quad (7)$$

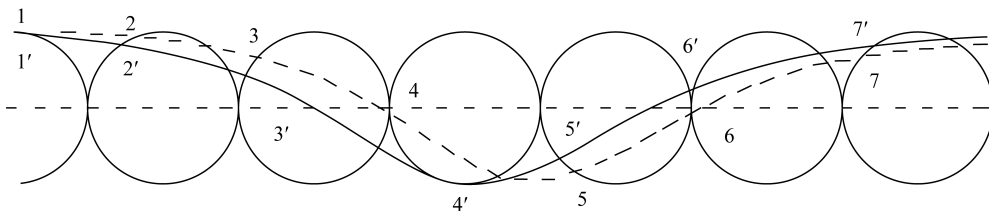


图2 波浪表面水质点运动轨迹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water particle motion trajectories on wave surfaces

太阳反射辐照量主要受地面反射率影响, 两者之间成正比关系, 地面反射率越大, 则倾斜面太阳反射辐照量 E_{tr} 越大(高赞等, 2017), 其计算式为:

$$E_{tr} = \rho E_h \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (8)$$

式中: ρ 为地面反射率; E_h 为水平面上直射与散射总辐照量($E_{hd} + E_{hs}$)。

综上所述, 倾斜面接收的太阳辐照量计算公式为:

$$E_t = KE_{hd} + \frac{1 + \cos \beta}{2} E_{hs} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} (E_{hd} + E_{hs}) \quad (9)$$

1.2 基于波浪影响的摆动倾斜面辐照能接收分析

对于近海漂浮式光伏电站, 组件均固定安装在浮体上, 同步随浮体结构受海浪作用不断做沉升、倾摆和平移运动, 这导致光伏组件的有效辐照接收面积时刻在变化, 进而影响到电量输出, 可见波浪对近海漂浮式光伏发电量的影响不可简单忽略。与固定平面式组件相比, 经简单分析可知在几种波浪随动影响中, 光伏组件在水平和垂直方向的平动基本不会造成辐照量接收差异, 一定程度的倾斜角度摆动才是对系统发电量影响最为明显的关键, 因此下面将进行着重分析。

1.2.1 浮体运动分析

首先, 值得注意的是, 受季风影响, 我国大部分近海海域波浪呈现波高(h)小, 波长(l)大的特点, 因此波陡(d)普遍较小($d = h/l \leq 1$)。例如, 我国江苏北部近海海域, 其平均波高不足 1m, 平均周期为 5s, 平均波长为 39m, 可计算得 $d=0.025$ (邱文博等, 2021)。针对我国大部近海海域波浪实际情况, 本研究采用线性波浪理论, 以波浪波陡 d 为小值的理想条件为前提, 研究波高、频率、运动方向单一的规则波对浮体运动的影响, 忽略波浪表面非线性成分, 对波浪运动进行线性化处理(Charlotte et al, 2011)。

下面分析浮体在规则波影响下的运动情况。根据相关研究, 波浪运动中, 表面各质点在深水区域的运动轨迹近似为圆形, 并且此时水面处的圆半径达到最大值。这种现象可以通过波动理论和流体动力学的原理来解释。如图 2 所示, 在浅水区, 水质点的运动轨迹依然保持圆形, 但其水平半轴和垂直半轴会随着水深的

增大而逐渐减小。这意味着近岸区域的水质点运动受到水深变化的显著影响。虽然每个水平位置的质点都参与类似的运动,但由于深度的不同,它们的相位表现出明显的差异(何啸, 2014)。

具体来看,在时间 t_0 时刻,波面上的各质点依次处于位置 1、2、3、4 等,而在 t_1 时刻,这些质点则移动到新位置 1'、2'、3'、4' 等。根据波浪理论,若某表面漂浮物的几何尺寸相较波长较小,且物体质量较轻,它的运动轨迹可以近似等同于在波浪表面作质点运动。漂浮在水面的结构物始终处于摇摆状态,其运动规律可以视为围绕平台质心的平移运动与摆动相结合的综合表现(金振逸等, 2011)。

综上,浮体在规则波影响下的运动由两个主要部分构成:首先是质心的逐步平移,体现了波浪的传播作用;其次则是围绕质心的周期性摆动,这种摆动受波浪的起伏影响,导致浮体在上下和左右方向上产生相应的变化。

因此,基于我国大部分近海海域波浪实际情况,考虑本研究发电量测算时间跨度以年为单位,忽略个别时段的极端海况,采用一阶 Stokes 波理论模拟线性波运动变化对光伏组件的影响,其速度势函数和波面方程为:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \frac{gh}{2\sigma} \frac{\cosh[k(z+i)]}{\cosh[ki]} \sin(kx - \sigma t) \\ \eta_1 &= \frac{h}{2} \cos(kx - \sigma t)\end{aligned}\quad (10)$$

式中: Φ_1 为速度势函数; g 为重力加速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); h 为波高(单位: m), 即相邻波峰与波谷的垂直距离; σ 为圆周频率(单位: $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$); k 为波数(单位: $\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$); z 为水质点垂直坐标; i 为水深(单位: m); x 为水质点水平坐标; t 为时间(单位: s); η_1 为波面方程(单位: m)

将式(10)中一阶 Stokes 波的波面方程对位置求导后取反正切函数可得线性波的波倾角时域表达式,即为各时段波浪对光伏组件影响而导致的组件倾角变化:

$$\tau(t) = \frac{d\eta}{dx} = -\tan^{-1}[kh \sin(kx - \sigma t)] \quad (11)$$

1.2.2 规则波作用下光伏辐照能计算

当浮体尺寸相对于海浪波长较小时,海浪表面的浮体运动可视为海浪表面海水质点的运动,相比于海浪波长,目前海上光伏结构设计多为小尺度浮体柔性连接而成的柔性结构物,运动状态与波浪基本一致。因此,本研究假设光伏板随波浪运动导致的倾角等于波倾角。此时光伏板的倾角为水平面初始倾角(β)与

波倾角 $\tau(t)$ 的叠加,记任意时间光伏板倾角为 $\beta'(t)$,其表达式为:

$$\beta'(t) = \beta + \tau(t) \quad (12)$$

因此,规则波作用下倾斜面的辐照量记为 $E_{ht}(t)$,其计算公式为:

$$\begin{aligned}E_{ht}(t) &= K'E'_{hd} + \frac{1 + \cos[\beta'(t)]}{2} E'_{hs} + \\ &\quad \rho \frac{1 - \cos[\beta'(t)]}{2} (E'_{hd} + E'_{hs})\end{aligned}\quad (13)$$

式中: E'_{hd} 、 E'_{hs} 为规则波作用下,光伏板接收的太阳直射和散射的辐照量(单位: $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$),且有:

$$K' = \frac{\cos[\varphi - \beta'(t)] \cos \delta \cos \omega + \sin[\varphi - \beta'(t)] \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (14)$$

采用辐照能效率(η)和时均倾角(ε)的概念量化波浪影响下的倾斜面等效辐照量以及波浪对光伏板的长期作用。为了分析浮体运动对接受辐照能的影响,考虑一个规则波周期内的太阳辐照能(E_{wp})为:

$$E_{wp} = \int_0^T E_{ht}(t) dt \quad (15)$$

式中: T 为一个规则波周期(单位: s)。

相应的,处于相同纬度相同倾角的固定式光伏板所接收的辐照能(E_{fp})为:

$$E_{fp} = \int_0^T E_t(t) dt \quad (16)$$

通过对比波浪作用下光伏板所接收的辐照能(E_{wp})与固定式光伏板所接收的辐照能(E_{fp})之比来评价波浪作用对光伏板光照效能的影响。辐照能效率(η)为:

$$\eta = \frac{E_{wp}}{E_{fp}} \quad (17)$$

下面对辐照能效率(η)受波浪周期影响做定量分析。

在一天之内太阳光照射角度是随时变动的,而在赤纬角为 0° 及太阳光直射(正午时)光伏板发电效率最高,是光伏板的主要发电时间。由于 η 为辐照能比值,下面主要考虑在受阳光直射时光伏板发电受波浪的影响,同时也可简化计算。采用现有项目的数据、如太阳辐照量、安装地纬度、初始安装角度、平均波高、平均波浪周期等,根据上述公式分别计算倾角函数、固定式光伏及漂浮式光伏接收的辐照能,最后计算出辐照能效率(η),以此研究单位波高的一阶 Stokes 波下 η 与波浪周期的关系,如图 3 所示。

图 3 为波浪周期 2~6s 的辐照能效率变化曲线。在单位波高下,波浪周期越小,各倾角光伏板的 η 随之

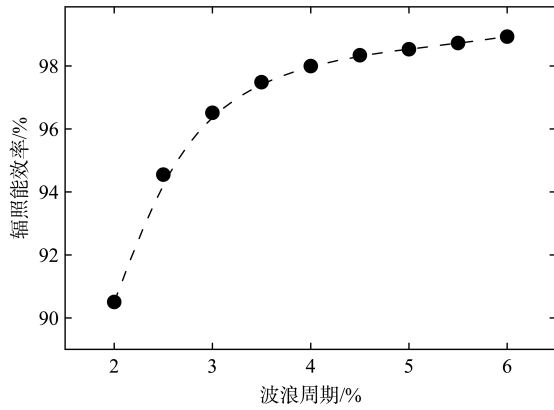


图3 辐照能效率与波浪周期的关系曲线

Fig. 3 Relationship between irradiation energy efficiency and wave period

减小, 在 2s 周期时低至 91% 左右, 而波浪周期越大, 各倾角光伏板的 η 随之增大, 直至接近 100%, 说明波浪作用对光伏板发电效能影响随周期减小而增大。这可以解释为单位波高下, 波浪周期越小则波数越大, 波倾角变化频率越大, 因此对 η 的影响越大。这一分析与已有文献对辐照能效率(η)与波浪周期关系的分析一致(鲁文鹤等, 2023)。尤其, 对于我国华东区域大部分近海海域, 由上述分析可知当赤纬角和时角为 0° 时, 光伏板的 η 接近 100%。

波倾角由波高和周期共同决定, 单一的波高或周期变量并不能直观展现出波浪运动对 η 的影响。考虑到波浪运动导致的光伏板发电量变化是时间累积问

$$\eta = \frac{\int_0^T \left\{ K'' E'_{hd} + \frac{1 + \cos[\beta''(t)]}{2} E'_{hs} + \rho \frac{1 - \cos[\beta''(t)]}{2} (E'_{hd} + E'_{hs}) \right\} dt}{\int_0^T \left[K E_{hd} + \frac{1 + \cos \beta}{2} E_{hs} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} (E_{hd} + E_{hs}) \right] dt} \quad (22)$$

$$= \frac{K'' E'_{hd} + \frac{1 + \cos[\beta''(t)]}{2} E'_{hs} + \rho \frac{1 - \cos[\beta''(t)]}{2} (E'_{hd} + E'_{hs})}{K E_{hd} + \frac{1 + \cos \beta}{2} E_{hs} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} (E_{hd} + E_{hs})}$$

以上述同一项目数据计算, 包括组件初始安装倾角为 14° 等, 根据式(22)计算当赤纬角与时角为 0° 时(即春分日正午), 其 η 与 ε 之间的关系见图 4。

由图 4 可知, 随时均倾角(ε)从 0° 增加至 28° , 辐照能效率随着时均倾角的增大而减小, 且减小速率随着 ε 的增大而增大, 显而易见当 ε 越大说明光伏板倾角变化越剧烈, 光伏板倾斜程度越大, 导致光伏组件正面接收的太阳直射辐照量减小, 继而导致漂浮式光伏系统发电量降低, 即辐照能效率(η)减小, 该分析与已有文献对辐照能效率与时均倾角关系的分析一致(鲁文鹤等, 2023)。

题, 与光伏板倾角变化程度和处于不同倾角时所持续的时间有关, 为直观量化体现波浪的影响, 本研究采用时均倾角(ε)概念, 即为浮体在波浪作用下运动倾角绝对值的时域平均值(鲁文鹤等, 2023)。其数学表达如下式:

$$\varepsilon = \frac{\int_{T_1}^{T_2} |\tau(t)| dt}{T_2 - T_1} \quad (18)$$

式中: T_1 为一段时间起始时间点(单位: s); T_2 为一段时间终末时间点(单位: s)。

时均倾角直观体现了波浪长期作用下浮体横摇或纵摇的响应程度, 可量化波浪对光伏板倾角影响的长期作用。因此可将规则波作用下光伏板的时均倾角表示为:

$$\beta''(t) = \beta + \varepsilon \quad (19)$$

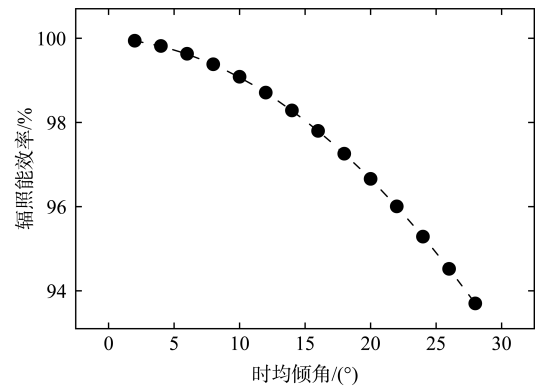
相应地, 规则波作用下倾斜面的辐照量记为 $E_{ht}(t)'$, 其计算公式也可为:

$$E_{ht}(t)' = K'' E'_{hd} + \frac{1 + \cos[\beta''(t)]}{2} E'_{hs} + \rho \frac{1 - \cos[\beta''(t)]}{2} (E'_{hd} + E'_{hs}) \quad (20)$$

相应地:

$$K'' = \frac{\cos[\varphi - \beta''(t)] \cos \delta \cos \omega + \sin[\varphi - \beta''(t)] \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (21)$$

因此, 利用时均倾角, 辐照能效率可计算为:

图4 14° 倾角光伏板的辐照能效率与时均倾角的关系曲线Fig. 4 Relationship between irradiation energy efficiency and time-averaged tilt angle for 14° tilted photovoltaic panels

2 近海漂浮式光伏系统发电量其他影响因素

对于近海漂浮式光伏发电系统,除去波浪运动影响组件辐照能吸收量这一主要特征外,还存在其他影响因素。

2.1 水面冷却效应

海水可通过蒸发、热传导、对流等形式,降低水面温度。因此,近海漂浮式光伏发电系统可以利用海水的冷却效应来提高光伏组件的效率(Refaa et al, 2022; 宋福龙等, 2023)。光伏组件正常工作时,电池片标准工作温度是 25°C,一般工作温度大于 25°C。电池片温度每升高 1°C, N 型单晶组件输出功率降低基准值 0.38%, P 型组件输出功率降低基准值 0.42%。夏季水体比地面吸收更多太阳辐照,水面蒸发吸收大量热能起到冷却作用。

与空气温度相比,预测和获取水温非常困难,水温受到气温、太阳辐照、相对湿度、风速、气压和水特

性等因素影响。其中,最重要的影响因素是气温和相对湿度,与水温存在强耦合关系。基于此,可采用气温和相对湿度近似估计水温(李克锋等, 2006):

$$\theta_w = 4.717e^{0.041\theta_a} \frac{(1+RH^2)^{0.781}}{(1+0.325v^2)^{0.0325}} \quad (23)$$

式中: θ_w 为水温(单位: °C); θ_a 为气温(单位: °C); RH 为相对湿度(单位: %); v 为水面风速(单位: $m \cdot s^{-1}$)。

2.2 双面组件发电量增益

以往研究指出海水反射率高于陆地各种地面(郭连贵等, 2012),如表 1 所示。光伏组件随浮体漂浮在海面上,组件背面接受辐照量,提高发电量的作用不可忽略。此外,双面组件常采用一体化玻璃封装,密封性能、耐腐蚀性能较好,能有效提高组件在海洋环境中的运行寿命。因此,本研究计及光伏组件背面对总发电量的正向影响。

表 1 不同环境表面的反射率

Tab. 1 Reflectance of different environmental surfaces

地面类型	反射率	地面类型	反射率	地面类型	反射率
干燥黑土	0.14	森林	0.04~0.10	市区	0.15~0.25
湿黑土	0.08	干沙地	0.18	岩石	0~0.15
干灰色地面	0.25~0.30	湿沙地	0.09	麦地	0.10~0.25
湿灰色地面	0.10~0.12	新雪	0.81	黄沙	0.35
干草地	0.15~0.25	残雪	0.46~0.70	高禾植物区	0.18~0.20
湿草地	0.14~0.26	水田	0.23	海水	0.35~0.50

2.2.1 基于等效辐照法的双面组件辐照量

以往研究引入视角系数的概念,通过建模,计算出各视角系数的几何关系,对水平面直射辐照量、散射辐照量进行加权,等效成相应倾斜面正、背面接受的总辐照能(廖东进, 2021; 韩硕等, 2023)。但实际上,光伏组件接受光照情况较为复杂,造成该模型计算尤为困难。

为了简化计算,工程常采用等效辐照法来计算光伏组件接受的辐照量,所谓等效辐照法即采用一定比例将组件背面接受的辐照量折算到组件正面,将组件正面的铭牌参数作为统一计算参数,这里的一定比例即为组件双面率,记为 λ ,此时,固定倾角双面组件接受的总辐照量 E_{sum} 可写为(石文胜, 2020):

$$E_{\text{sum}} = E_{\text{tf}} + E_{\text{tb}} \times \lambda \quad (24)$$

式中: E_{tf} 、 E_{tb} 分别表示光伏正面、背面的辐照量(单位: $kW \cdot h \cdot m^{-2}$)。相应地,加入前文所述规则波作用下光伏组件正面辐照能效率(η),则规则波作用下的双面光伏组件接收的等效辐照量 E'_{sum} 为:

$$E'_{\text{sum}} = \eta(E_{\text{tf}} + E_{\text{tb}} \times \lambda) \quad (25)$$

2.2.2 背面辐照量实用化计算

为了对背面辐照量进行计算,本研究对天空各向同性散辐照模型进行修正。此时,对于背面而言,倾斜角为 β 的补角 $180^\circ - \beta$,这使得地面反射辐照量分量比原模型更高。此外,需改变背面直射辐照量的比例。正面的入射角和直射辐照量比例根据第 1 节进行计算,计算过程中包括了纬度、倾斜角、时角和表面方位角等参数。当入射角大于 90° 时(即太阳位于背面表面时),参照正面太阳直射辐照倾斜因子 K_r ,使用 K_r 来表征背面太阳直射辐照倾斜因子。背面的直射分量是由太阳路径的对称性所导致,只有在日出和日落时背面才有直射分量。背面不同部分接收到的水面反射辐照量因高度的差异而不同(Durusoy et al, 2020)。因此,可使用一个修正因子 f :

$$E_{\text{tb}} = K_r E_{\text{hd}} + \frac{1 - \cos \beta}{2} E_{\text{hs}} + \rho f \frac{1 + \cos \beta}{2} (E_{\text{hd}} + E_{\text{hs}}) \quad (26)$$

为了考虑不同高度接收辐照值的差异,可以使用高度的分布函数 $f(s)$,从而推导出修正因子的平均值。该函数应在光伏板距水面最小和最大高度的区间内积分。由于底部到顶部的背面辐照增加不均匀,我

们使用指数分布函数对 $f(s)$ 进行建模:

$$f(s) = 1 - e^{-s/s_c} \quad (27)$$

式中: s 为任意时刻高度(单位: m); s_c 表示临界高度常数(单位: m)。

假定中间长度的分布函数值为 0.5, 可通过计算确定参数 s_c 。例如, 光伏高度为 $h_1 \sim h_2$ 时有:

$$1 - e^{-\frac{h_1+h_2}{2s_c}} = 0.5 \quad (28)$$

式中: h_1 和 h_2 分别表示光伏板离水面最小和最大高度(单位: m)。

$$\text{计算可得 } s_c = \frac{h_1+h_2}{2\ln 2}。$$

平均修正因子 (F) 可根据公式(29)计算:

$$F = \int_{h_1}^{h_2} (1 - e^{-s/s_c}) ds \quad (29)$$

因此, E_{tb} 计算式可表示为:

$$E_{tb} = K_r E_{hd} + \frac{1 - \cos \beta}{2} E_{hs} + \rho F \frac{1 + \cos \beta}{2} (E_{hd} + E_{hs}) \quad (30)$$

2.3 近海漂浮环境下的发电量损失

相较于内陆光伏, 近海漂浮式光伏电站在项目所处地理环境上存在较大的不同, 但对于整个电气系统的技术组成方案, 漂浮光伏与内陆光伏在拓扑上区别并不大。对于独特的近海漂浮式光伏发电系统, 主要在组件吸收太阳辐照能, 以及组件完成光电能量转换两个阶段, 受制于独特的地理环境和气象因素, 从而影响到发电效率。针对这两个发电阶段梳理出的影响因素, 进一步分析可知, 对于入射角度和弱光情况响应, 海上漂浮光伏与内陆光伏的区别不大, 阴影遮挡、表面污秽、组件失配等情况大有不同。

2.3.1 近海漂浮环境下的阴影遮挡损失

海上的强风浪会对组件的定位带来巨大影响, 在潮汐波浪力的作用下, 光伏组件无法长时间保持在一个稳定的倾角和朝向, 而是会随波浪周期性做各向运动, 组件在短时间内可能朝向东西南北各个方向各个角度, 从而影响到组件能够接收到的太阳辐照量。这在内陆是不可能发生的现象, 也是本研究认为的一种更为独特的“阴影遮挡损失”。

2.3.2 近海漂浮环境下的表面污秽损失

相较于内陆光伏电站, 由于海洋环境的独特性, 灰尘积累并不是近海漂浮式光伏表面污秽损失的最大影响因素。经分析, 海洋环境下组件表面污秽主要有两大来源: 1) 盐渍。由于组件在运行中不可避免的会经常溅到海水, 当水分蒸发后就会形成局部或整体盐渍, 造成表面污秽。2) 生物附着物。由于海洋环境

较为恶劣, 海鸟的排泄物、海洋微生物(包括细菌、藻类、轮虫、贝类等)等对浮体的侵蚀都会造成组件表面污秽。

尤其要注意的是, 由于海洋运维的不便性, 针对海上漂浮式光伏组件后期的清洗维护, 目前还只能考虑以自然降水冲刷为主, 人工洗刷为辅, 自动清洗机器人短期内还不具备可行性。这无疑从另一方面放大了组件遮挡、表面膜及涂层腐蚀、浮体加重等问题, 影响到了系统发电量和效率。

2.3.3 近海漂浮环境下的衰老损失

在高温、高湿、高盐雾的环境下, 海上的盐分、湿度等强腐蚀性物质将直接破坏组件保护层, 水汽渗入造成乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(ethylene vinyl acetate copolymer, EVA)水解生成醋酸, 醋酸和玻璃中的钠元素反应, 生成大量自由移动的钠离子, 钠离子与银栅线反应, 从而腐蚀电池栅线, 导致串联电阻的升高, 造成不可逆的组件性能衰减。海边盐度均值为 $12.4\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ~ $60\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (陆上大气中盐度均值仅为 $0.8\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), 盐雾强腐蚀性造成电化学反应, 自由电子析出, 会危害电池、组件、浮体性能。此外高温高湿环境也会加剧电位诱导衰减(potential induced degradation, PID)效应, 加速组件老化。

针对上述损失因素, 结合光伏系统转化效率, 采用综合效率系数 P 表征近海漂浮环境下各项损失, 具体场址 P 值均不尽相同, 应按实际区分估算(牛高远 等, 2016)。

3 近海漂浮式光伏发电系统发电量测算模型

若采用国家规范中规定的算法计算年发电量(GB50797-2012)(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012), 漂浮式光伏年发电量可利用下面的公式进行测算:

$$E_p = E'_{sum} \frac{P_{az}}{E_s} P [1 - \xi(\theta_w - \theta_s)] \quad (31)$$

式中: E_p 为漂浮式光伏年发电量(单位: $\text{kW}\cdot\text{h}$); ξ 为温度系数, θ_w 为水表温度(单位: $^{\circ}\text{C}$); θ_s 为标准测试条件下的温度(单位: $^{\circ}\text{C}$); P_{az} 为目标场址光伏装机容量(单位: kW); E_s 为标准测试条件下的太阳辐照量, 取值 $1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

为验证本研究所提测算模型, 选用两个漂浮式光伏场址作为对比参照, 分别为场址 1、场址 2。查询场址所在地 Meteororm 数据库中的历年平均太阳辐照度, 并根据 Klein 模型计算出倾斜面所接收的太阳辐照度。表 2 所示为场址 1 月均太阳辐照情况。

表 2 场址 1 太阳辐照数据

Tab. 2 Solar irradiance data for Site 1

月份	总辐照/(kW·h·m ⁻²)	散射辐照/(kW·h·m ⁻²)	直射辐照/(kW·h·m ⁻²)
1 月	80.42	47.81	32.61
2 月	81.57	50.65	30.92
3 月	109.90	69.14	40.76
4 月	120.31	74.44	45.87
5 月	133.83	79.61	54.22
6 月	146.52	74.10	72.42
7 月	195.24	77.91	117.33
8 月	176.52	76.61	99.91
9 月	143.94	70.03	73.91
10 月	116.62	63.61	53.01
11 月	81.83	48.71	33.12
12 月	77.93	45.32	32.61

此外, 根据报告中 2 个场址的总装机容量、综合发电效率系数等参数, 结合太阳辐照度, 采用标准法可理论推算月平均发电量及年均总发电量。相同地, 利用上述场址的外部参数, 如水文气象条件、月太阳辐照量、效率系数等, 采用本研究光伏发电量测算模型, 可计算出相同场址下的月平均及年均总发电量, 如表 3 所示。

表 3 场址 1、2 理论发电量与本模型测算发电量(单位: kW·h)对比

Tab. 3 Comparison between theoretical energy generation and model-estimated energy generation for Sites 1 and 2 (unit: kW·h)

月份	场址 1	本模型 1	场址 2	本模型 2
1 月	9961.37	10554.55	20636.69	22087.56
2 月	8388.14	9120.45	18929.31	20423.23
3 月	11282.42	12341.89	24158.84	26186.04
4 月	12714.52	14016.87	24694.25	26927.05
5 月	14076.05	15573.00	26873.04	29357.16
6 月	13301.89	14744.15	28807.16	31504.27
7 月	15663.81	17344.61	38028.63	41580.09
8 月	14130.01	15614.22	35365.16	38580.75
9 月	12033.76	13219.37	30057.62	32684.38
10 月	10957.61	11933.74	26927.98	29047.51
11 月	10085.90	10792.34	20298.87	21781.64
12 月	7662.75	8294.58	21259.63	22651.41
全年	约 140258	约 153549	约 316037	约 342811

由表 3 可知, 对于场址 1, 本研究所提方法的光伏年总发电量测算值与理论值相差约 9.4%, 对于场址 2, 本研究所提方法的光伏年总发电量测算值与理论值相差约 8.4%, 均在 10%以内, 符合预期差值限度, 可见本研究所提方法能很好测算海上光伏长期发电量, 为近海漂浮式光伏工程建设提供潜在参考价值。

4 总结与展望

海上漂浮式光伏发电的装机潜力大、投资强度高、带动作用强, 对沿海地区能源结构的改善效果显著, 逐渐成为国内外研究热点。针对国内外近海海域光伏漂浮系统技术研究缺失现状, 本研究详细分析了

陆面光伏与近海漂浮光伏的联系与区别, 确定了影响海上漂浮光伏发电量的主要特征影响因子, 包括波浪影响、海面反射增益及水面冷却效应, 基于国内外主流发电量测算理论, 结合波浪力学、浮体水动力学及视角系数理论, 并统筹考虑组件失配、阴影遮挡、海洋生物附着等不利因素, 创新性提出规则波作用下光伏发电量实用化测算模型。

本研究将所提模型与目标场址进行测算对比, 结果显示所提测算模型的测算差值较小, 均保持在 10%以内, 具备较好理论精度。随着后期近海漂浮式光伏项目的陆续开发, 将根据实际情况不断完善优化模型参数以满足不同项目的发电量测算需求。

参考文献 References

陈正洪, 孙朋杰, 成驰, 等, 2013. 武汉地区光伏组件最佳倾角的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 33(34): 98–105. CHENG ZHENGHONG, SUN PENGJIE, CHENG CHI, et al, 2013. Experimental research on the optimal tilted angle for PV

- modules in Wuhan[J]. Proceedings of the CSEE, 33(34): 98–105 (in Chinese with English abstract).
- 高赞, 赵娜, 贺文山, 等, 2017. 水上光伏电站设计要点和经济性分析[J]. 太阳能, (6): 18–22 (in Chinese).
- 郭连贵, 2012. 太阳能光伏学[M]. 北京: 化学工业出版社 (in Chinese).
- 韩硕, 胡坚柯, 韩一峰, 等, 2023. 双面光伏组件建模及发电性能研究[J]. 太阳能学报, 44(9): 95–100. HAN SHUO, HU JIANKE, HAN YIFENG, et al, 2023. Research on modeling and power generation performance of bifacial photovoltaic module[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 44(9): 95–100 (in Chinese with English abstract).
- 何啸, 2014. 海洋漂浮式光伏发电装置性能研究[D]. 宁波: 宁波大学: 1–63. HE XIAO, 2014. Research of properties of ocean floating photovoltaic device[D]. Ningbo: Ningbo University: 1–63 (in Chinese with English abstract).
- 江娥, 2015. 武汉市光伏组件安装的最佳倾角分析[D]. 武汉: 武汉工程大学: 1–68. JIANG E, 2015. An investigation on the optimum tilt angle of PV modules installed in Wuhan[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology: 1–68 (in Chinese with English abstract).
- 金振逸, 马少杰, 2011. 基于线性波浪理论的海上浮体受力及运动分析[J]. 四川兵工学报, 32(8): 135–137 (in Chinese).
- 李华军, 刘福顺, 杜君峰, 等, 2022. 海洋工程发展趋势与技术挑战[J]. 海岸工程, 41(4): 283–300. LI HUAJUN, LIU FUSHUN, DU JUNFENG, et al, 2022. Development trend and technical challenges of ocean engineering[J]. Coastal Engineering, 41(4): 283–300 (in Chinese with English abstract).
- 李克锋, 郝红升, 庄春义, 等, 2006. 利用气象因子估算天然河道水温的新公式[J]. 工程科学与技术, 38(1): 1–4. LI KEFENG, HAO HONGSHENG, ZHUANG CHUNYI, et al, 2006. A new method for predicting water temperature of river by using meteorological factors[J]. Advanced Engineering Sciences, 38(1): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- 廖东进, 黄志平, 方晓敏, 等, 2021. 双面光伏组件辐照度模型的研究[J]. 太阳能学报, 42(2): 471–476. LIAO DONGJIN, HUANG ZHIPING, FANG XIAOMIN, et al, 2021. Analysis of solar radiation model for bifacial PV modules[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 42(2): 471–476 (in Chinese with English abstract).
- 鲁文鹤, 练继建, 董霄峰, 等, 2023. 波浪作用对海上漂浮式光伏光照辐照能的影响[J]. 水力发电学报, 42(5): 35–42. LU WENHE, LIAN JIJIAN, DONG XIAOFENG, et al, 2023. Effect of sea waves on radiant energy of floating photovoltaic[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 42(5): 35–42 (in Chinese with English abstract).
- 牛高远, 王以笑, 龚晓伟, 等, 2016. 基于 PVsyst 的分布式并网光伏发电系统效率分析与优化研究[J]. 可再生能源, 34(2): 196–202. NIU GAOYUAN, WANG YIXIAO, GONG XIAOWEI, et al, 2016. Study of efficiency analysis and optimization for distributed grid-connected photovoltaic power generation systems based on PVsyst[J]. Renewable Energy Resources, 34(2): 196–202 (in Chinese with English abstract).
- 邱文博, 李冠宇, 徐俊臣, 等, 2021. 黄渤海海域波浪时空变化特征分析[J]. 海洋科学, 45(7): 1–8. QIU WENBO, LI GUANYU, XU JUNCHEN, et al, 2021. Spatial and temporal variation characteristics of the waves in the Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 45(7): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- 石文胜, 2020. 双面光伏发电系统的建模及最大功率点跟踪算法研究[D]. 保定: 河北大学: 1–67. SHI WENSHENG, 2020. The research of fall prediction method based on surface electromyography[D]. Baoding: Hebei University: 1–67 (in Chinese with English abstract).
- 宋福龙, 陈晨, 张雯悦, 等, 2023. 省域水上光伏发电潜力分析评估方法及应用[J]. 全球能源互联网, 6(1): 33–44. SONG FULONG, CHEN CHEN, ZHANG WENYUE, et al, 2023. Method for potential analysis and evaluation of water PV power generation within a province[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 6(1): 33–44 (in Chinese with English abstract).
- 宋肖锋, 陈作钢, 肖福勤, 等, 2020. 漂浮式光伏电站方阵风荷载数值研究[J]. 太阳能学报, 41(10): 136–143. SONG XIAOFENG, CHEN ZUOGANG, XIAO FUQIN, et al, 2020. Numerical research on wind load of floating solar power plants[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 41(10): 136–143 (in Chinese with English abstract).
- 孙杰, 2017. 水上光伏电站应用技术与解决方案[J]. 太阳能, (6): 32–35 (in Chinese).
- 肖福勤, 陈作钢, 代焱, 等, 2020. 漂浮式光伏电站方阵环境荷载计算方法研究[J]. 工程力学, 37(3): 245–256. XIAO FUQIN, CHEN ZUOGANG, DAI YI, et al, 2020. Numerical method study on environmental loads of floating photovoltaic power array[J]. Gineering Mechanics, 37(3): 245–256 (in Chinese with English abstract).
- 张木梓, 王艺澄, 2020. 全球水上光伏产业的发展现状及市场前景分析[J]. 太阳能, 7: 19–24. ZHANG MUZI, WANG YICHENG, 2020. Global floating PV industry development status and market prospect analysis[J]. Solar Energy, (7): 19–24 (in Chinese with English abstract).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012. 光伏电站设计规范: GB50797-2012[S]. 北京: 中国计划出版社(in Chinese).
- 卓自想, 段士伟, 任静, 2023. 武汉地区光伏电站理论年发电量的计算研究[J]. 太阳能, 347(3): 30–37. ZHUO ZIXIANG, DUAN SHIWEI, REN JING, 2023. Research on calculation of theoretical annual power generation capacity of PV power stations in Wuhan region[J]. Solar Energy, 347(3): 30–37 (in Chinese with English abstract).
- CHARLOTTE B, PETER T, JENS P K, et al, 2011. A methodology for production and cost assessment of a farm of wave energy converters[J]. Renewable Energy, 12(36): 3402–3416.
- DURUSOY B, OZDEN T, AKINOGLU B G, 2020. Solar irradiation on the rear surface of bifacial solar modules: a

- modeling approach[J]. *Scientific Reports*, 10: 13300.
- LIU B Y H, JORDAN R C, 1960. The interrelationship and characteristics and distribution of direct, diffuse, and total solar radiation[J]. *Solar Energy*, 4(3): 1–19.
- PADOVAN A, DEL COL D, 2010. Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes[J]. *Solar Energy*, 84(12): 2068–2084.
- PAN YUANCHAO, DAI ZHUHANG, MA HAOXIANG, et al, 2024. Self-powered and speed-adjustable sensor for abyssal ocean current measurements based on triboelectric nanogenerators[J]. *Nature Communications*, (15): 6133.
- REFAAI M R A, DHANESH L, GANTHIA B P, et al, 2022. Design and implementation of a floating PV model to analyse the power generation[J]. *International Journal of Photoenergy*, (2022): 1–13.
- SHI WEI, YAN CHAOJUN, REN ZHENGRU, et al, 2023. Review on the development of marine floating photovoltaic systems[J]. *Ocean Engineering*, 286(1): 115560.
- SUN XIN, SHANGCHENJING, MA HAOXIANG, et al, 2022. A tube-shaped solid-liquid-interfaced triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for efficient ocean wave energy harvesting[J]. *Nano Energy*, (100): 107540.
- XU QINGYUE, SHANG CHENJING, MA HAOXIANG, et al, 2023. A guided-liquid-based hybrid triboelectric nanogenerator for omnidirectional and high-performance ocean wave energy harvesting[J]. *Nano Energy*, (109): 108240.