

# 高海拔光伏电站光伏组串的优化设计

李翔

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

**摘要:**目前,光伏电站在高海拔地区建设的情况愈来愈多,因高海拔导致的环境温度降低、逆变器降容、辐照度变化等情况均对光伏组件串联数的设计产生了较大影响,单一采用《光伏电站设计规范》GB 50797-2012 中的公式计算具有一定的局限性。通过综合考虑项目所在地海拔、辐照度、环境温度、光伏组件温度等影响因素,结合国标及 IEC 相关规程规范,提出了计算光伏组件串联数的综合方法并予以应用,取得了较好的效果,相关经验可为类似情况的光伏电站组串设计提供参考。

**关键词:**光伏组串;高海拔;辐照度;开路电压

**中图分类号:**TK511;TK515;[TK514]

**文献标志码:** B

**文章编号:**1001-2184(2024)02-0098-05

## Optimization Design of Photovoltaic String for High-altitude Photovoltaic Power Stations

LI Xiang

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 611130)

**Abstract:** At present, the construction of photovoltaic power stations in high-altitude areas is becoming more and more common. However, the environmental temperature reduction, inverter capacity reduction, and changes in irradiance caused by high altitude have a significant impact on the design of the series connections of photovoltaic modules. Single use of the formula in the "Code for design of photovoltaic power station" GB 50797 - 2012 has certain limitations. By comprehensively considering factors such as altitude, irradiance, environmental temperature, and photovoltaic module temperature in the project location, combined with national standards and relevant IEC regulations, a comprehensive method for calculating the number of photovoltaic module series connections has been proposed and applied, achieving good results. The relevant experience provides reference for the design of photovoltaic power station series in similar situations.

**Keywords:** Photovoltaic String; High altitude; Irradiance; Open circuit voltage

### 1 概述

近年来,国家以碳达峰碳中和为目标,多措并举推动光伏发电项目的装机容量再创新高。为适应光伏发电项目的发展形势,从用地政策层面、设备制造层面都推动着光伏项目向高海拔高寒地区拓展,愈发极端的运行环境对光伏组件组串设计的科学性与安全性提出了更高的要求。

光伏组串的组件串联数量直接影响到整个光伏电站的容配比选择、材料数量以及用地范围等,合理提高组件串联的数量可以缩小用地范围、减少支架用量、降低直流线损,对光伏系统整体效率的提升和 LOCE 的降低具有决定性的作用。笔者基于四川省某高海拔地区光伏项目光伏系统的

设计过程,在考虑气温修正后的参数选取、太阳辐照度对气温的影响等因素后总结归纳出优化后的光伏组串设计思路。

### 2 研究对象

笔者以四川省某高海拔地区光伏项目作为研究对象。该项目场址以缓坡为主,平均坡度为 $5^{\circ}$ ~ $20^{\circ}$ ,场址高程为 3 200~4 200 m,属于典型的高海拔光伏项目。距离项目中心最近的气象站约 40 km,为国家基本气象站,海拔 2 545 m,可作为该项目的参证气象站。记录的极端最高气温为 $32.5^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温为 $-11^{\circ}\text{C}$ 。场址内设有一座测光塔,海拔高度为 3 386 m,其已有 2019 年 5 月至 2021 年 4 月 2 a 时间内的逐小时温度数据。

该项目选用 N 型单晶硅 Topcon 580 Wp 双

收稿日期:2023-12-20

玻双面组件进行设计,逆变器选用 1 500 V 系统 228 kW 组串式逆变器(该逆变器在海拔 4 000 m 以上需要降容使用)。标准测试条件(STC)下的光伏组件相关参数见表 1,逆变器的相关参数见表 2,逆变器的降容特性见表 3。

表 1 光伏组件相关参数表

| 项 目                   | 参 数                |
|-----------------------|--------------------|
| 型号                    | JKM580N-72HL4-BDV  |
| 最大功率 P <sub>max</sub> | 580 W <sub>p</sub> |
| 峰值电压 V <sub>mp</sub>  | 42.59 V            |
| 峰值电流 I <sub>mp</sub>  | 13.62 A            |
| 短路电流 I <sub>sc</sub>  | 14.37 A            |
| 开路电压 V <sub>oc</sub>  | 51.47 V            |
| 最大系统电压                | 1 500 V            |
| 组件效率                  | 22.45%             |
| 最大功率温度系数              | -0.30%/°C          |
| 开路电压温度系数              | -0.25%/°C          |
| 短路电流温度系数              | 0.046%/°C          |
| 工作温度                  | -40°C~85°C         |

表 2 逆变器相关参数表

| 项 目       | 参 数                     |
|-----------|-------------------------|
| 最大输入电压    | 1 500 V                 |
| MPPT 电压范围 | 550~1 500 V             |
| 工作环境温度    | -40°C~+60°C             |
| 允许海拔高度    | 5 000 m(4 000 m 以上降容使用) |

表 3 逆变器降容特性表

| 运行海拔高度 /m | 额定连续出力 /kW | 最大连续出力 /kW | 直流工作电压范围 /V | 额定交流电压 /V |
|-----------|------------|------------|-------------|-----------|
| ≤4 000    | 228.00     | 250.00     | 1 500.0     | 800.0     |
| 4 100     | 225.75     | 248.30     | 1 480.5     | 800.0     |
| 4 200     | 223.50     | 245.80     | 1 461.0     | 800.0     |

### 3 项目设计优化与计算过程

#### 3.1 气象数据的修正

目前,仅采用《光伏电站设计规范》GB 50797-2012 中的相关公式计算对于“光伏组件工作条件下的极限低温”分析不足,可能会导致计算出的光伏组串串联数趋于保守。行业内已针对该问题进行了相关研究。王忆麟等<sup>[1]</sup>通过分析光伏组件工作条件下的极限温度与气象极限温度的区别,指出了常规计算时采用气象极限温度取值存在的问题;杨旭等<sup>[2]</sup>依据计算经验,进一步提出了以大量气象数据为基础来预测最低环境温度与太阳辐照度之间的关系。

笔者对该项目选取的参证气象站数据进行了

修正。气象站海拔高度为 2 545 m,极端最高气温为 32.5°C,极端最低气温为-11°C。设计优化时按照场址的实际最高海拔 4 200 m 进行了温度修正,海拔每升高 100 m,温度降低 0.6°C。修正场址海拔高度为 4 200 m 时,修正后的计算极端最低温度为-20°C。

笔者对该项目场址内的测光塔数据进行了修正。经分析辐照度与环境温度之间的对应关系可知,辐照度每升高 200 W/m<sup>2</sup>,环境温度升高约 5°C。为保守计算考虑,在辐照度为 0~200 W/m<sup>2</sup> 时的最低温度按照-20°C 计算,辐照度为 200~400 W/m<sup>2</sup> 时的最低温度按照-15°C 计算,辐照度为 400~1100 W/m<sup>2</sup> 时的最低温度按照-10°C 计算。

笔者对该项目光伏组件的工作温度与环境温度之间的关系进行了推导。根据《Photovoltaic system performance - Part2: Capacity evaluation method》IEC TS 61724-2 中附录 A 的相关内容<sup>[3]</sup>,光伏组件和电池片的工作温度可以按公式(1)~(3)推导得到。

$$T_m = G_{\text{meas}} \cdot [e^{(a+b \cdot WS)}] + T_a \quad (1)$$

式中: $T_m$  为计算出的光伏组件背面温度(°C); $G_{\text{meas}}$  为测得的光束 POA 辐照度(W/m<sup>2</sup>); $T_a$  为测得的环境温度(°C); $WS$  为修正到 10 m 高度的风速(m/s); $a$  为光伏组件玻璃系数; $b$  为强制对流玻璃系数(s/m); $e$  为自然对数底。

$$WS = WS_{\text{meas}} \cdot [H/H_{\text{meas}}]^{\alpha} \quad (2)$$

式中: $WS_{\text{meas}}$  为实测风速; $H$  为模型所使用的高度(通常为 10 m); $H_{\text{meas}}$  为测风仪高度(m); $\alpha$  为地面覆盖物的阻力系数或海爾曼指数。

组件背面和内部 PV 电池之间的传导温差可由式(3)计算得出:

$$T_c = T_m + (G_{\text{meas}}/1\,000 \text{ W/m}^2) dT_{\text{cond}} \quad (3)$$

式中: $T_c$  为计算得到的组件温度(°C); $dT_{\text{cond}}$  为传导温度系数,用以确定组件表面和电池中心之间的温度差异(°C);系数  $a$ 、 $b$  和  $dT_{\text{cond}}$  被定义为温度依赖性的一部分。

#### 3.2 光伏组件开路电压与辐照度的关系分析

李善寿等<sup>[4]</sup>针对现有光伏组件工程数学模型曲线拟合误差较大的问题,基于光伏电池的物理模型推导出开路电压与辐照度之间的函数关系,建立了以电压为输出的改进光伏组件工程数学模

型。该文献中推导出的光伏组件开路电压与辐照度关系见式(4)~(6)。在温度不变的条件下,忽略光伏电池等效并联电阻  $R_p$  的影响时,光伏组件开路电压与辐照度的关系近似为:

$$U_{oc} \approx U_T \ln \left( I_{sc0} \frac{G}{G_0} / I_0 + 1 \right) \quad (4)$$

$$I_0 \approx I_{sc0} / \left( e^{\frac{U_{oc0}}{U_T}} - 1 \right) \quad (5)$$

$$U_T = AkT/q \quad (6)$$

式中: $q$  为电子电荷,取值为  $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ;  $T$  为

电池温度,取值为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $k$  为 Boltzman 常数,取值为  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $A$  为 P-N 结等效二极管(非)理想因子,一般取值为  $1 \sim 1.25$ ;  $G_0$  为标准测试条件下的辐照度,取值为  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $I_0$  为标准测试条件下的电池温度,取值为  $298.16 \text{ K}$ 。

根据上述推算过程,结合拟选光伏组件的技术参数,经计算可得出不同辐射强度、不同温度下对应的单个组件的开路电压。不同的辐射强度、不同的温度下对应的单个组件的开路电压见图 1。

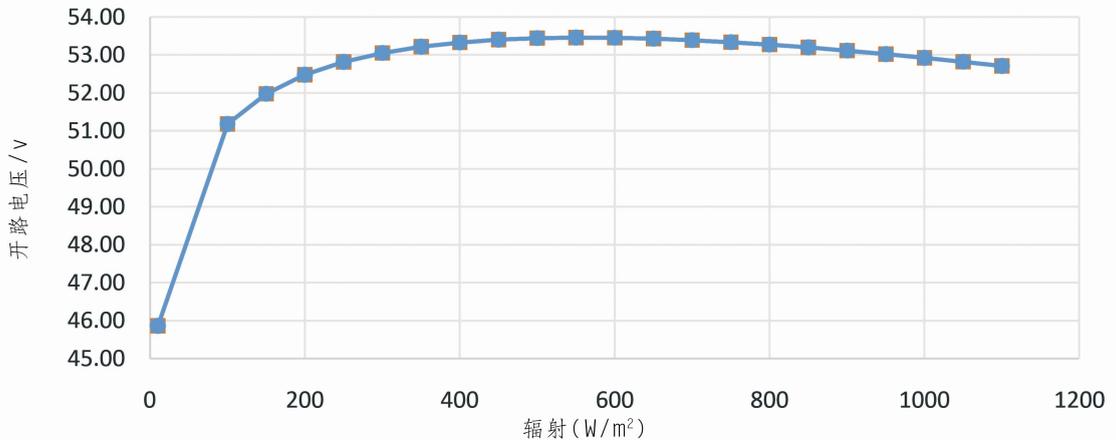


图 1 不同的辐射强度、不同的温度下对应的单个组件的开路电压示意图

### 3.3 计算依据

根据《光伏电站设计规范》<sup>[5]</sup> GB 50797-2012 中的 6.4.2 节要求,在光伏方阵中,同一光伏组件串中各光伏组件的电性能参数宜保持一致,其光伏组件串的串联数应按式(7)进行计算:

$$N \leq \frac{V_{dcmax}}{V_{oc} \times [1 + (t - 25) \times K_v]} \quad (7)$$

$$\frac{V_{mpptmin}}{V_{pm} \times [1 + (t' - 25) \times K'_v]} \leq N \leq \frac{V_{mpptmax}}{V_{pm} \times [1 + (t - 25) \times K'_v]}$$

式中: $V_{dcmax}$  为逆变器允许最大直流输入电压(V); $V_{mpptmin}$  为逆变器 MPPT 电压最小值(V); $V_{mpptmax}$  为逆变器 MPPT 电压最大值(V); $V_{oc}$  为光伏组件开路电压(V); $V_{pm}$  为光伏组件工作电压(V); $K_v$  为光伏组件开路电压温度系数; $K'_v$  为光伏组件工作电压温度系数; $t'$  为光伏组件工作条件下的极限最高温度( $^\circ\text{C}$ ); $N$  为光伏组件串联数( $N$  取整数); $V_{dcmax}$  为逆变器允许最大直流

输入电压。场址内海拔在 4 000 m 以下时的逆变器直流侧的最大开路电压为 1 500 V。经分析,场址内逆变器所处的最高海拔为 4 132 m,按照 4 130 m 计算并参考表 3 中的逆变器降容特性进行插值算法计算后得到的逆变器降容后直流侧的最大开路电压为 1 474V; $t$  为光伏组件工作条件下的极限最低温度( $^\circ\text{C}$ )。计算时根据 IEC TS 61724-2 中的附录 A 方法对  $t$  值进行修正。

### 3.4 计算结果

按照上述优化原则,对光伏组件工作时不同海拔、不同辐射强度、环境温度及工作温度经综合考虑后得到海拔 4 000 m 及海拔 4 200 m 时光伏组串在不同辐照强度下的开路电压。海拔 4 000 m 时光伏组串在不同的辐照强度下的开路电压见表 4,海拔 4 200 m 时光伏组串在不同的辐照强度下的开路电压见表 5。

### 3.5 取得的结论

经计算得知:在海拔 4 000 m 及以下时,逆变器不降容。即使不考虑辐照度对光伏组件温度的

表4 海拔4 000 m时光伏组串在不同的辐照强度下的开路电压表

| 辐射强度<br>/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | 开路电压<br>/V | 环境温度<br>/°C | 组件工作<br>温度 /°C | 修正后开路<br>电压 /V | 最大<br>串联数 | 串联开路<br>电压 /V | 确定<br>串联数 | 串联开路<br>电压 /V |
|---|------------|-------------|----------------|----------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| 10  | 41.25      | -20         | -19.66         | 45.86          | 32        | 1 467.42      | 28        | 1 284         |
| 100   | 46.36      | -20         | -16.63         | 51.19          | 29        | 1 484.39      | 28        | 1 433         |
| 200   | 47.90      | -20         | -13.27         | 52.48          | 28        | 1 469.47      | 28        | 1 469         |
| 300   | 48.80      | -20         | -9.90          | 53.06          | 28        | 1 485.58      | 28        | 1 486         |
| 400   | 49.44      | -20         | -6.54          | 53.33          | 28        | 1 493.37      | 28        | 1 493         |
| 500   | 49.93      | -20         | -3.17          | 53.45          | 28        | 1 496.57      | 28        | 1 497         |
| 600   | 50.34      | -20         | 0.19           | 53.46          | 28        | 1 496.83      | 28        | 1 497         |
| 700   | 50.68      | -20         | 3.56           | 53.40          | 28        | 1 495.07      | 28        | 1 495         |
| 800   | 50.97      | -20         | 6.92           | 53.28          | 28        | 1 491.80      | 28        | 1 492         |
| 900   | 51.24      | -20         | 10.29          | 53.12          | 28        | 1 487.38      | 28        | 1 487         |
| 1 000                                       | 51.47      | -20         | 13.65          | 52.93          | 28        | 1 482.04      | 28        | 1 482         |
| 1 100                                       | 51.68      | -20         | 17.02          | 52.71          | 28        | 1 475.96      | 28        | 1 476         |

表5 海拔4 200 m时光伏组串在不同的辐照强度下的开路电压表

| 辐射强度<br>/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) | 开路电压<br>/V | 环境温度<br>/°C | 组件工作<br>温度 /°C | 修正后开路<br>电压 /V | 最大<br>串联数 | 串联开路<br>电压 /V | 确定<br>串联数 | 串联开路<br>电压 /V |
|---|------------|-------------|----------------|----------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| 10  | 41.25      | -20         | -19.66         | 45.86          | 32        | 1 467.42      | 28        | 1 284         |
| 100   | 46.36      | -20         | -16.63         | 51.19          | 29        | 1 484.39      | 28        | 1 433         |
| 200   | 47.90      | -15         | -8.27          | 51.88          | 28        | 1 452.71      | 28        | 1 453         |
| 300   | 48.80      | -15         | -4.90          | 52.45          | 28        | 1 468.50      | 28        | 1 469         |
| 400   | 49.44      | -10         | 3.46           | 52.10          | 28        | 1 458.76      | 28        | 1 459         |
| 500   | 49.93      | -10         | 6.83           | 52.20          | 28        | 1 461.61      | 28        | 1 462         |
| 600   | 50.34      | -10         | 10.19          | 52.20          | 28        | 1 461.60      | 28        | 1 462         |
| 700   | 50.68      | -10         | 13.56          | 52.13          | 28        | 1 459.59      | 28        | 1 460         |
| 800   | 50.97      | -10         | 16.92          | 52.00          | 28        | 1 456.12      | 28        | 1 456         |
| 900   | 51.24      | -10         | 20.29          | 51.84          | 28        | 1 451.51      | 28        | 1 452         |
| 1 000                                       | 51.47      | -10         | 23.65          | 51.64          | 29        | 1 497.66      | 28        | 1 446         |
| 1 100                                       | 51.68      | -10         | 27.02          | 51.42          | 29        | 1 491.20      | 28        | 1 440         |

影响,在-20 °C的环境温度下,按照28片串联后的最大开路电压为1 497 V,均未超过逆变器的允许开路电压1 500 V。而在海拔4 000~4 200 m高度时,在理论最低的-20 °C环境温度下,同时考虑环境温度受辐照度的影响,按照28片串联后计算,最大开路电压为1 473 V,未超过4 130 m海拔下逆变器修正后的最大允许开路电压1 474 V。故该项目光伏组串按照28片一串设计是合适的。

同时,在光伏组串优化设计时,对于组件开路电压还应考虑以下两个因素的影响:

(1)考虑到N型组件的LID衰减和组件安装后并网前衰减,并网后的开路电压相比组件的额定开路电压会下降约10 V。从第2 a起,光伏组件的逐年衰减为0.4%,每年的组串开路电压将下降5.8 V。因此,随着光伏组件的衰减,光伏组串的开路电压超允许值的风险将会越来越低。

(2)若项目投产前期遇到极端异常天气情况,

其环境最低温度低于设计值-20 °C,同时,光伏逆变器因其自身或外部其他原因(如箱变故障或高压侧断电等)未正常工作,逆变器直流侧为开路状态。当上述极端情况同时发生时,光伏组串的开路电压有可能超过逆变器允许值,将会有较低概率导致逆变器直流侧元器件绝缘被击穿,对发电量有损失,但该情况出现的可能性极小。因此,在综合考虑项目投资成本、运维成本及发电量效益的前提下,判定光伏组串按照28片一串的设计是合适的。

#### 4 结 语

该项目在仅考虑气象站数据海拔修正情况下,光伏组串数量的计算结果为26片;而采用经笔者优化算法后,光伏组串的数量为28片。对于单个3.2 MW光伏子阵进行经济比较后得出的具体数据见表6。

由表6可得:单个光伏子阵采用28片串联方

表 6 单个 3.2 MW 光伏子阵采用不同光伏组串数经济比较表

| 项目                  | 26 片串联方案 |       |         | 28 片串联方案 |         |
|---------------------|----------|-------|---------|----------|---------|
|                     | 单价 / 元   | 工程量   | 总价 / 万元 | 工程量      | 总价 / 万元 |
| 组件 / 片              |          | 6 682 |         | 6 664    |         |
| 支架 / t              | 7 500    | 138   | 103.5   | 135      | 101.25  |
| 支架基础 + 施工(单根桩)      | 140      | 2 570 | 35.98   | 2 380    | 33.32   |
| 直流电缆 + 穿管 + 施工 / km | 51 000   | 37.99 | 193.75  | 37.8     | 192.78  |
| 合计 / 万元             |          |       | 333.23  |          | 327.35  |

案比采用 26 片串联方案可节省费用约 5.88 万元。按 1 GW 项目测算,可节省直接成本约 1 840 万元,同时可减少光伏阵列用地近 5%,其经济性明显较好。

笔者针对高海拔光伏电站光伏组件串联数设计进行了研究,在综合考虑某项目海拔高度、辐照度、环境温度、光伏组件温度等影响因素的前提下,结合国标及 IEC 相关规程规范,提出了计算光伏组件串联数的优化综合方法,旨在为类似情况的光伏电站组串设计提供参考与借鉴。

#### 参考文献:

(上接第 95 页)

或隧洞内瓦斯超限时能够立即自动切断隧洞中电气设备的电源,防止爆炸事故的发生。

#### 4 结 语

亭子口灌区一期工程Ⅲ标金鸡梁隧洞属于高瓦斯隧洞,自发现瓦斯后,项目部针对现场施工的具体情况,将所采取的各项施工技术措施落实到位,施工过程未发生安全事故,并在施工过程中对防治方案不断进行优化,目前防治措施已趋于完善,防治效果亦有明显提升。在红层地区高瓦斯引水长隧洞施工过程中,采用超前地质钻孔进行瓦斯的释放与预报;利用人工检测与自动监测相结合的方式加强对瓦斯的监控;按照“一备一用”的要求配置轴流式风机压入式通风,并在特殊部位采取局扇消除了瓦斯积聚,保证了供风量并及时排除了洞内废气;对机械设备加装了车载瓦斯自动监控报警与断电系统以及尾气火花熄灭器;对隧洞内的用电设备进行了“三专”“两闭锁”改造,严控隧洞火花以及火源的产生。该工程瓦斯隧洞的施工以“强通风、控火源,重监测、防涌出”为原则,认真贯彻“先测后进,有疑必测,不明不进”的指导方针,将“一通二防”(通风、防治瓦斯、防火)作为安全工作的重点,强化日常监管,零容

- [1] 王忆麟. 光伏电站中光伏组件串联数的新设计思路[J]. 太阳能,2021,42(1):62-67.
- [2] 杨旭,易坤,左超. 光伏电站中光伏组件串联数的优化设计[J]. 太阳能,2021,42(3):68-74.
- [3] Photovoltaic system performance - Part 2: Capacity evaluation method; IEC/ TS 61724-2-2016[S].
- [4] 李善寿,张兴. 改进的光伏组件工程数学模型建模方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):108-112.
- [5] 光伏发电站设计规范,GB 50797-2012[S].

#### 作者简介:

李 翔(1987-),男,四川成都人,副高级工程师,硕士,从事新能源发电设计工作。 (编辑:李燕辉)

忍落实通风、火源、监测关键“三要素”,确保了现场施工安全,加快了施工进度。

#### 参考文献:

- [1] 肖广智. 我国几类特殊地质条件铁路隧道修建问题与对策概述[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(11):1748-1758.
- [2] 吴光松,肖昌,赵瑞桐. 瓦斯隧道施工防灾设计与监控方案[J]. 西部探矿工程,2019,31(1):174-176.
- [3] 陈涛,杨中委. 浅谈地铁高瓦斯隧道信息化智慧平台建设[J]. 四川水力发电,2019,38(增刊 1):65-70.
- [4] 孙龙俊. 瓦斯通风技术在高速公路隧道建设中的应用[J]. 绿色环保建材,2021,8(9):93-94.
- [5] 王文军. 小断面水利隧洞高瓦斯段施工控制分析[J]. 浙江水利水电学院学报,2023,35(4):53-58.
- [6] 王睿锋. 引水瓦斯隧洞施工机械与用电线路改装[J]. 中国高新科技,2023,30(10):91-93.
- [7] 任明武. 夹岩水利工程瓦斯突出隧洞综合防突技术研究[J]. 施工技术,2021,50(7):85-89,93.
- [8] 高俊. 水工高瓦斯深埋长隧洞施工关键技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2022,12(23):103-105.

#### 作者简介:

滕 黎(1996-),男,湖北恩施人,助理工程师,工程硕士,从事水利工程项目施工技术与管理工作;  
杨 帆(1994-),男,四川南充人,助理工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与安全管理工作;  
何 诚(1978-),男,四川南充人,会计师,从事水利工程项目管理与资金管理工。 (编辑:李燕辉)