

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-077-05

# 长垂直母线热压耦合厂房通风研究

谢方祥 梁波 陈鹏云

(长江勘测规划设计研究有限责任公司 武汉 430010)

**【摘要】** 大型地下电站发电机引出大多采用长垂直离相封闭母线 (IPB), 但在长垂直条件下因高度差产生的“烟囱效应”会导致母线上、下温差过大, 甚至超过母线最大运行工况下的温升限值, 带来一定的安全隐患, 并限制了地下电站封闭母线引出方式的运用。结合三峡地下电站等长垂直、大电流封闭母线竖井的特点, 对长垂直封闭母线在不同影响因素下的热平衡特性进行了理论分析与数值计算。通过工程实践, 探索出长垂直母线热平衡和地下厂房母线竖井通风的耦合模型及规律, 并在此基础上提出了基于“热压耦合”的长垂直离相封闭母线的应用与通风设计的新思路。

**【关键词】** 长垂直离相封闭母线; 地下厂房; 热压耦合通风; 热平衡; 烟囱效应

中图分类号 TM41 文献标志码 A

## Research of Ventilation in Powerhouse Coupling Plant with Thermal-compression of Long Vertical Busbars

Xie Fangxiang Liang Bo Chen Pengyun

(Changjiang, Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan, 430010)

**【Abstract】** Most of the generators in large underground power plants are led out using long vertically separated phase enclosed busbars (IPB). However, under long vertical conditions, the chimney effect caused by height differences can lead to excessive temperature differences between the upper and lower parts of the busbars, even exceeding the temperature rise limit under the maximum operating condition of the busbars, posing certain safety hazards and limiting the use of enclosed busbar lead out types in underground power plants. This article combines the characteristics of the equal length vertical and high current enclosed busbar shaft of the Three Gorges Underground Power Station, conducts theoretical analysis and numerical calculation on the thermal balance characteristics of the long vertical enclosed busbar under different influencing factors. Through engineering practice, a coupling model and regularity between the thermal balance of long vertical busbars and the ventilation of underground factory busbar shafts are explored. Based on this, a new idea for the application based on "thermal pressure coupling" and ventilation design is proposed.

**【Keywords】** Long-vertical separated phase enclosed busbar; Underground powerhouse; Coupled thermal and pressure ventilation; Thermal balance; Chimney effect

## 0 引言

长垂直离相封闭母线 (IPB) 在地下水电站中应用越来越广泛, 在额定工况运行时应满足温升要求。结合国内外类似工程的设计、运行和制造经验,

地下电站长垂直段母线导体、外壳轴向最大温差要求小于  $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ , 导体允许最高温度不超过  $90^{\circ}\text{C}$ 。

对不同容量、垂直高度不同的 IPB, 主要有自

然通风冷却和强迫通风冷却，常规国内主要的冷却方式依靠自然通风冷却，例如彭水水电站、水布垭水电站等<sup>[1]</sup>。由于以往垂直段常规较短，电流也较小，且多为一机一洞引出方式，母线的通风散热通过自然通风即可满足要求<sup>[2]</sup>。随着地下电站长垂直封闭母线热流量的增大以及布置方式的复杂化，传统方式的通风散热方式难以满足大型地下电站封闭母线的要求。

地下电站一般需设置满足通风气流组织需要的独立送、排风竖井，通过送、排风竖井进行通风换气，通风设备随季节按不同通风工况运行<sup>[3]</sup>。由于地下空间和洞室稳定性的要求，通常要求同样需引到地面的母线竖井（如果有）和通风竖井合二为一。

因此，本文以三峡地下电站为例，通过建立数学模型，研究 IPB 竖井的散热、气流组织机理、温度分布规律，提出将地下厂房长垂直 IPB 热平衡和厂房通风融合设计的新理念，探索与通风竖井之间的耦合利用的可行性。

## 1 长垂直 IPB 竖井的“烟囱效应”和地下空间通风联合研究

### 1.1 数值建模及热平衡分析

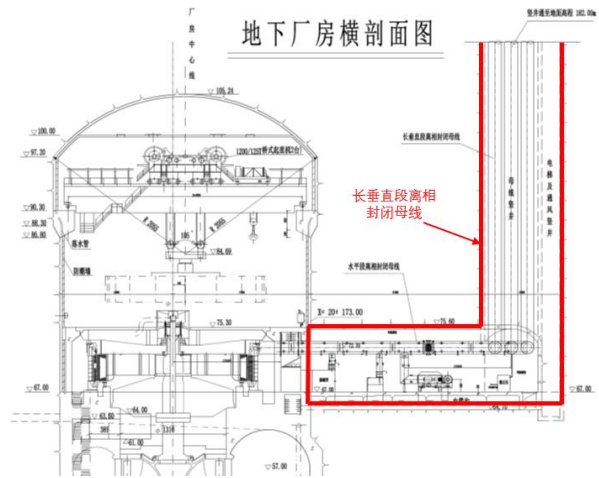
IPB 导体的散热是通过导体和外壳之间的热辐射、壳内空气对流进行的，外壳则主要是通过热辐射、壳外空气的对流散热。热辐射由辐射系数（为常数）决定，在 IPB 垂直方向上没有差别，因此影响 IPB 在垂直方向上温度分布的主要是 IPB 内部和外部空气的对流<sup>[4]</sup>。导体和外壳直接存在对流、辐射传热，其机理较为复杂，因此需要模型进行以下简化：

(1) 由于考虑到空气的热性能、黏度，因此考虑导体将 100% 热量传递给外壳，且在导体的长度方向忽略导体本身和气体的损耗。

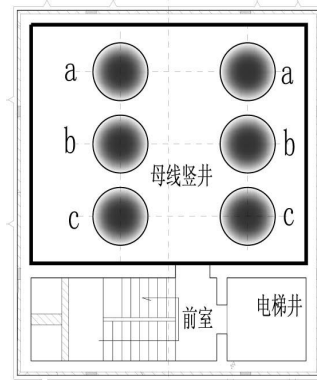
(2) 在 IPB 垂直方向各段导体、壳体、洞壁只与本段物体发生热传导，各段之间无热传导，忽略 IPB 导体、壳体材料的导热热阻。

#### 1.1.1 IPB 竖井的物理模型

IPB 竖井的物理模型如图 1 所示，IPB 竖井剖面图和平面图。IPB 及其竖井可简化为圆柱形发热体置于竖井形成的封闭空间中，形成一个具有内热源的受限空间换热模型<sup>[5]</sup>。



(a) IPB 竖井剖面图



(b) IPB 竖井平面图

图 1 IPB 及其竖井物理模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the physical model of IPB and its shaft

在进行 IPB 封闭母线的热平衡模拟计算时，将母线的导体与外壳的损耗值作为热源耦合到流场里进行计算。其在流场中的散热本质是在有内热源的非等温湍流换热、对外热辐射综合作用下，竖井受限空间内空气的温度场、速度场达到相应平衡的过程，这种受限空间内的气流是由经过 IPB 外壳加热产生的浮升力为动力的自下而上的热气流作用。对流传热计算时采用标准  $k-\epsilon$  双方程模型求解，壁面采用标准壁面函数法处理，无滑移壁面条件，控制  $11.5 \leq y_p^+ \leq 400$ 。应用 SIMPLE 算法求解离散控制方程，离散方程采用 QUICK 格式以防止伪扩散。采用六面体网格划分方法，竖井按照 0.2m 的间隔划分网格，母线部位按照 0.1m 的间隔划分网格，局部进行加密处理，总网格数量约 262 万。

地下电站厂房 IPB 封闭母线垂直段长度为

78.6m, 单根母线直径为 1.6m, 母线由内至外构成为空气、导体、绝缘保护层、外壳, 母线竖井尺寸为 8m×6.6m, 导体和外壳的材质为铝。根据物理模型, 设定母线竖井的入口界面为压力边界, 竖井壁面为定壁温, 竖井出口为速度出口边界或压力出口边界。导体与外壳定义为内热源 (固体域, 密度 2719kg/m<sup>3</sup>; 热导率 238W/m·°C; 比热容 0.88kJ/kg·°C), 其余区域设为流体域 (空气, 密度 1.16kg/m<sup>3</sup>; 热导率 0.0256W/m·°C; 比热容 1.013kJ/kg·°C), IPB 发热量为 1kW/(m·相)。

### 1.1.2 热压耦合下的 IPB 竖井散热分析

#### (1) 自然通风下 IPB 竖井热平衡分析

通过计算机数值模拟得到自然通风状态下的三峡地下电站 IPB 母线外壳温度和竖井内温度计算结果如图 2、图 3 所示。

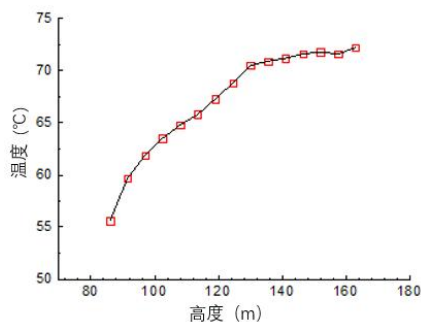


图 2 IPB 表面竖向温度分布图

Fig.2 Vertical temperature distribution on the surface of the IPB

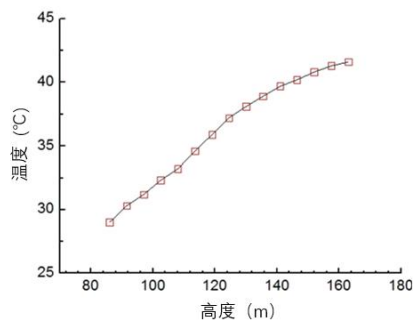


图 3 IPB 竖井竖向温度分布图

Fig.3 Vertical temperature distribution diagram of IPB shaft

由上述计算结果可以看出, 在自然通风条件下, 三峡地下电站 IPB 表面温度随着高度增加逐步提高, IPB 竖井内温度也随着高度增加逐步升高, 具有明显的“烟囱”效应。三峡 IPB 竖井由于热源强度高, 在有限的空间内产生的自然通风不足以带

走 IPB 散发的热量, 随着高度的增加空气温度逐渐升高, 这进一步削弱了 IPB 的热交换能力导致 IPB 表面温度的逐渐升高<sup>[6]</sup>。在三峡地下电站投入运行后, 对地下电站的竖井自然通风情况下的 IPB 竖井及 IPB 外壳温度进行现场测试, 测试时 IPB 运行电流并未能达到设计负荷, 但 IPB 竖井内温度和 IPB 表面温度的分布规律与计算机模拟计算的结果基本一致, 如图 4、图 5 所示。

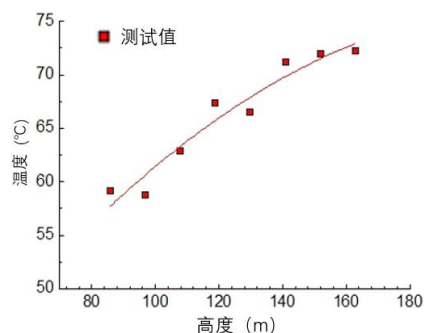


图 4 IPB 表面温度竖向实测分布图

Fig.4 Vertical temperature distribution on the surface of the IPB

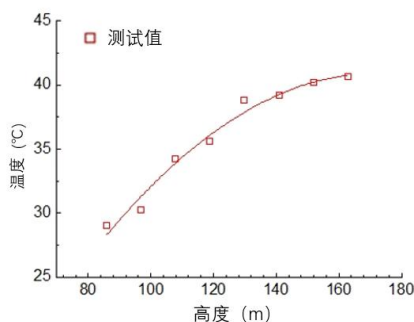


图 5 IPB 竖井竖向温度实测分布图

Fig.5 Vertical temperature distribution diagram of IPB shaft

#### (2) 复合通风下 IPB 竖井最优运行工况

在三峡地下电站, 经现场测试单纯的自然通风造成的 IPB 表面和 IPB 竖井内的进、出口温差分别达到 16.8°C 和 11.5°C, 超出需要控制的温差要求, 自然通风难以满足 IPB 竖井热环境的要求。鉴于此, 针对该类型热流封闭母线的形式, 采取机械通风形成 IPB 竖井内强迫对流, 提高空气与 IPB 外壳的换热系数, 通过机械通风和自然通风的耦合作用, 强化竖井内的换热能力<sup>[7,8]</sup>。根据 IPB 的热平衡  $Q_{MF} = m \cdot C_p \cdot \Delta t \cdot \eta$  对所需通风量进行大致估算, 根据所得到风量作为试算的基础代入数学模型进行

仿真计算，分别选取竖井内风速 0.8m/s, 1.15m/s, 2.3m/s, 2.8m/s 进行计算，最终得到一个较佳的风速，使得满足温度要求的前提下，能够使得风机能耗较小。通过数值计算（见图 6）和现场实测数据，当 IPB 竖井内风速为 0.8m/s、1.15m/s 时，IPB 表面温度进、出口差值不满足 IPB 运行条件；当 IPB 竖井内风速为 2.3m/s 时，IPB 表面温度进、出口差值满足要求，能耗较小；再增大风量 IPB 进出口温差减少很小，继续提升风速会使风机无效能耗增加，没有意义。因此，在满足热平衡和温度的要求下，可认为竖井内复合通风风速 2.3m/s 为 IPB 最优运行工况，既可保证温差要求，同时保证所选择的通风设备能耗最低。

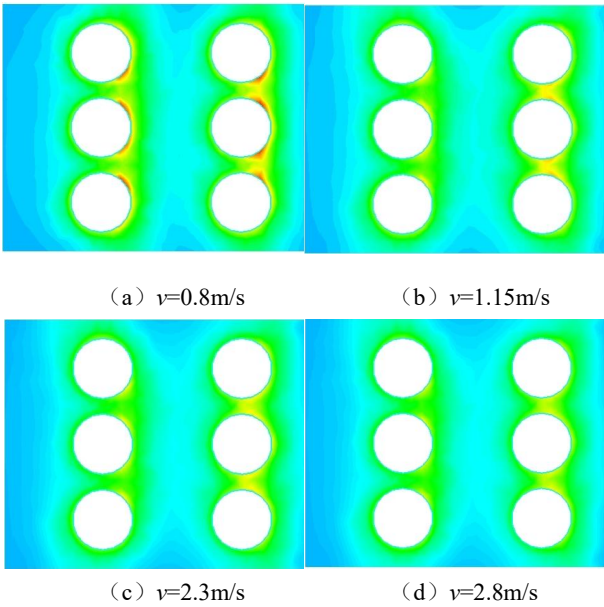


图 6 母线竖井道截面温度分布图（高程为 76m）

Fig.6 Temperature distribution diagram of the cross-section of the busbar vertical shaft (elevation 76m)

### 1.2 IPB 复合通风特性和最优温差

对于大型电站内，母线强热源和其空间受限特点，单项母线的热损失随着通过负荷增加而增大，总的热源强度还受到 IPB 的布置方式，如一机一洞、两机一洞等方式的影响。对上述 IPB 最优运行工况进行数值模拟，得到不同长垂直高度和不同热源强度与温差变化关系如图 7、图 8 所示。受限空间内的母线热源强度 ( $q$ ) 和高度 ( $h$ ) 成为影响实际工程中母线温度分布和母线上下端温差的最重要因素，特别是热源强度是其最重要的因素<sup>[9,10]</sup>。

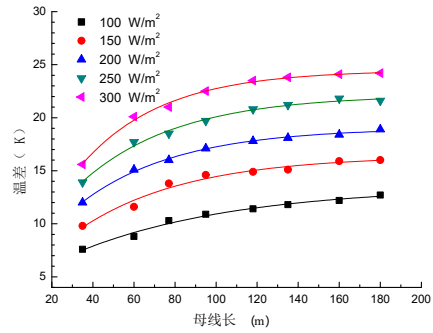


图 7 母线温差随其长度的变化图

Fig.7 Variation diagram of bus temperature difference with its length

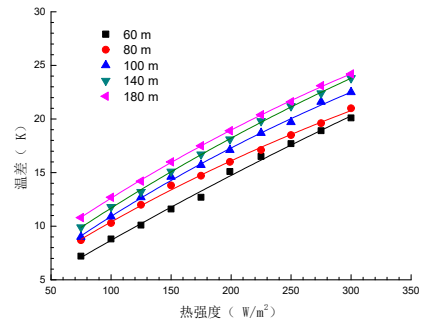


图 8 母线温差随其热源强度的变化图

Fig.8 Variation diagram of bus temperature difference with its heat source intensity

在以温差为控制目标下，对于大型 IPB 竖井采用复合通风的散热策略<sup>[11]</sup>。在复合通风模式下，热驱动和机械风驱动相互耦合作用两者相互增益。基于对三峡地下电站、水布垭水电站<sup>[12]</sup>和彭水水电站<sup>[13]</sup>的实测数据的基础上，开展了不同热源强度 ( $q$ )，不同母线长度 ( $H$ ) 的多种工况的数值计算，得到两机一井方式的数值计算相关结果，并建立温差 ( $\Delta T$ ) 和热源强度 ( $q$ ) 拟合的关联式，得到复合通风下最优温差控制表，后续建设工程可参考表 1 进行选择。

表 1 IPB 竖井复合通风最优温差控制表

Table1 Optimal temperature difference control table for mechanical mixed ventilation

复合通风最优温差值 (°C)	竖井高度 $H$ (m)			
	75~120	120~155	155~225	225~300
60~80	N	N	N	7.5
热源强度 $q$ ( $W/m^2$ )	80~120	N	6.5	8
	120~240	N	7.5	9.5
	240~300	8	9.5	10.5

注：N 代表自然通风方式下的温差控制。

1.3 IPB 竖井复合通风联合厂房通风方案  
根据三峡地下电站、水布垭电站和彭水电站的

实测数据和模拟研究结果, 各电站 IPB 竖井相关参数及通风情况整理如表 2 所示。

表 2 IPB 竖井相关参数及通风情况

Table2 Relevant parameters and ventilation conditions of busbar shaft

序号	电站	母线竖井尺寸 (m)	母线竖井形式	进出口母线温差 $^{\circ}\text{C}$	是否满足要求	通风形式	通风量 $\text{m}^3/\text{h}$
1	三峡	8m $\times$ 6.6m	两机一井	16.8	不满足	自然通风	111620
2	三峡	8m $\times$ 6.6m	两机一井	6.2	满足	复合通风	338000
3	彭水	5m $\times$ 2m	一机一井	5	满足	自然通风	55035
4	水布垭	5m $\times$ 2.3m	一机一井	7	满足	自然通风	58371

根据以上结果, 以三峡水电站为例, 建立长垂直 IPB 竖井复合通风联合厂房通风的新模式, 系统

示意图如图 9 所示。

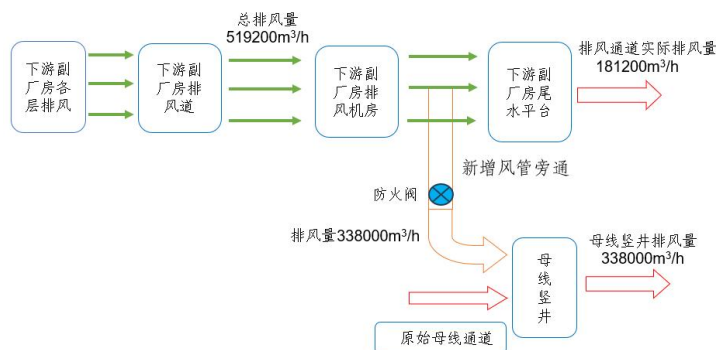


图 9 长垂直热压耦合厂房通风的系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of the ventilation system for long vertical busbars thermal pressure coupled factory building

在原厂房排风通道上, 增设联通旁通风管, 接至母线竖井。当母线竖井需要通过复合通风作用保证母线安全稳定要求时, 气流通过母线竖井排至室外, 与厂房自身的机械通风的气流走向一致。此时开启旁通风管的电动防火阀, 关闭原排风机房的风机运行台数, 减少原排风通道的排风量, 使整个厂房的排风通过两种路径排至室外, 减少原厂房排风通道的排风风机耗能约 65%。

(3) 通过 IPB 竖井热平衡的研究成果, 可以成功的解决地下电站长垂直 IPB “烟囱效应” 的设计难题, 并首次提出地下厂房通风融合设计新思路, 突破了该领域理论及应用的传统界限, 为大型地下电站大容量机组、多机共井、超高垂直长度、厂房通风等创新应用提出了切实可行的设计方案和科学依据<sup>[14]</sup>。未来多个地下电站的长垂直封闭母线的通风散热可以结合厂房通风统一进行设计, 具有良好经济效益和社会效益。

## 2 结论

通过利用“热压耦合”机理和方法结合实际场景的应用研究, 总结得到:

(1) 三峡地下电站自然通风下的 IPB 竖井散热无法满足要求, 需要采用机械通风耦合自然通风的形式, IPB 竖井最优运行工况风速为 2.3m/s;

(2) 建立了不同长垂直高度、不同热源强度与温差变化关系曲线, 根据相关关联式得到最优温差控制表, 为后续工程建设中 IPB 热平衡提供了参考;

## 参考文献:

[1] 魏琪. 自然通风条件下某水电站高垂直大电流封闭母线散热计算及分析[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(4): 33-34.  
 [2] 王俭. 高垂直段风冷封闭母线三维场仿真分析及结构优化设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.  
 [3] 陈军, 李胜兵, 徐蒯东, 等. 白鹤滩水电站出线竖井通风设计与内衬风管施工研究[J]. 暖通空调, 2022, 52(12): 106-108, 101.

转轮再生提供热源,充分匹配了系统冷、热需求。

(6) 设计时还需结合土建条件设置合理的气流组织,为冰面提供稳定、干燥的循环空气,迅速、有效排除潮湿空气,保障温湿度场均匀性,避免局部起雾。

#### 参考文献:

- [1] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005
- [2] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:2615-2630.
- [3] 张昕,王伟良,潘云钢,等.首体短道速滑训练馆暖通空调设计[J].暖通空调,2022,52(6):116-122,93.
- [4] 束庆.娱乐性冰场暖通空调设计[J].暖通空调,2008,(6):36-41.
- [5] 张昕,钱玮昕,刘京.关于室内冰上运动场馆热湿环境控制的模拟研究[J].建筑科学,2021,37(10):145-151.
- [6] 陈伟东.溜冰场制冷负荷的分析计算及设备选型探讨[J].制冷,2005,(S1):79-84.
- [7] 陈震宇,肖剑仁,郭筱莹,等.冷冻除湿及转轮除湿耦合冷凝热回收型温湿度分控系统[P].CN215001969U,2021-12-03.
- [8] GB 50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2015
- [9] GB/T 2589-2020,综合能耗计算通则[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [10] GB/T 51366-2019,建筑碳排放计算标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

#### (上接第 81 页)

- [4] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.
- [5] 郭建辉,梁波,雷永刚,等.大电流长垂直离相封闭母线热平衡模拟及实测分析[J].暖通空调,2015,45(2):48-51.
- [6] 王汉青.通风工程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [7] 北京电力设备总厂.大型水电站长倾斜段离相封闭母线自然对流换热的试验研究[R].北京:清华大学,2005.
- [8] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等.基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J].中国电机工程学报,2012,32(33):141-147,187.
- [9] 李玲,吴晓文,李洪涛,等.离相气体绝缘母线温度场计算及其影响因素分析[J].高压电器,2012,48(7):88-92,98.
- [10] 张兴娟,曹乃承,杨春信,等.垂直布置的母线温度场计算及分析[J].中国电机工程学报,2000,20(8),11-14.
- [11] 水电站机电设计手册编写组.水电站机电设计手册(采暖通风与空调)[M].北京:水利电力出版社,1987.
- [12] 高军华,陈希英,计绿野.水布垭水电站高垂直布置大电流封闭母线设计[J].人民长江,2007,38(7):83-88.
- [13] 王树清,种建伟.彭水水电站长垂直离相封闭母线的應用[J].人民长江,2006,37(1):65-68.
- [14] 梁波,高军华,王迪良.Scitevare 水电站长垂直封闭母线设计考察与研究[J].人民长江,2006,37(11):38-40.