



国家电网公司
电力科技著作出版项目

气体绝缘金属 封闭输电线路 (GIL)

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院 组编

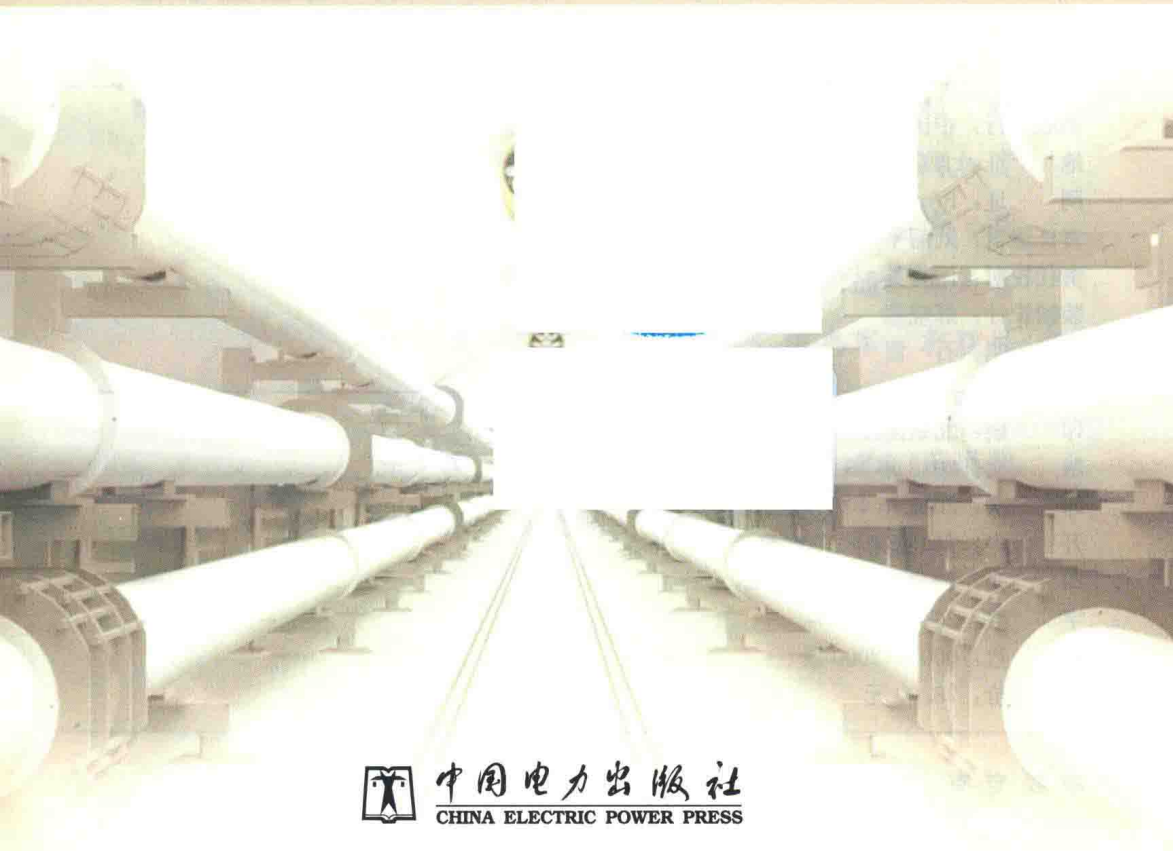


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

网 公 司
卡 作 出 版 项 目

气体绝缘金属 封闭输电线路 (GIL)

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

气体绝缘金属封闭输电线路 (GIL) 相较传统输电方式具有诸多优点, 适合在某些特殊环境下应用。本书共 7 章, 系统地介绍了 GIL 设备的技术要求、结构特点、设计安装技术、异常情况及处理措施、试验与运检技术, 希望可以为读者提供有关 GIL 技术的完整认识。

本书可供制造企业产品设计人员和高等院校师生使用, 也可供工程设计人员提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

气体绝缘金属封闭输电线路: GIL/国网江苏省电力有限公司电力科学研究院组编. —北京: 中国电力出版社, 2018.10

ISBN 978-7-5198-2290-3

I. ①气… II. ①国… III. ①气体绝缘材料—金属封闭开关—输电线路—电力工程—工程设计 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 174712 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘丽平 (010-64312342) 陈 丽 (010-64312348)

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 郝晓燕

责任印制: 石 雷

印 刷: 北京博图彩色印刷有限公司

版 次: 2018 年 10 月第一版

印 次: 2018 年 10 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米×1000 毫米 16 开本

印 张: 13.75

字 数: 264 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 78.00 元

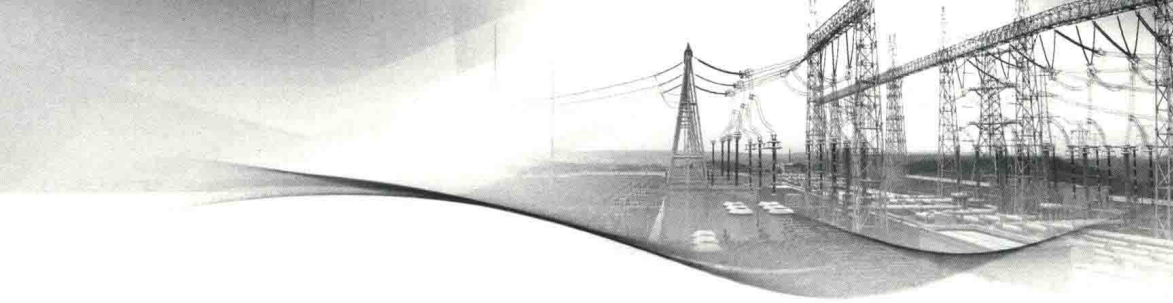


版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

编委会

主	任	黄志高					
副	主	任	许海清	刘华伟			
成	员		黄强	魏旭	王建明	陆东生	吴威
			李群	袁宇波	邓洁清	许建刚	丁然
			张国江	范炜豪	薄斌	刘洋	张量
			高山	杨景刚	陶风波	周志成	戴阳
			钟建英	乐党救	陈松涛	钱玉华	
编写组组长			黄强				
编写组副组长			杨景刚	邓洁清			
编写组成员			贾勇勇	腾云	邵劭	卞超	赵科
			李洪涛	夏峰	莫文文	关为民	陶加贵
			谭婷月	陈双	刘永康	王静君	唐亮
			刘媛	宋思齐	李玉杰	刘通	谢天喜
			钟岚	裴文龙	李东风	陈志军	郭煜敬
			金光耀	李丽娜	唐烨	马勇	刘咏飞
			陈少波	吴昊	王卫华	罗琴	王通德
			赵恒	王志刚	孙超		



前 言

气体绝缘金属封闭输电线路 (gas - insulated metal - enclosed transmission line, GIL) 是一种采用 SF_6 、 SF_6/N_2 或其他气体绝缘、外壳与导体同轴布置的高电压、大电流、长距离电力传输设备, 具有输电容量大、传输损耗小、占地面积少、运行成本低、环境友好、安全性高等显著优点, 逐渐成为特殊环境下替代架空线、电缆的首选方案, 适合应用于连接 GIS 和架空线、架空线交叉、连接发电厂内变压器与开关设备等重要部位, 国内外已有大量工程应用实例。

2016 年 8 月, 苏通特高压 GIL 综合管廊工程开工建设, 计划于 2019 年投运。该工程是华东特高压交流环网合环运行的关键节点, 是我国特高压交流输电工程的一项重大举措, 也是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、技术水平最高、施工难度最大的超长距离 GIL 工程。为此国网江苏省电力有限公司组织技术力量进行了广泛调研, 对在运 GIL 设备的设计、建设和运行等情况进行实地考察, 尤其是 GIL 设备典型结构、国内在运 GIL 工程运行情况、现有运行维护手段等方面内容, 提前为苏通特高压 GIL 综合管廊工程运维进行技术储备。本书就是在该项工作基础上, 梳理汇总而成, 希望能够给该技术领域专业人员和爱好者提供些许帮助。

本书共有 7 章, 第 1 章综述了 GIL 的特点及与架空线路、电缆的区别, 并简要介绍了 GIL 在国内外的典型应用情况; 第 2 章介绍了 GIL 设备的元件、典型单元、典型技术参数及包括密封、绝缘、通流设计等在内的关键设计; 第 3 章介绍了 GIL 的设备安装方式、安装工艺与安装工艺, 着重介绍了 GIL 隧道安装技术; 第 4 章结合相关规程介绍了 GIL 的运检技术, 包括 GIL 在线监测技术, GIL 设备巡视和检

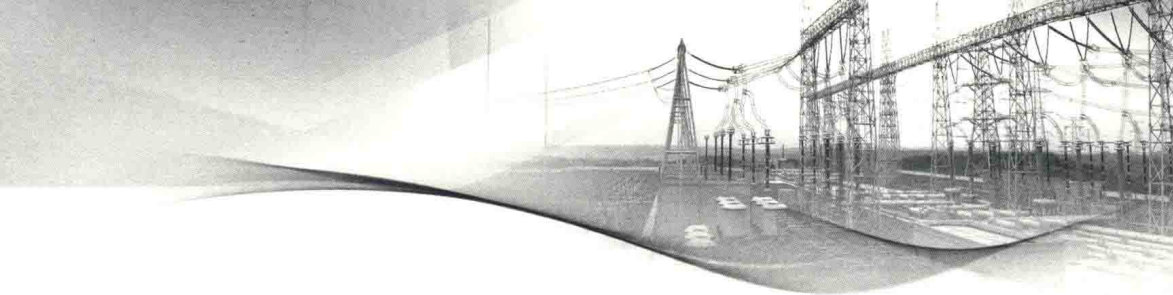
修方法，创造性地介绍了 GIL 智能巡检机器人的设计理念；第 5 章结合实际运行情况介绍了 GIL 设备的几种典型异常状态或风险，主要包括 GIL 设备异常、隧道风险以及 GIL 的典型缺陷及故障，给出了相应的处理措施；第 6 章结合相关标准与规范对 GIL 的相关试验进行了介绍，包括各类型式试验、出厂试验及现场交接试验，并简介了现有的新型试验技术；第 7 章对 GIL 输电技术的未来研究方向与应用前景进行了展望。

在本书编写过程中，国家电网有限公司 GIS 设备运维检修技术实验室、国网江苏省电力有限公司检修分公司、江苏省送变电有限公司、平高集团有限公司、中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司、江苏南瑞恒驰电气装备有限公司等机构、单位安排技术人员参加编写组，在此一并表示感谢。

由于时间与水平所限，本书之中尚有不妥之处，恳请读者朋友们指正。

编者

2018 年 8 月



目 录

前言

1 概述	1
1.1 GIL 输电技术简介	2
1.2 GIL 输电技术特点	3
1.3 GIL 输电技术应用现状	6
2 GIL 设备结构及设计	17
2.1 设备元件及典型单元	17
2.2 典型技术参数	34
2.3 关键设计	37
3 GIL 设备安装技术	49
3.1 安装方式	49
3.2 隧道技术	50
3.3 安装工艺	63
3.4 安装机具	74
4 GIL 运检技术	81
4.1 在线监测技术	81
4.2 定期巡视技术	94
4.3 设备检修技术	97
4.4 智能巡检机器人	98
5 GIL 异常情况及处理措施	107
5.1 GIL 设备异常情况及处理措施	107
5.2 隧道风险及处理措施	125

5.3	GIL 典型缺陷与故障案例	134
6	GIL 试验技术	144
6.1	试验方法	145
6.2	试验规则	169
6.3	新型试验技术	181
7	GIL 输电技术展望	192
7.1	SF ₆ /N ₂ 混合气体绝缘可靠性技术	192
7.2	GIL 故障电弧定位技术	198
7.3	GIL 混合输电线路过电压分析	200
7.4	GIL 内部微粒运动特性及捕捉技术	202
	参考文献	208

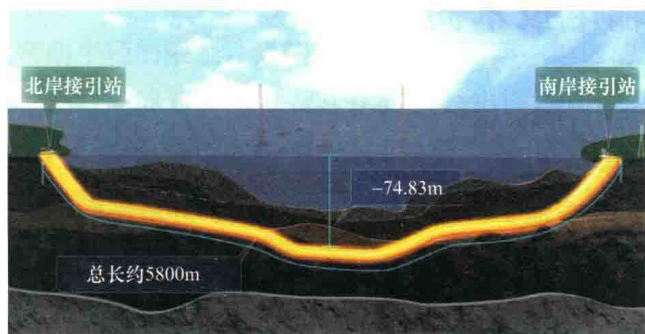


1 概 述

2016 年 7 月，淮南—南京—上海 1000kV 交流特高压输变电工程苏通 GIL^❶综合管廊工程获国家发改委核准，并于 2016 年 8 月开工建设。该工程是华东特高压交流环网合环运行的关键节点，是我国特高压交流输电工程的一项重大举措和创新，也是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、技术水平最高的超长距离气体绝缘金属封闭输电线路工程。工程示意如图 1-1 所示。



(a)



(b)

图 1-1 苏通 GIL 综合管廊工程示意图
(a) 鸟瞰图；(b) 剖面图

❶ GIL——气体绝缘金属封闭输电线路，英文全称为 gas-insulated metal-enclosed transmission line。

苏通 GIL 综合管廊工程越江线位于 G15 沈海高速苏通长江大桥上游附近，南北岸各设置一个永久占地的地面接引站。GIL 路线设计总长 5736m，盾构隧道长度 5593m，隧道内径 10.5m、外径 11.6m，考虑纵坡影响，隧道实际长度约 5800m，结构最低点标高-74.83m。GIL 管廊内预留两回 500kV 电缆线路，GIL 布置在管廊上部区域，远期 500kV 电缆线路敷设在下层区域，分腔体布置，并在中间区域设置人员巡视通道；两回 GIL 设备采用垂直布置，分开布置在管廊两侧，管廊内 GIL 布置如图 1-2 所示。



图 1-2 苏通 GIL 综合管廊工程隧道截面图

本章将介绍 GIL 输电技术的基本概念以及 GIL 输电技术的优势，特别将 GIL 设备与传统架空线路、高压电缆进行对比，并介绍国内外 GIL 典型工程的基本情况。

1.1 GIL 输电技术简介

GIL 是一种采用 SF_6 、 SF_6/N_2 或其他气体绝缘、外壳与导体同轴布置的高电压、大电流、长距离电力传输设备。GIL 典型结构如图 1-3 所示。由于 GIL 设备具有输电容量大、占地少、维护量小、寿命长、环境影响小等显著优点，逐渐成为特殊环境下替代架空线的首选方案，用于 GIS 和架空线连接、输电线路交叉、发电厂内高压变压器与开关设备连接等重要部位，已有大量的工程应用实例。

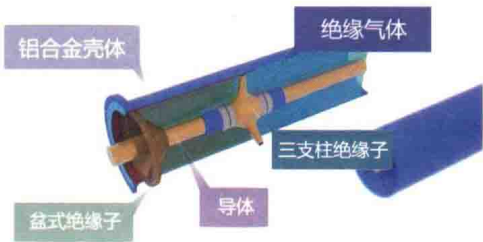


图 1-3 GIL 典型结构

GIL 设备在进行长距离、大容量电能传输时具有明显的优势，主要表

现在以下几个方面：

(1) 输送容量大。目前，GIL 设备的最大额定电流可达到 8kA，而最大输送功率超过 10GW，根据不同的技术和经济指标，GIL 设备可以通过调节壳体的壁厚、直径及内部导体的直径来满足输送容量的要求。

(2) 传输损耗小。与架空导线电缆相比，GIL 设备导体和外壳的截面积更大，电阻更小，因而传输损耗小。

(3) 部件模块化。GIL 设备通常包含 4 种标准单元，即直线单元、转角单元、隔离单元和补偿单元。其中，直线单元由导体、壳体和支撑绝缘子组成；转角单元适用于 GIL 设备的复杂工况，常用于 GIL 中较大的转角处；隔离单元是为了满足长距离 GIL 设备的现场耐压试验需要而设置的；补偿单元的主要作用是当 GIL 长距离布置时，用来补偿管线的热胀冷缩及基础沉降引起的形变，也可用于调节安装误差。采用模块化处理不仅可以简化线路设计，而且也利于降低工艺难度、提高制造水平。

(4) 安全性高。GIL 设备的高压导体被安装在全封闭式的金属外壳内，且充有 SF_6 或 SF_6/N_2 混合气体等绝缘介质，不易受到外界因素的影响，不易发生燃烧和爆炸事件。

(5) 环境友好。一方面，GIL 可采用直埋于地下或者隧道等安装方式，对外部自然景观没有影响；另一方面，高压导体上输送的电流与外壳上感应的电流是等值反向的，因此 GIL 周围外部空间的电磁场几乎为 0，可以忽略不计。

(6) 适用于复杂地形、远距离输电。GIL 设备的电容值、电阻值较小，即使进行长距离电能输送，也不需要无功补偿和冷却系统。另外，GIL 设备能够克服敷设高度差以及弯曲半径的限制，适用于大跨度、高落差地区的长距离输电。

(7) 运行成本低。虽然 GIL 设备每千米造价是电缆的 4~5 倍，是架空线路造价的 10 倍以上，使得 GIL 设备的一次性投入成本高，但是由于 GIL 设备的运维成本低和损耗小，其一次性投入成本在经过大约 5 年的运行之后，可以实现资本回收。

1.2 GIL 输电技术特点

架空输电线路、高压电缆和 GIL 输电技术都有各自的特点，对不同的输电线路进行技术比较，需要综合考虑多项技术参数。由于功能的相互依赖性，在对比中很难简单地说某种方案是最佳的，只能对影响因素作用的大小给出定量的分

析。此外，由于不同的工程项目都有各自的特点，在技术方面的影响是不同的，因此，在实际施工设计中，需要对每个工程项目分别进行分析。

1.2.1 与架空线路的区别

与架空输电线路相比，GIL 设备具有以下优点：

- (1) 由于高压导体安装在全封闭空间中，并充有 SF_6 或 SF_6 混合气体作为绝缘介质，因此，不受自然环境影响，可靠性高，运维工作量小。
- (2) 高压导体中的传导电流与壳体产生的感应电流是等值反向的，因此，设备外部环境中的电磁场几乎为零，不产生电磁干扰。
- (3) 导体截面积大，因此，输送容量大（2000～3000MVA），损耗小。根据实际运行经验，将 1400MW 电能输送至 32km 距离远处，架空输电线路的损耗为 18.56MW，而 GIL 设备的损耗仅为 5.76MW，GIL 设备的损耗还不到架空线路的 1/3。
- (4) 能够克服敷设高度差以及弯曲半径的限制，适用于特殊地形条件下。
- (5) 占地面积小。根据有关资料表明，容量为 2.5GVA 的四回 420kV 架空线路或一回 765kV 架空线，所需的线路走廊宽度约为 35m，但如果换用 420kV 的 GIL，则单项封闭式占地宽度仅约为 2.3m，三相封闭式占地宽度则仅为 0.9m。

图 1-4 为架空输电线路实物图，图 1-5 为 GIL 实物图。



图 1-4 架空输电线路实物图



图 1-5 GIL 实物图

1.2.2 与电缆的区别

与高压电缆相比，GIL 设备具有以下优点：

（1）传输容量大。由于制造工艺的原因，考虑技术和经济因素，电缆导线截面积已经到了的极限，但是 GIL 设备导线截面可以做到更大，在提高传输功率方面具有巨大的优势。表 1-1 以传输容量为 1100MVA 为例，给出了 GIL 与电缆的传输损耗对比。

（2）不易老化，使用寿命长。GIL 设备的气体介质为 SF₆ 或 SF₆ 混合气体，不存在老化问题，而且气体介质在发生击穿后，介质具有较强自恢复能力。虽然盆式绝缘子会存在一定的老化情况，但比电缆绝缘材料的老化情况要好得多。根据已有的研究结果，GIL 设备的使用寿命至少可以达到 50 年。

（3）电容值小，介质损耗小。GIL 设备的电容值远小于常规电缆，因此充电电流小，传输距离可以增加，而且无需安装电抗器等无功补偿装置。表 1-1 给出了典型 GIL 设备与电缆的一些基本物理参数。图 1-6 和图 1-7 分别为电力电缆和 GIL 实物图。

表 1-1 GIL 设备与电缆的基本物理参数对比

参 数	充油电缆	交联聚乙烯电缆	GIL
单位长度电感（mH/km）	0.68	0.73	0.22
单位长度电容（nF/km）	269	183	54
单位长度电阻（mΩ/km）	23	19	9.4
特性阻抗（Ω）	50	64	63

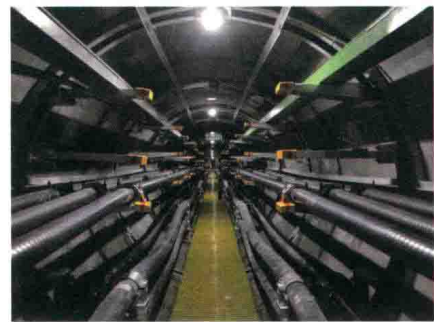


图 1-6 电力电缆实物



图 1-7 GIL 实物图

续表

电压等级 (kV)	累计长度 (km)
550	265
800	15
1200	1.26
总计	757.26

由于具有上述优点，GIL 设备已经在世界范围内得到越来越广泛的应用。典型的应用情况包括：

- (1) 高压电力变压器与断路器的连接；
- (2) 地下发电站高压电力变压器与外部架空输电线路的连接；
- (3) GIS 与架空输电线路或变压器的连接；
- (4) 高海拔、大落差、大跨度，跨江、跨海等特殊环境中的电能输送；
- (5) 高压阀厅内直流穿墙套管的替代。

1.3.1 国内典型 GIL 工程

20 世纪 90 年代初期，GIL 设备开始在中国得到应用。

(1) 天生桥水电站 500kV GIL 线路为我国敷设的第一条 GIL 线路，由压缩气体绝缘输电线路公司（Compressed Gas Insulated Transmission Corporation，简称 CGIT 公司）于 1992 年制造，用于连接变压器和空气套管。该 GIL 工程的单相长度为 50m，额定电压为 550kV，额定电流为 2000A，雷电冲击耐压为 1550kV。

(2) 广东岭澳核电站 500kV GIL 工程也是由 CGIT 公司于 1998 年制造，用于连接主变压器和 GIS，单相线路长 3008m，隧道敷设，额定电压 550kV，额定电流 2000A，雷电冲击耐压 1550kV。

(3) 浙江省瓶窑变电站。华东电网的首条 500kV GIL 于 2004 年 6 月在浙江瓶窑变电站投运，为 500kV 母线分裂改造工程创造了有利条件。该设备由河南平高东芝高压开关有限公司制造，关键零部件全部由日本东芝进口，采用户外架设，法兰连接。上海 500kV 泗泾变电站 GIL 设备，单相总长度为 3.2km，双层布置敷设，双回出线最大宽度仅为 2.88m，无需新征地，不涉及控制和保护系统的改造。

(4) 青海省拉西瓦水电站。拉西瓦水电站位于青海省贵德县拉西瓦镇境内的

黄河干流上，是黄河上游龙羊峡至青铜峡河段规划的第二座大型梯级电站，其地理位置和外貌如图 1-8 所示。该水电站出线设计采用 GIL 技术，由 CGIT 公司制造，从 GIS 间隔引至出线平台后转架空线送出，是中国目前电压等级最高的 GIL 工程。该 GIL 设备的最高电压为 800kV，额定电流为 5000A，雷电冲击耐压为 2100kV，操作冲击耐压为 1550kV，根据现场的特点，共设置了一种直线标准单元（长 11.5m）和五种转弯单元，拉西瓦 GIL 的结构示意图如图1-9所示。



图 1-8 拉西瓦水电站地理位置及外貌

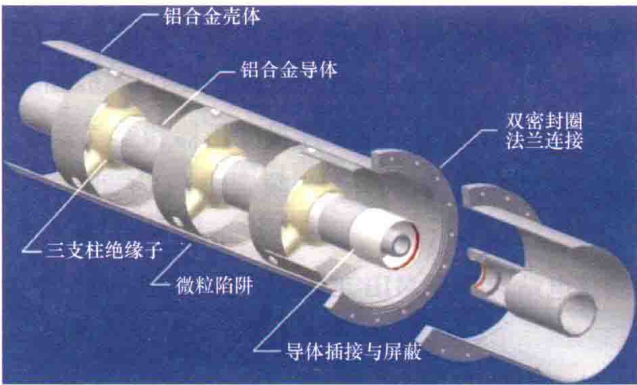


图 1-9 拉西瓦水电站 800kV GIL 结构示意图

拉西瓦水电站 GIL 设备布置在电站主变通风管道夹层，地面高程为 2252.70m，空间净高 7m，GIL 与 GIS 出线相连后经 105m 长水平廊道，如图 1-10所示；再穿过高 207m 的垂直竖井到地面高程为 2460m 出线层，如图 1-11 所示；两端分别连接 GIS 与线路设备。电站通过西宁间隔与官亭间隔两回 GIL 经拉宁线和拉官线分别接入 750kV 西宁变电站和官亭变电站。



图 1-10 水平长廊及 800kV GIL



图 1-11 垂直竖井及 800kV GIL

GIL 竖井剖面呈截去左侧的圆形，圆形的内半径为 5600mm，左侧的截面长度为 7952mm；GIL 水平廊道剖面下方呈长方形，上方呈圆形，下方尺寸为 6000×3200mm，上方圆形内径为 3750mm，如图 1-12 所示。

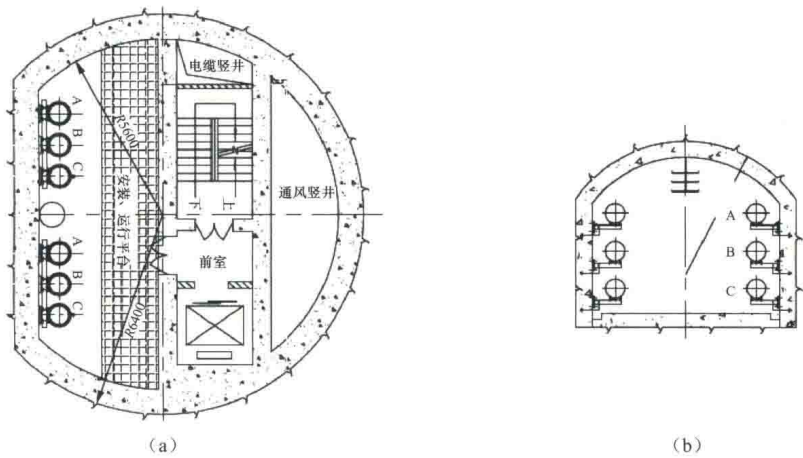


图 1-12 GIL 竖井、水平廊道剖面图

(a) GIL 竖井剖面图；(b) GIL 水平廊道剖面图

拉西瓦水电站 800 kV GIL 的主要技术参数如表 1-4 所示。

表 1-4 拉西瓦水电站 800kV GIL 工程的主要技术参数

主要技术参数	参数值
额定电压 U_e	462/800kV
额定电流 I_e	5000A
雷电冲击耐受电压	2100kV
操作冲击耐受电压	1550kV
绝缘介质	SF ₆