

适用于公里级高温超导电缆的排管通道设计研究

蔡龙晟¹, 孟 毓¹, 谢 伟², 李 艳¹, 李帅波¹, 许经纬¹, 鞠 萍¹, 陈妍君³

(1. 上海电力设计院有限公司, 上海 200025; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 3. 国网上海市电力公司市南供电公司, 上海 200233)

摘要: 针对即将实施的上海 35 kV 公里级超导电缆试验示范工程, 对适用于公里级超导电缆的排管通道设计进行研究。首先分析了国内外已建的超导电缆工程中应用的超导电缆通道型式, 随后着重针对上海示范工程中所应用的排管通道型式进行分析, 研究从超导电缆特点出发, 分析了超导电缆路径选择的制约点以及排管通道的断面设计。最后, 考虑到超导电缆敷设过程中所产生的牵引力、侧压力是通道设计的主要限制条件, 对超导电缆排管通道设计中需特殊考虑的措施进行了分析, 并给出了三点建议, 用以控制超导电缆所承受的最大牵引力及侧压力, 确保通道设计能够满足超导电缆的安全敷设。

关键词: 超导电缆; 排管设计; 电缆敷设

Research and design of ductbank for kilometer class high temperature superconducting cable

CAI Longsheng¹, MENG Yu¹, XIE Wei², LI Yan¹, LI Shuaibo¹, XU Jingwei¹, JU Ping¹, CHEN Yanjun³

(1. Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200025, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 3. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shinan Power Supply Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: In view of the upcoming 35 kV kilometer class High Temperature Superconducting (HTS) cable test demonstration project in Shanghai, research and design of the ductbank suitable for kilometer class HTS cable has been done. Firstly, The HTS cable laying method adopted in the established HTS cable projects at home and abroad have been surveyed and analyzed. Based on the survey result, the cable laying method in Shanghai demonstration project is analyzed. On the basis of the characteristics of HTS cable, the critical factor of the route selection of superconducting cable and the cross-section design of the ductbank are analyzed. Finally, due to the traction and the lateral pressure during the HTS cable laying process are the main constraints of ductbank design, considering measures are analyzed. Three measures is introduced to constrain the maximum traction and the lateral pressure in order to guarantee the safety of the HTS cable laying in ductbank.

Key word: superconducting cable; ductbank design; cable laying

0 引言

超导电缆输电技术在应对新能源变革对电网

带来的重大挑战、全球能源互联网建设等领域有着显著的优势。上海依托其在超导材料和超导电缆技术积累, 拟建设 35 kV 公里级长度超导电缆示范工程, 以推动地区超导技术的发展及其产业化。本工程在上海 220 kV CC 站和 220 kV CX 站

国家电网公司科技项目国产公里级高温超导电缆系统关键技术及示范应用研究 (520940180014)

之间建设 1 回电压等级 35 kV、额定电流 2.2 kA 的超导电缆，替代现有 4 回 35 kV 常规电缆，新建电缆线路路径长度约 1.15 km，全线设置有两组中间接头。

超导电缆作为一种新型的电缆型式，相对于传统电缆而言，其对配套电缆通道提出了新的要求。同时，由于本次示范工程线路路径较长，达到公里级指标，线路中需设置超导电缆接头两处，亦是目前国内外已建成的示范工程中未曾出现的情况。对于公里级长度的超导电缆而言，由于其距离长并存在超导电缆接头，其配套通道设计方案是工程顺利实施的重要内容。

本文将对适用于公里级超导电缆的排管通道进行设计方案研究，目的是确保通道建成后能够满足超导电缆敷设条件，同时满足投运后超导电缆安全稳定运行的需求。本文将从超导电缆的特点出发，重点研究超导电缆排管通道设计。

1 超导电缆通道型式

1.1 国内外超导电缆项目工程的通道型式

纵观国内外已经建成的超导电缆试验示范工程，超导电缆的通道选型大多根据项目的目的以及超导电缆的所处位置而决定。

在日本 super-ACE 项目中，500 m 超导电缆采用明敷的方式。该项目试验性质较为明显，采取明敷有助于实施敷设过程中以及敷设后的各类试验项目^[1]。在国内，云电英纳云南普吉项目、中国科学院电工所甘肃长通电缆项目这两项较早投运的项目也采取了明敷的方式。明敷方式具有实施简便、易于观察的优点。同样采用明敷方式的还有日本铁路项目，其建设长度为 310 m，除终端节点外，超导电缆全线沿铁路轨道边沿建设^[2]。该项目的实施地点特殊，因而采用了明敷的敷设方式。

在日本 Ishikari 项目中，分别建设了长度达到 500 m 以及 1 000 m 的超导电缆回路，其中 500 m 回路超导电缆敷设于道路下方的钢管之中，1 000 m 回路电缆敷设于地面上。美国长岛 LIPA 项目超导电缆路径长度为 660 m，电缆沿已建道路地埋穿管敷设。在美国 Albany 项目中，超导电缆路径长度为 350 m，其中 320 m 电缆利用水平定向钻拖拉管进行敷设。在德国 ESSEN 实施的 Ampacity 超导项目同样采用了穿管敷设的方式。上述四项穿管敷设的超导电缆项目均具有电缆路径长度较长的特点，其中美国两项目以及德国 ESSEN 项目实施地点均位于城区内，超导电缆通道需要利用管道穿越市政道路，与电网工程实际情况已较为接近，如图 1 所示。



图 1 美国 LIPA 工程(左)及德国 ESSEN 工程(右)穿管敷设

Fig. 1 Cable laying in duct of LIPA project in America and ESSEN project in German

国内 2013 年实施的宝钢超导电缆示范工程中，超导电缆敷设在宝钢厂区内自建的电缆沟内^[3]，具有便于敷设施工以及后期运维检修的特点。在韩国高敞高温超导电缆工程中采用了隧道

作为超导电缆敷设通道^[10]，其具有可靠性高、便于敷设的优点，但相对造价较高。

1.2 示范工程电缆通道型式的选择

为了确保超导电缆示范工程建成后安全可靠

运行，新建电缆通道需满足高可靠性的要求，因此在示范工程中不建议采用可靠性较差的明敷以及直埋的方式。在电力隧道、电缆沟和电力排管这三种通道型式中，电力隧道的环境条件最好，防外破能力最强，但其造价最高，建设过程需占用的地下空间也最多；电缆沟在城市路网中不具备长距离建设的条件；电力排管具备一定的防外破能力，在建设过程中相对灵活，可实施性较高，建设经验也相对成熟。

上海电网是目前我国最大的城市电网，上海电力电缆通道主要为电力排管。对于城市建设开发强度较大、地下管线较为密集的区域而言，电力排管具有实施便利、通道集约的优点。本次超导试验示范线路工程实施地点位于上海市核心区域，根据周边地下空间以及道路条件判断认为电缆隧道可行

性较低。另一方面，考虑到超导电缆工程未来在城市电网应用中的可推广性，建议在上海电网超导示范工程中主要采用排管的通道型式。

2 超导电缆特点

高温超导电缆的结构与常规电缆差别较大，其基本组成结构按照由内而外的顺序可分为内支撑芯、电缆导体、热绝缘层、电绝缘层、电屏蔽层和外护层等。公里级超导电缆系统采用三相同芯电缆结构。电缆以及配套液氮回流管结构型式如图 2 所示。对于超导电缆排管通道设计而言，超导电缆的外径、重量、弯曲半径及敷设过程中可允许的牵引力、侧压力大小等参数将出现有别于传统排管的制约条件，具体如下表所示。

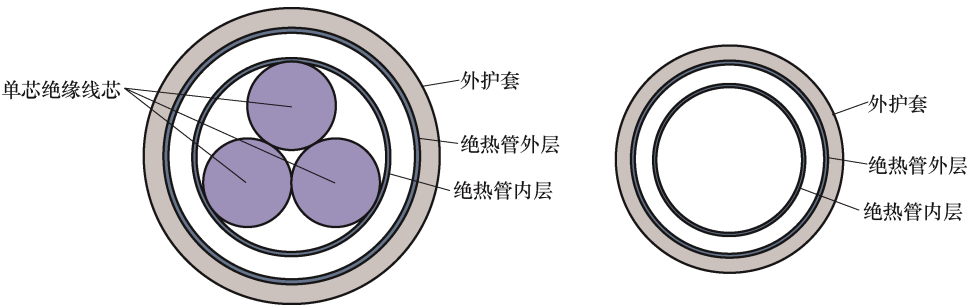


图 2 三相同芯超导电缆及液氮回流管结构示意图
Fig. 2 Schematic cross sections of HTS 3-phase cable and LN2 return pipe

表 超导电缆特性参数
Tab. HTS cable parameters

	单位	数值
超导电缆外径	mm	190
端部绝热法兰外径	mm	200
端部绝热法兰长度	mm	700
超导电缆重量	kg/m	40
弯曲半径	/	20D
最大牵引力	N	≤27 000
最大侧压力	N/m	≤3 000
超导电缆冷缩量		~3‰
液氮回流管外径	mm	130(接头端部 150)

3 超导电缆路径选择制约点

根据目前超导电缆生产工艺以及国内外实际相关项目情况的调研结果，超导电缆敷设过

程中对侧压力的限制要求较高，线路设计过程中应尽量避免 90°大转角的情况，亦可采用增大转角工井内径尺寸和增大电缆转弯半径的方式来减小电缆敷设过程中的侧压力。

为了减小运行过程中的热传导，降低超导电缆的热损耗，超导电缆在电缆两端设置有绝缘管法兰，上有真空抽头，用以在电缆敷设完成后进行抽真空。区别于超导电缆的其他部分，该绝热管法兰为一根长直不锈钢管，长度约 700 mm，且不能弯曲。对于传统城市地下电缆排管而言，为了应对市政道路路由弯曲、与市政管线交叉穿越等情况，排管管节接续处大多有夹角的存在。考虑到超导电缆前后各有一处直管法兰段，从任意一端开始牵引均无法避免直管法兰在排管内牵引

通过。因此,排管路径在设计过程中需保证排管顺直,确保直管法兰能够顺利在管道内通过。

4 超导电缆排管设计

4.1 排管孔径

从上表中可知,超导电缆的成缆外径可达到190 mm,每盘电缆两端端部设置有绝热管法兰,其外径达到200 mm。外置液氮回流管的外径可达到150 mm。从电缆外径角度来看,其尺寸相对常规电缆有很大程度的增加。普通电力排管的内径一般小于200 mm。显然,利用普通内径的电力排管无法满足敷设超导电缆的要求。因此,超导电缆所利用的排管通道需扩大其内径,拟定为300 mm,符合国家标准中关于电缆保护管外径需大于电缆外径1.5倍的要求。

4.2 排管规模

从超导电缆系统可知,除了超导电缆本体以外,液氮回流管也需要随电缆同通道敷设,其管径为130 mm,接头端部外径达到150 mm,常规管径排管同样无法满足敷设液氮回流管的要求。因此,液氮回流管同样需要敷设于300 mm内径的排管内。

根据上述超导电缆本体以及液氮回流管的孔径敷设需求,同时额外考虑1孔备用孔,则示范工程中新建专用排管通道拟采用3($\phi 300$)+1($\phi 175$)孔排管,其中3孔 $\phi 300$ 内径管孔分别用于超导电缆、液氮回流管以及备用孔敷设,1孔 $\phi 175$ 内径管孔用于敷设超导系统所需敷设的控制电缆、通信光缆等小线。

4.3 孔位布置

首先,示范工程所在地处于上海市中心城区,地下管线密集,为了增加排管实施的可行性,建议采用单排布置的方式,减小排管箱体厚度,便于排管在管线密集处交叉穿越。其次,排管中设有常规孔,用于敷设控缆、光缆等小线,其中包括随超导电缆同通道敷设的测温光缆。测温光缆系统能够监测通道火灾隐患,同时对超导电缆或液氮回流管损坏而造成的环境异常降温进行报

警,及时发现超导电缆内部液氮泄露等故障情况并进行准确定位,为超导电缆可靠运行提供保障。因此,超导电缆排管中备用孔建议设置于边侧,超导孔位设置于中间一孔,小线通信孔设置于中间另一孔,液氮回流管设置于小线通信孔相邻另一侧,如图3所示。

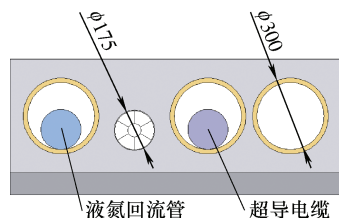


图3 超导排管断面示意图

Fig. 3 Schematic cross section of HTS cable duct

4.4 考虑超导电缆敷设牵引力及侧压力的排管通道设计

超导电缆绝缘线芯外为真空绝热层,为两层不锈钢结构且两层之间为真空结构。当承受超过其能承受的侧压力时,将造成绝热管结构破坏。而超导电缆的重量较重,但其可承受的敷设牵引力、侧压力较常规电缆要小。根据国外已建超导电缆工程经验,在Albany项目中,电缆总长度为350 m,其中320 m在长非开挖拖拉管中敷设,电缆与管壁摩擦系数为0.25。电缆敷设过程中测量了电缆所承受的实时牵引力,其最大值为2.5 t。日本横滨超导电缆项目中电缆敷设时承受的最大牵引力为1.3 t,而其电缆最大可承受的牵引力为2.0 t。

相对地,以常规电缆中重量和外径与超导电缆相当的500 kV-2 500 mm²交联聚乙烯电缆为例,其重量为44.3 kg/m。若以铜芯为牵引部位,铜芯最大牵引力为70 N/mm²,则最大牵引力可达到175 kN,也即约17.86 t,远大于超导电缆可承受的最大牵引力。因此在超导电缆排管通道的设计过程中,需要对超导电缆排管通道进行特殊考虑。

以式(1)作一简单的推算

$$T = \mu WL \quad (1)$$

式中, T 为电缆敷设时所受的牵引力; μ 为电缆在管道敷设时的摩擦系数; W 为电缆单位重量; L 为电缆长度。

若考虑排管内壁与电缆外护层之间摩擦系数 μ 为 0.3, 则理论上 500 kV-2 500 mm² 交联聚乙烯电缆可进行直线牵引的长度约为 1 343 m。与此对照以超导电缆的重量以及最大牵引力为计算条件下可知, 理论可进行直线牵引的长度仅为 229 m。

另一方面, 由于电缆敷设过程中的牵引力在同样弯曲角度的情况下, 与其转角处所承受的牵引力成正比, 即

$$P = \frac{T}{R} \quad (2)$$

式中, P 为电缆敷设时承受的侧压力; R 为电缆的弯曲半径。

假设一种简单的敷设工况, 当电缆在一段直线路径牵引后, 随即进行弯曲敷设。此时可由式 (3) 推算电缆在承受一定侧压力时, 其对应直线敷设的长度, 即

$$L = \frac{PR}{\mu W} \quad (3)$$

示范工程中采用的超导电缆外径可达到 190 mm。不妨假设一种较为宽松的弯曲敷设环境, 即超导电缆在转角工井内利用 30 倍电缆外径的弯曲半径 5.7 m 进行弯曲敷设。对于超导电缆 3 000 N/m 的侧压力上限而言, 计算可得牵引电缆长度达到 145 m 后即会造成侧压力超标。

由此可知, 超导电缆在排管中敷设对于牵引力、侧压力有相当严格的要求, 超导电缆在排管中敷设存在很大难度。在传统敷设手段下, 若不增加辅助动力设备, 如履带式输送机, 公里级的超导电缆只有采用较小的分盘盘长才能够满足敷设条件。而小分盘将带来接头数量的增多, 除了提高电缆故障的风险外, 也会加大超导电缆系统的热损耗, 同时增加制冷系统的负荷。

因此, 超导电缆若需在排管中进行敷设, 则必须从以下几方面着手降低超导电缆敷设的难度。

1) 采用内壁摩擦系数较小的管材。根据调

研, 目前管材生产厂家具备生产内壁摩擦系数可达到 0.2 的 HDPE 管材。该管材采用高密度聚乙烯为主材, 加入提高导管力学及加工特性的添加剂。低摩擦系数将极大改善超导电缆的敷设环境。然而, 由于该种管材在电力行业基本无既往使用经验, 在工程实践中使用该种管材, 需结合排管路径、埋深条件进一步细化确认其抗压强度以及施工工艺。

2) 排管通道设计中应适当增加工井数量, 减小工井间距, 便于在各工井内设置履带式输送机。

3) 优化电缆敷设施工方案, 由于电缆弯曲敷设前后会增加敷设牵引力, 电缆敷设的方向不同, 单盘电缆的末端敷设牵引力也会不同。电缆敷设前, 应根据通道路径条件, 合理确定敷设牵引力、侧压力较小的敷设方式。

上述三点建议中, 低摩擦系数管材由于涉及到新管材的应用, 尚存在一定的不确定性。因此, 实际工程中, 将在开展新型管材研究的基础上, 同时减小常规管材排管通道中的工井间距, 并优化敷设方案。示范工程中超导电缆的路径情况如图 4 所示, 全线设置中间接头两处。本文对超导电缆敷设牵引力及侧压力进行了分析, 明确了各段超导电缆敷设过程中可能出现的最大牵引力及侧压力, 以及为了将牵引力侧压力降低到满足超导电缆安全设计条件下需要额外增加用于设置履带式输送机的工井数量。

通过对三段电缆两种敷设方向的电缆敷设牵引力及侧压力计算, 推荐敷设方案如下:

1) 首段电缆建议由 CC 变电站向 1[#]接头方向敷设, 电缆盘设置于变电站内, 卷扬机设置于 1[#]接头工井。该段需增设工井 1 座, 用于设置履带式输送机。

2) 中间段电缆建议由 2[#]接头向 1[#]接头方向敷设, 电缆盘设置于 2[#]接头工井处, 卷扬机设置于 1[#]接头工井处。该段无须增设工井。

3) 末端电缆建议由 CX 变电站向 2[#]接头方向敷设, 电缆盘设置于变电站内, 卷扬机设置于 2[#]接头工井处。该段无须增设工井。

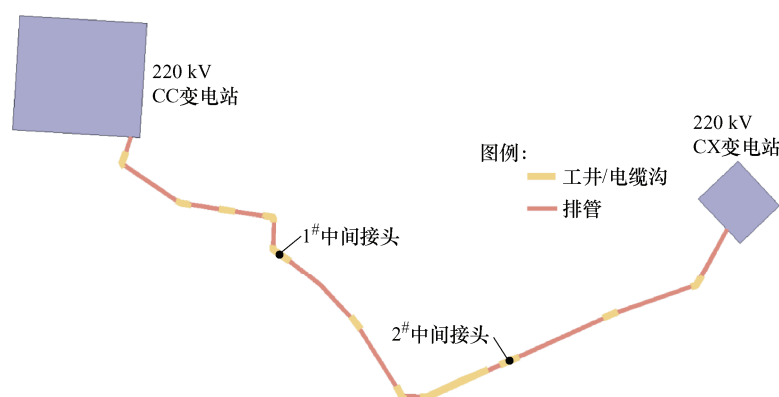


图4 超导示范工程路径示意图

Fig. 4 Schematic diagram of HTS demonstration project route

5 结束语

本文针对公里级高温超导电缆的特性，分别从三相统包超导电缆本体尺寸、重量、敷设牵引力和侧压力等方面研究影响超导电缆排管设计的边界条件。旨在为未来超导工程推广应用提供借鉴。以边界条件为基础，结合典型的路径和地形特点，提出了适合工程化的超导电缆敷设的排管设计建议：

- 1) 排管路径在设计过程中需保证排管顺直，减小通道转角。
- 2) 超导电缆排管孔径需与超导电缆本体及其液氮回流管的超大外径进行匹配。
- 3) 超导电缆排管通道孔数规模需满足超导电缆本体、液氮回流管以及随线路建设所配套的弱电、通信等线缆的敷设需求，同时考虑预留备用检修孔。
- 4) 小线孔由于敷设测温光缆的需要，建议与超导电缆相邻布置，以便监测液氮泄露时造成的环境异常降温。
- 5) 超导电缆排管通道设计受到超导电缆敷设可承受的最大牵引力、侧压力影响很大，有必要采用以下措施：① 选用低摩擦系数管材；② 增加工井数量，用以增加设置履带式输送机等敷设

辅助装置；③ 优化敷设施工方案，减小敷设过程中的牵引力以及侧压力。EA

参考文献

- [1] MUKOYAMA S, ISHII N, YAGI M, et al. Manufacturing and installation of the world's longest HTS cable in the super-ACE project[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1763-1766.
- [2] TOMITA M, AKASAKA T, FUKUMOTO Y, et al. Laying method for superconducting feeder cable along railway line [J]. Cryogenics, 2018, 89: 125-130.
- [3] 魏东, 宗曦华, 徐操, 等. 35 kV 2000 A 低温绝缘高温超导电力电缆示范工程 [J]. 电线电缆, 2015(1): 1-3, 5.

作者简介：



蔡龙晟

蔡龙晟(1988—)，男，硕士，工程师，主要研究方向为输电工程咨询与设计。

(收稿日期：2020-05-09)