DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.200 **中图分类号**：TM725 **文献标志码**：A

面向轨道交通氢电联供的液氢能源管道概念设计与能效评估

陈 宇[1](中国电源学会学生会员)，付 琳[1](中国电源学会高级会员)，
陈孝元[2](中国电源学会高级会员)，陈洁莲[3](中国电源学会高级会员)，
沈博洋[1](中国电源学会会员)，康劲松[1](中国电源学会高级会员)
(1.同济大学交通学院，上海 201804；2.四川师范大学工学院，成都 610101；3.株洲中车时代电气股份有限公司，株洲 412001)

摘要：随着交通与能源领域的深度耦合，推动交通用能电气化、绿色化是实现“双碳”目标的重要技术手段。以低温能源作为高温超导电缆的冷却媒介，实现电力与燃料联合传输，提高能源传输效率并降低综合成本，是大规模可再生能源传输的有效途径。以10 km传输距离为例，设计了1种适用于轨道交通的1.5 kV/10 kA液氢能源管道结构。同时，通过建立超导电缆有限元仿真模型，研究了正负双极超导带材的排布角度对其临界电流的影响，其中平行排布方式下临界电流最大约为15 240 A。最后，对比了15 MW/10 km的超导电缆与传统铜电缆的系统传输损耗。研究结果表明，1.5 kV超导电缆的传输损耗仅为10 kV传统交流电缆的15%，且略低于35 kV电压等级的损耗，可为液氢超导能源管道应用于大容量电能与氢能传输提供1种可行的技术思路。

关键词：轨道交通；能源管道；超导电缆；液氢

Conceptual Design and Energy Efficiency Evaluation of Liquid Hydrogen Energy Pipelines for Combined Hydrogen-electricity Transmission in Railway Transportation

CHEN Yu[1], *Student Member*, *CPSS*, FU Lin[1], *Senior Member*, *CPSS*, CHEN Xiaoyuan[2], *Senior Member*, *CPSS*, CHEN Jielian[3], *Senior Member*, *CPSS*, SHEN Boyang[1], *Member*, *CPSS*, KANG Jinsong[1], *Senior Member*, *CPSS*
(1. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China; 3. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: With the significant integration of transportation and energy fields, the electrified and “green” energy consumption in transportation is an important technical solution for achieving the targets of carbon peak and carbon neutrality. The use of low-temperature energy as coolants for high-temperature superconductor (HTS) cables can simultaneously transport the electric energy and fuels, which can improve the energy transmission efficiency and reduce the overall costs for large-scale renewable energy transmission. For a 10 km transmission distance, a 1.5 kV/10 kA liquid hydrogen (LH_2) energy pipeline structure for railway transportation is designed. Meanwhile, the effect of the arrangement angle of positive and negative bipolar HTS tapes on their critical currents was investigated by establishing a finite element simulation model of HTS cable. The maximum critical current was about 15 240 A in the parallel arrangement. Finally, the transmission losses of HTS cables and conventional copper cables with the same capacity (i.e., 15 MW/10 km) were compared. Results show that the transmission loss of 1.5 kV HTS cable was only 15% of that of 10 kV conventional AC cable, and it was also slightly lower than that at the 35 kV voltage level. The findings in this research can provide a feasible technical solution for LH_2 HTS

收稿日期：2024-12-06；**修回日期**：2024-12-26；**录用日期**：2024-12-29；**网络首发日期**：2025-01-14
基金项目：青年人才托举工程资助项目(2023QNRC001)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目
This work is supported by CAST under Young Elite Scientists Sponsorship Program under the grant 2023QNRC001; The Fundamental Research Funds for the Central Universities

energy pipelines to be used for large-capacity combined hydrogen-electricity transmission.

Keywords: Railway transportation; energy pipeline; high-temperature superconductor (HTS) cable; liquid hydrogen (LH_2)

国家能源局印发的《2024 年能源工作指导意见》中明确指出，将积极推进能源的绿色低碳转型，并加快构建充电基础设施网络体系，深入推动交通用能电气化[1-2]。随着交通领域电气化比例的不断提升，对电能的需求日益增长，线路传输损耗也随之增加。传统交流输电技术在长距离和大容量传输方面显现出局限性，难以满足大规模可再生能源并网与高效传输的需求[3]。近年来，柔性直流输电技术广泛应用于新能源送出、电网互联和远距离输电[4]。然而，高压柔性直流输电对换流阀等核心部件提出了新的技术挑战，需要对高压大容量功率器件完成一系列技术突破，从而提高系统的稳定性[5]。相比于传统交流输电与高压直流输电，超导电缆具有传输容量大、电压等级低、占地走廊小、线路损耗低等优势，有望彻底改变能源传输和分配的方式[6]。

在国内外的研究中，超导电缆示范工程的广泛安装标志着输电技术的重大突破[7-9]。2021 年，广州深圳安装运行了国内首条 10 kV/2.5 kA/400 m 的三相同轴高温交流电缆，直径仅 17.5 cm，输电损耗仅为常规电缆的 1/4 到 1/5；同年，上海徐汇安装运行了世界首条 35 kV/2.2 kA/1.2 km 的超导交流电缆；2023 年，江苏苏州并网运行了国内首条±375 V/4.5 kA/180 m 的低压直流电缆。在交通供电系统中，日本研究所设计并安装了 1 条 310 m/1.5 kV/10 kA 超导直流电缆，并在直流铁路馈电线上成功进行了首次商用列车测试[10]；法国 SuperRail 项目开发并安装了 2 根 60 m/1.5 kV/3.5 kA 的高温超导直流电缆，用于加强巴黎蒙帕纳斯火车站的电力供应[11]。

然而，超导电缆运行需要低温环境。相比较于液氮 LN_2(liquid nitrogen)制冷，液氢 LH_2(liquid hydrogen)的能源密度高，是常温常压气态氢的 845 倍，是压缩氢气的 6 倍，汽化潜热大(约 446 kJ/kg)，是非常理想的冷却介质和大容量储能介质[12]。随着氢燃料列车与汽车的增加，交通领域对氢能的需求也越来越大。同时，新能源的广泛接入也正在改变电网的结构，导致一些电网设备面临容量不足或过剩的问题，从而严重限制了新能源消纳。因此，考虑利用可再生能源剩余电力来制备液氢，由液氢作为超导电缆的冷却媒介，通过液氢超导能源管道联合传输电能和氢能，不仅可以节约冷却成本，还可以提升超导电缆载流能力。

在可再生能源发电领域，特别是在大型光伏发电系统中，1 500 V 高压直流系统的应用已成为趋势。基于此背景，参照 GB/T 10411—2024《城市轨道交通直流牵引供电系统》等轨道交通供电系统的国家标准，本文提出了 1 种面向轨道交通的液氢能源管道设计方案，该方案旨在实现 1.5 kV/10 kA 的电力与氢燃料的联合传输。首先，根据液氢传输压降与温升条件，选取了合适的流速与管径，并比较了液氢恒温器在室温环境与液氮环境的漏热。其次，建立了超导电缆有限元仿真模型，分析了双极超导电缆带材排布方式对其临界电流的影响。最后，对比了 15 MW 传输容量下超导直流电缆与传统铜电缆的系统传输损耗，为未来大容量长距离的电能与氢能输送提供一种可行的技术思路。

1　轨道交通氢电能源管道概念设计

图 1 为面向交通系统的氢电能源传输方案。其中：方案 1 仅传输电力，可再生能源发电通过电能变换器，经由高压交流电缆输送至交通系统，为牵引列车、充电站等提供所需的电能；方案 2 仅传输压缩氢气，可再生能源发电通过电解水制氢并压缩，然后利用槽车将氢气运输至加氢站；方案 3 在方案 2 的基础上进行了优化，通过液化氢气实现低压、大容量的液氢传输；方案 4 中一部分可再生能源电力通过超导电缆进行传输，剩余部分则用于制备液氢，作为超导电缆的冷却媒介，通过液氢能源管道进行联合传输，为交通系统负荷同时提供电能与氢能。为满足轨道交通的能源需求，本文基于方案 4 设计了 1 条 1.5 kV/10 kA 的液氢超导能源管道。

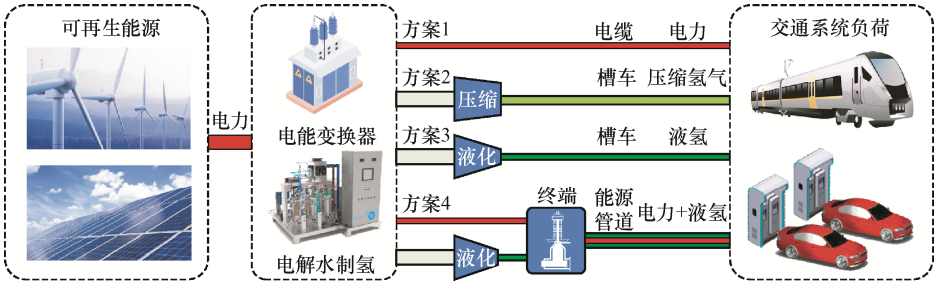


图 1 面向交通系统的氢电能源传输方案

Fig. 1 Hydrogen-electricity energy transmission scheme for transportation systems

图 2 为长距离液氢超导能源管道系统示意图。液氢与液氮介质以受控的入口温度和压力进入一个冷却站，经过一段距离 L 后，在下一个冷却站重新冷却。为确保系统安全，液氢与液氮介质出口压力不得低于设定的最小压力，以避免形成气泡。制冷系统的成本，从 300 K 到 77 K 的制冷成本约为 80 万元/kW(冷量)，从 77 K 到 20 K 的制冷成本也约为 80 万元/kW[13]。

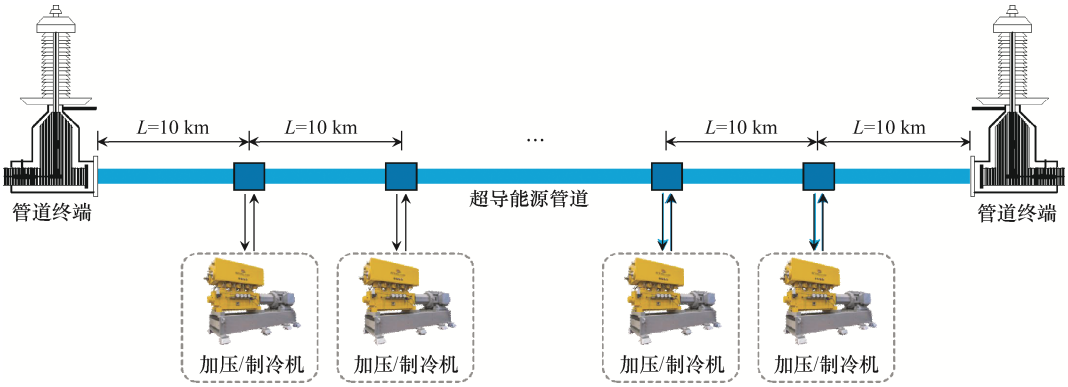


图 2 长距离液氢超导能源管道系统示意

Fig. 2 Schematic of long-distance liquid hydrogen superconducting energy pipeline system

2 能源管道结构设计

图 3 为液氢能源管道结构示意图，从内到外主要有液氢层、铜导体、超导电缆、绝缘保护以及液氮等。该管道采用两级冷却方式，这种配置能够大幅降低超导电缆的总体冷却功率。具体来说，外层的液氮层起到了热屏蔽的作用，从而减少了液氢层由于辐射而产生的热负荷。

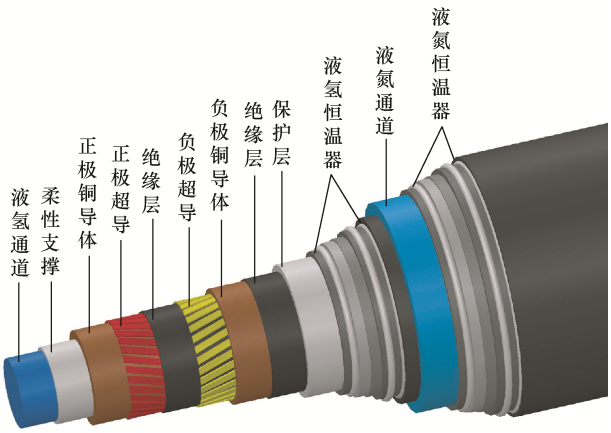


图 3 液氢能源管道结构示意

Fig. 3 Schematic of structure of liquid hydrogen energy pipeline

图 4 为氢的相图，根据液氢的压力与温度关系，传输过程中液氢应保持液态相位[14]。表 1 列出了所考虑的液氢超导能源管道所允许的温度和压力极限。

根据质量、动量和能量的平衡，可以推导出低温管道内冷却剂流动的严格控制方程[15]。由于管道的长度远大于横向尺寸，因此可以使用一维模型。如果假设流体不可压缩，则沿管道长度方向液氢层的压力差和温度差[16]分别为

$$\begin{cases}\Delta P=\dfrac{f_{\mathrm{H}}\rho_{\mathrm{H}}v_{\mathrm{H}}^2L}{2D_{\mathrm{H}}}\\ \Delta T=\left(\dfrac{f_{\mathrm{H}}v_{\mathrm{H}}^2}{2D_{\mathrm{H}}C_{\mathrm{pH}}}+\dfrac{4q}{\pi D_{\mathrm{H}}^2\rho_{\mathrm{H}}v_{\mathrm{H}}C_{\mathrm{pH}}}\right)L\end{cases}\tag{1}$$

式中：f_{H}为液氢流动摩擦因数；ρ_{H}为液氢的密度；v_{H}和 D_{H}分别为液氢的流速和管径；C_{pH}为液氢的恒压比热；q 为管道漏热(初始假定为 1 W/m)。

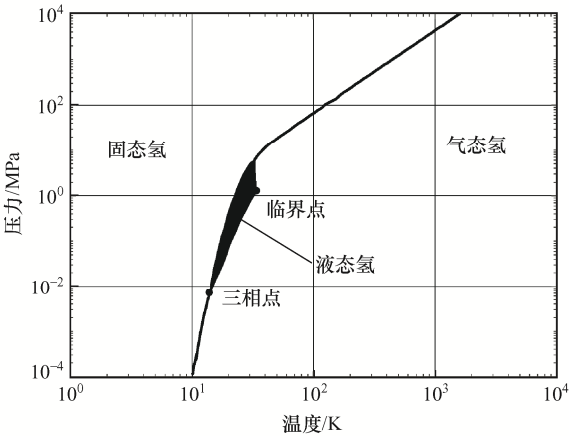


图 4　氢的三相图

Fig. 4 Three-phase diagram of hydrogen

表 1　液氢超导能源管道的温度和压力允许极限

Tab. 1 Temperature and pressure limits of liquid hydrogen superconducting energy pipeline

参数	LN_2	LH_2
管道入口温度/K	65	17
管道出口最大温度/K	77	25
管道入口压力/MPa	2	2
管道出口最小压力/MPa	0.5	0.5

液氢流动摩擦因数取决于低温介质的流速与水力直径，计算公式[17]为

$$\begin{cases}\dfrac{1}{\sqrt{f_{\mathrm{H}}}}=-2\log_{10}\left(\dfrac{\varepsilon}{3.71D_{\mathrm{H}}}+\dfrac{2.51}{R_{\mathrm{e}}\sqrt{f_{\mathrm{H}}}}\right)\\ R_{\mathrm{e}}=\dfrac{\rho_{\mathrm{H}}v_{\mathrm{H}}D_{\mathrm{H}}}{\mu_{\mathrm{H}}}\end{cases}\tag{2}$$

式中：ε 为管道的粗糙程度，将波纹不锈钢假定为光滑管，$\varepsilon=0$；R_{e}为雷诺数；μ_{H}为液氢的动力粘度。

图 5 为液氢流通层的温升与压降等位线，图中 $\Delta P=0.5$ Mpa、$\Delta P=1.5$ MPa、$\Delta T=4$ K 和$\Delta T=8$ K 这 4 条等位线围成的区域是液氢流通层管径 D_{H}与流速 v_{H}的选取范围。根据式(1)和式(2)计算，在该区域内所有的点都满足管道运行温度和压降要求(见表 1)。本文设计的液氢管道内径为 4 cm，流速为 2 m/s。

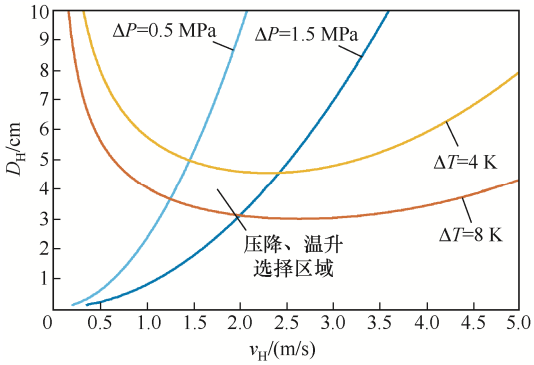


图 5　液氢流通层的温升与压降等位线

Fig. 5 Contour lines of temperature rise and pressure drop for liquid hydrogen layer

根据液氢流通管径与流速，质量流量的计算公式为

$$m_{\mathrm{H}}=\frac{\pi}{4}D_{\mathrm{H}}^2\rho_{\mathrm{H}}v_{\mathrm{H}}\tag{3}$$

通过式(3)可计算出液氢的质量流量为 0.178 kg/s，即 15 379 kg/d，可以满足 15~20 个加氢站每天氢能需求[18]。超导电缆若发生短路电流冲击，故障电流会经过铜骨架分流。铜骨架的最小截面积 $S_{\min}$ 计算公式[19]为

$$\begin{cases}S_{\min}=\dfrac{I_{\mathrm{f}}\sqrt{t_{\mathrm{eq}}}}{C}\\ C=\sqrt{\dfrac{C_{\mathrm{r}}}{a\rho_{\mathrm{r}}}\ln\dfrac{1+a(T_{\mathrm{s}}-T_0)}{1+a(T_{\mathrm{c}}-T_0)}}\end{cases}\tag{4}$$

式中：I_{f}为稳态故障电流有效值；t_{eq}为故障电流持续作用时间；C 为铜导体的热稳定系数；C_{r}为热容量(由铜的比热和密度决定)；α 为 20 K 温度下铜的电阻率温度系数；ρ_{r}为铜导体电阻率；T_{s}为短路故障时电缆允许的最大温度；T_{c}为电缆工作温度，取 20 K；T_0为环境温度，取 300 K。

根据 1.5 kV/10 kA 超导电缆的设计参数，额定电流为 10 kA，短路稳态故障电流设定为 50 kA(考虑 5 倍的额定电流)，短路持续时间设定为 1 s。故障时导体的最大允许温度 T_{s}需综合考虑多种因素，如超导体临界温度、绝缘材料的最高温度及冷却系

统能带走的最大热量等。根据国外测试高温超导线材的比热试验，温度通常控制在 150~200 K 的范围内[20]。因此，本文将 150 K 作为故障时导体的温度上限。通过式(4)计算出最小的铜导体截面为 495.5 mm^2，考虑一定的安全裕量，铜导体层厚度计算为 5 mm。

超导带材选用上海超导科技公司的商业化 REBCO 带材，其结构与性能参数见表 2。超导带材在排布时容易损伤，临界电流会衰退。为保证超导带材安全，单根带材的运行电流设计为 500 A，正负极超导层各需要 20 根带材。

表 2 超导带材结构与性能参数

Tab. 2 Structural and performance parameters of superconducting tape

带材参数	数值
77 K 单根带材临界电流/A	140
20 K 单根带材临界电流/A	1 147
超导层厚度/μm	1
单根带材厚度/mm	0.23
单根带材宽度/mm	4.8

为了减小低温介质在输送过程中的消耗，通常采用高真空绝热的低温恒温器作为输液管。低温恒温器的结构包括内层波纹管、外层波纹管、多层防辐射层、支撑条及吸附剂等组件。鉴于制造、运输和安装过程中的限制，无法采用过长的单一恒温器本体，因此需要将多个恒温器段组合以构成长距离的超导电缆低温恒温器。受限于当前工业抽真空技术的能力，单根恒温器的最大长度约为 100 m，其接头部位通过 J-T 形式进行连接。低温恒温器的漏热 Q 计算公式[21]为

$$Q=\frac{2\pi\lambda(T_{\mathrm{h}}-T_{\mathrm{l}})}{\ln(D_{\mathrm{o}}/D_{\mathrm{i}})} \tag{5}$$

式中：λ 为绝热材料有效热导率，取 2.2×10^{-4} W/(m·K)；T_{h} 为环境温度；T_{l} 为超导电缆运行温度；D_{o} 和 D_{i} 分别为恒温器的外径和内径。低温恒温器的外径 D_{o} 由超导电缆外径尺寸决定；低温恒温器的内径 D_{i} 由管道允许的最大压力、低温不锈钢厚度及绝热层厚度综合决定。

图 6 为液氢层恒温器漏热与厚度的变化规律。可以看出，随着绝热层厚度的增加，恒温器漏热逐渐减小，最后趋于稳定。此外，在液氢层外增加 1 个液氮层，可显著降低液氢层恒温器的热漏。具体来说，在 10 mm 厚度条件下，液氢到液氮环境的漏热为 0.325 W/m，液氢到室温环境的漏热为 1.657 W/m。

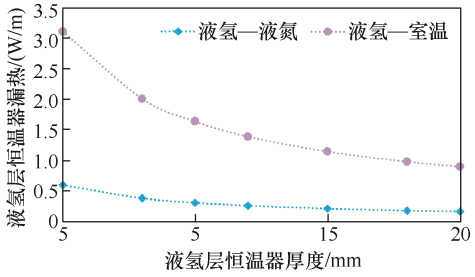


图 6 低温恒温器漏热与厚度变化规律

Fig. 6 Variation law of heat leakage and thickness for cryostat

为避免因内外层压力不均产生的挤压，液氮层的压降与液氢层保持一致，根据式(1)计算为 1.2 MPa。如图 7 所示，图中ΔP = 1.2 MPa、ΔT = 2 K 和ΔT = 8 K 这 3 条等位线围成的线段是液氮流通层管径 D_{N} 与流速 v_{N} 的选取范围。本文的液氮管道内径选取 12 cm，流速约为 0.46 m/s，计算出液氮的质量流量为 1.5 kg/s。

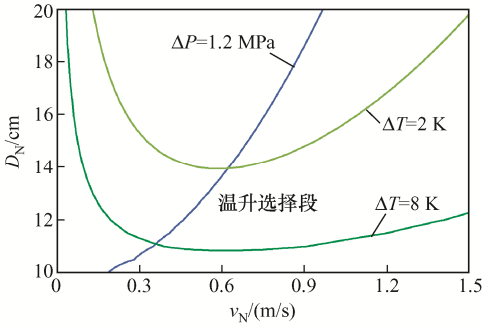


图 7 液氮流通层的温升与压降等位线

Fig. 7 Contour lines of temperature rise and pressure drop for liquid nitrogen layer

表 3 详细列出了液氢超导能源管道结构参数。通过式(5)重新计算 10 mm 厚度的液氢层恒温漏热为 0.33 W/m，液氮层恒温器漏热为 2.02 W/m。通过新的漏热值，重新根据式(1)计算出，在 10 km 的传输距离下，液氢层的温升为 1.2 K，而液氮层的温升为 7.8 K。

表 3　液氢超导能源管道结构参数

Tab. 3 Structural parameters of liquid hydrogen superconducting energy pipeline

能源管道参数	数值
液氢通道外径/cm	4
柔性支撑骨架厚度/mm	2
正极铜导体层厚度/mm	5
正极带材+绝缘厚度/mm	1
负极带材+绝缘厚度/mm	1
负极铜导体层厚度/mm	4
绝缘+保护层厚度/mm	5
液氢恒温器厚度/mm	10
液氮通道外径/cm	12
液氮恒温器厚度/mm	10

3　超导电缆电磁仿真

3.1　有限元仿真模型

目前，对于超导电缆的大多数设计都是用磁场公式和有限元软件计算磁场。在数值模型中，需要考虑高温超导体的3个关键特性：高度非线性的 *E-J* 关系，场角依赖的临界电流和极薄导体几何[22]。

本文采用二维有限元仿真模型，模型采用 H 方程，电磁模块的控制方程由法拉第定律和安培定律得出[23]，即

$$\begin{cases} J = \nabla \times H \\ \nabla \times E + \dfrac{\partial B}{\partial t} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

式中：E 为电场强度，B 为磁感应强度，H 为磁场强度，J 为电流密度。为了得到完整的控制方程，还需要补充未知变量之间本征属性的电磁本构关系式[24]，即

$$B = \mu_0 \mu_r H \tag{7}$$

$$E = \rho J \tag{8}$$

式中：μ_0 和 μ_r 分别为真空磁导率和相对磁导率；ρ 为电阻率。铜层在液氢环境的电阻率为 1.9×10^{-9} Ω·m，空气区域为 1 Ω·m。REBCO 层中的超导元素的电阻率 ρ 遵循 *E-J* 幂律，即

$$E = E_0 \cdot \left(\frac{J}{J_c(B)} \right)^n \tag{9}$$

式中：$J_c(B)$ 为磁场相关的临界电流密度；$E_0 = 10^{-4}$ V·m^{-1}；$n = 25$。由于 REBCO 带材具有较强的各向异性，其临界电流密度[25]选择拟合公式

$$J_c(B) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \dfrac{\sqrt{(kB_{pare})^9 + B_{perp}^2}}{B_0} \right)^{\beta}} \tag{10}$$

式中：J_{c0} 为临界电流密度，$J_{c0}=2\times10^{11}$ A·m^{-2}；B_{pare} 和 B_{perp} 分别为与超导带材平面平行和垂直的磁场分量；$B_0 = 0.3$、$k = 0.25$、$\beta = 0.45$ 为超导带材 20 K 的各向异性曲线拟合参数。

3.2　超导电缆磁场分布

超导带材均匀分布在铜导体外层，带材与带材之间夹角为 18°，每层 20 根带材。图 8 为双极电缆电磁分布示意图。可以看出，2 层带材电流方向相反情形下，通过交叠排布会增加带材边缘区域的磁场强度。平行排布与交叠排布方式的最大磁场强度分别为 0.23 T 和 0.29 T。

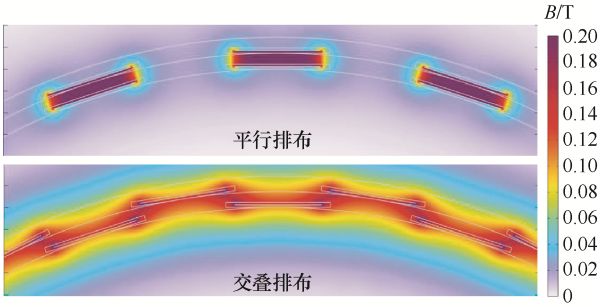


图 8　双极电缆电磁分布

Fig. 8 Electromagnetic distribution of bipolar cables

图 9 为双极电缆带材排布角度与临界电流变化规律，可以看出，随着 2 层带材相差角度的增加，

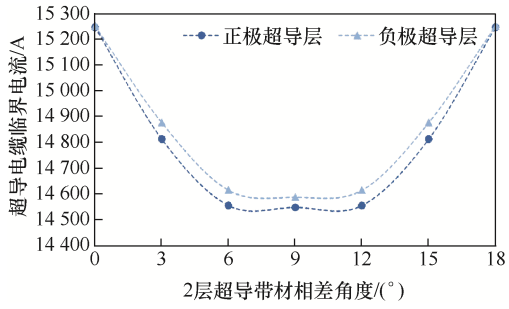


图 9　双极电缆带材排布角度与临界电流变化规律

Fig. 9 Variation law of arrangement angle and critical current for bipolar cable tape

双极超导电缆的临界电流呈现先减小后增加的变化趋势，并以 2 层带材相差 9°为轴对称分布。值得说明的是，内外层变化趋势一致，但受磁场的影响，内层带材临界电流较小。因此，双极超导电缆最大传输电流应以内层临界电流为基准，在平行排布方式下其临界电流为 15 240 A。

4 能源管道传输损耗

超导能源管道除了传输容量大，在线路损耗方面也具有巨大优势。通过调研实际工程电缆的系统损耗[16]，超导电缆的传输损耗仅为传统电缆的 1/4 到 1/5。超导电缆传输系统损耗包括超导电缆线路损耗、低温介质流动带来的摩擦负荷、电缆终端热负荷及低温恒温器的漏热。超导电缆因传输直流电，所以线路损耗近似为 0。在实际工程中，摩擦引起的热负荷可以忽略不计(低于 2%)。超导终端电流引线热负荷约为 30 W/kA，正负两极，一进一出，共 4 个终端，计算出热负荷为 1 200 W。超导电缆运行温度为 20 K，低温下制冷耗电功率约为制冷功率的 100 倍[26]，即 120 kW。恒温器的漏热约为 2.35 W/m，传输距离为 10 km，计算出管道漏热负荷为 23.5 kW。低温恒温器的漏热均由液氮介质带走，在 77 K 下制冷耗电功率约为 10 倍[27]，即 235 kW。

在电力传输系统，铜电缆由于较高的线路损耗，在相同电压等级下，难以与超导电缆的系统损耗进行直接比较[28-30]。针对 15 MW 的传输容量需求，分别对 10 kV 和 35 kV 电压等级的传统交流电缆系统损耗进行了计算分析，包括变电站损耗和线路损耗 2 大部分。变电站损耗涉及到变压器等设备的损耗，而线路损耗则主要是指电缆在传输过程中由于电阻发热而产生的能量损失。根据国家标准 GB 20052—2024《电力变压器能效限定值及能效等级》，在 1 级能效情况下，10 kV 与 35 kV 变电站的损耗分别约为 180 kW 和 200 kW。对于传统交流电缆，以 YJV-26/35kV-1*400 型号为例，其交流电阻约为 0.062 Ω/km。超导电缆与传统电缆的系统传输损耗对比见表 4。

表 4 超导电缆与传统电缆的系统传输损耗对比

Tab. 4 Comparison of system transmission loss between superconducting and conventional cables

电缆类型	参数	数值
超导直流电缆 (15 MW/1.5 kV)	终端热负荷(30 W/kA)/kW	120
	恒温器漏热(2.35 W/m)/kW	235
	系统传输总损耗/kW	355
传统交流电缆 (15 MW/10 kV)	变电站损耗 (10 kV 油浸式)/kW	180
	线路损耗(0.062 Ω/km)/kW	2 180
	系统传输总损耗/kW	2 360
传统交流电缆 (15 MW/35 kV)	变电站损耗 (35 kV 油浸式)/kW	200
	线路损耗(0.062 Ω/km)/kW	179
	系统传输总损耗/kW	379

图 10 为不同电缆系统在相同容量和距离下的传输损耗。结果表明，超导电缆的总损耗约为 355 kW，仅占 10 kV 电压等级传统交流电缆(2 360 kW)的约 15%，略低于 35 kV 电压等级交流电缆的传输损耗(379 kW)。图 11 进一步揭示了不同传输距离下的系统传输损耗。可以看到，当传输距离小于 10 km 时，在低电压等级下超导直流电缆的系统传输损耗也能低于传统交流电缆。

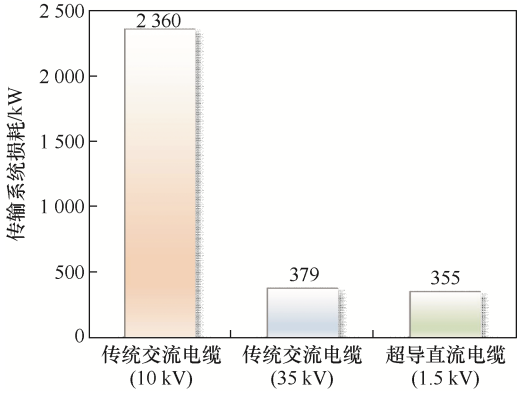


图 10 不同电缆系统的传输损耗

Fig. 10 Transmission loss in different cable systems

综上，超导电缆能够在保持较低损耗的同时传输比常规电缆更高的电流。在满足相同传输容量需求的情况下，超导电缆传输电压可以降低 1 到 2 个等级，从而减少对高压变压器和高压电气绝缘组件的需求。从系统层面来看，超导电缆可以显著降低

高压设备方面的投资成本。

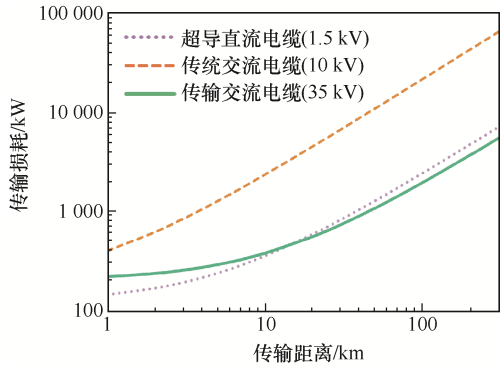


图 11　不同传输距离下系统传输损耗

Fig. 11 System transmission loss at different transmission distances

5　结论

本文从交通系统用能电气化、绿色化发展的需求出发，针对大规模可再生能源高效利用与消纳难题，通过电力与液氢联合传输来提高能源的综合利用效率。为满足轨道交通对电能和氢能的供应需求，本文设计了 1 种 1.5 kV/10 kA 的液氢超导能源管道结构，并对该结构进行了电磁分布特性与能源管道系统传输损耗的对比分析，主要结论如下。

(1)以 10 km 为 1 个制冷站单元，以液氢温升与压降为传输容量的约束条件，设计了 1.5 kV/10 kA 的液氢超导能源管道结构参数，并通过增加液氮层来减小液氢介质的漏热。

(2)建立了超导电缆有限元仿真模型，分析了双极超导层带材排布方式对磁场分布的影响。研究结果表明，双极电缆正负极带材采用平行排布方式的临界电流最大，约为 15 240 A。

(3)以 10 km、15 MW 传输距离和容量为例，1.5 kV 超导直流电缆的系统传输损耗仅为 10 kV 电压等级传统交流电缆的约 15%，且略低于 35 kV 电压等级交流电缆。

参考文献：

[1] 国家能源局关于印发《2024 年能源工作指导意见》[EB/OL]. (2024-03-18)[2024-11-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6941170.htm

NEA issues guidance on energy work in 2024 [EB/OL]. (2024-03-18)[2024-11-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6941170.htm. (in Chinese)

[2] 贾利民, 程鹏, 张蜇, 等. “双碳” 目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 173-183.

Jia Limin, Cheng Peng, Zhang Zhe, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: Development paths and strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 173-183. (in Chinese)

[3] 周远翔, 陈健宁, 张灵, 等. “双碳” 与“新基建” 背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2396-2408.

Zhou Yuanxiang, Chen Jianning, Zhang Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408. (in Chinese)

[4] 饶宏, 周月宾, 陈煜坤, 等. 高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 1-14.

Rao Hong, Zhou Yuebin, Chen Yukun, et al. Key design and development trend of high-voltage large-capacity VSC valves for HVDC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 1-14. (in Chinese)

[5] 李岚, 丁安敏, 田洪英, 等. 超导磁储能装置提高柔性直流配电系统稳定性的研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 250-262.

Li Lan, Ding Anmin, Tian Hongying, et al. Research on superconducting magnetic energy storage device to improve the stability of flexible DC distribution system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 250-262. (in Chinese)

[6] 金建勋. 高温超导电缆与输电[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

Jin Jianxun. High Temperature Superconducting Cables and Electric Power Transmissions [M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)

[7] Tomita M, Fukumoto Y, Ishihara A, et al. Superconducting DC power transmission for subway lines that can

reduce electric resistance and save energy [J]. Energy, 2023, 281: 128250.

[8] Hajiri G, Berger K, Dorget R, et al. Thermal and electromagnetic design of DC HTS cables for the future French railway network [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(5): 5400208.

[9] Tang Shouquan, Li Minhong, Xie Hong, et al. Development and demonstration of concentric-type HTS power cable for distribution grid in Shenzhen urban [J]. Frontiers in Energy Efficiency, 2023, 1: 1160372.

[10] Tomita M, Fukumoto Y, Ishihara A, et al. Energy analysis of superconducting power transmission installed on the commercial railway line [J]. Energy, 2020, 209: 118318.

[11] Hajiri G, Berger K, Dorget R, et al. Design and modelling tools for DC HTS cables for the future railway network in France [J]. Superconductor Science and Technology, 2022, 35(2): 024003.

[12] 杨天慧, 信赢, 李文鑫. 满足电力与能源液体双重输送管道建设的超导材料需求和发展现状[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 215-225.
Yang Tianhui, Xin Ying, Li Wenxin. Demand and development status of superconducting materials to meet the construction of integrated transmission pipeline for electric power and energy liquid [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 215-225. (in Chinese)

[13] Morandi A. HTS DC transmission and distribution: Concepts, applications and benefits [J]. Superconductor Science and Technology, 2015, 28(12): 123001.

[14] 张振扬, 解辉. 液氢的制、储、运技术现状及分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(3): 298-305.
Zhang Zhenyang, Xie Hui. Status quo and analysis of liquid hydrogen production, storage and transportation technology [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41 (3): 298-305. (in Chinese)

[15] Klöppel S, Marian A, Haberstroh C, et al. Thermo-hydraulic and economic aspects of long-length high-power MgB_2 superconducting cables [J]. Cryogenics, 2021, 113: 103211.

[16] 信赢, 任安林, 洪辉, 等. 超导电缆[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
Xin Ying, Ren Anlin, Hong Hui, et al. Superconducting Power Cable [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013. (in Chinese)

[17] Chang H M, Ryu K N, Yang H S. Cryogenic design of liquid-nitrogen circulation system for long-length HTS cables with altitude variation [J]. Cryogenics, 2017, 83: 50-56.

[18] Apostolou D, Xydis G. A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure: Current status and future prospects [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 113: 109292.

[19] Fu Lin, Chen Xiaoyuan, Chen Yu, et al. Hydrogen-electricity hybrid energy pipelines for railway transport-tation: Design and economic evaluation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 61: 251-264.

[20] 郭伟, 李卫国, 丘明, 等. 单通道冷绝缘高温超导电缆铜骨架的设计计算[J]. 低温与超导, 2013, 41(8): 35-39.
Guo Wei, Li Weiguo, Qiu Ming, et al. Calculation and design of single cold dielectric HTS cable's copper former [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2013, 41(8): 35-39. (in Chinese)

[21] Wang Y. Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering [M]. John Wiley & Sons, 2013.

[22] Shen Boyang, Grilli F, Coombs T. Overview of H-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications [J]. IEEE Access, 2020, 8: 100403-100414.

[23] Chaganti P, Yuan Weijia, Zhang Min, et al. Modelling of a high-temperature superconductor HVDC cable under transient conditions [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2023, 33(5): 5400805.

[24] Li Xianhao, Tang Yuejin, Ren Li, et al. Transient research on distribution networks incorporating superconducting cables utilizing field-circuit coupling method [J]. Superconductor Science Technology, 2023, 36(12): 125001.

[25] Viarengo S, Brouwer L, Ferracin P, et al. A new coupled electrodynamic T-a and thermal model for the critical current characterization of high-temperature superconducting tapes and cables [J]. IEEE Access, 2023, 11: 107548-107561.

[26] Yamada S, Hishinuma Y, Uede T, et al. Study on 1 GW class hybrid energy transfer line of hydrogen and electricity [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 97(1): 012167.

[27] Van Sciver S W. Cryogenic systems for superconducting devices [J]. Physica C: Superconductivity, 2001, 354(1-4): 129-135.

[28] 肖立业, 林良真. 超导输电技术发展现状与趋势[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 1-9.
Xiao Liye, Lin Liangzhen. Status quo and trends of superconducting power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (7): 1-9. (in Chinese)

[29] 马爱清, 张杨欢, 吕江平, 等. 首条国产公里级高温超导电缆输电特性分析[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1206-1213.
Ma Aiqing, Zhang Yanghuan, Lü Jiangping, et al. Transmission characteristics analysis of first domestic km-level HTS cables [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1206-1213. (in Chinese)

[30] 朱金华, 朱汉山, 王恩哲, 等. 高温超导电缆研究现状及应用场景分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(7): 26-37.
Zhu Jinhua, Zhu Hanshan, Wang Enzhe, et al. Research status and application scenario analysis of high temperature superconducting cable [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(7): 26-37. (in Chinese)



陈宇

作者简介：

陈宇(1996—)，女，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：超导电力与综合能源系统。E-mail：chen_yu4@tongji.edu.cn。

付琳(1991—)，女，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，研究员。研究方向：超导电力技术。E-mail：linfu@tongji.edu.cn。

陈孝元(1986—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：超导定制电力与低温综合能源。E-mail：chenxy@sicnu.edu.cn。

陈洁莲(1982—)，女，中国电源学会高级会员，本科，正高级工程师。研究方向：轨道交通及新能源供电技术。E-mail：chenjl@csrzic.com。

沈博洋(1990—)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：超导技术与智能电网。E-mail：shenboyang@tongji.edu.cn。

康劲松(1972—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子与电机控制技术。E-mail：kjs@tongji.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)