

管型母线的选型以及聚酯薄膜机械绕包式管型母线的关键技术

邵 俊

(山东能源集团内蒙古荣信化工有限公司)

摘要：全绝缘管型母线利用管型导体载流，电流分布均匀、集肤效应低、载流能力强，解决了在大电流情况下单相采用多根电缆并联情况时，因互感效应及阻抗不同，同相多根电缆中每根电缆不能充分载流和电流分配不均的问题而被广泛使用。本文主要论述全绝缘管型母线的选型以及聚酯薄膜机械绕包式管型母线的关键技术。

关键词：全绝缘管型母线；全屏蔽连接；在线监测

2025.02.docx
67

1 全绝缘管型母线的种类及对比

我国的全绝缘管型母线发展史是极其曲折的，最早期的全绝缘管型母线采用聚四氟乙烯带作为绝缘材料的电容型绝缘包制技术，主要采用手工绕包生产，然而因局部放电性能严重不合格导致故障频发。后来经改进与发展，最终形成了环氧树脂真空浇注式管型母线、挤包式管型母线和机械绕包式管型母线三大类管型母线。

环氧树脂真空浇注式管型母线是以环氧树脂为绝缘材料，以电缆纸包绕导体，真空浇注液态环氧树脂制作绝缘，其原理类似于油浸式绝缘原理，中间接头处的绝缘采用的是全预制电容型屏蔽筒。挤包式管型母线是仿照电缆相关原理及工艺而衍生出来的产品，但又有别于电缆，主要区别在于一个是刚性空心导体，一个是柔性实心导体，其绝缘材料是交联聚乙烯、硅橡胶或三元乙丙胶。机械绕包式管型母线是依

据电容型绝缘电场均化理论，以聚酯薄膜为主绝缘材料，采用机械设备包制而成的产品，其中间接头处的绝缘采用的是全预制电容型屏蔽筒。

据国网天津电科院不完全统计，前些年三类绝缘管型母线发生事故的比例情况：绕包式管型母线占 58%、挤包式管型母线占 28%、环氧树脂真空浇注式管型母线占 14%。从数字上看绕包式管型母线事故率远高于挤包式管型母线及环氧浇注式管型母线，但实际情况并非如此。绕包式管型母线之所以事故占比较高，其原因有以下两方面：一是起步早，起始时间可追溯到 2000 年左右，因为投运时间长，所以累积的事故次数较多；二是绕包式管型母线有用热缩管替代聚四氟乙烯带的情况，背离电容型绝缘技术发展路线，提升了绕包式管型母线事故率。挤包式管型母线事故率没有绕包式管型母线高的根本原因是其投放市场时间较短，产品出现事故的期限远远小于绕包式

管型母线，但按投运时间与发生事故次数的比值，挤包式管型母线的事故率远高于绕包式管型母线。环氧树脂真空浇注式管型母线发生事故占比为 14%，其原因是相当长一段时间内某企业一枝独秀，说其质量好于绕包式管型母线和挤包式管型母线没有足够的说服力。自从国网公司开展全绝缘管型母线招标以来，始终是以挤包式管型母线和环氧树脂真空浇注式管型母线为主，直到 2017 年 10 月 17 日国家电网公司《7.2kV~40.5kV 绝缘管型母线技术规范》出台后，才允许机械绕包式管型母线进入国网参与招标。截至目前，全国只有一家机械绕包式管型母线企业在国网

入围并中标，至今机械绕包式管型母线没有发生过一起事故。
目前我国现存的三大类管型母线就使用条件而言，其彼此之间各具特点。挤包式管型母线适合用于充气柜上的主母线与三通型插拔头配合使用，不适合在有弯道、距离较长条件下使用。环氧浇注式管型母线适合和充气柜出线接口插接使用，不适合长距离、大电流条件下使用。机械绕包式管型母线适合于距离长、弯道多、电流大条件下使用，但其不适合用于充气柜上的主母线与三通型插拔头配合使用，也不适合与充气柜出线插口配合使用。对比如表 1 所示。

表 1 全绝缘管型母线对比

项目	挤包工艺	环氧真空浇筑	全机械绕包
导体材质	铜 (T2Y/T2M)	铜 (T2Y)	铜 (T2Y)
主绝缘材质	交联聚乙烯/硅橡胶/三元乙丙橡胶	环氧树脂	聚酯薄膜
加工工艺	挤包	真空浇注	全机械绕包
加工周期	短	较长	较短
中间头数量	多	多	少 (约为其他工艺的 1/2~1/3)
单根长度	≤6m	≤6m	≤18m
局放水平	直线段部分勉强满足国家标准，弯道部分无法保证，易发生击穿	可以满足国家标准	远高于国家标准，甚至达到无局放
温度特性	高、低温差大会对产品产生一定影响	不适合低温、湿度大的环境，低温环境绝缘会发生碎裂。	高、低温差对产品几乎无影响。
延展特性	好	差	好
抗冲击能力	一般	好	好
耐酸碱紫外线	好	很好	好
中间头形式	导体机械连接，安装没有均压、屏蔽功能的绝缘筒	导体机械连接，安装预制式屏蔽筒	导体焊接，安装全预制式电容型屏蔽筒
屏蔽层接地	直接接地 (中间头处不接地)	直接接地	直接接地
成本/价格	一般 (三元乙丙橡胶的成本高)	很高 (比其他品类管型母线造价高 30%~40%)	较低
安装方式	水平和竖直	水平和竖直	水平和竖直
折弯半径	大 (R500 以上)	较大 (R300 以上)	小 (常用电流 R200~R300)
应用场所	国网、企业	国网、企业	国网、企业

2 科学合理的聚酯薄膜绝缘包制工艺

20 世纪 90 年代，中国电力科学研究院利用聚四氟乙烯带添加硅油的方式，生产出高压干式穿墙套管

和高压干式电流互感器，开创出一条独具特色的排气工艺。实践已经证明这是一条正确而且行之有效的排气工艺，解决了用有机绝缘带包制电容型绝缘无法用

抽真空方式把有机绝缘带间夹杂的空气排出问题。硅油的介电强度高（45kV/mm），允许工作温度范围为-50~120℃，用持续并且施以足够包扎力的有机绝缘带涂上硅油进行包制，可以利用硅油具有填充作用特性，将电容屏屏端及有机绝缘带层间微小缝隙及聚四氟乙烯带自身微米级针孔进行有效填充，排出其间的空气，进一步提高了主绝缘的介电强度。中国电力科学研究院不仅开创了新的排气工艺，而且还实现了由手工包制到机械包制质的飞跃。

之所以要用聚酯薄膜替代聚四氟乙烯带做为主绝缘材料，其原因有如下几方面：一是聚酯薄膜介电强度高，其介电强度150~250kV/mm，是聚四氟乙烯带7~9倍，是硅橡胶的7~10倍，是环氧树脂的5~8倍。允许长期工作场强为30~50kV/mm，是上述三者的10倍多。聚酯薄膜经过十几年运行检验，绝缘性能稳定可靠，作为管型母线主绝缘介质，是保证其安全运行的基本要素。二是聚酯薄膜机械强度高，其抗拉强度为147~205MPa，是聚四氟乙烯带的10倍多，可用更大的包扎力，使电容屏包扎得更紧密，更有效减少气体残留，提高了局部放电起始电压值，减少了产生局部放电的可能性。三是电容屏极板材料特性优秀。该管型母线电容极板为镀铝聚酯薄膜，柔软、包绕性好，与主绝缘材料同为一个材质，使电容屏与绝缘包绕层间不会因温度变化而产生间隙，影响局部放电性能。四是耐高（及低）温性能好，聚酯薄膜允许长期工作温度为-50~120℃。五是聚酯薄膜密度小，价格低，使用工作场强高，性价比高。六是聚酯薄膜无毒、无味，广泛用于生产、生活各个领域，用后可回收再利用，是环保类材料。

3 全预制电容型屏蔽筒技术

全绝缘管型母线的中间全屏蔽连接技术是一项关键技术。由于全绝缘管型母线安装现场环境原因，不

具备局放检测条件，全绝缘母线的中间全屏蔽连接要用全预制电容型屏蔽筒实现全屏蔽连接。为了方便论述，通常称母线本体为公管，预制式复合绝缘电容型屏蔽筒为母管。公管是在管型导体上包制电容型绝缘体，电容屏由内到外逐渐缩短，最内层电容屏和高压导体等电位，最外层电容屏和大地等电位。母管是在环氧筒上包制电容型绝缘体，电容屏由内到外电容屏逐渐增长，在工作时，最内层电容屏通过等位簧与公管导体等电位，最外层电容屏与大地等电位。并且公管和母管都依据等梯差、等电容、等A值设计原则，这个设计原则能使公管外表面电压过渡区和母管内表面电压过渡区沿轴向（与母线导体相一致的方向）的轴向工作场强 E_a 即均匀又相等，计算公式为：

$$E_a = \frac{U}{|l_0 - l_n|} \quad (1)$$

通过理论推导，公管、母管的径向（与母线导体相垂直的方向）工作场强 E_r 公式相同，为：

$$E_r = -E_a \frac{dl}{dr} = -\frac{U}{l_0 - l_n} \cdot \frac{dl}{dr} = \frac{U}{2} \frac{l_n + l_0}{\ln \frac{r_n}{r_0}} \frac{1}{rl} \quad (2)$$

公管、母管相邻电容屏的电容值计算公式也相同，计算公式为：

$$C_x = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon (l_x + l_{x+1})}{\ln \frac{r_{x+1}}{r_x}} = \frac{n \cdot \pi \epsilon_0 \epsilon (l_n + l_0)}{\ln \frac{r_n}{r_0}} \quad (3)$$

式中， U 为相电压； l_0 为最内层电容屏长度； l_n 为最外层电容屏长度； r_0 为最内层电容屏半径； r_n 为最外层电容屏半径； n 为电容屏数； $\epsilon=3.0$ ； $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

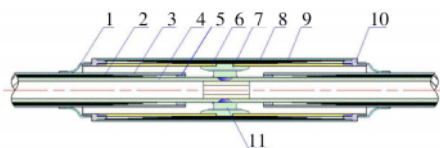
公管和母管配插，让公管电压过渡区和母管电压过渡区对应上，就能在公管和母管之间的空气道形成轴向均匀电场，这样只要公管和母管过渡区梯差总值略大于空气中对电压最小安全距离要求，就能满足

工频耐压、局放、雷电冲击和操作冲击等各项试验要求。并且实践证明，公管过渡区和母管过渡区在对应上一定偏差范围内，仍然能满足上述各项试验要求，这样热胀冷缩，公管和母管会在一定范围内相对运动，能够满足上述各项试验要求，安全运行。

综上，这是全绝缘管型母线中间全屏蔽连接的工作原理。

根据公管、母管是否相对运动，可将全绝缘管型母线中间全屏蔽连接分为相对静止型中间全屏蔽连接和相对运动型全屏蔽连接。

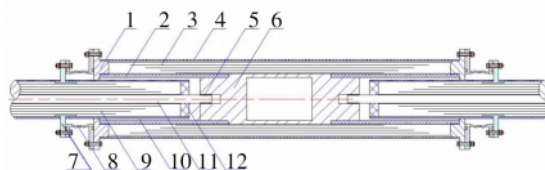
1) 全绝缘管型母线相对静止型中间全屏蔽连接由于公管与母管相对静止，可用热缩管多层胶封解决密封，如图1所示。此图导体连接采用焊接方案，也可采用机械连接方案，不再画图示意。



1—热缩管密封 2—外护套 3—电容型绝缘
4—载流体 5—刚性密封 6—刚性绝缘筒 7—法兰
8—电容型绝缘 9—外护套 10—密封堵 11—等位环

图1 导体连接采用焊接连接示意图

2) 全绝缘管型母线相对运动型中间全屏蔽连接由于公管与母管相对运动，其密封为不导磁的不锈钢波纹管机械密封，如图2所示。此图导体连接采用触头连接方案，也可以采取软连接方案，不再画图示意。



1—固定法兰 2—刚性绝缘筒 3—电容型绝缘
4—外护套 5—插接头 6—导流体 7—固定法兰
8—波纹管 9—电容型绝缘 10—外护套 11—导流体
12—刚性密封

图2 导体连接采用触头连接示意图

3) 全预制电容型绝缘屏蔽筒内部电场如图3所示。

4 聚酯薄膜机械绕包式管型母线质量保证和监测维护

出厂质量检测时，每段母线都要在工厂做耐压、局放、介质损耗试验，并记录电容量。中间屏蔽筒也要和母线一起配合做耐压、局放、介质损耗试验，并记录电容量。超高压母线还要做冲击试验。型

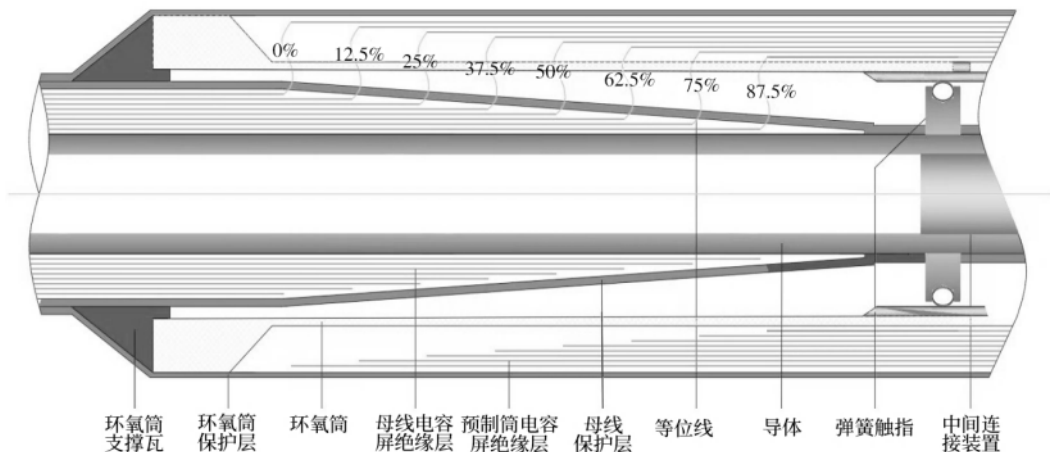


图3 全预制电容型绝缘屏蔽筒内部电场分布图

式试验时，中压母线已有冷热循环试验。高压母线做试验时还没有，加上更好。

户外安装施工时，用预制式中间接头，只要环境不是下雨，湿度很大，环境十分污脏，就可安装。特殊环境下，可搭建帐篷安装。不建议用现场包制方法处理母线中间接头。

设备正常运行时，可用红外线测试仪检查母线本体、接地引线和高压端头金具是否有异常，可在末屏引线上加在线检测装置，监测局放。停电时检查电容量和介质损耗，电容量基本不变，在每年相同月份介质损耗基本不变，可认定母线没有问题。聚酯薄膜介质损耗随温度变化，在零度以上，介质损耗小于0.3%，温度越高，介质损耗越小。在零度以下，介质损耗随着温度降低而略微增大，最大可达0.5%。因此要在每年相同月份对比介质损耗值才有意义。电容量受温度影响较小。如果检测发现电容量增加两倍以上，说明至少有一层电容屏发生击穿，就要抢修母线。停电时，也可做工频耐压。若具备测局放条件，也可测局放。

5 结束语

当前主流的三大类管型母线就使用条件而言，彼此之间各具特点，在选用时应根据使用条件具体选

型。聚酯薄膜机械绕包式管型母线历史悠久，生产工艺成熟，具有丰富的使用业绩。从近年国网公司和大量的企业使用情况来看，聚酯薄膜机械绕包式管型母线总体运行情况良好。各用户在使用时，可安装在线检测装置，通过实时监测，在稳定性和可靠性的基础上又达到了及时发现隐患的目的。

参考文献

- [1] 阮羚，刘睿，赵健康，等. 绝缘管型母线的行业现状分析及关键技术展望 [J]. 中国电力，2018，51（6）：67-76.
- [2] 郑云海，吴奇宝，何华琴. 全绝缘管母线局部放电的检测与分析诊断 [J]. 绝缘材料，2010，43（4）：63-66.
- [3] 郎进平，田永彪. 全屏蔽绝缘管型母线在10kV大电流输电线路的应用 [J]. 电工技术，2014（1）：72-73.

（收稿日期：2024-05-31）