

高频对称电缆设计与制造技术

成都普天电缆股份有限公司

肖 飏

摘要: 本文首先介绍了高频对称电缆几个重要电性能指标及其改善措施, 然后具体分析了电缆设计与制造过程中的一些技术, 并提出了对绞线最小退扭率的要求”。

关键词: 串音 回波损耗 退扭率

1. 前言

随着计算机网络和数据通信的发展, 人们对对称电缆的要求也越来越高, 从几年前带宽为 100MHz 的五类缆到今天高达 1000MHz 的数据缆, 无疑是一个巨大的飞跃。众所周知, 同轴缆的电磁场是封闭的、规则的, 达到 1000MHz 的带宽是比较容易的。然而, 对称电缆的电磁场是开放的, 既不规则也不均匀, 要制造高频对称电缆其难度可想而知。很多时候, 电缆制造商制造出了符合要求的对称电缆并按正确的布线方法布线后, 检测发现电缆的某些指标恶化了许多, 尤其是近端串音衰减和结构回波损耗两项指标。所有这些, 归根到底都与电缆结构设计和制造工艺有关。

本文以 1 对、2 对、4 对高频对称电缆的设计制造为例, 对设计和制造中的一些技术进行了探讨。

2. 高频对称电缆的几个重要电性能指标及其改善措施

2.1 串音

串音引起的误码是影响通信距离的主要因素之一。根据串音产生的机理, 减少线对间串音的方法有:

a 保证绝缘单线的均匀性和对称性, 尽可能降低线对间电容不平衡是提高线对抗干扰能力的基础;

b 在条件允许情况下, 加大线对间的距离;

c 采用优化的节距设计是提高串音防卫度的有力措施;

d 采用线对屏蔽技术, 但此种方法因电磁波的反射, 需要适当增加绝缘外径, 使用时也需要带屏蔽的接插件。

e 除此之外, 保证相邻线对维持 TEM 波传输也可有效地减少串音^[1], 这也是高频对称电缆设计中可用的另一种理念。我们知道, 传统对绞线结构的电缆中, 在对绞线的中心有很强的电场, 并有很大一部分泄漏于绝缘层外。如果将对绞线用与绝缘具有相同等效相对介电常数且损耗角正切值低材料挤一层护套(低压力挤压式)则大部分电磁场分布在绝缘和护套内, 有效减少电力线从绝缘体散发出去(见图 1), 因而从源头上减小了对相邻线对的串音。另一方面, 电磁波在绝缘体周围的空气中传播速度

($C_{\text{空气中的速度}} \approx C_{\text{真空中的速度}}$) 比在绝缘体内的传播速度

($C_{\text{绝缘体中的速度}} = C_{\text{真空中的速度}} / \sqrt{\epsilon_e}$, 其中 ϵ_e 为电缆的等效相对介电常数) 快。电磁场的这种不均匀性会同时产生沿传播方向的电磁矢量以及垂直于传播方向的电磁能量, 从而引起串音增加。围绕线对的护套愈厚, 串音改善就愈明显。然而, 由于介质损耗的原因, 用这种方式来控制串音会导致衰减增加, 并且也增加电缆成本。

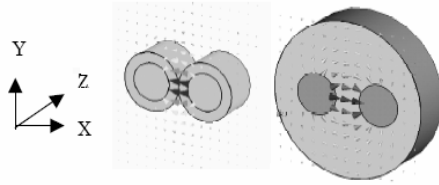


图 1 传统的对绞线和圆形护套电缆的电磁场分布

不过，由于护套的加入为保证电缆的特性阻抗值需要增加绝缘外径或增加绝缘的发泡度，最终电缆的衰减并不会增加多少，有时反而略低。因此，当串音得到有效控制时，即使信号衰减增加了，但传输信号时的信噪比却增加了。为了尽可能降低衰减，采用此思路设计电缆时通常采用泡沫绝缘和护套。

2.2 特性阻抗与结构回波损耗

特性阻抗是电缆回路上任意点电压波与电流波之比，并有

$$Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (1)$$

式中 R 、 L 、 G 、 C 分别为对称回路的交流电阻、电感、导体间介质电导和导体间互电容； ω 为信号的角频率。在高频下无屏蔽对称电缆的特性阻抗近似表示为

$$Z_c = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \frac{2S-d}{d} \quad (2)$$

式中 ϵ_e 值与绝缘材料、绝缘类型、线对间填充介质的相对介电常数有关； S 为回路两导体的中心距； d 为导体直径。在实际中常用输入阻抗 Z_{in} 来表述电缆的特性阻抗。其定义如下：

$$Z_{in} = \sqrt{Z_0 \cdot Z_s} \quad (3)$$

式中 Z_0 为终端开路时的阻抗测量值； Z_s 为终端短路时的阻抗测量值。

由于电缆结构的不均匀性，信号在传输过程中会产生波的反射，反射波在某些频率点相互迭加，当反射波幅值极大时，电缆的传输性能会在这些频率点上甚至整个频宽范围内急剧恶化。因此，输入阻抗频率扫描曲线是一条起伏颇大的随机分布曲线。通常用结构回波损耗来描述这种波动情况。结构回波损耗 SRL 定义如下：

$$SRL = -20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_m}{Z_{in} + Z_m} \right| \quad (4)$$

式中 Z_m 为拟合阻抗。

由此定义可见， SRL 实质是描述 Z_{in} 围绕 Z_m 波动大小的一个指标。引起 Z_{in} 波动的原因是电缆部件存在着突发性或周期性的结构偏差或缺陷。如绝缘外径波动、导体直径波动、绞对时绝缘单线在节点处周期性压伤，绝缘发泡不均匀、绝缘偏心时绞对过程因单线的自转造成导体中心距 S 呈周期性的正（余）弦函数波动等。其中周期性的结构偏差或缺陷对 SRL 危害最大。由于输入阻抗与制造过程中的诸多随机缺陷有着极为直接的关系，而制造过程中这诸多的随机缺陷之间又彼此间相互关联，相互影响，错综复杂，因而难以分析输入阻抗与某个缺陷的定量关系。但通过长期的生产实践得知，生产过程中的随机缺陷较小时造成的阻抗波动很小时， SRL 曲线上只出现小的尖峰。极轻微的周期性结构不均匀造成的影响与其它缺陷造成的影响迭加一起，最终也呈现出随机性的波动，这与同轴缆的情况有所不同。当较严重的周期性不均匀缺陷时，且相邻点间的距离等于电缆传输信号波长的一半时，在此频率点及其整数倍频率点上将出现显著的尖峰。即有以下关系

$$\frac{150}{\sqrt{\varepsilon_e} f} = T \quad (5)$$

式中 f 为 SRL 出现尖峰的的最低处的频率值 (MHz), T 为结构波动周期长度单位 (m)。

某企业在生产六类缆时, 四对线的结构回波损耗曲线总是在 60MHz 120MHz 和 180MHz 处出现 SRL 峰值。通过公式 5 计算得出 T 应在 1.9m 左右并以此查找原因, 最终发现是成缆机出现了故障, 造成成缆节距的周期性大幅度波动。

2.3 衰减

衰减是影响传输距离的又一重要因素。其值由以下三部分衰减组成

$$\alpha_{\text{衰减}} = \alpha_{\text{金属衰减}} + \alpha_{\text{介质衰减}} + \alpha_{\text{阻抗不均匀时反射引起的附加衰减}} \quad (6)$$

其中, 金属衰减主要由线对中两根导线因高频电阻产生的衰减和周围金属(导线和屏蔽)反射电磁波而产生的衰减组成; 介质衰减与介质的损耗角正切值、工作频率和工作电容有关, 其值近似与频率成正比; 阻抗不均匀时波反射引起的附加衰减是由于阻抗不均匀造成波的反射, 减小了波向前传输的量, 造成终端信号的减弱, 其等效于有一附加的“衰减”, 这是造成衰减曲线在高频下出现“波纹”的主要原因。这种“波纹”可能导致个别频率点上衰减不合格。

降低衰减的主要途径是

- a. 选用介电常数和 $\text{tg } \delta$ 都低的绝缘料。
- b. 采用合理的绝缘型式, 如采用泡沫实心皮或泡沫或皮-泡-皮的绝缘型式。
- c. 足量的导体尺寸、减小电缆结构偏差和缺陷。

2.4 相时延和不同线对间的相时延差

相时延是决定高频对称电缆通信距离的关键参数之一。有些通信协议对数据帧的最小长度有明确规定, 如果链路的相时延过大(与电缆的相时延和链路上设备延时有关), 在冲突发生时容易造成数据帧的丢失。从传播速度 $V_p \propto \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_e}}$ 可知使用等效相对介电常数较小的绝缘结构是降低相时延的重要途径。线对间的相时延差过大会导致并行传输数据时帧的错误。减小线对间总的绞合系数差值或调整绝缘发泡度或微调绝缘外径是解决相时延差的主要措施。

3. 高频电缆设计时需要注意的问题

设计高频对称电缆时, 首先要保证其电气性能和机械物理性能满足相应要求。在设计时最好采用计算机进行优化设计。尽可能采用结构简单、加工容易的方式。

电缆产品最终是要用到具体的环境中去的, 电缆被安装后也应具备良好的传输性能。这就要求电缆具有良好的抗拉、抗压及良好的适应正常使用环境能力。如室外高频对称电缆宜采用耐候护套材料并具备良好的防潮能力, 高温环境下使用的高频对称电缆应采用耐高温的材料如 FEP、辐照交联聚乙烯等。其次, 因与接插件配套的原因, 高频对称电缆的结构尺寸还应满足与相应接插件相匹配的要求。然而, 这两个问题并未引起所有高频对称缆制造商的重视。

最后, 还应重视电缆的性价比。不恰当地采用高性能的材料或加工工艺或过大的性能指标裕度均会带来过高的制造成本, 降低性价比。

4. 常见高频对称电缆结构

4.1 常见高频对称电缆结构概述

目前, 常用的对称电缆结构有许多种, 但其结构及材料通常为:

导体: 通常采用圆形金属导线。根据使用的频率和使用的环境不同, 常用的材料有:

- a. 裸铜导体：使用最广的一种。
- b. 镀银铜线：用于频率较高的情况。由于集肤效应的缘故，其高频电阻较小，因而金属衰减也小些；其次当采用氟塑料等材料绝缘时，其镀银层还具备较强的抗腐蚀作用，因而使用性能较好。
- c. 铜包钢：由于铜包钢线的抗拉强度和挠性均较大，因此常常用于抗拉要求较高的平行线。

绝缘材料及绝缘型式：

最常用且最经济的绝缘材料是 PE 材料。其次，在有些使用场合还会用到氟塑料、辐照交联聚乙烯等。

绝缘型式：最常见的是实心绝缘，有时为了降低衰减和缩小电缆尺寸也用泡沫或泡沫实心皮、皮-泡-皮绝缘型式。由于化学发泡不均会加大电容不平衡和降低机械性能（机械强度低会导致绝缘严重变形，影响 SRL），同时发泡剂分解残留物易吸潮使介电常数上升而影响电缆的传输质量，故泡沫/实心皮、泡沫绝缘有逐渐被物理发泡取代的趋势。如果采用化学发泡也宜选用品质优良的 HDPE 发泡料（如联碳公司 HDPE 发泡料，牌号 DGDA3487，此料发泡度在 50% 以内时，其泡孔质量与物理发泡效果相当）。由于低密度发泡料的机械强度较低，在后道工序或使用过程中容易变形，影响 SRL 指标，因此宜少用。

线组结构：常见的线组结构为对绞组，偶尔也会遇到星绞组。目前，还有不少的电缆采用粘连绝缘线结构，以确保 S 值在制造和使用过程中的波动和变化尽可能小，以提高阻抗的均匀性。图 2 显示了粘连线对与普通线对电缆在弯曲后 S 的变化情况。



图 2 粘连线对与普通线对在弯曲时顶端 S 值的变化情况示意图

缆芯结构：为了保证缆芯中线对间分散电容的均匀性，以提高串音衰减和回波损耗，线组构成缆芯时通常为采用规则绞合而不采用束绞。

屏蔽：根据电缆对抗外来干扰能力要求及使用要求的不同，常用的结构有单个线组屏蔽、分组屏蔽或总屏蔽几种。使用的材料常常为复合铝箔、复合铜箔、铜线、镀锡铜线或镀银铜线编织等。在普通线对外绕包铝箔屏蔽时，会由于线组表面不平整导致屏蔽层也不是一个理想的圆柱体，导体离屏时近时远，造成 SRL 值不理想。因此，在条件允许时应尽可能采用线对护套的结构，因为在线对护套外加屏蔽时，屏蔽离导体距离的波动情况大为改善，能有效地提高 SRL 值。

护套：根据使用环境的要求不同，常用的护套材料有 PVC、LLDPE、橡胶、聚偏氟乙烯及其它阻燃材料。

4. 2 常见的高频对称电缆结构实例及其优缺点分析

以下组图为常见的高频对称电缆典型结构实例。这些结构的差异主要是因其使用场合或电缆带宽不同而引起。现分别对其进行评述：

- a)图 3、图 4 分别为常见的三、四、五类和超五类 UTP 和 FTP 电缆结构。其优点是

电缆结构紧凑、加工方便，缺点是电缆安装后的传输性能可能因电缆受拉、受压而出现较大幅度降低。

b)图 5 为常见的带“+”字塑料骨架的的六类缆结构。其优点是电缆抗拉、抗压较强，因而具有较好的安装性能，其次，线对被“+”字塑料骨架分隔后，电缆的串音指标也有所改善。缺点是电缆外径较大、需要加工骨架。图 6 为带腔形的塑料骨架的六类数据缆结构，其优缺点与前者相似，但更抗压。

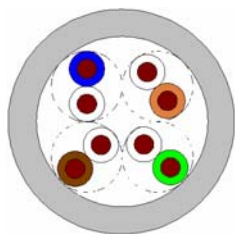


图 3

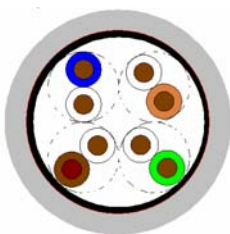


图 4

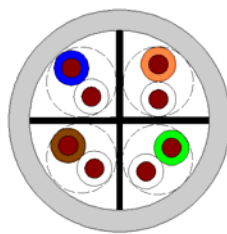


图 5

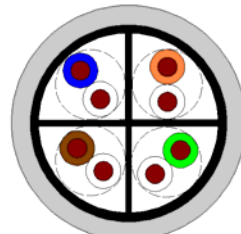


图 6

c) 图 7 为带内护套的屏蔽星绞组电缆。其优点是抗拉、抗压能力较强，电缆安装前后的结构稳定性和电气一致性较好，线组屏蔽加在护套后的线组上，导体与屏蔽间的距离波动较小，因而具有较好的 SRL 值。缺点是制造工艺较复杂，线组护套后，绝缘外径、衰减、传输时延比不加内护套时略大。

d) 图 8 为带护套的屏蔽对绞组电缆。其优点是抗拉、抗压能力较强，电缆安装前后的结构稳定性和电气一致性好，线对屏蔽加在护套后的线对上，导体与屏蔽间的距离波动较小，因而具有较好的 SRL 值。由于是单对线结构，不存在电缆内部串音的问题，因此对绞组还可以用平行线代替，内护套材料也可以与绝缘料不同。缺点是制造工艺较复杂，线对护套后，绝缘外径、衰减、相时延比不护套时略大。

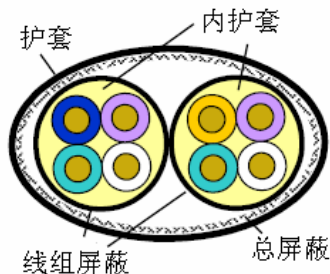


图 7

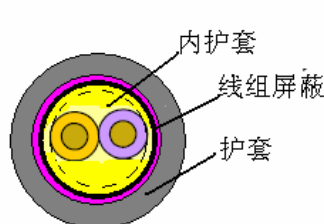


图 8

e) 图 9、图 10 分别是为带护套的非屏蔽和屏蔽对绞组电缆。其优点是抗拉、抗压能力较强，电缆安装前后的结构稳定性和电气一致性好。线对的两导体中心距波动较小，因而具有较好的 SRL 值。另一方面，此充分利用了维持 TEM 传播的模式，故其线组间的串音也改善很多。缺点是制造工艺较复杂，线组护套后，绝缘外径、衰减、时延比不护套时略大。

f) 图 11、图 12 为特殊条件下使用的非屏蔽对绞组电缆。其优点是抗拉、抗压能力较强，电缆安装前后的结构稳定性和电气一致性好，绝缘导体相互粘连，单导体无法实现独立旋转，确保导体间距的一致性，而达到极其稳定的阻抗和线对优异的平衡性能。线对的两导体中心距波动较小，因而具有较好的 SRL 值。另一方面，此充分利用了维持 TEM 传播的模式，故其线组间的串音也改善很多。缺点是制造工艺较复杂，线组护套后，绝缘外径、衰减和时延比不护套时略大。

g) 图 13、图 14 为传输频率可达 1GHz 以上的平行粘连线结构。为了减少集肤效应影响，用镀银退火铜线作为导体。由于在 1GHz 频带内，如果采用对绞结构，要想改变线对间

的绞合节距使它们互不干扰很难做得到，也很难用屏蔽把每一个线对独立分隔，因为在屏蔽内很可能形成间隙。另外，由于屏蔽和信号线间的距离有波动也会引起阻抗的波动。此外，如果这些芯线绞合不均匀，那么一根单线的长度与线对另一根线的长度就不一样，而这种差异很可能导致信号传播延迟畸变。为此，采用了物理发泡绝缘的平行粘连线结构。粘连线的 S 值变化很小，确保了 SRL 值。由于每个线组都采用了金属箔绕包屏蔽（因为线对无绞合，故绕包层平整，提高了 SRL 值），因此，没有节距时也不会造成线组间的串音。为了保持电磁场的对称性，图 13 所示结构中，屏蔽连通线用了两根，尽管这会带来衰减的轻微增加，但其它指标得到改善，因此也是值得的。

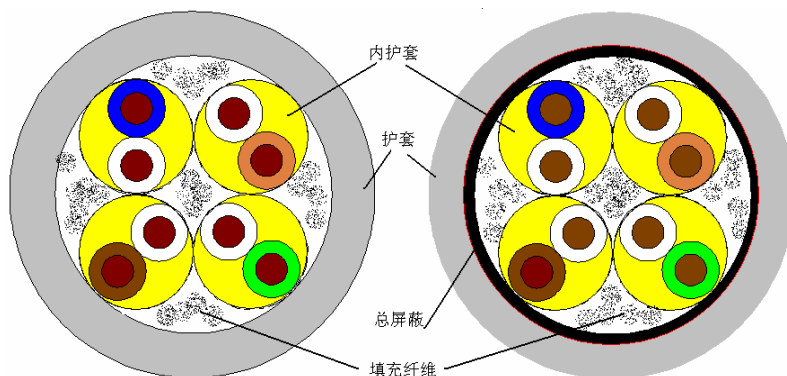


图 9

图 10

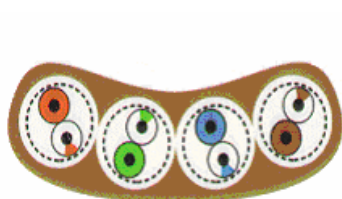


图 11

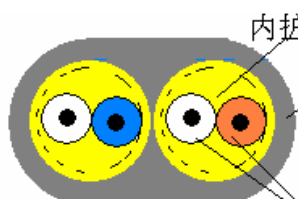


图 12

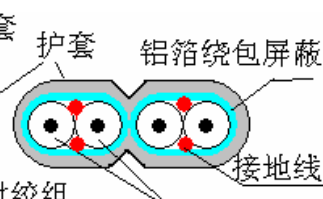


图 13

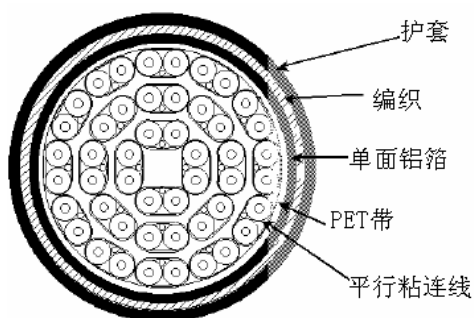


图 14

5. 高频对称电缆制造技术

高频对称电缆制造的关键是保持电缆在宏观和微观上结构尺寸的精确和尽可能小的偏差。

5.1 绝缘

绝缘是高频对称电缆制造的基础，绝缘芯线的质量直接影响着能否成功生产出高频对称电缆，因此，除了生产绞合导体高频对称缆外，为了保证绝缘线芯达到高度精密的几何尺寸和最佳质量，均毫无例外采用串联线。下面介绍绝缘工序的几个主要因素

5.1.1 严格控制导体和绝缘外径的波动

通过对阻抗公式的分析得知：导体的波动比绝缘外径的波动影响更大。因此，根据绝缘生产线的情况尽可能将导体波动控制在一个较小的范围内。对于六类以上的对称电缆其波动应控制在 $\pm 0.0015 \sim \pm 0.002\text{mm}$ 以内。绝缘外径应控制在 $\pm 0.010 \sim \pm 0.015\text{mm}$ 以内。如果是粘连线，则导体中心距波动宜控制在3%以内。

5.1.2 严格控制导体、绝缘的不圆度

当导体和绝缘不是理想的圆柱时会造成电场畸变，影响电场的分布，从而影响电缆的许多项电气性能指标。影响导体不圆度的主要因素有成品拉丝模孔不圆、导体在挤塑前所经过过线轮上损伤。影响绝缘不圆度的主要因素有：挤塑模盖孔不圆、挤塑温度过高，在冷却前热的塑料因重力作用下坠而造成、绝缘芯线在过线轮上擦伤。导体最大不圆度不宜大于 0.002mm 。绝缘的最大不圆度不宜大于 0.015mm 。

5.1.3 严格控制绝缘偏心

绝缘偏心会影响对称电缆的工作电容和电感而引起阻抗的波动。通常情况下生产六类及以上电缆时同心度应在97%以上。造成绝缘偏心的主要因素有：模芯与导体间的间隙过大造成导线在模芯内晃动、挤塑温度过高，在冷却前热的塑料因重力作用下坠而造成、模芯和模盖同心度不够。在国外，通常采用一种特殊设计的可微调偏的自定心机头配合在线偏心监测仪来调整同心度，其同心度可达98%以上。

5.1.4 绝缘颜色

高频对称电缆的绝缘芯线的颜色分为单色线和带标志色（色环、色点和色条）线两类。由于绝缘料中加入色母料后，常常会因为色母料内部有矿物质，它的不均匀分布会造成相对介电常数的不均匀，引发不同程度的反射波，同时也会增加介质损耗角正切值，故生产六类及以上电缆时，最好采用表皮着色技术，并尽可能降低颜色深度，从而减少色母料的不良影响。如果采用色环或色点作标志色时，宜在绝缘芯线未进入冷却水槽前用油墨着色，否则色环或色点易脱落。由于在高速度绝缘线上使用印色环或色点着色的成本高、技术难度较大，因此，应尽可能采用色条方式。

5.1.5 其它

严格控制绝缘附着力：导体与绝缘间的附着力过小，会造成后工序加工时导体与绝缘间的相对转动，造成微观上的不均匀，影响SRL值。附着力过大，在有些使用场合下，会影响使用。因此，应根据电缆的具体情况确定附着力的控制范围并严格控制。影响绝缘附着力的因素有：导体挤塑前的预热温度、导体的清洁程度、挤塑后的冷却速度。

严格控制导体的伸率范围：绝缘芯线在后序的加工过程中，因为张力的原因，会产生一定的拉伸，其伸长量与导体的伸率有关。因此，导体的伸率范围过大时，会造成后工序加工中导体被不同程度拉细，加大导体线径的波动范围从而影响SRL值。生产六类及以上电缆时伸率波动宜控制在4-5%及以下。

尽量使绝缘表面光滑，这可以减小因绞对、成缆时绝缘芯线与绞弓或模具间的摩擦力带来的各种损伤。

5.2 绞对和成缆

绞对的主要目的是利用交叉效应来减小线组间的串音，对于退扭（部分或全部）式绞对在满足一定条件时，还可以减少绝缘偏心及其它绝缘芯线径向上的不均匀缺陷。成缆的主要目的是使线对绞合在一起构成结构比较稳定的缆芯。

根据绞对、成缆是合二为一还分开来完成，通常将绞对与成缆分为一步法和二步法。其中一步法是采用群绞，其最大优点是将对绞、成缆两工序合而为一，省除了对绞后的收绕和成缆时的放出，使对绞的反复弯曲减少，从而提高了电缆的质量。但其缺点为生

产效率低、投资大。二步法则是先用绞对机将绝缘线绞成线对，然后再用成缆机成缆，其特点是设备的投资较少，电缆的质量稍差一些，但通过合理配置也能生产合格的电缆。国内多采用二步法。

5.2.1 绞对节距范围的选择及控制

通常情况下，电缆的使用频率越高，信号的波长就越短，绞对节距越小时平衡效果才好。但过小的绞合节距又会带来生产效率低和绝缘芯线扭伤的问题。实践中，当绝缘芯同心度达到94%以上时，五类缆的节距可取在10-18mm。绝缘同心度达到97%时，六类缆的节距可取在10-17mm左右，同心度达到98%以上时可取12-24mm左右。其他规格的对绞线节距可按绞对节距与绞对螺旋角的关系适当放大或减小。在线对节距(成品中的节距,绞对工序中的节距经过不退扭成缆后会出现变化)设计时,应保持两个原则:1. 相邻线对的节距差尽可能大;2. 相邻和相近的线对节距不成低整数倍关系。

其次，需要控制绝缘芯线放线张力的均匀性和节距的波动范围，通常放线张力和节距波动宜分别控制±10%和±2%以内。

5.2.2 不退扭与退扭绞合

5.2.2.1 绞对过程中绝缘芯线的变化

对称缆的绞对机根据其是否退扭及退扭量多少分为三大类：不退扭绞对机、部分退扭绞对机、和零扭绞对机。

不退扭绞对机

普通的绞对机是一种不退扭的绞对机。线对绞对过程中，两根线绕着公共轴(线对线中心轴)公转的同时，还会绕自己的轴线转动，一个节距范围内其转的角度为 $2\pi \sin \gamma$ (其中 γ 为绝缘芯线绞对时的螺旋升角)。这会带来以下后果：

- a) 线对节距很小，扭转的次数很多，截面上的扭转应力集中严重，造成绝缘层的严重变形和损伤，最终造成电磁场的畸变，影响一些电气指标如SRL值、衰减。
- b) 当绝缘偏心存在时，由于绝缘单线的公转和自转造成导体间的距离周期性变化带来阻抗的周期性波动，波动周期比较长，在高频传输时这种缓慢变化能被电磁波觉察，影响SRL值。

零扭绞对机

它是一种特殊设计的绞对机，在绞对过程中，两线间只有公转而不产生自转。这种技术优势在于消除了绝缘芯线的自扭转带来的损伤，同时也把绝缘偏心造成的导体中心距离的波动周期缩短到一个节距内(通常也小于电磁波波长的十六分之一)。根据电磁波传播理论，当阻抗沿传播方向上变化的周期小于等于八分之一波长时，电磁波将不易觉察到这种变化，因此，基本消除了绝缘偏心对SRL的影响。

部分退扭绞对机：

这类绞对机是通过一定的方法来减慢或等效地减慢绞对时绝缘单线的自转速度，使线对导体间距离S完成一个周期变化所对应的长度包含于若干绞对节距，但未超过电缆最高使用频率对应的1/8波长，那么线对阻抗也在较快的时间内完成一个周期的快速变化，从而使线对总长度上的阻抗变化变得平滑。在这类绞对机中，实现的方式有两种：

一种是先零扭绞对，然后再进行不退扭绞对，最终等效于部分退扭，其退扭率可从0%-100%范围调整。

另一种是将绝缘单线先沿绞对时绝缘单线自转方向相反的方向扭转一定的角

度，在绞对后也等效地实现了部分退扭，由于有大角度的反复扭转，因而这种退扭技术对绝缘芯线仍有一定的损伤，实践证明随着退扭率的增加，导体与绝缘层的粘合强度、铜线的内应力、绝缘表面等都受到破坏，且这种破坏程度几乎随着退扭率呈线性关系增加。特性阻抗波动幅度随着退扭率从 0 开始至某一数值的范围内时呈线性减小，当退扭率达到这数值后，阻抗的波动幅度又随着退扭率的增加呈近线性增加，但增加的幅度比减小的幅度要缓慢些，其结果如图 15 所示^[6]。退扭率通常选择在 5-35%^[7]范围内。由于退扭范围的限制，用这种绞对机生产六类以上的电缆时常存在着一些问题。

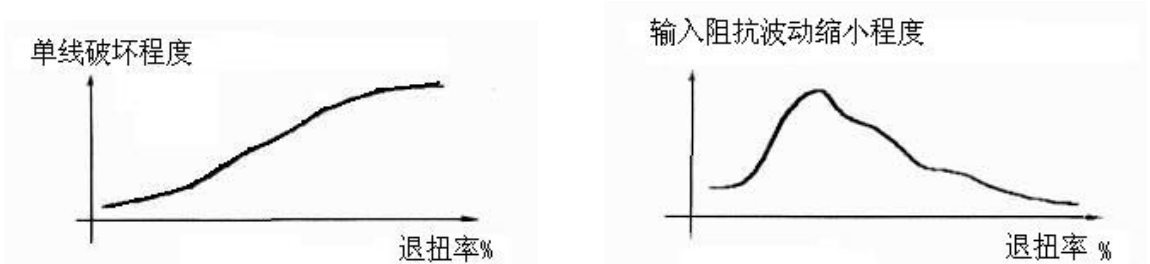


图 15 预退扭型绞对生产过程中单线损伤程度、阻抗波动缩小程度与退扭率关系

5.2.2.2 最小退扭率的选择

由文献^[7]得知，要消除绝缘偏心对SRL的影响，就要求导体中心距S的变化周期不大于 1/8 波长，也就是说，S的变化周期为 1/8 波长时对应的退扭率即为所需的最小退扭率。笔者根据这一思路推导出了最小退扭率的计算公式，发现其值与绞对节距、绝缘外径以及成缆时是否采用退扭式成缆机有关。表 1 给出了 4 对五类、六类、七类缆，绞对节距在 10-18mm、成缆节距为 100mm时，生产各类缆的绞对线所需要的最小退扭率。

表 1 生产各类缆绞对线时需要的退扭率最小值

电缆类别	最高工作频率	1/8 波长	绞对节距	绞对线的最小退扭率(%)	
				退扭式成缆	不退扭式成缆
五类	100MHz	290mm	10	绞对时不需退扭	最好退扭 5%以上
			18	4.9	5.8
六类	250MHz	116mm	10	3.3	3.6
			18	13.7	16.2
七类	600MHz	48mm	10	15.3	16.8
			18	35.5	41.9

注:此处假定绞对方向与成缆绞合方向一致。

对于采用先零扭绞绞对再用不退扭绞对实现的部分退扭方式而言,退扭率越大则 S 值的波动周期越小,绝缘芯线的扭伤也越小,因而阻抗波动也就越小,但此时的生产效率低;对于预扭绞绞对,退扭率过大会影响绝缘的损伤程度;另一方面,从表 1 知线对的退扭率只需大于最小退扭率就可以了。这就是在实际生产过程中通常不采用完全退扭的原因。通常情况下采用前种方法生产五类、六类电缆时线对的退扭率选择为 33% (此时生产效率最高),采用预扭绞方法时退扭率则宜选择较小一些(如 25%左右)。

5.2.3 成缆节距

根据目前的生产经验,在成缆过程中应保证以下几点:

- a) 各组线张力适宜,使缆芯的结构既保持对称又不过分挤压。
- b) 成缆节距通常按节径比 25-30 左右选择。
- c) 采取主动放线,最好具有自动对中功能,以减小绞对节距的破坏程度。

5.2.4 绞对与成缆的绞向

对于非退扭式成缆机,绞对和成缆同向绞合时,电缆护套后在内应力的作用下可能有“打扭”现象,反向绞合则不明显。同向绞合使线对具有“增扭”的效果,反向则具有“减扭”效果,增扭会使两导体间的距离相对较稳定,减扭则破坏其稳定性。其影响效果如图 16 所示。实践证明,在其它条件相同下同向绞合更好!为了尽可能减小同向绞合的不良影响,最好使用退扭式成缆机。



图 16 绞对、成缆同向和反向绞合时对绞对线的影响

5.3 屏蔽

导体对屏蔽间的距离发生变化,特别是周期性变化,且变化周期为电磁波波长一半的整数倍时,会对 SRL 值产生较大影响。因此,绕包、编织屏蔽的绕包节距、编织节距应尽可能小于电缆最高传输对应电磁波波长的一半,最好是小于波长的 1/8。其次,要尽可能使屏蔽层内表面离导体的距离的波动减小。

5.4 护套

护套时护套不宜过松和过紧,过松的护套会使电缆使用时因外力作用使线对发生相对滑动,影响 SRL 值。过紧会使绝缘层受压,也会影响电缆衰减。为了减小缆芯放出时对缆芯的破坏,最好采用自动对中式主动放线架。

6. 结束语

一方面,高频对称电缆是各制造工序不断改善和提高的产物,只有对制造中的每一个细节均加以重视才行,片面地强调某一细节都可能带来事倍功半的效果;另一方面,在设计高频对称电缆时应充分考虑其安装性能,有针对性地确定设计方案。

参考文献

1. Osamu Koyasu, Fumio Suzuki. Development of the UTP cable for 10Gbps transmission [A]. 53rd IWCS [C] 2004:266-272
2. L. M. Hore. Return loss of metallic telecommunication cables due to periodic and random structural variation and temperature [A]. 41st IWCS [C]. 1992:757-764
3. Werner Sittinger. Mechanical performance of different category 6 cable designs [A]. 50th IWCS [C]. 2001:151-159
4. Koichi Kuwahara, Yuko Tachibana Abe. The copper cable for 2.5Gbps signaling [A]. 52nd IWCS [C]. 2003:135-139
5. H. LUBAS. J. A. OLSZEWSKI. Analysis of structural return loss in catv coaxial cables [A]. 17th IWCS [C]. 1968
6. 姜廷运. 关于改善数字电缆输入阻抗的探讨 [J] 现代有线传输 2002(4):27-32, 48
7. 代康 . 全塑市内宽带对绞通信电缆技术发展 [J] 光纤与电缆及其应用技术, 2000(6):3-15
8. 韩中洗 . 电缆工艺原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
9. 郑玉东. 通信电缆 [M] . 北京: 机械工业出版社, 1985.