



综合布线以太网供电 (PoE) 技术 蓝皮书

系列(二)直流供电条件下的线缆升温特性

浙江兆龙互连科技股份有限公司 何方(博士, 特许工程师), 沈金涛, 周钦阳
中国信息通信研究院泰尔系统实验室 刘泰(高级工程师), 翟庆诗(高级工程师)

1 对绞电缆直流供电时的升温模型

在用于电报传输的地下电缆被发明之后，学术界即开始研究电缆承载电流时的导体升温现象^[1]。早期的理论研究大多集中在电力工程和电配领域，通过研究电流强度、导体直径、绝缘材料、护套外径等参数之间的数值关系分析电力电缆在承载稳态或瞬态电流时的升温特性。如要详细了解使用数值方法计算电缆升温的文献请参考 Holyk 和 Anders 的文章^[2]。

为了使综合布线系统能有效地支持以太网供电应用，综合布线的相关标准组织陆续发布了一些指导性技术文件^{[3][4][5][6]}。在这些指导性技术文件中，除了通信信道的环路电阻和电阻不平衡之外，通信电缆承载直流电流时其升温情况是重点需要关注的现象。

当使用综合布线系统进行远程供电时，对绞电缆中铜导体的直流电阻会消耗一部分能量并转化为热。这部分热量由铜导体表面沿着绝缘和护套辐射至外界自由空间。当对绞电缆成束捆扎安装，并且线束内每条对绞电缆都进行远程供电时，线束内层的电缆散热受阻，其温度会持续上升，直到电缆捆扎内外达到新的热交换平衡。因此，当成束安装的对绞电缆用于远程供电时，位于线束中心位置的电缆的工作温度要明显高于线束边缘位置，如图 1 所示。

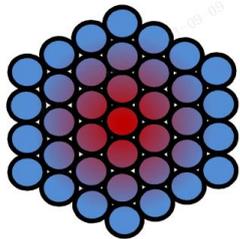


图 1 – 捆扎电缆线束的内部升温^[4]

通过必要的理论计算可知，在给定相关条件的前提下，捆扎线束的最高升温与捆扎数目 (N) 和电流强度 (I) 有关。因此对绞电缆在直流供电时的升温 (ΔT) 可

以用以下简化公式表述：

$$\Delta T = (C_1 \cdot N + C_2 \cdot \sqrt{N}) \cdot I^2 \quad (1)$$

其中：

- C_1 ：由捆扎线束表面至捆扎线束中心的升温系数。
- C_2 ：由自由空间至捆扎线束表面的升温系数。

公式 (1) 默认环境温度为 20°C。如果环境温度大于 20°C，则该公式可修正为：

$$\Delta T = (C_1 N + C_2 \sqrt{N}) I^2 \cdot [1 + \alpha(T - 20)] \quad (2)$$

其中：

- α ：金属铜的电阻温度系数，其数值为 0.00393/°C。
- T ：环境温度（单位：°C）。

由公式 (2) 可见，对绞电缆捆扎线束在远程供电时的最高升温 (ΔT) 与该对绞电缆在指定安装环境中的升温系数 (C_1 和 C_2)、捆扎线束中对绞电缆的数量 (N)、每对线承载的电流强度 (I) 和环境温度 (T) 相关。在设计针对以太网供电的综合布线系统方案时，在确定了对绞电缆规格的前提下（即已知 C_1 和 C_2 ），最高升温 (ΔT)、捆扎数量 (N)、电流强度 (I) 和环境温度 (T_a) 这四个参数中，只要已知任意三个参数，就可以确定第四个参数。

2 对绞电缆直流供电升温实验

2.1 测试设备和测试方法

对绞电缆在直流供电条件下的升温的特性，以及电缆的升温系数 C_1 和 C_2 ，可以通过实验室测试方法评估^[8]。测试捆扎线缆升温时，电缆需按照“紧密接触”的方式进行捆扎。将电缆的横截面视为正六边形，紧密包裹一根电缆需要六根电缆（第一层）；再覆盖第二层需要十二根电缆，如图 2 所示。表 1 列出了不同覆盖层数对应的电缆捆扎的总数量。

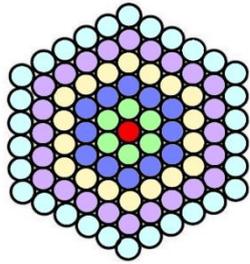


图 2 – 电缆捆扎示意图

表 1 – 电缆捆扎数量

	单层电缆数量	电缆捆扎总数
中心线缆	1	1
第一层	6	7
第二层	12	19
第三层	18	37
第四层	24	61
第五层	30	91
第六层	36	127
第七层	42	169

测试电缆升温时，将电缆捆扎的中心电缆的护套割开一个缝隙并插入热电偶（图 3）。



图 3 – 将热电偶插入中心电缆

将放置好热电偶的缝隙用胶带固定牢固（图 4）。

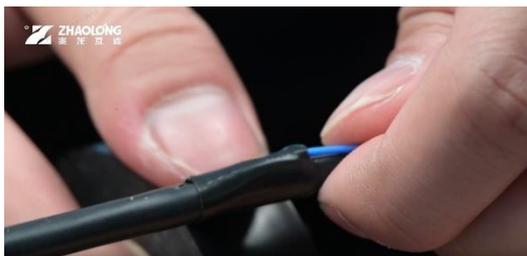


图 4 – 使用胶带固定缝隙

以七层覆盖为例，在测试支架上将同一根电缆往复缠绕，使支架上有 169 根电缆单元。以插入热电偶的电缆为中心，将 169 根电缆按照每层的数量小心地捆扎为一个电缆线束，如图 5 所示。



图 5 – 169 根电缆的捆扎线束

电缆捆扎预备好之后，将两端的电缆的导体分别绞合在一起，焊接后与直流源连接，形成回路，此时电缆内的导体相当于并联连接，如图 6 所示。将被测电缆捆扎与直流电源相连接。本文验证四对对绞电缆支持 PoE Type 4 时的升温，因此按照上述步骤预备的被测电缆捆扎需要由直流源提供 4 安培电流（即每对对绞线承载 1 安培电流）。



图 6 – 电缆两端的导体并联绞合

热电偶测量的温度数据由测试仪读取。为了获得更严谨的测试数据，可以在中心电缆放置三个热电偶，放置位置如图 7 所示（黑色圆点）。另外使用至少一个热电偶监控被测电缆捆扎所在的环境温度。

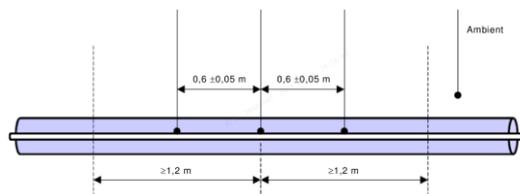


图 7 – 热电偶放置位置^[8]

实际的测试配置如图 8 所示。线缆捆扎的中心电缆放置了三个热电偶监控电缆线束的最高升温，在测试支架外围放置了三个热电偶监控环境温度。在层数允许的前提下，另有两个热电偶放置在第二层和第三层的任一电缆内监控非中心位置的升温作为参考数据。



图 8 – 测试设备
(左：数据采集电脑；中：热电偶测试仪；右：直流电源)

图 5 所示的测试条件为开放空间 (ventilated)，在开放空间环境下捆扎线束的表面可以和空间进行充分的热交换。图 9 所示为电缆线束安装在封闭套管 (conduit) 中的场景。在封闭套管中电缆线束和空间的热交换受阻，捆扎线束的最高升温必然高于在开放空间中的相同数量的电缆线束。



图 9 – 电缆线束在封闭套管中

由公式 (1) 或公式 (2) 可见，如果要得到 C_1 或 C_2 的数值，只需要改变一次电缆捆扎的数量，即可通过二元一次方程求解得到。在实际测试过程中，电缆线束的数量按照表 1 所列的数据从 169 根测试至 7 根， C_1 或 C_2 的数值再通过最小二乘法得到。

2.2 电缆升温数据

图 10 所示为一款 23 线规 0.56 毫米导体线径的 6A 类 U/FTP 电缆在 127 根捆扎并通风条件下的最高升温测量数据。其中，“电缆温度”为三个测量电缆温度的热电偶中测量温度最高的数值；“环境温度”为三个测量环境温度的热电偶测量值的平均值。当线束内加入直流激励后中心电缆的温度开始上升，待达到热交换平衡后测得电缆的最高升温为 13.30°C。

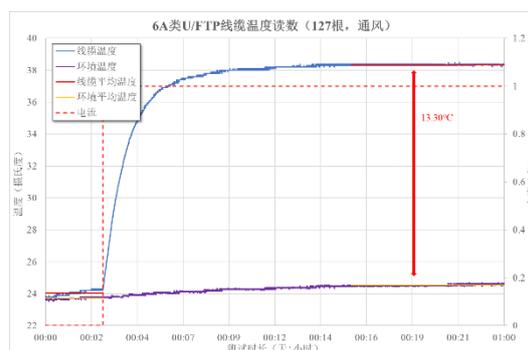


图 10 – 127 根 6A 类 U/FTP 电缆通风环境最高升温

相同电缆数量的同款电缆在封闭套管环境中的最高升温测量值如图 11 所示，由图中数据可知封闭套管环境下的最高升温为 17.05°C。

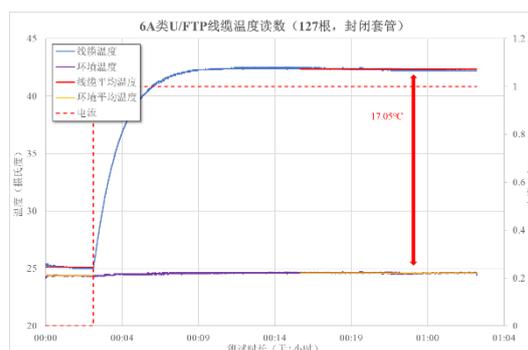


图 11 – 127 根 6A 类 U/FTP 电缆套管环境最高升温

针对该 6A 类 U/FTP 电缆，依次测试表 1 所列捆扎数量的最高升温。将测试数据按照最小二乘法计算得到该电缆在通风环境和套管环境下的 C_1 和 C_2 值如表 2 所列。

表 2 – 6A 类 U/FTP 电缆的升温系数

	C_1	C_2
通风环境	0.0713	0.3651
套管环境	0.0641	0.7660

图 12 所示为 6A 类 U/FTP 电缆在不同捆扎数量和不同环境的条件下，通过升温系数计算得到的电缆线束最高升温数值。

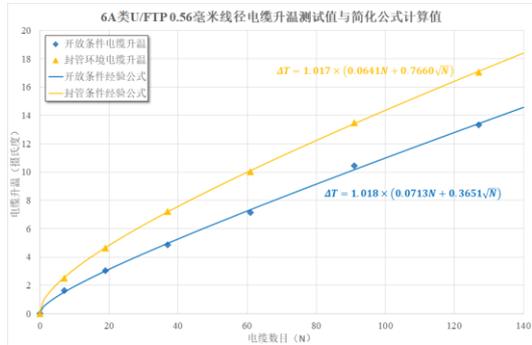


图 12 - 6A 类 U/FTP 电缆升温值与简化公式计算值

3 电缆升温特性分析

3.1 电缆升温曲线 (ΔT)

表 3 列出了测试得到的几款不同类型的对绞电缆的升温系数。当电缆线束安装在封闭套管中时，套管阻碍了线束表面与自由空间之间的热交换，而这个升温特性由参数 C_2 描述。因此由表 3 数据可见，将通风环境和套管环境的升温参数对比， C_1 参数变化不大，但套管环境的 C_2 参数要明显大于通风环境。

表 3 - 不同对绞电缆的升温系数

	通风环境		套管环境	
	C_1	C_2	C_1	C_2
8.1 类 S/FTP	0.0368	0.4736	0.0342	0.8679
7 类 S/FTP	0.0428	0.5352	0.0528	0.8074
6A 类 U/UTP	0.0788	0.4452	0.0750	0.8815
6A 类 U/FTP	0.0713	0.3651	0.0641	0.7660
6 类 U/UTP	0.0843	0.6273	0.1136	0.8022
6 类 F/UTP	0.0586	0.4477	0.0578	0.8337
5 类 U/UTP	0.1350	0.7797	0.1217	1.5904

图 13 所示为表 3 中所列的电缆在每对线承载 1 安电流、通风环境、20°C 环境温度条件下的升温曲线。

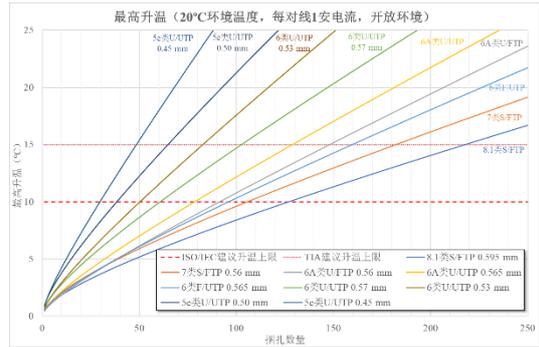


图 13 - 电缆升温曲线对比
(每对线 1 安电流、通风环境、20°C 环境温度)

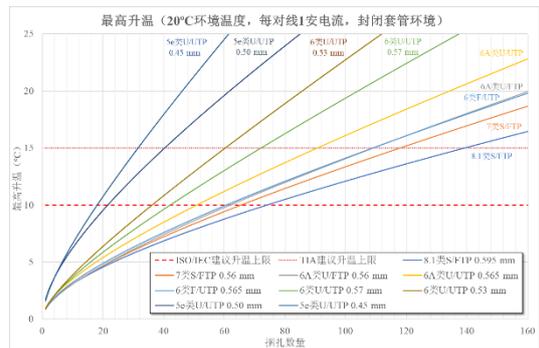


图 14 - 电缆升温曲线对比
(每对线 1 安电流、套管环境、20°C 环境温度)

图 14 所示为表 3 中所列的电缆在每对线承载 1 安电流、套管环境、20°C 环境温度条件下的升温曲线。

由图 13 和图 14 的升温曲线可见，带有屏蔽结构的电缆的升温要低于同规格的非屏蔽结构的电缆。这是因为金属屏蔽层是热的良导体，可以加速热交换，降低捆扎中心的升温。另外，因为导体线径越小，导体电阻越大，所以粗线径的电缆（8.1 类、7 类）的升温要低于细线径的电缆（6 类、5 类）。

TIA-TSB-184-A 建议支持远程供电的电缆捆扎的最高升温不超过 15°C，即综合布线系统所在的环境温度最高可以达到 45°C，在此前提下即使电缆升温达到 15°C，电缆的工作温度仍然没有超过常规电缆默认的 60°C。ISO/IEC TS 29125 则建议电缆升温不超过 10°C，即环境温度最高可以达到 50°C。以 23 线规 6A 类 U/FTP 电缆为例，如果按照 ISO/IEC TS 29125 的建议，电缆

升温不超过 10°C，则在 20°C 环境温度、通风条件下，电缆捆扎数量不应超过 91 根。如果电缆按照 ISO/IEC 14763-2 的规范要求进行安装，即每捆扎的电缆数量不超过 24 根，则网格桥架上可以放置 3 至 4 捆线束。由于篇幅原因，桥架安装的电缆线束的升温修正系数不再展开讨论，详细内容请参阅本系列蓝皮书的第四篇《布线系统安装建议》。

3.2 最大捆扎数量 (N)

在已知电缆规格和安装条件 (C_1 和 C_2)、环境温度 (T_a)、电缆工作温度 (T_c) 以及承载电流强度 (I) 的前提下，可以通过公式 (2) 计算捆扎线束的电缆数量。对于普通应用环境，电缆的默认最高工作温度为 60°C。假设 $T_c = 60$ ，则可得到在给定条件下捆扎线束的最大电缆数量。

图 15 和图 16 分别是不同类型的对绞电缆在每对线承载 1 安电流时，在通风和封闭套管条件下针对不同环境温度的最大捆扎数量。由图可见不同电缆的最大捆扎数量的定性规律与图 13 和图 14 所示的特性是一致的。在实地安装中，只要给定 PoE 系统指标、环境温度等条件，就可以推算电缆捆扎的理论最大数量，并以此依据 ISO/IEC 14763-2 的安装实践标准进行桥架铺设^[7]。

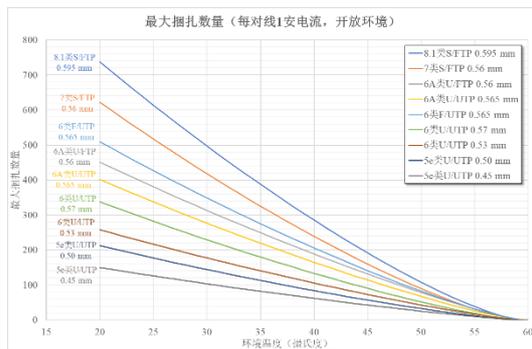


图 15 - 每对线 1 安电流条件下，不同电缆在通风环境的最大捆扎数量

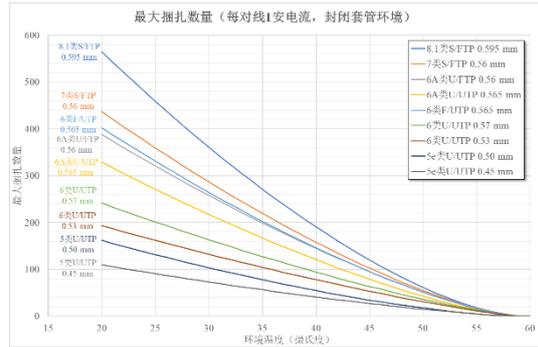


图 16 - 每对线 1 安电流条件下，不同电缆在套管环境的最大捆扎数量

3.3 电缆载流容量 (I)

将公式 (2) 改写为公式 (3) 的形式：

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{(C_1 \cdot N + C_2 \cdot \sqrt{N}) \cdot [1 + \alpha \cdot (T_a - 20)]}} \quad (3)$$

在已知电缆规格和安装条件 (C_1 和 C_2)、电缆捆扎数量 (N)、规定的电缆工作温度 (T_c) 以及环境温度 (T_a) 的前提下，公式 (3) 可以得到在以上条件下电缆可以承载的电流强度。对于普通应用环境，电缆的默认最高温度为 60°C。假设 $T_c = 60$ ，则可得到在给定条件下电缆能承载的最大电流强度，这个电流强度被称为电缆的载流能力。

图 17 和图 18 分别是不同对绞电缆在 20°C 环境温度，通风和封闭套管条件下的电流承载能力。

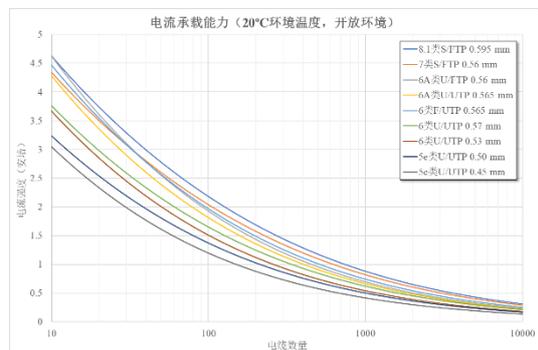


图 17 - 20°C 环境温度，通风条件下不同电缆的电流承载能力

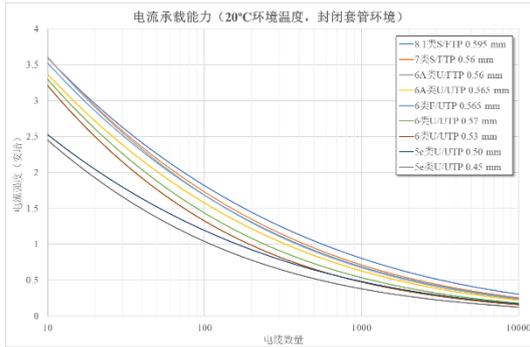


图 18 - 20°C环境温度，套管条件下不同电缆的电流承载能力

由图可见当电缆捆扎的数目比较少时，电缆的载流能力是可以远远超过 1 安培的。因此可见，对于现有的以太网供电系统，其 PSE 端的最高输出功率可以超过 90 瓦，PD 端的最高接收功率也可以超过 71.3 瓦。

4 电缆升温对性能的影响

4.1 电缆升温对导体电阻的影响

对绞电缆的导体电阻在直流远程供电中会带来功率损耗，因此电缆的导体电阻的大小会直接影响接收端所能接收到的功率。IEC 61156-5 规定在 20°C 环境温度条件下用于水平布缆的 100 米对绞电缆的导体电阻不超过 9.5 欧姆^[9]；而 IEC 61156-6 规定在相同环境温度条件下用于工作区布缆的 100 米对绞电缆的导体电阻不超过 14.5 欧姆^[10]。

图 19 所示为使用欧姆表测量的不同规格的用于水平布缆的对绞电缆在不同导体温度条件下的导体电阻值。由图可见，对于对绞电缆产品，导体直径是影响导体电阻值的最重要因素。导体直径越大，单位长度的导体电阻越小。

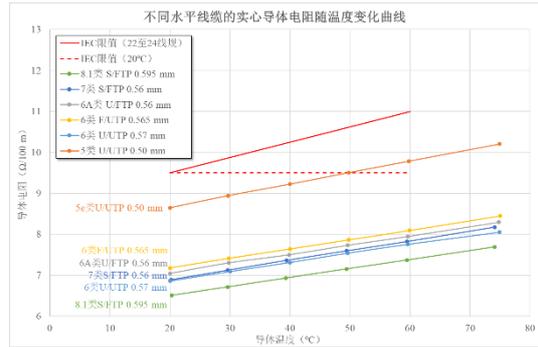


图 19 - 不同水平线缆的导体电阻测量值

由图 19 的细节可见，当对绞电缆的导体直径在 0.56 毫米以上时，导体电阻的测量值都远小于 IEC 61156-5 的标准要求值。即使导体温度达到 60°C，导体电阻也小于 9 欧姆。如果综合布线系统需要支持以太网供电 Type 4，水平布缆建议使用导体线径不小于 23 线规的实心对绞电缆。

对于导体直径为 0.50 毫米的 5e 类水平线缆（24 线规），当环境温度达到 50°C 时，导体电阻已经超过了 20°C 对应的电阻要求值。当对绞电缆系统进行直流供电时，传输媒质（信道）的电阻是按照各组件在 20°C 条件下的电阻值进行规划的。因此，假设使用该水平线缆所组成的信道进行远程供电，则当中心电缆的工作温度超过 50°C 后，升高的电缆电阻有可能会使传输媒质的电阻超过设计值，导致传输媒质的压降过大，接收端无法接收到额定的功率值。对于支持以太网供电 Type 4 的应用场景，不建议使用 24 线规或更细规格的对绞电缆用于水平布缆。

图 20 所示为使用欧姆表测量的不同规格的用于工作区布缆的对绞电缆在不同导体温度条件下的导体电阻值。

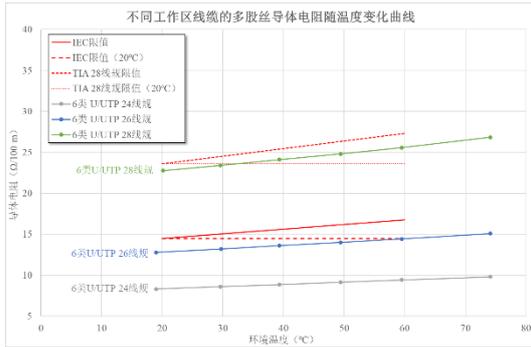


图 20 – 不同工作区线缆的导体电阻测量值

由图 20 的细节可见，用于工作区布缆的多股丝电缆，其导体电阻也由导体的直径决定。如果综合布线系统需要支持以太网供电 Type 4，信道配置中的跳线线缆应考虑 24 线规至 26 线规的导体线径。对于 TIA-568.2-D Annex G 所规范的 28 线规跳线线缆，由于导体直径过细，导体电阻值很高。因此如果要在以太网供电应用中使用 28 线规跳线，应按照 TIA TSB-184-A-1 所建议的布缆方式进行施工。

当水平电缆进行直流供电时，通过上一章节测量确定的电缆升温系数 (C_1 和 C_2) 可以推算得到在给定条件下捆扎线束中心电缆的导体电阻值。图 21 和图 22 分别显示了不同水平线缆在 20°C 环境温度支持以太网供电 Type 4，在开放环境和封闭套管环境中导体电阻与捆扎数量的关系。图 21 和图 22 是按照测试值进行理论计算的极限情况。针对实际应用中的设计、预备和施工中如何处理电缆的导体电阻的详细内容，请参阅本系列蓝皮书的第四篇《布线系统安装建议》。

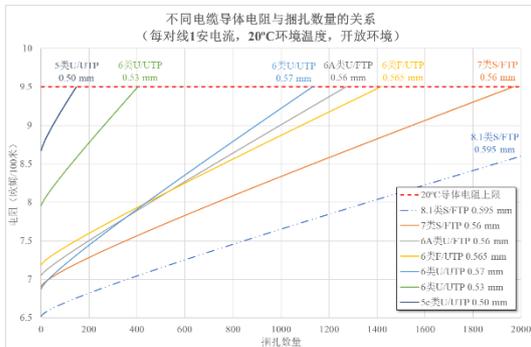


图 21 – 不同水平线缆在指定以太网供电应用中的电阻与捆扎数量的关系（开放环境）

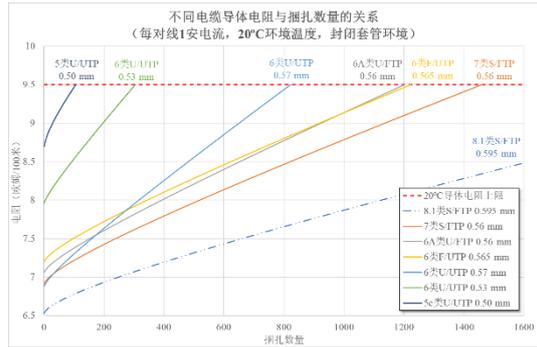


图 22 – 不同水平线缆在指定以太网供电应用中的电阻与捆扎数量的关系（封闭套管环境）

4.2 电缆升温对插入损耗的影响

电缆导体升温会使导体电阻增大，这会进一步导致对绞电缆的插入损耗变大。如果插入损耗过大，使得接收端的信号功率衰减严重，将无法满足信噪比要求。因此，在使用综合布线系统进行远程供电时，需要特别关注信道的插入损耗在高温时是否仍然满足标准限值的要求。

为了验证对绞电缆在直流供电时的插入损耗特性，首先测量对绞电缆在不同温度条件下的插入损耗。图 23 所示为 23 线规 6A 类 U/FTP 电缆的插入损耗测试值。

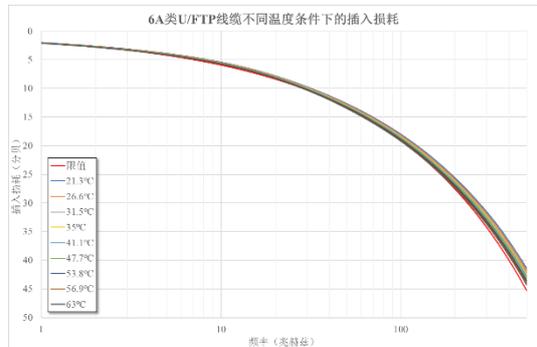


图 23 – 6A 类 U/FTP 电缆在不同温度条件下的插入损耗

为了验证对绞电缆在高温条件的插入损耗是否仍能支持综合布线系统的传输性能，需要继续验证插入损耗的余量富裕程度。以图 23 所示的 23 线规 6A 类 U/FTP 对绞电缆的 500 MHz 的插入损耗测试值为例，此 6A 类对绞电缆在产品规划阶段已经预留了充足的插入损耗余量富裕度，因此即使在 63°C 条件下测得的插入损耗相对于 6A 类

水平线缆 20°C的插入损耗标准要求仍然保有正余量。这意味着如果使用此 6A 类对绞电缆作为水平布缆的 E_A 级永久链路，在不超过 60°C最高工作温度的条件下，该永久链路可以保持 90 米的最长布缆长度。

图 24 所示为一款 23 线规 0.57 毫米线径 6 类 U/UTP 对绞电缆在不同温度条件下的插入损耗测量值。以 250 MHz 的测试值为例，与 6A 类 U/FTP 对绞电缆不同，该 6 类电缆为非屏蔽电缆，插入损耗增大的速度快于同等条件的 6A 类屏蔽电缆。因此在 50°C以上测得的插入损耗与 6 类水平线缆 20°C的插入损耗标准要求相比已经出现负余量。假设使用此 6 类对绞电缆组成 E 级永久链路，则当电缆的工作温度超过 50°C时，必须适当缩短水平布缆的长度以确保永久链路的插入损耗仍能满足标准要求。

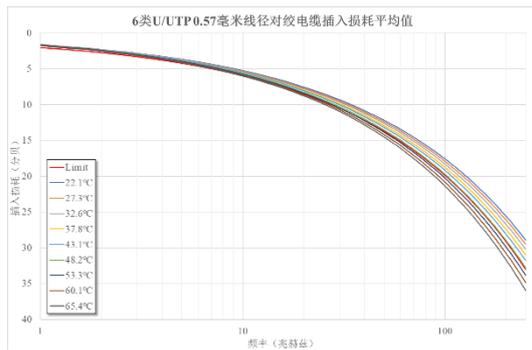


图 24 - 6 类 U/UTP 0.57 毫米线径对绞电缆在不同温度条件下的插入损耗

图 25 显示了不同对绞电缆的插入损耗余量与温度的关系。其中，各对绞电缆的插入损耗取其对应的类别的最高工作频率点：5e 类取 100 MHz、6 类取 250 MHz、6A 类取 500 MHz、7 类取 600 MHz。故图 25 中不同类别的对绞电缆的余量值没有横向可比性。另外，图 25 中的余量大小也与设计指标相关，因此余量数据只针对测试用的指定电缆产品，不适用于普遍情况。对绞电缆的插入损耗与其长度成正比，故图 25 中插入损耗余量如果为负可以通过缩短布缆长度进行改善。根据表 3 中各电缆的直流供电升温系数，以及图 25 中对应各电缆的插入损耗余量与温度的关系，可以

推算各电缆组成的捆扎线束在进行直流供电时，电缆能够支持的最长布缆长度。

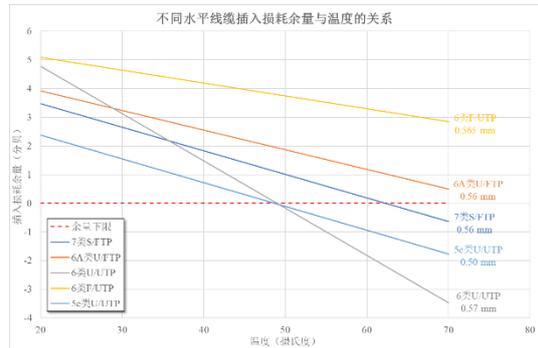


图 25 - 不同电缆插入损耗余量与温度的关系

图 26 和图 27 所示为不同对绞电缆在 20°C 温度条件下，分别在开放环境和封闭套管环境中的永久链路最长布缆长度。

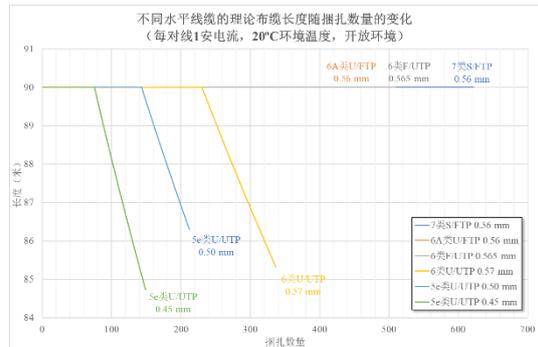


图 26 - 布缆长度随捆扎数量变化的关系 (PoE Type 4, 20°C环境温度, 开放环境)

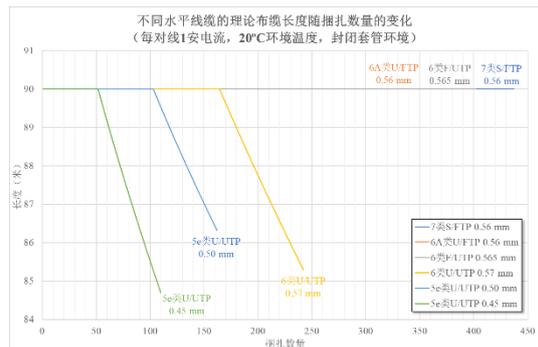


图 27 - 布缆长度随捆扎数量变化的关系 (PoE Type 4, 20°C环境温度, 封闭套管环境)

由于金属屏蔽层优良的散热能力，图中所示的三种屏蔽类电缆在可支持的捆扎数量条件下都能保持 90 米的最长布缆长度。而另外三种非屏蔽电缆由于升温较高，且无金属屏蔽辅助散热，因此在达到特定捆

扎数量时，中心电缆的插入损耗余量已经为零。此时若再增加捆扎数量，中心电缆的插入损耗继续增加，就需要减少布缆长度以满足插入损耗的标准要求。

5 电缆升温研究总结

本文通过测试验证了不同对绞电缆在直流供电条件下的升温情况。并基于测试数据对电缆支持以太网供电应用时的升温特性做了简要分析。通过测试可知，粗线径导体的电缆的升温要低于细线径导体的电缆，而带有屏蔽结构的电缆的升温也低于无屏蔽结构的电缆。因此，在目前布线行业追求低成本的非屏蔽方案，追求小线径布线的风向前提下，需要布线品牌厂家、设计院等充分考虑布线系统支持远程直流供电时电缆升温的影响。

针对最大功率需求的以太网供电应用场景（以太网供电 Type 4，受电设备功率需求超过 60 瓦），建议使用 23 线规的 6A 类屏蔽对绞电缆或更粗线径、更高类别、更多屏蔽结构的对绞电缆产品用于水平布缆；并建议使用 24 线规或 26 线规的 6A 类屏蔽跳线用于工作区布缆。

针对较高功率需求的以太网供电应用场景（以太网供电 Type 3，受电设备功率需求在 40 瓦至 60 瓦之间），本文仍然建议使用上述 6A 类或更高类别的对绞电缆用于水平布缆，以及对应类别的屏蔽跳线用于工作区布缆。同时，也可以考虑使用 24 线规的 6 类对绞电缆用于水平布缆；并可以使用 24 线规或 26 线规的 6 类跳线用于工作区布缆。

针对功率需求不高的以太网供电应用场景（以太网供电 Type 1 和 2，受电设备功率需求小于 25 瓦），对布缆所用的对绞电缆规格没有特别的建议。出于对绞电缆导体直流电阻合规性的考虑，不建议使用 25 线规或更细导体线径的对绞电缆用于水平布缆。

在设计综合布线系统用于支持以太网供电环境时，需要关注电缆在承载直流电流时的升温情况，以及电缆升温对插入损耗和导体电阻的影响。特别的，如果有以下情况：

- 使用非屏蔽对绞电缆用于水平布缆或工作区布缆。
- 使用导体线径小于 0.51 毫米的对绞电缆用于水平布缆。
- 使用 28 线规跳线用于工作区布缆。
- 桥架内铺设的对绞电缆的平均承载电流超过 212 毫安。

建议设计院或综合布线系统供应商咨询电缆厂家了解相关的针对以太网供电的布缆安装建议。通用的布缆安装施工建议，请参阅本系列蓝皮书的第五篇：《布线系统施工安装建议》。

参考文献

- [1] W. A. Thue, "Historical Perspective of Electrical Cables," in *Electrical Power Cable Engineering*, 2nd ed., New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2005, pp. 1-9.
- [2] C. Holyk and G. J. Anders, "Power Cable Rating Calculations - A Historical Perspective [History]," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 21, no. 4, pp. 6-64, Jul.-Aug. 2015, DOI: [10.1109/MIAS.2015.2417094](https://doi.org/10.1109/MIAS.2015.2417094).
- [3] *Information technology -- Telecommunications cabling requirements for remote powering of terminal equipment*, ISO/IEC TS 29125:2017+AMD1:2020, May 2020.
- [4] *Guidelines for Supporting Power Delivery Over Balanced Twisted-Pair Cabling*, TIA TSB-184 Revision A, Mar. 2017.
- [5] *Information technology. Cabling installation - Remote powering*, PD CLC/TR 50174-99-1:2015, Jun. 2015.
- [6] *以太网供电 (PoE) 系统工程技术标准*, T/DZJN 28-2021, 2021 年 8 月。
- [7] *Information technology -- Implementation and operation of customer premises cabling -- Part 2: Planning and installation*, ISO/IEC 14763-2:2019, Dec. 2019.
- [8] *Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 1-4: Assessment of conductor heating in bundled cables due to the deployment of remote powering*, IEC 61156-

1-4:2018, Oct. 2018.

- [9] *Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 5: Symmetrical pair/quad cables with transmission characteristics up to 1 000 MHz - Horizontal floor wiring - Sectional specification*, IEC 61156-5:2020, Apr. 2020.
- [10] *Multicore and symmetrical pair/quad cables for digital communications - Part 6: Symmetrical pair/quad cables with transmission characteristics up to 1 000 MHz - Work area wiring - Sectional specification*, IEC 61156-6:2020, Apr. 2020.
- [11] *Low-frequency cables and wires with PVC insulation and PVC sheath - Part 1: General test and measuring methods*, IEC 60189-1:2018, Jun. 2018.

以太网供电系列蓝皮书:

- (一) 以太网供电技术概览
- (二) 直流供电条件下的线缆升温研究
- (三) 连接器组件支持以太网供电的要求
- (四) 布线系统功率传输分析
- (五) 布线系统施工安装建议
- (六) 绝缘和护套材料的热耐久性研究
- (七) 单对以太网的数据线供电研究