

EtherCAT® 安装指南

EtherCAT 网络规划、安装和调试指南

文件: ETG.1600 G (R) V1.0.3

命名:

ETG编号	ETG.1600
类型	G (Guide)
状态	R (Release)
版本	V1.0.3

创建人:	EtherCAT 技术协会
联系人:	info@ethercat.org.cn
日期:	2022-03-23

法律声明

商标和专利

EtherCAT® 和 Safety over EtherCAT®是由德国倍福自动化公司授权的注册商标和专利技术。文档中使用的其他名称可能也是商标，如有第三方擅自用于其他目的将侵犯相关所有者的权益。

免责声明

文件通过精心撰写，但所描述的技术在持续开发中。因此，并非在每种情况下都核实了文档在性能数据、标准或其他特性方面的一致性。如若其中包含技术或编辑错误，我们将保留随时修改的权利，恕不另行通知。不得根据本文档中的数据、图表和说明对已提供的产品进行修改。

版权

© EtherCAT技术协会

未经明确授权，禁止复制、分发和使用本文档以及将其内容传播给他人。违者将被追究赔偿责任。保留授予专利、实用新型或设计时的所有权利。

www.ethercat.org.cn

文档修订记录

版本	说明
1.0.0	首次发布
1.0.1	校正了图14和25的电容值
1.0.2	添加了表12的注释
1.0.3	修改了第4.2条；更新了第5.4.2条和表10；修改了第5.8条的内容。第6.4条扩展了M8连接器。第7.4条，根据ETG.1000规范修改了硬件错误计数器的名称。

目 录

1	前言和摘要	1
2	参考文献	2
3	术语、定义和词语用法	3
	3.1 术语和定义	3
	3.2 词语用法：要、应该、可以、能够	3
4	EtherCAT 基础知识	4
	4.1 网络配置	4
	4.2 物理介质	4
	4.3 拓扑结构	5
	4.4 链路检测和帧路由	6
	4.5 高速动态数据处理 “On the fly”	8
5	规划	9
	5.1 环境条件	9
	5.2 拓扑定义和设备定位	9
	5.3 信道尺寸	10
	5.3.1 100BASE-TX 链路的信道参数	11
	5.3.2 100BASE-FX 链路的信道参数	16
	5.4 电缆选择	17
	5.4.1 100BASE-TX 链路电缆	18
	5.4.2 100BASE-FX 链路电缆	25
	5.5 连接器选择	25
	5.6 电缆隔离	26
	5.7 接地	28
	5.7.1 等电位接地	28
	5.7.2 星型接地	28
	5.8 基础设施组件的选择	30
	5.9 EtherCAT 从站设备的选择	32
	5.10 规划阶段的其他任务	32
6	安装	34
	6.1 安装的一般程序	34
	6.2 电磁防护	34
	6.3 机械保护	39
	6.4 连接器安装	44
	6.4.1 RJ45 连接器的安装	44
	6.4.2 M12和M8连接器的安装	46
7	调试	51
	7.1 肉眼检查	51
	7.2 信道物理参数测量	52
	7.2.1 电缆测试	52
	7.2.2 功能测试	53
	7.2.3 验收测试	54
	7.2.4 信道测量检查表	56
	7.3 接地系统的测量	56
	7.4 EtherCAT 特定诊断	57

7.4.1	丢失链路计数器	57
7.4.2	物理层错误计数器.....	58
7.4.3	帧错误计数器	59
8	总结	60

表 格

表 1: 铜信道参数	11
表 2: 100m长D级信道的参考参数	13
表 3: 光纤信道的参考参数	16
表 4: 永久链路固定电缆的参考参数	18
表 5: 永久链路柔性电缆的参考参数	19
表 6: 用于永久链路的电缆示例	20
表 7: 电缆屏蔽编码示例	22
表 8: 导线直径和AWG编码之间的对应关系	24
表 9: 光纤电缆的参考参数	25
表10: 铜缆的标准连接器	26
表11: 光纤电缆的标准连接器	26
表12: 通信电缆和电力电缆之间最小距离参考值	27
表13: 接地线横截面与长度的关系	30
表14: 规划阶段可能的额外任务	33
表15: ISO 61918和TIA-568-C的线缆颜色对应关系	48
表16: 网络肉眼检查表	51
表17: 信道测量检查表	56
表18: 接地系统检查表	57
表19: 丢失链路计数器寄存器	58
表20: 物理层错误计数器寄存器	58
表21: 帧错误计数器寄存器	59

图 例

图 1: EtherCAT网络上的从站数量	4
图 2: EtherCAT物理介质	5
图 3: EtherCAT拓扑结构	5
图 4: ESC内部端口结构	6
图 5: 物理链路建立	7
图 6: 端口状态和物理链路	7
图 7: EtherCAT帧路由	8
图 8: ESC中的“on the fly”（高速动态数据处理）	8
图 9: 信道和端到端链路结构	10
图10: 几种可能的信道架构	12
图11: IL和NEXT参数的物理含义	14
图12: 计算连接数量	15
图13: 固定电缆和柔性电缆之间的区别	19
图14: 未在设备中使用对线的正确端接	21
图15: 推荐和不推荐的屏蔽配置	23
图16: 通信电缆和电力电缆之间的最小距离	27
图17: 采用了金属隔离导管后的最小距离	27
图18: 等电位接地方案	28

图19: 星形接地方案.....	29
图20: 有源基础设施组件的运行	31
图21: 在有源基础设施组件中集成ESC	32
图22: 通信电缆和电力电缆之间的交叉	34
图23: 避免通信电缆中出现线圈	34
图24: 设备内的屏蔽接地连接选项	35
图25: 设备内的内部RC连接接地	35
图26: 设备内屏蔽接地的测量	36
图27: 通过电缆夹将电缆屏蔽层外部接地.....	37
图28: 电缆夹的正确尺寸和错误尺寸	37
图29: 接地点正确和错误的屏蔽处理	38
图30: 电缆屏蔽层通过金属箔进行外部接地	38
图31: 隔板直通连接器的正确接地.....	39
图32: 保持通信电缆的最小弯曲半径	40
图33: 通信电缆路径上的边缘保护.....	40
图34: 作用在通信电缆上的张力	41
图35: 保护通信电缆免受张力影响.....	41
图36: 应力消除组件的正确尺寸和错误尺寸	42
图37: 作用在通信电缆上的扭转力.....	42
图38: 保护通信电缆免受挤压	43
图39: 根据ISO/IEC 61918规范, 四芯电缆的连接器引脚分配	44
图40: TIA-568-C定义 RJ45连接器布线方案	48
图41: RJ45连接器安装不良	49
图42: 电缆屏蔽层与连接器外壳的正确连接和错误连接	50
图43: 使用万用表设备进行简单的电缆验证	53
图44: 使用功能测试仪设备进行电缆鉴定.....	54
图45: 使用验收测试仪进行电缆认证	54
图46: 基础设施组件的参数测量	55

缩 写

μC	微处理器
ACR	衰减串音比
ANSI	美国国家标准学会
AWG	美国线规
BN	棕色
BU	蓝色
CP	通信行规
CRC	循环冗余校验
DPRAM	双端口存储器
EM	电磁
EN	欧洲标准
ESC	EtherCAT从站控制器
ETG	EtherCAT技术协会
GN	绿色
IEC	国际电工委员会
IL	插入损耗
ISO	国际标准化组织
LLF	链接丢失转发
LVDS	低压差分信号
MAC	媒体存取控制器
NEXT	近端串扰
NIC	网络接口卡
OG	橙色
PHY	物理层芯片
RJ45	RJ45
RL	回波损耗
SC	用户连接器
TIA	电信行业协会
TP	双绞线
TQ	四芯双绞线
WH	白色
YE	黄色

1 前言和摘要

与传统现场总线相比，所选通信技术仅需无源布线基础设施，且具有若干优势，并在大量商业和工业实施中得到了现场验证。推荐的布线将信噪比提升了一个数量级。

以太网点对点的传输技术以及屏蔽电缆的使用可以获得更好的抗电磁噪声能力。这些措施可隔离特定链路上的错误，并使接收方更好地适应发送方。永久链路监控有助于在运行时无延迟地检测错误组件。

EtherCAT组件具有链路激活指示灯。因此，即使不使用特定工具，也可以快速确定接线中的问题。主站设备可以使用 EtherCAT从站设备中内置的错误计数器，并对任何偏离正常运行的情况作出快速响应。

因此，一般不需要昂贵的电缆诊断或复杂的测试程序。但某些措施有助于避免因配置错误、电缆安装错误和关键环境条件引发的问题。

本文档中收集的信息旨在指导您在电缆安装方面提升特定自动化系统可靠性且避免过多的额外工作。

内容分为四个主要部分，每部分都有特定的范畴：

- EtherCAT基础知识：简要介绍相关的技术特性，有助于了解EtherCAT网络。
- 规划：旨在支持工程师规划基于EtherCAT技术的工业通信网络，具体参考国际标准。
- 安装：旨在支持技术人员根据之前的规划实现EtherCAT通信网络。
- 调试：旨在支持技术人员和终端用户检查安装的正确性，或监控基于EtherCAT技术的工业通信网络的运行。

本文档不是规范，也不能代替其他ETG文件。它旨在提供有关EtherCAT网络安装的实用信息，并补充ETG规范文件。

本文档并未完全描述EtherCAT技术。它描述了可能影响网络实施或性能的问题。关于EtherCAT技术的完整信息，请参阅EtherCAT技术协会提供的与EtherCAT标准相关的规范和文档。

2 参考文献

下列参考文件对于本文档的应用是必不可少的。对于注明日期的参考文献，仅引用的版本适用。凡是未注明日期的参考文献，其最新版本（包括任何修订版）适用。

ETG标准

- [1] ETG.1000.2: 物理层服务定义和协议规范
- [2] ETG.1000.3: 数据链路层服务定义
- [3] ETG.1000.4: 数据链路层协议规范
- [4] ETG.1000.5: 应用层服务定义
- [5] ETG.1000.6: 应用层协议规范

其他参考文献

- [6] ISO/IEC 61918: 工业通信网络-工业场所通信网络的安装
- [7] ISO/IEC 61784-5-12: 工业通信网络 - 配置文件 - 第5-12部分：现场总线的安装 - CPF 12的安装配置文件
- [8] ISO/IEC 11801: 信息技术-用户基础设施结构化布线
- [9] IEC 61076-2-101: 电子设备连接器. 产品需求. 第2-101部分：圆形连接器. 带螺钉锁紧的 M12连接器的详细规范
- [10] IEC 61754-4: 光纤互连器件和无源元件-光纤连接器接口-第4部分：SC型连接器系列
- [11] IEC 61754-24: 光纤互连器件和无源元件-光纤连接器接口-第24部分：SC-RJ型连接器系列
- [12] IEC 60603-7-3: 电子设备连接器-第7-3部分：数据传输频率100MHz及以下的8路屏蔽、自由和固定连接器的详细规范
- [13] EN 50174-2: 布线安装-第2部分：建筑物内的安装计划和实践
- [14] EN50288-2-1: 用于模拟和数字通信和控制的多元件金属电缆-第2-1部分：100MHz及以下屏蔽电缆的分规范-水平电缆和建筑物骨干电缆
- [15] EN50288-2-2: 用于模拟和数字通信和控制的多元件金属电缆-第2-2部分：100MHz及以下屏蔽电缆的分规范-工作区和跳线电缆
- [16] EN60793-2-10: 光纤-第2-10部分：产品规范-A1类多模光纤分规范
- [17] EN60793-2-50: 光纤-第2-50部分：产品规范-B类单模光纤分规范
- [18] ANSI/TIA-568-C: 商业楼宇通用电信布线

3 术语、定义和词语用法

3.1 术语和定义

文中的术语和定义，除非另有规定，否则ETG.1000系列规范完全有效。

3.2 词语用法：要、应该、可以、能够

“要”一词用于表示严格遵守的强制性要求，以符合标准，且不允许偏离（等同于要求）。

“应该”一词用于表示在几种可能性中，推荐一种特别合适，而不提及或排除其他可能性；或者优先选择某种方案，但不一定需要；或者（以否定的形式）某一方案被否决但并非禁止（等同于建议）。

“可以”一词用于表示在标准限制范围内允许的行为（等同于“允许”）。

“能够”一词用于描述可能性和能力，无论是物质的、物理的还是因果关系的（等同于“能够”）。

4 EtherCAT 基础知识

4.1 网络配置

EtherCAT网络由一个主站设备和一个或多个从站设备组成。

- 在主站端，标准网络适配器适用于硬件层
- 在从站端，低电平，时序要求严格的功能在名为EtherCAT从站控制器（ESC）的专用硬件组件中实现

从站设备通过16位地址字段寻址，因此连接到EtherCAT网络的从站设备数量理论上可以达到65535个（图1）。



图 1: EtherCAT 网络上的从站数量

4.2 物理介质

EtherCAT支持两种不同的物理介质：

- 100BASE-TX, 100 Mbit/s 铜缆全双工传输（最远100米）
- 100BASE-FX, 100 Mbit/s 全双工光纤传输（最远几公里）

根据ANSI/TIA/EIA-644用于100 Mbit/s的标准，某些ESC还支持基于LVDS的物理介质，在非常短的背板连接上进行全双工传输（例如在模块化I/O系统中）。

网络内物理介质的更改次数没有限制（如图2所示）。

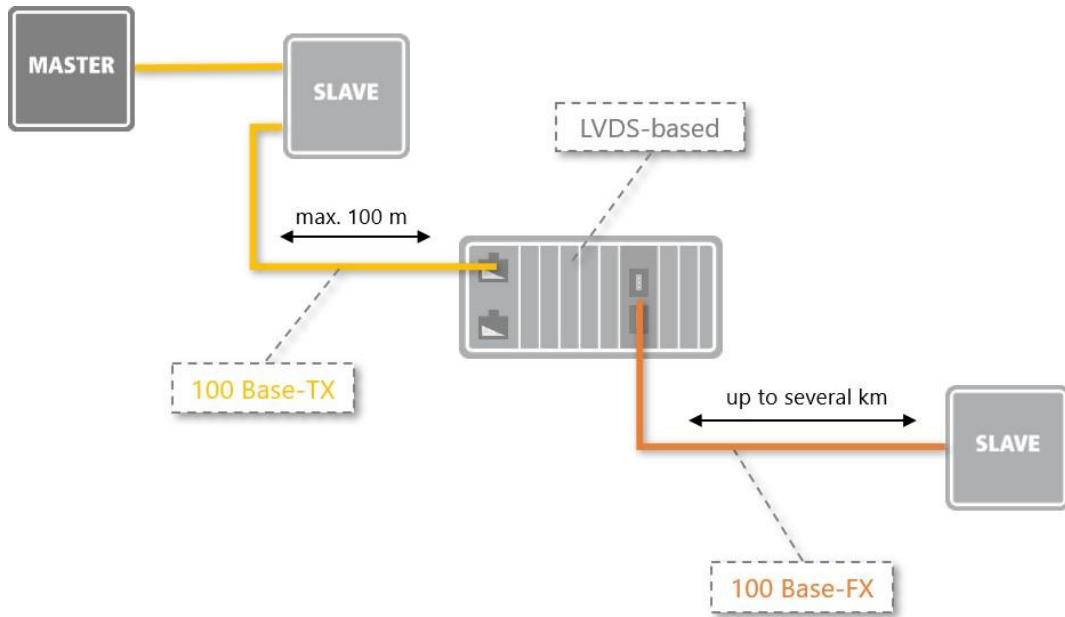


图 2: EtherCAT 物理介质

4.3 拓扑结构

EtherCAT 允许实施多种拓扑类型，如线型、菊花链型、星型或树型（图3）。

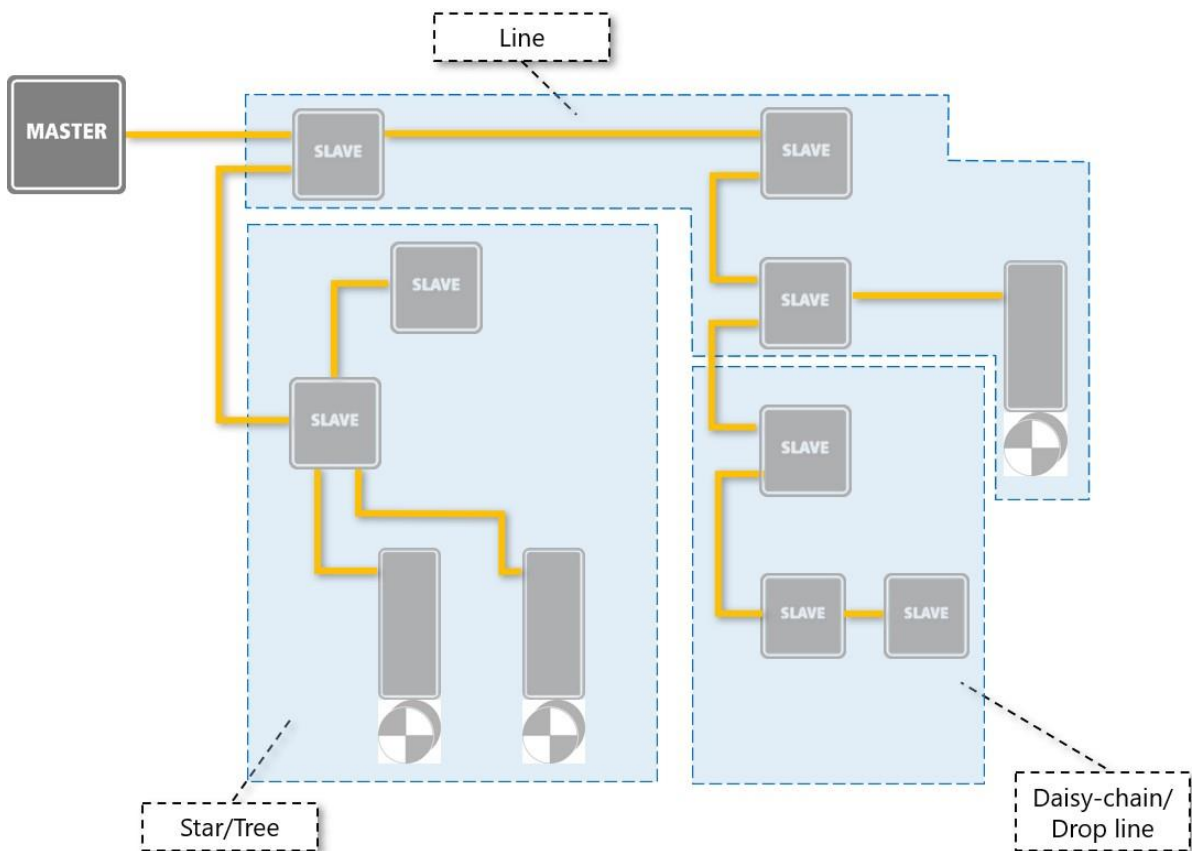


图 3: EtherCAT 拓扑结构

网络性能如同步性、传输和处理延迟或最小周期时间，独立于特定的拓扑方案。

4.4 链路检测和帧路由

ESC内部最多支持四个通信端口，彼此环形连接（如图4所示）：

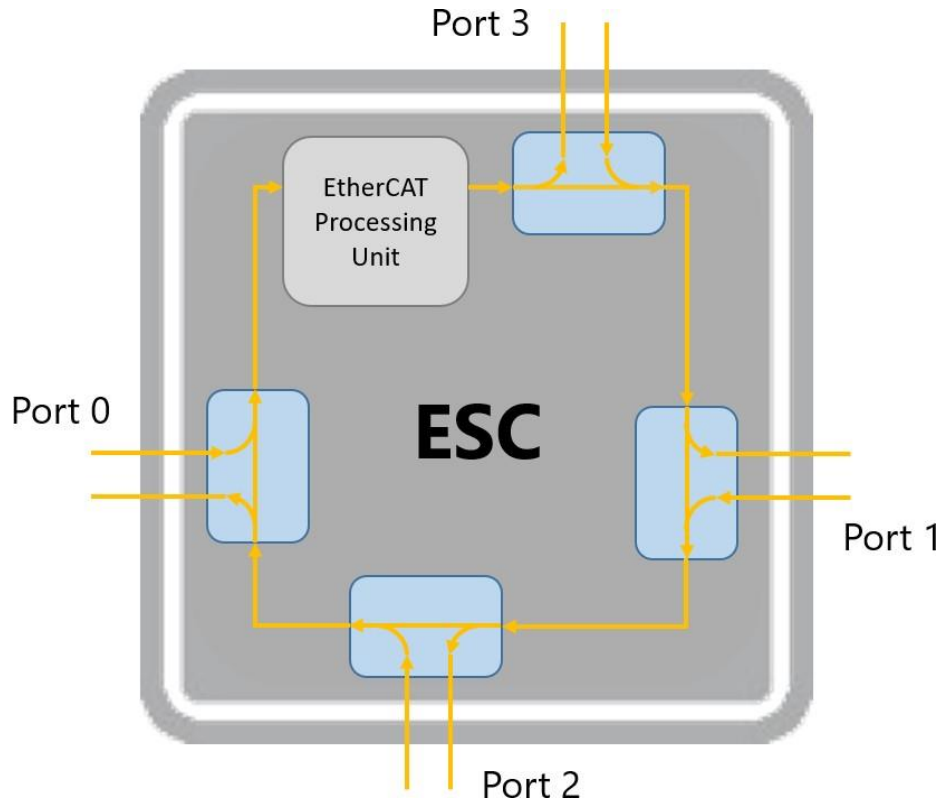


图 4: ESC内部端口结构

开机或复位后，根据从站设备之间的现有连接，如果检测到与另一设备的物理链路，则端口打开，如果没有物理链路，端口保持关闭：因此，从站设备在硬件层自动构建网络拓扑。

当两个设备之间建立物理链路时，尽管可能存在损坏电信号的因素（如衰减、反射、EMC干扰），但这两个设备都能够正确恢复接收到的符号序列（图5）。

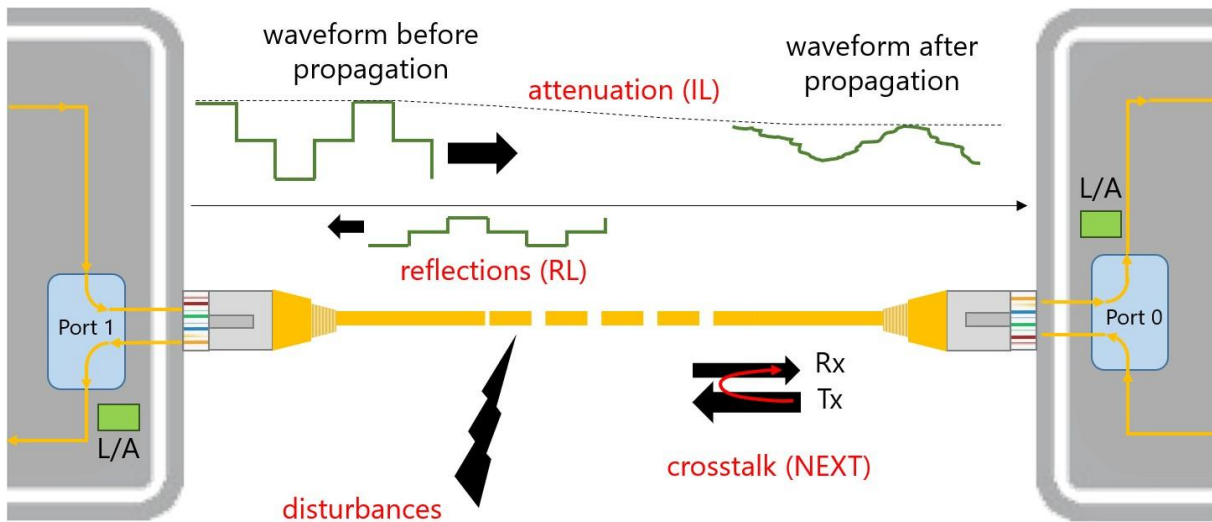


图 5：物理链路建立

所有带有可拆卸连接器的从站端口都必须配备链路/活动（L/A）LED，用于描述物理链路状态：

- L/A LED 熄灭：不存在物理链路
- L/A LED 亮起：存在物理链路，但没有网络流量
- L/A LED 闪烁：存在物理链路，且有网络流量

图6显示了从站设备中硬件连接和链路状态之间关系的两个示例。

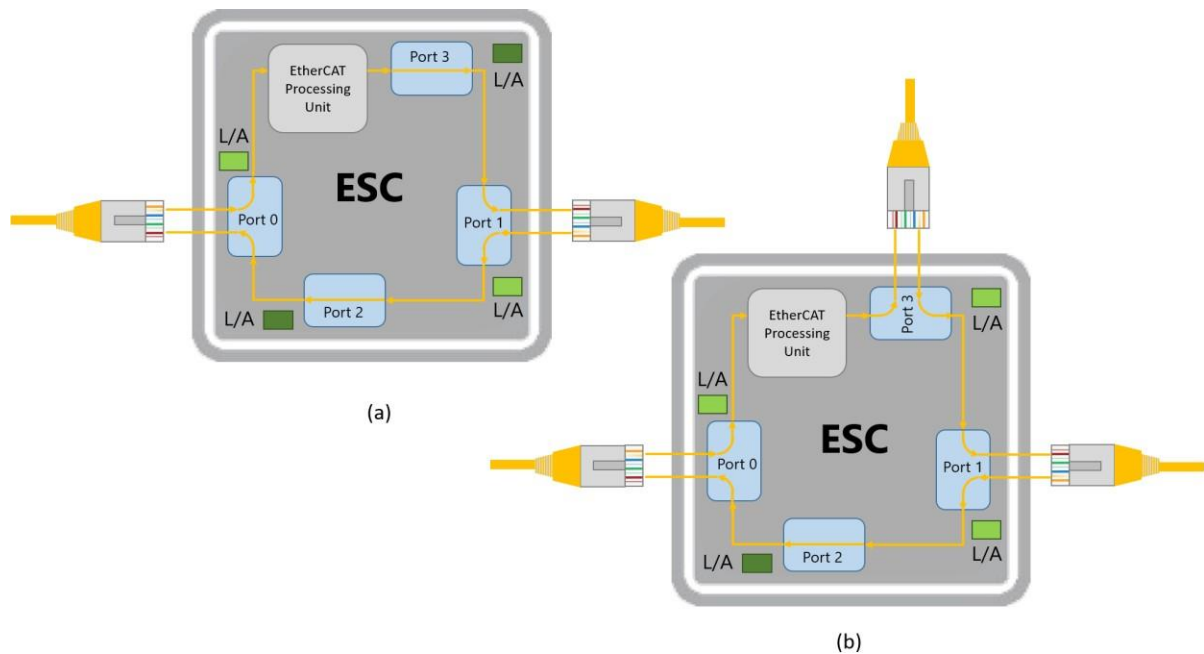


图 6：端口状态和物理链路

ESC的内部架构确保了网络独立于特定的拓扑类型，且始终按照逻辑环路原则运行：主站发送的数据帧按照预定义顺序从从站路由到从站（仅由端口之间的硬件连接决定，无需任何软件寻址机制），然后返回主站，如图7所示。

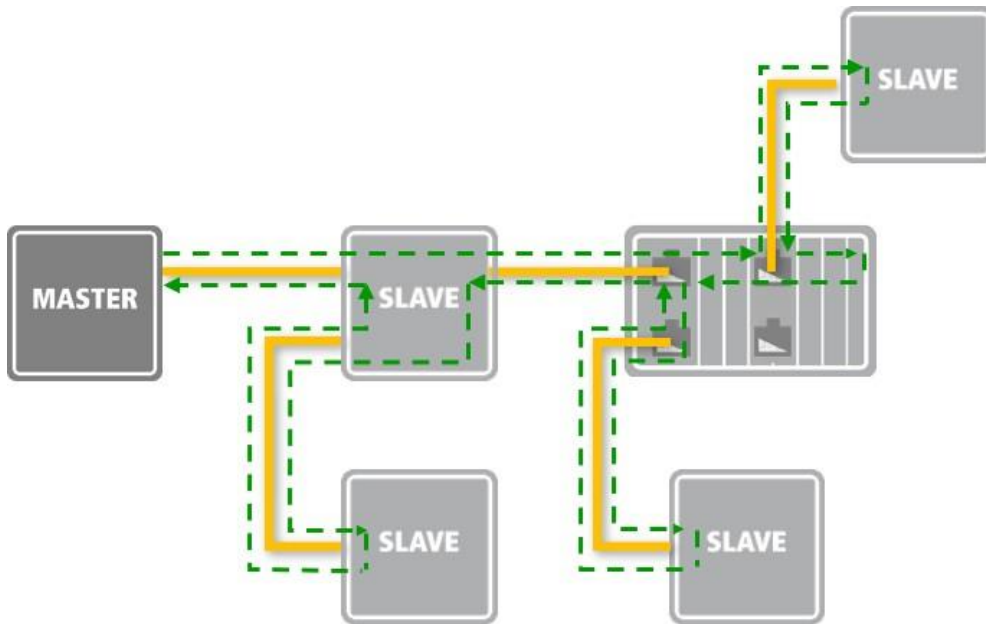


图 7: EtherCAT 帧路由

4.5 高速动态数据处理 “On the fly”

当通过ESC传输时，数据帧被“on the fly（高速动态）”处理：单个位或整个字节序列由EtherCAT处理单元动态提取并插入到数据帧中，而无需存储和处理整个数据帧（如图8所示）。因此，网络上的硬件传输延迟不受软件堆栈处理时间的影响。每个ESC内两个方向上传输延迟总和的参考数据为：

- ~ 1 μ s, 用于支持至少一个100BASE-TX或100BASE-FX端口的从站
- ~ 300 ns, 用于仅支持LVDS端口的从站

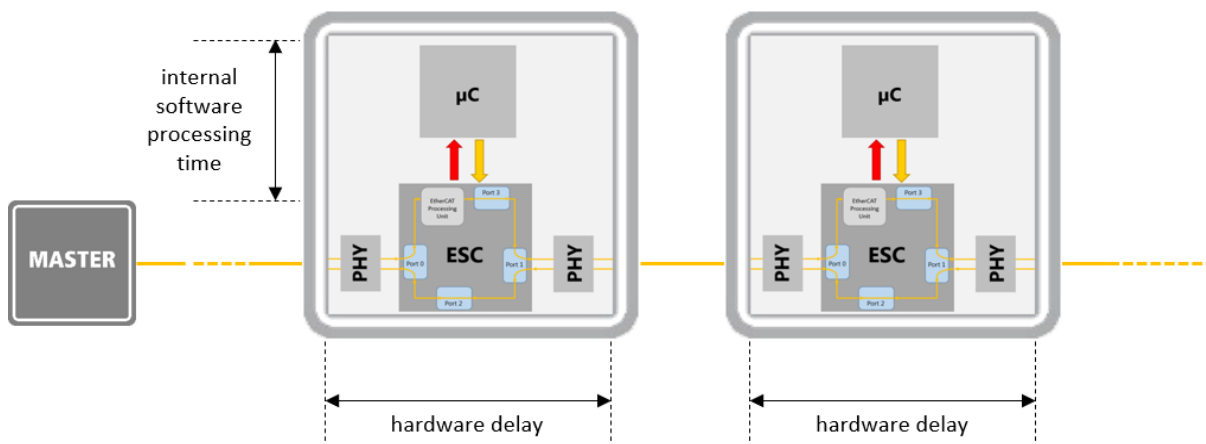


图 8: ESC中的“on the fly”（高速动态数据处理）

5 规划

应提前定义机器或工厂内通信基础设施的规划范围，所有建议的实施用于保证设备在任何运行情况下正确的数据传输。规划阶段的结果应该是设备之间所有连接的列表。对于每个连接，应报告所有相关信息，如所需的电缆布线、关键布线以及确保通信质量所需的一系列措施。在规划阶段，还可以额外输出组件列表、检查表和测试计划。

5.1 环境条件

为了规划通信基础设施，需要准确了解机器或工厂的环境条件。包括：

- 布线布局、长度、弯曲度和电缆类型
- 传输路径中的连接器、媒体转换器和基础设施组件
- 电磁条件，由电力电缆、电机、电力电子设备、光源、射频发射机的存在决定
- 机械约束，如运动部件、旋转部件、张力、振动、冲击
- 最高和最低工作温度值
- 化学环境，如存在的水、灰尘或腐蚀剂

对某些环境条件进行分类可能很有用，例如借助IEC 61918标准中描述的MICE（机械、入口、气候和电磁）模型。在整个规划过程中，应牢记这些环境条件，因为它们将影响组件选择以及电缆布线，或采取措施以确保传输质量。

根据具体环境条件，在规划阶段可以采取的具体措施如下：

- 检查电缆走线的总长度
- 识别关键的EM环境，并相应地规划充分的保护
- 根据环境条件检查所有组件（包括电缆）所允许的温度范围
- 为设备选择适当的IP保护级别
- 为连接器选择适当的IP保护级别
- 系统中使用合格的电缆，防灰尘、污垢和液体
- 检查针对危险液体的适当的防护措施
- 避免电缆机械应力超出最大容许值，并相应规划适当的保护措施
- 尽可能吸收振动
- 室外应用时，考虑使用防紫外线电缆或防护罩
- 如果存在地下走线或移动部件，请考虑使用专门设计的电缆

5.2 拓扑定义和设备定位

如第4.3条所述，EtherCAT网络的性能不受所采用的特定网络拓扑的影响。

例如，在线型或菊花链型拓扑中可以级联的设备数量没有限制。关于线型或菊花链型拓扑唯一需要注意的是，如果一个设备断电或与网络断开连接，并且不支持电缆冗余，那么数据帧将无法到达下游设备：如果应用程序要求从站或从站组断电，或独立于网络的其余部分断开连接，则应首选星型拓扑。

因此，网络拓扑应进行独特规划，以尽量减少通信电缆的长度，并与确保无差错通信所需的要求兼容（如与EM噪声源保持适当距离，或保护电缆免受机械或化学试剂的损坏）。

设备定位和调试应始终根据设备制造商提供的具体信息和安装规则，并根据第5.1条所述的具体环境条件进行。

5.3 信道尺寸

除环境条件外，设备之间硬件连接的性能还可能受到以下因素的影响：

- 电缆质量（衰减、导线数量、串扰、屏蔽）
- 连接器质量（正确的引脚分配，与电缆屏蔽的正确连接）
- 中间连接（中间转换次数、衰减）

如ISO/IEC 11801规范所述，有了结构化布线的概念，这些因素可以在规划阶段进行评估并适当考虑。结构化布线的范围是为两个网络设备之间的硬件连接定义一个标准的、独立于应用程序的模型。根据应支持的最大通信比特率，可以定义多个链路性能等级。每一类都是根据物理链路参数来描述的，并为其定义了最坏情况下的角值，以确保在所有操作条件下无差错数据传输。

ISO/IEC 11801规范中定义的结构化布线模型基于“信道”和“端到端链路”的概念，如图9所示：

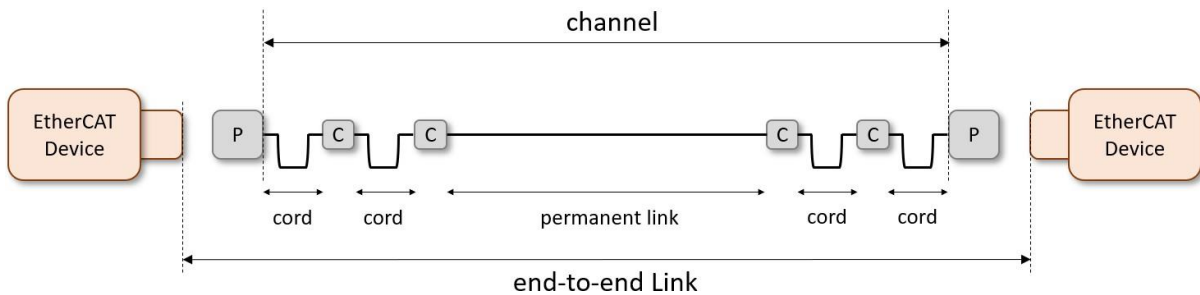


图 9: 信道和端到端链路结构

在此模型中：

- J 是终端设备的插孔
- P 是连接端的插头
- C 中间连接

“端到端链路”概念包括连接端的两个插头（但不是终端设备的插孔），而“信道”概念则不包括这两个插头。

根据信道模型，用于连接两个终端设备的电缆可分为：

- 永久链路，横跨安装于机柜内部或外部，两个终端设备之间的主电缆
- 机柜内短电缆段，通常是在机柜内终端设备和中间连接点（如隔板传输用的电连接器）之间使用的短电缆段

ISO/IEC 61918规范将ISO/IEC 11801中定义的通用信道模型应用于工业通信网络，而ISO/IEC 6.1784-5-12规范则定义了该模型对EtherCAT的要求。

5.3.1 100BASE-TX 链路的信道参数

表 1: 铜信道参数

特性	值
支持的数据速率(Mbit/s)	100
支持的最大信道长度(m)	100
信道中的连接数 (max.)	6
符合ISO/IEC 24702的信道等级 (min.)	D
符合ISO/IEC 24702的电缆类别(min.)	5
符合ISO/IEC 24702的连接硬件类别 (min.)	5

ISO/IEC 11801规范定义了用于精确计算最大信道长度的数学规则，作为中间连接数量和铜电缆物理参数的函数。在EtherCAT网络规划中，可以使用以下简化规则：

- 通信信道的总长度（永久链路和柜内线缆长度的长度总和）不应超过100米。
- 每个信道末端的柜内短电缆总长度不应超过5米，永久链路的长度应相应减少（以保证信道的总长度不超过100米）。
- 信道中的最大连接数应为6（含信道两端的连接器）或4（仅含信道中间的连接器）。
- 在任何情况下，信道长度应尽可能短，并与现有环境限制的信道相兼容。

图10显示了信道体系结构的不同示例:

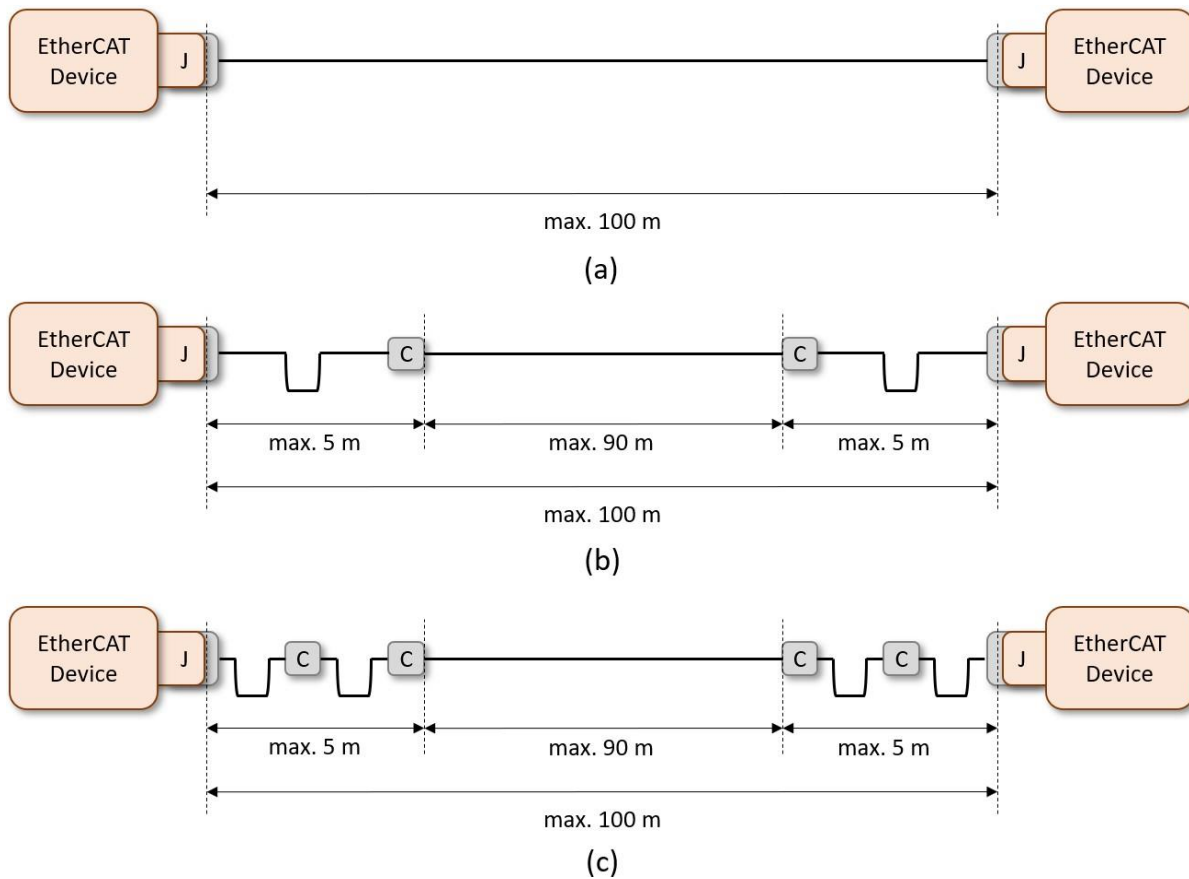


图 10: 几种可能的信道架构

上述尺寸规则是指非苛刻环境条件下的通信信道。如果信道安装在高EM干扰环境中，则应对信道长度做出相应限制。

根据ISO/IEC 61784-5-12规范，如果是100BASE-TX铜质物理介质，EtherCAT需要D级信道（或更高）。ISO/IEC 11801规范定义了硬件参数的最坏情况角值，以确保符合D级信道。表2描述了这些参数中最相关的选项。

表 2: 100m长D级信道的参考参数

参数	释义	永久链路 (@100 MHz)	信道 (@100 MHz)
IL	插入损耗、衰减	20,4 dB	24 dB
NEXT	近端串扰	32,3 dB	30,1 dB
ACR	衰减串音比	11,9 dB	6,1 dB
	传播延迟	0,491 μ s	0,548 μ s
	延迟偏差	0,044 μ s	0,050 μ s

在规划阶段要考虑的最相关的信道参数是插入损耗（IL）、近端串扰（NEXT）和衰减串音比（ACR）。

- 插入损耗是对通信信道引入的信号衰减的测量，单位为dB。IL的绝对值越大，信号在传播过程中丢失的部分越大。例如，IL值为20dB意味着只有10%的传输差分电压到达接收器。反之亦然，IL参数的值越小则表示衰减越小，因此是性能较好的指标。
- 近端串扰是对双绞线上传输的信号可能对相邻线产生的影响的度量，以dB表示。NEXT的绝对值越小，传输信号中出现在相邻线上的感应干扰的部分越大。例如，NEXT的值为32dB意味着在一对双绞线上传输的差分电压的2.5%将被相邻双绞线接收，因此会导致干扰。相反，NEXT参数的值越高表示串扰越小，因此性能越好。
- ACR参数是信道信噪比的测量值，以dB表示，并计算为IL和NEXT的（对数）值之差。例如，ACR的值为6dB意味着在一对双绞线上接收的信号的衰减部分将比在相邻双绞线上以相同振幅传输信号引起的串扰干扰大50%。

值得注意的是，表2中报告的值指的是100MHz的传输频率。由于100BASE-TX数据吞吐量是通过4B/5B MLT3多级编码传输的，硬件信号的实际最大频率为31.25MHz，并且在该工作频率下的参数值大约是在100MHz下规定的参数值的3-5倍。

IL和NEXT参数的物理含义如图11所示：

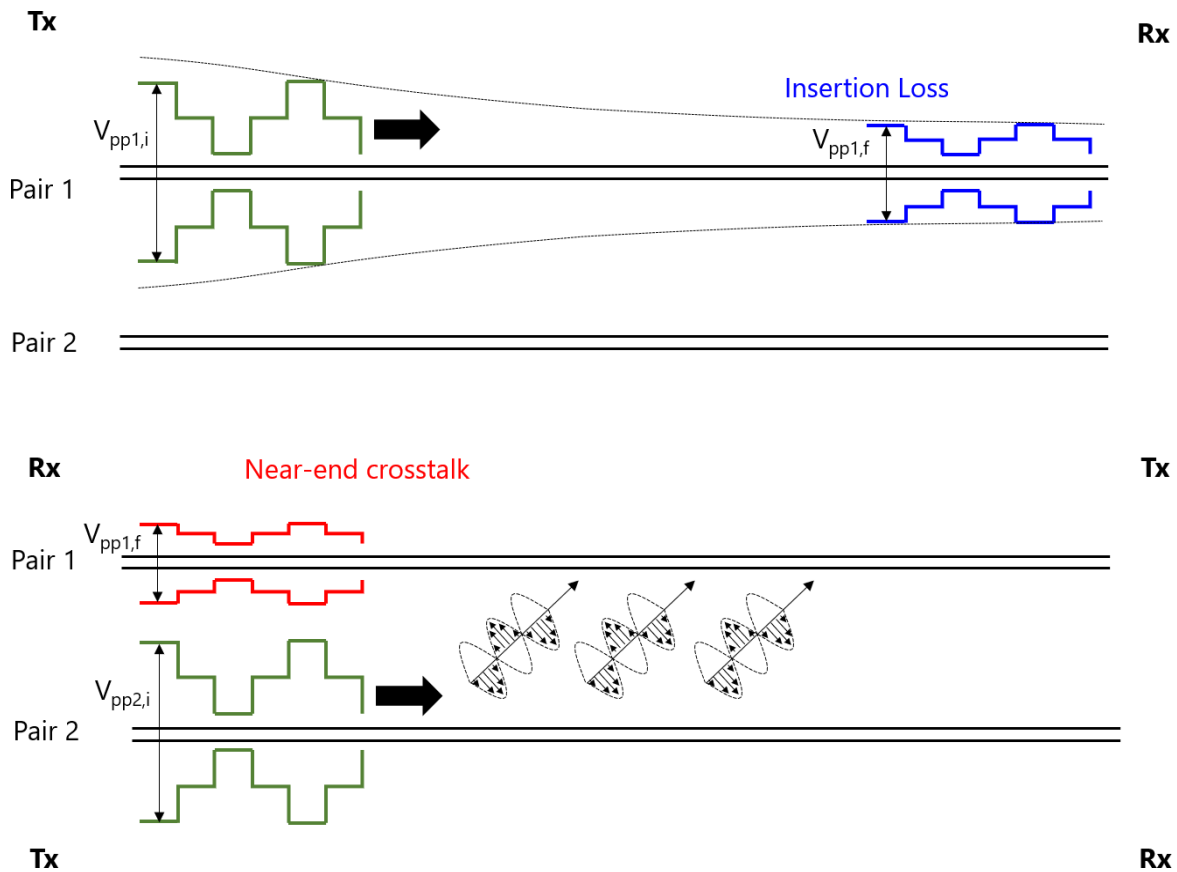


图 11: IL和NEXT参数的物理含义

组件制造商（电缆、连接器……）可以根据ISO/IEC 11801规范认证其产品的特定性能等级。在EtherCAT网络中，必须使用经过D级（或更高）性能认证的组件，但不能保证信道也符合相同的性能等级。通信信道是否符合性能等级D应根据信道中所有部件制造商提供的参数值来确定。如果连接中使用的所有组件的参数值未知，则应按照第7.2条所述，通过适当的测量，明确验证信道性能是否符合D级（或更高）。

每个连接都会在信道中引入额外的衰减和串扰。因此，中间连接的数量应尽可能减少，以符合应用要求，并且在任何情况下都不得超过第5.3.1条所述的最大允许数量。

在确定连接数量时，双耦合器应计为两个独立的连接（如图12所示）：

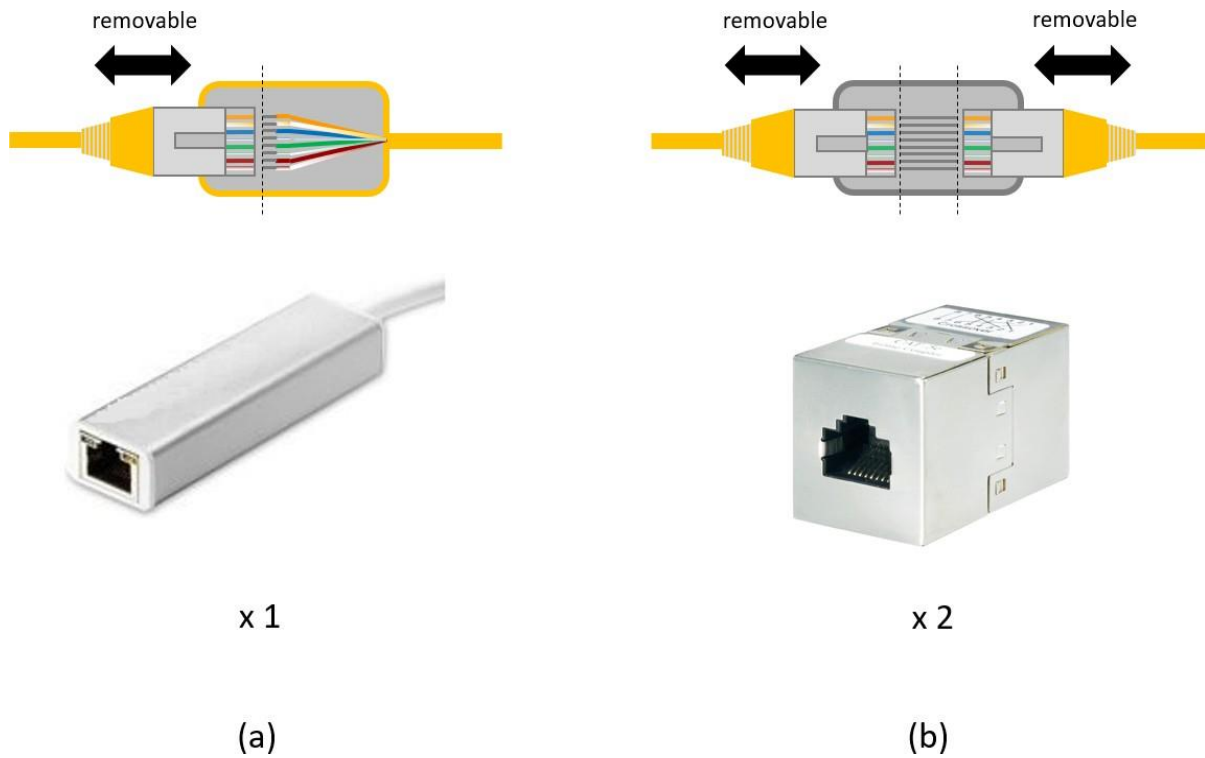


图 12：计算连接数量

我们建议根据ISO/IEC 11801规范中描述的结构化布线模型规划网络连接，但并不是强制性的。不基于结构化布线规则的连接被定义为特定应用的布线：在这种情况下，应按照第7.2条所述，通过适当的测量验证所有操作条件下的信道性能和无差错传输。

5.3.2 100BASE-FX链路的信道参数

表 3: 光纤信道的参考参数

光纤类型	描述	
单模石英	标准	IEC 60793-2-50; Type B1
	标称透射波长 λ	1310 nm
	衰减系数 λ	$\leq 0,5$ dB/km
	截止波长	< 1260 nm
	替代描述	
	模场直径 (μm)	9...10
	包层直径 (μm)	125
	最小长度 (m)	0
	最大长度 (m)	14000
多模石英	标准	IEC 60793-2-10; Type A1a, A1b
	标称透射波长 λ	1310 nm
	衰减系数 λ	$\leq 1,5$ dB/km
	模式带宽 λ	600 MHz x km
	替代描述	
	纤芯直径 (μm)	60 (A1a); 62,5 (A1b)
	包层直径 (μm)	125
	数值孔径	0,20 \pm 0,02 or 0,23 \pm 0,02 at 50/125 0,275 \pm 0,02 at 62,5/125
	最小长度 (m)	0
最大长度 (m)	2000	

光纤类型	描述	
POF	标准	IEC 60793-2-40; Type A4a
	标称透射波长 λ	650 nm
	衰减系数 λ	≤ 160 dB/km
	模式带宽 λ	35 MHz x 100m
	替代描述	
	纤芯直径 (μm)	980
	包层直径 (μm)	1000
	数值孔径	$0,5 \pm 0,05$
	最小长度 (m)	0
	最大长度 (m)	50
塑料包层石英	标准	IEC 60793-2-30; Type A3c
	标称透射波长 λ	650 nm
	衰减系数 λ	≤ 10 dB/km
	模式带宽 λ	70 MHz x km
	替代描述	
	纤芯直径 (μm)	200
	包层直径 (μm)	230
	数值孔径	$0,37 \pm 0,04$
	最小长度 (m)	0
	最大长度 (m)	100

5.4 电缆选择

IEC 61784-5-12规范描述了EtherCAT应用建议的电缆类型，并规定在EtherCAT信道内不应超过的电缆参数的最坏情况的角值。

在规划阶段，电缆选择应始终参考电缆制造商提供的测量参数。

如果设备之间的连接是移动的，应使用柔性电缆，以防止电缆损坏。在这种情况下，应仔细验证诸如最大允许弯曲半径以及最大允许的张力和扭转力等参数是否符合第6.3条所述的应用要求。

如果连接件安装在化学腐蚀性环境中，应使用具有适当特殊涂层的电缆，以防止电缆损坏。

如果应用中存在其他环境限制，应根据电缆制造商提供的具体信息使用专门设计的电缆。

5.4.1 100BASE-TX 链路电缆

对于永久链路，电缆应符合表4和表5中描述的最坏情况的角值：

表 4：永久链路固定电缆的参考参数

特性	A 类电缆（固定）
电缆的标称阻抗（公差）	100 Ω ± 15 Ω (IEC 61156-5)
平衡或非平衡	平衡
直流往返电阻 ^a	≤ 115 Ω/km
导线数量	4 (2 对)
屏蔽	S/FTQ
导线颜色代码	WH, YE, BU, OG
传输阻抗	< 50 mΩ/m at 10 MHz
安装类型	静止、安装后无移动
外电缆直径	6,5 mm ± 0,2 mm
导线横截面	AWG 22/1
线径（无绝缘）	0,64 mm ± 0,1 mm
延迟偏差	≤ 20 ns/100 m

^a 直流往返电阻（也称为直流回路电阻）是通过测量双向电缆的直流电阻来计算的，即连接电缆一侧的两对电线，并测量另一侧相同电线之间的电阻。如果测量一根单线的两个电缆末端之间的电阻，所获得的值约为往返电阻值的一半，因此也应考虑相应的参考值≤57.5Ω/km。

更多信息，请参阅供应商电缆规范。

表 5: 永久链路柔性电缆的参考参数

特性	B 类电缆 (柔性)
电缆的标称阻抗 (公差)	100 Ω ± 15 Ω (IEC 61156-5)
平衡或非平衡	平衡
直流往返电阻 ^a	≤ 115 Ω/km
导线数量	4 (2 对)
屏蔽	S/FTQ
导线颜色代码	WH, YE, BU, OG
传输阻抗	< 50 mΩ/m at 10 MHz
安装类型	灵活、偶尔移动或振动
外电缆直径	6,5 mm ± 0,2 mm
导线横截面	AWG 22/7
线径 (无绝缘)	0,64 mm ± 0,1 mm
延迟偏差	≤ 20 ns/100 m

a 直流往返电阻 (也称为直流回路电阻) 是通过测量双向电缆的直流电阻来计算的, 即连接电缆一侧的两对电线, 并测量另一侧相同电线之间的电阻。如果测量一根单线的两个电缆末端之间的电阻, 所获得的值约为往返电阻值的一半, 因此也应考虑相应的参考值 ≤ 57,5 Ω/km。

更多信息, 请参阅供应商电缆规范。

在固定电缆中, 每根电线都由一根大导线组成, 而在柔性电缆中, 电线由几根截面较小的双绞导线组成 (如图13所示)。

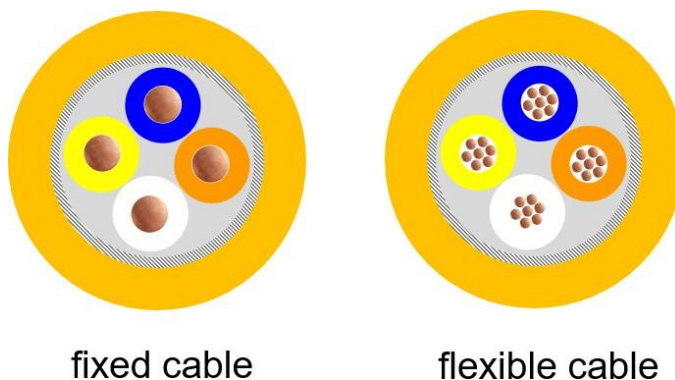


图 13: 固定电缆和柔性电缆之间的区别

所测量的柔性电缆的参数值（例如插入损耗）通常比固定实心电缆差。因此，柔性电缆的使用仅限于在严格需要的场景中，例如设备之间连接相互移动的情况下。否则，应使用固定实心电缆。

表6报告了EtherCAT应用中成功使用的真实电缆的典型参数值：

表 6：用于永久链路的电缆示例

	固定	柔性
类型	AWG22/1	AWG22/7
屏蔽	S/FTQ	S/FTQ
往返电阻	$\leq 115 \Omega/\text{km}$	$\leq 115 \Omega/\text{km}$
插入损耗 (@100MHz)	19,5 dB/100m	21,3 dB/100m
近端串扰 (@100MHz)	50 dB/100m	50 dB/100m

EtherCAT通信仅使用四根线缆，因此建议使用四芯（两对）平衡以太网电缆。

当然也可以使用四对电缆，前提是它们在IL和NEXT方面的性能与四芯电缆相当，并且不超过表4和表5中报告的最坏情况的角值：额外未使用的线对（尤其是如果这些线对未在两端设备中正确端接）实际上会增加相邻线对之间的信号串扰，从而降低电缆性能。

给设备制造商的提示

EtherCAT设备制造商应尽可能不使用75Ω电阻的对线端接，该电阻连接到虚拟接地，如图14所示：

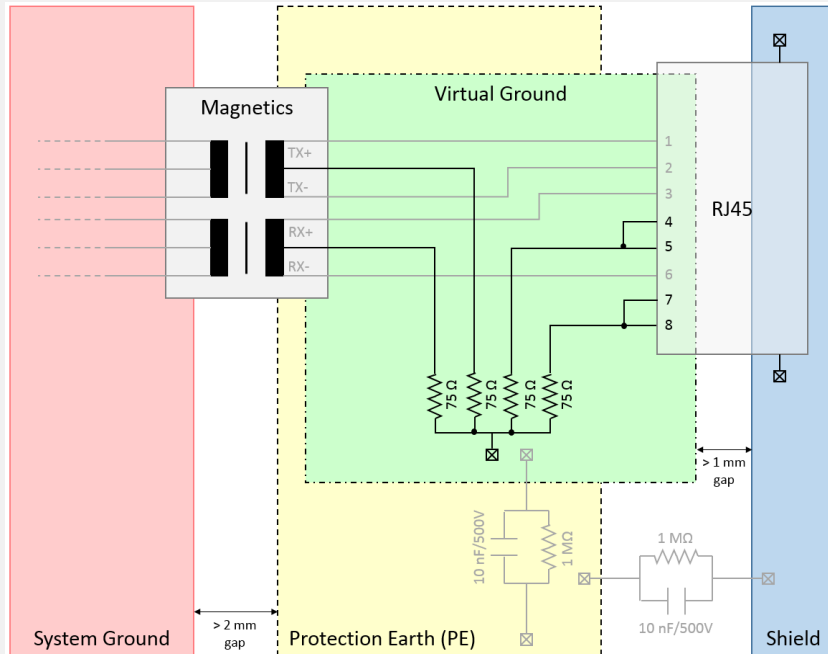


图 14：未在设备中使用对线的正确端接

对于四芯双绞线，建议使用TIA-568-C规范中定义的T568B连接器引脚分配，采用直连电缆结构。然而，所有从站硬件接口都强制支持自动交叉功能，因此，在电缆两端对应于T568A引脚分配的直连电缆以及交叉电缆也可以在EtherCAT网络中使用。

还有一个例外是支持快速热连接技术的从站。在这种情况下，为了减少建立连接所需的时间，硬件接口参数（如传输速率、双工模式和直/交叉连接）是预设的，不会协商（IN端口使用MDI设置，OUT端口MDI-X）。因此，必须将直连电缆和快速热连接技术结合使用。

EtherCAT建议至少使用外部屏蔽电缆，用于永久连接和跳线（如图15所示）。

外部电缆屏蔽应首选绞合解决方案，因为它具有更高的机械稳定性。当使用外部箔屏蔽电缆时，应特别注意屏蔽层不要损坏或破裂。

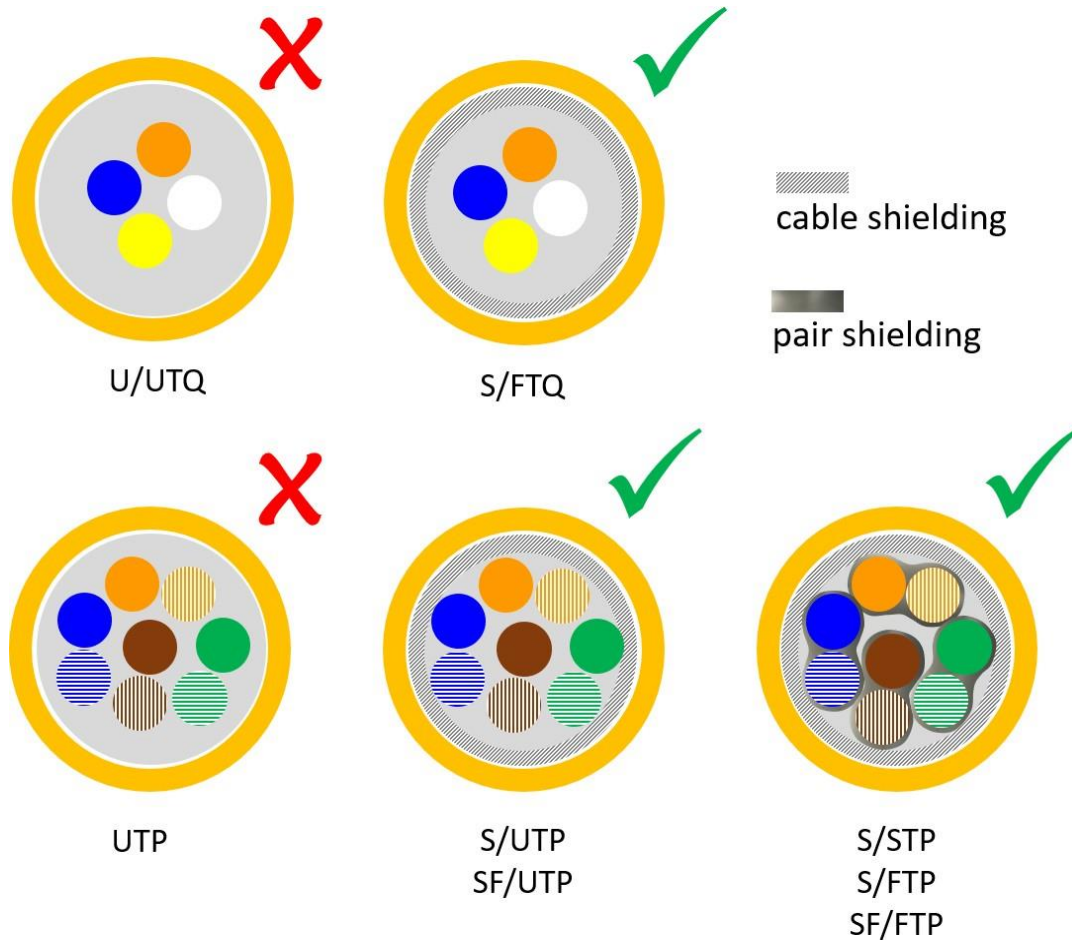


图 15: 推荐和不推荐的屏蔽配置

关于电缆直径，美国线规（AWG）标准定义了以下编码规则：

AWGx/y

其中：

x = AWG 类别（随着导线直径的减小而增加）

y = 构成导线的线缆数量

表8报告了一些AWG编码示例。

表 8: 导线直径和AWG编码之间的对应关系

AWG 编码	线缆结构
AWG 20	
AWG20/1	粗的
AWG20/7	7x0.320 mm
AWG20/10	10x0.254 mm
AWG 22	
AWG22/1	粗的
AWG22/7	7x0.254 mm
AWG22/19	19x0.160 mm
AWG 24	
AWG24/1	粗的
AWG24/7	7x0.203 mm
AWG24/10	10x0.160 mm
AWG26	
AWG26/1	粗的
AWG26/7	7x0.160 mm
AWG26/10	10x0.127 mm

AWG编码编号越小，导线的直径越大，因此给定电缆长度的信号衰减越小。

对于永久链路，强烈建议使用AWG22或更大直径的电缆（即AWG编码编号更小）。直径较小的电缆（如AWG24或AWG26）不应用于机柜外部的长连接。

对于机柜内的短连接，可以使用直径较小的跳线，如AWG24或AWG26。直径较小的电缆具有更高的电阻值和更高的信号衰减。在规划阶段，对于导线直径小于AWG22的电缆，无论是电缆制造商提供的还是按照第7.2条所述直接测量的，都应仔细评估其硬件参数。因为由于衰减值较高，这些参数可能会将总信道长度限制在明显短于100 m的距离内。

5.4.2 100BASE-FX 链路电缆

表 9: 光纤电缆的参考参数

	9..10/125 μm 单模石英	50/125 μm 多模石英	62,5/125 μm 多模石英	980/1000 μm	200/230 μm
每公里衰减 (650 nm)	-	-	-	≤ 160 dB/km	≤ 10 dB/km
每公里衰减 (820 nm)	-	-	-	-	-
每公里衰减 (1300 nm)	$\leq 0,5$ dB/km	$\leq 1,5$ dB/km	$\leq 1,5$ dB/km	-	-
	2	2	2	2	2
连接器类型 (双工或单工)					
外护套颜色要求	-				
外护套材质	-				
抗恶劣环境 (如, 紫外线, 抗油剂, LS0H)	取决于应用				
分支					

5.5 连接器选择

IEC 61784-5-12规范定义了为EtherCAT应用指定的标准连接器类型（见表10和表11）。以下文件进一步规定了IEC 61784-5-12中指定的EtherCAT连接器类型：

- IEC 60603-7-3, 用于RJ45屏蔽连接器（铜缆）
- IEC 61076-2-101, IEC 61076-2-109 和 IEC 61076-3-117, 用于 M12连接器（铜缆）
- IEC 61076-2-104 用于M8屏蔽连接器（铜缆）
- IEC 61076-2-114 用于带P编码的M8连接器（铜缆, 仅用于EtherCAT P）
- IEC 61754-4, 连接器（光纤）
- IEC 61754-24, 用于SC-RJ连接器（光纤）

在规划阶段, 应始终参考连接器制造商提供的测量结构参数进行连接器选择。

连接器的选择应考虑应用的特定机械约束, 以防止电缆和连接器本身的永久性损坏。

如果连接件安装在化学腐蚀性环境中，应使用合适的专用连接器，以防止损坏电缆和连接器本身。

表 10：铜缆的标准连接器

IEC 60603-7-3 ^a	RJ45（屏蔽）	a 对于IEC 60603-7-x，连接器部分基于信道性能。
IEC 61076-3-117 ^b	RJ45（屏蔽）	
IEC 61076-2-101	带D编码的M12-4	b 带推拉联轴器的矩形保护外壳。
IEC 61076-2-109	带X编码的M12-8	
IEC 61076-2-104	带A编码的M8-4（屏蔽）	
IEC 61076-2-114 ^c	带P编码的M8-4	c 仅与EtherCAT P结合使用。

表 11：光纤电缆的标准连接器

IEC 61754-4	SC	IEC 61754系列定义了光纤连接器的机械接口；IEC 61753系列标准化了端接至特定光纤类型的光纤连接器的性能规范。
IEC 61754-24	SC-RJ	

当使用IEC 61784-5-12中未规定的连接器类型时，必须通过如第7.2.3条所述的电气测量，确保在所有操作条件下性能等级符合D级（或更高）。

此外，设备制造商应随设备提供从非标准连接器格式到IEC 61784-5-12标准格式的适配器。对于EtherCAT P接口，则不允许使用适配器。

5.6 电缆隔离

为了防止EM干扰破坏信号而影响通信性能，网络规划应始终确保通信电缆与其他电缆类型的适当隔离，尤其是电源线或电机连接等电力电缆（如图16所示）。

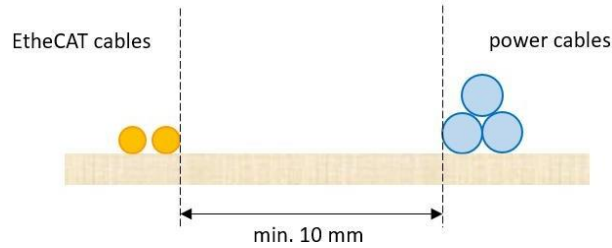


图 16: 通信电缆和电力电缆之间的最小距离

为了提高抗EM干扰度并减少与电源线的最小距离，EtherCAT电缆可以通过金属外壳或导管布线，如图17所示。

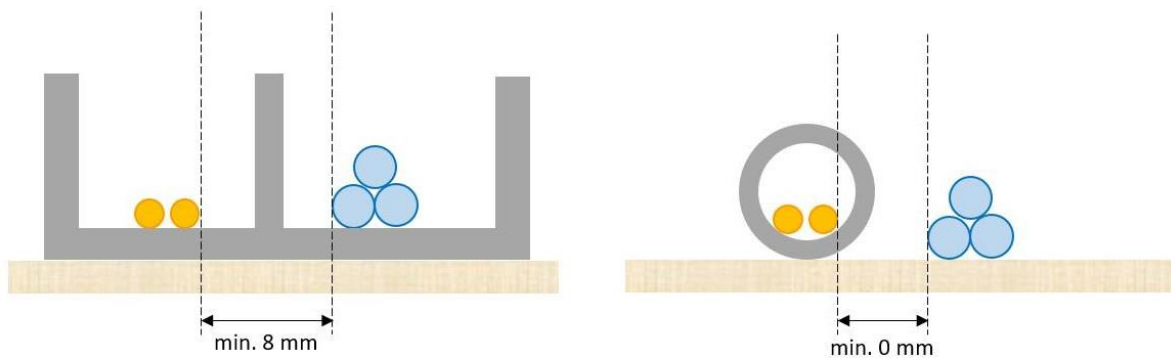


图 17: 采用了金属隔离导管后的最小距离

建议的铜缆（参数值见第5.4.1条）符合参考文献[13]中表3中所述的D级隔离。表12报告了EtherCAT屏蔽电缆和电力电缆之间的最小距离，根据参考文献[13]中的表3，有几种可能的金属隔离类型。

表 12: 通信电缆和电力电缆之间最小距离参考值

隔离类型	最小距离 ^{a, b}
无金属隔离	10 mm
开放式金属电缆导管	8 mm
穿孔金属板导管	5 mm
大型电缆导管	0 mm

a 最小距离值适用于高达300 A和230 V的电力电缆内的总电流值。对于更高的电流值，应根据参考文献 [13] 中的表5考虑降额因数。

b 如果铜缆不符合第 5.3.1 条中建议的参数值，根据参考文献 [13] 中的表3，可以采用更高的间隔距离。

5.7 接地

为了提升对EM干扰和噪声的最高抗扰度，机器或工厂内的所有电子部件和底架外壳或金属信道应通过适当的接地连接保持在同一参考电位。

根据ISO/IEC 61918规范，在工业环境中有两种有效的接地方案：等电位接地和星形接地。

5.7.1 等电位接地

在等电位接地中，设备底架和路径尽可能连接到建筑金属结构，建筑金属结构又连接到功能接地（如图18）。这就形成了一个网格，为所有EtherCAT设备和基础设施组件提供了同一参考电位。

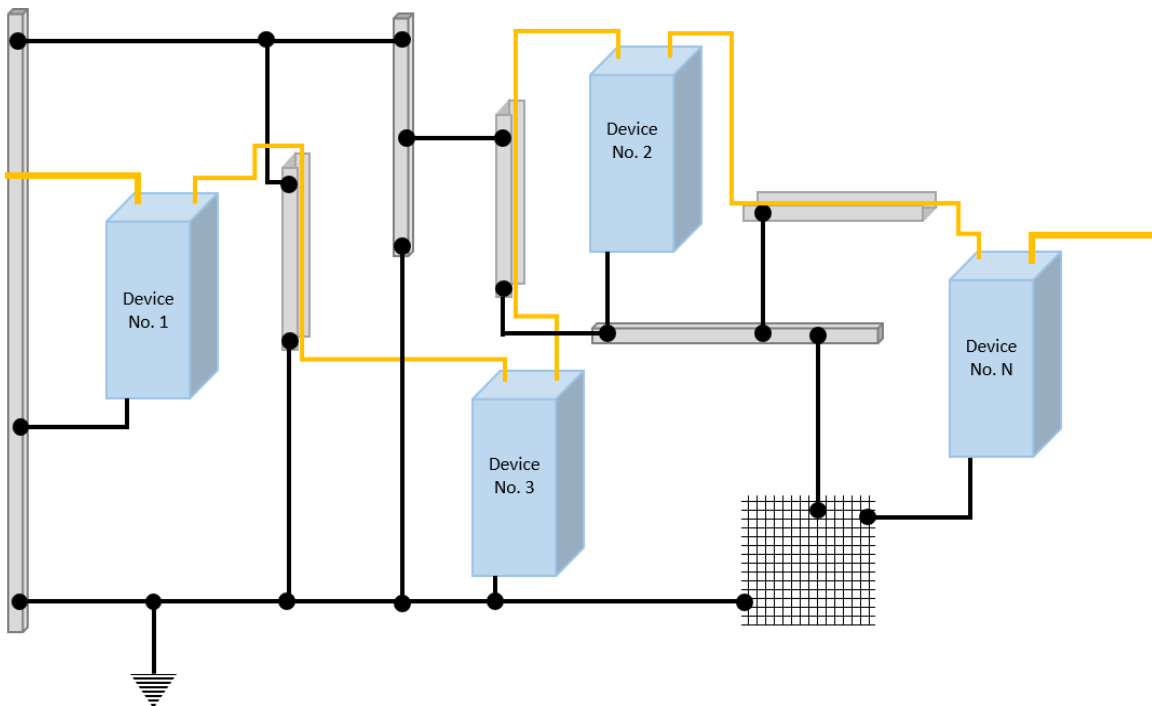


图 18：等电位接地方案

5.7.2 星形接地

如果应用中产生中等或高电流，接地路径将形成电流回路，进而确定网络设备之间的电位差。在这种情况下，星形连接到单点，然后再连接到功能接地，这可能是一种更有效的接地解决方案（如图19）。

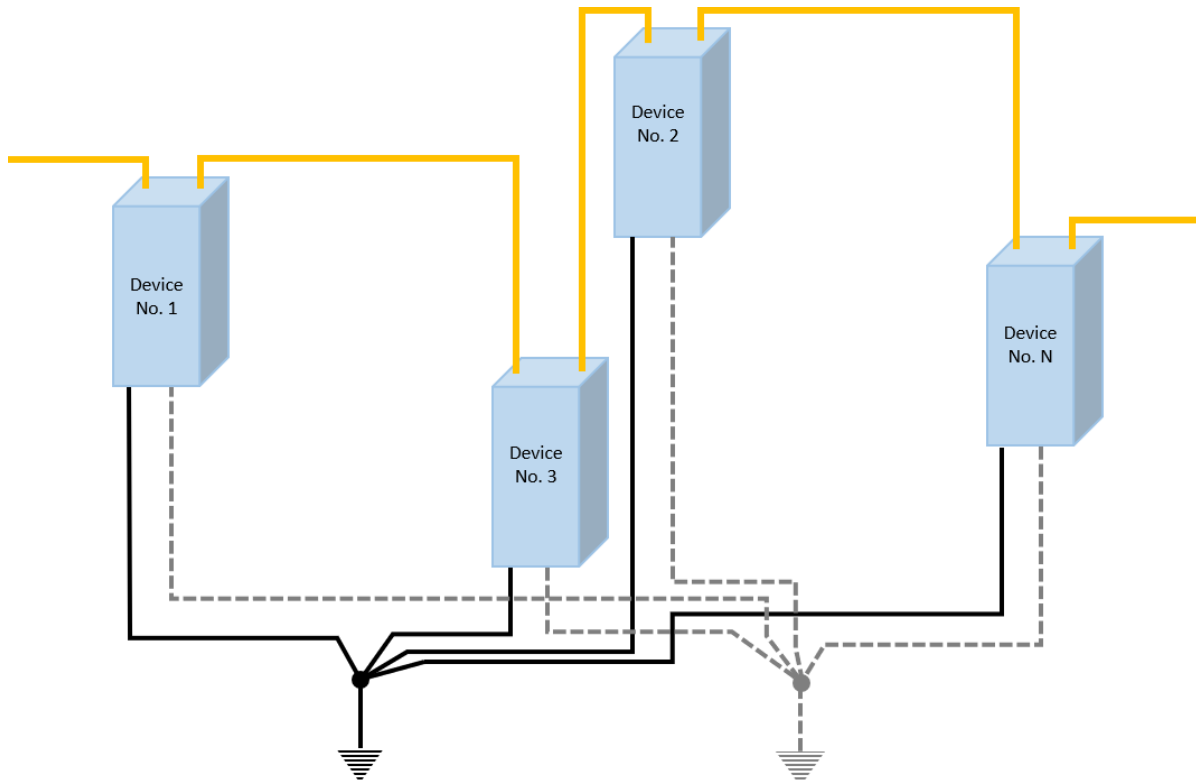


图 19: 星形接地方案

设备底架和金属信道与地面的连接应根据不同的国家标准，通过具有适当配色方案的专用电线进行。为了使接地系统能够有效抑制EM和噪声干扰，每个设备或金属底架与功能接地之间的阻抗应尽可能低，通常低于 0.6Ω ，任何情况下都应低于 1Ω 。

由于导线的总电阻与其长度成正比，因此应始终保证接地线尽可能的短。

导线的总电阻也与其横截面成正比。表13显示了接地线的横截面与其最大长度之间的关系，最大长度将确保 0.6Ω 的电阻，以提供足够的接地效果。

表 13: 接地线横截面与长度的关系

横截面区域		最大长度 ^a
IEC 602228	AWG	(a)
	8,36 (8 AWG)	291 m
10 mm ²		349 m
	10,5 (7 AWG)	368 m
	13,3 (6 AWG)	461 m
16 mm ²		556 m
	16,8 (5 AWG)	582 m
	21,1 (4 AWG)	736 m
25 mm ²		870 m
a 具有电阻R = 0,6 Ω的导体长度		

表13中报告的最大长度应视为最佳值，因为设备通常显示本地接地和RJ45连接器之间的阻抗，且RJ45连接器也可能有自己的阻抗。根据不同的环境条件，如第7.2条所述，应改进接地或可能需要的额外的外部接地以屏蔽连接。

5.8 基础设施组件的选择

仔细评估不同于电缆的基础设施组件的使用，如滑环、光电数据耦合器或其他组件，以及未集成EtherCAT的从站控制器（见第4条），因为它可能会影响网络性能，导致帧丢失，甚至会阻碍第5.4条所述的EtherCAT功能原理正常运行。

如第4.4条所述，ESC支持路由功能，并且可以实现所有可能的拓扑类型。因此，实现星型或树型拓扑结构无需交换机等外部路由组件，它们只会降低在传播延迟、通信抖动和EtherCAT帧的正确路由顺序方面的网络性能。因此，请勿在EtherCAT网络中使用交换机。

基础设施组件应在所有操作条件下获得D级（或更高）性能认证，并防止老化。包括基础设施组件在内的每个端到端链路应通过第7.2条所述的适当测量进行测试，并且在调试阶段应始终评估第7.4条所述EtherCAT特定诊断信息，以验证没有帧丢失，并且不会因为基础设施组件本身而导致信号损坏或过度衰减。

有些基础设施组件，如滑环或介质转换器或其他有源组件，即它们能再次生成EtherCAT信号。当这些组件插入两个EtherCAT设备之间时，上游和下游设备之间的连接被分成两个不同的信道，具有独立的物理链路检测和建立，而不是由ESC在两端终止。如果基础设施组件和下游设备之间的物理链路中断，则上游设备和基础设施组件之间的链路可能保持活动状态：在这种情况下，上游从站设备的端口保持打开，从而导致帧丢失（如图20），因为基础设施组件内部不支持EtherCAT逻辑环路的关闭。

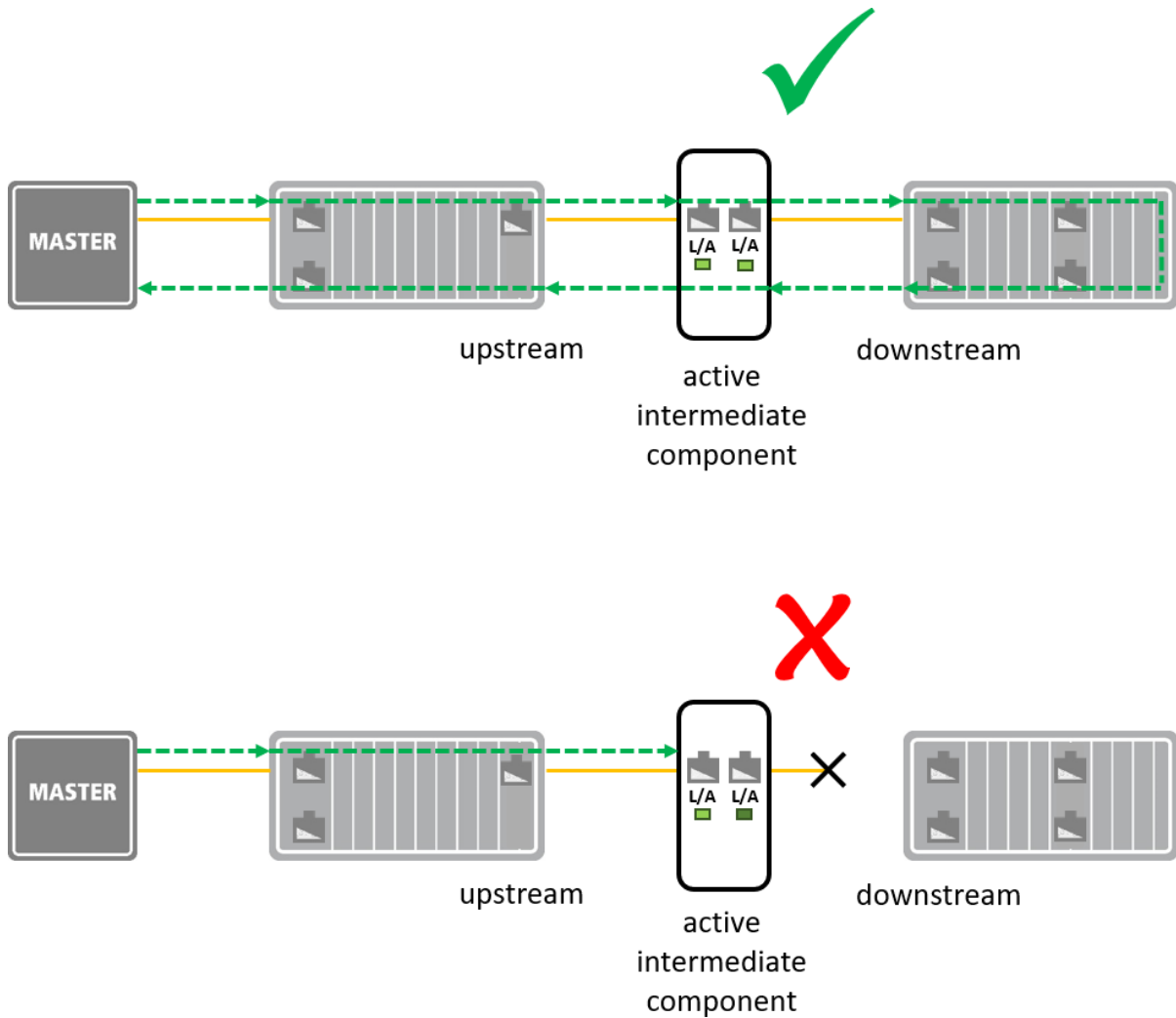


图 20：有源基础设施组件的运行

因此，EtherCAT网络中使用的有源基础设施组件应支持以下机制，即如果中间组件和下游从站之间的硬件连接中断，中间组件也将关闭与上游从站的链接，从而迫使上游从站关闭其端口和EtherCAT逻辑环路，以防止帧丢失。例如，可以通过专用机制（如链路丢失转发（LLF）机制）使有源基础设施组件按此运行。

为了提供可靠的链路管理和高级诊断能力，我们鼓励用于EtherCAT网络的有源基础组件制造商在其设备中集成ESC。ESC应位于上游PHY之后，并始终确保在链路中断时保留EtherCAT逻辑环路，并防止帧丢失。

给设备制造商的提示

通过实施链路丢失转发（LLF）或类似的机制实现上述有源基础设施组件的正确链接管理。

另一种可能的解决方案，除了提供更广泛的诊断信息外，还可以提供 在下游连接中断的情况下，对物理链路进行正确管理。即在有源基础设施组件中集成EtherCAT从站控制器（如图21）。

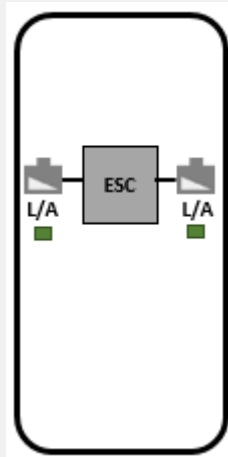


图 21：在有源基础设施组件中集成ESC

5.9 EtherCAT 从站设备的选择

EtherCAT设备的产品范围非常广泛，因此最终用户可以在多种可用设备中选择最适合自身需求的产品。ETG官网上的产品指南 (<https://www.ethercat.org/en/products.html>) 概述了市场上部分产品的技术特性，并链接到相关设备制造商官网以提供更详细的信息。需要注意的是，ETG官网上显示的产品列表并不全面，也不代表产品的质量标准。

所有EtherCAT从站制造商必须使用官方一致性测试工具进行测试，以确保其设备符合EtherCAT主要规范以及与其他设备的互操作性。

此外，官方授权的EtherCAT测试中心也可以测试和认证EtherCAT设备。强烈建议进行官方测试，以确保更高层次的兼容性和互操作性。

EtherCAT设备的安装和调试应始终根据设备制造商提供的信息进行。

5.10 规划阶段的其他任务

规划阶段还应考虑降低机器的总体运营成本，或减少维护或意外故障的成本。在规划布线基础设施时，最小化安装和材料成本不是主要目的，通信才是自动化系统的支柱。

本指南描述了在规划阶段可以采取的合理措施，这些措施的附加成本有限，但在机器或工厂的生命周期中可以显著节省资金和时间成本。

其中某些方面更为关键，因此，充分了解自动化系统的周围条件非常有用。表14报告了可纳入规划阶段的一些额外任务。

表 14: 规划阶段可能的额外任务

建议	备注
定义布线的可靠性级别，和/或确定布线总成本目标。	有保持低成本布线的经济目标意识。
评估关键路径。	大多数布线都没有问题，但某些区域可能导致问题。主要重点应放在布线热点区域上。
高品质电缆和连接器推荐。	更换电缆很昂贵。
尽量保持组件的环境温度较低。	温度升高会影响电子产品和数据传输。
规划电缆检查。	通过肉眼检查识别问题，电阻测量也可以帮助识别问题。
在出现错误时缩短维修时间。	维修时间是可用性的重要因素，需要备件和训练有素的维修人员。
网络架构的文档。	文档（包括长度、电缆类型）有助于识别操作过程中的错误。

6 安装

6.1 安装的一般程序

请参考第5条中有关电缆布线的基本信息。以及第5.6条“电缆隔离”和第5.7条“接地”。

安装应由经验丰富的技术人员完成，并遵循布线计划。

6.2 电磁防护

如第5.6条所述，通信电缆的敷设应始终与其他类型的电缆，尤其是电力电缆保持最小距离。

如果通信电缆必须与电力线交叉，则应保持以90°角穿过，如图22所示。

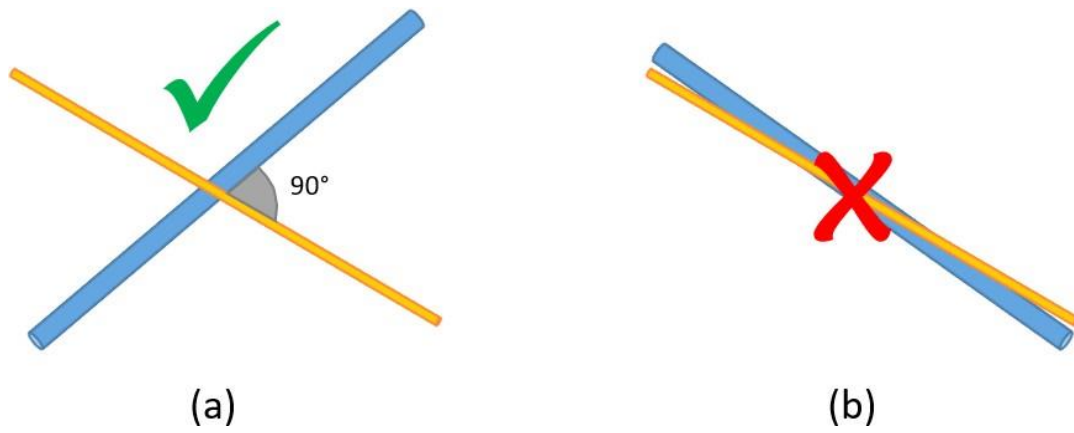


图 22: 通信电缆和电力电缆之间的交叉

避免通信电缆盘绕，这样会将EM干扰引入网络并大面积严重影响通信性能（图23）。

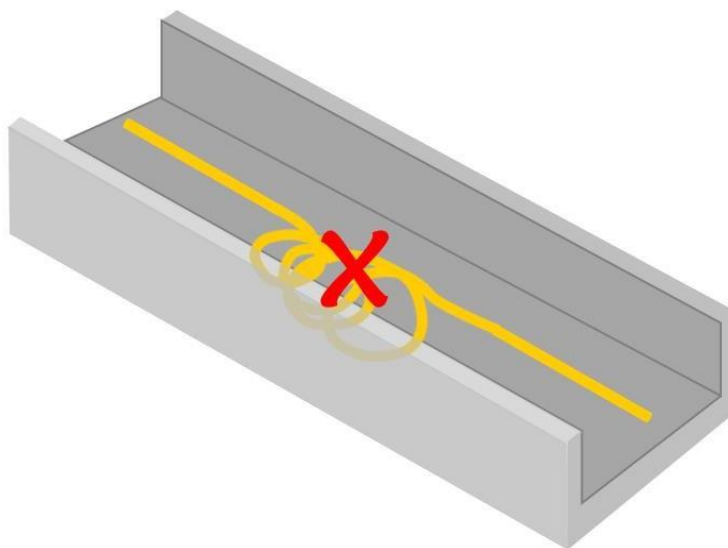


图 23: 避免通信电缆中出现线圈

由于EtherCAT网络中只能使用屏蔽电缆，因此应特别注意电缆屏蔽层的接地，以最大程度地减少通信系统中的噪声和干扰。

电缆屏蔽层应在信道两端接地，且两个终端设备应始终处于相同的参考电位，如第5.7条所述。

给设备制造商的提示

我们鼓励从站设备制造商在其设备内将电缆屏蔽层正确接地（如图24），建议使用RC连接（如图25）。如果无法实现，则应提供直接连接。

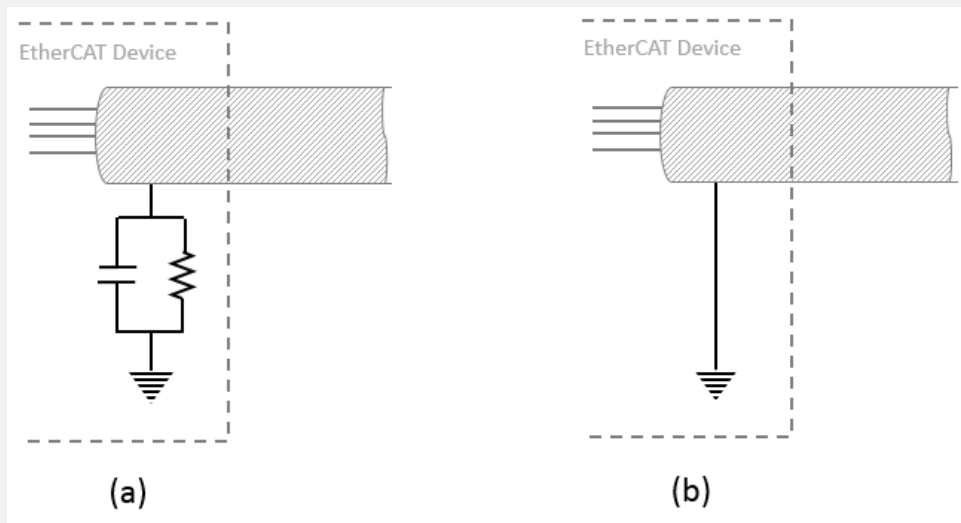


图 24：设备内的屏蔽接地连接选项

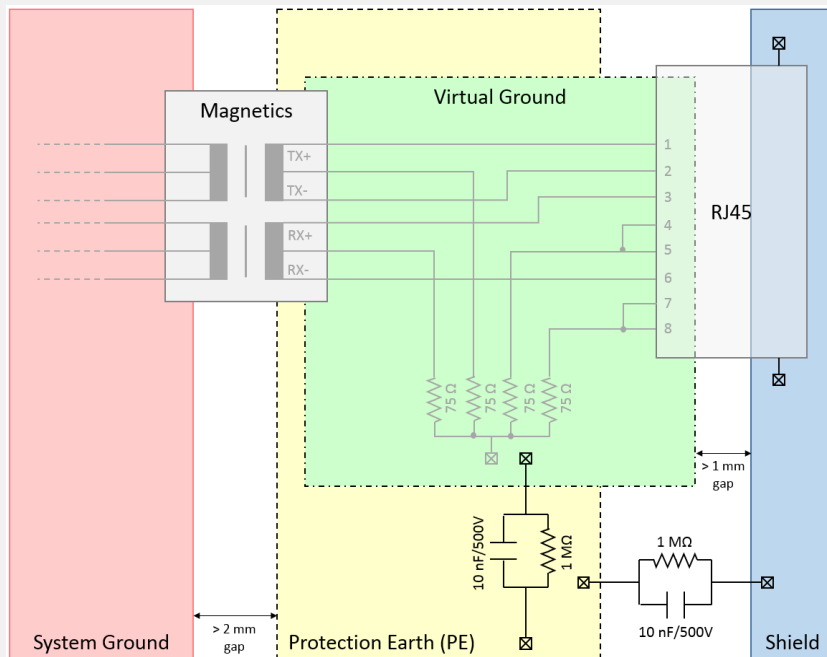


图 25：设备内的内部RC连接接地

由于电缆屏蔽层和本地接地之间的连接通常由EtherCAT从站设备内部提供，因此通常不需要在电缆端额外将屏蔽层接地。有关外部屏蔽接地的具体指示，请参阅从站设备的安装说明。

安装后，可以通过测量连接器金属部分和本地接地之间的阻抗值来检查每个从站设备中使用的特定接地方式（如图26所示）：

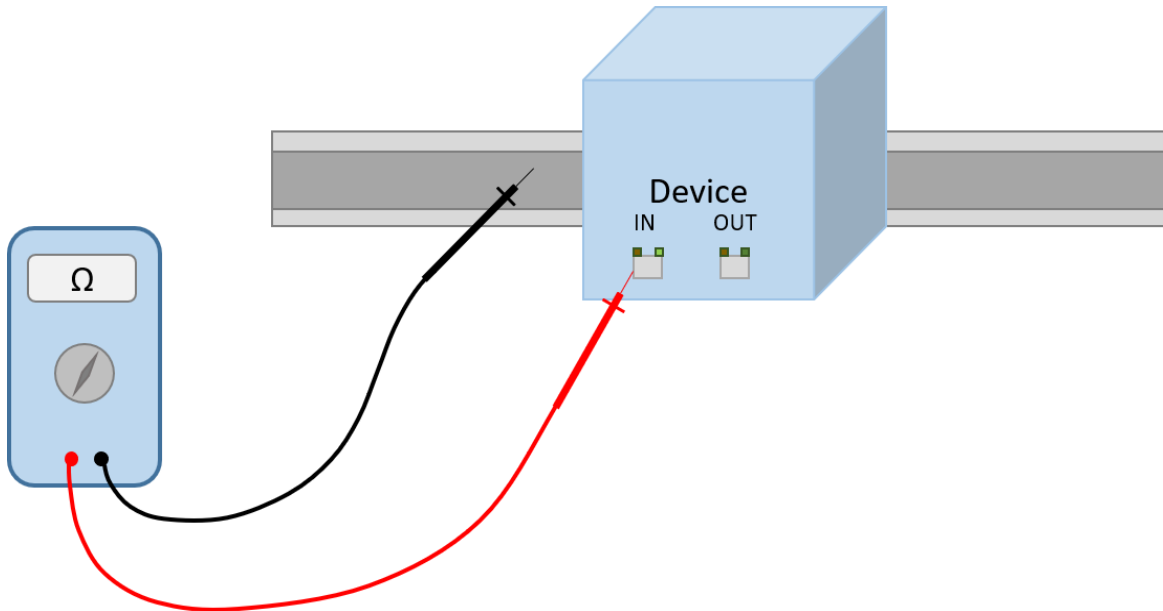


图 26：设备内屏蔽接地的测量

测量的结果有以下几种：

- 极高的阻抗值（量级为 $M\Omega$ ）。在这种情况下，电缆屏蔽层很可能通过RC连接在设备内接地。
- 极低阻抗值（低于 1Ω ）。在这种情况下，电缆屏蔽层很可能通过直接连接在设备内接地。
- 断路。在这种情况下，电缆屏蔽层很可能根本没有在设备内接地。

如果电缆屏蔽层直接内部接地，阻抗值相对较高（ 1Ω 或更大），如果电缆屏蔽层内部没有连接到本地接地，或者在任何情况下，调试阶段收集的诊断信息（如第7.4条所述）检测到硬件通信错误则可以添加电缆屏蔽层到本地接地的外部连接，通过使用专用的电缆夹（如图27所示）提高抗干扰性并均衡电流：

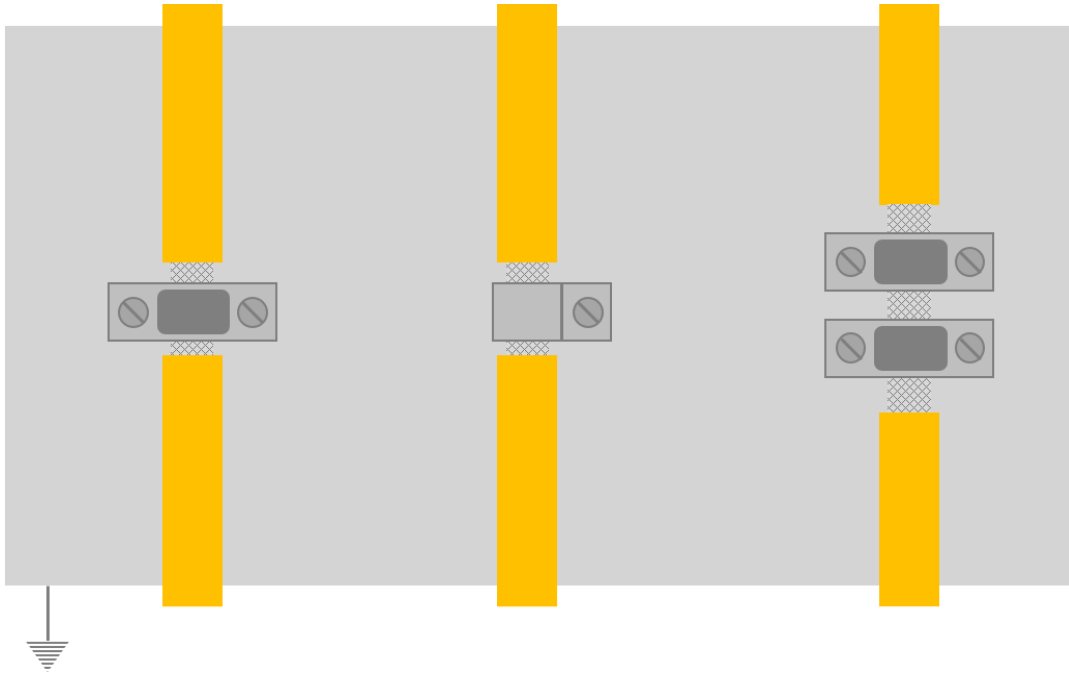


图 27：通过电缆夹将电缆屏蔽层外部接地

使用电缆夹时，应遵循以下规则：

- a) 接地路径应保证极低阻抗（ 0.1Ω 或更小）。
- b) 电缆夹应与电缆直径完全匹配：如果过紧，电缆夹可能会机械损坏电缆；如果过松，可能给系统带来额外的噪声（如图28）。

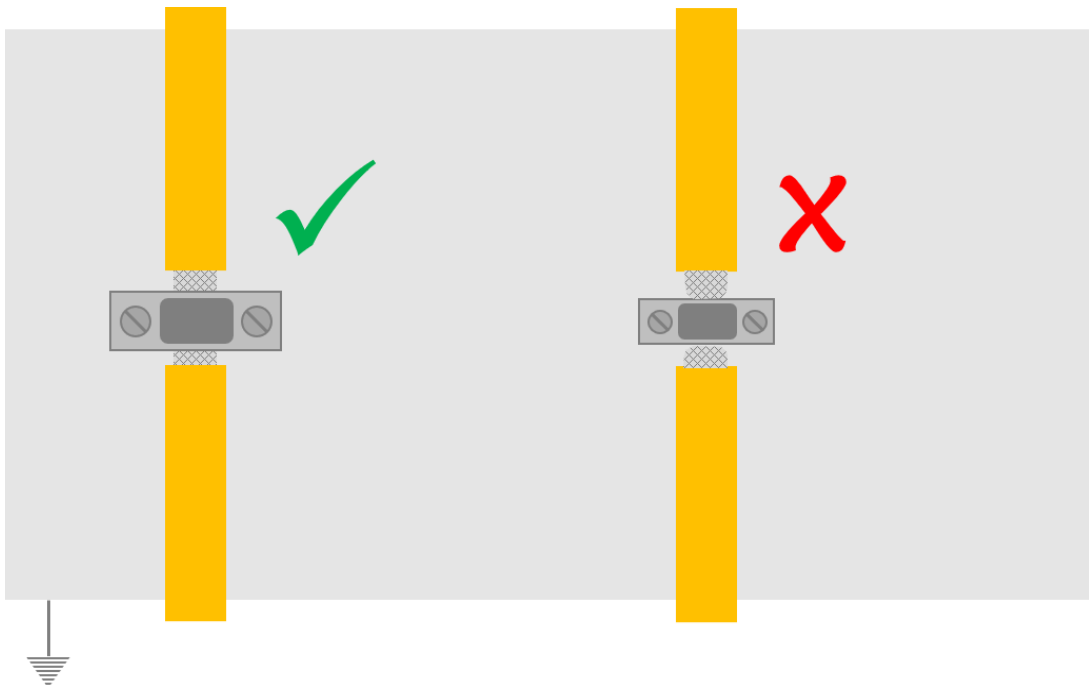


图 28：电缆夹的正确尺寸和错误尺寸

c) 剥离外部电缆保护套时，不得损坏或切断电缆，否则屏蔽层提供的EM屏障将失效（图29）。

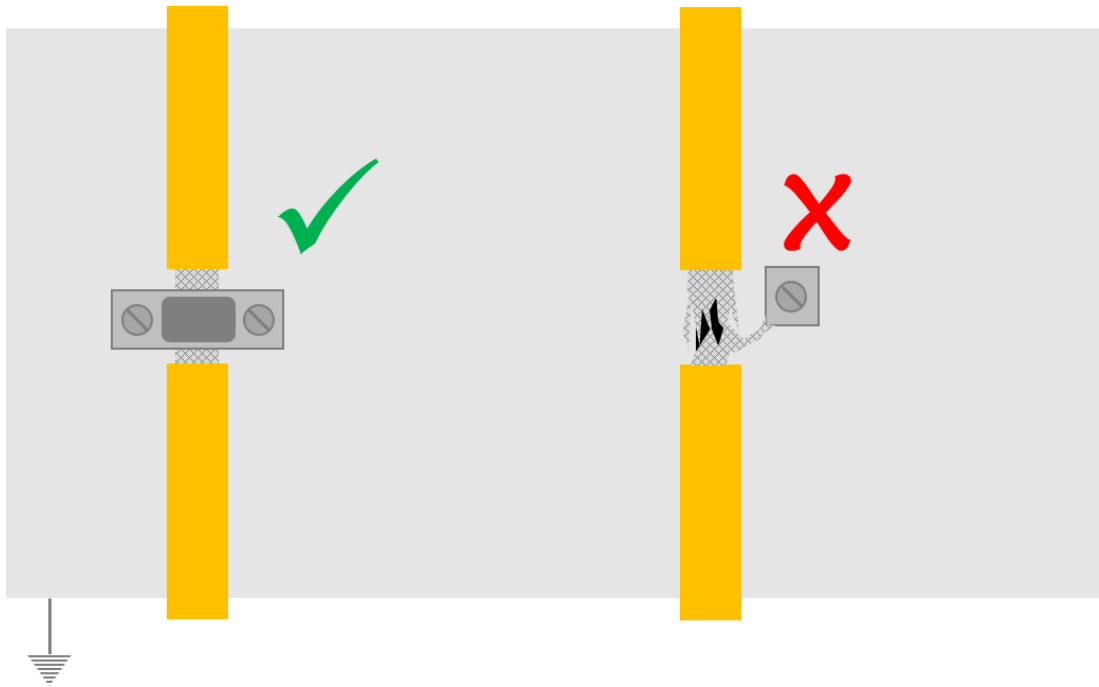


图 29: 接地点正确和错误的屏蔽处理

d) 用于屏蔽接地连接的电缆夹不得用于应力消除。如第6.3条所述，应该使用专用应力消除组件。

作为电缆夹的替代方案，可以使用穿孔金属板箔，直接在通信电缆的金属连接器与本地接地之间提供低阻抗路径（ 0.1Ω 或更小），如图30所示。

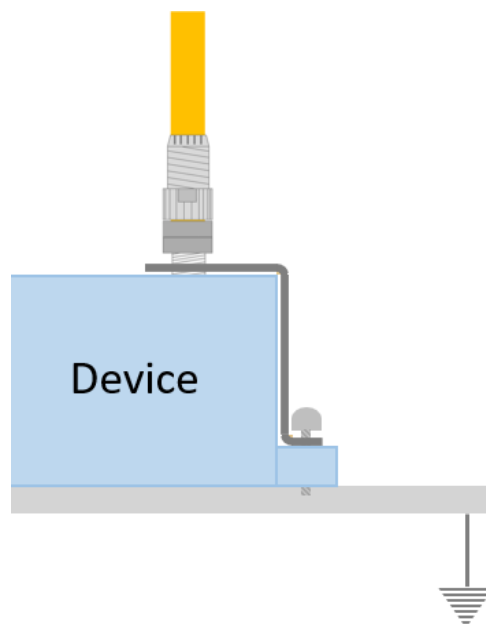


图 30: 电缆屏蔽层通过金属箔进行外部接地

如果使用隔板直通连接器来访问机柜，那么这些连接器还应具有最低的接地阻抗路径（0.1Ω或更小）。为了实现这一点，应尽量使直通连接器的金属部件和机柜的接触面积更大，以防损坏机柜的部分涂漆涂层。

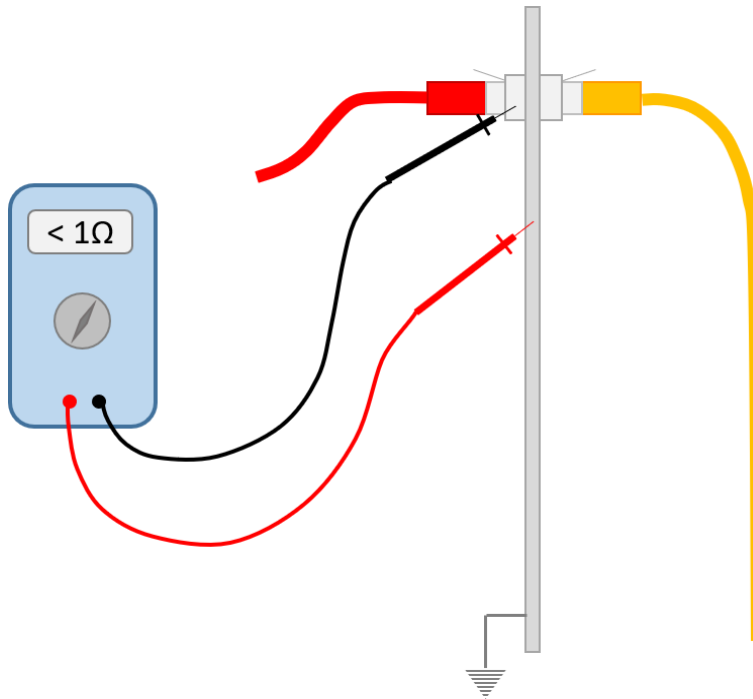


图 31：隔板直通连接器的正确接地

6.3 机械保护

通信电缆不得随意弯曲。过度弯曲会永久损坏电缆电线和保护罩，严重影响通信性能。安装期间，应始终遵守特定电缆制造商规定的最小弯曲半径。根据经验，对于固定主干电缆，应保证最小弯曲半径为电缆直径的8~10倍（如TIA-568-C规范所述）。

为了防止通信电缆过度弯曲，可以使用特定的机械辅助工具（如图32所示）：

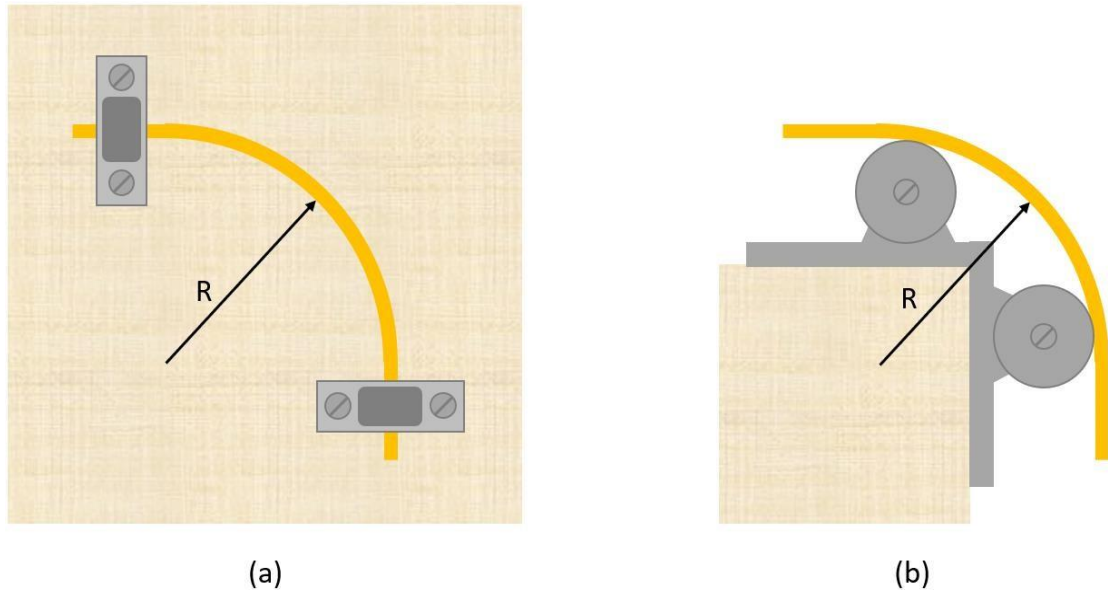


图 32：保持通信电缆的最小弯曲半径

锋利的边缘对电缆完整性特别危险，尤其是在部件相互移动的情况下。因此，锋利边缘应平滑或具有特殊保护（如图33所示），以防止电缆受损。

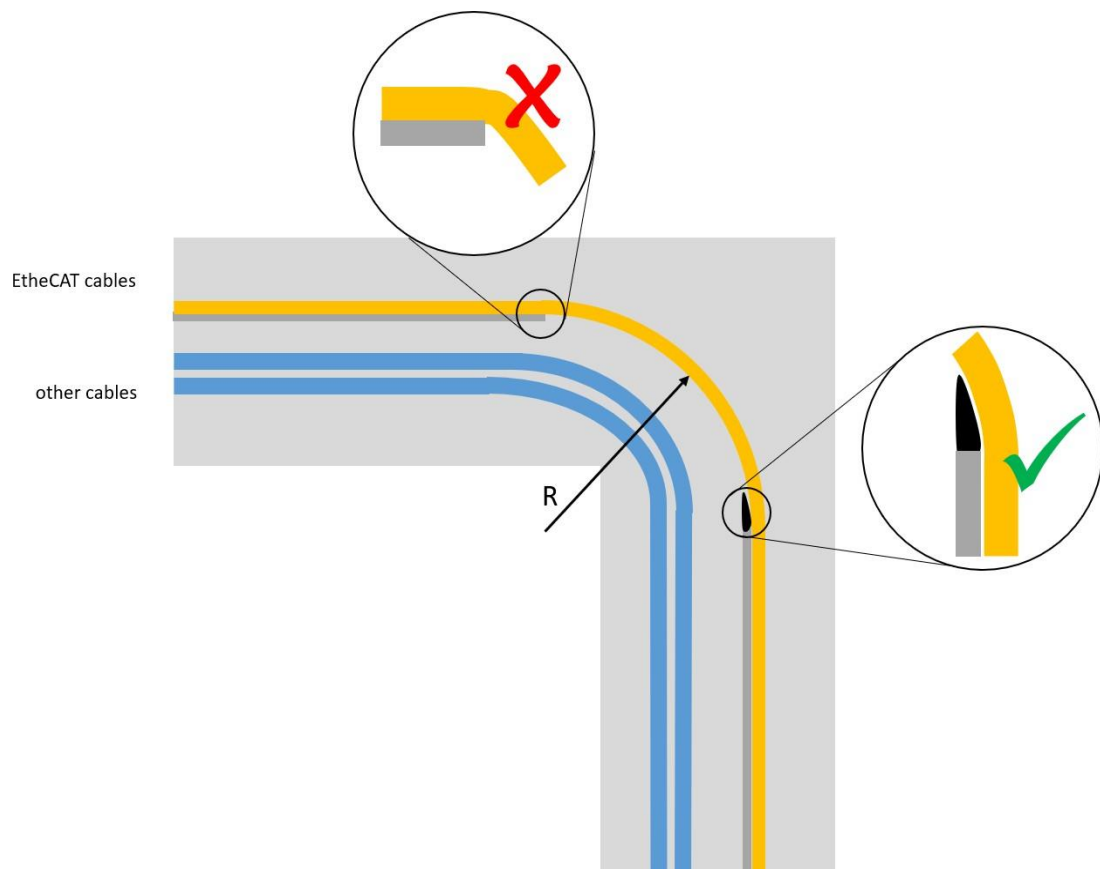


图 33：通信电缆路径上的边缘保护

张力（如图34所示）也可能对电缆完整性造成风险。在安装过程中，应始终确保通信电缆承受的张力不会超过电缆制造商规定允许的最大值。根据经验，对于固定主干电缆，最大张力不应超过110 N（如TIA-568-C规范所述）。

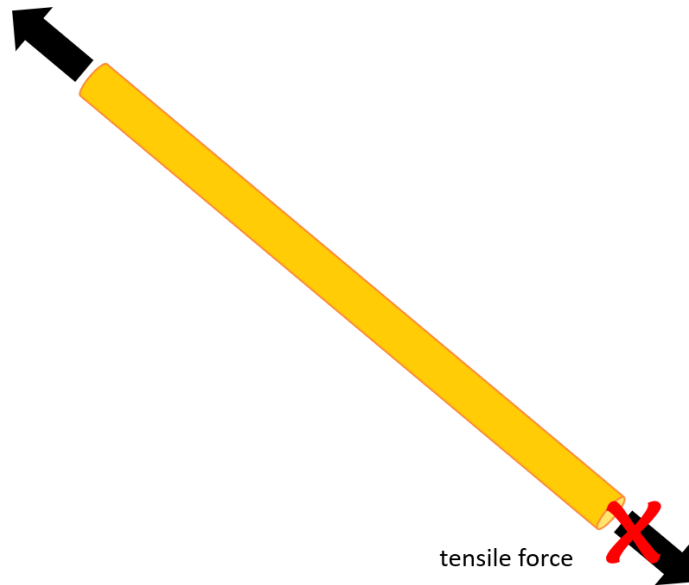


图 34：作用在通信电缆上的张力

如果张力在某些操作条件下可能超过电缆制造商规定允许的最大值，则应使用应力消除辅助工具（如图35所示）。应力消除夹应放置在离最近的电缆连接器适当的位置，以防止电缆超过其最大弯曲半径（根据电缆制造商提供的信息）。

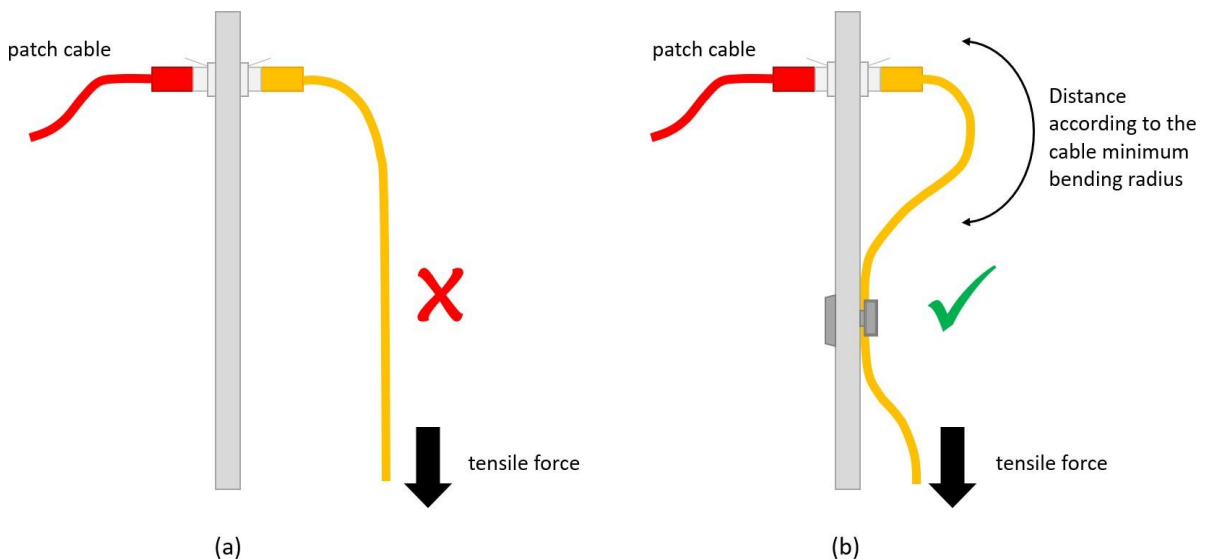


图 35：保护通信电缆免受张力影响

应力消除夹应与电缆直径完全匹配，以防止永久性电缆损坏（图36）。

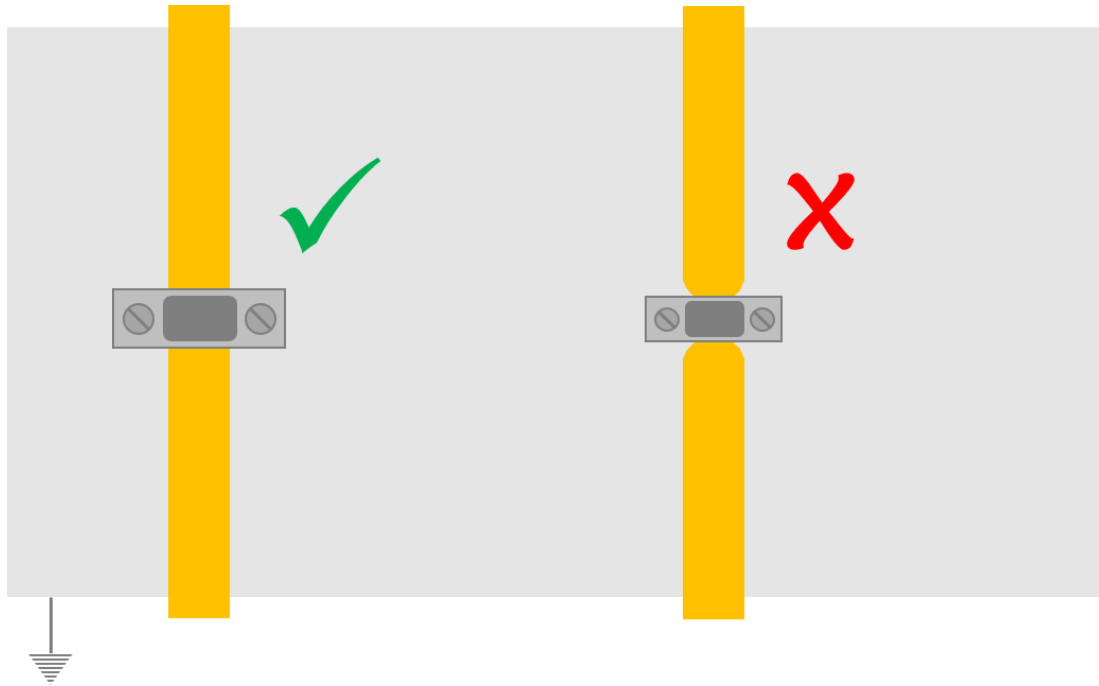


图 36：应力消除组件的正确尺寸和错误尺寸

扭转力（如图37所示）可能导致双绞线相互移动，从而降低扭转效应，甚至永久损坏电缆。因此，应尽可能避免扭转力。

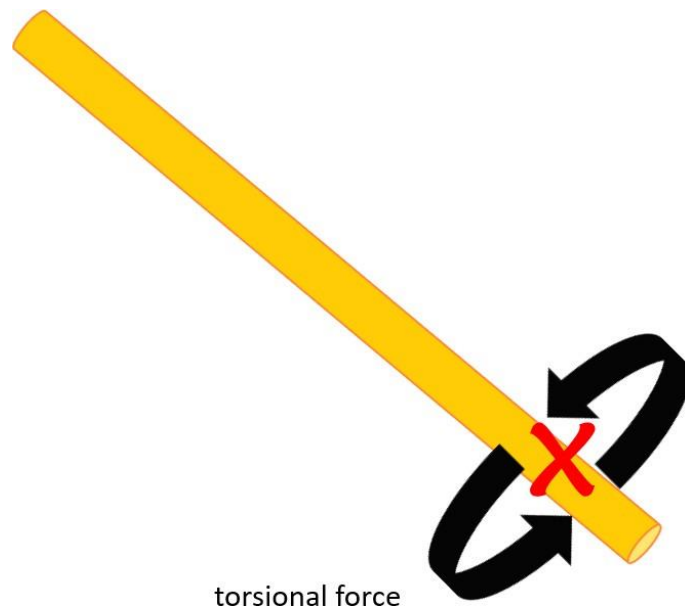


图 37：作用在通信电缆上的扭转力

如果应用中包含相互移动的部件，因此无法避免扭转力，则应根据电缆制造商提供的信息，使用专为持续移动设计的柔性电缆。

避免电缆挤压。如果通信电缆有可能被机械移动部件或柜门挤压，则应提供足够的机械保护（如图38所示）。

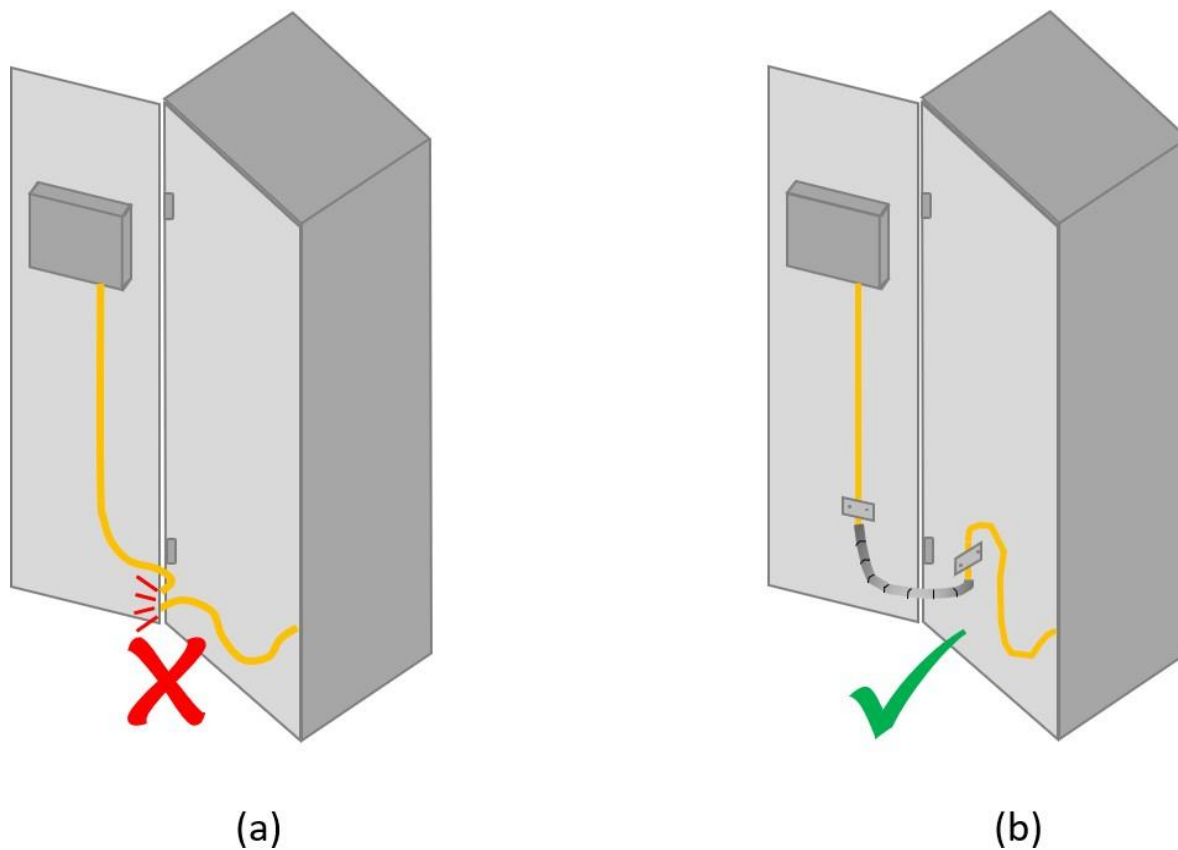


图 38：保护通信电缆免受挤压

6.4 连接器安装

ISO/IEC 61918标准定义了四芯电缆的电线颜色标准和连接器引脚分配，如图39所示：

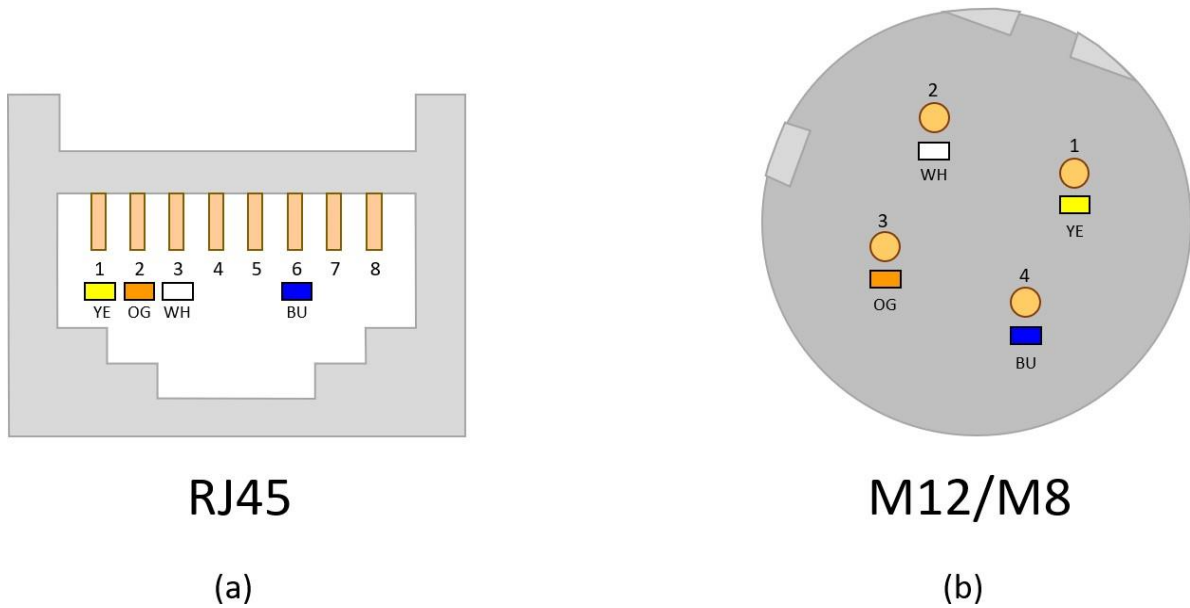


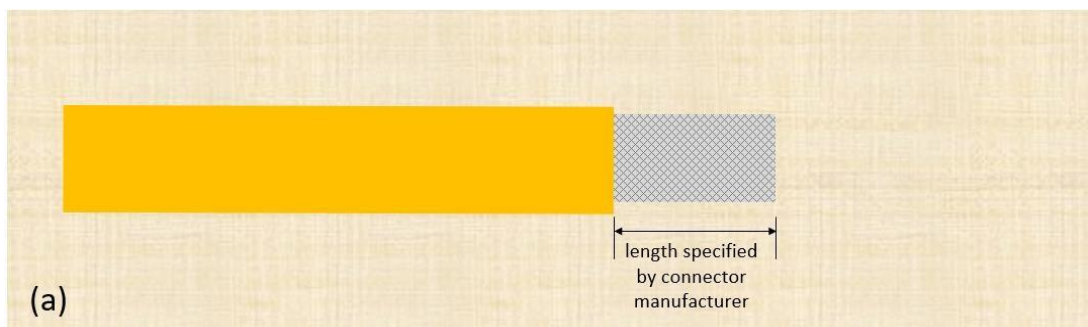
图 39：根据ISO/IEC 61918规范，四芯电缆的连接器引脚分配

使用现场安装的电缆时应特别小心。连接器的安装应使用专用工具进行，以保持线缆和屏蔽层的完整性。ISO/IEC 61918规范的附录I提供了以太网缆连接器组件的一般提示。

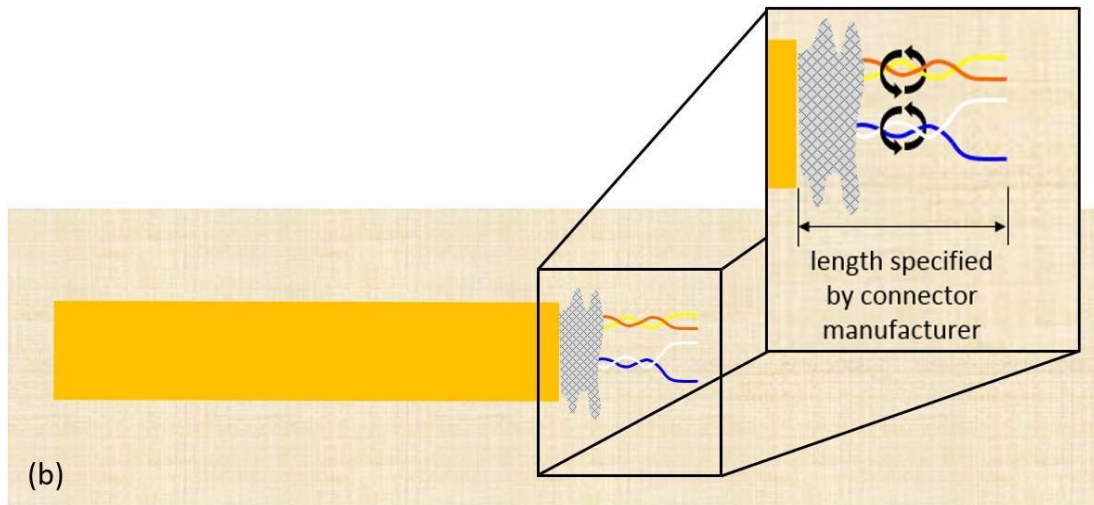
6.4.1 RJ45 连接器的安装

RJ45连接器，应遵循以下步骤：

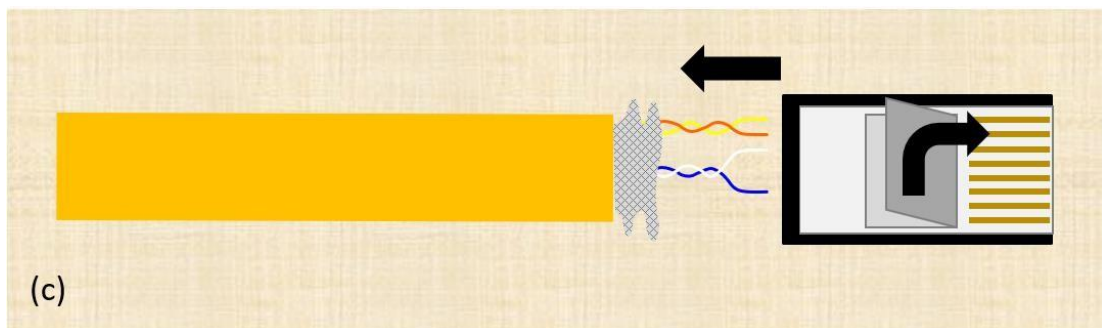
- a) 按照连接器制造商在相应安装说明中规定的长度剥去电缆保护套：



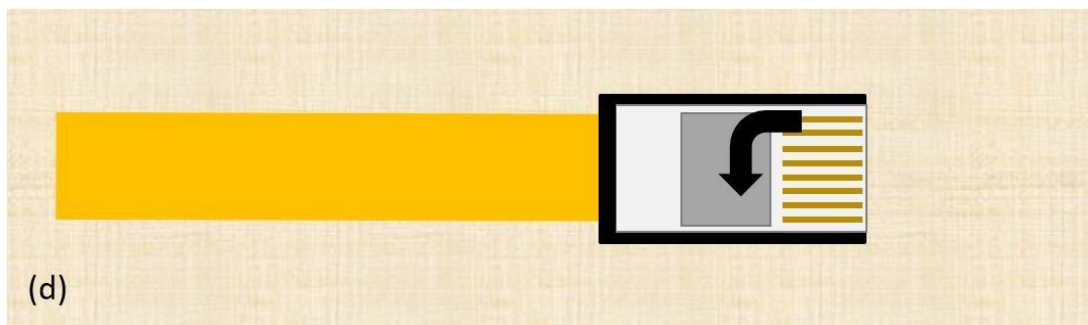
- b) 将屏蔽层折回到电缆保护套的末端，分离线对并将其对齐，如图所示。在这个过程中，要特别小心，使双绞线几乎拧到头，不要损坏屏蔽层本身。然后，按照连接器制造商在安装说明中的规定长度修剪连接器超出的部分：



- c) 根据所需的引线分配检查线缆方向是否正确。为了简化这一步骤，几个连接器提供了拼接元件或其他机械辅助工具，使单根线缆保持稳定，并在后续的压接过程中处于正确位置。更多详细信息，请参阅特定连接器的安装说明。
- d) 将导线插入连接器主体。在此过程中，确保所有线缆都接触到连接器主体的末端：



- e) 闭合/压接连接器，然后轻轻拉动进行检查：

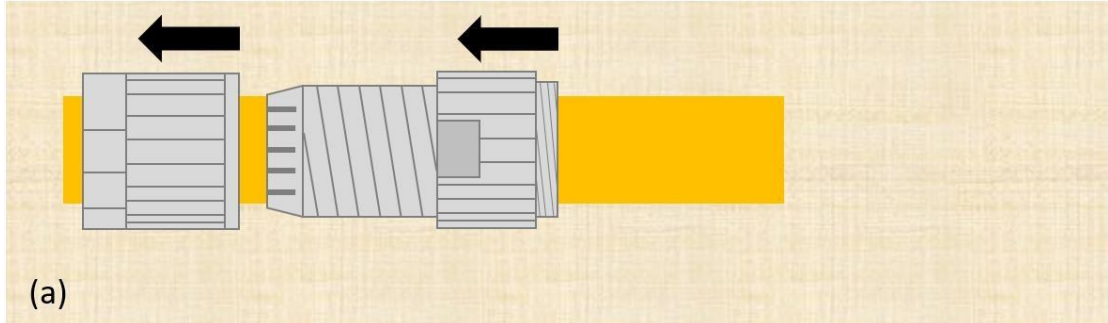


- f) 最后，用万用表检查电缆两端之间每根线缆引脚之间的连通性。

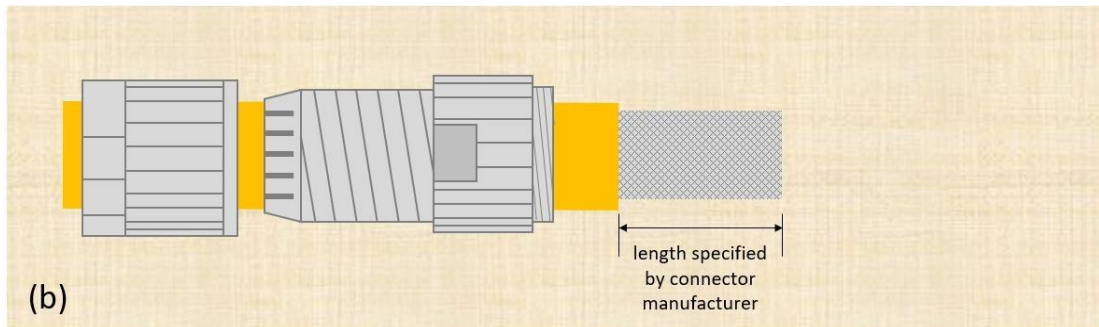
6.4.2 M12和M8连接器的安装

对于M12和M8连接器，应遵循以下步骤：

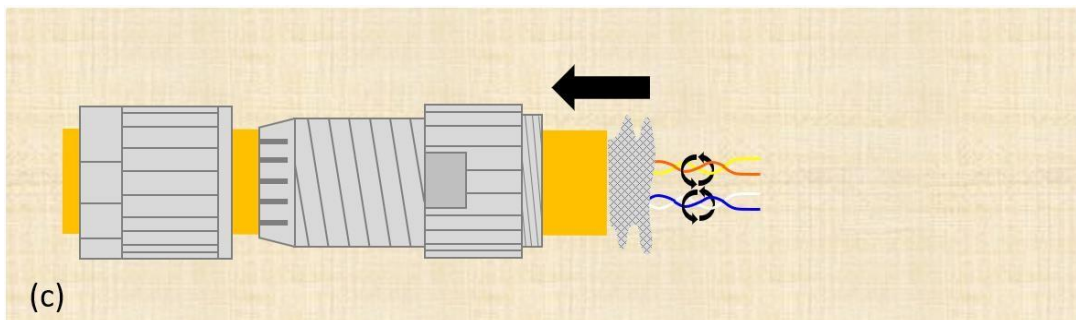
- a) 滑动电缆上的线缆格兰头、螺母和连接器外壳：



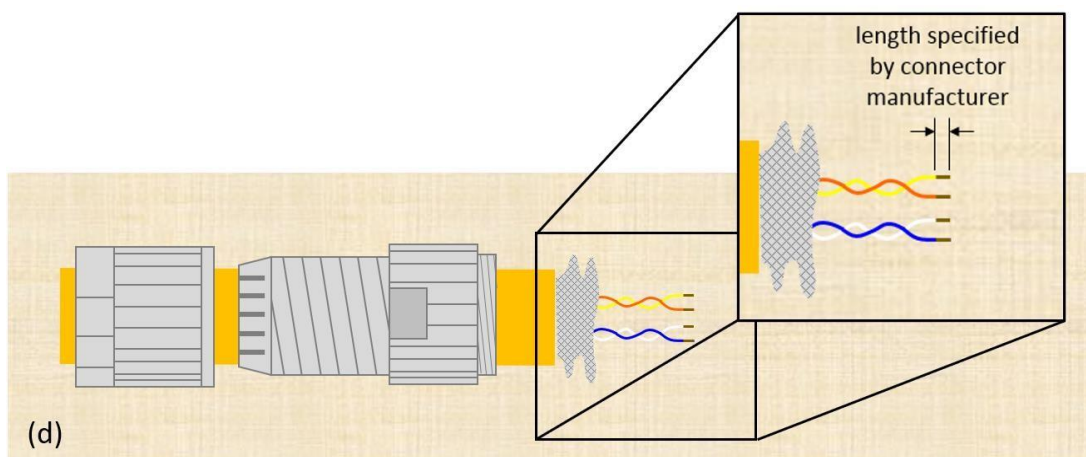
- b) 按照连接器制造商在相应安装说明中规定的长度剥离电缆保护套：



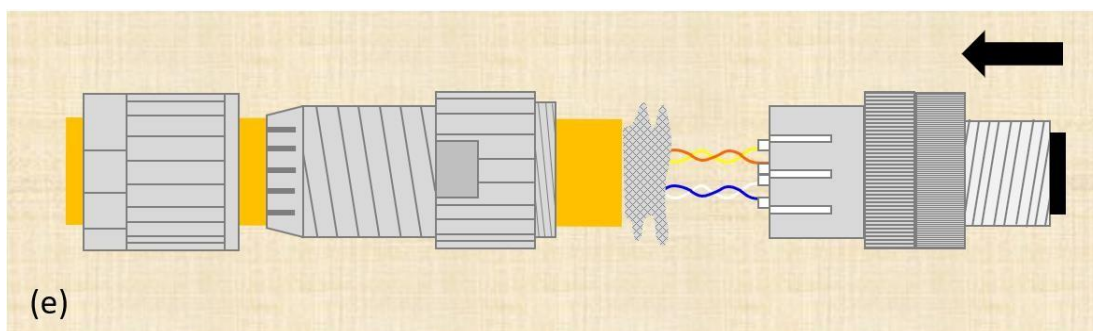
- c) 将屏蔽层折回到电缆保护套的末端，分离线对并将其对齐，如图所示。在这个过程中，要特别小心，使双绞线几乎拧到头，不要损坏屏蔽层本身。然后，根据连接器说明文档，修剪掉多余的长度：



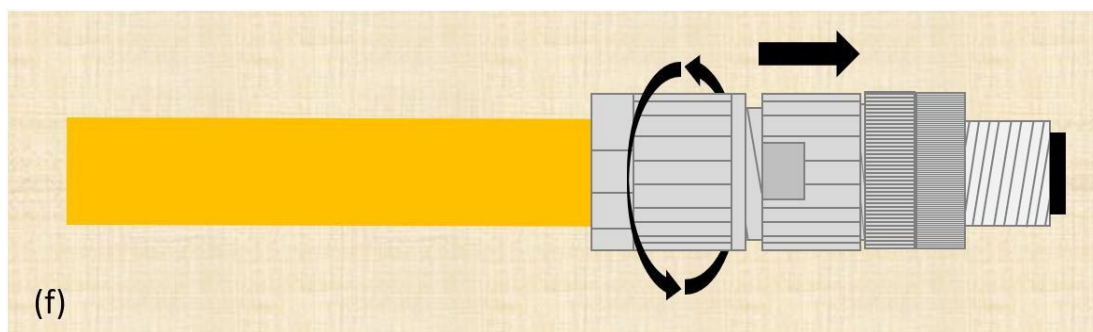
- d) 按照连接器制造商在相应安装说明中规定的长度剥离导线绝缘层：



- e) 根据所需的引脚分配，将剥离的线缆插入连接器主体后端的孔中，直到末端（线束不得伸出）。必要时用螺钉拧紧线缆。



- f) 将连接器外壳滑过连接器后端。然后，将线缆格兰头滑到连接器外壳上并拧紧。在此过程中，请特别注意不要过度拧紧线缆格兰头，以免损坏连接器：



- g) 最后，用测试仪检查电缆两端之间每根线缆的连接。

对于四芯双绞线，TIA-568-C规范中定义了线缆颜色标准和连接器引脚分配。描述了两种不同的连接方案，分别称为T568A和T568B。

TIA-568-C定义的线缆颜色和引脚分配与IEC 61918中描述的不同，如图40所示。表15对这两种标准进行了对比。

表 15: ISO 61918 和 TIA-568-C 的线缆颜色对应关系

信号	RJ45	M12	IEC 61918颜色	TIA-568-C(T568A)颜色	TIA-568-C(T568B)颜色
TD+	1	1	黄色	白色/绿色	白色/橙色
TD-	2	3	橙色	绿色	橙色
RD+	3	2	白色	白色/橙色	白色/绿色
RD-	6	4	蓝色	橙色	绿色
	4	-	-	蓝色	蓝色
	5	-	-	白色/蓝色	白色/蓝色
	7	-	-	白色/棕色	白色/棕色
	8	-	-	棕色	棕色

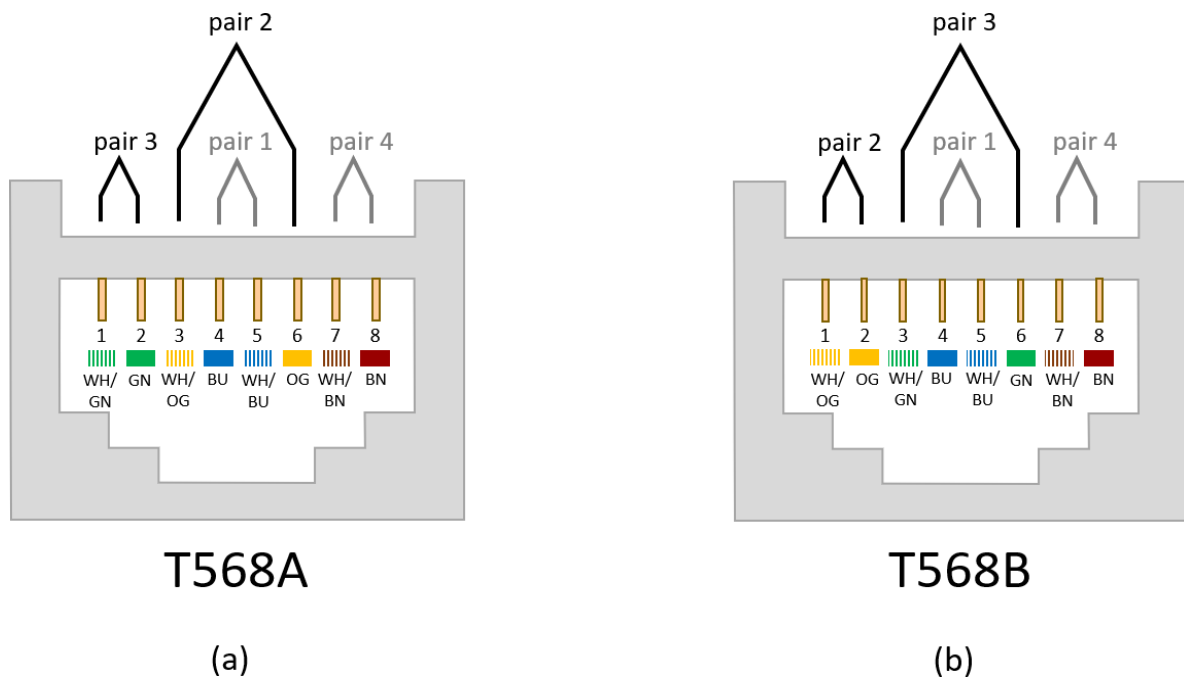


图 40: TIA-568-C定义的RJ45连接器布线方案

如第5.4.1条所述，应首选根据T568B在电缆两端进行引脚分配。尽管如此，允许在电缆两端使用基于T568A的直连电缆以及交叉电缆，也允许使用其他引脚分配方案（基于快速热连接技术的设备之间的连接除外，这种必须使用直连电缆）。

将连接器安装到四芯双绞线时，应遵循第6.4.1条中所描述的相同步骤。

在连接器安装过程中，独立于特定电缆和连接器类型，应始终遵循以下规定：

- 不得损坏单根电缆的塑料绝缘层。
- 双绞线只能在离连接器最近的位置分开。过早分离双绞线（如图41所示）可能会导致电流回路和干扰。

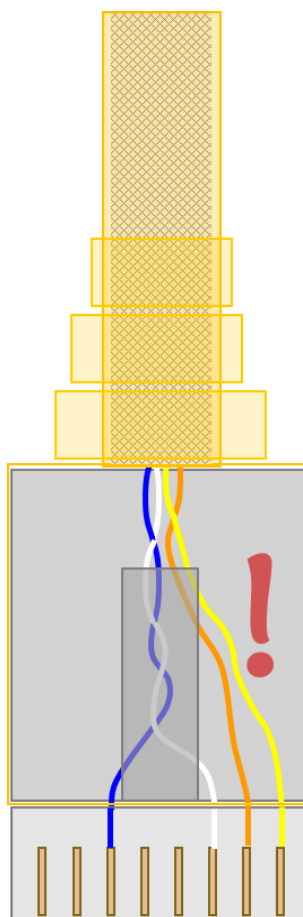


图 41：RJ45 连接器安装不良

- 如图42所示，在安装过程中不得损坏或中断屏蔽层。屏蔽层应围绕双绞线向下延伸至连接器，其连续性不得在任何点中断，并且应焊接至连接器金属笼上（屏蔽层和连接器金属笼之间的阻抗应尽可能低）。

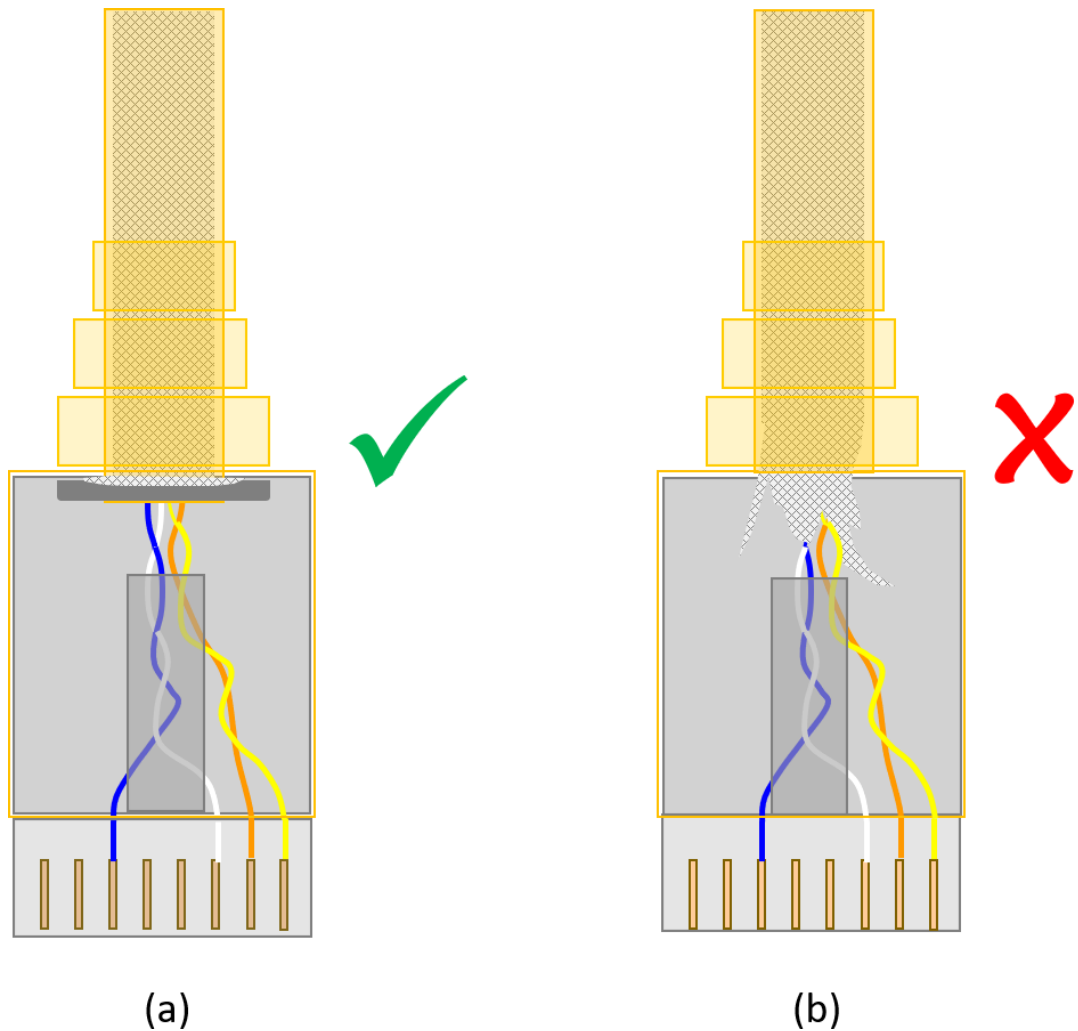


图 42： 电缆屏蔽层与连接器外壳的正确连接和错误连接

7 调试

7.1 肉眼检查

EtherCAT网络调试阶段的第一步应包括肉眼检查，应逐步检查前几条所描述的実施方面的正确执行情况。肉眼检查的范围应是检测甚至防止所有可立即定位的潜在问题点，而无需进一步测试和特定测量设备。

对网络安装的肉眼检查应能够检测到调试错误或潜在问题，包括：

- 网络结构
- 电缆布线
- 电缆完整性

表16 可用于肉眼检查表：

表 16：网络肉眼检查表

步骤	内容	确认
1	网络结构	
1.1	设备之间的最大距离是否符合网络规划（根据第4.2条）？	<input type="checkbox"/>
1.2	每个端到端链路内的最大连接数是否符合网络规划（根据第5.3条）？	<input type="checkbox"/>
1.3	网络设备是否正确接地（根据第5.7条）？	<input type="checkbox"/>
2	电缆布线	
2.1	安装的电缆类型和截面是否符合网络规划（根据第5.4条）？	<input type="checkbox"/>
2.2	所采用的隔离类型是否可以确保通信电缆和电力电缆之间的最小距离（根据第5.6条）？	<input type="checkbox"/>
2.3	通信电缆和电力电缆之间的交叉是否呈90°角（根据第6.1条）？	<input type="checkbox"/>
2.4	通信电缆中是否避免了线圈盘绕（根据第6.1条）？	<input type="checkbox"/>
2.5	通信电缆的最小弯曲半径是否有保证（根据第6.3条）？	<input type="checkbox"/>
2.6	通信电缆是否专门针对锋利边缘进行保护，特别是当张力可能导致电缆永久性损坏时（根据第6.3条）？	<input type="checkbox"/>

步骤	内容	确认
2.7	在张力可能永久损坏电缆和连接器的位置是否安装了应力消除组件（根据第6.3条）？	<input type="checkbox"/>
2.8	在没有专门设计的电缆的位置是否避免了扭转力（根据第6.3条）？	<input type="checkbox"/>
2.9	通信电缆是否受到保护，以防移动部件挤压（根据第6.3条）？	<input type="checkbox"/>
3	电缆完整性	
3.1	两个端点之间的电缆涂层是否损坏？	<input type="checkbox"/>
3.2	通信电缆是否明显被应力消除工具或外部接地夹挤压（根据第6.1和6.3条）？	<input type="checkbox"/>
3.3	电缆连接器或相对应的外部接地夹附近的电缆屏蔽层是否损坏或撕裂（根据第6.1条）？	<input type="checkbox"/>
3.4	当所有设备上电时，所有连接接口的链路/活动LED灯固定亮起或闪烁（根据第4.4条）？	<input type="checkbox"/>
3.5	建立链路所需的时间是否明显长于类似配置所需的时间？是否明显长于使用短电缆时观察到的时间？是否明显长于设备上电后的6-7秒？	<input type="checkbox"/>

7.2 信道物理参数测量

EtherCAT网络内信道物理参数的验证可以使用更加复杂和成本更高的测量仪器在不同等级进行。

我们强烈建议将调试阶段获得的测量结果添加到机器或工厂文档中，以便能够跟踪参数值的后续变化，从而检测机器或工厂生命周期中可能出现的问题。

7.2.1 电缆测试

通过标准的低成本万用表进行非常简单的电缆测试（图43）。此类设备可用于检查电缆最相关的物理参数。

为了正确解释电缆测量结果，应根据电缆制造商提供的数据了解线缆和屏蔽层的直流电阻。如果未提供电缆参数值，或者观察到预期长度值和实际长度值不符，则应对样品电缆进行初始测量。

通过简单的电缆测试进行以下检查：

- 根据第6.4条所述的ISO/IEC 61918（四芯电缆）或TIA-568-C（四芯双绞线）引脚分配标准，在电缆两端正确分配引脚。
- 电缆两端对应引脚之间的线缆连续性。
- 电缆电阻（给定电缆长度），在电缆一端短路对引脚，测量另一端相同引脚之间的电阻，并将测量的电阻值与根据电缆制造商公布的单位长度电阻值进行比较。
- 电缆长度（给定电缆电阻），将测量的电缆电阻除以电缆制造商公布的单位长度电阻值。

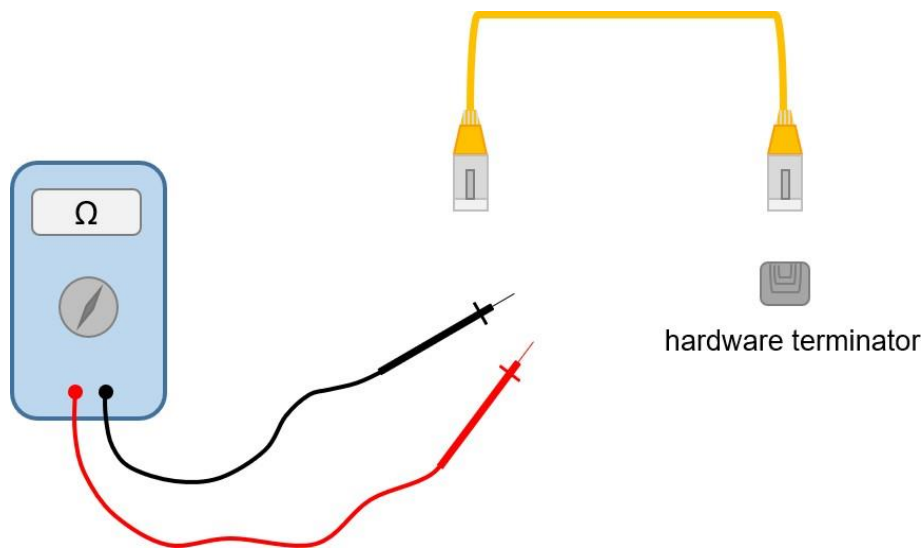


图 43：使用万用表设备进行简单的电缆验证

如果电缆的电气参数和长度已知，电缆测试甚至可以识别细微的接线问题，因此，在EtherCAT网络的调试阶段，这通常就足够了，除非检测到第7.4条所述的通信错误。

7.2.2 功能测试

第7.2.1条所述的测试仅允许检查主电缆物理参数，但不代表真正的通信测试。为了检查实际100 Mbit/s全双工以太网通信下的电缆性能，可以通过合适的设备进行功能测试（如图44所示：使用功能测试仪设备进行电缆鉴定）。在功能测试中，预定义的以太网帧由测量单元发送，并由远程单元应答。功能测试可以验证：

- 在传输过程中，由EM干扰、不良电缆组件或不良组件制造引起的数据损坏。
- 100 Mbit/s全双工传输中，由电缆和中间组件引起的可能带宽限制。
- 可能由中间组件导致的信道衰减过大（电缆对衰减的影响应已通过第7.2.1条所述的电缆测试进行评估）。

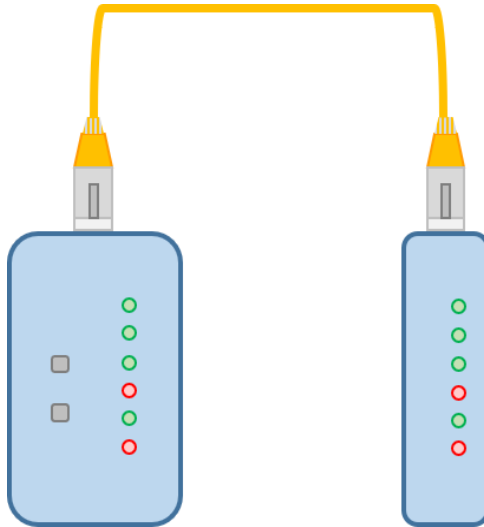


图 44：使用功能测试仪设备进行电缆鉴定

建议对所有信道进行功能测试，包括不同于无源连接器基础设施组件（如滑环或介质转换器）的功能测试，尤其是之前没有经过组件制造商针对EtherCAT应用测试过的基础设施组件。测试应始终在基础设施组件的最差的运行条件下进行（例如，在特定应用预期的滑环最大转速下）。

7.2.3 验收测试

第5.3条所述的信道参数（如IL或NEXT）可以通过合适的高端测试设备作为频率函数进行测量（如图45所示）。通过这些测试设备，可以确定详细信息，如：

- 信道IL，作为不同组件（电缆、中间连接器、基础设施组件）引入的衰减的总和。
- 信道NEXT，即相邻对线之间的影响程度。

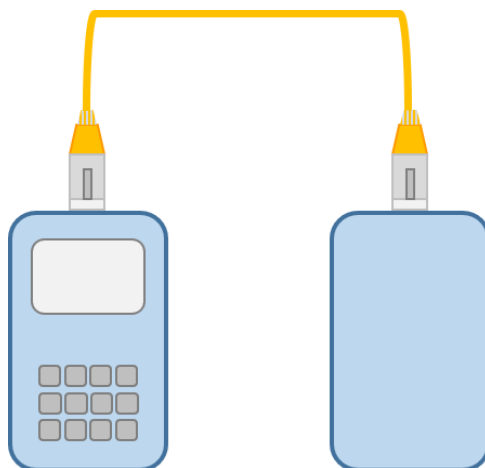


图 45：使用验收测试仪进行电缆认证

如果NEXT值非常高，则不可能进行精确的测量：因此，NEXT值大于40dB应被视为良好性能的指标。如果是短电缆，ACR值大于30dB即可。

验收测试通常需要非常昂贵的测试设备。根据第5.3条所述结构化布线规则的应用，以及对所有信道组件（电缆、中间连接器、基础设施组件）物理参数的精确了解，通常无需直接测量信道物理参数。因此，在调试阶段，通常无需对EtherCAT网络内的所有信道进行验收测试。

只有当组成信道的组件物理参数未知的情况下，并且检测到第7.4条所说的通信错误时，才需要在EtherCAT网络调试阶段进行验收测试。

给设备制造商的提示

相反，强烈建议所有非EtherCAT设备的基础设施组件（如滑环或介质转换器）制造商通过合适的设备测量物理参数作为频率的函数进行测试。

测试应测量组件输入点和输出点之间的物理参数，并应当包括所有中间组件（电缆、金属触点、中间连接器），如图46所示。

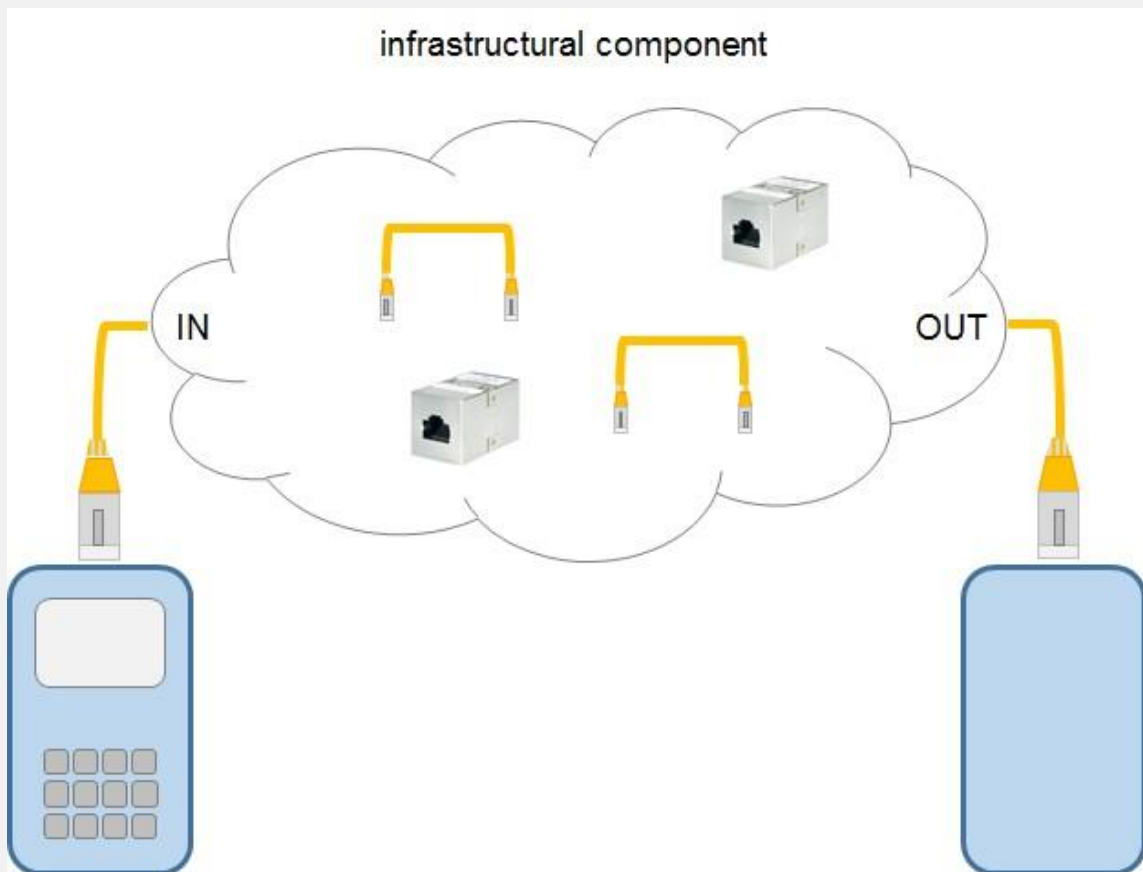


图 46：基础设施组件的参数测量

测试应始终在组件数据表或文档中规定的最差运行条件下进行。

测试结果也应在组件数据表或文档中报告，以便向用户提供正确规划信道所需的信息，而无需在网络调试阶段进行功能测试。

7.2.4 信道测量检查表

测量通信电缆时，可使用表17中报告的检查表：

表 17：信道测量检查表

步骤	内容	确认
1	电缆测试	
1.1	电缆的引脚分配是否正确（根据第6.4条）？	<input type="checkbox"/>
1.2	是否避免了不同导线之间或导线与屏蔽之间的短路？	<input type="checkbox"/>
1.3	电缆电阻是否符合容许值（根据第5.4条）？	<input type="checkbox"/>
2	功能测试	
2.1	测试帧的发送和接收是否正确？	<input type="checkbox"/>
3	验收测试	
3.1	每个信道的电缆衰减（IL）是否符合规定值（根据电缆规范/测试测量）？	<input type="checkbox"/>
3.2	每个信道的电缆近端串扰（NEXT）是否符合规定值（根据电缆规范/测试测量）？测量50dB及以上范围的值无需完全匹配，较高即可。	<input type="checkbox"/>

7.3 接地系统的测量

在EtherCAT网络的调试阶段，应始终使用标准万用表检查接地系统的实施情况。

测量的范围应验证EtherCAT网络中可能影响通信性能的每个组件是否正确连接到系统接地。所有直接或间接涉及网络基础设施的组件正确接地将防止电流回路从而影响通信。

检查接地系统时，可使用表18中报告的检查表。

表 18: 接地系统检查表

步骤	内容	确认
1	测量每个机柜和本地接地之间的阻抗是否 $< 0,1 \Omega$?	<input type="checkbox"/>
2	测量网络中不同位置的不同本地接地之间的阻抗是否 $< 0,1 \Omega$?	<input type="checkbox"/>
3	测量每个设备的PE引脚（如有）与本地接地（如DIN导轨或金属安装支架）之间的阻抗是否 $< 1 \Omega$?	<input type="checkbox"/>
	如果没有PE引脚，设备是否以另一种方式（如设备背面的金属夹，或与安装螺钉的金属接触）连接到本地接地，测量阻抗 $< 1 \Omega$?	<input type="checkbox"/>
4	测量每个EtherCAT连接器的金属部分（断开EtherCAT电缆）与本地接地（即DIN导轨或金属安装支架）之间的阻抗。 如果测得的阻抗非常高，但不是开路（即M Ω 量级），则不应进行进一步检查。 如果测得的阻抗较低，则应 $< 1\Omega$ 。如果不是这样，则应检查电缆屏蔽层是否已经使用了阻抗极低（ $< 0.1\Omega$ ）的合适电缆夹连接到机柜或设备底架。 如果测得的阻抗为开路，应检查电缆屏蔽层是否已经使用了阻抗极低（ $< 0.1\Omega$ ）的合适电缆夹连接到机柜或设备底架。	<input type="checkbox"/>

7.4 EtherCAT 特定诊断

所有EtherCAT从站设备以错误计数器的形式提供硬件级别的诊断信息，这些错误计数器由ESC的标准寄存器报告和计数。

EtherCAT主站或主站配置工具应提供相应的功能，允许用户监控ESC的硬件错误计数器。例如，通过主站配置工具内的监控窗口或从PLC程序读取错误计数器值的功能块的形式来实现。

在调试阶段，应经常广泛检查硬件错误计数器，以检测通信错误，定位问题或关键点，并在网络规划或安装发生变更时进行检查。调试阶段的错误计数器监控应在机器或工厂的所有可能的运行条件下进行。

每当网络通信开始出现问题时，还应在机器或工厂的生命周期内检查硬件错误计数器。

7.4.1 丢失链路计数器

当相应端口检测到信道连续性中断时，ESC会增加每个丢失链路计数器。表19描述了链路丢失计数器。

表 19: 丢失链路计数器寄存器

物理地址	含义	大小
0x0310	丢失链路计数器端口 0	1字节
0x0311	丢失链路计数器端口 1	1字节
0x0312	丢失链路计数器端口 2	1字节
0x0313	丢失链路计数器端口 3	1字节

由于物理介质不会中断，因此在机器或工厂运行期间，这些计数器不会增加，除非一个或多个设备故意断电或与断开网络连接。

7.4.2 物理层错误计数器

当相应端口（用于100BASE-TX和100BASE-FX信道的PHY芯片）的相应物理层接口报告symbol错误时，ESC增加每个物理层错误计数器。这表示信号损坏。

Symbol错误表示根据使用的特定硬件编码方法，物理层接口无法识别特定的位序列为有效的位序列之一。即使没有帧传输，也会在物理介质上发送 idle symbol，EtherCAT帧内外都可能发生物理层错误。物理层错误计数器如表20所示：

表 20: 物理层错误计数器寄存器

物理地址	含义	大小
0x0301	物理层错误计数器端口0	1字节
0x0303	物理层错误计数器端口1	1字节
0x0305	物理层错误计数器端口2	1字节
0x0307	物理层错误计数器端口3	1字节

完全无错误的数据传输在物理上是不可能的。在工业环境中，误码率 $1 \cdot 10^{-12}$ 通常被视为性能良好的指标。因此，与此误码率值兼容的物理层错误计数器偶尔增加通常不是问题。相反，可以通过物理层错误计数器的快速或突增作为临危状态的检测。

7.4.3 帧错误计数器

当相应端口在执行循环冗余检查而检测到错误时，ESC会增加每个帧错误计数器（也称为CRC错误计数器）。

当从外部接收帧时，循环冗余检查始终由每个ESC端口执行。帧错误计数器如表21所示。

表 21：帧错误计数器寄存器

内存地址	含义	大小
0x0300	帧错误计数器端口 0	1字节
0x0302	帧错误计数器端口 1	1字节
0x0304	帧错误计数器端口 2	1字节
0x0306	帧错误计数器端口 3	1字节

完全无错误的数据传输在物理上是不可能的。在工业环境中，误码率 $1 \cdot 10^{-12}$ 通常被视为性能良好的指标。因此，与此误码率值兼容的帧错误计数器偶尔增加通常不是问题。相反，可以通过帧错误计数器的快速或突增作为临危状态的检测。

由于物理层错误计数器可以在帧内外增加，而帧错误计数器只能在帧内增加，因此在外部随机干扰的情况下，应长期观察物理层和帧错误计数器的增加情况。物理层错误计数器激增，但相应的帧错误计数器却没有增加，则表明设备内可能存在电气问题。

8 总结

通信基础设施代表机器或工厂的核心：它决定控制器和现场设备之间可以交换的数据量、可以达到的最小周期时间以及不同组件的同步程度。

对于EtherCAT网络，通信基础设施的实施包括三个阶段：

- 规划。规划阶段的范围是提前检查和定义决定机器或工厂架构的所有方面。它的任务是定义环境条件（特别注意关键点）、选择EtherCAT设备、确定硬件连接尺寸、选择电缆和连接器以及合适的基础设施组件。
- 安装。安装阶段旨在将规划阶段产生的指示正确转化为实际的网络基础设施。核心任务是从机械和电磁角度为通信基础设施提供适当的保护，并正确安装通信基础设施的组件，如连接器。
- 调试。应始终测试通信基础设施的正确实施，以便立即检测规划错误和安装缺陷。首先可以通过现成的测量设备进行简单测量来检查网络基础设施。如果网络中存在特别关键的点，可以使用更复杂的仪器进行更深入的测量。EtherCAT设备提供的广泛诊断信息允许在网络基础设施内定位错误和关键点。

规划、安装和调试阶段的所有结果都应包含在机器或工厂的文档中，以便快速检测基础设施参数和运行的变化，从而在机器或工厂本身的生命周期内更容易进行维护。