飞纯电缆 · FLEXIBLE CABLE ENGINEERING / 柔性电缆工程能力

飞纯电缆为什么更懂柔性电缆？从“能弯”到可验证动态寿命的系统工程

真正的柔性电缆专业性，不是把导体做细、护套做软，也不是给所有移动场景套用同一个“弯曲次数”。它要求同时解决导体疲劳、成缆稳定、轴向承力、抗扭、耐磨、EMC、光纤微弯、卷筒散热、端接和现场电缆管理。

A rigorous engineering guide to Feichun high-flex, tensile-resistant, torsion-stable and abrasion-resistant cable systems for reeling, festoon, drag-chain, mining, robotic and port-crane duties.

Anhui Feichun Special Cable Co., Ltd. 安徽飞纯特种电缆有限公司 · Hefei Economic and Technological Development Zone Comprehensive Bonded Zone, Anhui, P.R. China · 2026-08-14

CONTENTS / 目录

1. 结论：专业性体现在哪里
2. 六级柔性工况不能混为一谈
3. 从输入到验证的工程闭环
4. 导体：Class 5/6不是终点
5. 成缆：控制芯线迁移与剩余扭矩
6. 承力与抗扭：不让铜承担全部机械载荷
7. 绝缘和护套材料如何选
8. VFD、屏蔽、PE与EMC
9. 动态光纤为什么难
10. 拖链、卷筒、拖令应用差异
11. 弯曲、拉力和卷筒转矩计算
12. 载流量、压降与短路热稳定
13. 动态寿命试验如何写得可比较
14. 耐磨试验与现场寿命的边界
15. 典型失效如何反推根因
16. 标准与认证如何专业表达
17. SCCT项目：工程能力的实证样本
18. 询价和FAT资料清单
19. 常见问题
20. 参考资料

1. 先说结论：飞纯的专业性不是“更软”，而是更会控制载荷

核心判断

柔性电缆首先是一套运动系统，其次才是一根电缆。如果不知道运动方式、半径、行程、速度、加速度、拉力、扭转、卷绕层数和环境条件，就无法负责任地承诺动态寿命。

飞纯的工程特点，是把问题拆成相互关联但不能互相替代的五条链：导体疲劳链、几何稳定链、机械承力链、电气/EMC链和验证证据链。设计目标不是在样品台上“弯得动”，而是在指定设备、指定半径、指定载荷和指定环境中维持导通、绝缘、屏蔽、接地、控制和光学性能。

Duty first
先定义运动与环境，再确定产品平台

Load path
让增强层承担机械载荷，铜负责导电

System EMC
VFD、PE、屏蔽、端接作为整机问题

Evidence
把“高柔性”写成可复现实验条件

2. 六级柔性工况：同样“会动”，破坏机理完全不同

图 1 — 柔性电缆工况分级：从安装柔性到复合动态载荷



不能用“同一根高柔性电缆 + 同一个循环次数”覆盖所有应用

IEC 60245-4:2026规定450/750 V及以下橡胶绝缘软线和柔性电缆的具体要求，但产品属于“flexible cable”并不自动等于适用于连续拖链、卷筒或扭转。[2] 连续动态能力必须由产品结构、目标工况和相匹配的动态试验共同证明。



3. 飞纯的工程闭环：从Duty Sheet到MRO可追溯

图 2 — 飞纯柔性电缆开发与交付闭环



4. 导体专业性：Class 5 / Class 6只是起点

IEC 60228:2023规定电力电缆和软线导体的标称截面、单线数量/尺寸和电阻要求，并包含柔性铜导体。[1] 但它是导体标准，不是整根动态电缆寿命标准。两条同为Class 6的电缆，可能因为单丝直径、束绞节距、复绞层级、绞向、压实程度、绝缘模量和端接方式不同而表现完全不同。

表 1 — 柔性导体真正需要同时控制的参数

参数	工程作用	设计过度或不足的后果	验证方法
单丝直径	影响局部弯曲应变和股线接触	过粗易疲劳；过细可能增加加工损伤、氧化和端接难度	截面、显微、R20与动态后电阻变化
束绞/复绞节距	决定股线滑移、圆整和柔顺性	过短增加材料与扭矩；过长降低几何稳定	结构解剖、节距测量、弯曲后变形
绞向组合	平衡层间剩余扭矩	不平衡会出现扭结、鼓包或“开瓶器”	自由悬挂扭转、往复试验、成品圆整
导体表面与润滑	控制单丝摩擦和材料兼容	摩擦过高加速磨损；添加剂不兼容会迁移	材料兼容、热老化、拆解观察
端接应力释放	让动态段与刚性端子平滑过渡	断丝常从压接端或夹具出口开始	端接拉力、截面、热循环和动态复验

5. 成缆专业性：核心是中性轴稳定和芯线不迁移

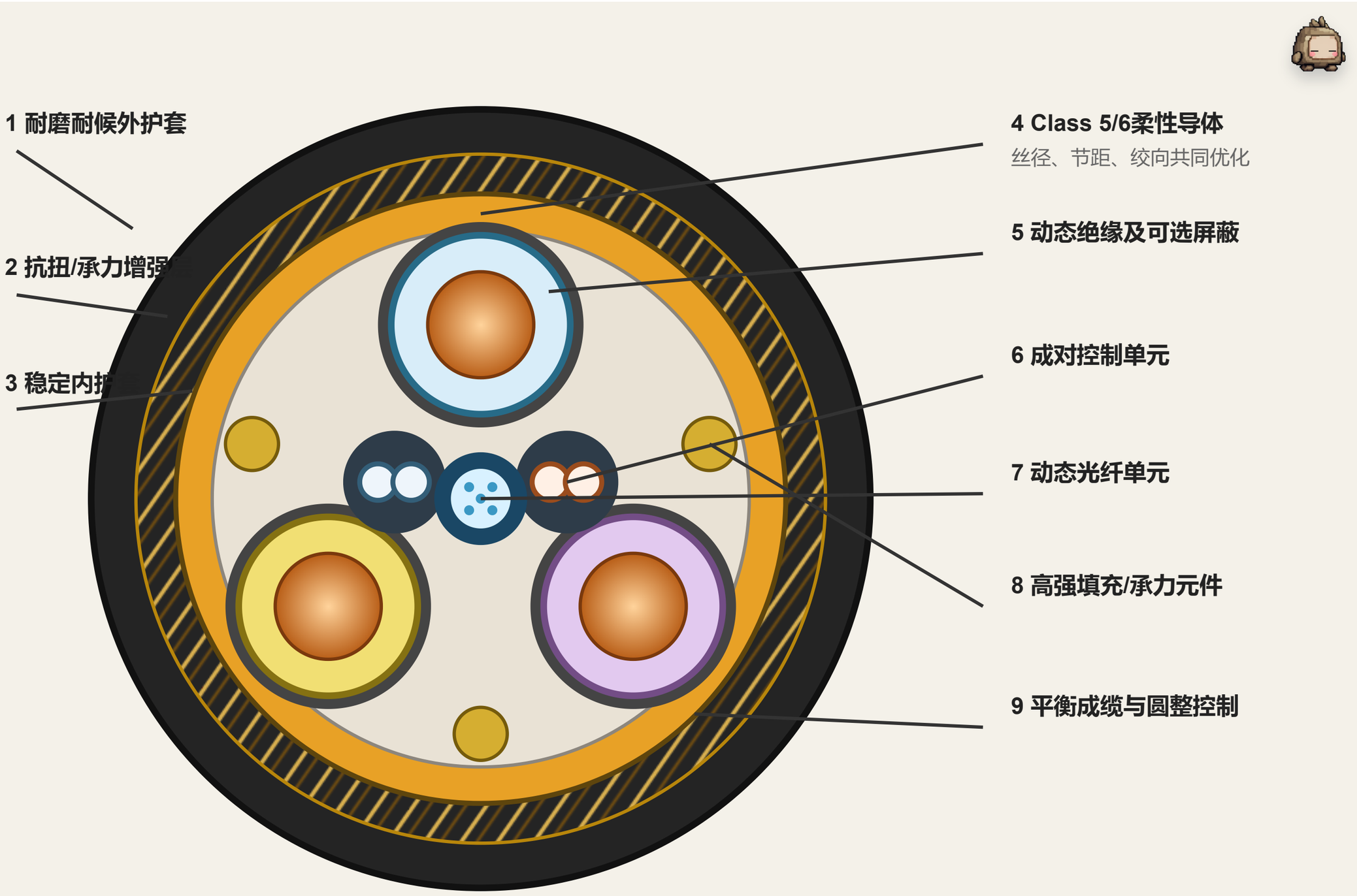
电缆弯曲时，截面外侧受拉、内侧受压，中性轴附近应变较小。芯线如果能在受控范围内进行微小相对位移，可以释放局部应力；如果填充太松、层间摩擦不稳定或绞合不平衡，就会发生轴向爬移、护套鼓包、股线鸟笼化或光纤微弯。

概念弯曲应变：ε ≈ y / R

y = 材料点到中性轴的距离；R = 弯曲曲率半径

这解释“半径越小、离中性轴越远，应变越高”，但不替代成品动态试验。

图 3 — 飞纯高柔性抗拉抗扭平台截面（概念结构）



概念平台：具体层数、材料和尺寸以项目批准图纸为准

6. 承力与抗扭：专业设计不会让铜导体承担全部拉力

动态电缆的铜导体应该主要承担电流，不应被当作牵引钢丝绳。飞纯会根据工况在中心填充、分布式纤维、内/外编织或护套增强中建立机械载荷路径，使拉力和扭矩分散到整个截面，并通过端部锚固把载荷真正传入设备结构。

中心承力

有利于轴向对称，但需控制中心元件与芯线之间的相对滑移、硬点和端部锚固。

分布式纤维

把载荷分散在填充/护套周向，保持柔性；材料用量、预张力和浸润需要稳定。

抗扭编织

同时控制周向变形和径向稳定；编织角、覆盖率和左右向平衡决定效果。

最常见的设计断点

增强层在电缆中间存在，却没有在终端被正确锚固，等于承力路径在最关键的位置中断。夹具只压外护套、端子承受整段悬垂拉力，都会让“抗拉电缆”在现场失去设计意义。

7. 绝缘和护套材料：不存在脱离工况的“最好材料”

表 2 — 常见动态电缆材料的工程比较

材料体系	通常有利的性能	必须验证的局限	常见适用方向
EPR / HEPR绝缘	柔顺、耐热、耐电气应力，适合橡套动态平台	配方、厚度、吸湿和工艺稳定性	矿用、卷筒、重载移动动力
XLPE绝缘	良好介电与热性能、尺寸效率	具体交联体系和成缆结构是否适应反复动态	高电气性能、动态要求经验证的设计
PCP / 氯丁橡胶护套	耐油、耐臭氧、耐候和重载橡胶手感	低温、耐磨、阻燃与配方老化	NSHTÖU、卷筒、拖曳
CPE护套	耐候、耐油和阻燃配方选择空间	不同牌号的柔性、温度和磨损差异	工业、矿山和户外动态
PUR / TPU护套	通常有利于耐磨、抗切口和外径效率	水解、阻燃、低烟、温度与加工窗口取决于牌号	拖链、自动化、紧凑型动态电缆
TPE弹性体	低温柔性、动态回弹和加工效率	耐热、耐油、阻燃、长期压缩形变	机器人、拖链和定制动态平台
LSZH / HFFR	低烟、低卤/无卤和低腐蚀气体方向	高填充可能提高刚度；不能自动等于高动态寿命	人员密集、隧道、船舶和特殊港机项目

8. VFD、屏蔽、PE和EMC：电缆必须放进整套驱动系统审核

IEC 61800-3:2022给出变速电力驱动系统及机床的EMC要求和试验方法。[5] 对港机、卷扬、输送机和大型移动设备，专业设计不应只问“有没有铜网屏蔽”，而应同时确定变频器输出电压边沿、电缆长度、电机绝缘、共模路径、PE阻抗、屏蔽覆盖率、360°端接、两端接地策略和轴承电流风险。

表 3 — VFD动态电缆的系统级审核

项目	错误简化	专业做法
屏蔽	“有铜网即可”	核对频率相关转移阻抗、覆盖率、动态疲劳和端接连续性
PE	只按导体截面看	核对故障回路、共模路径、对称PE结构与整机接地
端接	引出一根长辫线接地	高频下优先连续、低电感的360°屏蔽端接
控制线	与动力线同层随意布置	按I/O类型确定对绞、分屏蔽/总屏蔽、隔离和端子映射
动态寿命	只测试导通	运动前后比较R20、屏蔽连续性、绝缘、耐压与信号质量

9. 动态光纤：不断路不代表通信性能合格

光纤对微弯和宏弯非常敏感，内部余长太少会被拉伸，太多又可能在弯曲区形成微弯或相互挤压。IEC 60794-1-111:2023的弯曲方法以测量弯曲前后衰减变化为主要目的，并评估是否发生物理损伤。[6] 因此，飞纯的动态光纤验证应把“机械运动”与“在线光学监测”绑定，而不是弯完后只看外观。

动态光纤FAT建议

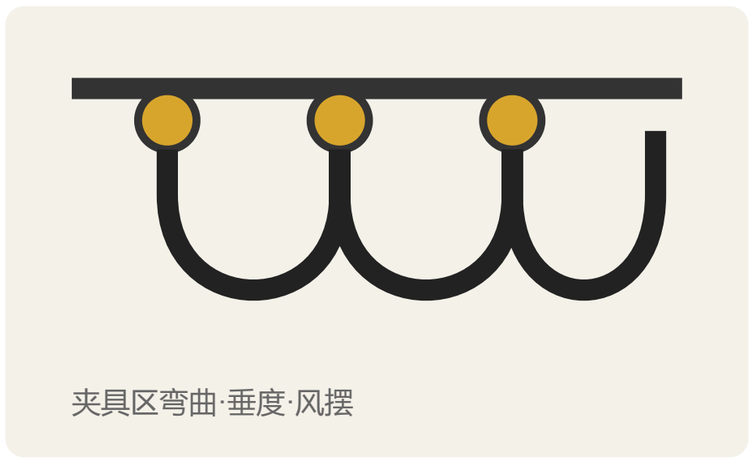
至少记录纤芯数量与类型、工作波长、初始插入损耗/OTDR基线、弯曲半径、行程、速度、拉力、温度、循环数、运动中最大衰减变化、试验后永久变化和端接状态。62.5/125 µm只能说明芯径/包层几何，不能单独完成OM等级、带宽和链路验收。

10. 拖链、卷筒、拖令：三种电缆管理方式不能互换



卷筒 / Reeling

主导问题：线拉力、导向角、滚轮、层间挤压、卷筒转矩和满卷热降容。



拖令 / Festoon

主导问题：悬垂回路、滑车同步、夹具压强、出口弯曲和侧向摆动。



拖链 / Drag chain

主导问题：固定平面高循环、填充率、分隔、自由移动余量和固定端。

11. 弯曲、拉力和卷筒转矩：用公式界定输入，不用公式虚构寿命

$$R_{min} = kD$$

k必须来自具体型号、运动状态和批准图纸；D为成品外径。

$$F \approx wL + ma + F_{friction} + F_{guide}$$

w为单位长度重量；L为受力长度；m为运动质量；a为加速度。

$$M \approx F \cdot r_{eff} / \eta$$

r_{eff}随卷绕层数变化；η包含传动与导向效率。

这些公式用于建立载荷预算，不直接给出“能弯多少次”。动态寿命需要材料S-N行为、实际结构、应力集中、温度、摩擦和试验数据。专业报价应把循环次数与试验半径、行程、速度、拉力和失败判据绑定。

12. 载流量、压降与短路：柔性不降低电气计算要求

IEC 60287-1-1:2023适用于稳态100%负载因子的载流量和损耗计算，并明确部分参数取决于电缆结构、环境条件以及制造商与用户的约定。[3] 卷筒多层绕组、周期工作和移动通风条件并不能简单等同于自由空气敷设。

$$\Delta U \approx \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot (R \cos\varphi + X \sin\varphi)$$

VFD输出还需考虑高频效应、谐波和允许电机端电压。

$$I \approx kS / \sqrt{t}$$

最终应按导体、绝缘、初末温度及IEC 60949的绝热/非绝热方法计算。[4]

卷筒电缆的高频错误

用样本中的自由空气载流量直接作为满卷长期电流。正确做法是至少给出最大卷绕层数、同时载流芯数、负载周期、环境温度、允许导体温度、卷筒通风和收放状态，再完成热校核或温升验证。

13. 动态寿命试验：循环次数只有在边界相同时才有意义

表 4 — 一份可比较的动态试验报告至少应包含什么

维度	必须报告	为什么
试样身份	Part No.、批次、结构、外径、长度、端接	避免不同结构共用一个结果
运动几何	弯曲半径/滚轮直径、行程、方向、导向角	决定应变幅和局部接触
运动学	速度、加速度、停顿、循环定义	决定惯性、发热和实际试验时间
机械载荷	拉力、悬垂、扭转角、夹具	弯曲与拉伸耦合会显著改变寿命
电气/光学	通电状态、电流、R20、绝缘、屏蔽、在线衰减	“外观完好”不等于功能合格
环境	温度、湿度、油、水、UV或盐雾预处理	材料性能与摩擦随环境改变
失败判据	断路、电阻变化、短路、护套裂纹、衰减上限等	决定“通过多少次”的含义

14. 耐磨专业性：知道试验能证明什么，也知道不能证明什么

ISO 4649:2024使用旋转圆筒装置测定橡胶磨耗，结果可表示为体积损失或耐磨指数，适合比较、质量控制、符合性和研发。更关键的是，ISO官方摘要明确提醒：**不能由该试验结果推断它与实际服役性能存在紧密对应**。[7] DIN VDE 0472-605则是电缆、绝缘线和软线的耐磨试验路线。[10]

飞纯的专业做法

材料级磨耗测试用于配方筛选，成品级滚轮/刮磨用于验证护套与结构，项目级试验再叠加张力、弯曲、温度和介质。只有三层证据组合，才能把“耐磨”从材料宣传变成系统能力。

15. 失效诊断：外观位置往往比“用了多久”更有价值

表 5 — 典型失效模式与优先排查顺序

症状	高概率机理	优先检查	纠正方向
夹具出口断芯	刚柔过渡过急、夹紧过度、应力释放不足	断口位置、夹具半径、端接拉力路径	增大过渡、重做锚固和夹具
护套螺旋/开瓶器	剩余扭矩、导向不良、芯线迁移	绞向、导向角、卷筒对中和扭转	平衡成缆、消扭和校正导向
滚轮侧单边磨损	偏转角过大、滚轮卡滞或沟槽不匹配	磨痕方位、滚轮轴承、槽径	机械对中与滚轮维护优先于换材料
导体电阻逐步上升	部分断丝、端子松动或氧化	分段R20、热像、压接截面	改善导体结构、端接和应力释放
VFD干扰/误动作	屏蔽端接、PE路径或线缆隔离不良	360°端接、共模路径、控制线布置	整机EMC整改，不只换“更厚屏蔽”
动态光纤间歇衰减	微弯、余长失控、夹具局部压迫	在线衰减与位置同步、OTDR基线	调整光纤单元、余长和夹具

16. 标准与认证：专业性在于不把名字当证据

DIN VDE 0250-813当前页面将其标为Trailing cable标准；DIN VDE 0250-814则对应NSHTÖU橡套柔性电缆。[8][9] 矿山项目还可能使用AS/NZS 1802、AS/NZS 2802或ICEA体系。[16][17][18] 这些标准路线针对不同电压、结构和应用，不能仅凭一个名称交叉替代。

FEICHUN GLOBAL COMPLIANCE POSITIONING

Engineered for maximum safety in demanding environments, our cable systems support applicable global compliance routes including ATEX, IECEx, VDE, CE, UKCA, EAC, and the Russian Fire Safety Certificate.

工程限定语：这是项目化合规能力矩阵，不表示每个型号自动同时拥有全部证书。

ATEX 2014/34/EU和IECEx主要围绕爆炸性环境中的设备、保护系统和组件，电缆还需与格兰、密封、接地、设备防爆型式和安装条件配套。[14][15] 对VDE、CE、UKCA、EAC和俄罗斯消防文件，也应核对准确型号、制造地点、标准版本、证书/声明编号、有效期及Scope。

17. SCCT项目：飞纯柔性电缆能力的实证样本

飞纯的专业性不仅体现在技术叙述，也体现在可追溯项目。PI 2025072408记录10项RTG动力、控制和光纤电缆；HBL PSE15218显示收货人为Suez Canal Container Terminal，卸货港和最终目的地为Port Said East，于2025年12月26日装船。HBL记录10 parcels、8,450 kg和11.900 CBM。[P1][P2]

这组清单的价值在于：它不是单一动力电缆，而是同时出现4G16、5G6、(4G6)C、1×70、(1×50)C、18G2.5、6×(2×0.5)、4G10和12G62.5/125 µm光纤，说明飞纯需要在同一RTG系统内协调动力、PE、控制、通信和机械动态要求。

表 6 — PI 2025072408全部10项技术条目（完整保留）

Line	原始技术描述	Part No.	Feichun Ref.	QTY
1	G-300716 GPG- M&R- RTGS, 4G16 for CRD & CRE for 10 RTGs	CF35.UL.160.04	W	620
2	G-300716 GPG- M&R- 5G6 control cable two pieces for CRD,E and two pieces for CRB	CF34.UL.60.05.D	W0052370	620
3	G-300716 GPG- M&R- RTGS, (4G6)C for CRB for 10 RTGs	CF35.60.04	W0052371	620
4	G-300716 GPG- M&R- RTGS, 1X70 for CRD,E,B for 20 RTGs	CF300.UL.700.01.D	W0052372	930
5	G-300716 GPG- M&R- RTGS, (1x50)C for CRB for 10 RTGs	CF310.500.01.UL	W0052373	2,790
6	G-300716 GPG- M&R- RTGS, 12G62.5/125 um fiber optics cable two pieces for CRD,E and two pieces for CRB	CF LG.	W0052374	620
7	G-300716 GPG- M&R- RTGS, 18G2.5 control cable two pieces for CRD,E and two pieces for CRB	CF900.05.222	W0052375	1,860
8	G-300716 GPG- M&R- RTGS, 6X(2X0.5) control cable two pieces for CRD,E and two pieces for CRB	CF900.05.219	W0052376	1,240
9	G-300716 GPG- M&R- RTGS, 1X70C for CRD,E for 10 RTGs	CF310.UL.700.01	W0052377	1,860
10	G-300716 GPG- M&R- RTGS, 4G10 for CRD & CRE for 10 RTGs	CF34.UL.100.04.O.PE.D	W0052378	310
累计QTY（原单未明示单位，不擅自写成米）				**11,470**

案例边界

PI与HBL证明供货和装船发运，不证明现场安装、投运时长或最终验收；本文不会虚构客户评价、运行小时或“零故障”结论。

18. 向飞纯询价和做FAT时，最好一次提供这些数据

运动数据

卷筒/拖令/拖链/拖曳/扭转；行程、速度、加速度、循环/天、工作制度。

几何数据

目标外径、卷筒芯径、滚轮/滑轮直径、最小半径、导向角、链腔尺寸。

机械数据

悬垂长度、稳态/瞬态拉力、扭转角、夹具、端接、安装方向。

电气数据

电压、负载、启动/制动、短路、VFD型号、开关频率、线长和接地。

信号/光学

I/O类型、对绞/屏蔽、阻抗、光纤类型、波长、带宽、连接器和链路预算。

环境与合规

温度、UV、盐雾、油、水、阻燃/低烟、目的国、标准和证书Scope。

建议写进采购单的条款

No substitution by conductor size alone. 替代产品必须匹配完整Part No.、批准截面、动态工况、最小弯曲半径、拉力/扭转能力、护套环境等级、电气/光学性能、FAT方法和证书Scope。

19. 常见问题

▼ 柔性电缆与高柔性电缆有什么区别?

“柔性”可能只表示导体较软或适合移动连接；“高柔性”如果用于连续运动，还必须给出运动方式、弯曲半径、行程、速度、加速度、拉力、扭转、温度、循环次数和失效判据。没有试验边界的“高柔性”不能横向比较。

▶ Class 6导体是否一定比Class 5更耐弯?

▶ 拖链、卷筒和拖令电缆能否互换?

▶ 电缆最小弯曲半径是不是固定为6D或10D?

▶ PUR护套是不是一定比橡胶护套更耐用?

▶ 为什么卷筒上的电缆需要降容?

▶ 耐磨试验结果能否直接换算现场寿命?

▶ 飞纯的ATEX、IECEx、VDE、CE、UKCA或EAC如何审核?

20. 参考标准与官方资料

标准状态与官方页面核对日期：2026-08-14。标准链接用于解释工程Scope，不表示任何飞纯Part No.自动取得相应认证。项目执行时应核对最新版标准、批准图纸、试验报告、证书Scope与批次文件。

[P1] Feichun Proforma Invoice No. 2025072408, dated 24/07/2025（项目文件）

[P2] House Bill of Lading PSE15218, shipped on board 26 Dec 2025（项目文件）

[1] IEC — IEC 60228:2023，绝缘电缆导体；包括柔性铜导体的结构与电阻要求

[2] IEC — IEC 60245-4:2026，450/750 V及以下橡胶绝缘软线与柔性电缆

[3] IEC — IEC 60287-1-1:2023，稳态载流量方程与损耗计算

[4] IEC — IEC 60949:1988，考虑非绝热效应的热允许短路电流计算

[5] IEC — IEC 61800-3:2022，变速电力驱动系统及机床EMC要求

[6] IEC — IEC 60794-1-111:2023，光缆弯曲、衰减变化与物理损伤测试

[7] ISO — ISO 4649:2024，橡胶旋转圆筒耐磨试验

[8] DIN Media — DIN VDE 0250-813:1985-05，Trailing cable / Leitungstrosse

[9] DIN Media — DIN VDE 0250-814:1985-02，NSHTÖU橡套柔性电缆

[10] DIN Media — DIN VDE 0472-605:1985-01，电缆耐磨试验

[11] IEC — IEC 60332-1-2:2025，单根绝缘电线电缆垂直火焰传播试验

[12] IEC — IEC 61034-2:2005+A1:2013+A2:2019，规定条件下电缆燃烧烟密度

[13] IEC — IEC 60754-2:2011+A1:2019，电缆材料燃烧气体酸度和电导率

[14] IECEx — 爆炸性环境设备认证体系官方说明

[15] EUR-Lex — ATEX Directive 2014/34/EU

[16] Standards Australia — AS/NZS 1802:2018，地下煤矿卷筒与拖曳电缆

[17] Standards Australia — AS/NZS 2802:2000，矿山和露天采矿用卷筒与拖曳电缆

[18] ICEA — ANSI/ICEA S-75-381 / NEMA WC 58等矿用便携与馈电电缆标准目录

[19] GOV.UK — CE与UKCA产品标识路径

[20] Feichun Cable — 矿用、卷筒、拖曳、拖令和拖链电缆产品平台



安徽飞纯特种电缆有限公司 — 柔性、卷筒、拖令、拖链及矿山电缆技术支持

技术支持 / TECHNICAL ENGINEERING
Tech@feichuncables.com

电话 / WHATSAPP / WECHAT
+86 13855123218

位置 / LOCATION
Hefei Economic and Technological Development Zone Comprehensive Bonded Zone, Anhui, P.R. China
安徽省合肥市经济技术开发区综合保税区

© 2026 Anhui Feichun Special Cable Co., Ltd. 安徽飞纯特种电缆有限公司 — All rights reserved.
本文用于柔性电缆工程选型、技术沟通和项目宣传，不替代批准图纸、项目规范、型式试验、FAT、证书Scope或当地法规。