

# 检测漆包线表面质量及电性能完整性

作者：Brian J. Alexander（Lear 欧洲区技术顾问）

漆包线的生产拥有超过一百年的历史，在欧洲及美国，漆包线分别被称作为绕组线及电磁线，两个不同的名字正好反映了其主要作用，即通过绕组线来制造磁场。早期的绕组线使用丝绸或棉花作绝缘层，其后发展到添加以天然树脂加油的清漆浸渍步骤，随着清漆的不断改良，丝绸及棉花的应用需要也逐渐减小，进一步发展更为我们带来现时兼备了强韧、富弹性、具绝缘性能及耐温等级达到 200 度或以上的合成涂层。

一百年前的漆包线生产工序在本质上与现时的没有任何分别，首先是铜线拉丝，然后是进入线漆池进行上漆，经过多余线漆的去除程序后进入固化炉，固化炉使溶剂挥发并在线上形成第一层树脂漆膜，接着是再次进入线漆池进行第二层的上漆工序，如此类推，直至达到所需要的漆膜厚度为止。一般情况下，涂层数可达十层之多。完成的线最后于表面上涂上小量的油或蜡，以帮助线从机器拉出时，能更顺畅的通过绕盘器绕于线盘上。

尽管工序变化不大，线漆的化学成分及铜杆的质量却一直在改良提升，同样地，涂漆的工艺也经过不断的优化。

线径约 0.15 毫米或以下，通常会使用卧式设备，通过毛毯控制，从仪表泵抽取适量的线漆以揩涂形式上漆。线径 0.15 至 3.00 毫米之间，仍然会使用卧式设备，但却会以模具来控制上漆部分。3.00 至约 5.00 毫米以下的，通常会利用立式设备，上漆部分由仅有数微米间隙的精确模具来控制。早期设备均通过烟囱将有机的溶剂及分解物排到大气层中，而现今的立式设备已配备了复杂的催化剂燃烧功能，将有机废物转化成热力，利用作炉温提升，而排出的废气更是无气味，符合环保原则。炉的长度更长，达到 10 米，另加 8 米的降温区域，而炉温更高，可达到 800°C。由于线漆的固化反应取决于时间及温度，这正反映了现今设备的线速，与旧式传统设备比较，有着非常显著的增加，以倍数来说，十倍的增加并不为奇。

随着线速及质量的改善，更大尺寸的包装需求也不断增加，现时漆包线厂家供应例如 1.00 毫米的线，采用高度接近 1 米、线承载重量达 850 公斤或长度 122 千米及收集时间长达 15 小时的线盘属非常普遍，见（图一）。



# 检测漆包线表面质量及电性能完整性

作者：Brian J. Alexander（Lear 欧洲区技术顾问）

伴随着线速增加，那些拥有自行开发、高运作要求的线圈绕线设备的用家们，需求出现前所未有的上升。线表面上的粒子类异常缺陷，或许曾可利用旧式绕线设备来配合使用，但这方法已经不再合时宜。在八十年代初期，应一美国漆包线厂家的要求，Lear Engineering 成功开发了便携式测量设备（Lear 测试枪），在九十年代初，Lear 再次受到厂家要求，开发可以在生产过程中，全程监测漆包线表面异常情况的程序，这要求引伸到一个非常有趣的问题，就是粒子的程度基本上是没有一个特别定义的，考虑到线表面质量问题时，业内均只简单地使用人手触摸及肉眼来进行检查判断，如对漆包线厂熟悉的，相信对在线盘收线前，以人手食指跟拇指触摸线表面来监测的情景绝对不会感到陌生，但以这样的方法，判断便会变得非常主观，同样的粒子出现在线速每分钟 250 米的细线上与线速每分钟 60 米的粗线上，感觉是会截然不同的，现行并没有特别针对粒子作出量方面的界定，Lear 必需寻找出方法，制造对漆包线生产厂家及用家均存在实质意义的的数据，并符合他们通过手指触摸测试所推断出来的信息。另外随着线速的增加，线本身会变得灼热，触摸测试也经常变得无法实行。

由于典型的漆包线厂家，一般也拥有最小 150 条的生产线，Lear 迅速意识到，若全线进行个别并持续的监测，价钱绝不能高昂。另外，漆包线的生产环境确实不能称得上非常理想，故设备也必须坚固而且无需维修。这样的条件，采用光学非接触类系统便变得不甚合适，因牵涉的前期资金及后期维护需求将会非常之高。

在讨论解决办法之前，我们先考虑一些会伴随电击穿一起出现的表面问题，这些问题最明显的成因莫过于铜线的表面质量及形状原本已出现了问题，假如表面粗糙或平切面非标准圆形，漆膜便会出现不均匀现象，漆膜较厚的部分会出现溶剂难于挥发，继而造成粒子，而漆膜较薄的部分，便会出现电性能方面的缺陷。

现在大多数漆包线均采用基本规格 8 厘米的铜杆，铜杆使用传统的设备进行拉丝，并通过接触式槽轮退火器进行退火处理，对整个过程中必须密切检视，因损坏的拉丝模具或绞盘或退火器中的电侵蚀均可对铜线造成破坏。拉丝的速度通常为每秒 25 米。完成的线便会用作漆包机器的进给线，一般规格为 2 毫米，进给线在内置的小型拉丝机器中，通过 8 或 10 个模具，再次以较慢的线速进行拉丝，并达到所需的线径，通过第二次拉丝所产生的表面问题将不会被去除，并残留在线的表面，任何出现的铜刺，部分或全部会从刺穿漆膜，形成电性能缺陷，亦可能造成粒子情况。



卧式漆包线生产设备

# 检测漆包线表面质量及电性能完整性

作者：Brian J. Alexander（Lear 欧洲区技术顾问）

假设铜方面的基本问题能解决，涂漆过程仍然会出现问题。漆包线涂漆是一个多次上涂的程序，一般可多达 10 层，常见的方式有内里 7 层使用同一种漆，表面 3 层则使用另外一种，如果是自粘线的话，更有可能使用到第三种漆。通过浮于漆池的模具，控制每次线通过时适量的线漆附于线上，让每涂层能达到指定的厚度。若任何模具移位，便会做成涂层不均匀，一连串第粒子便由此产生。需留意的是，在同一时间可能会有多达 1500 个模具在同时运作，确保每个均正常运作是一件非常困难的事。

不同种类的线漆是互不相容的，小许的溢出至涂漆器上便会做成不良涂层及粒子情况的发生。有时候在固化炉中发生断线的情况，是由于在高温下，线的拉伸度已达到极限，尤其是进给线本身已存在缺陷，断开的线会让烧焦的线漆残余物连同铜线的氧化物进入固化炉的空气循环系统，影响邻近生产线的模具，并带来严重后果。在某些国家，闯进的飞行昆虫也会构成问题，并间歇成为构成表面问题的原因。

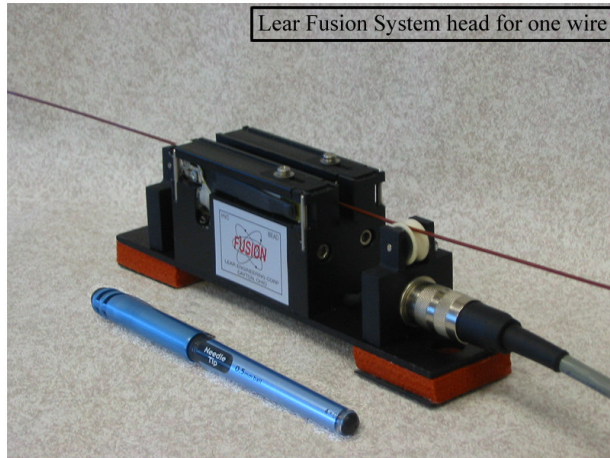
若曾见过漆包线设备，必然会知道其中需要使用到很多的滑轮及槽轮，一条生产线可有多达 20 个或以上之多，滑轮的轴承随着时间，会发生下沉迹象，并对生产线造成震动，导致异常表面情况出现。

众所周知构成粒子及电性能缺陷的原因很多，有些是可以透过称职的操作员来控制，但有些本身确实只发生于瞬间，无法加以控制，而我们主要考虑到的，便是无法控制的一类。凌晨四点，一连串的粒子出现在一盘非常大的线的中间，是非常容易被忽略的，直至被客户无意中发觉，暂时停顿生产作调整，但假若问题仍然没有得到改善，继而停顿的相信便会是相关生产商的订单。同样地，一连串的小粒子在线圈的空间系数上会有互相抵消的效应。

Lear 计划复制可让业内人士信赖的触摸式测试。如旧式唱盘的唱针碰到唱片上的灰尘发出声响，同样的原理是否可应用在漆包线的表面上？通过使用压电物料，接触点的移动会产生电信号，根据相关的线径、形状及线速，信号的电压便能显示表面质量，及任何让电压上升的粒子。由于避免破坏漆膜是非常重要的，Lear 首创使用超高分子量聚乙烯作为监测器感应槽的物料，用作与漆膜接触。遗憾的是该物料仍有不足之处，尽管其非常适合使用于慢速度设备的粗线生产，但若换到现今的高速设备，线会因速度而产生热量，并让物料的损耗非常之高。感应槽的闭合力非常之低（2 克），故使用陶瓷作为感应槽的物料很快地便被引进，得出效果也非常好，经过数千小时的测试，证实非常耐用，并且对漆膜不构成任何损坏，同样应用在较易损坏的自粘线漆膜上，效果也非常出色。

# 检测漆包线表面质量及电性能完整性

作者：Brian J. Alexander（Lear 欧洲区技术顾问）



圓线探头

（图二）粒子监测头安装于生产线润滑程序之前的位置，利用两头为 BNC 接头的同轴线与电子处理器连接。在处理器中，每个监测头所收集到的模拟信号会被过滤及放大，并进行数字化处理。在数据传送到电脑后，需使用键盘输入相关线速及线盘大小等。操作员并需设定可接受粒子大小的程度，及某线段中（一般为 30 米）可接受的粒子数量。警报系统能让操作员得悉有关过量粒子及其他缺憾方面情况的出现。

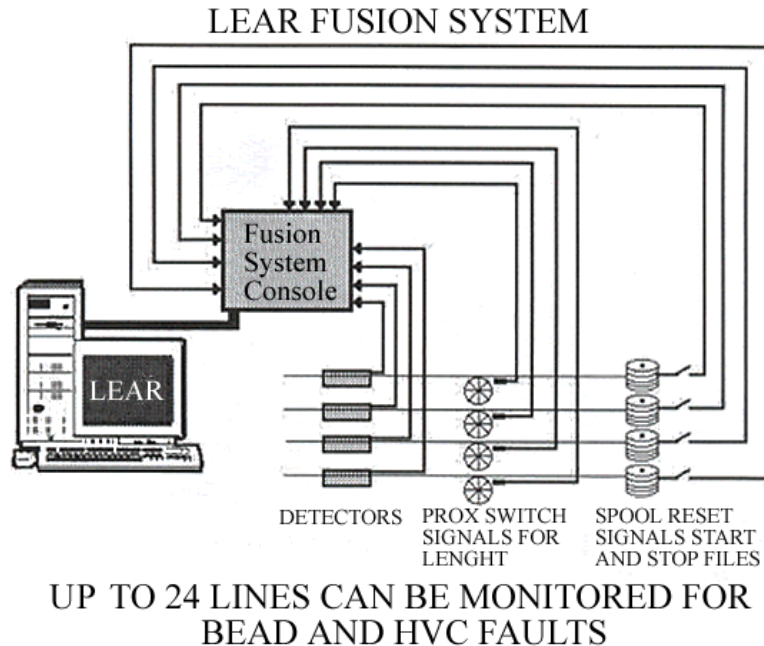
监测头所收集的信号可通过处理器进行修改及放大。操作员可按其经验及判断的习惯，对 Lear 系统作出改动，配合整个对粒子程度的判断方式。

在粒子监测系统诞生不久，业内已开始向 Lear 提出对另外一个主要线质量问题的监测要求，即通过漆膜针孔所引发的电击穿问题，并通过一个监测头，在生产过程中同步对线表面质量及高压持续性进行连续性监测。之前已提及到，粒子并没有一个特别的界定标准，但对非在线的高压持续性却是有的。（文献<一>）这些标准是基于在生产初期抽取的线样，进行静态式实验室测试，但标准对现存由其他公司所生产的在线高压持续性测试系统并不适用，对测试方法所产生的偏差亦已于前面提及到（文献<二>）。测试系统让线通过 3 个会进行电压测试的导轮，通常输进电压为 1500V，基于系统的构造，最多 50 毫米的线同时与导轮接触，测试的检查频率与分辨率必须对应此长度，以确保正确的缺陷数统计及电流记录。

Lear 所采用的方法是通过与线接触并用作粒子测试的感应槽，同时输出测试电压——“合成系统”的名字正源于此合成方式；电压是由监测头所产生，范围从 300V 至 3000V，分辨率为 0.1 微安培。感应槽的接触覆盖少于 1 毫米，此使缺陷的分辨率比其他方法要高。使用传导式陶瓷物料所开发的特别感应槽，直至今日已使用达 5 年之久，事实也证明非常成功。

# 检测漆包线表面质量及电性能完整性

作者：Brian J. Alexander（Lear 欧洲区技术顾问）



（图二）为 **Lear 合成系统的控制示意图**，相关信号通过处理器的处理后，传达至电脑，一台电脑能处理多达 24 条生产线的信息，以及每条生产线特有的信息，包括由收线器所提供的线速、大或小粒子的电压接受值、特定长度的线段可接受的大或小粒子数、测试电压、不及格电流值及特定长度的线段可接受的缺陷数。所有的线缺陷会与线轴相互关联，警报亦会预先设置好，让操作员对大小粒子及高电压持续性超标的情况受到警告。当线轴完成收线后，收线器会发出信号并自动终结线轴档案、重设数据并开启新档。对粒子、线缺陷及确实发生的位置都会提供总结报告，用于线轴的标签亦可按需要印制。

现在许多公司都会采用联网，让 Lear 系统的信息能从生产厂内，传送至质检及销售部门，让每线轴每一部分的质量资料都能在发运前获悉，此减低了废线及退货率，改善客户满意度，达到双赢局面，并于漆包线的历史中，首次让发运前确定每轴线的粒子及高电压持续性缺陷情况能否达到可接受水平。

除了增加线圈生产厂对所购买的漆包线质量上的信心外，对漆包线生产厂家也能带来相当利好之处。在生产过程中，对超标及接近超标的情况，生产厂能即时获得警告，让操作员采取补救行动。事实上只发运有认可的线，代表了客户信心的增加，让费用高昂的退货及赔偿变成历史。

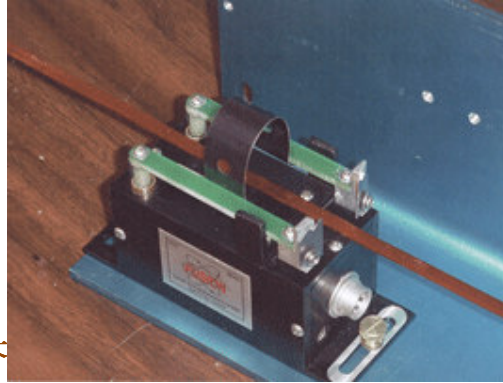
另一个让漆包线厂家意想不到的益处，是操作员可在过程中或多或少能观察到任何工艺改动所带来的效果，此因果关系，让操作员的技术上改进并提高生产力。有关表面质量的背景数据也证实非常实用，因为由损坏的导轮轴承或一般的定位错误而造成对线的震动，能即时被发现。拥有此预先的警报，操作员能在问题变得严重之前获悉，再次降低废线的发生率。

# 检测漆包线表面质量及电性能完整性

作者：Brian J. Alexander（Lear 欧洲区技术顾问）

如系统应用于方线或扁线上，监测头将有所不同，见（图4）。

扁线探头



一对感应槽会使用于与水平面接触，另一对则与垂直面接触。粒子与高电压持续性的信号以同样的方式输出，档案会提供在水平面及垂直面任何缺陷及其所在位置的资料。几乎所有扁线的生产者，都会利用回卷，让操作员人手检查每米所生产出来的漆包线，但现在完成扁线的资料报告让操作员很快地集中注意力于可能出现问题的地方，大大减少检查的时间，有问题的部分可以抽起，让正常的部分进行下一步工序，此对使用扁线于连续转置线缆（CTC）尤为重要，对变压器的设计带来很多有利之处，CTC 通常使用于价格高昂的电机设备，正因如此，整个生产过程都控制得非常严紧，扁线的表面质量及电性能完整性极其重要。

## 总结

一个在过出五年一直在进行研发的系统，首次让漆包线厂家能对每一米线的表面质量及电性能全面性进行测试，线径范围覆盖 0.15 到 5.00 毫米，更包括扁线的任何正常线径。

每线轴均设独立档案，并提供对粒子及高电压持续性缺陷的出现数量及位置的相关报告，同时还包含任何曾经出现过警报的相关资料，每线轴上每米线的性能均有完整的记录。

系统的接受程度亦非常显著，在过去五年已有多于 12 个国家、超过 2000 条生产线正在使用。

漆包线厂家可对所生产的每轴漆包线建立档案，尽管他们的焦点主要在出现问题的线，但在更广的层面来看，所有线轴的相关数据对反映厂的生产能力是非常重要的，对未来计划，亦可利用到所有的数据，让厂家认知厂的能力趋势，选择最合适的厂房配合特定的生产规模及结构，降低成本。

# 检测漆包线表面质量及电性能完整性

作者：Brian J. Alexander（Lear 欧洲区技术顾问）

再进一步的发展将会是 Lear “多头线径测量系统”，该系统为光学非接触类系统，并不采用的激光技术，数据处理采用与粒子及高电压持续性系统的同一台电脑进行。同样的系统已于其他工业有着数年的使用历史，但一些漆包线厂家由于规格上的要求越变重要，故亦对此系统表达了浓厚的兴趣。此系统尤为适合毛毯法生产细线上装备。

Lear 设备的软件是经过多年，由漆包线生产过程及质量方面的工程师无价的参与研发出来的成果，并一直作出定期的回顾及更新。



安裝在立式機



標準儀器櫃

## 文献

- (一) International Electrotechnical Commission  
IEC 60317 TC55
- (二) Dennis Swing September/October 2000  
“The Real World of Magnet Wire Tests”  
Wire & Cable Technology International