

欧洲 X 射线自由电子激光装置安装在一个总长为 3.4 公里的设施中，该设施大部分位于地下隧道

基于 PC 的运动控制在超导电子直线加速器中的应用

欧洲 X 射线自由电子激光装置的高精度、超高动态驱动控制

最近，在德国汉堡都会区正在建设具有开拓性意义的欧洲 XFEL 设施。中心将于 2017 年开幕，将容纳欧洲 X 射线自由电子激光装置，这台装置能够衍射超短 X 射线线束 — 每秒 27,000 次 — 且亮度比目前传统的 X 射线辐射源高出十亿倍。Beckhoff 基于 PC 的控制和驱动技术用于定位共 91 个电子加速器专用的高精度磁铁组件（波荡器）。



欧洲 XFEL 助理研究员 Suren Karabekyan 博士(左)向来自倍福吕贝克分公司的 Nils Burandt 解释波荡器更细微的物理结构细节

通过其像激光一样的 X 射线线束，欧洲 X 射线自由电子激光装置开辟了全新的研究领域，从而能够实现诸如纳米三维图像等功能，破译病毒和细胞的原子结构细节，并检查超快速的化学反应。该设施总长为 3.4 公里，大部分位于地下隧道，并将由汉堡的欧洲 XFEL 研究机构独立运营。它将供来自世界各地的研究小组进行实验研究。目前，已有十一个国家建设该装置：丹麦、德国、法国、意大利、波兰、俄罗斯、瑞典、瑞士、斯洛伐克、西班牙和匈牙利。

欧洲 X 射线自由电子激光装置的特点是，在超导加速器技术的推动下每秒种 27,000 束 X 射线线束的超高重复率。线束的波长为 0.05 至 6 纳米，其长度非常短，甚至可以看见原子结构的细节。由于持续时间不到 100 飞秒（1 飞秒 = 10^{-15} 秒），它甚至可以记录分子或磁化反转是如何形成的。激光的特性将使得在原子层三维成像成为可能。

被加速电子的 X 射线线束

X 射线线束形成的起始点是一个 1.7 公里长的超导线性电子加速器。电子束被加速到一个接近光速的高能量状态。加速度在被称为“谐振器”的特殊形状的空腔中发生。这一切可以实现超导，并衍射出 X 射线激光装置所需的一束非常窄且均匀的电子束。

被加速的电子全速通过波荡器 — 特殊的磁铁组件，它强制粒子通过一个严密的回旋过程。电子发射出 X 射线，射线因为光与电子的交互而进一步放大。由于光的传播速度比电子快，光“追赶并超过”粒子，并会在这一过程中对它们产生影响。其中一些电子被加速，另外一些则被减速，因此，这些电子构成了大量薄盘。盘内的所有电子现在同步辐射，产生超短、强烈的 X 射线线束，这些线束具有类似于激光的特性。

为了让这个自放大自发辐射（SASE）的原理生效，波荡器系统由多台设备构成，每台设备都位于一个扇形阵列式加速器的后面。欧洲 X 射线自由电子激光装置一开始将有 3 个波荡器系统 — SASE，1 和 2 各有

35 个波荡器单元，而 SASE 3 有 21 个单元。所有波荡器系统加一起的总长度为 555.1 米。

基于 PC 的运动控制系统提供精确的波荡器控制

波荡器由两个磁结构构成，且两者之间的距离 — 被加速的电子的恒定能量 — 最终决定了激光的波长。这使得驱动控制要求很高，正如欧洲 XFEL 研究协会的 Suren Karabekyan 博士所述的那样：“两台伺服电机用来移动两个磁铁结构中的一个。控制过程必须高度同步，以避免电子和光子束之间出现相移。这对我们即将进行的频谱光栅实验来说是一个关键的要求，顺序误差必须小于 1 微米。此外，必须确保磁铁结构距离方面的可重复性为 ± 1 微米，因为这保证了磁场强度的高再现性，因此，也确保了光子波长的高再现性。其目的是为了使用标准的工业自动化系统满足这些严苛的要求。在为期数月的评估阶段，Beckhoff 基于 PC 的控制和驱动技术成为理想的候选方案。”

集成有运动控制功能的高性能 TwinCAT 软件具有很多优点，正如 Suren Karabekyan 博士下面所解释的：“借助 TwinCAT 能够实现高精度、高动态的驱动控制系统，有可能与多根轴完全同步。甚至可以满足我们的最多具有 35 个单元的长波荡器系统的高同步性要求。SASE 段内对波荡器控制的要求也很严格，这是因为对即时测量光子能量进行的使用需要最大限度地同步一个段内的所有波荡器的磁铁结构距离。一个典型的例子是新加坡樟宜机场的‘雨之舞’项目，其中有 1200 多根的伺服轴通过 TwinCAT 同步和控制。我们目前正致力于此，由倍福的专家团队提供专门的支持。”

大量波荡器单元需要复杂的自动化系统

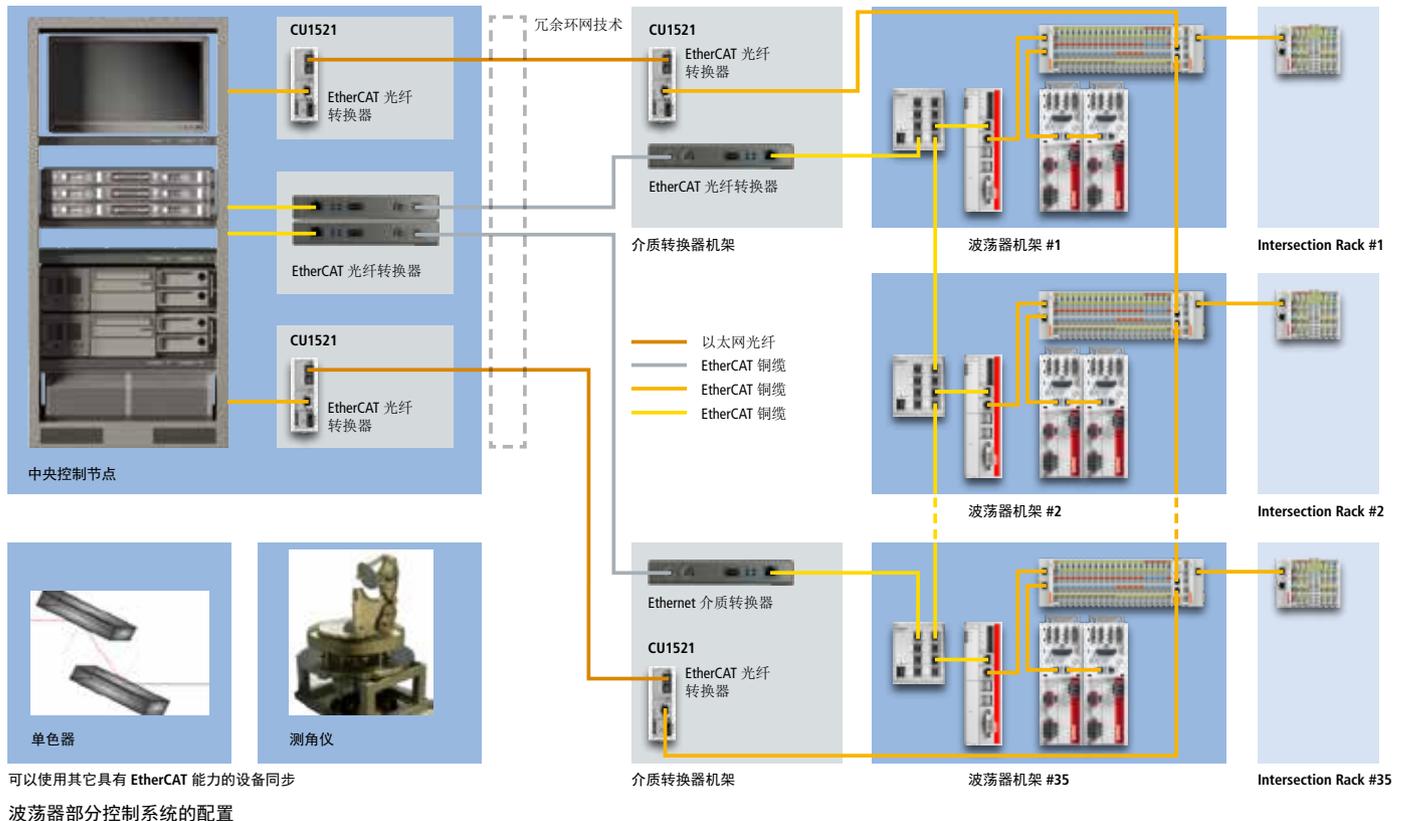
SASE 波荡器段使用 19 寸抽拉式工业 PC C5210 控制。它们通过具有电缆冗余的 EtherCAT 环拓扑结构联网。由于隧道长达数公里，因此必须使用光纤电缆。此外，每个 SASE 段中的波荡器单元通过菊花链形式的以太网互相链接。在每个波荡器单元中，控制柜式 PC C6925 通过 TwinCAT NC PTP 控制用于 4 个 AM3052 伺服电机的 2 个 AX5206 伺服



91 个波荡器单元的每一个都由基于 PC 的控制系统控制系统由一台控制柜式 PC C6925 (右) 大量 EtherCAT 端子模块 (中间) 以及 2 个 AX5206 伺服驱动器 (左) 构成



每个波荡器单元共有 4 个 AM3052 伺服电机 — 通过 TwinCAT NC PTP 控制 — 确保磁铁结构精确定位 (图片显示的是上面磁铁结构的两个电机)



驱动器。工业 PC 还控制三个步进电机 — 两个用于四极动子，一个用于移相器。移相器电机与伺服驱动器同步运行，并校正各个波荡器单元之间电子和光子束的相位。针对所需的 I/O 数据，每个波荡器单元提供 35 个 EtherCAT 端子模块、模拟量和数字量 I/O、以及脉冲、编码器和桥接端子模块。总体来说，基于 PC 的控制解决方案由三台 19 英寸抽拉式工业 PC C5210、91 台控制柜式 PC C6925、182 个 AX5206 伺服驱动器、364 个 AM3052 伺服电机以及约 3200 个 EtherCAT 端子模块构成。

据 Suren Karabekyann 博士介绍，其结果是 91 波荡器单元构成了一个结构紧凑、功能强大的控制系统：“无风扇型控制柜式 PC C6925 非常紧凑。这是我们能找到的具有足够的计算能力来处理一个波荡器单元内所有控制任务的最小单元。这些操作包括用于控制磁铁结构的主从轴之间的高精度同步，以及在磁铁距离变化方面移相器的精确同步。用于实现 STO 和 SS1 安全功能的 AX5206 伺服驱动器的 TwinSAFE 选项卡 AX5801 提供的系统集成的安全技术具有更多优点。这种高性能的控制和驱动技术能够定位重量较重的组件，如具有高磁力（约 100000 N = 10 吨）的波荡器磁铁结构，或重约 60 公斤的四极动子，以确保精度达到微米。” Suren Karabekyan 博士总结道：“EtherCAT 通讯是我们设施的关键部分。它让我们能够配置一个非常强大和可靠的具有冗余环网拓扑结构的控制系统，即使在一个大型装置中，如我们的设施。总体而言，这是一个经济高效的解决方案，这一点在由公共研究资助研究项目的背景下特别重要。此外，我们总是随时能够从倍福专家那里得到最佳支持。”

更多信息：

www.xfel.eu

www.beckhoff.com/motion