arXiv:2611.31086v1 [physics.acc-ph] 23 Nov 2026

# EuXFEL 超导 TESLA 腔体压电器件运行优化

M. Grecki*、J. Branlard、M. Diomede、M. Herrmann、
C. Schmidt 德国电子同步加速器 DESY，德国汉堡

## 摘要

高 Q 因子的超导腔体需要进行精确调谐，以匹配射频频率，从而确保电磁场稳定并最大限度地降低射频功耗。在欧洲 XFEL（EuXFEL）加速器中，TESLA 腔体采用慢速调谐器（步进电机）进行粗调，并采用快速调谐器（压电执行器）进行微调，以补偿洛伦兹力失谐（LFD）和微音等扰动。

该系统中的关键部件压电执行器需要高电压（最高 100V）和大电流（最高 1A）驱动信号，才能有效补偿洛伦兹力失谐。然而，压电执行器容易受到过电压、过电流和过热的影响，因此必须加以保护，因为在完全组装的模块中更换受损的压电器件不可行。此外，压电器件引起的振动还可能影响机器的稳定性。

通过降低电压、电流和电流斜率，同时确保有效的洛伦兹力失谐补偿，优化压电激励可同时提高效率、可靠性和机器稳定性。本文探讨了 EuXFEL 中压电激励的优化，详细介绍了同样适用于其他超导腔体设施的方法和结果。

## 引言

EuXFEL 的腔体 [1] 采用步进电机调谐器和压电执行器相结合的方式进行调谐。步进电机负责粗调，而压电执行器则实现精调和洛伦兹力失谐（LFD）补偿。针对压电驱动，人们已提出并实施了多种策略 [2,3]。在 EuXFEL 中，采用了一种基于生成正弦电压脉冲的简单而稳健的方法（图 1）。这些脉冲通过精确调整幅度和时序产生，以抵消射频功率引起的腔体变形。该方法的主要优势在于其简便性和运行可靠性。

压电脉冲的关键参数——幅度、频率、相对于射频脉冲的时序以及直流偏置——均可调节。激励频率固定在约 300Hz，对应于腔体的机械谐振频率。射频脉冲期间的腔体失谐——具体而言，是场处于平顶阶段时的失谐
稳定后，可分为三个组成部分：静态、线性和二次（曲率）失谐（图 2）。采用 PI 控制方案迭代调整压电脉冲参数，以尽量减小这些失谐分量：脉冲幅度补偿线性失谐，直流

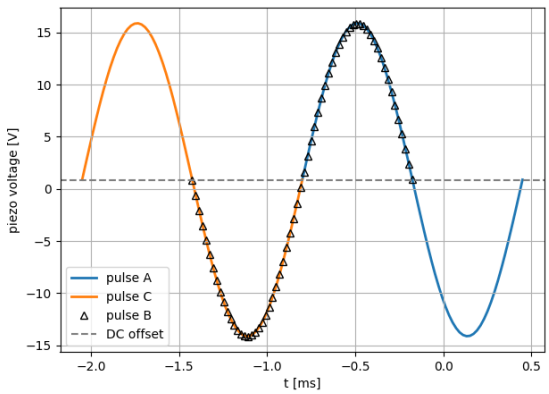


图1：参数搜索空间中的三个单周期压电脉冲示例（A、B 和 C）。

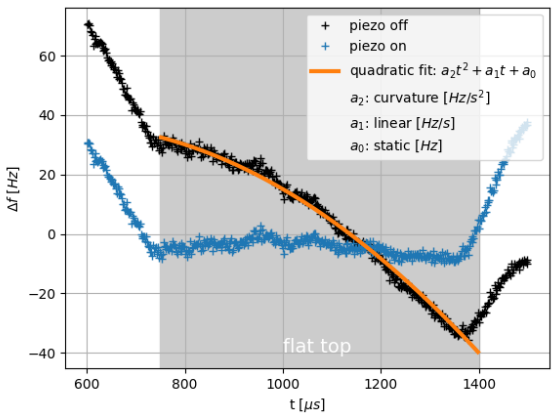


图2：射频脉冲期间的失谐曲线，以及在关闭（黑色）和开启（蓝色）压电自动化时失谐参数 静态、线性和曲率 的定义。

偏置用于校正静态失谐，而脉冲时序则用于处理曲率相关失谐效应（图 2）。

基于该算法的自动调谐程序已经实施，以实现射频平顶期间接近零的失谐。该方法的有效性如图1所示，其中展示了启用压电补偿时的失谐波形。

压电执行器的运行寿命受环境条件和激励参数共同影响。具体而言，温度、湿度和施加电压已被确定为关键因素 [4,5]。在 EuXFEL 的低温环境中，可以假定温度和湿度保持不变，因此激励电压成为影响长期可靠性的主要因素。

* mariusz.grecki@desy.de

由于压电执行器的寿命会随着工作电压的升高而呈指数下降，因此将激励电压降至最低对于最大限度地延长其耐用性至关重要。此外，运行经验表明，在压电脉冲开始时降低电流斜率有助于防止局部涌入电流，并降低由正向电热反馈机制引起热失控的风险。

以下各节将介绍压电脉冲参数的优化策略，其双重目标是最大限度地降低激励电压，并减小压电脉冲的初始电流斜率。

## 压电脉冲参数优化

为确定使补偿洛伦兹力失谐（LFD）所需激励电压最小化的条件，我们对单个射频站（EuXFEL 的 A23.L3）供电的全部32个腔体进行了系统表征，考察了各种压电驱动波形。在射频激励保持恒定的条件下（矢量和为650 MV，采用标准的 EuXFEL 射频脉冲形状），我们使用不同的压电脉冲配置对每个腔体进行了调谐。

我们探索了多种驱动策略，包括改变压电脉冲频率、相对于射频脉冲的时序和相位（图1，示例A、B和C）。此外，还测试了双周期正弦脉冲。

我们采用自动优化程序，扫描补偿洛伦兹力失谐所需压电脉冲参数的频率依赖性。对于每个脉冲频率，我们通过迭代调整脉冲幅度、时序和直流偏置电压来调谐腔体，使射频平顶期间的失谐分量最小化（图2）。目标是将静态、线性和二次失谐分量降至接近零；当三个失谐参数的绝对值均低于10 Hz时，即认为优化完成。此时记录所需的压电脉冲幅值，以供进一步分析。直流偏置电压并非关键参数，因为可以使用步进电机调谐器进行补偿。

## 压电信号平滑

平滑处理是通过截去正弦信号的初始部分，并用三次样条 [6]替代来实现的。形式化表示为，

$$u(t) = \begin{cases} p(t) & \text{if} \quad -T_0 \le t \le T/4\,, \\ \sin(\omega t) & \text{if} \quad T/4 < t \le 2T\,, \\ 0 & \text{otherwise}\,, \end{cases} \tag{1}$$

其中， $p$ 表示样条曲线函数， $T_0 + T/4$ 是样条曲线的过渡时间， $T$ 是正弦周期。图 3 展示了默认正弦脉冲与复合脉冲之间的差异。

复合压电电压信号中样条曲线部分的要求如下：

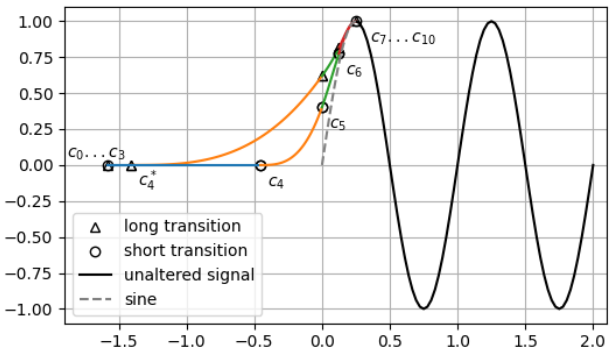


图 3：压电电压信号的比较。虚线：正弦曲线；Δ：过渡时间较长的三次样条的控制点；o：过渡时间较短的三次样条的控制点。控制点记为 $c_0 \ldots c_{10}$。重合的控制点位于各自样条曲线的起点和终点。为便于阅读，图中仅标出了过渡时间较短的样条曲线的控制点。控制点 $c_4$ 是用于优化的唯一自由参数，其中 $c_4$ 对应过渡时间较短的样条曲线， $c_4^*$ 对应过渡时间较长的样条曲线。

1. 正弦曲线与样条曲线的连接点处达到 $2^{\text{nd}}$ 阶平滑。2. 脉冲起始处达到 $2^{\text{nd}}$ 阶平滑。3. 使用一个自由参数来调整初始猜测。

这些要求构成了 $n_c = 7$ 个约束，需要使用 $n_c - d = 4$ 条互连样条曲线，其中 $d = 3$是多项式的阶数。

节点 $t_i$，即要求$p(t_i) = c_i$成立的时间点，是样条曲线初始猜测的设计选择，通过试错法确定（见图3）。

将节点 $t_4$ 选作优化参数或决策变量，以最小化代价函数

$$J = w \cdot T_0^2(t_4) + (1 - w) \cdot (\max\left(p_t(t_4)\right))^2\,, \tag{2}$$

其中， $T_0$ 为过渡时间，即样条曲线的持续时间； $p_t$为样条曲线在范围 $[t_6, t_7]$内的时间导数； $w \in [0, 1]$ 为加权系数，其中 $w = 1$ 对应最接近正弦曲线的信号， $w = 0$对应过渡时间最长的平滑样条曲线。优化后的压电电压信号是在过渡时间与最大浪涌值之间权衡的结果，加权系数选为 $w = 0$。5。

## 结果

压电脉冲参数优化的结果汇总于图4和图5。主要结论如下：

不同的脉冲配置会显著影响所需的压电脉冲幅值，变化幅度可达几十个百分点。

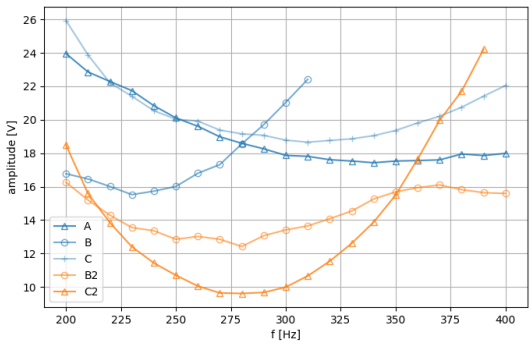


图4：针对三种不同的单周期正弦脉冲（标记为 A、B 和 C，定义见图1）以及两种对应的双周期脉冲（B2 和 C2），评估了补偿洛伦兹力失谐（LFD）所需的压电脉冲幅度。

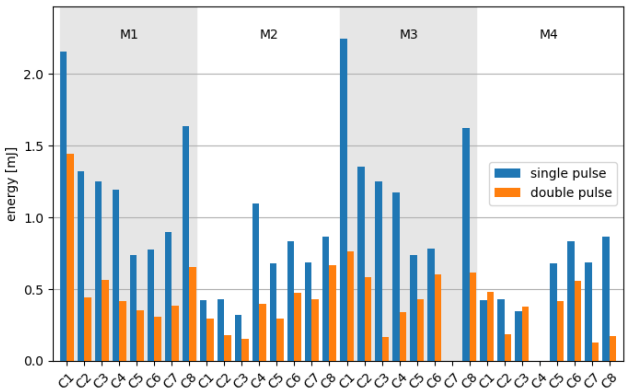


图5：通过采用频率和时序经过优化的双周期正弦波形，降低所需压电脉冲总能量（EuXFEL A23.L3）。

尽管最佳激励频率可能会因脉冲形状和时序而异，但它几乎不依赖于各个压电器件的具体特性。因此，为简化实施并确保标准化，已选定275赫兹这一代表性频率作为默认激励频率。

在测试的策略中，双周期正弦脉冲效果最佳。它们可将所需压电幅度降低约一半。由于注入能量与幅度的平方成正比，因此能量输入可降至四分之一。考虑到脉冲持续时间加倍，净能耗降幅约为一半。

在压电信号平滑方面，用平滑信号替代默认的正弦信号，使浪涌电流降低了约 80%，如表1所示。稳定时间和能耗几乎相同。

## 结论

从传统的单正弦电压转为双正弦波形，并对信号的前沿进行基于样条的平滑

表1：EuXFEL A23站32个腔体的压电信号平滑性能指标比较

| | 无平滑启动 | 有平滑启动 |
|---|---|---|
| 稳定时间 [秒] | 119.3 (± 2.6) | 119.9 (±0。4) |
| 能量 [mW] | 0.71 (± 0.45) | 0.71 (± 0.46) |
| 最大浪涌电流 [mA/s] | 200(± 63) | 33 (± 8) |

显著提高了压电控制效率。这一转变使能耗减半，并将浪涌电流降低了 80%，从而有效减轻电应力，提升系统稳定性和可持续性。重要的是，这一改变无需修改硬件或现有 PI 控制参数，且闭环稳定时间不受影响。该方法已在 EuXFEL 成功实施，在将压电激励所需能量减半的同时，没有对机器性能造成负面影响。下一版压电控制服务器将进一步平滑浪涌电流。

## 致谢

本研究部分经费来自欧洲 XFEL 的研发计划。本项目还获得了欧盟“地平线欧洲”研究与创新计划的资助，资助协议编号为 101131435。

## 参考文献

[1] M. Altarelli等，《欧洲 X 射线自由电子激光器技术设计报告》，DESYXFELProjectGroup，德国汉堡，报告编号 DESY 2006-097，2007 年 7 月，https://bib-pubdb1.desy.de/record/77248/files/european-xfel-tdr.pdf

[2] M. Grecki等，《XFEL 的压电控制》，*arXiv*，2018 年 3 月。doi:10.48550/arXiv.1803.09042

[3] W. Schappert 和 Y. M. Pischalnikov，《超导射频腔中洛伦兹力失谐的自适应补偿》，载于 *SRF'11* 会议论文集，美国伊利诺伊州芝加哥，2011 年 7 月，论文编号 FRIOA01，第 940–942 页。

[4] PI Ceramic GmbH，https://www.pi-usa.us/fileadmin/user_upload/pi_us/files/catalogs/Piezo_Actuator_Lifetime_Test_Reliability_结果.pdf

[5] P. Pertsch 等，“压电多层执行器的可靠性”，载于第*10*届国际新型执行器会议（*ACTUATOR 2006*）论文集，德国不来梅，2006年6月，论文P11，第527—531页。

[6] T. Lyche 和 K. Mørken，样条方法草稿。挪威奥斯陆大学，2008年。https://www.researchgate.net/publication/265866339_Spline_Methods_Draft