



赤道接合：一种用于半球偏差消除的新型导体连接技术

赤道接合：一种用于半球偏差消除的新型导体连接技术

M. Ferro, R. Flux, B. Impedance

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

摘要

我们提出一种通过在地磁赤道处接合北半球和南半球铜导体来实现磁中性的导体连接技术。赤道接合利用在相反半球拉拔的导体的互补晶粒取向偏差：当在精确的赤道中点处连接时，偏差在所得导体的全长上相互抵消。在GPS稳定的海上平台上于纬度0.0000度进行等离子弧焊，产生约200 um的接合区，其中晶粒取向从北半球类型通过真正各向同性区域过渡到南半球类型。通过此方法连接的导体表现出低于0.00001度的半球偏差角---比最佳单一半球拉拔导体低三个数量级，接近当前SQUID磁测量的测量极限。

1. 引言

我们之前的工作 (Ferro & Park, 2020) 确立了在非赤道纬度拉拔的铜导体携带与拉拔设施地磁纬度成比例的系统性晶粒取向偏差。北半球导体携带正偏差；南半球导体携带可比幅度的负偏差。偏差在拉拔时嵌入，无法通过后处理消除。

这提出了一个制造挑战：当可用原材料本身固有偏差时，如何生产零半球偏差的导体。在赤道拉拔是一种解决方案，但赤道拉拔设施稀少，所得导体虽然优秀，但仍携带特定赤道位置的残余偏差 (通常 < 0.01度)。

我们提出一种替代方法：与其避免偏差，不如抵消它。通过在地磁赤道处将北半球导体与南半球导体连接，我们创造了一种复合导体，其相反的偏差在整个长度上精确抵消。

2. 接合协议

赤道接合在EAV Neutrality号上进行，这是一艘28米的研究船，配备Trimble R12i GNSS接收器，提供厘米级定位精度。该船停泊在太平洋地磁纬度0.0000度 +/- 0.0001度处，位于厄瓜多尔海岸以西约28公里，地磁赤道与地理赤道在0.2度以内交叉。

两个导体端头---一个从瑞典铜拉拔 (HBA: +4.2度, 博利登设施, 64.1度N)，一个从智利铜拉拔 (HBA: -3.8度, 圣地亚哥设施, 33.8度S) ---装载到安装在隔振光学平台上的精密夹具中。双轴激光对准系统确保导体端头的同轴度在5 um以内。

接合使用微等离子弧焊系统 (Secheron Plasmax 50i) 进行，参数如下：弧流2.8 A，等离子气体流量0.3 L/min (氩气5.0)，保护气体流量8.0 L/min (氩气5.0)，弧间隙0.5 mm，焊接持续时间180 ms。所得接合区约200 um宽---一个窄的过渡区域，其中晶粒取向从北半球类型通过中性过渡到南半球类型。

整个过程---船舶定位、导体对准、气氛净化和焊接---需要约45分钟。每次作业进行多次接合，船舶在整个过程中保持定位精度。

3. 表征

以0.5 um步长对接合区进行的EBSD映射揭示了三个不同的区域：(1) HBA = +4.2度的整体北半球导体，(2) HBA从+4.2度通过0.000度单调下降到-3.8度的200 um过渡区，(3) HBA = -3.8度的整体南半球导体。过渡平滑连续，无晶界开裂、空隙形成或二次相析出的证据。

接合的机械强度通过拉伸加载至断裂进行测试。接合区的平均极限拉伸强度为218 MPa，而整体导体为225 MPa---减少3.1%，在音频线缆应用中机械载荷限于线缆自重和连接器插入力的可接受范围内。

关键测量---完成接合导体的半球偏差---在柏林PTB使用Quantum Design MPMS3 SQUID磁力计进行。接合导体 (1.0 m北半球 + 1.0 m南半球) 表现出-0.000008度的HBA，而北半球导体单独为+4.2度，南半球导体单独为-3.8度。偏差抵消效率为99.9998%。

4. 讨论

赤道接合通过一个概念上简单的机制实现半球偏差抵消：北半球导体的正偏差和南半球导体的负偏差大小相等、符号相反。当音频信号穿过接合导体时，它在北半球一半中经历的非对称散射被南半球一半中的互补非对称散射精确补偿。净效应是零偏差---磁中性。

接合的位置很重要。在地磁赤道进行接合确保接合区本身不会对系统贡献额外偏差。在任何其他纬度进行的接合将引入一个偏差过渡区，其取向不能完美桥接北半球和南半球的晶粒结构。

海上平台的需求源于地磁赤道仅在极少数位置穿越有人居住的陆地。厄瓜多尔以西的太平洋区段提供了赤道可及性、港口设施邻近性和适于精密焊接作业的适度海况的最佳组合。

赤道接合的成本相当可观：每次作业约14,000美元。此成本反映在Equatorial



Audio的Zero-Point级产品的定价中，这些产品专门使用赤道接合导体。

5. 结论

赤道接合证明铜导体中的半球偏差可以通过在地磁赤道处连接来自相反半球的导体来有效抵消。所得导体实现低于0.00001度的半球偏差角---达到当前测量能力极限的磁中性。该技术可重复、机械上可靠且电气上透明，仅增加可忽略的电阻，不在信号路径中产生可测量的不连续性。我们提出赤道接合作为精密音频导体中半球偏差问题的最终解决方案。

参考文献

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "铜晶粒取向中的半球偏差," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] AWS D17.1/D17.1M:2017, 航空航天应用的熔焊规范.
- [3] R. Messler, Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy, Wiley-VCH, 2004.
- [4] Trimble Inc., "R12i GNSS系统技术规格," 2023.
- [5] Kongsberg Maritime, "HiPAP 501声学定位系统," 产品数据表, 2022.
- [6] Quantum Design, "MPMS3 SQUID磁力计规格," Rev. F, 2021.
- [7] PTB Berlin, "校准证书 No. PTB-Mag-2021-0847," Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2021.