高频手术设备功率输出不同检测方法的对比分析

候飞翔

天津市医疗器械质量监督检验中心　天津　300380

摘　要：高频手术设备功率输出的准确测量直接关系手术安全，但在1.7MHz高频下不同检测方法的误差差异显著。本文依据GB9706.202-2021标准，在双极模式下分别采用示波器加电流探头和示波器加电压探头两种方法，在10Ω至1000Ω负载范围内采集数据并计算误差。结果表明，电流探头法在偏离额定负载时误差最高达31.3%，超出±20%限值；电压探头法在所有工况下误差均保持在±15.7%以内，完全满足标准要求。本文揭示了电流探头法在高频段失效的机理，为检测方法选择提供了实验依据。

关键词：高频手术设备；输出功率测试；电流探头；电压探头

引言：高频手术设备是现代外科手术中不可或缺的能量器械，其功率输出的准确性直接影响切割效率与止血效果，功率偏差过大可能对患者造成组织损伤风险。GB9706.202-2021明确规定高频手术设备在双极模式下的功率输出误差不得超过±20%。当前针对高频段功率输出检测方法的对比研究尚不充分，尤其在1.7MHz工作频率下，电流探头法与电压探头法的适用性缺乏系统的实验验证。本文通过对比实验，系统评估两种检测方法的误差特征与可靠性，为检测方法的合理选用提供科学依据。

1 高频手术设备功率输出检测标准与技术要求

1.1 GB9706.202-2021对功率输出的要求

GB9706.202-2021是高频手术设备安全性与基本性能的核心专用标准，明确要求设备在双极模式下的功率输出误差不得超过标称值的±20%，该限值是衡量设备性能是否合格的关键判据。标准规定了测试用负载电阻的范围和测试条件，要求在不同负载阻抗下分别验证设备的功率输出精度，以确保设备在临床典型工况下的可靠性。标准强调检测仪器应具备足够的带宽和精度，其测量不确定度不应影响合格判定。但标准未对具体检测仪器配置给出强制规定，为不同检测方法的对比研究提供了空间[1]。

1.2 高频手术设备的工作原理与输出特性

高频手术设备通过高频能量发生器将市电转换为300kHz至5MHz的正弦波电流，经电极作用于人体组织产生热效应，实现切割、凝固或混合功能。设备输出特性随负载阻抗变化：低阻抗下电流大但功率受限，高阻抗下电压升高而电流减小，存在最佳负载点使输出功率最大化，功率曲线呈先升后降特征。双极电凝模式下能量局限在两电极间，功率水平通常低于单极模式，但对精度要求更为严格。1.7MHz属高频段较高区域，对检测仪器的频率响应和探头高频特性提出了更高要求。

1.3 功率输出检测的基本方法概述

高频手术设备功率输出检测分为直接测量法和间接测量法。直接测量法使用专用分析仪直接读取功率值，但带宽限制可能影响高频测量精度。间接测量法通过示波器配合电压探头或电流探头采集信号，再换算功率值——电压探头法测量负载电压，电流探头法测量负载电流。两种方法在低频段结果一致，但在高频段受频率响应、寄生参数和电磁干扰影响，误差可能出现显著分化，需通过实验加以甄别。

2 实验方案与数据采集

2.1 实验设备与测试条件

本实验依据GB9706.202-2021标准要求在双极模式下进行测试。被测高频手术设备工作频率为1.7MHz，工作模式为双极电凝，额定输出功率70W，额定负载200Ω，输出设定范围0至100。检测设备包括：数字示波器（带宽不低于100MHz）、电流探头（标称带宽满足高频测量需求）、电压探头（标称带宽满足高频测量需求）、高频功率负载电阻箱（可提供10Ω、50Ω、200Ω、500Ω、1000Ω五种阻值）以及电刀分析仪QAES-II（标称带宽30Hz～2.5MHz）。实验在电磁屏蔽环境内进行，所有设备接地良好，探头校准在有效期内，以最大限度排除外部干扰因素对测量结果的影响。

2.2 实验方法与数据采集

实验分为两组进行。第一组采用示波器加电流探头法，将电流探头卡在负载回路中测量高频电流有效值，换算功率值。第二组采用示波器加电压探头法，将电压探头连接于负载两端测量高频电压有效值，换算功率值。每种工况在设备输出设定为50和100两档下分别测试，负载电阻依次为10Ω、50Ω、200Ω、500Ω和1000Ω。

每个测试点重复测量三次取平均值以减少随机误差。实测数据按照功率换算公式计算实际输出功率，并与制造商标称功率值比较，按照GB9706.202-2021的要求计算百分比误差[2]。

2.3 误差计算公式

电流探头法功率换算及误差计算公式为：换算功率值 = $(I/1000)^2\times R$，误差 = [(换算功率值-P标)/P标]×100%。其中I为实测电流有效值（mA），R为负载电阻（Ω），P标为制造商标称功率值（W）。电压探头法功率换算及误差计算公式为：换算功率值 = U^2/R，误差 = [(换算功率值-P标)/P标]×100%。其中U为实测电压有效值（V），R为负载电阻（Ω），P标为制造商标称功率值（W）。两种方法均采用相同的误差判定标准：误差在±20%以内为合格，超出该范围判定为不合格。

3 实验结果与数据分析

3.1 电流探头法测试数据分析

电流探头法在全部10个测试工况下的误差数据如表1所示。在输出设定为50时，误差范围为-27.3%至31.1%，其中10Ω负载（-27.3%）、50Ω负载（-20.3%）、500Ω负载（20.8%）、1000Ω负载（31.1%）均超出±20%限值。在输出设定为100时，误差范围为-22.5%至31.3%，其中10Ω负载（-22.5%）、50Ω负载（-22.0%）、1000Ω负载（31.3%）超出±20%限值。仅有200Ω负载在两组设定下误差分别为0.4%和1.7%，500Ω负载在大设定值下为1.6%，处于合格范围。全部10个测试工况中有7个超出允许误差，合格率仅为30%。

表1 电流探头法测试误差汇总

负载电阻(Ω)	输出设定50误差(%)	输出设定100误差(%)
10	-27.3	-22.5
50	-20.3	-22
200	0.4	1.7
500	20.8	1.6
1000	31.1	31.3

分析误差分布特征可以发现，电流探头法的误差呈现明显的规律性：低阻抗负载下误差为负值（测量值偏低），高阻抗负载下误差为正值（测量值偏高），误差绝对值随负载阻抗偏离200Ω而增大。这一规律暗示电流探头法在高频段受探头频率响应非线性和寄生电容旁路效应的综合影响，测量精度与回路阻抗之间存在强相关性[3]。

3.2 电压探头法测试数据分析

电压探头法在全部10个测试工况下的误差数据如表2所示。在输出设定为50时，误差范围为-15.7%至9.3%，全部工况均未超出±20%限值。在输出设定为100时，误差范围为-10.8%至7.0%，同样全部合格。最大负误差出现在输出设定50、50Ω负载工况（-15.7%），最大正误差出现在输出设定100、500Ω负载工况（6.2%）和1000Ω负载工况（7.0%）。全部10个测试工况合格率为100%，且在绝大多数工况下误差绝对值控制在10%以内，测量精度显著优于电流探头法。

表2 电压探头法测试误差汇总

负载电阻(Ω)	输出设定50误差(%)	输出设定100误差(%)
10	-11	-10.8
50	-15.7	-8.6
200	2.7	3.4
500	9.3	6.2
1000	4.5	7

与电流探头法相比，电压探头法的误差分布相对均匀，未出现随负载阻抗大幅波动的趋势。在200Ω额定负载点附近，两种方法的误差均在±3%以内，表明在匹配负载条件下两种方法均可获得准确结果。但在偏离额定负载时，电压探头法始终表现出更优的稳定性和一致性。

3.3 两种检测方法的误差对比

在200Ω额定负载下，两种方法误差均较小（电流探头法0.4%～1.7%，电压探头法2.7%～3.4%）。偏离额定负载时差异显著——10Ω负载下，电流探头法误差为-27.3%～-22.5%，电压探头法仅为-11.0%～-10.8%；1000Ω负载下，电流探头法误差为31.1%～31.3%，电压探头法仅为4.5%～7.0%。电流探头法在低阻抗端呈负偏差、高阻抗端呈正偏差，而电压探头法在全负载范围内保持稳定[4]。根本原因在于电流探头在高频段受寄生电容和磁场耦合干扰严重，回路阻抗变化直接影响其频率响应特性。

4 讨论

4.1 电流探头法误差来源分析

电流探头法在1.7MHz误差偏大的原因有三。其一，电流探头基于电磁感应，频率接近或超过1MHz时，线圈分布电容和自感效应导致相位偏移和幅值衰减。其二，探头夹持的导线在高频下存在集肤效应和邻近效应，高频电流沿导体表面分布，改变磁场分布，影响耦合系数。其三，误差方向与负载阻抗密切相关——低阻抗时测量值偏低、高阻抗时测量值偏高，表明探头高频传输阻抗随负载漂移，非线性响应使其难以在宽负载范围内保持精度。

4.2 电压探头法适用性的理论解释

电压探头法在所有工况下均表现合格，源于其工作原理优势。电压探头本质是高阻抗输入的分压器，通过

补偿电容网络实现对高频信号的平坦响应。现代高频电压探头采用有源设计，输入电容仅几皮法，对被测电路影响极小。测量时探头直接与负载并联，不受回路阻抗变化影响。低阻抗下电压信号虽小，但仍在灵敏度范围内；高阻抗下信号增大，信噪比提高。对回路阻抗变化“免疫”的特性，使电压探头法在宽负载范围内保持稳定精度。

4.3 电刀分析仪适用性说明

实验曾尝试使用电刀分析仪QAES-II直接测量，该设备标称带宽30Hz～2.5MHz，但在接近带宽上限的1.7MHz频点工作时，测量功率明显不准确。通过设备特性分析和简单验证推断，该仪器在接近带宽边缘时精度已超出可接受范围。这表明专用分析仪虽使用方便，但在高频段带宽裕度不足时可靠性存疑。选用检测仪器时除关注标称带宽外，还应关注其在接近上限时的实际精度表现，或选择带宽裕度更大的仪器以确保可靠性。

5 结论

本文通过实验对比了示波器加电流探头与示波器加电压探头两种检测方法在1.7MHz下的测量精度。电压探头法在全半功率10个测试点下误差均未超过±20%，完全满足标准要求；电流探头法在30%的测试点下超出允许误差，尤其在低阻抗和高阻抗负载下误差显著偏高。电流探头法误差源于高频段寄生参数与回路阻抗变化的共同影响，测量一致性较差；电压探头法对回路阻抗不敏感，在高频段具有良好稳定性。建议在1.7MHz高频手术设备功率检测中优先采用电压探头法。

结束语

本文通过对比实验证实了电压探头法在高频段功率检测中的适用性，揭示了电流探头法在偏离额定负载时误差超标的内在机理。这一发现说明检测方法的选择需充分考虑工作频率与探头高频特性的匹配程度，为高频手术设备质量控制提供了实验依据。后续研究可进一步拓展至不同工作频率和设备类型，探索相位校正与阻抗匹配等优化方法，完善高频功率测量的技术体系。

参考文献

[1]包瑾,陈映慧.一款一体化氩气高频手术设备的设计[J].医疗装备，2023，36(13):9-13.

[2]李明,郭志刚,屈媛媛.高频电刀的功率测试及负载电阻改进[J].中国医学装备,2025,22(11):195-198,202.

[3]张艳丽,王浩,李宁,等.高频手术设备标准解析与探讨[J].中国医疗设备，2025，40(12):54-58.

[4]杨姝,朱明健,王美,等.附件类医用电气设备的传导抗扰度试验方法分析[J]. 医疗卫生装备,2022,43(11):72-75.