

基于双因子融合的夹具阻抗牵引效应表示方法^{*}王赛飞^{1,2} 刘舞阳¹ 祝瑞璞¹ 唐明涛¹ 董慧敏^{1,2}(1. 河南理工大学鹤壁工程技术学院 鹤壁 458031; 2. 鹤壁市 FPGA 集成电路(芯片)应用与
仿真工程技术研究中心 鹤壁 458031)

摘 要: 阻抗作为高速互联链路的核心电气参数,其测试精度是保障信号完整性的关键。然而测试夹具引发的牵引效应导致实测值严重偏离真实值,成为以太网高速连接器高精度测试领域的共性难题。现有研究多采用单因素分析方法,难以揭示公差与电磁耦合的协同作用机制。提出一种融合公差差异与耦合强度的双因子牵引模型,通过引入公差差异系数与耦合系数,构建了牵引因子的定量计算方法,实现了对牵引效应的精准量化。仿真与实测结果表明,该模型能有效表示公差与耦合的协同作用规律,在强耦合条件下,3%公差夹具的阻抗测试偏差率经模型精准量化后可控制在 16.8%以内,且模型预测值与实测值的误差均在 3%以内。该研究为高精度阻抗测试提供了理论模型与实验依据,对提升高速装备性能评估可靠性具有重要价值。

关键词: 信号完整性;牵引效应;双因子模型;公差差异系数;耦合系数

中图分类号: TN811+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

Representation method of the fixture impedance pull effect
based on dual-factor fusionWang Saifei^{1,2} Liu Wuyang¹ Zhu Ruipu¹ Tang Mingtao¹ Dong Huimin^{1,2}(1. Hebi Institute of Engineering and Technology, Henan Polytechnic University, Hebi 458031, China; 2. Hebi Engineering
Technology Research Center for FPGA Integrated Circuit (Chip) Application and Simulation, Hebi 458031, China)

Abstract: As a core electrical parameter of high-speed interconnection links, the measurement accuracy of differential impedance and common mode impedance is critical to ensuring signal integrity. However, the fixture-induced pull effect causes the measured values to deviate significantly from their true values, which has become a prevalent challenge in the high-precision testing of high-speed connectors for Ethernet systems. Most existing studies rely on single-factor analysis methods, which fail to reveal the synergistic mechanism of tolerance and electromagnetic coupling. This paper proposes a dual-factor pull model that integrates tolerance variation and coupling strength. By introducing a tolerance variation coefficient and a coupling coefficient, a quantitative method for the pull factor is established, enabling accurate quantification of the pull effect. Simulation and experimental results indicate that the proposed model can effectively characterize the synergistic interaction mechanism between tolerance variation and electromagnetic coupling. Under the strong coupling condition, the deviation rate of impedance testing for the fixture with 3% tolerance can be controlled within 16.8% after being accurately quantified by the model, and the error between the model prediction value and the measured value is within 3%. This study provides a theoretical model and experimental basis for high-precision impedance testing, and is of great value for improving the reliability of performance evaluation for high-speed connecting equipment.

Keywords: signal integrity; pull effect; dual-factor model; tolerance variation coefficient; coupling coefficient

0 引 言

随着车联网、5G 通信、数据中心等领域对高速以太网

信号传输需求的持续攀升,信号速率已普遍突破 100 Gbps,部分场景甚至达到 400 Gbps 及以上,此时差分阻抗与共模阻抗的匹配精度对信号完整性(signal integrity,

SI)^[1]的影响愈发显著,微小的阻抗偏差即可能导致信号反射、串扰急速加剧^[2],进而引发数据传输误码率显著上升^[3]。差分与共模阻抗作为高速以太网连接器^[4]、传输线等关键器件的核心电气指标,其测试准确性直接决定产品性能评估的可靠性,但在实际测试流程中,测试夹具与被测件之间的阻抗不匹配、电磁耦合干扰^[5]、环境噪声等因素常导致实测值偏离真实值,其中由夹具特性引入的牵引效应是制约测试精度的关键瓶颈,尤其在高频场景下,该效应引发的偏差可达 5%~15%,严重影响产品合格性判定。即便在轻型无人机等航空电子领域的信号处理板设计中^[6],传输链路的阻抗匹配也需依赖精准测试,但夹具牵引效应同样会干扰其硬件性能的准确评估。

传统研究中,学者们多单独分析夹具公差^[7]或电磁耦合对测试结果的影响,Roy 等^[8]基于传输线理论,建立了电路结构同 SI 参数的联系,但未考虑耦合效应的干扰;周佳乐等^[9]通过电磁仿真分析了不同耦合程度下的共模阻抗变化规律,却忽略了夹具精度的影响;骆燕燕等^[10]以最优信号反射的表征参数为目标,提出基于误差补偿的测试方法,但其模型仅适用于特定夹具类型,通用性较差;胡媛媛等^[11]虽借助时域反射(time domain reflectometry, TDR)技术实现了传输线阻抗的高精度测量与校准,但未针对夹具牵引效应的多因素耦合问题展开分析;黄成等^[12]在高速集成电路(integrated circuit, IC)测试系统的信号完整性设计中优化了传输路径的阻抗匹配,却未量化夹具特性对阻抗测试结果的牵引影响。总体而言,现有研究缺乏对多因素耦合作用的系统性建模,无法全面量化牵引效应的影响机制,难以满足高精度测试需求^[13-17]。

为解决上述问题,本文围绕以太网高速连接器中差分与共模阻抗测试中的牵引效应展开深入研究。首先,深入分析夹具公差与电磁耦合的作用机理,创新性提出融合公差差异系数与耦合系数的双因子牵引模型,采用加权融合实现对牵引效应强度的精准量化。其次,基于传输线理论与误差溯源分析方法,建立牵引因子与阻抗测试偏差的定量解析关系,明确差分阻抗与共模阻抗^[18-19]对牵引效应的敏感度差异,进一步引入敏感度系数,使模型可分别适配差分与共模两种阻抗类型的测试场景,有效提升模型的工程适用性与场景适配性。最后,结合高速连接器传输性能研究中常用的仿真与实测结合方法,开展仿真验证与实物测试实验,验证模型的有效性,以期以以太网高速连接器阻抗测试中牵引效应的抑制与测试精度提升提供可靠的理论支撑与实践指导。

1 理论模型与数学推导

1.1 差分与共模阻抗基础模型

以太网信号传输中差分阻抗 Z_{diff} 反映两传输线间的差模信号特性,共模阻抗 Z_{cm} 反映对地的共模信号特性,基于传输线理论可推导差分阻抗为:

$$Z_{\text{diff}} = Z_1 + Z_2 - 2k \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (1)$$

式中: Z_1 和 Z_2 是两根传输线的单端阻抗, k ($0 \leq k \leq 1$) 为耦合系数,差分信号在两根相邻导线中反向传输,耦合作用会降低等效阻抗。当 $k = 0$, 即无耦合时, Z_{diff} 简化为两单端信号的串联阻抗;当 $k > 0$ 时,耦合项 $2k \sqrt{Z_1 Z_2}$ 随 k 增大而增大, Z_{diff} 随之减小。共模阻抗计算公式为:

$$Z_{\text{cm}} = \left(\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \times (1 + k) \quad (2)$$

式中:当 $k = 0$ 时, $Z_{\text{cm}} = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ 简化为纯并联阻抗; $k > 0$ 时, $(1 + k)$ 项使 Z_{cm} 随耦合增强而增大。

1.2 双因子牵引模型

牵引效应的本质是夹具的公差及耦合特性对测试值的干扰,定义牵引因子 T 量化其强度。设夹具公差为 T_f , 被测件公差为 T_c , 公差差异的标准化系数为:

$$C_{\text{tol}} = \frac{|T_f - T_c|}{T_c} \quad (3)$$

式中: C_{tol} 定义了夹具与被测件的公差匹配度,值越大表示匹配越差,牵引越强。结合 k 和 C_{tol} , 通过加权求和融合公差差异与耦合的影响构建双因子融合模型为:

$$T = \underbrace{\alpha \times C_{\text{tol}}}_{\text{公差项}} + \underbrace{\beta \times k}_{\text{耦合项}} \quad (4)$$

式中: α 和 β 是公差权重与耦合权重,数值可基于工程经验确定,且有 $\alpha + \beta = 1$; T 为牵引效应强度因子,通过式(5)的截断函数实现 $T \in [0, 0.95]$, 0 表示无牵引, 0.95 表示最强牵引。由于未经过截断处理的公差差异与耦合系数的融合初始值 T_0 在工程场景中存在弱牵引时变化平缓,强牵引时趋于饱和特性,因此可采用分段指数函数对 T_0 进行截断处理,最终得到 T 的表达式如式(5)所示。

$$T = f(T_0) = \begin{cases} 0, & T_0 \leq 0.01 (\text{无牵引效应}) \\ 1 - e^{-5T_0}, & 0.01 < T_0 < 0.2 (\text{牵引效应线性增强}) \\ 0.95, & T_0 \geq 0.2 (\text{牵引效应趋于饱和}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:当 $T_0 = 0.01$ 时, $T \approx 0.0488$, 接近 0,符合弱牵引场景中公差与耦合均处于弱影响水平,牵引效应可忽略;对中强牵引场景,即 $T_0 = 0.2$ 时, $T \approx 0.632$, 此时牵引因子随 T_0 线性增强,表征公差与耦合的协同作用进入显著区间;对于强牵引饱和场景, T_0 固定为 0.95,避免因 T_0 过大导致牵引因子无限制增长,保障了模型在工程场景下的收敛性与合理性。

1.3 模型偏差定义

被测器件的测试值与真实值的偏差由牵引因子 T 和阻抗类型的敏感度共同决定,差分阻抗的测试值计算公式为:

$$Z_{\text{meas, diff}} = Z_{\text{diff}} \times (1 + T \times S_{\text{diff}}) \quad (6)$$

式中: S_{diff} 是差分敏感系数,考虑差分的阻抗稳定性更高,设定 $S_{\text{diff}} = 0.4$ 。将式(1)、(4)代入式(6)得到:

$$Z_{\text{meas, diff}} = (Z_1 + Z_2 - 2k \sqrt{Z_1 Z_2}) \times [1 + (\alpha \times C_{\text{tol}} +$$

$$\begin{aligned} \beta \times k) \times S_{\text{diff}}] = & \underbrace{(Z_1 + Z_2 - 2k \sqrt{Z_1 + Z_2})}_{\text{第1部分}} + \\ & \underbrace{\alpha(Z_1 + Z_2 - 2k \sqrt{Z_1 + Z_2}) S_{\text{diff}} C_{\text{tol}}}_{\text{第2部分}} + \\ & \underbrace{\beta(Z_1 + Z_2 - 2k \sqrt{Z_1 + Z_2}) S_{\text{diff}} k}_{\text{第3部分}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中:第1部分是被测连接器的实际差分阻抗,表示无牵引时的真实阻抗计算值;第2部分表示由公差差异引发的牵引偏差;第3部分表示由耦合强度引发的牵引偏差。对于被测器件的共模阻抗按式(8)计算。

$$Z_{\text{meas,cm}} = Z_{\text{cm}} \times (1 + T \times S_{\text{cm}}) \quad (8)$$

式中: S_{cm} 是共模敏感系数,由于共模传输使用地面回流,受地面影响显著,导致共模阻抗对牵引更敏感,因此通常设定 $S_{\text{cm}} = 0.4$ 。将式(2)、(4)代入式(8)得到:

$$\begin{aligned} Z_{\text{meas,cm}} = & \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \times (1 + k) \times [1 + S_{\text{cm}} \times \alpha \times C_{\text{tol}} + S_{\text{cm}} \times \\ & \beta \times k] = \underbrace{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 + k)}_{\text{第1部分}} + \underbrace{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 + k) S_{\text{cm}} \alpha C_{\text{tol}}}_{\text{第2部分}} + \\ & \underbrace{\frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} (1 + k) S_{\text{cm}} \beta k}_{\text{第3部分}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:第1部分表示被测件的实际共模阻抗,也是无牵引时的真实计算值;第2部分表示由公差差异引发的牵引偏差;第3部分表示由耦合强度引发的牵引偏差。定义被测连接器的差分与共模阻抗偏差率计算为:

$$\Delta Z\% = \frac{Z_{\text{meas}} - Z_{\text{actual}}}{Z_{\text{actual}}} \times 100 = T \times S \times 100\% \quad (10)$$

式中: Z_{meas} 表示被测件的差分或共模阻抗测量结果; Z_{actual} 表示实际差分或共模阻抗; S 表示敏感系数。

2 仿真实验与结果分析

2.1 仿真参数设置

仿真环境基于高速连接器实际测试场景构建,被测件为 100 Ω 差分阻抗板端连接器,共模阻抗目标 25 Ω ,单端阻抗目标 50 Ω 、公差 5%;测试夹具采用 3%、5%、7% 这 3 种公差等级,单端阻抗目标 50 Ω ,与被测件阻抗匹配;电磁耦合系数 k 分别取 0、0.1、0.2、0.3,覆盖无耦合至强耦合场景;各阻抗参数均按正态分布生成,通过 3σ 原则控制波动范围。每个夹具公差与耦合系数情况独立分组设置 3 000 组样本,保障统计结果的可靠性与普适性,贴合工程批量测试场景。仿真实验环境为 Windows 11(64-bit)操作系统,开发工具为 PyCharm 2025.2.2 (Community Edition, 64-bit),编程语言为 Python 3.12(64-bit),核心依赖库为 NumPy、Pandas 及 Matplotlib。

2.2 夹具阻抗特性分析

由图 1(a)可知,差分阻抗呈现随耦合系数 k 增大而单调降低的变化规律,与式(1)的理论推导结果完全一致。从

公差维度看,3%公差夹具的差分阻抗波动范围最小($\pm 3 \Omega$),7%公差夹具的波动范围最大($\pm 7 \Omega$),这直观体现了公差差异越大,阻抗牵引效应越显著的物理规律,与双因子模型中公差差异因子 C_{tol} 驱动阻抗偏差的量化逻辑形成呼应。从图 1(b)可知,其随耦合系数 k 的增大呈单调升高趋势,符合式(2)的理论预期。其中,3%公差夹具的共模阻抗值更接近 25 Ω 的目标值,偏差控制在 1 Ω 以内,而 7%公差夹具的偏差最大可达 5 Ω 以上,进一步验证了公差差异与电磁耦合的协同作用是阻抗牵引效应的核心诱因这一结论,也为双因子模型中权重系数 $\alpha = 0.4$ 、 $\beta = 0.6$ 的工程合理性提供了实验支撑,耦合系数对共模阻抗的影响权重更高,与共模信号无差分抵消、对电磁干扰更敏感的物理特性完全契合。结合双因子模型的参数优化结果分析,差分阻抗对耦合系数的敏感度低于共模阻抗,这与图 1(a)中相同耦合系数下,共模阻抗的绝对偏差幅度更大的现象完全一致。例如,当耦合系数 $k = 0.3$ 、公差 $T_i = 7\%$ 时,差分阻抗偏离目标值约 30 Ω ,共模阻抗偏离约 8 Ω ,其相对偏差差分 30%、共模 32% 的比例关系与敏感系数比例 0.4:0.6 结构相吻合,从实验层面验证了模型参数的精准性与一致性。综上,图 1 的阻抗分布箱线图从公差、耦合与阻抗偏差的多维度关联中,完整呈现了双因子模型的核心假设与量化逻辑,为模型的理论推导提供了实验佐证。

2.3 牵引效应量化分析

图 2(a)所示为牵引因子 T 与差分偏差率的显著正相关关系,判定系数 $R^2 = 0.92$,这与式(10)的推导结果完全一致,有力验证了双因子模式公式的定量有限性。需说明的是,由于 3%公差与 7%公差对应的公差差分系数 C_{tol} 相等,两者的牵引因子及偏差率结果完全一致,因此图 2(a)中 3%公差与 7%公差的样本点重合显示;3%、5%、7%公差的样本点均沿正相关趋势线分布,表明该模型可系统量化牵引效应的强度,为后续分析奠定了理论基础。

图 2(b)、(c)中,3%与 7%公差的平均偏差看似一致,这源于两者与 5%被测产品公差的偏离幅度相同,均差 2%,相对 3%是精度过剩,相对 7%是精度不足,并非意味着精度高低无区别。而耦合系数 k 对偏差分布的影响则体现出明确的因果关系:当 $k = 0$ 时,各公差夹具的偏差分布均较窄,偏差稳定;随着 k 增大至 0.1、0.2 和 0.3,耦合如同放大器,会放大夹具与产品的公差不匹配,使不同样本的偏差拉开差距,整体波动范围显著变宽。此外,7%的高公差夹具虽平均偏差与 3%看似一致,但其偏差上限明显更高,这是由于 7%公差夹具实际制造时阻抗波动更大,叠加耦合的放大效应后,易出现极端大偏差,体现出低公差夹具在偏差稳定性上的显著优势,也正是工程中选择低公差夹具用于高精度测试的核心原因。对于图 2(b)中 3%公差偏差率高于 5%公差的现象,其本质源于理论牵引因子贡献与工程制造精度匹配效应耦合作用的合理工程体现。从双因子模型中的公差差异系数推导来看,3%公差夹具的公

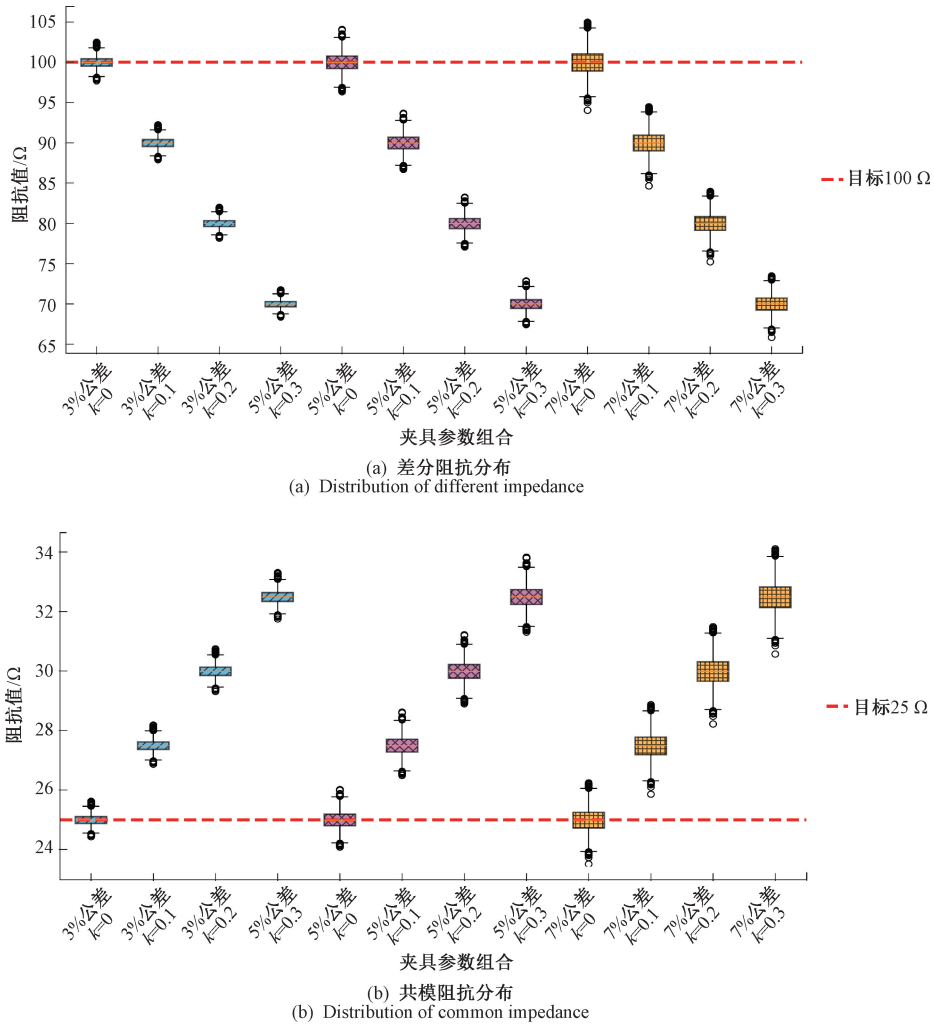


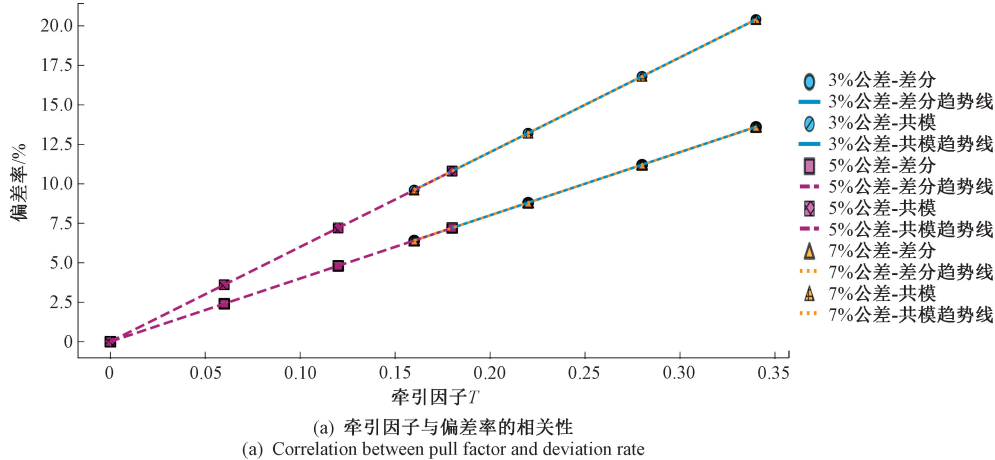
图 1 阻抗分布箱线图

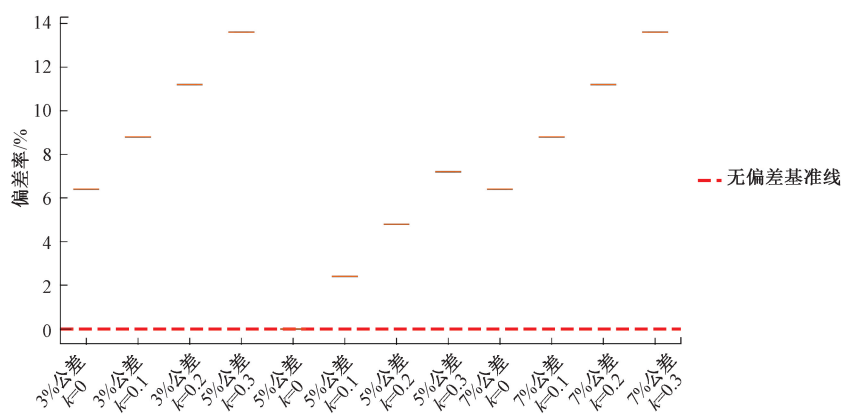
Fig. 1 Box plot of impedance distribution

差差异系数 $C_{tol} = |0.03 - 0.05| / 0.05 = 0.4$ ，公差项贡献为 $0.4 \times 0.4 = 0.16$ ；而 5% 公差夹具的公差差异系数为 0，公差项贡献直接为 0。

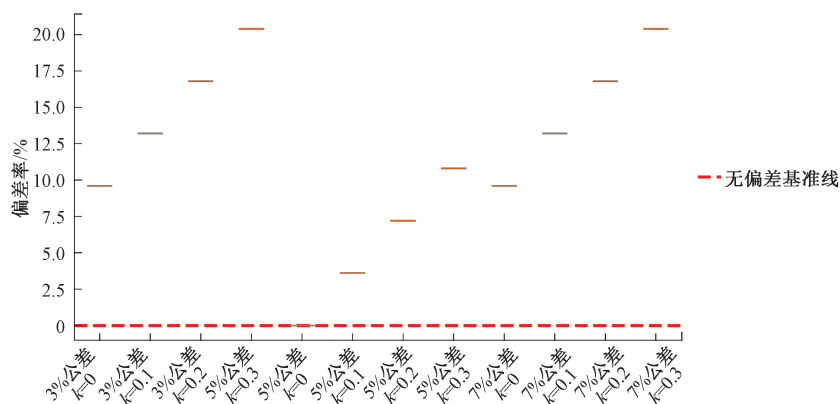
理论上，3% 公差的牵引因子公差项贡献远大于 5% 公

差，这与图 2(d) 中 3% 公差平均牵引因子显著高于 5% 公差的统计结果完全契合。但在工程制造场景下，夹具阻抗需模拟实际生产的正态分布波动特性，3% 公差夹具虽制造精度高，阻抗标准差小，却因精度过剩导致与被测件

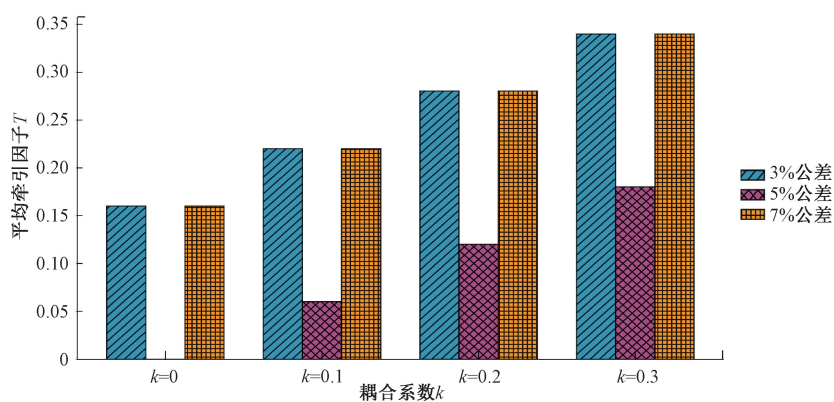




(b) 不同组合的差分偏差概率分布
(b) Probability distribution of differential mode deviation for different combinations



(c) 不同组合的共模偏差概率分布
(c) Probability distribution of common mode deviation for different combinations



(d) 不同组合的平均牵引因子
(d) Average pull factor of different combinations

图 2 牵引效应量化分布

Fig. 2 Quantitative analysis diagram of the pull effect

的阻抗适配区间存在偏差,实际测试中的阻抗失配度反而更高;5%公差夹具的公差与产品公差完全匹配,其阻抗波动范围与被测件的阻抗分布高度契合,即便制造波动,即阻抗标准差略大于3%公差夹具,精度匹配优势也会部分抵消理论牵引因子的差异,最终导致统计后的偏差率分布出现重叠。这一现象并非模型或仿真的缺陷,而是真实还

原了理论推导与工程实际的照应逻辑,进一步凸显了双因子模型的工程普适性。图2(d)的平均牵引因子柱状图则从量化角度严格验证了这一理论推导的内在逻辑,同一耦合系数 k 下,3%公差的平均牵引因子显著高于5%公差,7%公差的平均牵引因子在 $k=0.3$ 时达到峰值,直观表现出公差越大、耦合越强,牵引效应越显著的工程规律,与双

因子模型中 T 随 T_i 和 k 递增的推导结果完全一致。图 2 的仿真验证了理论推导与工程规律的一致性,展示了双因子模型对复杂实际测试场景的解释力。

2.4 链路阻抗测试模拟

为验证双因子模型在实际链路测试中的有效性,针对 $100\ \Omega$ 差分链路和 $25\ \Omega$ 共模链路,开展若干场景的测试模拟,结合双因子模型式(4)系统分析公差差异与电磁耦合的协同作用规律。

如图 3(a)所示,差分阻抗偏差随耦合系数 k 的增大呈现先差异化增长、后趋同稳定的特征,与双因子模型中 $\alpha = 0.4$ 、 $\beta = 0.6$ 的参数设定完全契合。无耦合状态下,牵引效应由公差差异主导,3% 公差夹具的差分阻抗测试值为 $106.4\ \Omega$,偏差

$6.4\ \Omega$,偏差率 6.4% ;7% 公差夹具的差分阻抗测试值同样为 $106.4\ \Omega$,但其公差设计值更大,这种测试值一致而公差设计不同的现象,恰恰反映了无耦合状态下公差对牵引效应的潜在主导作用,为后续耦合阶段的差异变化提供了基准参照;进入弱耦合阶段,耦合效应开始凸显,两类公差夹具的差分阻抗偏差均增至 $8.8\ \Omega$ 并首次趋同,表明耦合效应已覆盖公差差异的影响;中耦合状态下,耦合主导作用进一步强化,3% 与 7% 公差夹具的差分阻抗测试值均稳定在 $111.2\ \Omega$,偏差 $11.2\ \Omega$,公差差异对偏差的影响完全消失;强耦合阶段,耦合效应达到饱和,两类夹具的差分阻抗测试值均为 $113.6\ \Omega$,偏差增至 $13.6\ \Omega$,偏差增长速率与耦合系数的线性关系,印证了 $\beta = 0.6$ 对耦合贡献的量化精度。

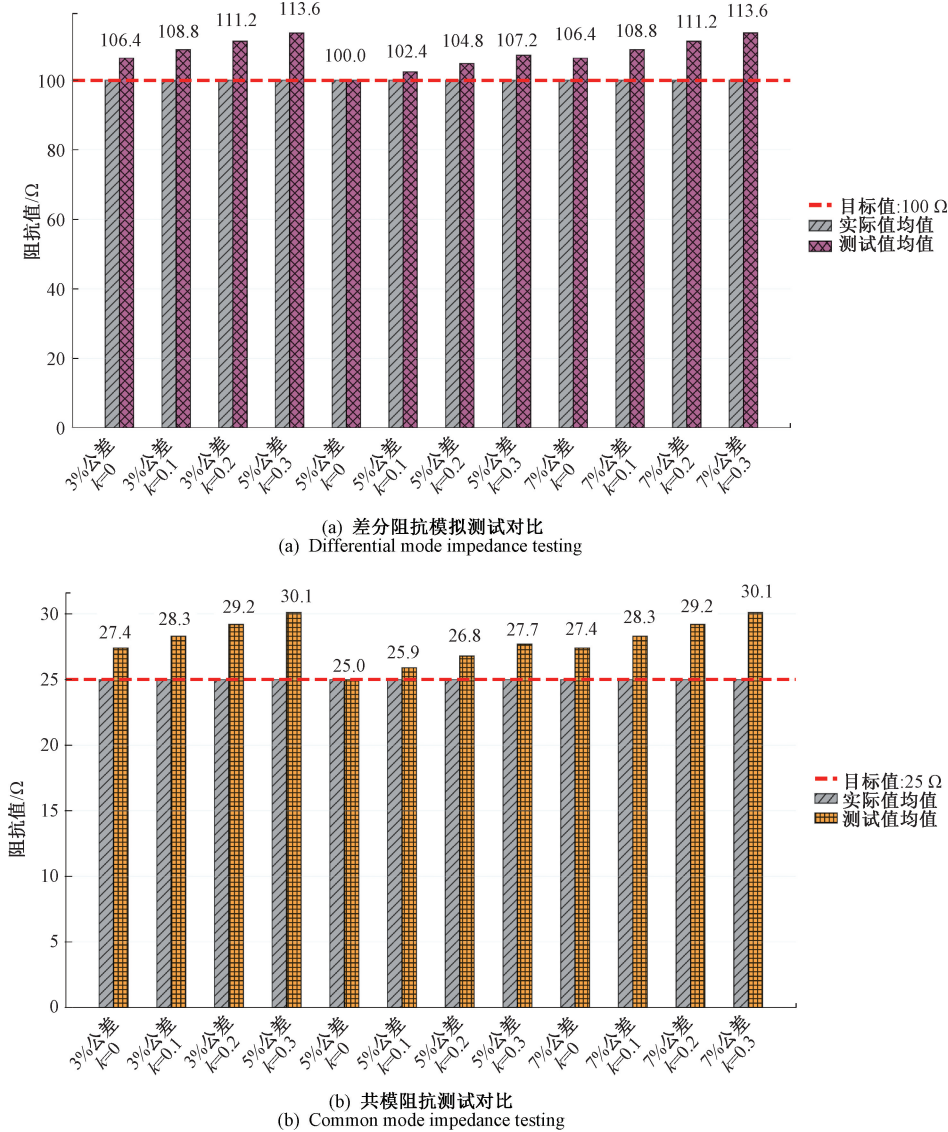


图 3 阻抗测试模拟

Fig. 3 Simulation of link impedance testing

如图 3(b)所示,共模阻抗偏差规律与差分阻抗一致,但整体偏差率更高,这与 $S_{cm} = 0.6 > S_{diff} = 0.4$ 的敏感度

系数设定保持一致,且耦合效应的主导作用出现更早。无耦合时,3% 公差夹具测试值为 $27.4\ \Omega$,偏差 $2.4\ \Omega$,7% 公

差夹具测试值同样为 $27.4\ \Omega$, 结合其更大的制造公差, 这种测试值一致而公差设计不同的现象, 直观反映了无耦合状态下公差对牵引效应的主导作用; 弱耦合状态下, 两类夹具共模阻抗测试值均为 $28.3\ \Omega$, 偏差趋同于 $3.3\ \Omega$, 耦合效应已完全覆盖公差差异影响; 中耦合阶段, 偏差进一步增至 $4.2\ \Omega$, 两类夹具偏差始终保持一致; 强耦合阶段, 偏差达到 $5.1\ \Omega$, 偏差率 20.4% , 更高的偏差率直观验证了共模阻抗对牵引效应的敏感度更高, 与 $S_{cm} = 0.6$ 的推导结论完全匹配。

上述场景中测试值与实际值的系统性偏离, 从实验层面验证了牵引效应的客观存在, 也凸显了双因子模型对公差、耦合双因素作用的量化价值, 通过该模型可精准预测不同夹具及耦合场景下的阻抗测试偏差, 为高速链路测试的精度优化提供理论支撑。

3 实测验证

为验证模型有效性, 采用 Keysight N5247B 矢量网络分析仪 (vector network analyzer, VNA) 对差分以太网连接器进行测试, 其差分阻抗标称值为 $100\ \Omega$, 共模阻抗为 $25\ \Omega$, 并选用 3% 、 5% 、 7% 公差夹具各 10 套, 在耦合系数 $k = 0.2$ 环境下重复测试 20 次, 测试系统连接如图 4 所示。图 4 中, 测试链路由被测连接器、Y 型转接头、SMA 连接器、同轴电缆、VNA 组成, 通过 VNA 的 S 参数测量功能提取阻抗的实测值, 与模型预测值对比分析。

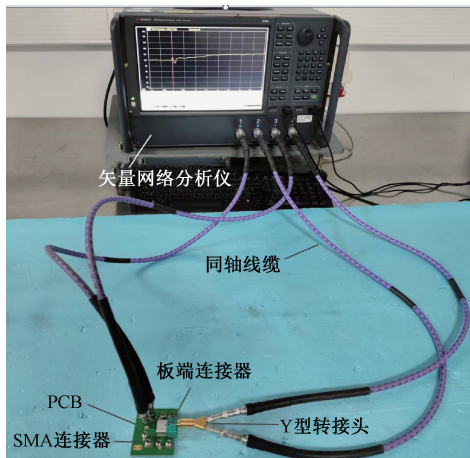


图 4 阻抗实测链路

Fig. 4 Fixture test platform

3.1 量化性能指标的定义与计算方法

首先定义阻抗模型预测偏差率, 表征双因子模型输出的阻抗预测值与阻抗理论标称值之间的相对偏离程度为:

$$\delta_{\text{模型}} = \left| \frac{Z_{\text{模型}} - Z_{\text{标称}}}{Z_{\text{标称}}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

式中: $Z_{\text{模型}}$ 为双因子模型输出的差分或共模阻抗预测值; $Z_{\text{标称}}$ 为高速连接器的差分或共模阻抗设计标称值, 差分取值为 $100\ \Omega$, 共模取值为 $25\ \Omega$ 。在模型预测偏差率的基础

上, 进一步定义阻抗实测平均偏差率, 以表征测试系统的实际偏差水平:

$$\delta_{\text{实测}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Z_{\text{实测}, i} - Z_{\text{标称}}}{Z_{\text{标称}}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中: $N = 20$ 为重复测试次数; $Z_{\text{实测}, i}$ 为第 i 次测试的差分或共模阻抗实测值。结合式 (11)、(12) 两个指标, 最终定义差分或共模阻抗测试误差, 以评估模型预测与实测结果的一致性, 表征模型预测偏差率与实测平均偏差率之间的绝对差值为:

$$\epsilon = |\delta_{\text{模型}} - \delta_{\text{实测}}| \quad (13)$$

3.2 测试结果与分析

将不同公差夹具下的差分、共模阻抗测试值代入 3.1 节指标公式, 计算得到量化性能数据如表 1、2 所示。

表 1 差分阻抗测试误差率

Table 1 Error rate in differential impedance testing (%)

夹具类型	模型预测 差分偏差率	实测平均 差分偏差率	差分 误差
3%公差	11.2	11.4	1.79
5%公差	4.8	5.0	2.08
7%公差	11.2	11.5	2.68

表 2 共模阻抗测试误差率

Table 2 Error rate in common impedance testing (%)

夹具类型	模型预测 共模偏差率	实测平均 共模偏差率	共模 误差
3%公差	16.8	17.0	1.19
5%公差	6.8	7.0	2.94
7%公差	16.8	17.1	1.79

所有误差均在 3% 以内, 属于工程可接受的偏差区间, 说明模型对牵引效应的量化具备较高准确性。其中, 3% 与 7% 公差的差分、共模误差表现均衡, 5% 公差的误差也处于合理范围, 这一结果不仅验证了双因子模型在不同公差等级、耦合强度及阻抗模式下的普适性, 更从实测层面印证了模型对公差与耦合协同效应的量化能力, 凸显了其在多变量场景下的工程适配价值。

4 结 论

本文构建的双因子模型实现了对夹具牵引效应的精准量化, 区别于现有单因素分析方法的局限性, 明确了公差匹配度决定偏差率基准, 耦合系数是偏差放大器的核心规律, 在理论层面解释了公差与耦合协同影响牵引效应的内在机制, 填补了现有研究中多因素耦合作用机制分析的空白。仿真与实测验证了模型的工程普适性与对实际场

景的适配性,传统方法仅能定性分析单一因素的影响,无法实现多因素协同作用的量化,而本模型通过融合公差差异与耦合强度的双因子设计,在多因素耦合场景下展现出更优的量化精度;并且,模型同时覆盖差分与共模阻抗场景,明确了阻抗牵引效应的影响规律,为高速以太网连接器差分与共模阻抗测试中夹具公差选择、耦合强度控制提供了理论依据与工程参考。后续可进一步拓展模型的环境适应性,或探索基于该模型的自适应补偿算法以提升阻抗测试精度,同时补充阻抗测试偏差率、模型预测误差等量化性能指标的物理意义与计算方法说明。

参考文献

- [1] 张伟超,张鹏宇,王暄,等. 电缆接头局部放电高频柔性传感器技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(10): 282-284.
Zhang Weichao, Zhang Pengyu, Wang Xuan, et al. Research on high-frequency flexible sensor technology for partial discharge in cable joints [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46 (10): 282-284.
- [2] 祝林林,胡小兰,陈丽,等. 矢量网络分析仪动态范围指标的分析与改善[J]. 电子测量技术, 2019, 42(13): 32-35.
Zhu Linlin, Hu Xiaolan, Chen Li, et al. Analysis and improvement of dynamic range in VNA[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(13): 32-35.
- [3] 程先哲,吕克洪,张勇,等. 基于间歇故障信号动态响应特征的电连接器退化状态评估方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 190-194.
Cheng Xianzhe, Lyu Kehong, Zhang Yong, et al. Research on the degradation state assessment method for electrical connectors based on dynamic characteristics of intermittent fault signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (11): 190-194.
- [4] 李旭,刘泓宏,黄岸丰,等. 智能网联汽车高速连接器传输性能研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(7): 21-23,25.
Li Xu, Liu Honghong, Huang Anfeng, et al. Research on transmission performance of high-speed connectors for intelligent connected vehicles [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(7): 21-23,25.
- [5] 杨奕,郭科,夏诗蕴,等. 中心开窗结构的 GFSP 磁耦合机构轻量化设计[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 185-190.
Yang Yi, Guo Ke, Xia Shiyun, et al. Lightweight design of the GFSP magnetic coupling mechanism featuring a center-window structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(8): 185-190.
- [6] 罗必露,位小记,韩小军,等. 轻型无人机无源定位系统的信号处理板设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(4): 24-30.
Luo Bilu, Wei Xiaoji, Han Xiaojun, et al. Design of signal processing board for passive positioning system of light UAV [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4): 24-30.
- [7] 谢锐,裴东兴,姚琴琴. 高频信号动态测试中的信号完整性分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 773-776.
Xie Rui, Pei Dongxing, Yao Qinqin. Signal integrity analysis in high-frequency signal dynamic test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 773-776.
- [8] Roy C, Wu K. A generalized circuit model development approach with short open thru(SOT) de-embedding technique and its applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(1): 124-128.
- [9] 周佳乐,余道杰,柴梦娟,等. 无人机系统级线缆电磁效应与耦合特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2025, 37(2): 74-78.
Zhou Jiale, Yu Daojie, Chai Mengjuan, et al. Analysis of electromagnetic effects and coupling characteristics of UAV system-level cables [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2025, 37(2): 74-78.
- [10] 骆海燕,杨硕,潘晓松,等. 航空用高速连接器信号反射抑制与优化设计[J]. 航空学报, 2024, 45(7): 227-233.
Luo Yanyan, Yang Shuo, Pan Xiaosong, et al. Signal reflection suppression and optimized design of high-speed connectors for aerospace applications [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 45 (7): 227-233.
- [11] 胡媛媛,张敏娟,卫晨博,等. 一种采用 TDR 的传输线阻抗测量和校准[J]. 电子测量技术, 2024, 47(19): 63-67.
Hu Yuanyuan, Zhang Minjuan, Wei Chenbo, et al. A method of transmission line impedance measurement and calibration using TDR [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(19): 63-67.
- [12] 黄成,夏军,刘成汉,等. 高速 IC 测试系统的信号完整性设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(3): 84-87.
Huang Cheng, Xia Jun, Liu Chenghan, et al. Signal integrity design for IC test systems [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(3): 84-87.
- [13] 曾翰森,徐正,张鹏飞,等. 基于耦合矩阵的新型 8 阶 SIW 带通滤波器[J]. 电子测量技术, 2025, 48(2):

- 1-6.
Zeng Hansen, Xu Zheng, Zhang Pengfei, et al. Novel 8th order SIW bandpass filter based on coupling matrix[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(2): 1-6.
- [14] 梁云忠, 李红, 伍权, 等. 高速传输电连接器差分阻抗优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 481-486.
Liang Yunzhong, Li Hong, Wu Quan, et al. Differential impedance optimization of high speed electric connector [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(3): 481-486.
- [15] 成哲, 刘祖韬, 吴琼. 基于无磁芯微型变压器的高效率隔离 DC-DC 设计[J]. 电子测量技术, 2025, 48(4): 8-12.
Cheng Zhe, Liu Zutao, Wu Qiong. High-efficiency isolated DC-DC based on a coreless micro-transformer [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(4): 8-12.
- [16] 张平均, 王颖, 李士勇, 等. 基于 HFSS 的电连接器信号完整性仿真分析[J]. 机电工程技术, 2024, 53(4): 75-78.
Zhang Pingjun, Wang Ying, Li Shiyong, et al. Signal integrity simulation analysis of electrical connectors based on HFSS[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(4): 75-78.
- [17] 严冬, 张盈利, 陈杨杨, 等. 高速 PCB 中差分过孔分析与优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 90-93.
Yan Dong, Zhang Yingli, Chen Yangyang, et al. Analysis and optimization of differential vias in high-speed PCB[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 90-93.
- [18] 张云昊, 何敏. 抗偏移磁感应耦合式 AUV 无线充电系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(7): 115-122.
Zhang Yunhao, He Min. Design of misalignment-tolerant magnetic induction coupler for AUV wireless charging system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(7): 115-122.
- [19] Illiano L, Liu X K, Grassi F, et al. Analysis and optimization of fast ethernet terminations for reduction of differential-to-common-mode conversion[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2025, 67(3): 940-948.

作者简介

王赛飞(通信作者), 硕士, 助教, 主要研究方向为高速电子器件测试技术与信号完整性分析。

E-mail:saifei_wang@163.com

刘舞阳, 硕士, 助教, 主要研究方向为信号分析。

祝瑞璞, 硕士, 助教, 主要研究方向为信号完整性。

唐明涛, 硕士, 副教授, 主要研究方向为智能控制。

董慧敏, 硕士, 教授, 主要研究方向为通信信号处理。