

EE5003-重建

一阶段 已有参数

参数名	数值（单位）	来源 / 计算方法	在论文模型中的意义
Csf_HF	2.461×10 ⁻¹⁰ F	高频测量计算	定子对地杂散电容（高频条件下的分布电容）；用于描述绕组与机壳之间的耦合电容。
Csf_LF	1.516×10 ⁻⁹ F	低频测量计算	定子对地杂散电容（低频条件下）；与 Csf_HF 共同用于求取等效中频电容 Csf0。
Csf0	7.38×10 ⁻¹⁰ F	实测中频区计算结果	定子杂散电容的等效平均值；用于高频模型的主电容支路。
Csw	1.012×10 ⁻⁹ F	程序计算（高频拟合）	定子绕组间电容（winding-to-winding capacitance），影响共模谐振点。
Rsf	2.74×10 ³ Ω	程序计算（经验公式）	定子-铁芯间损耗支路的等效阻抗；代表绝缘及泄漏损耗。
Rsw	1.3437×10 ⁴ Ω	程序计算（高频损耗拟合）	绕组间损耗电阻，反映绕组匝间损耗及趋肤效应。
ηLls	1.7806×10 ⁻² H	程序计算	定子首匝漏感，用于高频等效支路；决定反谐振频率。
Lls	2.55×10 ⁻² H	中频区计算结果	定子串联漏感（stator series leakage inductance），低频 T 型电路中的串联电感。
Llr	2.55×10 ⁻² H	中频区计算结果	转子漏感（rotor leakage inductance）；与 Lls 共同决定总漏感。
(1-η)Lls	7.694×10 ⁻³ H	推算值	高频分流后主支路中的等效定子漏感。
Lσ (L_sigma)	5.10×10 ⁻² H	合成	总漏感 Lσ = Lls + Llr；反映电机耦合程度与漏磁。
Lm	5.5×10 ⁻² H	IEEE Std 112 估算	励磁电感（magnetizing inductance），反映定转子间耦合磁链；高频中可忽略。
Rcore	4.751×10 ³ Ω	经验公式 Rcore = 6300×(hp) ^(-0.6958)	铁芯损耗等效电阻（core loss resistance）；与磁滞和涡流损耗有关。

参数名	数值（单位）	来源 / 计算方法	在论文模型中的意义
fr	$27.49 \times 10^3 \text{ Hz}$	测量	阻抗谐振频率；由定子漏感与杂散电容决定。
 Z _max	$2.50 \times 10^4 \Omega$	测量	谐振点阻抗峰值；反映等效电路在 fr 处的谐振特性。
fa	$76.03 \times 10^3 \text{ Hz}$	测量	反谐振频率（anti-resonance）；由 ηLls 与 Csw 决定。
 Z _anti-r	$4.11 \times 10^3 \Omega$	测量	反谐振点阻抗；描述高频寄生通道的泄流特性。
Rs	$\approx 8.703 \Omega$ （拟合结果）	低频拟合（受限于数据）	定子电阻（stator resistance），反映铜损；需 IEEE Std 112 直流或热态试验确认。
Rr/s	$\approx 28 \Omega$ （拟合结果）	低频拟合（受限于数据）	转子等效电阻（rotor resistance over slip）。

分组：

编写程序识别+计算的：

$$CsfHF = 2.461 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$CsfLF = 1.516 \times 10^{-9} \text{ F}$$

$$Csf0 = 7.38 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$L\sigma = 5.10 \times 10^{-2} \text{ H}$$

$$Lls = 2.55 \times 10^{-2} \text{ H 用了 } Lls = Llr$$

$$Llr = 2.55 \times 10^{-2} \text{ H}$$

$$fr = 27.49 \text{ kHz} = 27.49 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$|Z|_{\max} \approx 2.50 \times 10^4 \Omega$$

$$fa = 76.03 \text{ kHz} = 76.03 \times 10^3 \text{ Hz}$$

$$|Z|_{\text{anti-r}} \approx 4.11 \times 10^3 \Omega$$

根据论文公式计算的：

$$Csw : 1.011680e-09 \text{ F}$$

$$\eta Lls : 1.780568e-02 \text{ H}$$

$$Rsf : 2.740000e+03 \Omega$$

$$Rsw : 1.343656e+04 \Omega$$

$$Csf0 \text{ (calc)} : 7.777000e-10 \text{ F (reported } 7.380000e-10 \text{ F)}$$

论文没有给出来源，自己尝试得到，不确定是否可靠的：

无数据，经验估算：

$$Lm: \text{negligible, 用IEE 112手册近似计算, 得到 } 32\text{mH} = 3.2 \times 10^{-2} \text{ H (更新为 } 5.5e-2)$$

$$Rcore = 6300 \times (hp)^{-0.6958} = 4751.342 \Omega$$

Rs、Rr在低频拟合

Rsf尚无法得到

思路切换：

不要一开始就做复杂的CM&DM混合，难以分析which dominate；先看CM（1-6）和DM（7-9）能提供什么参数，拼合起来，拟合，最后再到DM&CM上验证，which means 1-9 as train set, 10-21 as test set (perhaps add some validation set?).

result: Nope. 根据恢复的手稿，每个以上一系列量用到了多组数据来测算（例如单相测Csf， Δ 接线侧Lm），不存在人为隔离的可能性；

但：可以这样：先在单相等简单的试验上拟合（假定三相对称），然后再在10号上来？

无必要，已成功。

二阶段：针对1e7-1e8频段

还是exp10为例，拟合参数：

=== Optimized parameters ===

Lls = 0.0261536

Csw = 8.68416e-10

Rsw = 14776.8

Llr = 0.0699247

Rrs = 283.057

Rcore = 4129.66

Lm = 0.0457641

nLls = 1.7806e-11

Csf = 3.12877e-10

Rsf = 27.4

Csf0 = 7.38e-09

1 尝试将Cad加在中性点-GND上，与Csf_0并联

结果：现在的拓扑里，Cad 是并在 Δ 网络的 b-c 边（Z4_0）上的： $Z4_0 = (Z3 \parallel 0.5Z3 \parallel (Csf0 \parallel Cad))$ 。Cad 变化会显著拉低这条边的阻抗，再经 $\Delta \rightarrow Y$ 变换主要体现在 Z6、Z5 两个星形臂里（而串联臂 Z4 基本不变）。但在总阻抗里，这两个臂是以 $Z6 + 0.5 \cdot Z1$ 和 $Z5 + 0.5 \cdot Z2$ 的形式参与并联；因为 $0.5 \cdot Z1$ 和 $0.5 \cdot Z2$ 的量级远大于 Z6、Z5 的变化量，所以 Z6、Z5 的变化被直接“淹没”，总阻抗几乎不动。

具体数字（在 20 MHz 的抽样点）：

Z1 极大： $|Z1| \approx 4.138 \times 10^3 \Omega$ （约 4138 Ω ），所以 $0.5 \cdot Z1 \approx 2069 \Omega$ ，这是左支路的主导项。

Z2 也不小： $|Z2| \approx 3.738 \times 10^1 \Omega$ （约 37.38 Ω ），所以 $0.5 \cdot Z2 \approx 18.7 \Omega$ ，这是右支路的主导项。

而 Cad 改变带来的 Z6/Z5 变化，量级完全比不过上面这两个“半边”：

当 $C_{ad} = 1e-12 \text{ F}$ ： $|Z_{4_0}| \approx 1.078 \Omega$ ，对应 $|Z_6| \approx 1.071 \Omega$ ， $|Z_5| \approx 9.68e-3 \Omega$ 。

当 $C_{ad} = 1.78e-7 \text{ F}$ ： $|Z_{4_0}| \approx 4.30e-2 \Omega$ ，对应 $|Z_6| \approx 4.27e-2 \Omega$ ， $|Z_5| \approx 3.86e-4 \Omega$ 。

当 $C_{ad} = 1e2 \text{ F}$ ： $|Z_{4_0}| \approx 7.96e-11 \Omega$ ，对应 $|Z_6| \approx 7.91e-11 \Omega$ ， $|Z_5| \approx 7.14e-13 \Omega$ 。

可以看到：Z6 从 $\sim 1 \Omega$ 被 Cad 拉到 $\sim 1e-10 \Omega$ （变化巨大），Z5 也从 $\sim 1e-2 \Omega$ 拉到 $\sim 1e-12 \Omega$ ；但它们分别是被加在 $\sim 2069 \Omega$ （0.5Z1）和 $\sim 18.7 \Omega$ （0.5Z2）上——这种加法里，小项再怎么变也改不了大项的性质，所以并联支路、进而 Z_{total} 的感/容特性几乎无法被 Cad 调整。

2 尝试将Cad加在A、B、C三相共同接机壳点-GND之间（原Rf、Cf）

结果：在将 Cad 与 Csf0 串联后，Cad 的变化会显著改变 Δ 网络 b-c 边的等效阻抗 Z_{4_0} ，并经 $\Delta \rightarrow Y$ 变换主要反映到星形臂 Z6、Z5 上。例如，当

$C_{ad} = 1e-12 \text{ F}$ 时， $|Z_{\text{csf0_ad}}| \approx 7.96 \text{ k}\Omega$ ， $|Z_{4_0}| \approx 7.96 \text{ k}\Omega$ ，对应 $|Z_6| \approx 3.66 \text{ k}\Omega$ 、 $|Z_5| \approx 33 \Omega$ ；

$C_{ad} = 3.16e-9 \text{ F}$ 时， $|Z_{4_0}| \approx 3.59 \Omega$ ， $|Z_6| \approx 3.57 \Omega$ 、 $|Z_5| \approx 0.032 \Omega$ ；

$C_{ad} = 1e2 \text{ F}$ 时， $|Z_{4_0}| \approx 1.08 \Omega$ ， $|Z_6| \approx 1.07 \Omega$ 、 $|Z_5| \approx 0.0097 \Omega$ 。

可以看到，Z6 从 $\text{k}\Omega$ 级一路降到 $\sim 1 \Omega$ ，Z5 从 $\sim 33 \Omega$ 降到 $\sim 0.01 \Omega$ ，变化跨越多个数量级，说明 Cad 的作用链路是畅通的。

然而，总阻抗的组合形式为

,

而在同一频点得到

$|Z_1| \approx 4.14 \text{ k}\Omega \rightarrow 0.5 \cdot Z_1 \approx 2.07 \text{ k}\Omega$,

$|Z_2| \approx 37.38 \Omega \rightarrow 0.5 \cdot Z_2 \approx 18.7 \Omega$ 。

因此，不论 Z6 是 1Ω 还是 $3.6 \text{ k}\Omega$ ，左支路 $Z_6 + 0.5Z_1$ 都是 $\text{k}\Omega$ 量级；不论 Z5 是 33Ω 还是 0.01Ω ，右支路 $Z_5 + 0.5Z_2$ 在大多数情况下都被 18.7Ω 的 $0.5Z_2$ 主导。两支路并联时，结果始终由较小的右支路控制，而串联臂 Z_4 又稳定在 $\sim 37 \Omega$ 附近。最终， Z_{total} 被锁定在“几十欧”量级，Z6/Z5 的巨大变化被 $0.5Z_1$ 、 $0.5Z_2$ 与 Z_4 这三个大项完全淹没，从而导致 Cad 无法有效调节电路的感/容特性。

3 1方案改成电感：没用

[Lad scan] i=00, Lad=1.000000e-12 H, sample @ f=2.000e+07 Hz
Zlad: +0.000000e+00+1.256637e-04j |Z|=1.256637e-04 ∠90.00°
Z_csf0_ad: -0.000000e+00+1.256784e-04j |Z|=1.256784e-04 ∠90.00°
Z4_0: -4.667500e-16+1.256784e-04j |Z|=1.256784e-04 ∠90.00°
Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j |Z|=5.570531e+01 ∠-42.52°
Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j |Z|=4.138196e+03 ∠-0.06°
Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j |Z|=3.738369e+01 ∠-42.87°
Z4 (series arm): +2.737268e+01-2.509748e+01j |Z|=3.713687e+01 ∠-42.52°
Z5: +7.614000e-07+8.320670e-07j |Z|=1.127859e-06 ∠47.54°
Z6: -7.613962e-07+1.248463e-04j |Z|=1.248486e-04 ∠90.35°

[Lad scan] i=01, Lad=5.623413e-11 H, sample @ f=2.000e+07 Hz
Zlad: +0.000000e+00+7.066590e-03j |Z|=7.066590e-03 ∠90.00°
Z_csf0_ad: -0.000000e+00+7.113206e-03j |Z|=7.113206e-03 ∠90.00°
Z4_0: -1.495182e-12+7.113206e-03j |Z|=7.113206e-03 ∠90.00°
Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j |Z|=5.570531e+01 ∠-42.52°
Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j |Z|=4.138196e+03 ∠-0.06°
Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j |Z|=3.738369e+01 ∠-42.87°
Z4 (series arm): +2.737264e+01-2.509753e+01j |Z|=3.713687e+01 ∠-42.52°
Z5: +4.309417e-05+4.709367e-05j |Z|=6.383511e-05 ∠47.54°
Z6: -4.308203e-05+7.066113e-03j |Z|=7.066244e-03 ∠90.35°

[Lad scan] i=02, Lad=3.162278e-09 H, sample @ f=2.000e+07 Hz
Zlad: +0.000000e+00+3.973835e-01j |Z|=3.973835e-01 ∠90.00°
Z_csf0_ad: -0.000000e+00+6.293019e-01j |Z|=6.293019e-01 ∠90.00°
Z4_0: -1.170257e-08+6.293019e-01j |Z|=6.293019e-01 ∠90.00°
Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j |Z|=5.570531e+01 ∠-42.52°
Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j |Z|=4.138196e+03 ∠-0.06°
Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j |Z|=3.738369e+01 ∠-42.87°
Z4 (series arm): +2.736892e+01-2.510164e+01j |Z|=3.713691e+01 ∠-42.53°
Z5: +3.813147e-03+4.165789e-03j |Z|=5.647468e-03 ∠47.53°
Z6: -3.718094e-03+6.251368e-01j |Z|=6.251478e-01 ∠90.34°

[Lad scan] i=03, Lad=1.778279e-07 H, sample @ f=2.000e+07 Hz
Zlad: +0.000000e+00+2.234652e+01j |Z|=2.234652e+01 ∠90.00°
Z_csf0_ad: +0.000000e+00-1.132954e+00j |Z|=1.132954e+00 ∠-90.00°
Z4_0: -3.793043e-08-1.132954e+00j |Z|=1.132954e+00 ∠-90.00°
Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j |Z|=5.570531e+01 ∠-42.52°
Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j |Z|=4.138196e+03 ∠-0.06°
Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j |Z|=3.738369e+01 ∠-42.87°
Z4 (series arm): +2.737945e+01-2.508999e+01j |Z|=3.713680e+01 ∠-42.50°

Z5: -6.861746e-03-7.502694e-03j |Z|=1.016730e-02 \angle -132.45°

Z6: +7.169831e-03-1.125449e+00j |Z|=1.125472e+00 \angle -89.63°

[Lad scan] i=04, Lad=1.000000e-05 H, sample @ f=2.000e+07 Hz

Zlad: +0.000000e+00+1.256637e+03j |Z|=1.256637e+03 \angle 90.00°

Z_csf0_ad: +0.000000e+00-1.079212e+00j |Z|=1.079212e+00 \angle -90.00°

Z4_0: -3.441728e-08-1.079212e+00j |Z|=1.079212e+00 \angle -90.00°

Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j |Z|=5.570531e+01 \angle -42.52°

Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j |Z|=4.138196e+03 \angle -0.06°

Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j |Z|=3.738369e+01 \angle -42.87°

Z4 (series arm): +2.737913e+01-2.509034e+01j |Z|=3.713680e+01 \angle -42.50°

Z5: -6.536348e-03-7.146716e-03j |Z|=9.685008e-03 \angle -132.45°

Z6: +6.815898e-03-1.072063e+00j |Z|=1.072084e+00 \angle -89.64°

[Lad scan] i=05, Lad=5.623413e-04 H, sample @ f=2.000e+07 Hz

Zlad: +0.000000e+00+7.066590e+04j |Z|=7.066590e+04 \angle 90.00°

Z_csf0_ad: +0.000000e+00-1.078302e+00j |Z|=1.078302e+00 \angle -90.00°

Z4_0: -3.435928e-08-1.078302e+00j |Z|=1.078302e+00 \angle -90.00°

Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j |Z|=5.570531e+01 \angle -42.52°

Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j |Z|=4.138196e+03 \angle -0.06°

Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j |Z|=3.738369e+01 \angle -42.87°

Z4 (series arm): +2.737913e+01-2.509035e+01j |Z|=3.713680e+01 \angle -42.50°

Z5: -6.530840e-03-7.140691e-03j |Z|=9.676846e-03 \angle -132.45°

Z6: +6.809919e-03-1.071159e+00j |Z|=1.071181e+00 \angle -89.64°

[Lad scan] i=06, Lad=3.162278e-02 H, sample @ f=2.000e+07 Hz

Zlad: +0.000000e+00+3.973835e+06j |Z|=3.973835e+06 \angle 90.00°

Z_csf0_ad: +0.000000e+00-1.078286e+00j |Z|=1.078286e+00 \angle -90.00°

Z4_0: -3.435825e-08-1.078286e+00j |Z|=1.078286e+00 \angle -90.00°

Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j |Z|=5.570531e+01 \angle -42.52°

Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j |Z|=4.138196e+03 \angle -0.06°

Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j |Z|=3.738369e+01 \angle -42.87°

Z4 (series arm): +2.737913e+01-2.509035e+01j |Z|=3.713680e+01 \angle -42.50°

Z5: -6.530742e-03-7.140584e-03j |Z|=9.676701e-03 \angle -132.45°

Z6: +6.809813e-03-1.071143e+00j |Z|=1.071165e+00 \angle -89.64°

[Lad scan] i=07, Lad=1.778279e+00 H, sample @ f=2.000e+07 Hz

Zlad: +0.000000e+00+2.234652e+08j |Z|=2.234652e+08 \angle 90.00°

Z_csf0_ad: +0.000000e+00-1.078286e+00j |Z|=1.078286e+00 \angle -90.00°

Z4_0: -3.435824e-08-1.078285e+00j |Z|=1.078285e+00 \angle -90.00°

Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j |Z|=5.570531e+01 \angle -42.52°

Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j |Z|=4.138196e+03 \angle -0.06°

$Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j \quad |Z|=3.738369e+01 \quad \angle -42.87^\circ$
 $Z4 \text{ (series arm): } +2.737913e+01-2.509035e+01j \quad |Z|=3.713680e+01 \quad \angle -42.50^\circ$
 $Z5: -6.530741e-03-7.140582e-03j \quad |Z|=9.676698e-03 \quad \angle -132.45^\circ$
 $Z6: +6.809811e-03-1.071143e+00j \quad |Z|=1.071165e+00 \quad \angle -89.64^\circ$

$[Lad \text{ scan}] \quad i=08, \quad Lad=1.000000e+02 \text{ H, sample @ } f=2.000e+07 \text{ Hz}$
 $Zlad: +0.000000e+00+1.256637e+10j \quad |Z|=1.256637e+10 \quad \angle 90.00^\circ$
 $Z_csf0_ad: +0.000000e+00-1.078286e+00j \quad |Z|=1.078286e+00 \quad \angle -90.00^\circ$
 $Z4_0: -3.435824e-08-1.078285e+00j \quad |Z|=1.078285e+00 \quad \angle -90.00^\circ$
 $Z_total: +4.105903e+01-3.764622e+01j \quad |Z|=5.570531e+01 \quad \angle -42.52^\circ$
 $Z1: +4.138194e+03-4.073300e+00j \quad |Z|=4.138196e+03 \quad \angle -0.06^\circ$
 $Z2: +2.740001e+01-2.543185e+01j \quad |Z|=3.738369e+01 \quad \angle -42.87^\circ$
 $Z4 \text{ (series arm): } +2.737913e+01-2.509035e+01j \quad |Z|=3.713680e+01 \quad \angle -42.50^\circ$
 $Z5: -6.530741e-03-7.140582e-03j \quad |Z|=9.676698e-03 \quad \angle -132.45^\circ$
 $Z6: +6.809811e-03-1.071143e+00j \quad |Z|=1.071165e+00 \quad \angle -89.64^\circ$

4 2方案改成电感

总结

在 $1e7-1e8 \text{ Hz}$ 频段，从幅相曲线可以把各项的“角色分工”概括为：0.5Z1（蓝）幅值稳定在约 103.3Ω （k Ω 量级），相位接近 0° （近电阻/弱反应性），因此在并联结构中等价于“几乎开路”，使得左支路 ($Z6+0.5Z1$) 永远被 0.5Z1 钳在 k Ω 量级，而对 Z_{total} 贡献很小；0.5Z2（橙）在该频段幅值下降到十几欧量级，且相位长期靠近 -90° （强容性），因此右支路 ($Z5+0.5Z2$) 的幅相几乎总由 0.5Z2 主导并决定了并联部分的主要性质；Z5（红）在 $1e7-1e8 \text{ Hz}$ 幅值已远小于 1Ω （趋近毫欧/微欧级），相位更偏向 $-120^\circ \sim -180^\circ$ （极强容性），但由于幅值太小，它在加法 $Z5+0.5Z2$ 中几乎被 0.5Z2 直接淹没，难以改变右支路；Z6（紫）在高频也下降到 $<1 \Omega$ 且相位接近 -90° ，但它出现在 $Z6+0.5Z1$ 里，被 k Ω 级的 0.5Z1 完全压制；最后 Z4（绿）在该频段是十几到几十欧量级、相位从负角度逐渐向 0° 靠近，并且它以串联项形式叠加在并联结果之后，因此对 Z_{total} 的幅值“锁定在十几~几十欧”起决定作用。综合起来，高频端可以近似理解为：并联部分主要由右支路 ($\approx 0.5Z2$) 决定，而最终幅相再由串联的 Z4 进一步设定。

因此，在中性点（Neutral）或机壳公共点加电容/电阻（无论并联或引入串联支路）之所以无法改变整体阻抗的容/感性，本质原因有两层：第一，按你当前的 $\Delta \rightarrow Y$ 等效路径，这类对地元件主要只会显著改变 Δ 网络某一边，从而体现在 Z5, Z6（以及部分情况下 Z4）的数值上，但在 $1e7-1e8 \text{ Hz}$ ，Z5, Z6 在总式中分别被 0.5Z2 与 0.5Z1 的“加法钳位”压住（小项再怎么变也改不了大项的幅相性质），导致并联部分的主导容性仍由 0.5Z2 决定；第二，即便对地元件通过 $\Delta \rightarrow Y$ 变换同时推动了并联部分与串联臂（你观察到的 $Z \parallel$ 变大而 Z4 变小），它们也会在变换结构下呈现“反向耦合补偿”，使 $Z \parallel + Z4$ 的复数和近似保持不变，最终 Z_{total} 在该频段被结构性锁定，难以通过在 Neutral 或机壳处增减对地元件来实现“由容转感”的性质改变。

高频段（10–100 MHz）中调节 Z2、Z4 无法改善相位拟合的原因

通过分别对 Z2、Z4 的实部与虚部进行大范围扫描（仅观察相位响应），可以发现：无论如何调节这两个内部等效阻抗分支，在 10–100 MHz 频段内，仿真结果的相位始终保持容性或仅能接近 0° ，而无法像实验结果那样明显转为感性。这表明，在该频段内，Z2 与 Z4 已不再是端口等效阻抗的主导项。

其根本原因在于：在高频极限下，等效电路被“对地电容通道”所主导。随着频率升高，相关电容支路的阻抗幅值按 $1/\omega$ 迅速减小，相当于形成一条越来越接近短路的高频通道。相比之下，Z2、Z4 这类仅随频率缓慢变化、幅值有限的 lumped 阻抗项，对端口看到的总阻抗反应性影响变得微弱。

因此，调节 Z2、Z4 只能在中频段（约 $1e5 \sim 1e7$ ）内移动曲线位置，却无法改变高频段的相位符号。

为什么需要引入小电感（寄生/ESL）来解释实验高频相位

实验曲线在 $1e7 \sim 1e8$ Hz 范围内不仅出现相位由容性转为明显感性的趋势，而且伴随高频振荡起伏。这种特征更符合“寄生电感 + 分布效应”的典型表现，而非电机内部 lumped 元件的行为。

从数量级估算可知：

若高频主导的等效对地电容在 nF 量级，仅需几十 nH 级别的串联电感，就足以在 10–100 MHz 区域与该电容产生相位翻转。这一数量级完全可能来自于测量回路、引线、机壳到地的几何回路或电容自身的 ESL，而非电机本体参数。

因此，单纯在模型内部调节 Z2、Z4 无法重现实验高频感性特征；要扭转 10–100 MHz 段的相位，必须在主导的对地电容通道或端口回路中引入小的串联寄生电感项。实验中高频相位的主要来源更可能是测量系统与回路几何结构，而非电机内部的 lumped 等效支路。