

MARS-12S10P 单定子单转子电机 轴向磁拉力仿真报告

单边轴向磁通结构（SSSR）定转子之间存在固有的不平衡轴向吸力。本报告给出该力的大小、纹波与空间分布，供轴承选型与结构设计使用。

模型 MARS-12S10P_SSSR_D76-C150_V5.0-0819.mot

12槽 / 10极 · 气隙 1 mm · 磁钢轴向厚 3 mm (径向深 13 mm) · 极弧 67.2%

5000 rpm · 相电流 21 A(RMS) · 相位角 0° 报告 V2 · 2026-08-25 · 新增 V3.0 解析报告对标

空载净轴向力 (磁钢 100 °C 热态)

342.9 N

转子被吸向定子 (模型默认温度)

空载净轴向力 (磁钢 20 °C 冷态)

416.5 N

V2 新增; $F \propto B_r^2$ 定律实测偏差 <1%

负载影响 (21 A RMS)

+0.1 %

纹波峰峰 ~1.1%，磁钢主导

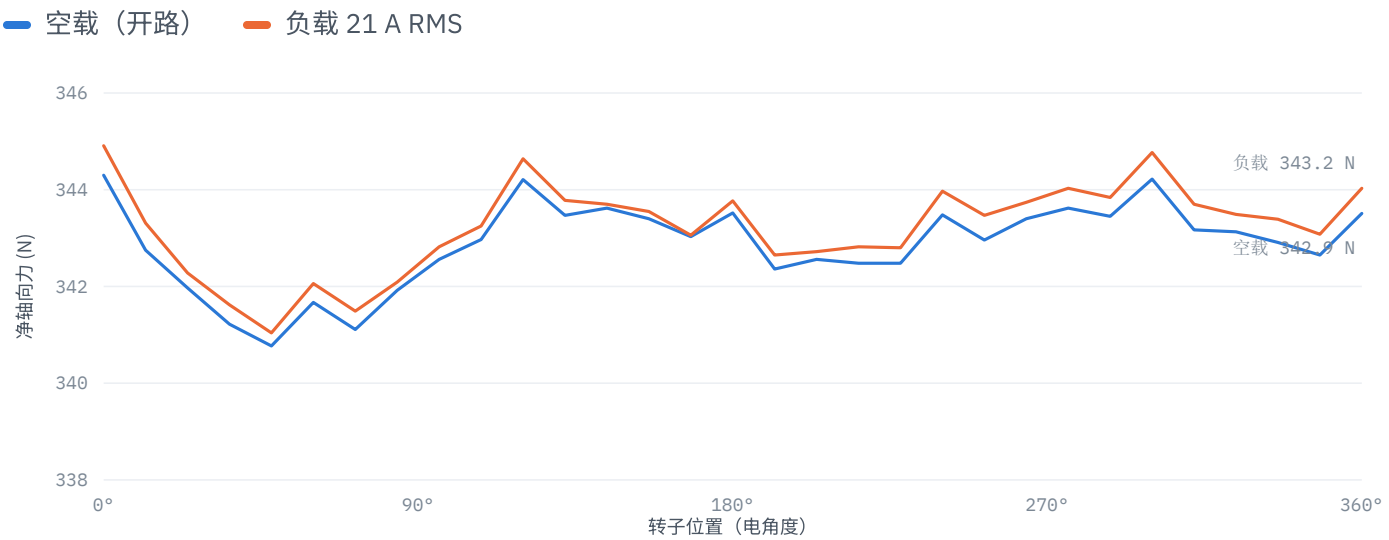
磁负刚度 k_{neg} (1 mm 气隙)

207 N/mm

V2 新增; 气隙减小→吸力增大的正反馈

净轴向力随转子位置的变化

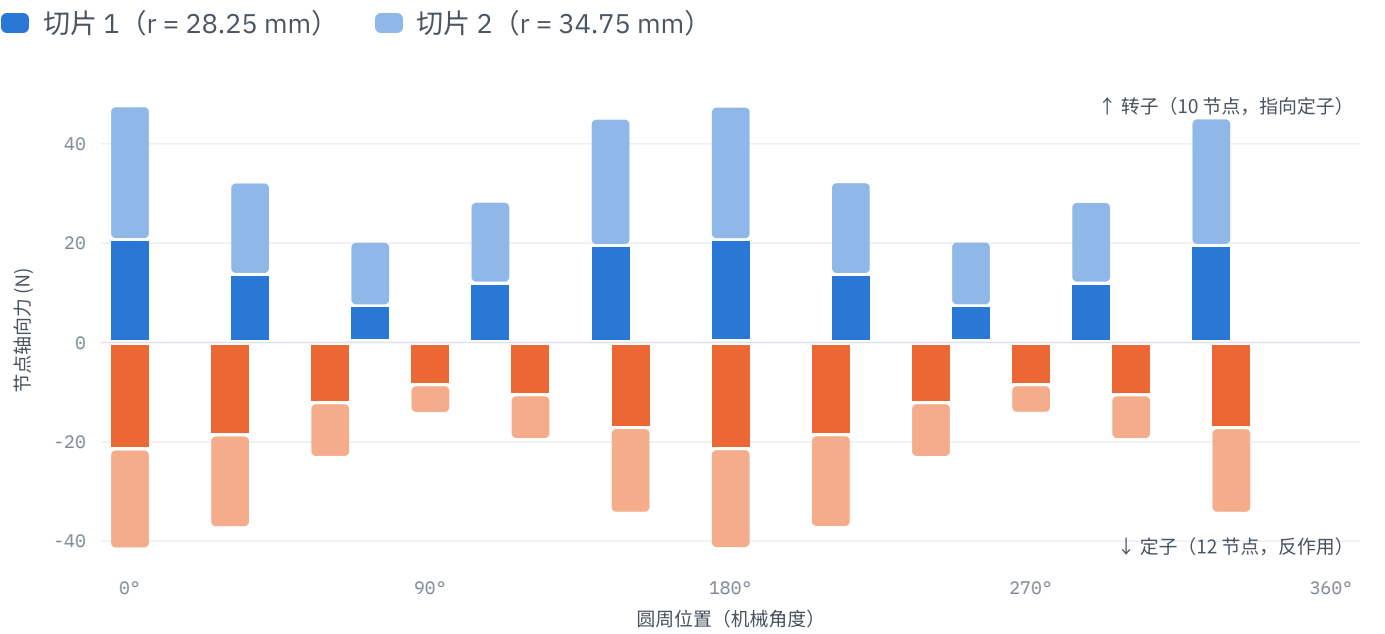
一个电周期（31 个时间步）内转子所受净轴向力。空载与负载曲线几乎重合——该力由磁钢对定子铁芯的吸力主导，电枢电流主要产生切向力。



注：本图为磁钢 100 °C 热态基线；纵轴为 338–346 N 局部放大以显示纹波，力的绝对量级见上方汇总卡。纹波幅值很小（12/10 齿槽配合）。轴承设计载荷取 600 N 包络（覆盖低温 + 气隙公差最恶劣组合 ≈ 563 N，见对标章节）。

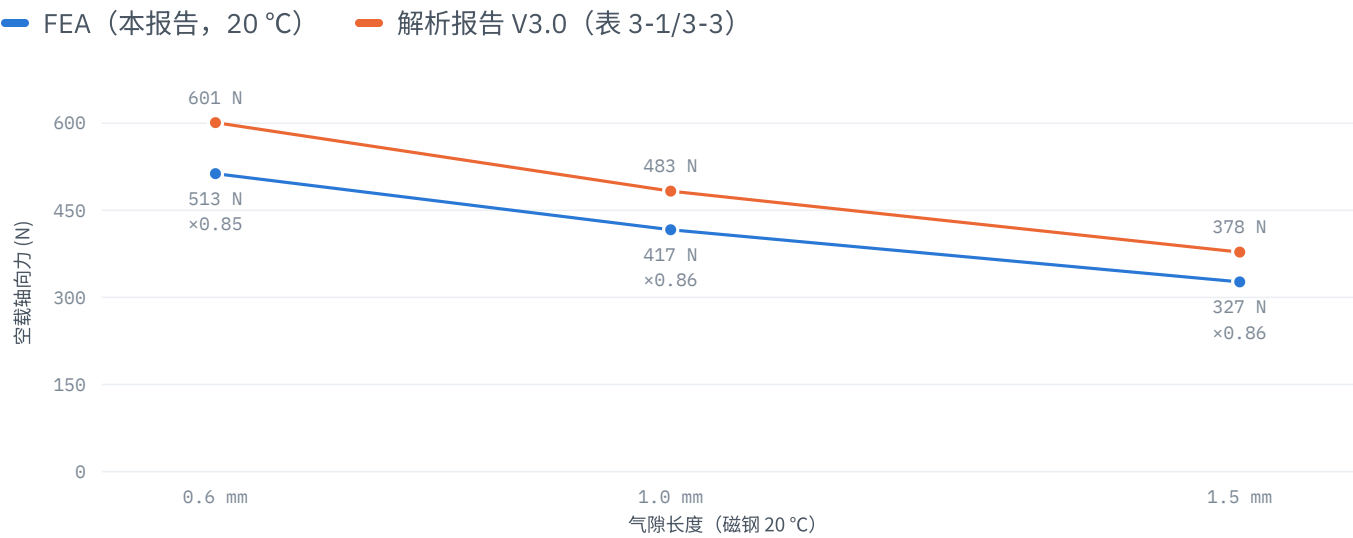
节点轴向力分布 (t = 0)

力在圆周方向的分布均匀（各极/各齿量级一致、无单边偏载），两径向切片中外侧切片（r = 34.75 mm）承担更大份额——面积更大、线速度更高，符合预期。定子侧为反作用力，方向相反。



对标《轴向磁拉力计算与轴承选型校核报告 V3.0》

该解析报告（磁路模型 + Maxwell 应力，磁钢 20 °C 基准）给出空载 $F_z=483\text{ N}$ （中值 500 N）。
将 FEA 磁钢温度归一到 20 °C 并扫描气隙后对比：三个气隙下 FEA/解析比值稳定在 0.85~0.86——解析法系统性偏高约 16%（集中参数磁路不计齿槽、边缘效应与厚磁钢侧漏的正常量级），趋势完全一致，对得上。



对比项	解析报告 V3.0	FEA（本报告）	结论
空载力 @1.0 mm，20 °C	483 N（中值 500 N）	416.5 N	比值 0.86，一致（解析偏高属方法固有）
气隙 0.6 / 1.5 mm	601 / 378 N	513.1 / 326.7 N	比值 0.85 / 0.86，趋势一致
磁负刚度 k_{neg} @1 mm	250 N/mm	207 N/mm（中心差分）	同随 F 等比，判据结论一致
温度定律 $F \propto B_r^2$	80 °C 时 -15%（推算）	100 °C 实测 343 N ↔ 折算 340 N	偏差 <1%，精确成立
负载电枢反应	经验取 +10~20% → 设计 600 N	实测 +0.07%	机理不成立；但 600 N 包络仍稳健（最恶劣 -20 °C + 0.6 mm ≈ 563 N），依据应改为低温 + 气隙公差
轴承结论链	708AC 寿命 577 h 不满足 → 推荐 7004AC	FEA 载荷代入约 1 730 h	仍远小于 20 000 h，结论不变，方案 A 裕度更大

输入核对（已闭环）：.mot 模型与解析报告描述同一套磁钢几何——模型
Magnet_Length=3 即磁钢轴向厚度 3 mm（Magnet_Thickness=13 是磁钢环径向深度

$= (76-50)/2$) ；极弧 `Magnet_Arc_[ED]=121°elec` = 24.2° 机械角 = 覆盖率 67.2%，均与报告表 2-1 一致。因此 0.85~0.86 的比值是纯方法差异（磁路法不计齿槽/边缘/侧漏，系统性偏高 ~15%），不存在参数口径问题。详见仓库 docs/COMPARISON_V3.md。

结果校核（三项全部通过）

校核项	数值	判据与结论
作用力-反作用力	转子 +343.2 N ↔ 定子 -337.4 N	偏差 1.7%（定/转子节点离散数不同：12 vs 10），通过
转矩交叉核对	$\Sigma (F_t \cdot r) = 0.505 \text{ N}\cdot\text{m}$ ↔ 转矩图 0.522 N·m	偏差 3%，切向力与转矩输出互洽，通过
解析量级核对	$B^2 A / 2 \mu_0 = 485 \text{ N}$ ↔ FEA 343 N	同量级（解析式取全环面积与气隙 B^2 均值，系统性偏大，比值 0.71 合理），通过

方法说明（关键结论，供复用）

Motor-CAD 2026R1 对轴向磁通电机（AFM）的轴向力没有输出变量、没有 2D 结果图、帮助文档未收录。数据入口是 3D 集中节点力图：

```
get_magnetic_3d_graph_point("Fr_{Rotor|Stator}_{OL|OC}_Lumped", 切片号, 节点号, 时间步)
```

- AFM 的 2.5D 展开模型沿用径向电机命名：**Fr（法向力）即轴向力**，Ft 为切向力；单位 N/节点/切片。
- 求解前须打开 `ElectromagneticForcesCalc_Load` 与 `_OC`；一次求解同时得到空载（OC）与负载（OL）。
- 节点：转子 10 个（36° 步距）、定子 12 个（30° 步距），首尾（0°/360°）为同一节点须去重；对节点与两切片求和得净力。
- 本模型电流为 RMS 口径（`CurrentDefinition=1`）：改电流要设 `RMSCurrent`，改 `PeakCurrent` 无效。

同事复现指南

整个项目由 git 管理，脚本一条命令跑完（约 2 分钟），原始 .mot 不会被修改。

1. **环境**：Windows + Motor-CAD 2026R1（安装器会设好 `MOTORCAD_ACTIVEX` 环境变量）；Python ≥ 3.10 ，执行 `pip install ansys-motorcad-core`。
2. **获取项目**：复制整个 `motionpushpull` 目录（含 .git）。
3. **运行**：`python -X utf8 axial_force_final.py` ——Motor-CAD 前台弹出，求解约 88 s，结束后保持打开供检查（加 `--quit` 自动关闭）。
4. **读结果**：控制台 [结论] 两行；波形与校核在 `output_motorcad/axialforce_final_*.json` 与 `axial_force_*.csv`。
5. **判定**：作用-反作用偏差 $< 5\%$ 、转矩交叉 $< 10\%$ 、解析同量级，三项都过才采信。

换其它 AFM 模型：改脚本顶部 `MOT_SRC`；若切片数/半径不同，按 .mot 中

`AFM_SectionCentreRadius_Array` 更新 `SEC_RADII_MM`。探测脚本 `axial_probe*.py` 是找数据口的历史过程，复现时无需运行。详见仓库 `REPRODUCE.md`。

数据：output_motorcad/axialforce_final_0825_212518.json（基线 100 °C）·

compare_results_0825_215456.json（20 °C 气隙扫描）· git: deb6b65 / 33eb8cf / 527eb49 · 对标对象：《轴向磁拉力计算与轴承选型校核报告 V3.0-20260826》· 工具链：PyMotorCAD + Motor-CAD 2026R1（前台）