



## 案例研究



**MAGCAM**  
advanced  
magnet  
inspection



# 利用Magcam 技术最大化永磁 电机效率

2023年比利时电动方程式赛车  
的洞察

“

**通过策略性地选择高品质的磁铁，  
制造商可以将电机的属性，如齿槽  
转矩和扭矩波动，提高2倍至4倍。**

”



## 介绍

磁铁的质量对永磁电机的性能至关重要。这是本案例研究的主要结论，我们在这里展示了电机制造商可以在电机生产的早期阶段通过优化磁铁质量，实现关键电机性能特性（如扭矩波动和齿槽转矩）上令人印象深刻的2倍至4倍的提升。

这些结果为高端电动机/发电机应用开辟了新的可能性。在汽车行业，这包括赛车运动和高性能消费者汽车，以及更广泛的电动出行市场。这些结果同样适用于电动机的其他应用领域，如航空、工业自动化、消费品和医疗设备。继续阅读，了解Magcam如何帮助您释放永磁电动机的未开发潜力。

**“一级方程式赛车除了使用内燃机外，还采用电动机/发电机单元。电机性能的提升立即转化为宝贵的单圈时间缩短。”**

**“这个赛季,我们在电机的电流控制相关问题上经历了显著的减少。这种改进在很大程度上可以归因于扭矩/电流波动的减少,这是通过Magcam对转子进行细致优化而实现的。”**





## 背景

当Formula Electric Belgium团队寻求优化他们2023赛季赛车的性能时,他们与Magcam (磁铁检查专家)和Fischer Elektromotoren GmbH (顶级德国电动机制造商)合作,以确保他们的四个径向通量永磁同步电动机(每个轮子一个)中的磁性质量。

尽管Fischer提供了磁铁并负责转子和电机组装,但Magcam的专长集中在确保这些电动机转子的磁性质量上。这是通过使用Magcam独特的磁场相机测量技术,结合其先进的数据分析能力,应用于组装前的单个磁铁和组装后的转子来实现的。

目标不仅是增强车辆的性能,而且还要通过创建一个由故意选择的劣质磁铁制成的“最坏情况”转子来提供比较分析。继续阅读,了解Magcam是如何实现这一点的,以及从结果中可以学到什么。



2023年Formula Electric Belgium团队及其全电动赛车“Apollo”,其中包含了四台由Magcam优化的径向通量永磁电机。  
来源:[www.facebook.com/formulaelectricbelgium/posts/730519009084633](https://www.facebook.com/formulaelectricbelgium/posts/730519009084633)

“

**磁铁的批次通常包含大量的质量参数变化, 这导致了次优的最终产品。**

”

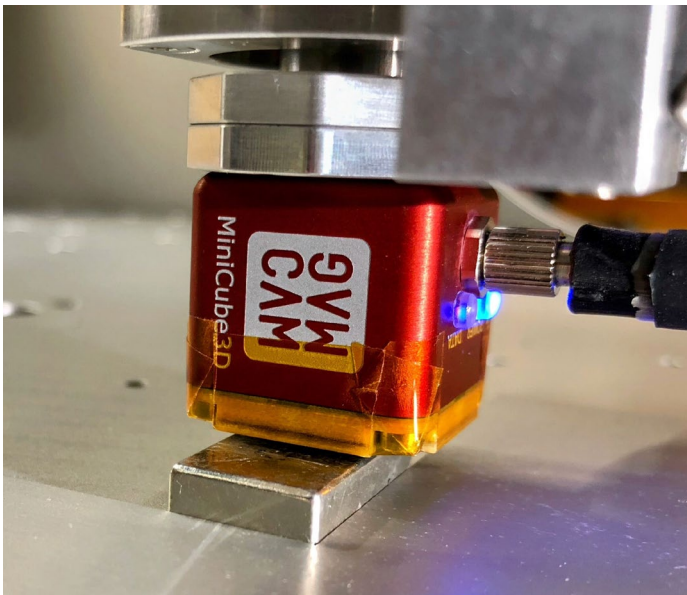


## 磁场测量和磁铁的选择

### Magcam对单个磁铁的扫描

研究开始时, Magcam使用其先进的磁场相机Combi Scanner测量Fischer提供的200个磁铁的高分辨率磁场分布。批次大小远大于转子所需的磁铁数量, 因为预计基于其质量, 大部分磁铁将不得不被拒绝。

测量涉及在高速下将Magcam的MiniCube3D磁场相机在磁铁表面上移动几步, 随后将单个帧拼接在一起。集成的2D阵列包含超过16000个霍尔效应传感器, 允许短的循环时间, 将整个批次测量时间限制在几个小时内



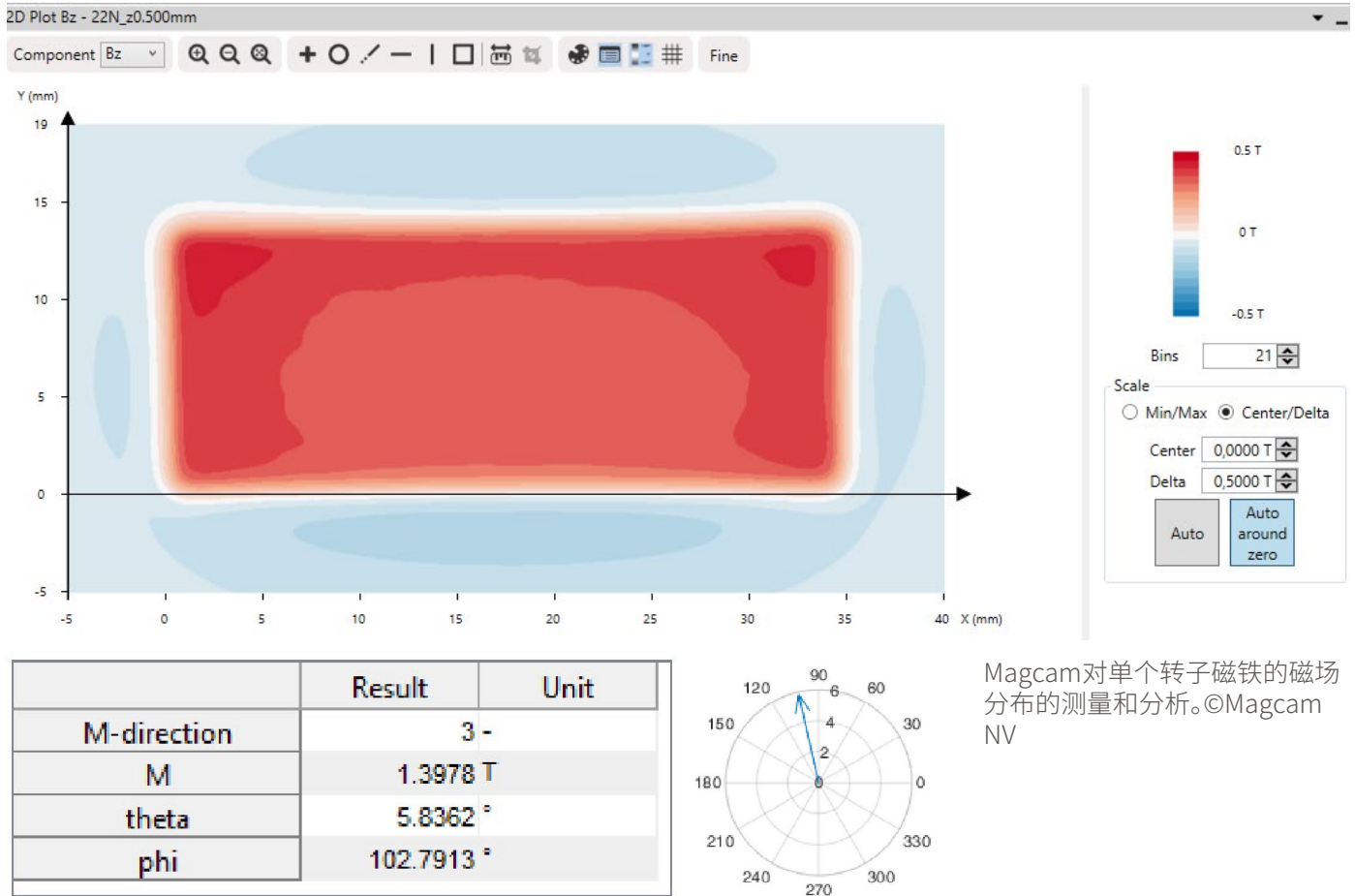
Magcam的MiniCube3D磁场摄像机

从随后对测量的磁场分布数据的分析中, 为每个磁铁产生了一系列的质量参数, 包括磁铁强度、磁化角误差和局部磁同质性图, 允许深入的质量评估, 这是任何其他磁检查技术都无法比拟的

将这些结果倾注入直方图后, 可以可视化并进一步分析磁铁批次内的质量变化。目标是什么? 从批次中识别出赛车转子最理想的磁铁, 同时也选择一组劣质的磁铁用于“最坏情况”的转子, 以展示劣质磁铁可能带来的后果。

能带来的后果。

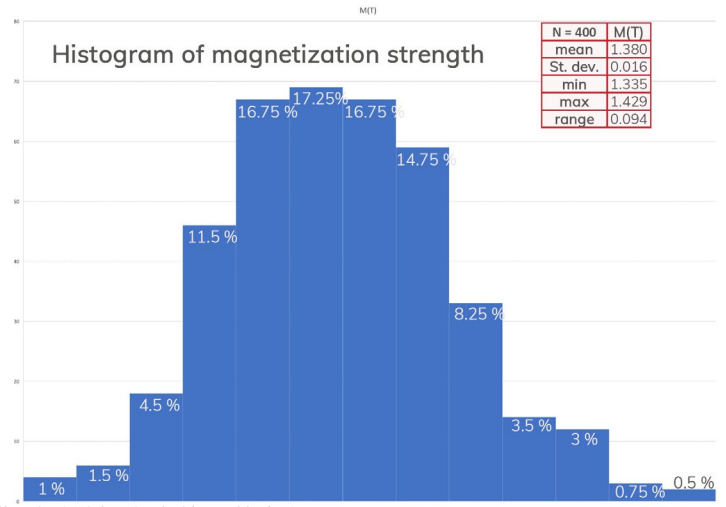
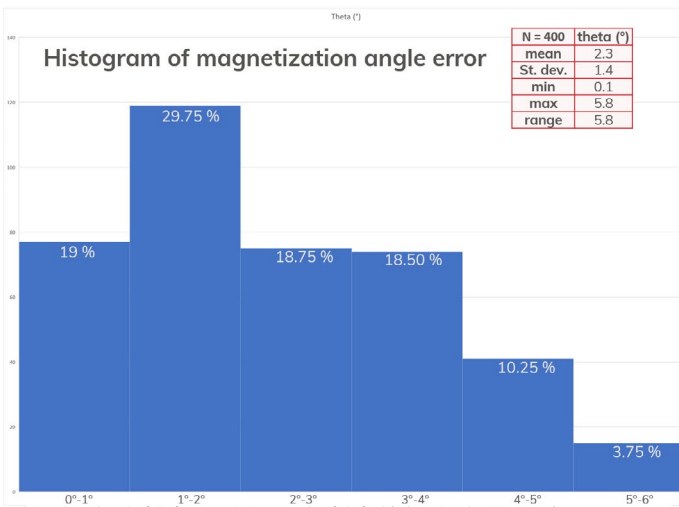
首先通过拒绝所有显示出过大的磁化矢量角偏差的磁铁进行了初步筛选, 只留下大约一半的磁铁。接下来, 也移除了在其内部磁化分布中显示出大的不均匀性的磁铁, 这是一个只能使用磁场映射和Magcam专有分析算法组合测量的特性。在这组剩下的磁铁



中, 其内部磁化强度仍存在相当大的变化, 这是Magcam的算法也可以从外部磁场分布中提取的指标。由于目标是创建高性能的电机, 因此选择了高强度、公差严格的磁铁, 同时最大化了四个转子之间的磁质同质性。这种精心的选择产生了4组高品质的磁铁, 每个转子一个。

为了查看这样的电机在功能性电机测试中的表现, 选择了另一组质量较差的磁铁用于“最坏情况”的转子, 这些磁铁显示出磁铁强度、角度偏差和磁铁不均匀性的大变化。





磁化角偏差(左)和磁化强度(右)的批次直方图结果,显示了典型磁铁批次中的显著变化。©Magcam NV

## 研究发现

- 即使来自公认的供应商, 磁铁质量的差异也是显而易见的。这进一步强调了细致的组装前评估的重要性。
- 通过精选最好的磁铁, Magcam使Fischer能够组装高性能的转子。

“

**高速、高分辨率的  
Magcam测量允许对磁铁  
进行一系列质量指标的筛  
查, 并防止劣质磁铁进入  
成品。**

”



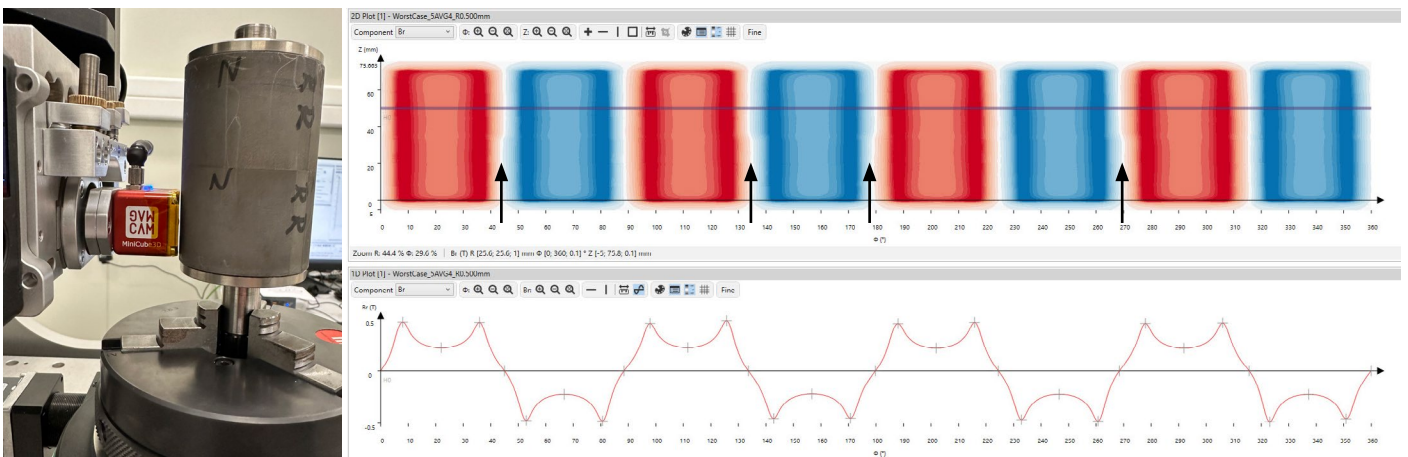
## 组装、测量和分析转子 Fischer Elektromotoren的转子组装

一旦磁铁被精心挑选出来, 轮到Fischer组装四个优化的转子, 以及“最坏情况”的单元。所有的转子都按照完全相同的专家程序组装, 因此转子之间的任何差异主要是由于内部磁铁的质量, 组装过程中的公差也有一些额外的影响。

### 转子磁场扫描和Magcam分析

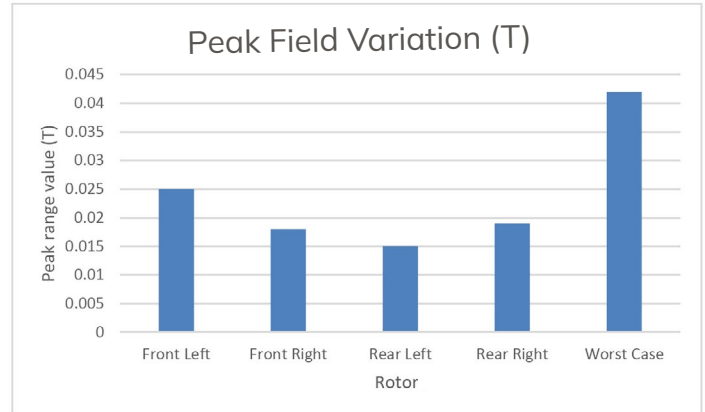
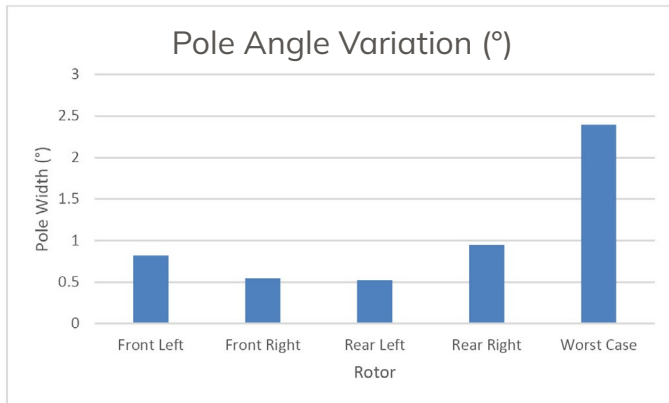
组装后, Magcam的Combi Scanner再次开始行动, 快速测量转子的高分辨率磁场分布图。在测量之前, 首先对转子轴进行了初始的自动跑偏校正, 以确保无跑偏的测量。使用Magcam的先进算法分析了得到的磁场图, 以揭示磁性转子参数, 包括极角一致性、极强度均匀性、场梯度变化和南/北对称性, 目的是后来将这些指标与功能性电机测试相关联。

比较五个构造的转子之间的磁性转子指标立即指向了一个清晰的观察: 由质量参数变化大的磁铁组成的“最坏情况”转子, 在关键的磁性转子质量指标上的变化比优化的转子大2到4倍, 其中磁铁是根据狭窄的公差选择的。



Magcam转子测量及其磁场分布结果 (最差情况的转子)。由于磁质量的波动, 极角变化已经肉眼可见 (由黑色箭头指示)  
©Magcam NV

除了这个惊人的差异,四个优化的转子之间还观察到了较小的差异。由于所有这些转子的磁铁都是根据其质量参数的严格公差精心挑选的,这些剩余的差异被认为是由于转子组装过程中的公差所致。这表明,通过优化转子组装过程,可以进一步提高转子质量,从而提高电机性能,这可以通过Magcam转子测量来验证。



所有转子的极角(左)和峰值场(右)变化的汇总图。”最差情况”的转子突出2倍到4倍。场梯度变化(未显示)显示了类似的模式。©Magcam NV

## 洞察

- 使用精选最佳磁铁组装的优化转子,在关键磁性指标上的性能比“最坏情况”转子好2到4倍。
- 在优化的转子之间仍然观察到较小的差异,这被认为是由于组装公差所致,显示了进一步完善组装过程的潜力
- 这一全面分析展示了两阶段质量控制的直接好处:首先,在磁铁选择中,其次,在转子组装后



“

由质量参数变化大的磁铁组成的转子，  
在关键的磁性转子质量指标上的变化可能比那些磁铁是根据狭窄公差预先选择的转子大2到4倍。

这些磁性质量指标可以使用Magcam设备测量，既可以在单个磁铁上测量，也可以在组装好的转子上测量。

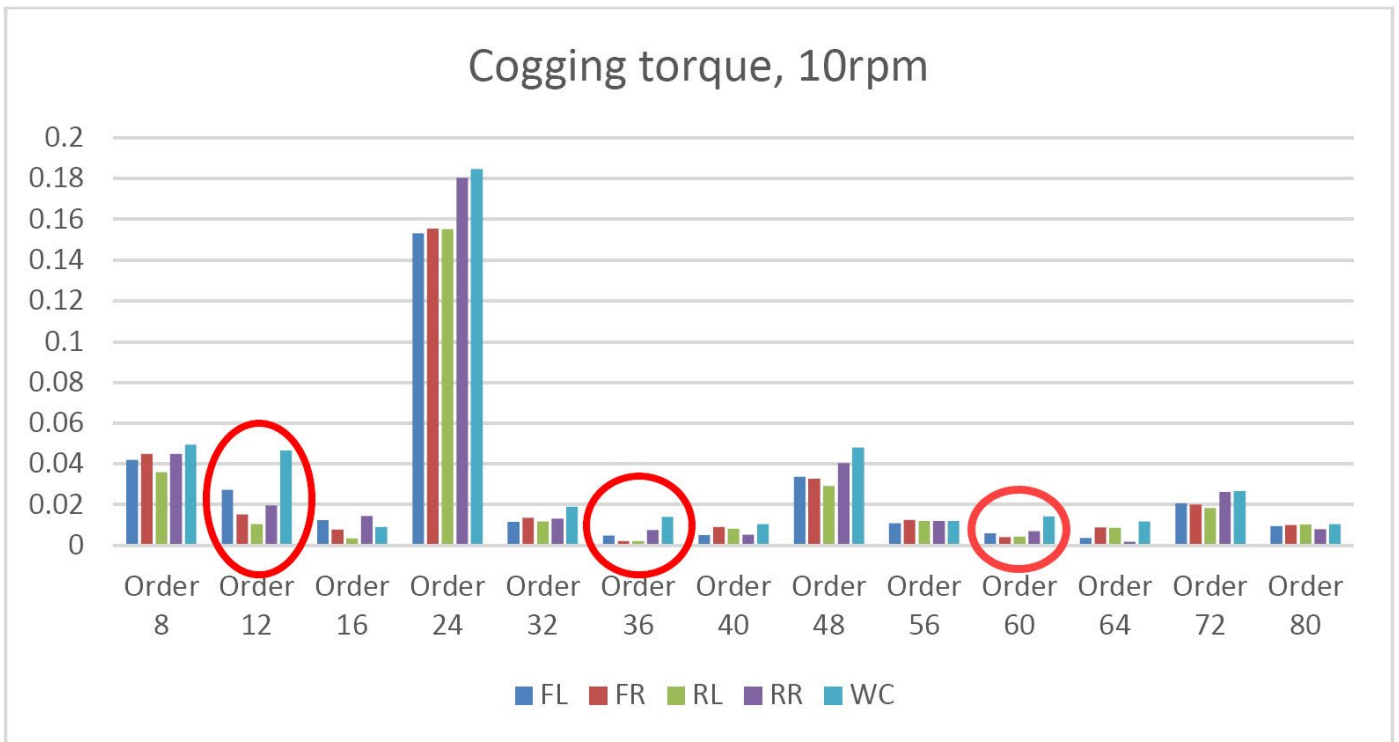
”

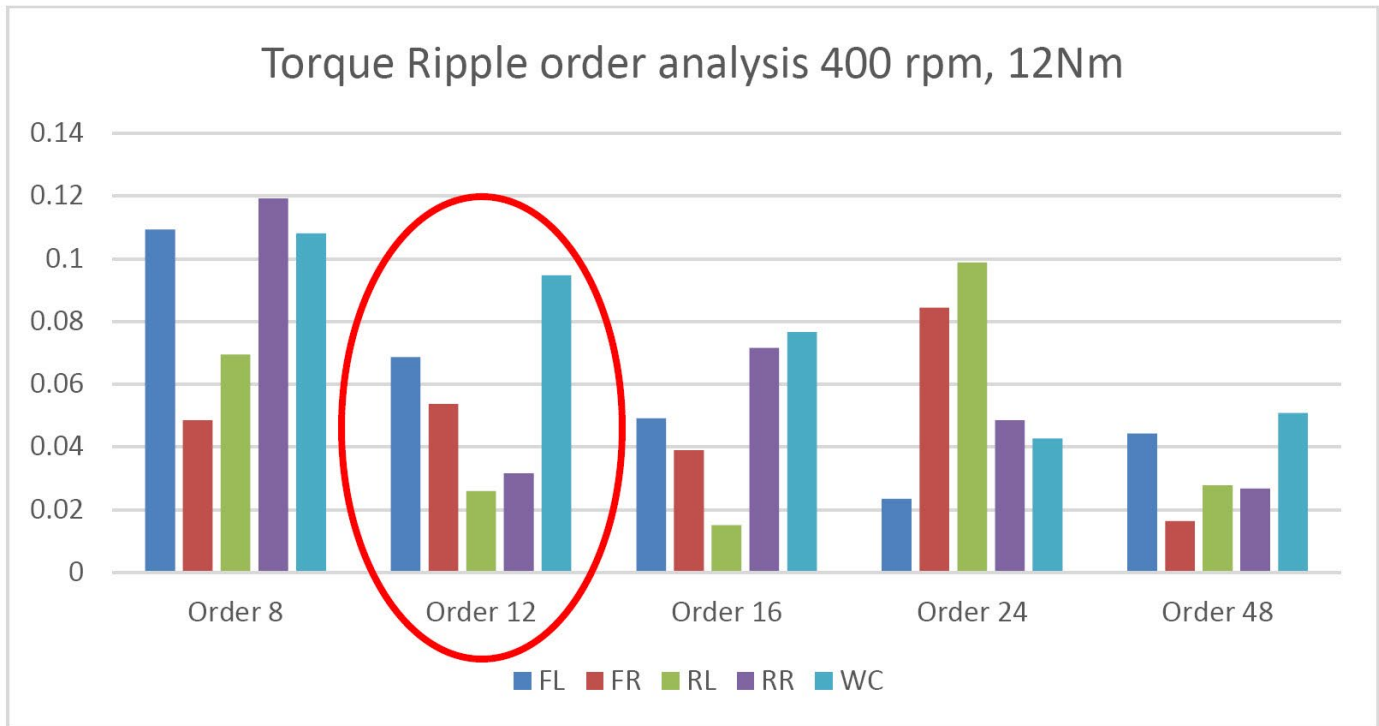


## 功能性电机测试和相关性分析

### Formula Electric Belgium团队的电机测试

配备了组装好的转子, Formula Electric Belgium团队对完成的电机进行了功能性测试, 重点关注如扭矩波动和齿槽扭矩等关键性能指标, 这些是用于汽车应用的电动机中的关键参数。他们的测试得出了对所有五个生产的电机的扭矩波动和齿槽扭矩的傅里叶分析。





完成电机上的Cogging扭矩 (顶部) 和扭矩纹波 (底部) 测量结果。请注意转子相关谐波中不同电机的相对值 (红色圆圈)  
©Formula Electric Belgium

## Magcam的比较分析和相关性

当查看电机的齿槽扭矩和扭矩波动的转子相关谐波的结果图时, 观察到了一个熟悉的画面: 经过优化的转子的值被发现比最坏情况的转子好2到4倍。此外, 这些功能指标的相对值完美地反映了从Magcam转子测量中获得的各种磁性质量参数。

这一比较分析的有力结论是: 从转子上的Magcam测量中获得的磁性质量参数与最终电机中的齿槽扭矩和扭矩波动完美相关! 换句话说: 可以从Magcam转子测量中测得的磁极角偏差、磁峰场变化和场梯度变化来预测最终电机的性能, 而无需组装完整的电机。

这一结论为巨大的成本节省打开了大门, 因为可以在电机组装之前报废不良的转子, 从而通过对裸转子进行磁性扫描来节省时间和材料。

## 结论

- 电机性能、转子磁场分布指标和使用的磁铁质量之间出现了明确且直接的相关性。
- 电机制造商可以通过在转子组装前对单个磁铁进行质量控制，将电机性能优化2到4倍
- 可以从组装好的转子的测量磁场分布中预测电机特性，而无需进行最终的电机组装。



“

**在Magcam转子测量中看到的改进,从2倍到4倍,都反映在最终的电机性能中。这为电机制造商提供了一个宝贵的工具,既可以优化也可以验证电机质量。**

”



## 电动机行业的关键要点

1. 即使在单一的磁铁批次中,也可能存在巨大的变化范围。为了制造顶级的转子,这些变化需要减少。供应商磁铁质量筛选、组装前测量和磁铁预选可以导致明显更好的最终产品
2. 使用Magcam磁场摄像机扫描器和MagScope数据分析软件,电机工程师可以优化关键的磁性转子参数,如极宽变化和场均匀性,与使用劣质磁铁组装的转子相比,可以提高2倍到4倍。
3. 通过策略性地选择高质量的磁铁,制造商可以改进电机属性,如齿槽扭矩和扭矩波动,提高2倍到4倍。
4. 通过测量组装好的转子的磁场分布(即使没有预选的磁铁),可以测量磁性转子参数,以评估转子质量,甚至在完整的电机组装之前预测功能性电机特性,从而节省时间和废料。
5. Magcam可以在电机开发和生产的每个阶段为电机制造商和磁铁供应商提供一流的磁铁检查设备,以及专家建议和服务。

## 关于合作伙伴 Magcam NV



Magcam是基于其独特的磁场摄像技术的永磁检查技术领导者。Magcam的硬件、软件和服务紧密合作,以高速测量、可视化和分析具有高空间分辨率的完整三维磁场分布,以深入分析永磁体、永磁转子和其他磁组件。Magcam的完整解决方案保证了永磁体高端应用的更好开发、改

进的进出质量控制和100%的在线生产测试。Magcam的专家团队还提供测量和分析服务、应用咨询服务,当然还有出色的客户支持。

[www.magcam.com](http://www.magcam.com)

[info@magcam.com](mailto:info@magcam.com)

LinkedIn: @magcam

Youtube: @magcam



## Fischer Elektromotoren GmbH

Fischer是各种类型的高质量、客户特定电机的开发和生产的专家,提供全面的服务,从开发和设计到可靠的系列生产。他们的服务还包括电机、齿轮电机、伺服电机、泵、风扇、电器和其他驱动系统的专业维修。

[www.fischer-elektromotoren.de](http://www.fischer-elektromotoren.de)

[info@fischer-elektromotoren.de](mailto:info@fischer-elektromotoren.de)

## Formula Electric Belgium



Formula Electric Belgium将来自比利时KU Leuven大学和Thomas More大学学院的不同校区的一群有动力的工程学生团结起来。每个赛季都会设计、制造并在国际Formula Student比赛的几个赛事中驾驶一辆

新的电动赛车。该团队得到了合作伙伴的支持,帮助他们实现赛车的建造。对于2023赛季, Magcam和Fischer正在支持他们优化他们的电动机。

[www.formulaelectric.be](http://www.formulaelectric.be)

[info@formulaelectric.be](mailto:info@formulaelectric.be)





**MAGCAM**  
advanced  
magnet  
inspection

## 开始提高您的电机性能

正如本案例研究所示,当配备了正确的工具并与正确的专家合作时,实现电机性能的显著提高是触手可及的。Magcam是您值得信赖的盟友,提供最先进的技术,以促进电机性能的前所未有的进步。不要满足于现状;今天就联系我们,探索我们如何支持您制造树立新的行业标准的顶级电机。

## 联系Magcam的专家

您准备好优化您的电机性能了吗?今天就联系我们,讨论您的应用,以便我们帮助您制造高质量的电机。



[info@magcam.com](mailto:info@magcam.com)



[www.magcam.com](http://www.magcam.com)



+32 16 19 79 67