

基于 JMAG 的永磁同步电机拓扑优化分析

Topology optimization study on Permanent Magnet Synchronous Motor by using JMAG

郑建军 尹秀婷 蔡浩波 李慧 杨晓前 蒲运平

重庆长安汽车股份有限公司新动力研究院

摘要：车用电机设计开发过程中，需要同时满足电磁、结构等多项技术指标，电机设计参数较多且参数之间相互耦合。传统的设计方法需要涉及到多轮次的电磁和结构迭代优化设计，对电机设计工程师的开发经验要求较高，且开发周期较长。本文利用 JMAG 软件强大的拓扑优化功能和准确高效的有限元算法，分别对某永磁同步电机采用 V 型转子和 I 型转子结构开展拓扑分析。首先，根据电机结构和极弧系数确定磁钢结构和布置；其次，建立电磁和结构仿真分析组及拓扑优化 NGnet 高斯函数；然后，根据整车对电机的性能要求确定优化目标，选择优化算法，列出约束条件等。最后，采用遗传算法，快速获得拓扑优化问题的帕累托最优解集。本文研究结果表明，通过 JMAG 软件拓扑优化功能，可以快速获得拓扑优化问题的帕累托最优解集。采用同样的磁钢用量，采用 V 型转子更容易获得平均转矩和转矩脉动率达到要求的转子拓扑优化方案。基于 JMAG 有限元模型的拓扑优化设计方法具有准确度高，优化效率高，实用性强等优点。

关键词：JMAG、永磁同步、电机、拓扑优化

Abstract: During the development of permanent magnet synchronous motor(PMSM) for New energy vehicle(NEV), both the requirements from electromagnetic and structural design should be met. There are too many design parameters in motor design, and they are coupled with each other. Therefore, it needs many turns of iterative optimization in electromagnetic and structural design in traditional method, which needs much more development experiences for engineers and the development period is longer. In this paper, a topology optimization analysis is conducted on a V-type rotor core and a I-type rotor core in a PMSM motor by using the JMAG software, respectively. Firstly, the dimension and the position of the magnets were determined based on the motor structure and the pole arc coefficient. Secondly, electromagnetic and structural analysis model as well as NGnet Gauss function in topology optimization were built. Thirdly, the optimization object, optimization algorithm and constraint conditions were set based on the performance of motor from vehicle. Finally, by using the Genetic Algorithm(GA), Pareto optimal solutions of this topology optimization problem are fast obtained. The results show that the topology optimization method based on JMAG finite element model has the advantages of high accuracy, high optimization efficiency and practicability.

Key words: JMAG, Permanent Magnet Synchronous, motor, topology optimization

1. 背景

随着“双碳”战略以及《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》的发布，节能减排的新能源汽车技术已成为国内外各大主机厂的研究热点。在新能源汽车动力驱动系统中，车用驱动电机和发电机扮演着重要角色。由于具有永磁同步电机具有高效率、高功率密度和调速范围宽等特点，在车用电机领域得到了广泛的应用[1]。

但是车用驱动电机和发电机设计开发过程中，需要同时满足电磁、结构、热和 NVH 等诸多领域的多项分析技术指标。由于电机设计参数较多且参数之间相互耦合，传统的设计方法需要涉及到多轮次的电磁和结构迭代优化设计，对电机设计工程师的开发经验要求较高，且开发周期较长。

为解决上述问题，本文利用 JMAG 软件强大的拓扑优化功能和准确高效的有限元算法[2]，对某永磁同步电机开展转子结构拓扑优化分析，以通过 NGnet 高斯函数结合遗传算法，快速获得拓扑优化问题的帕累托最优解集，减少对电机设计工程师开发经验的依赖，缩短产品开发周期，提高产品竞争力。

2. 模型准备

本文基于长安汽车某车用电机模型，利用 JMAG 软件分别对 V 型转子结构和一型转子结构进行拓扑优化分析。

2.1 计算域及拓扑优化设置

本文的电机电磁场的初始计算域几何结构如图 1 所示。由于在拓扑优化的时候，需要针对不同的区域，赋不同的材料。为了实现在转子分总成上形成硅钢片和空气相间分布的拓扑结构，需要在转子铁芯上单独划分出一块区域，标记为虚拟空气区域。图 1 (a)展示了采用 V 型转子电机电磁场的初始计算域几何结构。图 1(b)展示了采用一型转子电机电磁场的初始计算域几何结构。

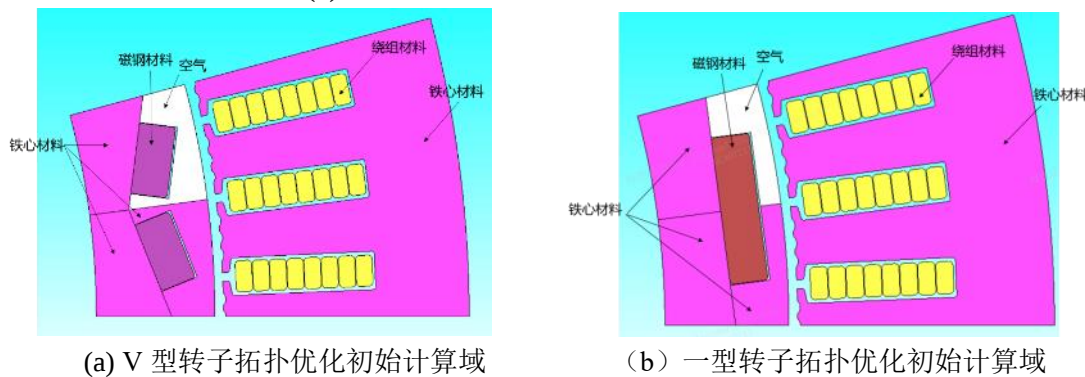


图 1 电机拓扑优化的初始计算域

采用基于 NGnet 的拓扑优化方法。优化区域设置为转子铁芯靠近外圆部分（如图 2 所示）。通过 python 脚本计算高斯函数的中心坐标，并导入 JMAG 完成拓扑优化设置。

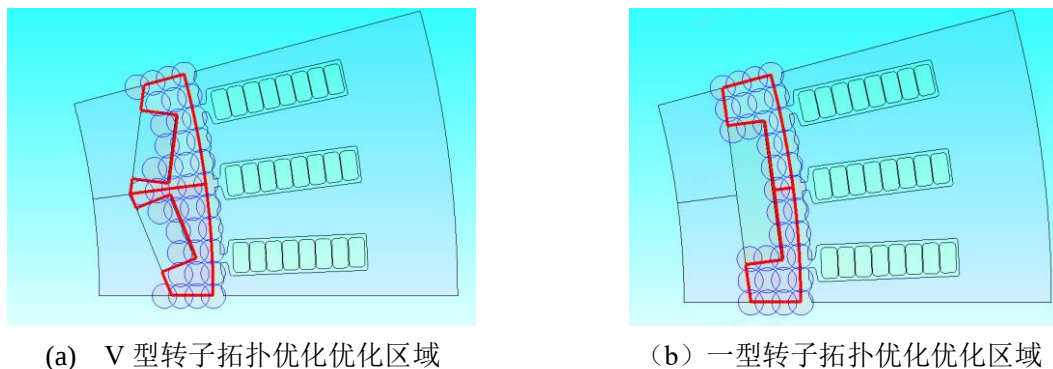


图 2 电机拓扑优化区域

2.2 电磁场网格剖分设置

网格剖分选择旋转周期网格及滑移网格，径向外扩尺寸比例 1.05（考虑定子外围空气域的影响）。全局网格尺寸设置为 3mm，气隙网格设置为 5 层，每个齿槽周期对应网格数 32。转子铁芯及磁钢局部加密为 0.5mm。

表 1 电磁场网格剖分

网格类型	旋转周期网格
动网格类型	滑移网格
径向外扩尺寸比例	1.05
全局网格尺寸	3mm
气隙网格层数	5 层
每个齿槽周期对应网格数	32
转子铁芯加密尺寸	0.5mm
磁钢加密尺寸	0.5mm

2.3 结构仿真设置

由于应力分析时，只考虑转子在离心力作用下的应力分析，不考虑定子分总成，因此，需要将定子铁芯和绕组对应部件冻结，对应的应力分析几何模型如图 3 所示。转子分总成约束边界设置如图 4 所示。离心力分析转速设置 1.2 倍最高转速。接触类型设置为无限小滑移类型。

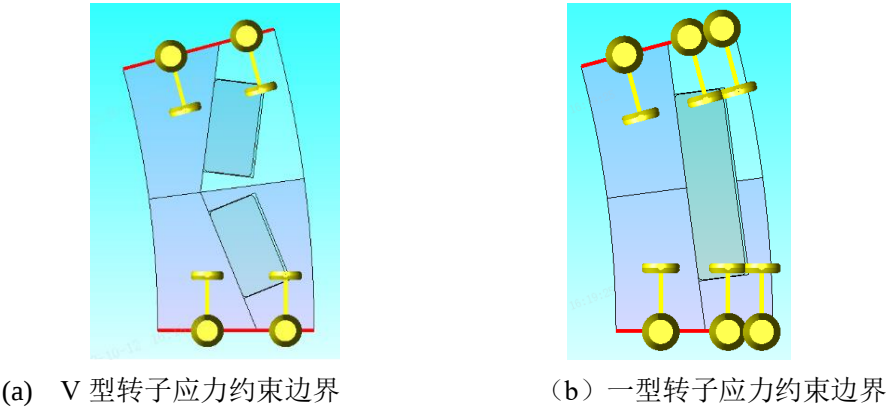
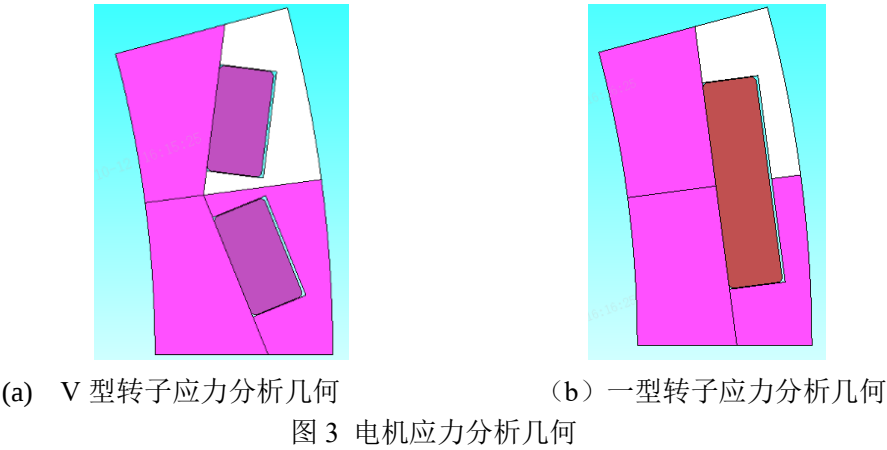


图 4 电机应力分析几何

应力模型网格选择 1 阶网格类型，转子铁芯及磁钢局部加密为 0.5mm。

2.4 优化设置

基于电磁分析模型和应力分析模型，创建优化分析组，及设置两个分析模型的执行顺序，为先执行电磁分析再执行应力分析。

采用遗传算法进行拓扑优化分析。为提高电机效率并保证结构及 NVH 性能，实现给定电流激励条件下可以输出最大转矩，并保证较小的转矩波动、结构应力及铁芯径向位移，设置优化目标为平均转矩最大，转矩波动率最小，设置约束条件为转子铁芯最大应力不高于 410MPa，转子铁芯最大径向位移不大于 0.1mm。

表 2 拓扑优化设置

优化算法	遗传算法
优化目标 1	平均转矩最大
优化目标 2	转矩波动率最小
约束条件 1	转子铁芯最大应力 $\leq 410\text{MPa}$
约束条件 2	转子铁芯最大径向位移 $\leq 0.1\text{mm}$

3. 拓扑优化结果

图 5 给出了 V 型转子电机拓扑优化散点图及帕雷托前沿。对于多目标优化问题，理论上分布在帕雷托前沿上的方案都是最优方案。比如 case20341 方案的转矩均值最大而转矩脉动稍微偏大（如图 6），case10587 方案的转矩均值和转矩脉动值居中（如图 7），case9834 方案的转矩脉动较小但转矩均值稍微偏小（如图 8）。但是图 6 所示的方案，结构上面是贯通的，制造性较差，因此本文将其舍弃，选择 case10587 方案作为阶段优化成果，并基于该方案进一步开展多参数多目标优化确定最佳电机详细方案。

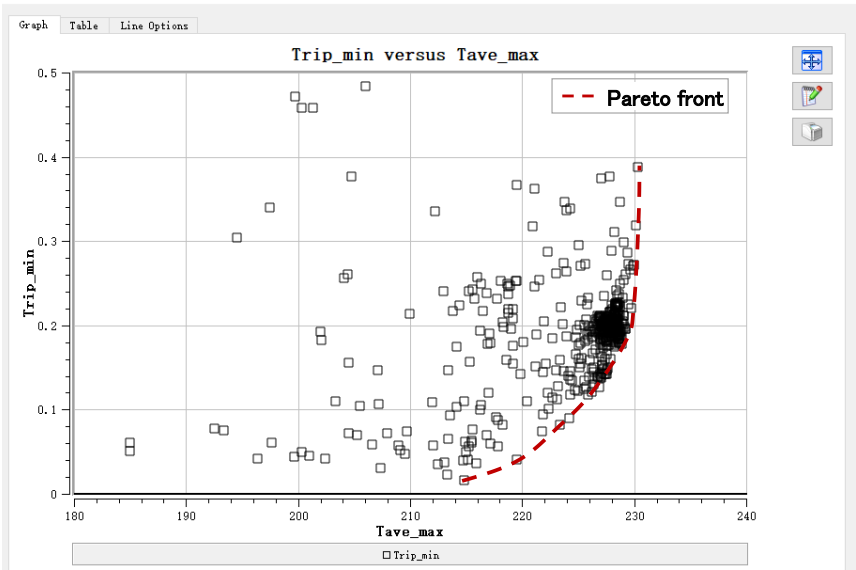


图 5 V 型转子电机拓扑优化散点图及帕雷托前沿

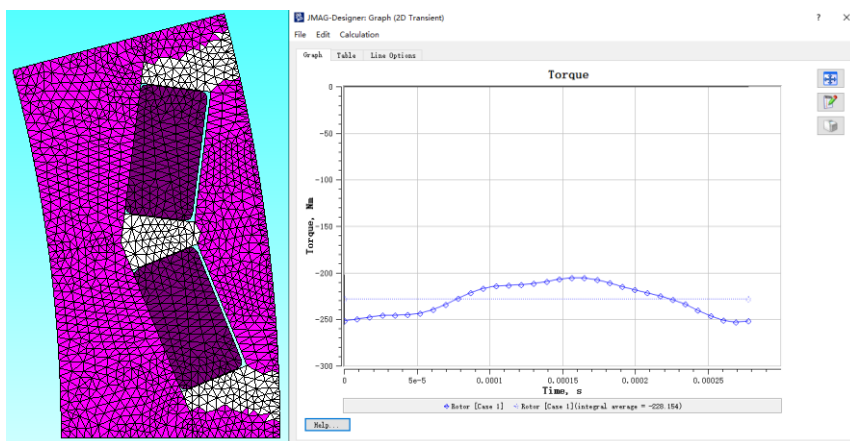


图 6 case20341 拓扑结构及计算结果（平均转矩=228.15Nm，转矩脉动率=0.2071）

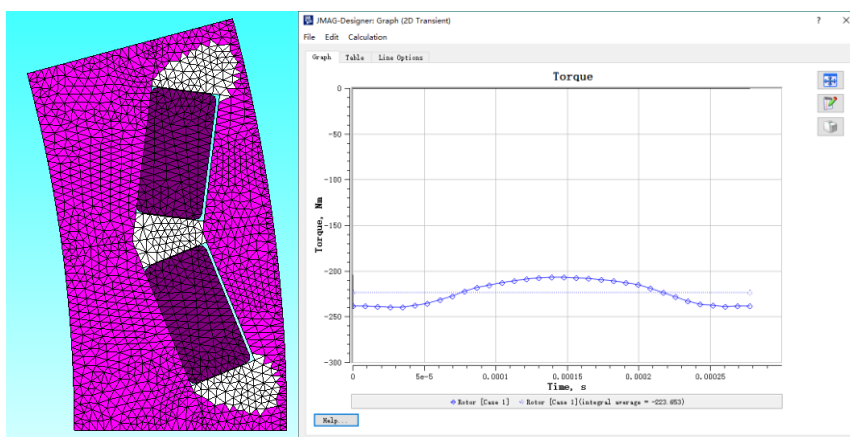


图 7 case10587 拓扑结构及计算结果（平均转矩=223.65Nm，转矩脉动率=0.1458）

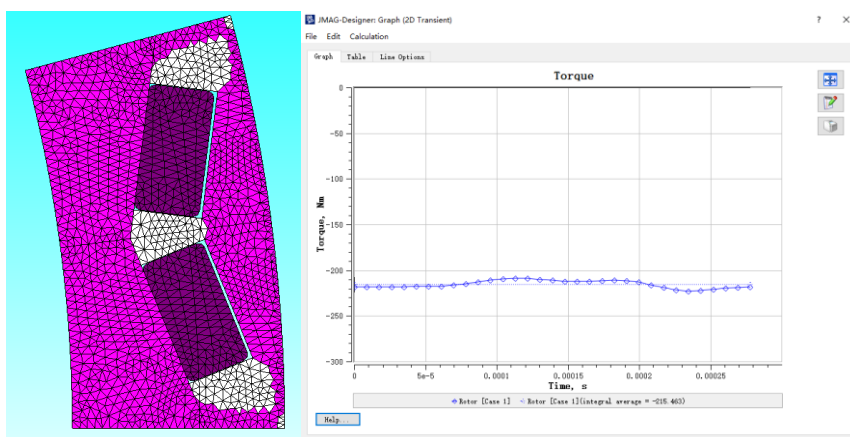


图 8 case9834 拓扑结构及计算结果（平均转矩=215.46Nm，转矩脉动率=0.0631）

图 9 分别给出了一型转子电机拓扑优化散点图及帕雷托前沿。同样，理论上分布在帕雷托前沿上的方案都是最优方案。比如 case9564 方案的转矩均值最大而转矩脉动稍微偏大(如图 10)，case13502 方案的转矩均值和转矩脉动值居中(如图 11)，case8399 方案的转矩脉动较小但转矩均值稍微偏小(如图 12)。但是图 6 所示的方案，结构上面是贯通的，制造性较差，因此本文将其舍弃，选择 case13502 方案作为阶段优化成果，并基于该方案进一步开展多参数多目标优化确定最佳电机详细方案。

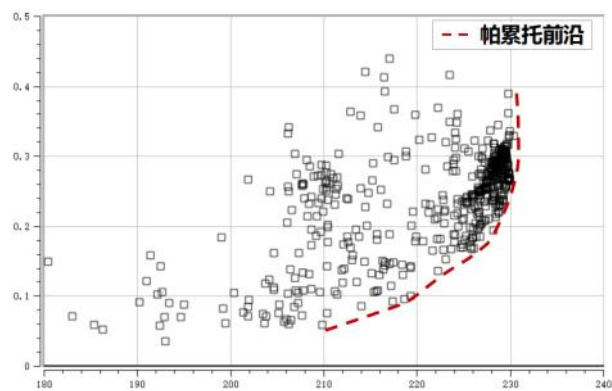


图 9 一型转子电机拓扑优化散点图及帕雷托前沿

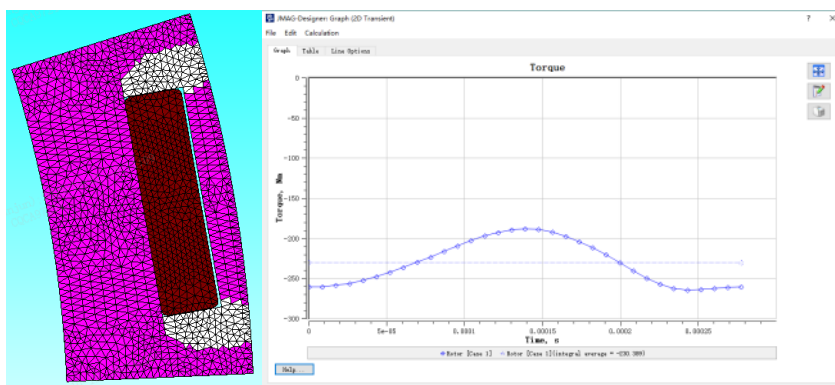


图 10 case9564 拓扑结构及计算结果（平均转矩=230.389Nm，转矩脉动率=0.3290）

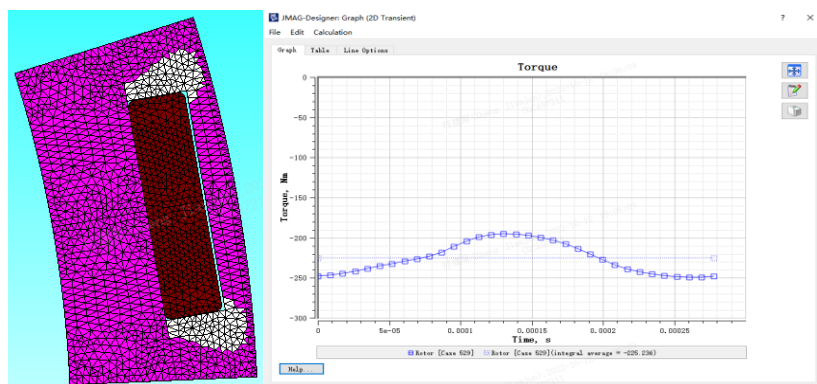


图 11 case13502 拓扑结构及计算结果（平均转矩=225.236Nm，转矩脉动率=0.2398）

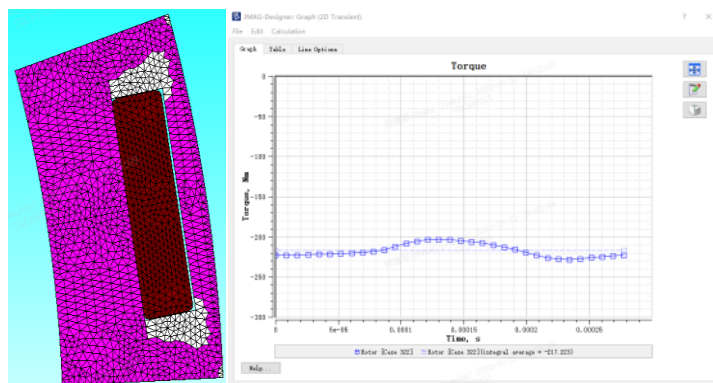


图 12 case8399 拓扑结构及计算结果（平均转矩=217.223Nm，转矩脉动率=0.1149）

图 13 给出了采用 V 型转子和一型转子电机拓扑优化散点图对比。由于本文中两种转子拓扑采用了相同的磁钢总尺寸，因此，可以看出采用同样的磁钢用量，采用 V 型转子比一型转子更容易获得平均转矩和转矩脉动率达到要求的电机转子拓扑优化方案。

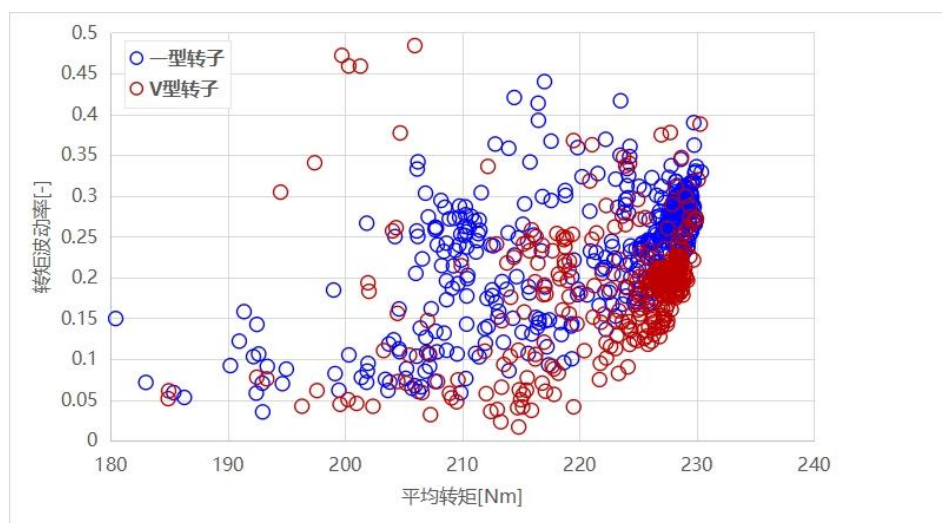


图 13 V 型转子和一型转子电机拓扑优化散点图对比

4. 结论

本文基于 JMAG 软件分别对某永磁同步电机采用 V 型转子和一型转子结构开展转子结构拓扑优化分析，并快速获得拓扑优化问题的帕累托最优解集。基于仿真结果得出结论：

- (1) 通过 JMAG 软件拓扑优化功能，可以快速获得拓扑优化问题的帕累托最优解集。
- (2) 通过 JMAG 软件开展拓扑优化分析，可以快速寻找满足工程化应用的潜在拓扑方案。
- (3) 采用同样的磁钢用量，采用 V 型转子比一型转子更容易获得平均转矩和转矩脉动率达到要求的电机转子拓扑优化方案。
- (4) 整个拓扑优化过程无需手动调整设计参数，完全通过拓扑优化算法进行自动优化设计，该方法优化效率高、实用性强，大大缩短了产品开发周期，提高了产品竞争力。

5 参考文献

- [1] 节能与新能源汽车技术路线图 2.0
- [2] 汤蕴璆，电机学[M].北京：机械工业出版社，2014.
- [3] 唐任远等，现代永磁电机:理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社，2015.