

基于遗传算法的车用永磁电机转子尺寸多目标优化设计

范庆锋^{1,2}, 王 振^{1,2}

(1. 中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 湖南省新能源汽车电机工程技术研究中心, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 新能源汽车(NEV)驱动电机对于转矩密度、功率密度、转矩脉动、振动噪声和高效率区间等参数有着较为严格的性能要求。转子拓扑及其结构尺寸直接影响电机的磁场大小、磁场分布和谐波磁场含量,对于汽车电机性能起着重要影响。针对该类电机多工况多性能参数的特点,利用有限元软件建立主要工况的电磁场计算模型,确定需要优化的转子结构尺寸。根据车用电机的主要性能指标,以转矩脉动、齿槽转矩、气隙反电动势谐波畸变率和输出转矩作为优化目标,根据不同工况性能需求定义目标函数,选择遗传算法作为多目标优化设计算法,再根据优化计算结果进行方案筛选,最终确定电机的最优转子尺寸。该优化设计方法可快速确定车用永磁电机的最优电磁设计方案,丰富了该类电机的高效优化设计途径。

关键词: 新能源汽车; 永磁电机; 遗传算法; 多目标; 优化设计

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0097-06

doi: 10.12177/emca.2020.107

Multi-Objective Optimization Design of Rotor Dimensions of Vehicle Permanent Magnet Motor Based on Genetic Algorithm

FAN Qingfeng^{1,2}, WANG Zhen^{1,2}

(1. CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Electric Vehicle Motors, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The new energy vehicle (NEV) motor has strict performance requirements for such parameters as torque density, power density, torque ripple, vibration noise and high efficiency section. Rotor topology and its structural parameters directly affect the magnetic flux density, magnetic field distribution and harmonic magnetic field contents, so they play an important role in the performance of NEV motor. For NEV motor, there are different operating conditions and various performance parameters. Finite element software is used to build the electromagnetic field calculation model for the main operating conditions and determine the structural parameters to be optimized. According to the main performance of vehicle motor, the optimization objective is defined with torque ripple, cogging torque, air-gap induced voltage total harmonic distortion (THD) and output torque. The objective function is defined according to the performance requirements of different working conditions, and the genetic algorithm is selected as the multi-objective optimization design algorithm. According to the optimized calculation results, the scheme selection is outlined. Finally, the optimal structure and size parameters of the rotor are determined. The optimization design method can quickly determine the optimal electromagnetic design scheme of vehicle permanent magnet motor and enrich the efficient optimization design approaches of this kind of motor.

收稿日期: 2020-05-13; 收到修改稿日期: 2020-07-20

作者简介: 范庆锋(1977—),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能源汽车驱动电机。

王 振(1986—),男,硕士,工程师,研究方向为新能源汽车驱动电机。

Key words: new energy vehicle (NEV); permanent magnet motor; genetic algorithm; multi-objective; optimization design

0 引言

新能源电动汽车工况的复杂性要求永磁驱动电机具备高转矩密度、高功率密度、低转矩脉动、低振动噪声、高效范围宽等特性,但这些性能在不同运行工况时存在相互制约,这对电机的高效优化设计方法提出了新的挑战。在进行该类电机的电磁设计时,需要在保证高转矩密度的同时,尽可能抑制齿槽转矩、转矩脉动和气隙反电动势谐波含量。因此,该类电机的优化设计是典型的多参数多目标优化问题^[1]。

为了能够进行电机多目标优化设计,许多学者将智能优化算法等引入到电机设计中,如遗传算法^[2]、模拟退火法、蚁群算法和田口法等。文献[3]采用遗传算法进行低转矩脉动同步磁阻电机多目标优化设计,兼顾转矩脉动、电机效率和功率因数的多目标优化设计方法实现了电机性能的全面提升。文献[4]采用田口法+磁极偏移的优化设计方法降低内置式永磁同步电机(IPMSM)的转矩脉动,并优化电机转矩特性,取得了较好的效果。文献[5]采用标准遗传算法、差分进化算法和混合遗传算法对双三相永磁发电机进行多目标优化设计,对比分析了不同方法的优化效果。文献[6]采用基于响应面的差分进化算法实现了兼顾超超高效异步电机效率和起动性能的分层多目标优化设计,采用该算法实现的实际方案可在保证优化精度的同时提升电机优化效率。

本文设计的车用永磁电机采用U+1型转子拓扑,使得优化分析过程中需要考虑的转子结构参数众多,其对优化目标的交叉影响又进一步增加了电机优化设计的难度。此外,该类电机的设计是一个多工况多维度的统筹优化过程,涉及到不同工况时的电磁转矩、转矩脉动、气隙反电动势谐波含量等多个优化目标。遗传算法^[7]是一种模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。该算法作为一种智能型随机搜索算法,具有非常强的全局寻优能力,在电机工程领域得到了推广。

因此,本文采用先进的 optiSlang 优化计算软

件对该电机转子尺寸进行基于遗传算法的多目标优化,对4个主要工况同时进行优化计算,充分发挥遗传算法的快速全局寻优的优势,以确定最终优化方案和优化结构尺寸。

1 基于遗传算法的电机优化设计思路

车用永磁电机由于拓扑形式的复杂性,导致其优化设计过程中需要考虑的转子结构参数较多。而且,为了满足电机在不同工况时的高性能要求,优化目标由单目标上升为多目标。因此,在进行该类电机的优化设计时,需要根据不同结构参数对多个优化目标的影响程度,合理确定需要优化的结构参数。优化的结构参数过多会导致优化计算速度过慢,收敛时间过长;结构参数过少容易导致难以找到最优解和最优方案。在充分考虑了电机特性的基础上,优化结构参数确定之后,依据永磁电机的设计经验及理论尺寸计算公式,确定结构参数的设计初值和合理变化范围。

在确定了结构参数及其初始值和变化范围之后,需要根据电机的特性要求确定计算工况时的优化目标。优化目标的实现通常采用下述函数表达^[8]:

$$\begin{cases} \min/\max F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)), x \in R^n \\ g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p \\ h_j(x) = 0, i = 1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_n(x)$ 为 n 维优化目标; x 为 n 维决策空间 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; $g_i(x)$ 和 $h_j(x)$ 分别为 p 个不等式约束和 q 个等式约束条件。

多目标优化的复杂之处在于求解目标的多样性,不同于单目标问题,各优化目标难以同时达到最优,有时会出现矛盾甚至对立的情况。在力求改善某个目标的同时,可能要以降低其他目标为代价,在实际问题中,能够折中权衡各目标的一组而非一个较优解,称为 Pareto 最优解,解得集合称为 Pareto 最优集^[9]。

本文采用遗传算法进行多目标优化设计,遗传算法首先根据待求解问题的多个目标函数构建多个合适的适应度函数,然后对包含多个解的种

群进行适应值评估、遗传操作、选择,经过多次迭代,获得适应度值最优的个体作为待求解问题的最优解^[10]。图 1 所示为构建的基于遗传算法的车用永磁电机优化设计流程。

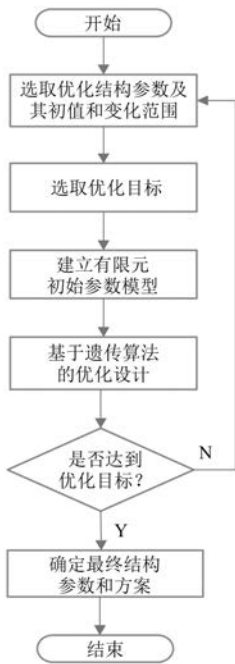


图 1 基于遗传算法的车用永磁电机优化设计流程图

2 电机多目标优化数学模型建立

2.1 电机基本参数

以一款车用永磁电机作为优化研究对象,槽极配合为 72 槽 12 极,电机基本参数如表 1 所示。

表 1 电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电池电压/VDC	600	峰值电流/A	740
额定转矩/(N·m)	1 432	峰值转矩/(N·m)	3 000
额定功率/kW	120	峰值功率/kW	260
峰值转速/(r·min ⁻¹)	3 300	最高转速反电动势/VDC	≤1 050
最大效率/%	96	冷却方式	水冷
定子外径/mm	400	定子内径/mm	300
气隙/mm	0.95	叠厚/mm	240

2.2 优化变量确定

车用永磁电机的转子拓扑结构对于电机的电磁性能具有极为重要的影响,常用的车用永磁电机转子拓扑有 V 型、双 V 型、双一型、U+1 型等。对于定子外径 400 mm 的商用车用永磁电机采用

U+1 型拓扑与其他拓扑具有转矩脉动较低、气隙反电动势波形畸变率较低、凸极率较大、转矩密度较高、磁钢用量更省等优势。

在进行优化变量的选择时,从理论上讲转子所有设计参数均可作为优化变量,但这种做法会加大计算量,反而会降低优化速度和设计效率。针对 U+1 型转子拓扑,优化变量的数量应该适当,变量过多会使计算量激增,但数量过少又会限制目标函数,导致最后计算的解为局部最优解。在进行转子优化变量的选取时,应该选取与目标函数相关性较大的尺寸,例如磁钢长度、磁钢厚度、极弧系数、V 字磁钢夹角、辅助槽位置和辅助槽尺寸等。

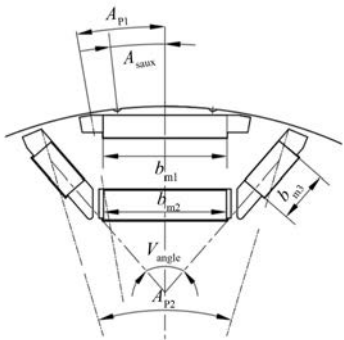


图 2 电机转子拓扑

选取图 2 中的 7 个转子尺寸作为优化变量用来进行多目标优化,如表 2 所示。

表 2 转子优化尺寸

尺寸参数名称	初始值	取值范围
外层隔磁孔角度 $A_{p1}/(^{\circ})$	4.5	3~6
V 字隔磁孔角度 $A_{p2}/(^{\circ})$	22	15~30
辅助槽角度 $A_{aux}/(^{\circ})$	8	5~9
V 字磁钢夹角 $V_{angle}/(^{\circ})$	58	50~90
外一字磁钢长度 b_{m1}/mm	21	16~23.1
内一字磁钢长度 b_{m2}/mm	32	26~35.2
V 字磁钢长度 b_{m3}/mm	9	7.5~10

2.3 优化目标确定

车用永磁电机优化目标需要结合电机的工况性能要求进行确定。车用永磁电机在进行电磁方案设计阶段,主要关注 4 种工况:空载工况、峰值转矩工况、额定工况、高速输出最大功率工况。这 4 种工况的综合性能可直接判断电机方案的合理性。

除了需要满足基本性能要求之外,车用永磁

电机对于电机的噪声、振动与声振精糙度(NVH)性能有着较高的要求,在进行优化目标的确定时,还需要考虑 NVH 性能参数,为此优化目标主要有:

(1) 齿槽转矩。该参数控制电机运行平顺度,数值越小越好。

(2) 转矩脉动。转矩脉动可产生振动和磁噪声,可直接反映电机的 NVH 水平。

(3) 气隙反电动势谐波畸变率。该参数可直接反映气隙磁场中谐波磁场的大小,而谐波磁场对电机影响较大。该参数与转矩脉动,振动噪声和铁耗正相关,可直接反映电机 NVH 水平。

(4) 空载反电动势幅值。为了保护电机控制器的安全,需控制电机的空载反电动势。一般而言,当电机运行在空载最高转速时,控制器模块会限定电机在该工况时的空载反电动势幅值,以避免控制器模块烧毁。另一方面,空载反电动势幅值越低对控制器成本越有利。因此,该参数也是一个重要的优化目标。

为此,在结合了 4 种主要工况的情况下,本文研究的电机优化目标如表 3 所示。

表 3 电机优化目标

工况	优化目标	目标函数
空载工况	齿槽转矩/(N·m)	≤ 2.5
	空载反电动势幅值/V	$\leq 1\ 000$
	反电动势 THD/%	≤ 0.9
	转矩平均值/(N·m)	$\geq 1\ 430$
额定点工况	转矩脉动	min
	反电动势 THD	min
	转矩平均值	max
峰值转矩点工况	转矩脉动	min
	反电动势 THD	min
	转矩平均值/(N·m)	≥ 750
高速最大功率点 工况	转矩脉动	min
	反电动势 THD	min

3 电机多目标优化数学模型求解

电机电磁场计算采用 Maxwell 软件,多目标优化计算采用 optiSlang 软件,该软件可直接调用 Maxwell 计算结果进行优化。需要在 Maxwell 中建立上述 4 种工况的电磁场计算模型,设置优化目标,再采用 optiSlang 软件进行算法设置。电磁场计算模型如图 3 所示。

遗传算法基本参数如表 4 所示。

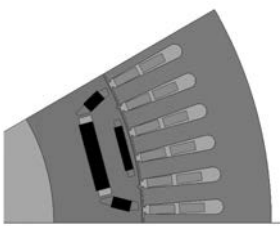


图 3 电磁场计算模型

表 4 遗传算法基本参数

参数名称	参数值
初始种群个体数	20
档案个体数	20
最少衍生代数	5
最大衍生代数	200
无法收敛而停止前的衍生代数	10
与目标结果的偏差/%	5

该电机的多目标优化共有 7 个尺寸变量,4 个工况,共计 12 个目标函数。在采用 optiSlang 软件进行多目标优化计算时,总共计算了 600 个方案,其中有 390 个方案转子几何尺寸干涉为无效方案,有效方案数量 210 个。

3.1 优化方案的初步筛选

从表 3 可知,在进行空载工况的优化建模时,分别设置了 3 个性能参数的约束函数:齿槽转矩 $\leq 2.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 、空载反电动势幅值 $\leq 1\ 000\text{ V}$ 和反电动势 THD $\leq 0.9\%$ 。在进行额定工况的优化建模时,设置了一个约束条件:转矩平均值 $\geq 1\ 430\text{ N}\cdot\text{m}$ 。在进行高速最大功率点的优化建模时,设置了一个约束条件:转矩平均值 $\geq 750\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

计算软件根据这 5 个约束函数自动判定了 210 个有效方案中有 40 个方案为不可行方案,剩余 170 个方案为可行方案。

3.2 优化目标的特性关系

额定工况、峰值转矩工况和高速输出最大功率工况中定义的目标特性均为转矩脉动和反电动势 THD。这 2 个性能参数可以直接反映电机 NVH 性能,是较为重要的电磁特性参数。

在 170 个可行方案中,通过基于遗传算法的多目标优化,可以得出不同目标参数之间的 Pareto 最优曲线,曲线上的点即为相对的最优解。3 种工况的反电动势 THD-转矩脉动相关性如

图 4 所示。曲线上黑色的点为优化方案,数字代表方案编号。从图 4 可以得出,满足目标函数的最优解集数量有 8 个,分别为第 88 号、第 119 号、第 158 号、第 161 号、第 183 号、第 186 号、第 195 号和第 207 号方案。

4 优化方案的确定

本文对车用永磁电机 4 种工况的 12 个目标函数进行优化,Pareto 解集为 8 种方案,但这些方案不可能满足所有 12 个指标均为最优,为此需要对计算结果进行综合权衡来确定最终方案。

8 个优化方案的目标函数求解结果如表 5 所示。

由于空载工况定义的 3 个性能参数均为约束条件,在进行最终方案的确定时,考虑到 NVH 性能的重要性,可根据额定工况、峰值扭矩工况和高速最大功率点的转矩脉动和反电动势 THD 计算数据进行综合评估。优化方案转矩脉动计算数值和反电动势 THD 计算数值如图 5、图 6 所示。

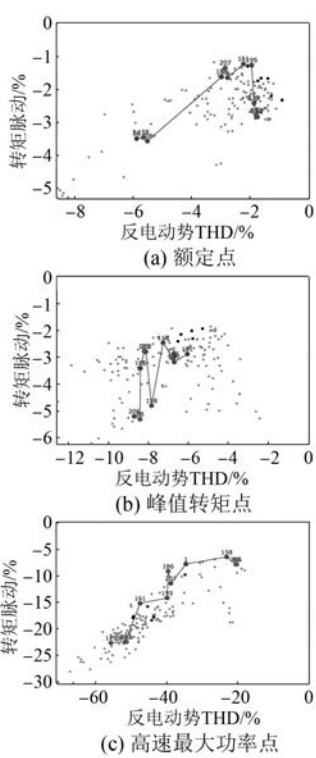


图 4 反电动势 THD-转矩脉动 Pareto 2D

表 5 优化方案目标函数计算数据

工况	参数名称	88 号	119 号	158 号	161 号	183 号	186 号	195 号	207 号
空载	齿槽转矩/(N·m)	1.86	2.43	1.91	2.48	2.05	1.33	1.85	1.74
	空载反电动势幅值/V	960.1	918.7	942.2	926.8	904.1	878.0	938.9	925.3
	反电动势 THD/%	0.61	0.88	0.56	0.51	0.84	0.66	0.84	0.63
额定	转矩平均值/(N·m)	1 455	1 477	1 457	1 480	1 451	1 466	1 470	1 452
	转矩脉动/%	3.49	2.41	3.45	1.22	2.82	1.62	1.26	1.34
	反电动势 THD/%	5.88	1.86	5.65	2.22	1.75	2.97	1.94	2.84
峰值扭矩	转矩平均值/(N·m)	3 074	3 095	3 105	3 120	3 045	3 071	3 102	3 070
	转矩脉动/%	5.30	2.46	4.80	2.88	2.77	3.41	3.05	3.18
	反电动势 THD/%	8.42	7.26	7.84	6.05	8.21	8.40	6.75	6.71
高速最大功率	转矩平均值/(N·m)	763	778	762	805	776	775	784	782
	转矩脉动/%	7.81	22.70	6.42	15.20	22.47	9.12	14.18	11.42
	反电动势 THD/%	20.22	55.70	23.03	47.50	51.37	39.58	39.85	38.81

从图 5、图 6 可以看出,第 158 号方案在额定点和峰值扭矩点的转矩脉动均小于 5%,且高速最大功率点转矩脉动最低为 6.42%,综合平衡 3 种工况数据,该方案转矩脉动性能最优;第 158 号方案气隙反电动势 THD 在额定点和峰值扭矩点均小于 8%,高速最大功率点为 23.03%,综合平衡 3 种工况数据,该方案 THD 性能仅次于第 88 号方

案,但 2 种方案 THD 相差较小。此外,第 158 号方案峰值扭矩 3 105 N·m,在 8 种方案中居第 2 位。

综上所述,综合平衡多工况的转矩脉动、气隙反电动势 THD 和输出转矩能力,可确定第 158 号方案为优化方案。表 6 所示为最终确定方案尺寸。

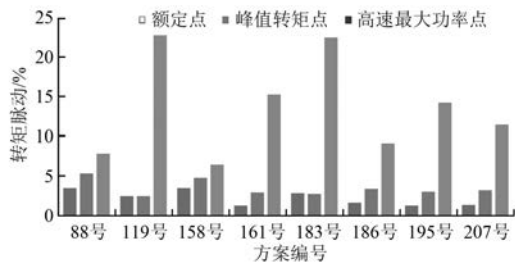


图5 优化方案转矩脉动计算数值

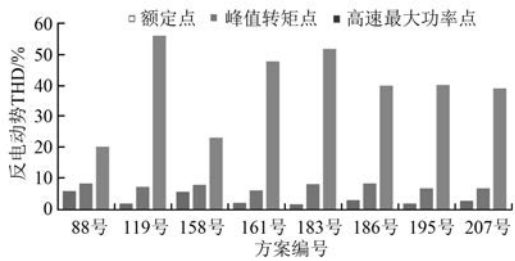


图6 优化方案反电势 THD 计算数值

表6 最终确定方案尺寸

参数名称	初始值	确定方案数值
外层隔磁孔角度 $A_{p1}/(^{\circ})$	4.5	4.2
V 字隔磁孔角度 $A_{p2}/(^{\circ})$	22	21.1
辅助槽角度 $A_{saux}/(^{\circ})$	8	8.4
V 字磁钢夹角 $V_{angle}/(^{\circ})$	58	64
外一字磁钢长度 b_{m1}/mm	21	22.8
内一字磁钢长度 b_{m2}/mm	32	30.3
V 字磁钢长度 b_{m3}/mm	9	8.2

5 结 语

本文以一款车用永磁驱动电机作为研究对象,采用基于遗传算法的多目标优化设计方法对该电机进行转子优化设计。以空载工况、额定工况、峰值转矩工况和高速最大功率工况的主要性能参数作为优化目标进行定向优化,最终得到了一种既能满足基本性能需求,NVH 性能又最优的优化方案。该实例的计算流程、计算方法和计算结果可得到下述结论:

(1) 基于遗传算法的多目标优化设计可应用于车用永磁电机的电磁设计,该方法可较大提升设计效率,缩短产品开发周期,尤其是对于较为复杂的转子拓扑更为显著。

(2) 在进行车用永磁电机多目标优化设计时,准确定义计算工况和不同工况性能参数尤为重要。对于该类型电机可考虑定义空载工况、额定工况、峰值转矩工况和高速最大功率工况作为优化工况,齿槽转矩、空载反电动势、转矩平均值、转矩脉动和反电动势 THD 作为优化性能函数。这 4 种工况和定义的目标性能函数可涵盖一个车用永磁电机的关键性能点。

(3) 对于优化计算结果,需要综合平衡定义的所有目标函数进行筛选和判断。各个优化目标有时并非正相关,需要综合权衡电机设计需求和设计目标之间的关系。

【参考文献】

[1] OSYCZKA A. Evolutionary algorithms for single and multicriteria design optimization [M]. Berlin: Springer Verlag, 2002.

[2] 张耀,杜荣法,赵新超,等. 基于多目标遗传算法的电机噪声优化 [J]. 微特电机, 2020, 48(4): 21.

[3] 王凯,李红梅,姚宏洋. 低转矩脉动同步磁阻电机设计与优化 [J]. 微特电机, 2017, 45(1): 1.

[4] 阮博,谷爱昱,廉迎战,等. 基于田口法+磁极偏移的 IPMSM 转矩脉动优化设计 [J]. 微电机, 2019, 52(10): 7.

[5] 胡景泰,付显,梁海泉. 双三相永磁同步发电机多目标优化设计 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 77.

[6] 李红梅,班东坡,刘立文,等. 基于响应面与分层优化的超超高效异步电机设计 [J]. 微电机, 2018, 51(3): 1.

[7] 张鹏. 基于遗传算法纯电动汽车的多目标能效优化 [D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.

[8] DEB K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2001.

[9] 曹雪景. 基于遗传粒子群算法的永磁同步电机多目标优化设计 [D]. 合肥:安徽大学, 2017.

[10] CASSIMERE B N, SUDHOFF S D, SUDHOFF D H. Analytical design model for a surface mounted permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24 (2): 347.