

基于拉丁超立方算法的永磁同步电机设计优化^{*}

丁 锦, 姜文刚
(江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 为了设计出起动性能好, 运行更加稳定的 V 形内置式永磁同步电机, 通过改善空气隔磁槽结构的方法对空载反电势、气隙磁密、齿槽转矩、转矩脉动进行优化。将空气隔磁槽几何参数作为待优化变量, 采用拉丁超立方抽样算法进行多目标优化, 得到最优参数组合。优化后齿槽转矩下降了 45%, 转矩脉动下降了 4.4%, 电磁转矩提升了 5.2%。优化结果理想, 验证了该永磁同步电机优化方案的合理性。

关键词: 永磁同步电机 (PMSM); 拉丁超立方抽样; 多目标优化; 空气隔磁槽; 优化设计

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)08-0066-07
doi: 10.12177/emca.2023.093

Design Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Latin Hypercube Algorithm^{*}

DING Jin, JIANG Wengang
(School of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In order to design a V-shaped built-in permanent magnet synchronous motor with good starting performance and more stable operation, the no-load back electromotive force (EMF), air gap magnetic density, cogging torque and torque ripple are optimized by improving the structure of air magnetic isolation tank. Taking the geometric parameters of the air magnetic isolation tank as the variables to be optimized, the Latin hypercube sampling algorithm is used for multi-objective optimization to obtain the optimal parameter combination. After optimization, cogging torque decreased by 45%, torque ripple decreased by 4.4%, and electromagnetic torque increased by 5.2%. The optimization result is ideal, verifying the rationality of the optimization scheme for the permanent magnet synchronous motor.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); Latin hypercube sampling; multi-objective optimization; air magnetic insulation tank; optimization design

0 引 言

近年来,随着市场对驱动电机运行性能的要求越来越高,对永磁同步电机的研究深度也逐步加深^[1-2]。V 形内置式永磁同步电机(PMSM)具有起动性能好、调速范围大、机械性能好、功率密度高及效率高等优势^[3-5],被广泛应用于工业领域中。国内外研发人员从电机结构、材料

等方面对 V 形内置式 PMSM 进行优化,使其性能得到提升。文献[6-8]分析了永磁体的结构形状、大小及用量对电机的影响。文献[9]详细论述了齿槽转矩和转矩脉动之间的关系及影响,描述了多种抑制方法,有效地提升了电机性能。文献[10-12]分析了降低损耗及提高效率的方法,改善了电机性能。

以上文献根据电机的性能指标,从电机结构

收稿日期: 2023-03-15; 收到修改稿日期: 2023-04-21
^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51877101)
作者简介: 丁 锦(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电机仿真及优化。
姜文刚(1973—),男,博士,教授,研究方向为伺服控制。(通信作者)

和材料方面改善优化了电机性能,但是缺乏对于电机参数的优化。为了满足特定场合的需求,需要设立优化目标函数,针对性地进行参数优化。

本文以一台额定功率为 7 500 W,额定转速为 1 500 r/min 的 V 形内置式永磁同步电机作为研究对象,根据电机型号、机座号以及电磁理论得出初始电机参数。为了初步验证电机参数的合理性,先利用有限元仿真对电磁场进行分析,得出电机初始性能参数;再利用拉丁超立方抽样算法,对空气隔磁槽结构几何参数的 3 个变量进行优化,以转矩脉动、齿槽转矩尽可能小作为目标,选择最优参数组合,对比分析各性能;最后对电机额定负载下的电磁转矩、能耗及效率进行分析,从而验证优化方案的可行性。

1 电机初始设计与有限元仿真

有限元模型主要基于有限元分析法,将一个复杂的物体分解为若干个简单的有限元单元,每个单元内部的物理行为可以用一些简单的数学方程来描述,因此可以直观地看出电机的静态参数、观察任意时刻电机的磁场状况。先利用磁路法计算得出电机的初始尺寸,建立仿真模型。电机主要结构参数如表 1 所示,生成的 Maxwell 二维有限元模型,如图 1 所示。

模型建立后的电机性能参数,如表 2 所示。

表 1 电机主要结构参数

参数名称	参数值
额定电压/V	348
额定功率/kW	7.5
额定转速/(r·min ⁻¹)	1500
定子槽数	36
转子极数	8
定子外径/mm	210
定子内径/mm	136
转子外径/mm	134
转子内径/mm	43
气隙长度/mm	1
铁心长度/mm	120
永磁体牌号	N40SH
永磁体长度/mm	20
永磁体宽度/mm	6

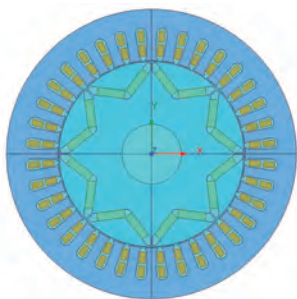


图 1 V 形永磁同步电机有限元模型

从表 2 可以看出,初步设计方案中电机效率达到 94.2%,功率因数 0.99,槽满率 76.83%,槽利用率较高,满足嵌线需求;其反电动势畸变率 3.51% 低于要求的 5%,波形趋近正弦;气隙磁密 0.84 T 左右,满足磁负荷要求,由此看出初步设计方案是合理的。

表 2 电机性能参数

参数名称	参数值
相电流有效值/A	12.9
气隙磁密/T	0.84
额定转矩/(N·m)	47.47
转矩脉动/%	7.5
反电动势畸变率/%	3.51
效率/%	94.22
功率因数	0.99
槽满率/%	76.83

为了方便观察电机内部磁路情况,创建 1/4 电机模型,其空载磁密分布如图 2 所示。由图 2 可知,永磁同步电机在空载下,内部磁路没有出现饱和,定子齿部磁密 1.6 T,定子轭部磁密 1.26 T,在转子隔磁桥区域磁密达到 1.8 T 左右,磁密饱和,可以起到很好的隔磁效果,满足磁负荷要求,验证了选磁材料的合理性。

2 优化目标与优化变量的选择

本文以空载情况下的齿槽转矩 T_{cog} 和额定负载下的转矩脉动 K_b 为优化目标。选取空气隔磁槽结构的几何参数作为优化变量^[13],优化变量的选取如图 3 所示。

根据空气隔磁槽结构,考虑实际电机结构尺寸,确定了 $L_1 \sim L_3$ 这 3 个变量的范围,见表 3 所示。

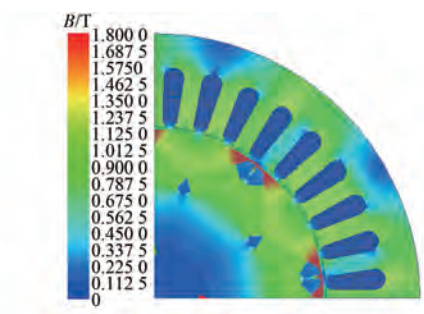


图2 空载磁密分布云图

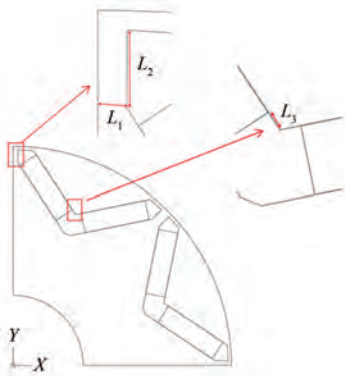


图3 优化变量示意图

表3 待优化参数取值范围/mm	
优化变量	参数取值范围
L_1	$1 \leq L_1 \leq 3.5$
L_2	$1 \leq L_2 \leq 6$
L_3	$0 \leq L_3 \leq 3$

3 拉丁超立方算法参数优化

为了获得更好的起动性能及电机能更加平稳地运行,采用拉丁超立方抽样算法,对转子空气隔磁槽结构的几何参数进行多目标优化。

拉丁超立方算法是一种随机抽样算法,在保证样本随机性的同时,还能避免样本出现较多冗余的情况,具体步骤为分层、采样、乱序。

(1) 确定抽取的样本数量 N 和抽取的维度 D ;

(2) 将每个维度分成 N 个等分,得到 N 个取值,记为 $V_1, V_2, \dots, V_N$;

(3) 对第一维度,随机从 $V_1, V_2, \dots, V_N$ 中抽取一个数作为第一个样本值,然后将其从列表中删除;

(4) 对于第二维度,从除去第一个样本的 V 列中再次随机抽取一个数,作为第二个样本值,反复此操作,直到第 D 个维度的值被取出为止。

(5) 最后将得到的样本按列排放,组成 N 行 D 列的矩阵,记为拉丁超立方样本矩阵。

此算法的主要思想就是概率分布的分层,目的是用更少的样本重新创建概率分布。较少的抽样次数达到与大量随机抽样相同的结果,优势在于抽样的范围均匀,不会出现明显的聚集现象,强制地抽取每一层样本,通过最大化使得每一个边缘分布分层,保证了一个变量范围内的全覆盖,能体现样本结果的全面性^[14]。对于变量较多,抽样环境复杂的情况,抽样效率会明显提升,与文献[6, 12]所采用的算法相比,节省了计算量,更快地提取了较优参数。

本文V形永磁同步电机多目标优化问题可描述为

$$\text{Min}\{T_{\text{cog}}, K_{\text{th}}\} \quad \text{s. t.} \quad \begin{cases} 1 \leq L_1 \leq 3.5 \\ 1 \leq L_2 \leq 6 \\ 0 \leq L_3 \leq 3 \end{cases} \quad (1)$$

本方案用拉丁超立方算法对3个优化变量共抽取100组数据,100个样本点,计算出每个样本点对应的齿槽转矩大小及转矩脉动大小,筛选出最优参数。样本数据分布如图4所示。

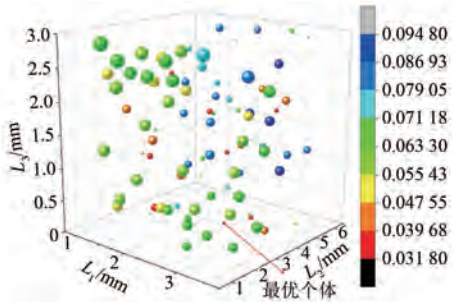


图4 样本数据分布图

立体三维空间 X, Y, Z 轴表示3个变量,散点图中球体的大小表示齿槽转矩大小,色度条反应了转矩脉动的大小。从样本数据分布,可以非常清晰地找到最佳样本点,其坐标表示为(2.44, 3.93, 0.06),即 $L_1 = 2.44$ mm, $L_2 = 2.93$ mm, $L_3 = 0.06$ mm。优化目标之间存在相互制约关系,权重之下,找到齿槽转矩、转矩脉动尽可能较小所对应的3个变量参数。

4 优化前后性能对比

机电能量的转换大多是在气隙中完成,对电机空载磁场进行分析,气隙磁密曲线能够清晰呈现出不同位置下的磁密分布情况。定子铁心和气隙相邻的交界处分割若干段圆弧,若第 m 段圆弧上的长度为 L_m ,则该段圆弧上的径向磁密大小为

$$B_{vm} = \frac{A_m - A_{m+1}}{L_m} \quad (2)$$

式中: A_m 、 A_{m+1} 是该段圆弧端点处磁矢位。

若假设 m 为圆弧上的任一端点,则该点的径向磁密大小为

$$B_m = \frac{L_{m-1}B_{vm-1} + L_mB_{vm}}{L_{m-1} + L_m} \quad (3)$$

式中: B_{vm-1} 、 B_{vm} 是 m 端点两边单元圆弧的磁密。

优化前后空载气隙磁密如图 5 所示。由图 5 可知,整个气隙磁密随着位置不同,分布情况也不同。由于高次谐波的影响,其波形顶部近似为平顶波,优化前幅值在 0.84 T 左右,优化后幅值为 0.94 T。由于齿槽转矩的存在,会导致气隙磁密波形出现脉动。优化前后气隙磁密谐波分析图如图 6 和图 7 所示。优化前气隙磁密基波幅值 0.94 T,优化后基波幅值 1.0 T,基波幅值上升,奇数次谐波幅值均有下降。谐波的减小,会使空载反电势的畸变率变小,波形情况会更加趋近于正弦化。

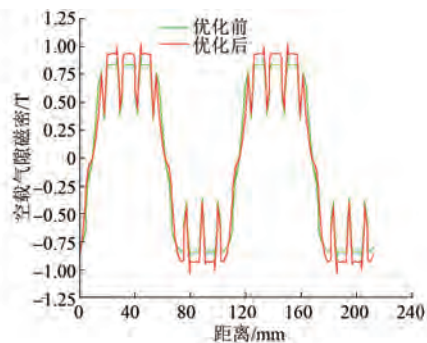


图 5 空载气隙磁密对比图

空载反电动势优化前后对比如图 8 和图 9 所示。对比图 8 和图 9,优化前波形的顶部波动依然较大,畸变率达到 3.51%,其每相绕组反电动势有效值为 328.48 V;优化后反电动势波形相对平滑,畸变率降低为 2.27%,每相绕组反电动势有效值为 354.69 V。反电动势体现了机电能量转化的

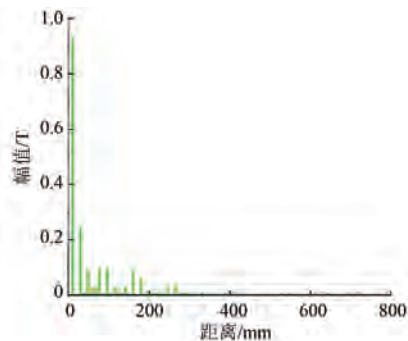


图 6 优化前气隙磁密谐波分析图

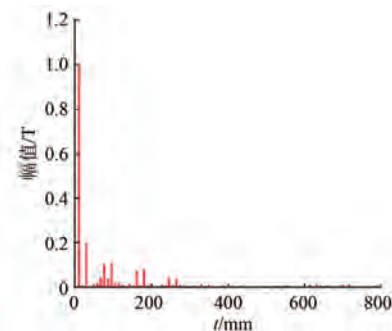


图 7 优化后气隙磁密谐波分析图

优劣,主要依靠基波,高次谐波会影响脉动的大小。

为了更加形象地说明气隙中空载反电动势的谐波含量,对电机空载下反电动势谐波进行 FFT 分析,如图 10 所示。由图 10 可知,优化后基波含量变大,在优化前,三次谐波依然明显,优化后的三次谐波基本为零。随着高次谐波的减少,谐波损耗以及振动都会相应减少,电机稳定性能会更优越。

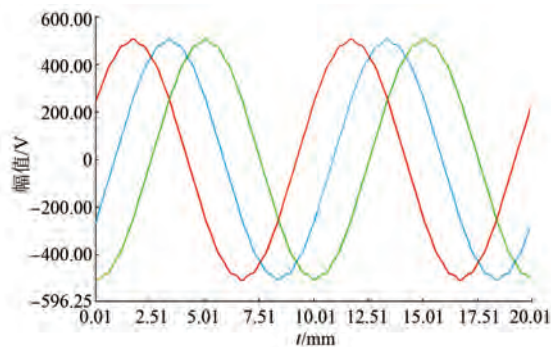


图 8 优化前反电动势

齿槽转矩直接影响着转矩脉动大小,其引起

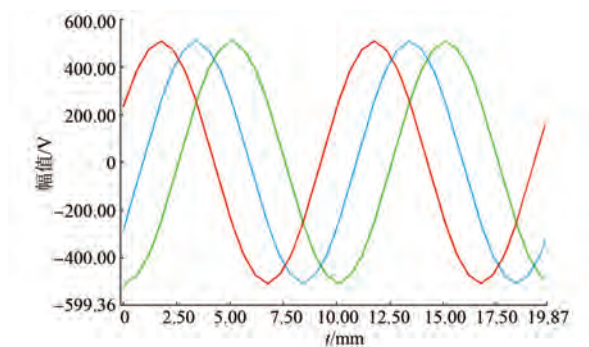


图9 优化后的反电动势

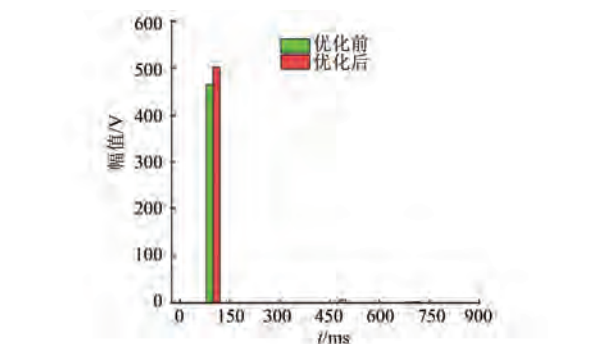


图10 空载反电动势谐波分析对比图

的噪声及振动对电机的稳定运行有很大影响,所以齿槽转矩的优化是电机优化过程中不可缺少的一部分^[15]。齿槽转矩计算式如下:

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z l_{\text{Fe}}}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_z \sin(nz\alpha) \quad (4)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; l_{Fe} 为电枢铁心有效长度; z 为电机槽数; R_1 为电枢外径; R_2 为定子内径; G_n 、 B_z 为傅里叶系数。

齿槽转矩优化前后对比如图 11 所示。优化前齿槽转矩 $0.71 \text{ N}\cdot\text{m}$, 优化后降低为 $0.39 \text{ N}\cdot\text{m}$, 下降了 45%。在工程上, 齿槽转矩小于额定转矩 2% 以内, 可以认为电机设计方案合理, 电机性能可靠性较好, 优化后的齿槽转矩只占到了额定转矩的 0.78%, 完全满足设计要求。电机的稳定性、可靠性可以得到保障。

5 电机额定负载工况分析

分析额定工况下的电磁转矩波形、定子电流波形和损耗情况, 如图 12~图 14 所示。优化前电磁转矩为 $47.47 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩脉动为 7.5%, 优化后电磁转矩为 $49.92 \text{ N}\cdot\text{m}$, 转矩脉动为 3.1%, 转矩上

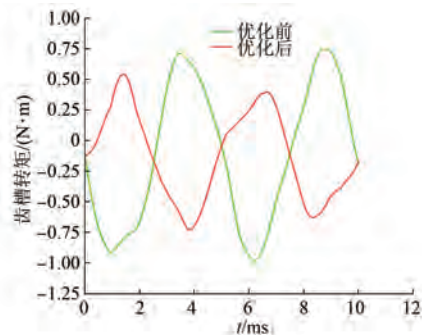


图11 优化前后齿槽转矩对比图

升了 5.2%, 脉动下降了 4.4%。脉动的减小会使得电机运行过程中机械振动变小, 电机运行更加平稳。从图 12 和图 13 看出 0.1 s 电机达到稳态后, 转矩波形十分平稳。为了保证稳态响应更加稳定, 增加了转子惯量, 虽然导致稳态前的启动转矩变大, 波动幅度较大, 震荡时间变长, 但是可以减少受到外界扰动的影响, 保证电机的稳定性更好。

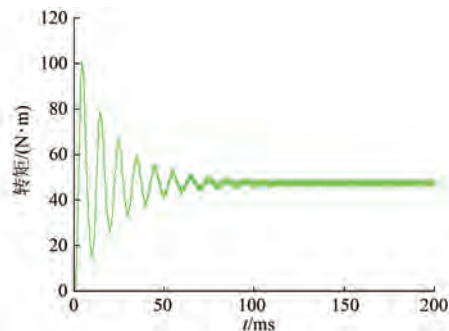


图12 优化前电磁转矩波形

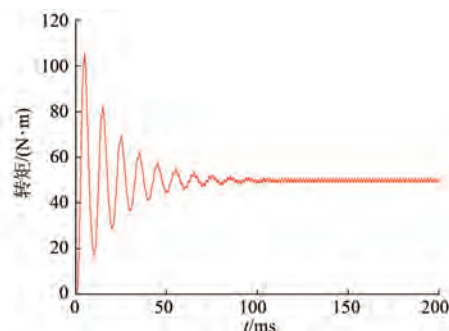


图13 优化后电磁转矩波形

从图 14 的电流波形上可以看出, 刚启动时电流较大, 当转速达到稳定后, 电流幅值稳定不变, 稳定在 13.47 A , 三相定子电流波形正弦性较好,

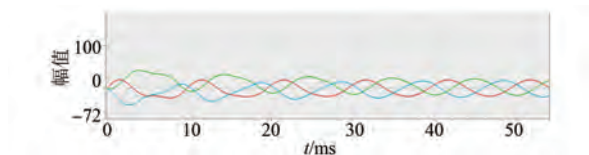


图 14 额定工况下定子电流波形

验证了电机参数的合理性。

电机的损耗主要是铜损和铁损两大部分,铜损就是电机绕组上的损耗,其大小由负载电流大小决定,其数学表达式为

$$P_{Cu} = 3I^2 R \quad (5)$$

式中: I 为绕组相电流有效值; R 为每相绕组电阻阻值。

铁损包括磁滞损耗和涡流损耗两部分,其数学表达式为

$$P_{Fe} = P_e + P_h = K_e f^2 B^2 + K_h f B^2 \quad (6)$$

式中: K_e 为电机涡流损耗系数; K_h 为电机磁滞损耗系数; B 为磁密幅值; f 为电流频率。

在额定工况下电机损耗情况如图 15 所示。可见电机刚启动时,损耗波动很大,电机运行 100 ms 后,趋于稳定,铜损为 197.9 W,铁损为 124.5 W,效率为 94.33%。

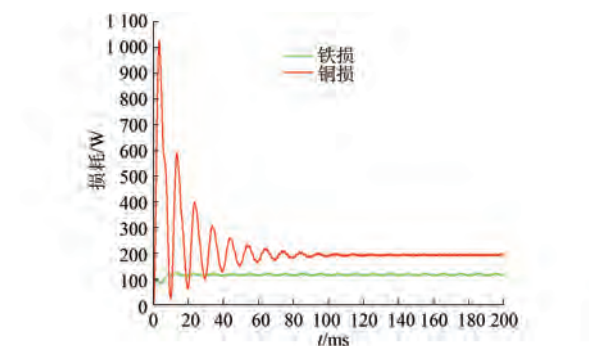


图 15 额定工况下的电机损耗

综上,本文提出的优化方案是改变空气隔磁槽结构来实现齿槽转矩和转矩脉动的优化。文献[12,16]与本文的研究目标一致,但提出不同方案来实现对齿槽转矩和转矩脉动的优化。文献[12]是从极弧系数、磁钢厚度、气隙的角度来进行优化;文献[16]从气隙、磁钢厚度、槽口宽度来进行优化,两者均采用田口法来实现优化。从设计方案来比较,文献[12]齿槽转矩降低了 27.5%,转矩脉动降低了 17.2%;文献[16]齿槽转矩下降了 54.6%,但是转矩脉动从 19.59%降为

17.14%,转矩脉动依然很大,存在电机稳定性问题。本文所设计方案的齿槽转矩下降了 45%,转矩脉动下降至 3.1%。考虑多目标性能优化,本文提出的优化方案更为合理。

本文采用拉丁超立方算法,从快速性和准确性两方面来考虑,对比文献[12,16],田口法正交表的构建需要大量的计算,耗时较长,设计复杂度高,而拉丁超立方算法能够在多个因素、多个水平的情况下,将试验设计为一组均匀分布的样本点,使得各种因素之间的交互作用可以得到充分的考虑。同时,拉丁超立方算法还能够在保证试验效率的前提下,减少试验样本数,从而节省时间和成本。

在准确性上,田口法是对每个影响因子进行独立控制,不能反映参数之间的相关性,会导致试验结果误差较大,而拉丁超立方算法避免了样本点之间的相关性,能更好地反映实际情况。

从试验数据来看, $L_1 = 2.44$ mm, $L_2 = 2.93$ mm, $L_3 = 0.06$ mm 为最终变量数值,图 16 为 L_1 、 L_2 、 L_3 控制单一变量的情况下,关于齿槽转矩和转矩脉动之间的数值关系图。控制单一变量,分别得出 L_1 、 L_2 、 L_3 关于齿槽转矩和转矩脉动之间的数量关系图,从 L_1 来看,齿槽转矩和转矩脉动都是先减后增, L_1 在 2.0~2.5 mm 附近,齿槽转矩和转矩脉动数值较小;从 L_2 来看,齿槽转矩递减,转矩脉动先减后增, L_2 在 3.4 mm 附近齿槽转矩和转矩脉动数值较小;从 L_3 来看,齿槽转矩和转矩脉动变化幅度很小, L_3 变化趋势对其影响不大。反过来验证了拉丁超立方算法数据抽样的准确性,表明采用拉丁超立方算法是合理有效的。

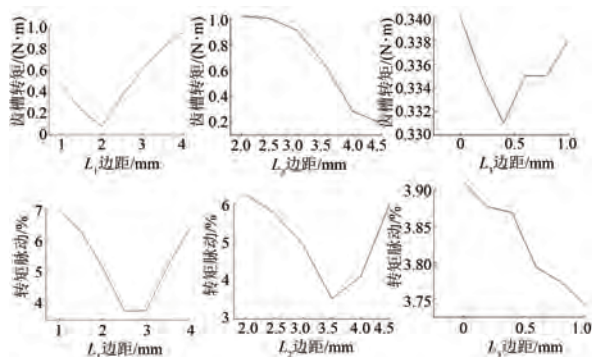


图 16 变量与优化目标之间关系图

6 结 语

本文对 V 形永磁同步电机进行建模,分析空

载下电机的内部磁密分布、气隙磁密分布、反电动势、齿槽转矩及额定工况负载下的输出转矩、转矩脉动及电机损耗情况。提出拉丁超立方算法进行多目标优化,从快速性和准确性方面验证了采用此算法的合理性及有效性。

【参考文献】

- [1] 吴金华,邓方,张安若.一种内置式永磁同步电机设计与性能评估[J].微电机,2021,54(11):31.
- [2] 刘国海,王艳阳,陈前.非对称V型内置式永磁同步电机的多目标优化设计[J].电工技术学报,2018,33(增刊2):385.
- [3] 甘源.电动汽车永磁同步电机的有限元分析及优化设计[D].锦州:辽宁工业大学,2020.
- [4] 王晓杰.电动汽车用永磁同步电机的设计及优化[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [5] 田静.车用永磁同步电机的优化设计[D].大连:大连理工大学,2020.
- [6] 王冬梅,白锐,冯达,等.电动汽车永磁同步电机的有限元分析及优化设计[J].控制工程,2023,30(2):300.
- [7] 张露锋,司纪凯,刘志凤,等.表面-内置式永磁同步电机优化与特性分析[J].微特电机,2015,43(6):12.
- [8] 丁嘉露,于慎波,赵海宁,等.一种表贴式永磁同步电机磁极形状优化方法[J].微特电机,2020,48(9):18.
- [9] 宋金龙.抑制表贴式永磁同步电机转矩脉动的优化设计[D].成都:电子科技大学,2017.
- [10] 王海燕,江郑龙,晁鹏博,等.车用永磁同步电机定子铁耗的分析与优化[J].电机与控制应用,2021,48(9):96.
- [11] 刘国栋,张学义,王爱传,等.永磁同步电机转子涡流损耗优化及温升分析[J].微电机,2022,55(5):17.
- [12] 邱瑞林,华青松,张洪信,等.基于田口法的永磁同步电机转子优化设计[J].青岛大学学报(工程技术版),2020,35(2):57.
- [13] 钟赛潮.考虑隔磁桥饱和的内置式永磁电机磁场解析建模与分析[D].天津:天津工业大学,2021.
- [14] 王群.基于对称拉丁超立方设计的多目标进化算法[D].西安:西安电子科技大学,2011.
- [15] 马孔融,周拓,季杰,等.永磁同步电机齿槽转矩的优化分析[J].防爆电机,2022,57(2):8.
- [16] 郭琳,姚舜才,姬劭宁,等.田口法在车用永磁同步电机优化设计中的应用[J].现代电子技术,2022,45(5):178.