

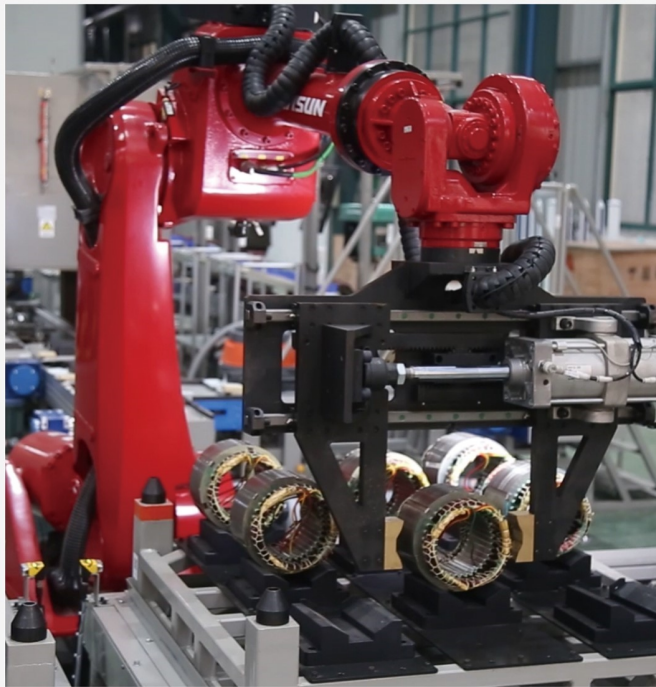
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

付豪, 吴尧辉.
计及温度变化的潜油直线电机结构
优化.
电机与控制应用, 2022, 49(2): 41.

SEARI
上電科

中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码
联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

计及温度变化的潜油直线电机结构优化*

付 豪, 吴尧辉

(河南理工大学 电气工程及其自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 潜油直线电机的工作环境温度随地层深度的变化而变化, 电机次级端部和中部的温差大。为了减小温度变化对电机推力的影响, 同时提高电机推力、降低推力波动, 对电机的结构参数进行优化, 以不同温度下的推力差值衡量温度变化对电机推力的影响。利用有限元分析软件 Magnet 建立电机的电磁模型, 分析各个参数对不同温度下电机推力、推力波动和推力差值的影响, 确定优化参数的数值范围。然后, 采用响应曲面法分别构建 100 °C 和 220 °C 时推力和推力波动的数学模型, 以 100 °C 和 220 °C 时推力函数之差的绝对值为这两个温度下推力差值的数学模型, 通过多目标遗传算法得到电机最优的参数组合。最后对优化后的电机进行有限元仿真分析, 验证了优化方案的有效性。

关键词: 圆筒型永磁直线电机; 温度变化; 推力特性; 响应面模型; 多目标优化

中图分类号: TM359.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)02-0041-06

doi: 10.12177/emca.2021.179

Structure Optimization of Submersible Linear Motor Considering Temperature Variation*

FU Hao, WU Yaohui

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The working environment temperature of the submersible linear motor changes with the depth of the stratum, and the temperature difference between the end and the middle of the motor secondary is large. In order to reduce the influence of temperature variation on motor thrust, increase motor thrust and reduce thrust ripple, the structural parameters of the motor are optimized. The thrust difference under different temperatures is used to measure the influence of temperature variation on motor thrust. The electromagnetic model of the motor is established by using the finite element analysis software Magnet, and the effects of various parameters on the motor thrust, thrust ripple and thrust difference at different temperatures are analyzed, and the numerical ranges of the optimized parameters are determined. Then, the mathematical models of thrust and thrust ripple at 100 °C and 220 °C are constructed respectively by response surface method. Taking the absolute value of the difference of thrust functions at 100 °C and 220 °C as the mathematical model of thrust difference, the optimal parameter combination of motor is obtained by multi-objective genetic algorithm. Finally, the finite element simulation analysis of the optimized motor verifies the effectiveness of the optimization scheme.

Key words: tubular permanent magnet linear motor; temperature variation; thrust characteristics; response surface model; multi-objective optimization

收稿日期: 2021-10-08; 收到修改稿日期: 2022-01-05

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61340015); 教育部协同育人项目(201701056027)

作者简介: 付 豪(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机设计。

吴尧辉(1964—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机与电器及电力系统继电保护。

0 引言

潜采油用的直线电机为圆筒型永磁直线电机(TPMLM)。TPMLM 作为往复电潜柱塞泵采油系统的动力机,具有推力大、传动刚度高、行程不受限等优点,它可以将电能直接转换为往复直线运动,减少了机械转换环节,提高了传动效率。同时可以实现大功率、大位移的无摩擦驱动,近年来已成为原油开采领域的热点^[1-3]。由于潜油直线电机的工作环境温度随地层深度和产量变化而变化^[4-5],井下环境密闭,难以利用地面常规的冷却系统进行散热^[6],不同环境温度下,电机的出力不同。另外,潜油直线电机长度较长,电机定子端部和中部的磁极温度差值大,不同位置的单元电机出力不同,会影响整个电机的推力性能。因此,有必要考虑温度变化对电机推力的影响。

目前对于电机的优化研究都是在固定的温度下进行的。文献[7]对不同结构参数下潜油直线电机的推力特性进行有限元分析,得到了推力性能的变化规律;文献[8]提出了一种基于六西格玛设计和响应面法的 TPMLM 结构优化设计方法,以高推力和低齿槽力为优化目标,对潜油直线电机进行优化;文献[9]基于响应面法,以高推力和低定位力为优化目标,对潜油直线电机进行结构优化设计。上述对潜油直线电机的优化,没有考虑工作环境温度的变化和电机内部的温差对电机推力性能的影响;文献[10]测量了硅钢和永磁材料等材料在不同温度下的特性,并将其导入有限元分析软件,对电机进行多目标优化,提出了不同温度的最佳设计方案,但是没有给出适合不同温度的电机设计方案。

本文考虑到潜油直线电机工作环境温度的变化和工作时电机内部温度分布的差异,以电机推力最大,推力波动和不同温度下推力的差值最小为优化目标,对电机的结构参数进行优化。采用响应曲面法分别建立 100 °C 和 220 °C 时推力和推力波动的数学模型,以及 100 °C 和 220 °C 时推力差值的数学模型。然后,通过多目标遗传算法,得到电机最优的参数组合。最后通过有限元分析,对优化后的参数组合进行仿真验证。

1 电机结构

本文以 114 系列开口槽的潜油直线电机为例,选择一个 9 槽 10 极的分数槽 TPMLM 单元电机为研究对象。表 1 为常温环境下电机的额定参数,图 1 为圆柱坐标系下 TPMLM 单元电机的结构模型,充磁方向为轴向充磁。表 2 为 TPMLM 的主要结构参数,利用有限元分析软件 Magnet 建立电机的电磁模型,假设初级无限长,设偶对称边界条件,将电机次级设置为 Motion 运动部分,驱动类型选为速度驱动,速度设置为 0.7 m/s,圆柱坐标系下 TPMLM 单元电机的电磁模型如图 2 所示。

表 1 单元电机额定数据

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/W	420	额定推力/N	600
相数	3	额定电压/V	16.56
额定速度/(m·s ⁻¹)	0.7	效率/%	85

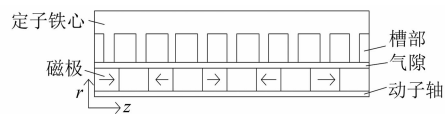


图 1 单元电机结构模型

表 2 TPMLM 主要结构参数 mm

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子外径	103.0	定子内径	22.6
定子内径	57.0	磁极宽度	11.3
槽深	14.0	气隙宽度	1.2
齿宽	15.0	磁极厚度	14.0
槽宽	12.0	极距	24.3



图 2 单元电机电磁模型

2 电机材料

潜油直线电机的工作环境温度变化范围大,因此有必要考虑温度变化对电机材料特性的影响。根据材料的选择,电机分为铁心、绕组和永磁体三部分。

定子铁心由硅钢片轴向叠加组成的,可有效

减少铁心涡流,降低铁耗,提高电机效率,减少电机的发热^[11]。在 500 °C 以下,温度变化对硅钢材料的性能影响较小,因此本文假设电机铁心的材料特性不随温度而变化。

电机的绕组材料为铜,导电性取决于电阻率。铜的电阻率与温度的关系为

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (1)$$

式中: ρ_0 为 0 °C 时铜的电阻率, $\rho_0 = 1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$; α 为铜的平均温度系数, $\alpha = 3.9 \times 10^{-3}$; t 为温度。

铁氧体、NdFeB、SmCo 是永磁电机中常用的永磁体材料。铁氧体磁能积小,不适合大推力的直线电机。NdFeB 的磁能积是这三种材料中最大的,也是永磁电机中使用频率最高的永磁材料,然而,磁性受温度变化影响较大,其居里温度仅为 310~410 °C,高温下会产生不可逆的退磁^[12]。SmCo 的磁能积比 NdFeB 小,但温度稳定性好,居里温度高,工作温度也比 NdFeB 高。本文选择 SmCo32 作为电机的磁极材料。

利用有限元分析软件 Magnet 建立电机的电磁模型,计算不同温度下电机的推力,则不同温度下电机推力的差值可以表示为

$$\sigma = |F_1 - F_2| \quad (2)$$

3 优化参数的确定

推力和推力波动是衡量电机推力性能的重要指标^[13]。在减小电机推力受温度变化影响时,还要提高电机推力、减小推力波动。因此,以电机的推力最大、推力波动和推力差值最小为优化目标。

考虑到潜油直线电机的规格和结构强度等因素,取定子铁心长度、定子外径、动子轴厚度和动子轴内径为定值。选取定子槽深 h_1 、槽宽 w_1 、气隙宽度 w_2 、动子磁极宽度 w_3 和磁极厚度 h_2 5 个参数进行优化。为了研究各个参数对推力、推力波动和推力差值的影响,确定参数范围,其余参数数值保持不变,对 100 °C 和 220 °C 下电机的推力进行有限元分析,计算结果如图 3、图 4、图 5、图 6 和图 7 所示。

由图 3 可知,随着槽宽的增加,100 °C 和 220 °C 时,TPMLM 的平均推力减小,推力波动都先增大后减小,这两个温度下推力的差值逐渐增大。由图 4 可知,随着槽深的增加,100 °C 和

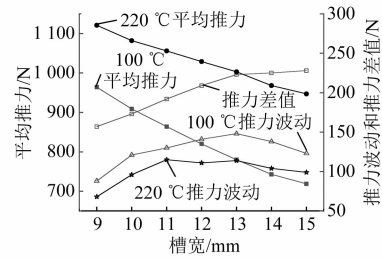


图 3 槽宽对 TPMLM 推力特性的影响

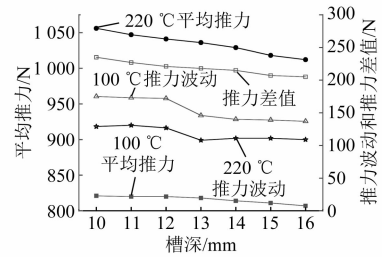


图 4 槽深对 TPMLM 推力特性的影响

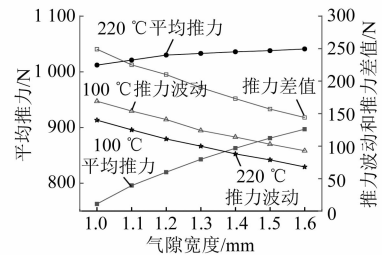


图 5 气隙宽度对 TPMLM 推力特性的影响

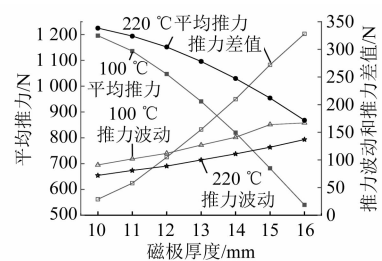


图 6 磁极厚度对 TPMLM 推力特性的影响

220 °C 时,TPMLM 的平均推力、推力波动和推力差值都逐渐减小,平均推力和推力差值的变化量较小,推力波动在槽深小于 12 mm 时基本不变,槽深由 12 mm 增加到 13 mm 时变化量较大,在槽深大于 13 mm 时基本不变,因此槽深 h_1 可以取 13 mm。由图 5 可知,100 °C 和 220 °C 时,随着气隙宽度的增加,TPMLM 的平均推力逐渐增加,推

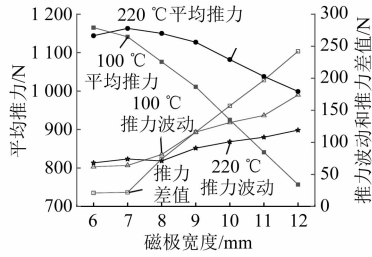


图7 磁极宽度对TPMLM推力特性的影响

力波动逐渐减小。由图6和图7可知,随着磁极厚度和宽度的增加,100 °C和220 °C时,TPMLM的平均推力逐渐减小,推力波动和推力差值逐渐增加。

综合考虑推力、推力波动和推力差值的变化趋势,取槽深 h_1 为13 mm,槽宽 w_1 、气隙宽度 w_2 、定子磁极宽度 w_3 和磁极厚度 h_2 的取值范围如表3所示。

表3 优化参数的取值

优化参数	w_1 /mm	h_2 /mm	w_2 /mm	w_3 /mm
上限	9	10	1.2	6
下限	13	14	1.6	10

4 基于响应面法优化电机的结构

为了准确分析优化参数之间的相互作用,采用响应面法建立100 °C和220 °C时电机的平均推力 F_1 、 F_3 和推力波动 F_2 、 F_4 的数学模型。采用响应曲面设计中的Box-Behnken法进行试验设计时,每个因子取三个水平的值,分别为设计变量优化区间的中心值、上限值和下限值^[14]。表4为各个优化变量的水平值。

表4 设计变量水平值

设计变量	水平		
	-1	0	1
w_1 /mm	9	11	13
h_2 /mm	10	12	14
w_2 /mm	1.2	1.4	1.6
w_3 /mm	6	8	10

根据Box-Behnken法的试验设计原则,建立一个关于4个变量的正交试验矩阵,一共需要进行27次试验^[15]。利用Magnet进行有限元分析,

包括100 °C和220 °C时,电机的平均推力 F_1 、 F_3 和推力波动 F_2 、 F_4 。有限元分析结果如表5所示。

表5 试验矩阵及有限元分析结果

w_1 / mm	h_2 / mm	w_2 / mm	w_3 / mm	100 °C		220 °C	
				F_1 /N	F_2 /N	F_3 /N	F_4 /N
11	10	1.6	8	1 258	47	1 161	53
13	14	1.4	8	1 208	65	1 136	60
11	10	1.4	10	1 271	62	1 224	63
9	14	1.4	8	1 167	78	1 175	76
9	12	1.2	8	1 261	89	1 228	84
11	12	1.2	6	1 249	70	1 175	70
11	12	1.2	10	1 156	76	1 216	76
11	10	1.4	6	1 238	63	1 137	60
13	10	1.4	8	1 262	57	1 111	55
13	12	1.2	8	1 197	73	1 216	65
11	14	1.4	10	1 001	78	1 119	65
11	12	1.6	6	1 199	55	1 118	57
13	12	1.4	10	1 104	87	1 163	67
11	10	1.2	8	1 311	69	1 252	79
11	12	1.4	8	1 226	53	1 207	62
9	12	1.4	6	1 106	75	1 117	62
13	12	1.4	6	1 216	63	1 155	67
11	12	1.4	8	1 227	53	1 207	62
11	14	1.4	6	1 178	71	1 137	63
11	14	1.2	8	1 118	56	1 174	71
11	12	1.4	8	1 227	53	1 207	62
11	12	1.6	10	1 162	49	1 186	47
11	14	1.6	8	1 125	43	1 146	47
9	12	1.4	10	1 215	62	1 225	72
9	10	1.4	8	1 287	75	1 202	71
13	12	1.6	8	1 178	48	1 165	47
9	12	1.6	8	1 225	70	1 175	62

根据表5的正交试验矩阵和有限元分析得到的结果,进行多元二次回归拟合,即可得到响应的数学模型。

100 °C时TPMLM平均推力 F_1 的拟合回归方程为

$$f_1 = -1 761 + 237.1w_1 + 154.5h_2 - 790w_2 + 417.5w_3 - 4.13w_1^2 - 4.19h_2^2 - 10.53w_3^2 - 3.75h_2w_1 - 13.81w_1w_3 + 37.5h_2w_2 - 13.3h_2w_3 + 35w_2w_3 \quad (3)$$

100 °C时TPMLM推力波动 F_2 的拟合回归方程为

$$f_2 = 833 - 86.3w_1 - 50.4w_2 - 56.9w_3 + 2.977w_1^2 + 2.008w_3^2 + 2.313w_1w_3 \quad (4)$$

220 °C 时 TPMLM 平均推力 F_3 的拟合回归方程为

$$f_3 = -1\ 086 + 138.8w_1 + 158.5h_2 - 602w_2 + 283.5w_3 - 4.37w_1^2 - 6.68h_2^2 - 6.74w_3^2 - 6.25w_1w_3 + 39.4h_2w_2 - 7.81h_2w_3 \quad (5)$$

220 °C 时 TPMLM 推力波动 F_4 的拟合回归方程为

$$f_4 = 140.8 - 20.35w_1 + 25w_2 + 14.4w_3 + 0.24w_1^2 - 10w_2w_3 \quad (6)$$

100 °C 与 220 °C 时电机推力差值的数学模型如下:

$$\sigma = |f_1 - f_3| \quad (7)$$

$$f_1 - f_3 = -655 + 98.3w_1 - 4h_2 - 188w_2 + 134w_3 + 0.24w_1^2 + 2.49h_2^2 - 3.79w_3^2 - 3.75h_2w_1 -$$

$$7.56w_1w_3 - 1.9h_2w_2 - 5.32h_2w_3 + 35w_2w_3 \quad (8)$$

采用 Gamultiobj 函数, 求解电机的最佳参数组合。优化参数取值范围如表 3 所示, 数学模型可以表示为^[16]

$$\begin{cases} \min\{-f_1(x), f_2(x), \sigma(x)\} \\ x_{il} \leq x_i \leq x_{ih} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $f_1(x)$ 为 100 °C 时电机的平均推力函数; $f_2(x)$ 为 100 °C 时电机的推力波动函数; $\sigma(x)$ 为 100 °C 和 220 °C 时推力差值的函数; x_{il} 和 x_{ih} 分别为第 i 个变量的最小值和最大值。

通过多目标遗传算法求解, 获得一组 Pareto 解集, 如图 8 所示, 图 8 中实心点为解集在二维平面上的投影。

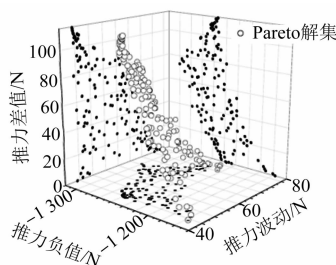


图 8 Pareto 解集

根据潜油直线电机大推力、低推力波动的要求, 从 Pareto 解集中选择一组解作为 TPMLM 最

优参数组合, 代入拟合方程(3)、方程(4)、方程(5)、方程(6)中, 参数组合如表 6 所示, 表 7 为代入拟合方程后的计算结果。

表 6 最优参数组合

参数名称	h_2	w_1	w_2	w_3
参数值	12.35	11.64	1.51	7.93

表 7 计算结果

参数名称	F_1	F_2	F_3	F_4
参数值	1 202.7	44.3	1 184.4	44.8

5 有限元仿真分析

利用有限元软件 Magnet 对表 6 所示的参数组合的 TPMLM 电磁模型进行有限元分析。图 9 和图 10 分别为优化前后 TPMLM 在 100 °C 和 220 °C 时的推力波形, 表 8 为优化前后 TPMLM 的推力特性对比, 图 11 为优化前后不同温度下电机的推力。

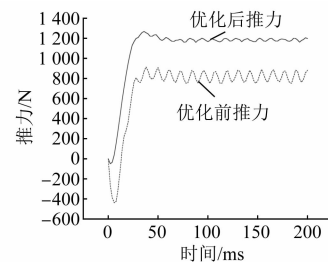


图 9 优化前后 100 °C 时 TPMLM 的推力波形

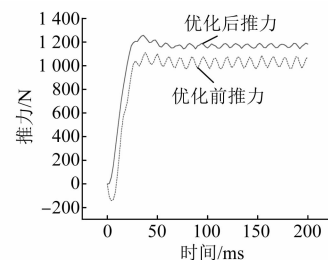


图 10 优化前后 220 °C 时 TPMLM 的推力波形

表 8 优化前后 TPMLM 性能对比

性能指标	优化前		优化后	
	100 °C	220 °C	100 °C	220 °C
平均推力/N	828	1 037	1 192	1 176
推力波动/N	140	112	41	42
推力差值/N	209		16	

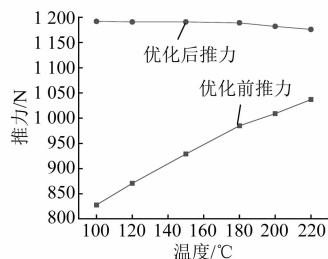


图 11 优化前后 TPMLM 不同温度下的推力

通过表 7 和表 8 可以得到,100 °C 时,通过拟合方程计算与有限元分析得到的 TPMLM 平均推力相差 10.7 N,误差为 0.90%;推力波动相差 3.3 N,误差为 8.05%。220 °C 时,通过拟合方程计算与有限元分析得到的 TPMLM 平均推力相差 8.4 N,误差为 0.71%;推力波动相差 2.8 N,误差为 6.67%。造成误差的原因一方面是拟合方程存在误差;另一方面是有限元分析时剖分精度设置。这些误差都在允许的范围内,证明了优化方法的可行性和有效性。

从表 8 可以得到,与优化前相比,优化后,100 °C 时,TPMLM 平均推力提高了 43.96%,推力波动降低了 70.71%;220 °C 时,TPMLM 平均推力提高了 13.40%,推力波动降低了 62.50%;推力差值减小了 92.34%。从图 11 可以看出,与优化前相比,优化后 TPMLM 推力随温度变化的趋势变缓,电机推力受温度变化的影响变小。

6 结 语

本文考虑温度变化对潜油直线电机推力的影响,以不同温度下推力差值衡量温度变化对电机推力的影响程度,分析了各个参数对不同温度下电机推力、推力波动和推力差值的影响,确定了优化参数的取值范围。以推力最大、推力波动和推力差值最小为优化目标,利用响应曲面法和多目标遗传算法对电机结构进行优化。优化后,TPMLM 平均推力在 100 °C 时提高了 43.96%,220 °C 时提高了 13.40%;推力波动在 100 °C 时降低了 70.71%,220 °C 时降低了 62.50%;100 °C 和 220 °C 时推力差值减小了 92.34%。电机的推力得到提高,推力波动得到抑制,温度变化对电机推力的影响变小,优化方法对需要考虑温度变化的电机设计有一定参考价值。

【参考文献】

- [1] 刘合,郝忠献,王连刚,等.人工举升技术现状与发展趋势[J].石油学报,2015,36(11):1441.
- [2] 甘庆明,黄伟,黄志龙,等.潜油直线电机无杆举升技术在定向井中的应用[J].石油机械,2019,47(7):117.
- [3] 刘永新.潜油柱塞泵机组优化设计与试验[J].石油机械,2018,46(6):75.
- [4] 卢德唐,曾亿山,郭永存.多层地层中的井筒及地层温度解析解[J].水动力学研究与进展(A辑),2002,17(3):382.
- [5] 毛新军,曹植纲,陈超峰,等.高产井地层特征的热流耦合温度反演新方法[J].石油钻探技术,2020,48(4):118.
- [6] 冯威,杨松,张炳义.高温超细长潜油永磁电机温升研究[J].电机与控制应用,2021,48(2):50.
- [7] 王红超.潜油直线电机不同结构参数下的性能分析[D].秦皇岛:燕山大学,2019.
- [8] 张啸,肖文生,王全宾,等.永磁直线电机结构参数的 DFSS 和响应面法优化[J].机械设计与制造,2020(4):3.
- [9] 王宏敏.潜油永磁直线同步电机的电磁优化[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
- [10] GHORHANIAN V, HUSSAIN S, HAMIDIZADEH S, et al. The role of temperature-dependent material properties in optimizing the design of permanent magnet motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018,54(3):8101104.
- [11] ZHOU W, HUANG X, JI T. Design of tubular permanent magnet synchronous linear motor in a wide temperature range environment by Taguchi-fuzzy method[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2019.
- [12] 吴攀,吴竣.潜油电机永磁化的一些基本问题[J].电气技术,2008(9):64.
- [13] 李雄松,崔鹤松,胡纯福,等.平板型永磁直线同步电机推力特性的优化设计[J].电工技术学报,2021,36(5):916.
- [14] 周怡,颜建虎,宋同月,等.基于响应面法的双边长初级永磁直线同步电机多目标优化设计[J].微电机,2021,54(7):44.
- [15] 曹永娟,冯亮亮,毛瑞,等.轴向磁场永磁记忆电机多目标分层优化设计[J].中国电机工程学报,2021,41(6):1983.
- [16] 张永亮,陈旭,姚家胜.基于改进遗传算法的电机公差优化设计[J].机械强度,2021,43(3):608.