

矿用管道机器人永磁同步电机的可拓优度模型^①

张 玉

永城职业学院 电子信息工程系, 河南 永城 476600

摘要: 针对矿用管道机器人永磁同步电机选型设计存在的问题, 本文提出了一种可拓优度模型与算法. 首先, 针对矿用管道机器人永磁同步电机选型设计过程进行分析, 建立了矿用管道机器人永磁同步电机选型设计的评价指标体系; 其次, 由于评价指标的复杂性, 给出了评价指标的权重处理方法以及评价指标的规范化处理方法, 使得评价过程具有统一的度量标准; 然后, 在可拓理论的基础上, 给出了矿用管道机器人永磁同步电机选型设计的可拓距与可拓优度计算模型, 并给出了具体的算法实现步骤; 最后, 对某型号矿用管道机器人永磁同步电机设计实例进行分析, 并实现电机本体设计. 结果表明, 本文给出的模型和算法具有良好的操作性和应用效果.

关 键 词: 可拓优度; 模型与算法; 评价指标体系; 永磁同步电机设计; 矿用管道机器人

中图分类号: TM383.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)08-0107-09

矿用管道机器人是一种对操控性要求比较高的矿山装备, 需要配备性能比较好的永磁同步电机^[1-2]. 高速永磁无刷直流电动机具有结构尺寸小、功率密度高、效率高等优点, 逐渐成为电机界研究的热点. 目前, 有关永磁同步电机设计的研究内容较多, 包含有本体设计、控制器开发、仿真分析、检测与测试以及性能评价等多个方面^[3-6]. 永磁同步电机选型与设计是电机整体设计的核心, 选择性能高的永磁同步电机将是一项复杂的优选决策过程. 在此过程中, 涉及到多种因素的综合处理^[7-8], 特别是还有一些不确定性信息的存在, 为此, 针对矿用管道机器人永磁同步电机选型设计存在的问题, 本文建立了矿用管道机器人永磁同步电机选型设计的评价指标体系, 并在可拓理论^[9-12]的支持下, 提出了一种矿用管道机器人永磁同步电机选型与设计的可拓优度模型, 并给出相应的算法实现步骤以及具体的设计实例, 以期对复杂产品智能化提供支持.

1 矿用管道机器人永磁同步电机选型设计评价体系

1.1 评价指标的获取

影响矿用管道机器人永磁同步电机选型与设计的因素比较复杂, 为了能够有效地显示出复杂系统选型因素间的关系, 需要采用层次性的形式描述电机选型的影响因素. 同时, 为了能够有效地度量选型设计结果, 需要从定性定量相结合的角度进行综合分析. 为此, 本文将选型设计评价体系分为系统级、准则级和指标级 3 个层次. 系统级即从整体体系的角度分析复杂系统评价问题, 其元素为准则级的对应准则, 为一级指标, 包括性能参数和结构参数 2 个部分. 准则级是以某一准则为基准进行评价, 其元素为子级指标, 即二级指标. 通过分析总结, 性能参数包括过载能力、功率因数、峰值转矩与功率、转速范围、转速响应能力、高效率区间、转矩响应能力等二级指标, 结构参数包括结构尺寸、可操作性、耐用性、电枢比、质量、

① 收稿日期: 2018-02-09

基金项目: 河南省社科联、河南省经团联项目(SKL20172457).

作者简介: 张 玉(1982-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电子信息工程技术研究.

成本、功率密度、可靠性等.

1.2 评价体系的建立

通过对评价指标的选取, 以及对其层次性结构的建立, 设定的矿用管道机器人永磁同步电机选型设计评价指标体系如表 1 所示.

表 1 评价指标体系

系统级	准则级	指标级	指标类型
评价体系 S	性能参数 S ₁	过载能力 s ₁₁	极大型
		功率因数 s ₁₂	极大型
		峰值转矩与功率 s ₁₃	极大型
		转速范围 s ₁₄	极大型
		转速响应能力 s ₁₅	极小型
		高效率区间 s ₁₆	极大型
		转矩响应能力 s ₁₇	极小型
	结构设计参数 S ₂	结构尺寸 s ₂₁	极小型
		可操作性 s ₂₂	极大型
		耐用性 s ₂₃	极大型
		电枢比 s ₂₄	适中型
		质量 s ₂₅	极小型
		成本 s ₂₆	极小型
		功率密度 s ₂₇	极大型
		可靠性 s ₂₈	极大型

2 矿用管道机器人永磁同步电机选型设计可拓优度模型与算法

2.1 指标权重

不同的评价指标对矿用管道机器人永磁同步电机选型设计的贡献程度不同, 为此需要对评价指标体系中的各个层次的指标进行指标权重计算. 由于指标的类型和表征的意义各异, 具有很多不确定信息, 因此本文采用专家评价打分的综合评判法.

假若聘请 M 位评判专家, 包括总设计师、领域专家、部门领导等, 对 N 个不同的评价指标进行评价打分, 若第 i 位专家对第 j 个评价指标的打分为 u_{ij} , 则其评判矩阵 U 为

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1j} & \cdots & u_{1N} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ u_{i1} & \cdots & u_{ij} & \cdots & u_{iN} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ u_{M1} & \cdots & u_{Mj} & \cdots & u_{MN} \end{bmatrix}$$

(1)

则第 j 个评价指标的权重 w_j 为

$$w_j = \sum_{i=1}^M u_{ij} / \sum_i \sum_j^N u_{ij}$$

(2)

其中, i 表示评判专家的数量, j 表示不同层级下评价指标的数量.

2.2 指标的统一标度处理

从矿用管道机器人永磁同步电机选型设计评价指标体系中能够看出, 评价指标有定性和定量 2 种形式, 有极大型、极小型和适中型 3 种类别, 要想使评价结果具有统一的度量标准, 需要进行统一标度处理.

对于定量指标 s_j , 若其为极大型, 则 v_{kj} 标准化后的指标量值 r_{kj} 为

$$r_{kj} = \frac{v_{kj} - \min_{1 \leq k \leq n} (v_{kj})}{\max_{1 \leq k \leq n} (v_{kj}) - \min_{1 \leq k \leq n} (v_{kj})}$$

(3)

其中, n 为选型方案个数, v_{kj} 为第 k 个选型方案的指标量值.

对于定量指标 s_j , 若其为极小型, 则 v_{kj} 标准化后的指标量值 r_{kj} 为

$$r_{kj} = \frac{\max_{1 \leq k \leq n}(v_{kj}) - v_{kj}}{\max_{1 \leq k \leq n}(v_{kj}) - \min_{1 \leq k \leq n}(v_{kj})} \quad (4)$$

对于定量指标 s_j , 若其为适中型, 则 v_{kj} 标准化后的指标量值 r_{kj} 为

$$r_{kj} = \begin{cases} \frac{v_{kj} - v_o}{\max\{|\max_{1 \leq k \leq n}(v_{kj}) - v_o|, |v_o - \min_{1 \leq k \leq n}(v_{kj})|\}} & v_{kj} \geq v_o \\ \frac{v_o - v_{kj}}{\max\{|\max_{1 \leq k \leq n}(v_{kj}) - v_o|, |v_o - \min_{1 \leq k \leq n}(v_{kj})|\}} & v_{kj} < v_o \end{cases} \quad (5)$$

对于定性指标 s_j , 按照一定的标度赋予其量值, 假若存在 v_{kj} , 则标准化后的指标量值 r_{kj} 为

$$r_{kj} = \frac{v_{kj}}{\max_{1 \leq k \leq n}(v_{kj})} \quad (6)$$

2.3 可拓距计算模型

假若参与评价的矿用管道机器人永磁同步电机选型方案有 n 个, 则经过标准化处理后, 第 j 个评价指标的理想值 $r_j^\ominus$ 为

$$r_j^\ominus = \max_{1 \leq k \leq n}(r_{kj}) \quad (7)$$

假若第 k 个选型方案中第 j 个评价指标的标准化量值为 r_{kj} , 则理想值 $r_j^\ominus$ 与其之间的可拓距 ρ_{kj} 为

$$\rho_{kj} = |r_j^\ominus - r_{kj}| \quad (8)$$

假若第 k 个选型方案中第 j 个评价指标的标准化量值为 $r_{kj} = [r_{kj}^1, r_{kj}^2]$, 则理想值 $r_j^\ominus$ 与其之间的可拓距 ρ_{kj} 为

$$\rho_{kj} = \left| r_j^\ominus - \frac{r_{kj}^1 + r_{kj}^2}{2} \right| - \frac{r_{kj}^2 - r_{kj}^1}{2} \quad (9)$$

假若理想值 $r_j^\ominus = [r_j^{1\ominus}, r_j^{2\ominus}]$, $r_{kj} = [r_{kj}^1, r_{kj}^2]$, 则两者之间的可拓距 ρ_{kj} 为

$$\rho_{kj} = \frac{1}{2} \left(\left| r_j^{1\ominus} - \frac{r_{kj}^1 + r_{kj}^2}{2} \right| + \left| r_j^{2\ominus} - \frac{r_{kj}^1 + r_{kj}^2}{2} \right| - (r_{kj}^2 - r_{kj}^1) \right) \quad (10)$$

2.4 可拓优度计算模型

假若获得了方案中不同评价指标与理想值之间的可拓距, 则两者之间的可拓关联数 K_{kj} 为

$$K_{kj} = \begin{cases} \rho_{kj} / \max_{0 \leq j \leq 1} |\rho_{kj}| & \max_{0 \leq j \leq 1} |\rho_{kj}| \neq 0 \\ 0 & \max_{0 \leq j \leq 1} |\rho_{kj}| = 0 \end{cases} \quad (11)$$

假若第 j 个评价指标的权重为 w_j , 则指标级的综合可拓优度 φ_k^z 为

$$\varphi_k^z = 1 - \sum_{j=1}^{m_2} (w_j * K_{kj}) \quad (12)$$

假若第 l 个准则的权重为 w_l^z , 则准则级的综合可拓优度 φ_k 为

$$\varphi_k = \sum_{z=1}^{m_1} (w_z * \varphi_k^z) \quad (13)$$

2.5 算法实现

根据前文的论述, 基于可拓优度模型的矿用管道机器人永磁同步电机选型与设计的算法实现过程如下:

- Step1 建立矿用管道机器人永磁同步电机选型评价指标体系, 确定指标的层次机构和指标类型;
- Step2 对评价指标体系中各个层次的准则和评价指标进行权重计算, 获得每个评价指标和准则的权重;
- Step3 根据设计需求, 获得多个电机选型方案的评价数据;
- Step4 对初始评价指标数据进行统一标度处理, 使其具有统一的度量标准;
- Step5 根据可拓距计算模型, 获得各个电机选型方案与理想值之间的可拓距;

Step6 根据可拓优度计算模型, 获得各个电机选型方案与理想值之间的可拓优度;

Step7 假如获得的可拓优度序列 $\varphi = \{\varphi_1, \cdots, \varphi_k, \cdots, \varphi_n\}$, 则最优选型方案为

$$\varphi^o = \max\{\varphi_1, \cdots, \varphi_k, \cdots, \varphi_n\} \tag{14}$$

Step8 以 Step7 获得的选型方案的设计参数进行电机的后续详细设计.

3 设计实例

3.1 基于模型和算法的选型设计分析

针对某矿用管道机器人设计需求, 提出如下几种方案, 通过仿真分析以及征求相关专家意见, 获得初始的评价数据, 如表 2 所示.

表 2 初始的评价数据

准则级	权重	指标级	权重	方案 A	方案 B	方案 C
S ₁	0.6	s ₁₁	9	200	300	250
		s ₁₂	6	90	95	85
		s ₁₃	7	中	高	高
		s ₁₄	7	22 000—28 000	20 000—30 000	25 000—32 000
		s ₁₅	5	0.45	0.50	0.65
		s ₁₆	9	80	85	80
		s ₁₇	5	30	30	25
S ₂	0.4	s ₂₁	5	中	高	中
		s ₂₂	7	中	高	高
		s ₂₃	8	高	中	中
		s ₂₄	6	0.40	0.5	0.45
		s ₂₅	3	中	小	大
		s ₂₆	5	低	低	中
		s ₂₇	5	中	中	高
		s ₂₈	9	中	高	中

表 3 给出了可拓距计算结果, 表 4 给出了加权可拓关联数计算结果. 由此获得可拓优度序列 $\varphi = \{0.555, 0.851, 0.642\}$, 由该序列结果可知, 最优方案为方案 B.

表 3 可拓距计算结果

指标级	理想值	方案 A	方案 B	方案 C
s ₁₁	1.0	1.0	0	0.5
s ₁₂	1.0	0.5	0	1.0
s ₁₃	1.0	0.2	0	0
s ₁₄	1.0	0.4	0.3	0
s ₁₅	1.0	0	0.5	1.0
s ₁₆	1.0	1.0	0	1.0
s ₁₇	1.0	1.0	1.0	0
s ₂₁	1.0	0.2	0	0.2
s ₂₂	1.0	0.2	0	0
s ₂₃	1.0	0	0.2	0.2
s ₂₄	1.0	0.20	0	0.10
s ₂₅	1.0	0.2	0	0.4
s ₂₆	1.0	0.2	0.2	0
s ₂₇	1.0	0.2	0.2	0
s ₂₈	1.0	0.2	0	0.2

表 4 加权可拓关联数计算结果

准则级	权重	方案 A	方案 B	方案 C
S ₁	0.6	0.188	0	0.094
		0.062	0	0.124
		0.029 2	0	0
		0.058 4	0.043 8	0
		0	0.052	0.104
		0.188	0	0.188
		0.104	0.104	0
		0.020 8	0	0.020 8
S ₂	0.4	0.029 2	0	0
		0	0.033 2	0.033 2
		0.025	0	0.012 5
		0.012 6	0	0.025 2
		0.020 8	0.020 8	0
		0.020 8	0.020 8	0
		0.037 6	0	0.037 6

3.2 电机方案实现

确定的电机选型方案，其对应的性能指标参数如表 5 所示.

表 5 选型设计基本设计参数

额定电压/V	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定输出功率/W	电机效率/%
20	20 000	≥150	≥85

内置式永磁同步电机的主要尺寸是由所需的最大转矩和动态响应性能指标确定的。内置式永磁同步电动机的转子磁路结构还要求有一定的恒功率速度运行范围，电机的气隙长度不宜太大，否则将导致电动机的直轴电感较小，弱磁能力不足，电动机的最高转速无法达到。永磁同步电机转子磁路结构选择的原则是：当电动机转速不是很高时，可以选择表面凸出式转子磁路结构，当电动机转速较高时，选择内置式转子磁路结构。该系统要求的电动机转速较高，所以选择内置式的转子磁路结构。该系统设计的转子磁路结构如图 1 所示，使用 Ansys 软件计算转子在高速情况下的应力分布以及磁桥安全系数如图 2 和图 3 所示。

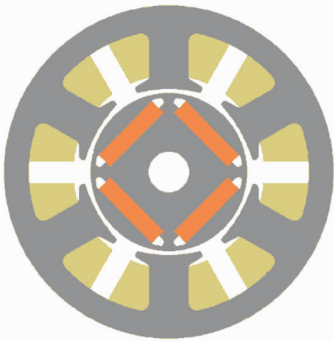


图 1 转子磁路结构

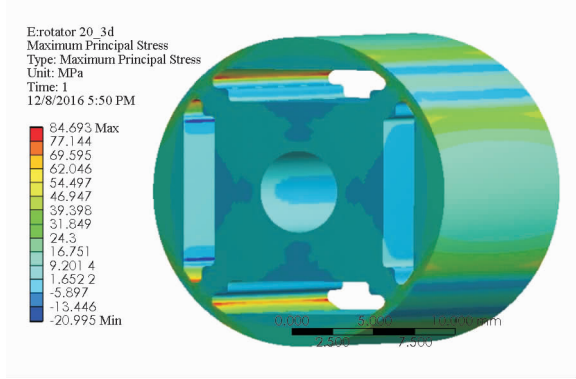


图 2 n=30 kr/min 应力分布

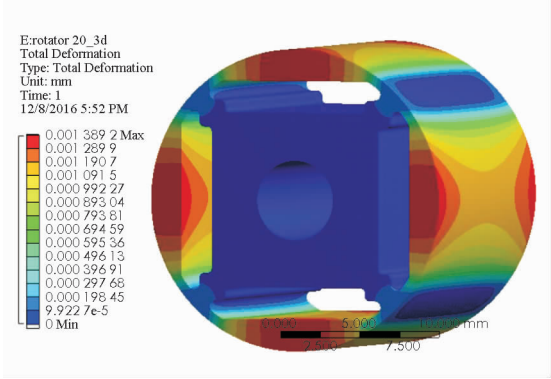


图 3 n=35 kr/min 变形云图

永磁体的尺寸和转子磁路结构决定了电动机的磁负荷，而磁负荷决定了电动机的功率密度和损耗。内置式磁路结构的电动机，永磁体尺寸的确定比较复杂，因为它与很多因素有关系。首先，永磁体磁化方向的长度与气隙长度有关，气隙越长，永磁体的磁化方向长度越长；其次，在确定永磁体磁化方向的长度时，应该考虑它对永磁体工作点的影响，对电动机不可退磁能力的影响，以及电动机的弱磁扩速能力等。本系统设计的永磁体磁化方向的长度和宽度可以根据经验预估，并利用 Ansoft 电机设计软件计算校验永磁体空载工作点，使得 $B_g=(0.6\sim0.8)Br$ 。电机的主要参数如表 6 和表 7 所示。

表 6 电机的主要参数

极槽数	定子外径 φ / mm	定子内径 φ / mm	转子外径 φ / mm	转子内径 φ / mm	转子铁心长度/ mm
4 极 6 槽	40	21	20	20	20

表 7 电机的技术参数

定子绕组 组系数	d 轴电感/ H	q 轴电感/ H	相绕组 电阻/ Ω	反电势系数/ ($V_s \cdot \text{rad}^{-1}$)	启动转矩系数/ ($\text{Nm} \cdot \text{A}^{-1}$)	额定转矩系数/ ($\text{Nm} \cdot \text{A}^{-1}$)
0.866	6.78E-05	1.15E-04	0.150 945	0.007 610 6	0.008 135 2	0.008 166 4
铁耗/ W	铜耗/ W	摩擦损耗/ W	总损耗/ W	输出功率/ W	输入功率/ W	效率
20	22	9	51	250	300	0.853 333 3

由计算数据可知初步选取的电机参数基本符合设计要求，但是电机的齿槽力矩大和反电势谐波含量较高，不利于电机的平稳运行，如图 4 和图 5 所示。

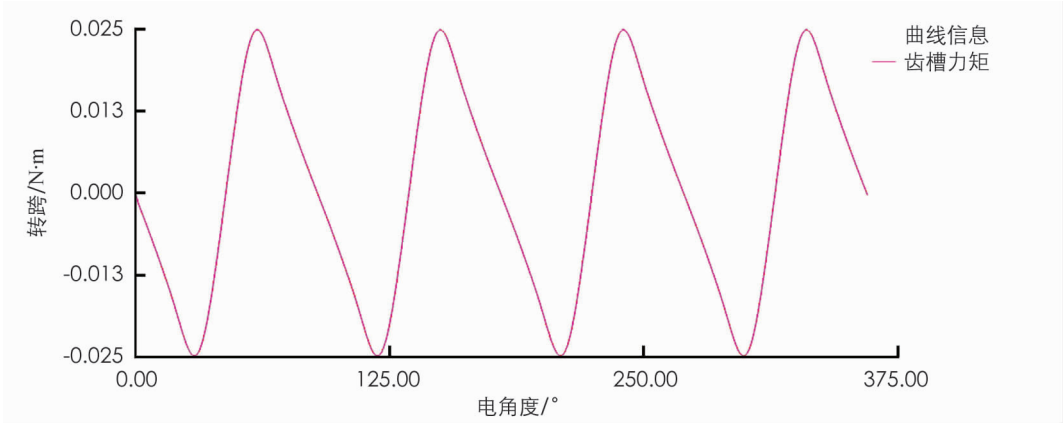


图 4 初始齿槽转矩图

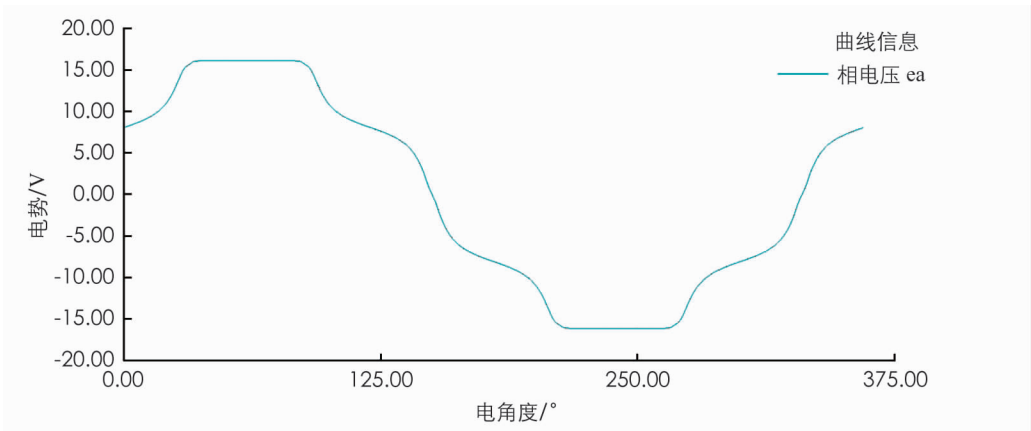


图 5 初始反电势波形图

高精度的伺服系统通常要求较高的定位精度和转速平稳性. 影响定位精度和转速平稳性的主要因素是电机的齿槽力矩. 齿槽力矩越小, 定位精度越高, 转速波动越小. 为了提高电机的动态性能, 需要进一步优化电机电磁设计方案. 本系统永磁同步电动机采用 Ansoft-Maxwell 电磁有限元软件分析电机, 此永磁同步电机既要满足自动化生产工艺需求又要满足电机性能, 因此设计了一种新的不等气隙的转子磁路结构, 如图 6 所示. 这种不等气隙转子结构外圆是不同心的, 圆心的偏心距在 2.0 mm, 最大气隙长度是最小气隙长度的 1.3 倍左右, 使得 q 轴磁导更大, d 轴磁导更小.

通过有限元软件计算得到的气隙磁密波形接近正弦波, 如图 7 所示; 反电动势谐波含量较小, 如图 8 所示; 齿槽力矩也得到减小, 如图 9 所示.

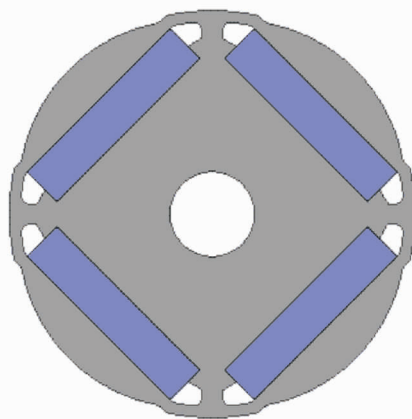


图 6 优化后的转子结构

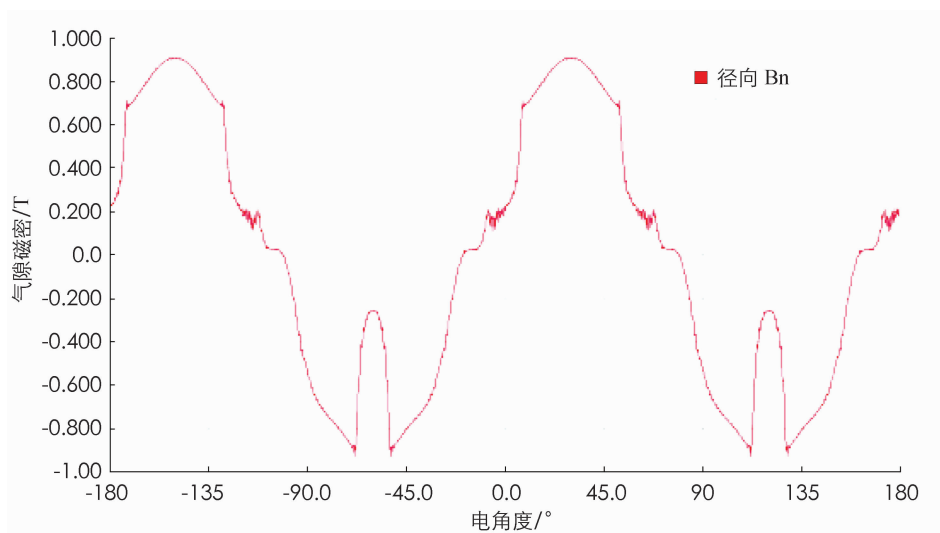


图 7 气隙磁密波形

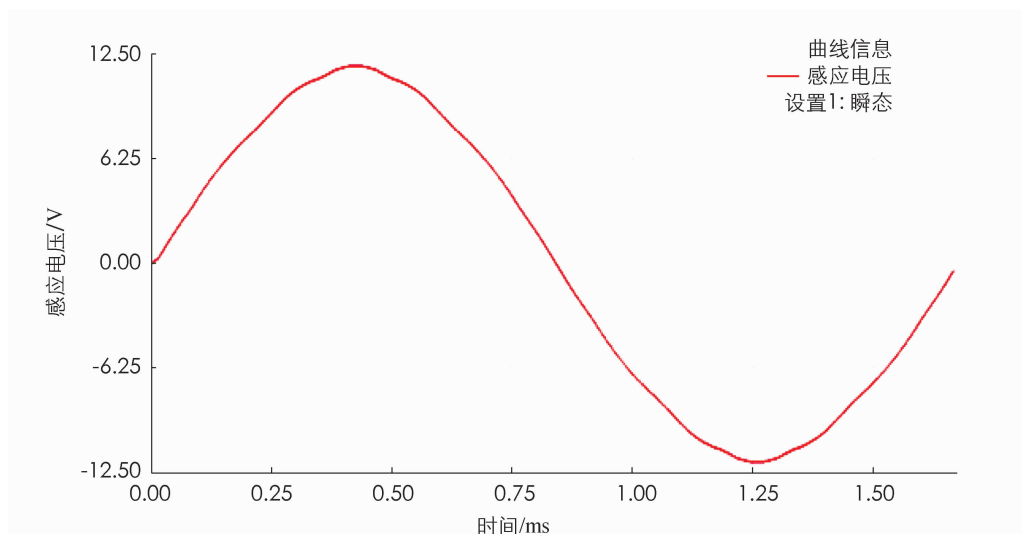


图 8 反电势波形

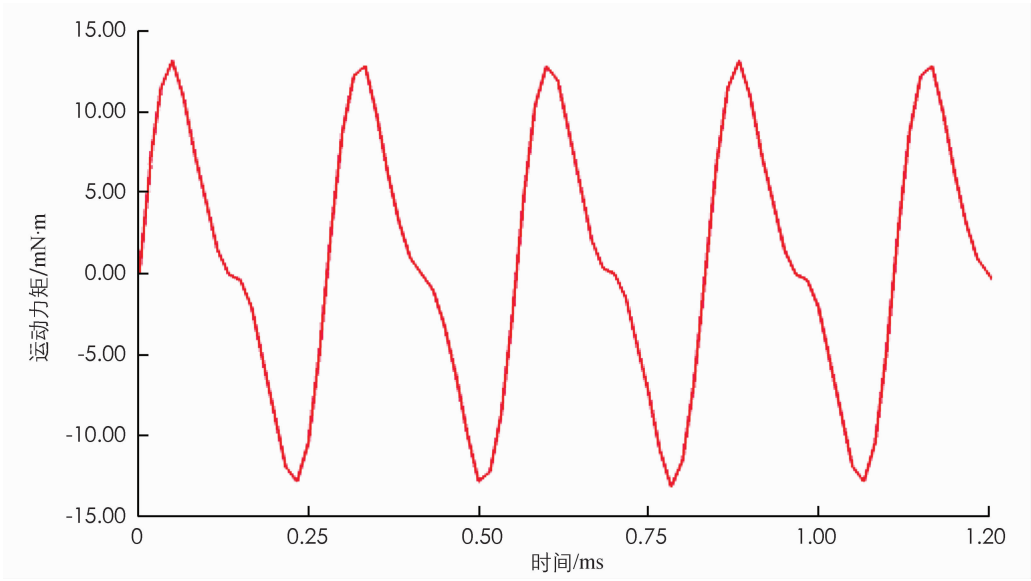


图 9 齿槽转矩分析图

优化前后的数据对比如表 8 所示. 优化后的结构具有反电势波形好、齿槽力矩小、效率高等优点, 满足了整机的结构和功率需求.

表 8 优化前后数据对比

	3 次 谐波 /%	5 次 谐波 /%	7 次 谐波 /%	9 次 谐波 /%	11 次 谐波 /%	反电 势 thd /%	d 轴 电感 /mH	q 轴 电感 /mH	齿槽 转矩 /N · m
优化前	0.55	3.47	1.18	0.37	0.22	3.78	37.10	75.50	0.032 48
优化后	0.35	0.49	0.49	0.23	0.56	1.12	35.20	68.50	0.015 84

4 结论与展望

本文讨论分析了矿用管道机器人永磁同步电机的选型与设计问题, 建立了矿用管道机器人永磁同步电机选型评价指标体系, 给出了评价指标的权重计算方法和统一标度处理方法. 同时, 在结合可拓理论的基础上, 建立了一种矿用管道机器人永磁同步电机选型与设计的可拓优度模型, 并给出了具体的算法实现步骤. 论文通过设计实例对文中的模型进行了说明, 并给出了电机的详细设计过程. 本文讨论的模型只是面向电机选型设计的, 在针对电机详细设计方面还存在一定的不足之处, 后续的研究中将进一步探讨.

参考文献:

[1] 杨立萍. 使用直驱永磁同步电动机对矿山机械做节能改造的研究 [J]. 价值工程, 2016, 35(23): 187—189.

[2] 陈士博, 许卫刚. 浅析永磁直驱动力系统在矿山皮带运输系统的应用 [J]. 微电机, 2016, 49(7): 91—92.

[3] 李红梅, 陈 涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 638—647.

[4] 王建设, 邹海荣. 基于有限元法永磁同步电机建模与分析 [J]. 电力学报, 2016, 31(3): 211—216.

[5] 张永平, 段小丽. TYP2600 永磁同步电动机的优化设计与实现 [J]. 电机技术, 2017(5): 14—16.

[6] WANG S N, LI Y H, LI Y Z, et al. Conception and Experimental Investigation of a Hybrid Temperature Control Method Using Phase Change Material for Permanent Magnet Synchronous Motors [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 81: 9—20.

[7] 刘凯辉, 徐建全. 纯电动汽车驱动电机全生命周期评价 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3456—3463.

[8] 叶健诚, 董 晨, 马彦华, 等. 电动汽车充电机性能评价指标体系研究 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(21): 91—96.

[9] 叶 郁. 基于可拓学菱形思维模式的 3S 风景园林设计教学方法研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(11): 193—197.

- [10] 朱维伟, 徐从发, 彭祖强. 基于行车安全的公路排水设施可拓设计方法及其应用 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(3): 43—48.
- [11] 李云伍, 刘得雄, 吴高华, 等. 混合动力三轮摩托车制动能量回收系统控制策略 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(3): 184—189.
- [12] 赵燕伟, 周建强, 洪欢欢, 等. 可拓设计理论方法综述与展望 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(5): 1157—1167.

An Extension Optimization Model of Permanent Magnet Synchronous Motor for Mine Pipe Robot

ZHANG Yu

Electronic Information Engineering Department, Yongcheng Vocational College, Henan Yongcheng 476600, China

Abstract: Due to the problems existing in the selection and design of the permanent magnet motor for the mining pipe robot, an extension model and algorithm have been proposed in this paper. Firstly, aiming at the selection and design process of permanent magnet motor for mine pipe robot, the evaluation index system of permanent magnet motor selection and design for mine pipe robot has been established. Secondly, due to the complexity of evaluation index, the weight processing method of evaluation index and the standardized processing method of evaluation index have been given, so that the evaluation process has a unified measurement standard. Then, based on the extension theory, the extension distance and extension optimization degree calculation model of permanent magnet motor selection design for mine pipe robot have been given and the specific algorithm implementation steps been proposed. Finally, the design example of the permanent magnet motor for mine pipe robot has been analyzed and the design of the motor been realized. The results show that the model and algorithm presented in this paper have a good operation and application effect.

Key words: extension optimization degree; model and algorithm; evaluation index system; permanent magnet synchronous motor design; mining pipe robot

责任编辑 崔玉洁