

分数槽集中绕组表贴式永磁同步电机转子损耗^{*}

刘福贵^{1,2}, 杨凯¹, 赵志刚^{1,2}, 郭莹¹, 刘佳¹, 尹赛宁¹

[1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津 300130;

2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学), 天津 300130]

摘要: 针对损耗模型很难准确地计算转子损耗且三维有限元方法占用大量时间的问题, 基于二维运动瞬态有限元法, 研究了1台36槽42极单层分数槽集中绕组永磁同步电机在恒转矩区和弱磁区以最大转矩运行时的转子损耗, 并且研究了高速工况下永磁体轴向分段数量、槽口宽度以及气隙厚度对永磁体损耗的影响。研究发现, 在整个转速区间永磁体损耗占转子总损耗的90%以上; 转速低于1500 r/min时, 转子铁心磁滞损耗高于涡流损耗, 高于1500 r/min时涡流损耗明显高于磁滞损耗。永磁体分段能明显降低永磁体涡流损耗; 负载工况下改变槽口宽度, 永磁体涡流损耗几乎没有变化; 增大气隙厚度虽然能降低永磁体损耗, 但是效果并不明显; 同时, 更改槽口和气隙厚度会使电感发生变化, 并进而影响电机的运行性能。

关键词: 永磁电机; 分数槽集中绕组; 转子损耗; 最大转矩运行; 二维运动瞬态有限元法

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)02-0052-05

Rotor Loss of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor with Fractional-Slot Concentrated Windings^{*}

LIU Fugui^{1,2}, YANG Kai¹, ZHAO Zhigang^{1,2}, GUO Ying¹, LIU Jia¹, YIN Saining¹

[1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment
(Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province
(Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China]

Abstract: Considering the difficulty to calculate rotor losses accurately by loss model and too much time by three-dimensional finite element method, the rotor loss of a 36 slots 42 poles single-layer surface permanent magnet synchronous motor with fractional-slot concentrated winding was calculated based on the two-dimensional motion transient finite element method operating at maximum torque both in constant torque region and in flux-weakening region. Additionally, the effects of the number of axial segments, slot width and air gap thickness on the loss of permanent magnets at high speed were investigated. It was shown that the magnet loss accounted for more than 90% of the total rotor loss in the whole speed range, the hysteresis loss of the rotor core was higher than the eddy current loss when the speed was lower than 1500 r/min, and the eddy current loss was obviously higher than the hysteresis loss when the speed was higher than 1500 r/min. The eddy current loss of the magnet could be reduced obviously by segmenting the permanent magnet; changing slot width contributed nothing to magnet loss under load condition; increasing the air gap width had no obvious effect on reducing the loss of permanent magnet. Meanwhile, changing the slot width and the thickness of the air gap would change the inductance and affect the performance of the motor.

Key words: permanent magnet motor; fractional-slot concentrated winding; rotor loss; operation under maximum torque; transient finite element method for two-dimensional motion

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51677052)

作者简介: 刘福贵(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程电磁场与磁技术。

杨凯(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制与损耗计算。

赵志刚(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电工磁材料磁性性能模拟与工程电磁场数值仿真及应用。

0 引言

分数槽集中绕组永磁电机被广泛应用于船舶、风力发电机、纯电动/混合动力汽车等诸多领域^[1-4]。虽然其具备短端部绕组、高槽满率、低齿槽转矩以及良好的弱磁能力等诸多优点,但是其定子绕组磁动势的低次和高次谐波分量会在转子上产生大量的损耗,且转子散热困难,严重时会造成永磁体不可逆热退磁^[5]。因此,研究转子损耗对于永磁电机的安全高效运行具有重要意义。

文献[2]基于损耗模型研究了1台永磁发电机的转子损耗,并将其与二维有限元计算结果进行对比。研究表明,用模型计算的结果明显低于有限元计算的结果,这是由于损耗模型无法考虑非线性以及复杂的几何模型。Bianchi等^[6]研究了磁动势空间谐波对于转子损耗的影响,发现转子损耗主要由磁动势的次谐波分量产生;通过进一步的研究,还发现当次谐波同时也是槽谐波时,会在转子上产生更高的损耗^[7]。文献[8-9]基于三维有限元法研究了永磁同步电机(PMSM)转子涡流损耗,虽然能得到准确的结果,但是会占用太多的资源和计算时间。文献[10]研究电机在低速工况下的损耗。少有文献详细介绍电机在不同的速度区间以不同的控制方式运行时的损耗。

本文基于MotorSolve二维运动瞬态有限元法研究了1台单层36槽42极分数槽集中绕组PMSM在恒转矩区和弱磁区以最大转矩运行时的转子损耗,并分析了高速工况下槽口宽度、气隙厚度及永磁体轴向分段数对永磁体损耗的影响。

1 表贴式PMSM最大转矩运行

1.1 PMSM数学模型

对于表贴式PMSM,由于永磁体的磁导率接近空气的磁导率,因此其在本质上属于隐极式同步电机,即 $L_d=L_q=L_s$ 。

在稳态工况下,忽略定子绕组的电阻时,表贴式PMSM在 $d-q$ 旋转坐标系下的电压方程为^[11]:

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_s i_q \\ u_q = \omega \psi_m + \omega L_s i_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q —— d 、 q 轴电压;

ω ——转子旋转的电角频率;

L_s ——每相电感值;

i_d 、 i_q —— d 、 q 轴电流;

ψ_m ——转子永磁体磁链;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴电感。

由于 $L_d=L_q$,故表贴式PMSM不存在磁阻转矩分量,其电磁转矩表达式为

$$T_e = p \psi_m i_s \cos \delta \quad (2)$$

式中: p ——极对数;

i_s ——电流矢量的模;

δ ——电流矢量 i_s 与 q 轴之间的夹角,称为电流超前角。

值得注意的是,式(1)和式(2)中出现的变量均为有效值,且在 $d-q$ 系统中电压、电流、磁链的有效值等于静止ABC系统中各相有效值的 $\sqrt{3}$ 倍^[12]。

1.2 电压和电流的限制

考虑到逆变器的容量有限,在 $d-q$ 旋转坐标系下电压和电流的限制方程如下^[13]:

$$\begin{cases} u_d^2 + u_q^2 \leq u_{\max}^2 \\ i_d^2 + i_q^2 \leq i_{\max}^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_{\max}$ 、 $u_{\max}$ ——逆变器允许的最大电流和最大电压。

将式(1)代入式(3)可得 i_d 、 i_q 坐标平面下电压和电流的限制方程为

$$\begin{cases} i_d^2 + i_q^2 \leq i_{\max}^2 \\ \left(i_d + \frac{\psi_m}{L_s} \right)^2 + i_q^2 \leq \left(\frac{u_{\max}}{\omega L_s} \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

由电压和电流限制方程可知:电流限制为一个圆形,电压限制为一系列的同心圆,随着转速的增加,其半径越来越小,如图1所示。

由式(2)可知,当 $i_s=i_{\max}$, $\delta=0$ 时,即 $i_d=0$,电机可获得最大转矩,对应图1中的M点。当电机以最大转矩运行并且转速较低时,电流达到极限值,电压并没有达到极限值。当电压极限圆和电

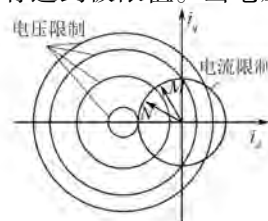


图1 电压电流限制

流极限圆相交于 M 点时,可得电机以最大转矩作恒转矩运行的最大速度,也称为基速:

$$n_{1\max} = \frac{30u_{\max}}{p\pi\sqrt{\psi_m^2 + L_s^2 i_s^2}} \quad (5)$$

当电机的转速从 $n_{1\max}$ 进一步上升时,电机进入弱磁工作区,为了使电机以最大转矩运行,电机的运行工作点将沿着电流极限圆从 M 点到 N 点。此时的最大转矩是指对应 δ 角下的最大转矩。结合图 1 和电压电流限制方程,电机在弱磁区的最大转速为

$$n_{2\max} = \frac{30u_{\max}}{p\pi(\psi_m - L_s i_s)} \quad (6)$$

2 有限元模型和转子损耗计算

图 2 所示为在 MotorSolve 软件中建立的有限元模型。表 1 所示为所研究电机的关键参数,其中永磁体材料为烧结钕铁硼,定转子铁心材料均为 M-19 29 Ga,更详细的电机参数见文献[14]。



图 2 36 槽 42 极永磁电机模型

表 1 永磁电机关键参数

参数名称	参数值
直流侧电压 u/V	42
额定电流 i/V	110
永磁体磁链 ψ_m/mWb	9.9
相电感 $L_s/\mu H$	91.4
永磁体剩磁 B_r/T	0.9
槽口宽度 w/mm	2
气隙厚度 g/mm	0.635

2.1 铁心损耗的计算

转子铁心损耗的计算由经典斯坦梅斯公式给出:

$$p = K_h f^\alpha B^\beta + K_e (sfB)^2 \quad (7)$$

式中: K_h 、 K_e ——磁滞系数和涡流系数;

f ——频率;

s ——叠片系数;

B ——峰值磁通密度;

α 、 β ——系数。

铁磁材料的损耗系数如表 2 所示。

表 2 M-19 29 Ga 电工钢损耗系数

参数名称	参数值
K_h	0.009 686
K_e	4.123×10^{-5}
α	1.198
β	1.796
s	1.0

2.2 永磁体涡流损耗的计算

在二维电磁场计算中,通常假定电流只沿着电机轴向流动,因而矢量磁位 A 只存在轴向分量 A_z 。在永磁体区域,时域电磁场控制方程如式(8)所示:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \phi + \nabla \times H_c \quad (8)$$

式中: μ ——永磁体的磁导率;

A ——矢量磁位;

J_s ——外施电流密度;

σ ——永磁体的电导率;

ϕ ——标量电位;

H_c ——永磁体的矫顽力。

永磁体的感应涡流密度为:

$$J_e = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (9)$$

瞬时永磁体涡流损耗为

$$p_{\text{eddi}}(t) = L \iint_S \frac{|J|^2}{\sigma} dS \quad (10)$$

式中: L 、 S ——永磁体轴向长度和横截面积。

注意,下文给出的损耗值均为在一个周期内的平均值。

3 $i_d=0$ 和弱磁控制条件下转子损耗

3.1 $i_d=0$ 控制时转子损耗

当 $i_d=0$ 、 i_s 为最大值时,电机以最大转矩作恒转矩运行。在此工况下,由式(5)和表 1 提供的可得电机在恒转矩区的最大转速 $n_{1\max}$ 大约为 550 r/min。图 3 所示为电机在恒转矩区的

转子损耗。由图 3 可以看出永磁体的涡流损耗占总损耗的 90% 以上, 转子铁心磁滞损耗和涡流损耗相差不大, 但是磁滞损耗大于涡流损耗。由式 (7) 和表 2 给出的数据, 可以发现当速度较低时, 频率也比较低, 加之涡流系数小于磁滞系数, 因此此时磁滞损耗大于涡流损耗。

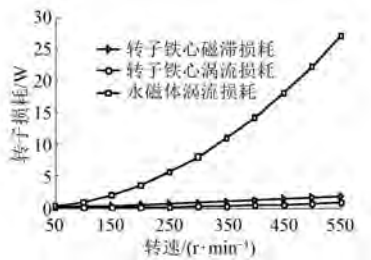


图 3 恒转矩运行工况下转子损耗

3.2 弱磁控制时转子损耗

由式 (3) 和表 1 对应的数据可知, 此时电压限制圆的圆心位于电流限制圆内, 理论上在弱磁运行时可以得到无穷大的速度^[15]。考虑到深度弱磁会对永磁体造成不可逆退磁, 弱磁区的最高转速设为 6 000 r/min。表 3 所示为转速 $n = 600 \sim 6\,000$ r/min 时, 转速 n 和超前角 δ 的对应关系。

表 3 弱磁控制下转速和超前角的对应关系			
转速 $n /$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	超前角 $\delta /$ ($^{\circ}$)	转速 $n /$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	超前角 $\delta /$ ($^{\circ}$)
600	8.73	2 500	72.04
800	31.53	3 000	75.06
1 000	44.00	3 500	77.21
1 200	52.00	4 000	78.82
1 400	57.60	4 500	80.08
1 600	61.74	5 000	81.08
1 800	64.94	5 500	81.90
2 000	67.48	6 000	82.58

图 4 所示为弱磁控制时的转子损耗。由图 4

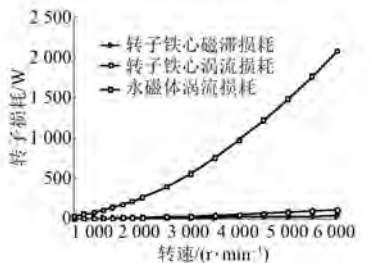


图 4 弱磁控制时转子损耗

可知, 在整个弱磁区域永磁体损耗仍然占 90% 以上, 尤其是在高速运行时, 永磁体的损耗会更高, 在 6 000 r/min 时, 其损耗值达到了 2 072 W。

图 5 所示为弱磁控制时铁心的磁滞损耗和涡流损耗。由图 5 可以看出, 当转速位于 600 ~ 1 500 r/min 时, 磁滞损耗大于涡流损耗, 但当转速超过 1 500 r/min 以后, 铁心的涡流损耗明显高于磁滞损耗。由式 (7) 可知, 在高速工况下时, 频率对于铁心损耗的贡献更加明显, 因此高速时铁心涡流损耗会明显高于磁滞损耗。

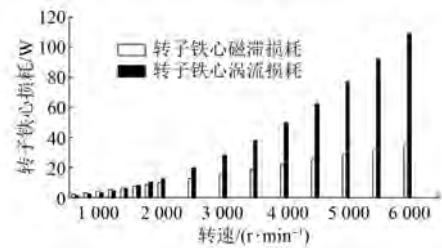


图 5 弱磁控制下铁心损耗

3.3 影响永磁体损耗的因素

由第 3.1 节和第 3.2 节可知, 在整个转速区间, 永磁体涡流损耗占转子总损耗的 90% 以上, 尤其在高速弱磁工况下永磁体损耗更高, 严重降低了电机在高速运行时的效率并可能造成永磁体不可逆退磁。因此, 降低永磁体的涡流损耗对于电机的安全高效运行具有重要意义。下文研究磁体分段数量、气隙厚度和槽口宽度这 3 个因素对永磁体损耗的影响。

图 6 所示为高速工况下 (3 000 ~ 6 000 r/min) 圆周分段对永磁体损耗的影响。由于分段数量的增加会导致加工困难以及成本上升, 因此本文中永磁体分段数量最多考虑为 4 段。由图 6 可以看出, 通过分段可以明显减弱永磁体损耗到较低的水平, 分成 4 段时永磁体损耗在 600 r/min 时达到 262 W。可知, 永磁体分段是减弱损耗的一种有

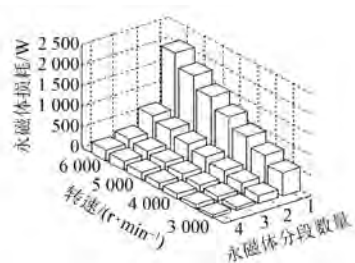


图 6 高速工况下分段数量对永磁体损耗的影响

效措施。

表 4 所示为槽口宽度分别为 2~3 mm 永磁体未分段时电机电感及对应的最大转速。由于槽口宽度过小会造成电机下线困难,槽口大于 3 mm 时电机的最高转速低于 6 000 r/min,因此本文只研究了槽口宽度 2~3 mm 时负载工况下对永磁体涡流损耗的影响。研究发现,槽口宽度对于永磁体损耗几乎没有影响,这是由于定子磁动势的次谐波波长较长,尽管槽口较小时也能穿越气隙进入转子从而在永磁体和铁心产生损耗^[5]。不同的槽口对应着不同的电感,因而超前角不同,虽然相同转速下永磁体涡流损耗基本不变,但是由于超前角的不同,同一转速下的最大转矩也不同。

表 4 槽口宽度变化时电感及最大转速						
槽口宽度 w/mm	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
电感 $L_s/\mu\text{H}$	91.4	88.2	85.4	83.1	81.1	79.2
最大转速 $n_{\text{max}}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	无限大	39 415	15 415	10 276	7 966	6 504

图 7 所示为转子结构不变,仅气隙变化时永磁体高速下的损耗。可以看出,增大气隙对减弱永磁体损耗作用不大,永磁体的损耗在高速下依然很高。当气隙变化时,同槽口变化时一样,也会造成电感和最大转速的变化。

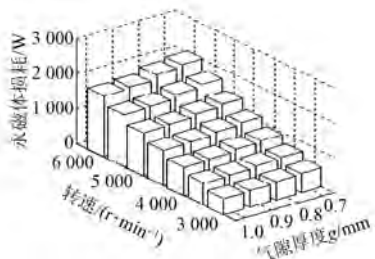


图 7 高速工况下气隙变化对永磁体涡流损耗影响

4 结 语

基于 MotorSolve 二维运动瞬态有限元法,研究了 1 台单层 36 槽 42 极分数槽集中绕组 PMSM 在恒转矩区和弱磁区以最大转矩运行时的转子损耗。研究得出如下结论。

(1) 整个转速区间,永磁体的损耗占 90% 以上,尤其在高速工况下,永磁体的损耗更高,在 6 000 r/min 时达到 2 072 W;铁心损耗只占很小的比例。在转速较低时,铁心的磁滞损耗高于涡

流损耗,但在高速工况下,涡流损耗明显高于磁滞损耗。

(2) 永磁体分段能够减弱永磁体的涡流损耗;槽口宽度的变化对永磁体损耗几乎没有影响,但是会造成电感的改变;增大气隙能减弱永磁体损耗,但是效果并不明显,同样也会造成电感的改变。

【参 考 文 献】

[1] XUAN H V, ANI S O, LAHAYE D, et al. Validation of non-linear dynamic FEM model for design of PM machines with concentrated windings in ship application[C]// 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011.

[2] JASSAL A, POLINDER H, LAHAYE D, et al. Analytical and FE calculation of eddy-current losses in PM concentrated winding machines for wind turbines [C] // 2011 IEEE Internaitonal Electric Machines & Drives Conference, 2011: 717.

[3] RAIHAN M A H, SMITH K J, ALMORAYA A A, et al. Interior permanent magnet synchronous machine (IPMSM) design for environment friendly hybrid electric vehicle (HEV) applications [C] // 2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference, 2017: 375.

[4] 张炳义, 梁丙雪, 徐广人, 等. 真分数槽集中绕组相带谐波比漏磁导系数研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(3): 14.

[5] 佟文明, 程雪斌, 舒圣浪. 高速永磁电机流体场与温度场的计算分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(5): 23.

[6] BIANCHI N, BOLOGNANI S, FORNASIERO E. A general approach to determine the rotor losses in three-phase fractional-slot PM machines [C] // 2007 IEEE Internaitonal Electric Machines & Drives Conference, 2007: 634.

[7] FORNASIERO E, BIANCHI N, BOLOGNANI S. Slot harmonic impact on rotor losses in fractional-slot permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2557.

[8] KOO M M, CHOI J Y, HONG K, et al. Comparative analysis of eddy-current loss in permanent magnet synchronous machine considering PM shape and skew effect using 3-D FEA [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 6301104.

(下转第 71 页)

绕组设计下,用高电阻率材质制成阻尼绕组的发电机,在突然短路瞬间由于磁链守恒原理,当短路处于超瞬态过程时,守恒磁链在阻尼绕组中感应出的电流因更高的电阻率而衰减得更快,从而导致主定子产生的突然短路电流略小于低电阻阻尼绕组结构的发电机。通过测试突然短路电流的峰值,再迭代计算出同步发电机实际的超瞬态电抗值,不可避免会受到电阻因素的影响。

在传统的资料中,阻尼绕组的计算都采用近似估算的方法,导致计算值与实际验证结果比较有非常大的误差。本文通过对 3 MW 无刷同步发电机超瞬态电抗理论计算与低电压瞬态电抗实测相结合的方法,优化设计、制造了 3 种不同结构的阻尼绕组样机,通过低电压突然短路测试,获得 0.33、0.40、0.5 p.u. 额定电压时的突然短路电流值,再计算出对应短路电流值的瞬态及超瞬态电抗。分别经过多次突然短路测试与计算,拟合出发电机初始状态的瞬态及超瞬态电抗值。再依据这些实测数据优化该型发电机转子的阻尼绕组设计并优化电磁计算过程。这种优化计算方法也可推广到相近功率发电机的阻尼绕组设计。

【参考文献】

- [1] 杨定乾,陈赞,张敏.阻尼绕组对同步发电机三相短路电流的影响[J].黑龙江电力,2015,37(3): 216.
 - [2] BASSI C, GIULIVO D, TESSAROLO A. Transient finite-element analysis and testing of a salient-pole synchronous generator with different damper winding design solutions [C] // XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010: 5608128.
 - [3] 霍菲阳,李伟力,王冬梅.大型水轮发电机阻尼条数对电磁参数和附件损耗的影响[J].电机与控制学报,2011,15(5): 89.
 - [4] 吴楠,李尚盛,孙建军.基于三步隐式 Adams 法的同步电机阻尼绕组电流计算[J].电测与仪表,2016,53(2): 57.
 - [5] 袁雨峰,王芳.25 MW 自备发电机超瞬变电抗选择[J].能源与环境,2017(4): 46.
 - [6] 黄国治,傅丰礼.中小型旋转电机设计手册[M].北京:中国电力出版社,2007.
 - [7] US Department of Defense. MIL-STD-705C. Generator sets, engine driven, methods of tests and instructions[S].1989: Method 426.1b.
- 收稿日期: 2018-11-28
-
- (上接第 56 页)
- [9] GEEST M V D, POLINDER H, FERREIRA J A. Computationally efficient 3D FEM rotor eddy-current loss calculation for permanent magnet synchronous machines [C] // 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2015: 1165.
 - [10] AZAR Z, WU L J, EVANS D, et al. Influence of rotor configuration on iron and magnet losses of fractional-slot IPM machines [C] // 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2010: 1.
 - [11] SOONG W L, REDDY P B, ELREFAIE A M, et al. Surface PM machine parameter selection for wide field-weakening applications [C] // 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, 2007: 882.
 - [12] 唐任远.现代永磁电机[M].北京:机械工业出版社,1997.
 - [13] LIN P Y, LAI Y S. Novel voltage trajectory control for flux weakening operation of surface mounted PMSM drives [C] // 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008.
 - [14] EL-REFAIE A M, JAHNS T M. Optimal flux weakening in surface PM machines using fractional-slot concentrated windings [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 790.
 - [15] MAGNUSSEN F, THELIN P, SADARANGAINI C. Performance evaluation of permanent magnet synchronous machines with concentrated and distributed windings including the effect of field-weakening [C] // Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2004), 2004: 679.
- 收稿日期: 2018-09-18