

双馈异步风力发电机气隙偏心故障诊断 研究现状与发展

马宏忠, 李思源

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 双馈异步风力发电机(DFIG)机械故障在实际运行中尤其不可忽略,不论是转子刚度不足还是轴承磨损或安装误差,都会导致气隙偏心,严重时甚至会烧毁电机,因此对风机进行准确高效的气隙偏心故障诊断至关重要。简单介绍 DFIG 产生气隙偏心的故障机理,再对当前已有的相关故障诊断方法做重点归类阐述,最后展望未来的 DFIG 气隙偏心故障诊断方法的发展趋势和方向。

关键词: 双馈异步风力发电机; 气隙偏心; 故障诊断; 弧偏心; 并联支路环流; 齿部磁场; 绕组变形

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0117-06

Research Status and Development of Air Gap Eccentric Fault Diagnosis for Doubly Fed Induction Generator

MA Hongzhong, LI Siyuan

(College of Energy and Electrical Engineering, HoHai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Doubly fed induction generator has been widely used in wind power industry. Compared with electrical failure, mechanical failure in practical engineering operation in particular can not be ignored, and are mostly associated with the air gap eccentricity, whether the rotor rigidity or insufficient bearing wear or installation error, will cause the air gap eccentricity, and even burning motor, air gap eccentric fault diagnosis of wind turbine. So it is very important accurate and efficient. This paper first introduces the failure mechanism of double fed asynchronous wind generator air gap eccentric fault diagnosis method, related to the current key classification described finally in the future, the doubly fed induction wind generator air gap eccentric fault diagnosis method of the development trend and direction.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); air gap eccentricity; fault diagnosis; arc eccentricity; parallel branch circulation; tooth magnetic field; winding deformation

0 引 言

双馈异步风力发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)是一个复杂的机械电气系统。一般情况下,水平型风机主要由风轮、变桨距系统、机舱、发电系统、主传动系统、偏航系统、控制系统、液压系统、塔筒、基础等几部分构成^[1]。与永磁同步电机相比,DFIG 结构简单,运行可靠、制造成本较低,因而应用广泛,需求量大。

气隙偏心故障是 DFIG 主要机械故障之一。不论是转子的刚度不足还是轴承磨损或者安装过程中产生误差,均会使电机发生气隙偏心。当感应电机发生气隙偏心故障时,内部气隙磁场会发生畸变,恶化电机的各项性能指标,严重时甚至会加剧定转子振动,引发转子弯曲、绕组磨损、定转子间的相互摩擦而烧毁电动机,造成严重的经济损失,甚至可能会危害人身安全^[2]。因此,通过检测 DFIG 的气隙偏心故障信号,运用气隙偏心故

作者简介: 马宏忠(1962—),男,博士,教授,研究方向为电力设备状态监测及故障诊断。

李思源(1994—),女,硕士研究生,研究方向为双馈异步风力发电机状态监测与故障诊断。

障诊断方法,可以实现电机故障的早期诊断和预备处理,避免问题的进一步恶化。

1 气隙偏心故障产生机理及分类

1.1 故障产生机理

DFIG 属于三相感应电机,主要由定子、转子和气隙 3 部分组成。定子固定安装在机壳上,其中包括机座、定子铁心、定子绕组、端盖等部件;转子通过轴承安装在基座上,其中包括转轴、转子铁心和转子绕组等部件。定转子之间存在气隙,为减小电机磁阻,在制造工艺允许的情况下应尽量减小气隙长度。在正常情况下,气隙长度沿定子圆周均匀对称分布,作用在转子上的切向电磁力和径向电磁力均匀对称分布。但受限于现有的安装工艺、电机复杂的内部结构及电机可能的恶劣运行环境,在实际工程中经常出现气隙不均匀现象;而在电机的研究中,至少有 50% 的故障都会引发气隙不均匀,出现气隙偏心故障。

1.2 故障分类

对 DFIG 气隙偏心故障的研究一般分为 3 种情况:静态偏心、动态偏心和混合偏心。其中,前两者为气隙偏心的基本故障类型,组合构成实际电机运行时的混合偏心故障。

图 1(a)所示,静态偏心的特征为定转子旋转中心不同,转子以自身几何轴心为旋转轴,定转子最小径向气隙位置在空间固定,产生因素一般为定转子铁心不同心或实际安装时的错位等;图 1(b)所示,动态偏心的特征为定转子旋转中心

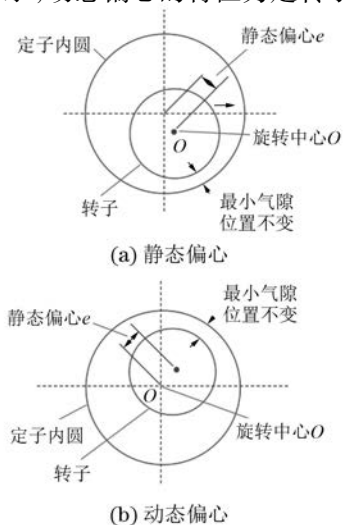


图 1 基本气隙偏心类型

不同,而且定转子的最小径向气隙位置随转子一同旋转,构成时间和空间的函数,产生因素一般为转轴的弯曲挠度、轴承的磨损移位、实际安装的不同心及产生的机械共振等。

气隙偏心会导致气隙两边对应的气隙磁导不同、气隙磁密不同,产生作用在定转子上的不平衡磁拉力从而引发定转子径向振动;定转子之间相互摩擦使得气隙偏心程度加大,从而形成恶性循环,对定转子产生致命伤害,严重时甚至会导致发电机停机;与此同时,定子绕组上会产生感应谐波和并联支路环流,转子上会产生轴电压,也为 DFIG 偏心故障的诊断提供了依据。

2 气隙偏心故障诊断研究现状

本文重点总结了近 6 年来出现的 DFIG 气隙偏心故障检测的新方法和新思路,便于日后进一步的研究。与传统发电机类似,对 DFIG 气隙偏心故障的诊断研究方法作以归类。

2.1 定子电流状态监测

DFIG 定转子间发生气隙偏心时,气隙磁导在沿圆周方向上分布不均匀,因此定子绕组会感应出谐波分量,产生特定的故障特征频率:

$$f_{ec} = f_1 \left[(R \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right] \quad (1)$$

式中: f_{ec} ——气隙偏心特征频率;

f_1 ——电源频率;

R ——转子槽数;

s ——转差率;

p ——电机极对数;

n_{ws} ——奇整数(1, 3, 5, ...);

n_d ——偏心级数,“0”为静态偏心,“1”为动态偏心。

转子槽数较多时,式(1)会使相应气隙偏心的特征频率较大,不利于特征频率的检测。在实际应用中,有一特征频率对于偏心故障的检测尤其是低频段的信号检测十分有效,表达式为

$$F = |f_1 \pm mf_r| \quad (2)$$

式中: f_r ——旋转频率,且 $f_r = f_1(1-s)/p$;

m ——正整数。

20 世纪 90 年代中期,Cardoso A J M 等国外学者提出了基于 Park 矢量方法的故障在线监测和诊断方法^[3]。当电机发生偏心故障时,矢量轨

迹会发生偏离变成椭圆,根据椭圆短轴、长轴的变化诊断电机气隙偏心的故障程度。但该方法对故障的早期监测比较困难。

基于 Extended Park 矢量方法,将基波分量转换成易被滤除的直流分量,能有效地提取故障信号^[4]。但在实际电机运行工况中,故障以复合形式出现,各种特征频率成分会发生互相作用而产生新的频率,增加频谱的复杂程度,难以识别。

针对传统 FFT 在提取故障特征频率中存在频谱泄漏和噪声淹没的问题,文献[5]提出了一种基于 Morlet 小波解调的新方法,利用 Morlet 小波变换的带通滤波功能,通过虚实部正交特性对定子电流信号进行变换并采用包络理论变基波分量为直流分量,提高定子电流诊断的准确性和实用性。

文献[6]提出了一种基于小波-抗体记忆克隆算法的 DFIG 故障诊断方法,提取电机故障信号特征向量生成抗原,可用于诊断不同程度的混合偏心故障,诊断准确率高。

采用小波尺度谱法能有效地提取定子电流信号特征^[7],可以直观地描述偏心引发的定子电流信号强度变化、时频分布及频率组成,有助于诊断 DFIG 的偏心故障程度、位置及发展趋势。

2.2 定转子振动监测

文献[8]将转子振动信号的多尺度熵平均值作为故障程度的诊断依据。但大多数发电机在制造和运行时多少都存在气隙偏心情况,并且发电机定转子间径向气隙长度较小,实际气隙偏心量不大,因此气隙偏心故障的多尺度熵值与正常运行情况下的多尺度熵值相对接近,监测精度不高。

基于 Ansys 有限元仿真软件对转子偏心故障建立 DFIG 二维和三维模型,如图 2(a)所示为风机二维转子径向偏心的物理模型,图 2(b)为风机三维转子轴向偏心的物理模型^[9-10]。

利用场路耦合法分析转子表面磁密的偶次谐波并作为转子偏心的判断依据^[11-13];用解析法计算不同程度偏心前后定转子振动特征^[14],为 DFIG 偏心故障检测提供理论方法。

文献[15]建立 DFIG 状态监测与故障诊断模型,提取气隙偏心故障振动的噪声信号进行软阈值消噪处理,利用小波包理论进行信号重构提取特征量;结合改进的粒子群优化最小二

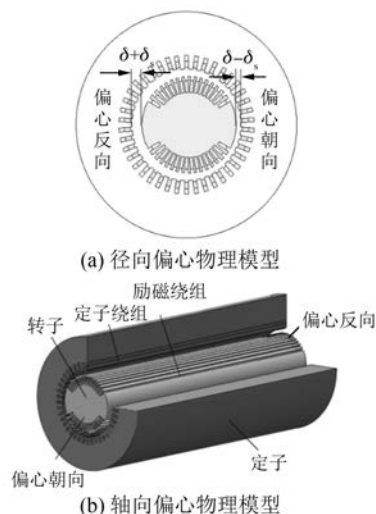


图2 双馈感应电机转子偏心物理模型

乘支持向量机 (Least Squares - Support Vector Machine, LS-SVM) 算法实现了偏心故障发生程度的诊断,相比传统的 LS-SVM 方法诊断结果更加精准。

2.3 不平衡磁拉力分析监测

弧偏心是转轴由于弯曲而形成的轴向呈现弧形的动态偏心^[16-18]。图3所示为感应电机轴向弯曲示意图。文献[19]提出的气隙弧偏心模型可以适用于 DFIG 产生定转子摩擦的严重偏心故障分析,将挠度与偏心统一起来,计算转轴挠度并考虑电机定转子热膨胀的影响,对气隙偏心进行更为精确的建模;通过有限元法计算弧偏心情况下的不平衡磁拉力,验证了轴向不平衡磁拉力的

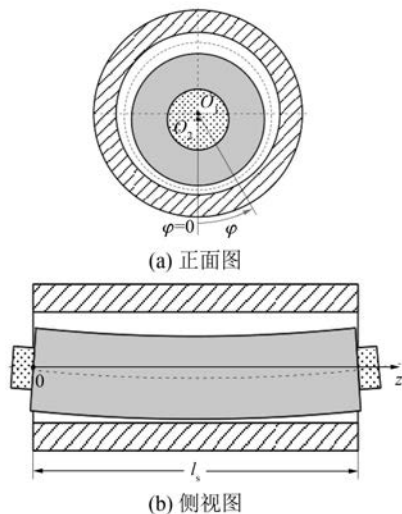


图3 弧偏心示意图

存在,具有现实意义。

在诊断电机气隙偏心故障时可以采用小波包能量和 BP 神经网络结合的方法^[20]。分析电机产生气隙偏心时电磁力的变化并进行小波包能量提取,直接作为神经网络输入向量区分故障类型,具有较好的分类效果;通过分析 DFIG 偏心故障的不平衡磁拉力,提出了适用于静偏心故障各个阶段的 0 Hz 故障特征频率,诊断结果较为精确;同时,根据相互垂直的两个方向力的关系可以推导最小气隙偏心的位置,进而判断故障的发生方位^[21-22],为故障维修提供一定的参考价值。

2.4 磁场检测线圈监测

文献[23]对感应电机定子齿部磁场和轭部磁场的偏心特征量进行研究,针对定子结构特征,提出了基于磁场检测线圈的多点磁场测量法检测感应电机的复杂气隙偏心故障。如图 4 所示为多点磁场测量法检测线圈在定子侧的安装结构,需要在定子齿部和轭部设置附加槽。

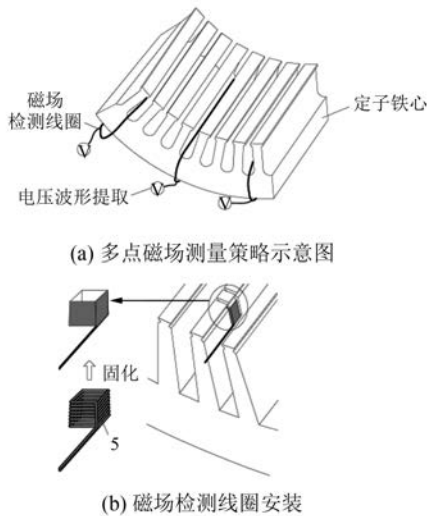


图 4 多点磁场测量法结构

多点磁场测量法相比其他常规方法可以克服极对数和转子槽数配合影响的限制。通过观察各磁场检测线圈测得的频谱信号识别最大偏心度的大致位置,不仅可以检测一般的静态和动态偏心,还能有效地识别斜偏心、弧偏心等轴向不均匀偏心。具体判断方式如表 1 所示。该方法在很大程度上提高了偏心故障的诊断精度。

表 1 偏心类型判断

转子机械 振动特征	定子并联支路 环流电气特征	诊断及 监测结果
二倍频振动	基波环流突出,另有 其他奇次谐波环流	存在静偏心故障
一倍频振动	基波环流突出,另有 其他奇次谐波环流	存在动偏心故障
一倍频、 二倍频振动	基波环流突出,另有 其他奇次谐波环流	存在动静复合偏心 故障
二倍频 振动增大	基波环流与其他奇 次谐波环流皆增大	静偏心故障加剧,环 流增幅反映静偏心 恶化程度
一倍频 振动增大	基波环流与其他奇 次谐波环流皆增大	动偏心故障加剧,环 流增幅反映动偏心 恶化程度
基频、 二倍频振动增大	基波环流与其他奇 次谐波环流皆增大	动静复合偏心故障 加剧,环流增幅反映 其恶化程度

给出动态偏心时气隙磁场的故障特征频率,该特征谐波也存在于定子齿部磁场中^[24]。

$$f_{de2} = \left| n \frac{1-s}{p} \pm n_{ws} \right| f_1 = \left| n f_r \pm n_{ws} f_1 \right| \quad (3)$$

通过有限元模型分析计算,得到动态气隙偏心故障频率的幅值与偏心度的近似正比关系,验证了基波附近的 $f_1 \pm f_r$ 故障特征频率^[25]。

2.5 定子绕组并联支路环流特性监测

文献[26-27]针对气隙偏心故障与电气信号特征的关联,通过对定子绕组感应支路的谐波计算,得到偏心故障时定子绕组并联支路间将产生以基波成分突出的奇次谐波电压差和环流,并且幅值随静偏心程度增加而增大。

3 DFIG 气隙偏心故障诊断研究展望

3.1 方法创新

气隙静态偏心会使得气隙分布不对称而导致磁场畸变,加剧定转子振动,引发绕组绝缘磨损和移位变形。因此文献[28]研究气隙静态偏心故障下转子绕组的力学响应,采用三维建模软件 SOLIDWORKS 建立转子绕组三维模型模拟感应电机静态偏心故障,发现电机励磁绕组形变、应变和应力在整体分布上存在一定空间对称性;电磁

力在靠近转子大齿处(磁极处)最大,力学响应随着与大齿距离的增大而减小,绕组形变量也如此且存在轴向滑移。定性而言,由于转角处形状突变,转角部分应力和应变最大,直线部分的应变和应力最小。在实际工程运用中,该方法为转子结构优化及绕组固定的设计提供了一定参考。

气隙偏心故障不仅会导致发电机产生一定频率的定转子振动,还会导致发电机定子绕组并联支路间感应产生环流,交叉表现出定转子振动和定子并联支路环流并存的综合故障特征。因此采用机械-电气交叉诊断法^[29],监测判据具体如表 2 所示。

表 2 基于交叉故障特征的气隙偏心故障诊断与监测		
转子机械 振动特征	定子并联支路 环流电气特征	诊断及监测结果
二倍频振动	基波环流突出,另有其他奇次谐波环流	存在静偏心故障
一倍频振动	基波环流突出,另有其他奇次谐波环流	存在动偏心故障
一倍频、二倍频振动	基波环流突出,另有其他奇次谐波环流	存在动静复合偏心故障
二倍频 振动增大	基波环流与其他奇次谐波环流皆增大	静偏心故障加剧,环流增幅反映静偏心恶化程度
一倍频 振动增大	基波环流与其他奇次谐波环流皆增大	动偏心故障加剧,环流增幅反映动偏心恶化程度
基频、二倍频 振动增大	基波环流与其他奇次谐波环流皆增大	复合偏心故障加剧,环流增幅反映其恶化程度

环流值可以通过电流互感器精确测量,因此基于发电机机械-电气交叉故障特征的诊断方法不仅可以快速诊断出发电机对应偏心故障,还能根据实测电流值增幅实现量化诊断,判别 DFIG 对应偏心故障发展的严重程度,从而及时采取有效措施,将危害和损失减少到最小。

3.2 未来展望

随着全球风力发电产业的快速发展,风力发电机组故障诊断技术将会越来越重要。DFIG 是风力发电系统的核心部件,而气隙偏心故障发生

频繁,因此对其诊断方法的研究必将成为当下时代发展的大趋势。

目前应用于故障诊断的算法主要有三大类:(1)信号处理,例如小波变换、主元分析等;(2)解析模型,例如 Bread 提出的故障监测滤波方法、基于 kalman 滤波器算法等;(3)知识网络,例如专家系统故障诊断、模糊故障诊断、基于 Agent 故障诊断等。可以将这些算法相互融合形成新的智能融合集成算法,开发出更有效的智能故障诊断系统。

对 DFIG 偏心故障的诊断主要偏向于电气量和振动量。在以后的研究中可以着重分析风电系统的工作温度、工作噪声等信号并将多种故障特征量融合以提高诊断的准确性^[30-31]。

在实际的风机故障诊断中,系统经常会同时发生多种故障,其对应故障特征量之间会相互影响,从而增加偏心故障的诊断难度。如何将单一的气隙偏心故障诊断融入对 DFIG 的综合故障诊断,有待进一步研究。

4 结 语

本文总结了近 6 年来 DFIG 气隙偏心故障诊断的研究现状和新方法、新思路;提出了气隙静态偏心故障下发电机励磁绕组力学响应分析和基于机械-电气故障特征量交叉诊断方法;最后预测了该领域的未来发展趋势与方向,为日后的课题研究打下了一定的基础。

【参考文献】

[1] 姚兴佳,宋俊.风力发电机组原理与应用[M].北京:机械工业出版社,2009: 18-19.

[2] 鲍晓华.感应电机气隙偏心故障研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2013,33(6): 93-100.

[3] NEJJARI H, BENBOUZID M E H. Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current park's vector pattern learning approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2000, 36(3): 730-735.

[4] CRUZ S M A, CARDOSO A J M. Rotor cage fault diagnosis in three - phase induction motors by extended park ' s vector approach [J]. Electric Machines And Power System, 2000, 28(5): 289-299.

[5] 左志文,田慕琴.Morlet 小波变换在感应电动机气隙偏心故障诊断中的应用[J].电气应用,2015,34

- (16): 67-70.
- [6] 吴洪兵.基于免疫算法的风电系统故障诊断技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2014.
 - [7] 赵浩铭.基于小波尺度谱的电机气隙偏心故障诊断研究[C] // 沈阳:沈阳科学学术年会,2013: 217-224.
 - [8] 何玉灵,万书亭.基于定子振动特性的汽轮发电机气隙偏心故障程度鉴定方法研究[J].振动与冲击,2011,31(22): 53-57,89.
 - [9] 唐贵基,何玉灵.气隙静态偏心与定子短路复合故障对发电机定子振动特性的影响[J].振动工程学报,2014,27(1): 118-127.
 - [10] 何玉灵,庞彬.基于振动信号多尺度熵发电机故障监测方法研究[J].电机与控制应用,2015,42(9): 15-18,46.
 - [11] 毛可意.大型汽轮发电机转子偏心故障[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
 - [12] FAIZ J, EBRAHIMI B M, AKIN B, et al. Finite - element transient analysis of induction motors under mixed eccentricity fault [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44 (1) : 66-74.
 - [13] FAIZ J, EBRAHIMI B M, AKIN B, et al. Comprehensive eccentricity fault diagnosis in induction motors using finite element method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (3) : 1764-1767.
 - [14] 常悦,徐正国.基于振动信号分析的感应电机气隙偏心故障诊断[J].上海应用技术学院学报,2015, 15(2): 135-138.
 - [15] 刘谦.双馈异步风力发电机状态监测与故障诊断研究[D].西安:西安理工大学,2011.
 - [16] PETERS R, LUNDIN U, LEIJON M. Saturation effects on unbalanced magnetic pull in a hydroelectric generator with an eccentric rotor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 34 (10) : 3884-3890.
 - [17] PILLAI K PP, NAIR A S, BINDU G R. Unbalanced magnetic pull in train - lighting brushless alternators with static eccentricity [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57 (1) : 120-126.
 - [18] LI J T, LIU Z J, NAY L H A. Effect of radial magnetic forces in permanent magnetic motors with rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43 (6) : 2525-2527.
 - [19] 吕强.大型潜水电机弧偏心特征分析与检测技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2014.
 - [20] DORRELL D G. Sources and characteristics of unbalanced magnetic pull in three - phase cage induction motors with axial - varying rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47 (1) : 12-24.
 - [21] TENHUNEN A. Finite - element calculation of unbalanced magnetic pull and circulating current between parallel windings in induction motor with non - uniform eccentric motor [C] // Proceedings of Electromotion Bologna, Italy, 2011: 19-24.
 - [22] 常悦.基于振动信号分析的感应电机气隙偏心故障诊断的研究[D].杭州:浙江大学,2016.
 - [23] 阙超豪,丁少华.基于气隙磁场分析的无刷双馈电机偏心故障研究[J].微电机,2017,50(3): 5-8,18.
 - [24] 鲍晓华,吕强.基于齿部磁场分析的大型潜水电机气隙偏心故障研究[J].电工技术学报,2016,31(8): 90-95.
 - [25] 周锋,王明渝.基于 MCSA 的异步电动机状态监测与故障诊断综述[J].重庆大学学报,2005,28(1): 49-52.
 - [26] 万书亭,孔江生.发电机偏心故障的机电多重特征分析[J].中国机械工程,2008,19(3): 347-350.
 - [27] 万书亭.发电机气隙偏心时定子并联支路的环流特性分析[J].高电压技术,2010,36(6): 1547-1553.
 - [28] 蒋宏春,伍世良.气隙静态偏心故障下汽轮发电机励磁绕组受载及其力学响应分析[J].电机与控制应用,2016,43(8): 46-50,62.
 - [29] 何玉灵.汽轮发电机气隙偏心故障分析与诊断方法研究[D].保定:华北电力大学,2009.
 - [30] WERNER U. Theoretical analysis of shaft vibrations in two - pole induction machines considering static rotor eccentricity [C] // International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion. Pisa, Italy: IEEE, 2010: 853-860.
 - [31] WERNER U. Bearing housing vibrations in soft mounted two - pole induction motors caused by static rotor eccentricity [C] // International Conference on Power Engineering, Electrical Drives Malaga, Spain, IEEE, 2011: 1-6.

收稿日期: 2017 -08 -29