

基于马尔科夫矩阵的灌浆连接段疲劳性能研究

张力¹, 陈珂^{1,✉}, 元国凯¹, 陈涛²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: [目的] 由于荷载的时变性与随机性, 海上风电基础结构中的灌浆连接段疲劳问题突出, 为确保海上风电基础服役安全性, 需要研究连接段疲劳性能演化规律。[方法] 从有限元数值模型出发, 将马尔科夫荷载矩阵转化为灌浆连接段关键位置处的应力, 并结合材料的 $S-N$ 曲线和线性累积损伤准则, 实现对灌浆连接段的疲劳性能评估。[结果] 通过对灌浆连接段有限元模型分析可知, 在轴向荷载作用下, 钢结构产生的累积损伤值大于灌浆材料, 但均小于 DNV 规范中的限值。[结论] 说明在该风机荷载作用下, 灌浆连接段内的两种材料均不会发生疲劳破坏, 风机基础结构是安全的, 同时该分析方法也是有效的。

关键词: 有限元模型; 马尔科夫矩阵; 灌浆连接段; 疲劳分析; 结构强度

中图分类号: TK89; P75

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S2-0006-05

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Fatigue Performance of Grouted Connections Based on Markov Matrix

ZHANG Li¹, CHEN Ke^{1,✉}, YUAN Guokai¹, CHEN Tao²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: [Introduction] Due to the time variability and randomness of load, the fatigue problem of grouted connections in offshore wind power is serious and it is necessary to research into the fatigue performance of grouted connections to ensure its safety operation. [Method] Based on the finite element numerical model, the Markov load matrix was transformed into the stress at the key position of the grouted connections in this study, and combined with the $S-N$ curve of materials and the linear cumulative damage rule, the fatigue performance of the grouted connections was evaluated. [Result] The finite element model of grouted connections shows that the cumulative damage of steel materials under axial load is greater than that of grouting materials, but less than the limit of DNV specification. [Conclusion] This study shows that fatigue failure will not occur in the two materials in the grouted connections under the specific load, the structure of turbine is safe, and the analysis method is effective.

Key words: finite element; Markov matrix; grouted connections; fatigue analysis; structure intensity

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在风力发电领域, 海上风电技术虽然起步较晚, 但已经逐渐成为世界可再生能源发展领域的焦点。海上风机基础与上部结构采用套筒灌浆进行连接的技术, 现已成功应用于国外很多海上风电场。然而, 灌浆连接段在风浪荷载的作用下, 构件的疲劳问题

突出: 除了钢管连接段处焊缝的疲劳以外, 剪力键附近的灌浆料产生较大的应力集中现象, 也容易出现疲劳问题^[1]。有不少学者提出采用有限元模拟的方法对灌浆连接段的疲劳寿命进行评估。Červenka 等^[2]基于欧洲模式规范^[3]中的整体分析方法, 基于整体模型预测灌浆连接段疲劳寿命; Schaumann 等^[4-5]系统研究灌浆连接段在疲劳极限下的性能评价方法;

收稿日期: 2022-04-19 修回日期: 2022-07-20

基金项目: 广东省促进经济发展专项基金“基于大数据的海上风电场支撑结构强度与疲劳实时评估研究”(粤自然资源合[2019]019)

Löhning^[6] 建议一种两阶段有限元数值分析方法, 获取带剪力键灌浆连接段的应力状态, 将马尔科夫矩阵作为起点, 通过有限元模型得到的传递函数将荷载幅转化为应力幅, 并利用灌浆材料的 $S-N$ 曲线以及线性损伤累积公式来校核灌浆连接段的疲劳性能。

本文针对某在建的风电导管架灌浆连接段进行疲劳性能评估。在已知荷载马尔科夫矩阵的基础上, 建立考虑剪力键细节的三维有限元模型, 获取局部应力状态。随后基于不同的材料疲劳性能曲线, 计算损伤指标, 获取钢管和灌浆料的损伤值。

1 马尔科夫矩阵方法

为了研究灌浆连接段的疲劳性能, 首先需要明确灌浆连接段的所承受的疲劳荷载工况。马尔科夫计数法是由荷兰的学者 J.B. de Jonge 于 1982 年提出的^[7]。作为一种较为常用的疲劳计数方法, 它可以对时程曲线进行统计计数, 从而得到时程曲线中各循环荷载出现的次数 n , 构成马尔科夫矩阵。在马尔科夫矩阵 $A[i, j]$ 中, 矩阵的元素 a_{ij} 表示从荷载水平 j 到荷载水平 i 发生的次数 n 。从荷载水平 j 到荷载水平 i 的循环, 其荷载范围是 $U=j-i$, 作为矩阵的行向量; 平均值为 $m=1/2(i+j)$, 作为矩阵的列向量。

1.1 数据过滤

对于荷载的时程曲线来说, 会存在一些对计数没有帮助的细微震荡, 所以在计数前需要对数据进行过滤, 将数据在 R 值(过滤所需幅度值)以下的震荡都忽略不计, 可以用图 1 说明。图中左边是未经过过滤的数据, 这些数据可能会有很多峰值和谷值点, 但这些数据点变化幅度可能太小, 对计数没有帮助, 则可以进行数据过滤处理, 得到图中右边的光滑曲线, 只计入最大的峰值和谷值。

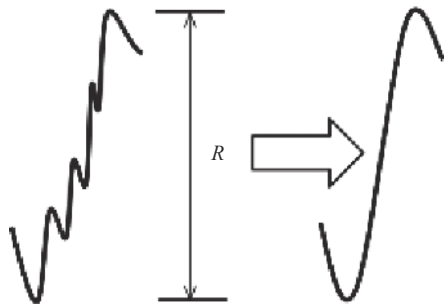


图 1 数据过滤示意图

Fig. 1 Data filtering diagram

1.2 计数规则

马尔科夫计数过程可分为如下的两个阶段。

阶段 1: 如图 2 所示, 从 S_{p-3} 点开始, 如果满足(1)或式(2)中的不等式, 则计数 S_{p-2} 和 S_{p-1} , 在其对应的矩阵的 a_{ij} 和对角元素 a_{ji} 上各加 1 (i, j 分别对应于应力水平 S_{p-2} 和 S_{p-1})。接着删除 S_{p-2} 和 S_{p-1} 这两个点, 从头开始, 按相同方法向下计数。

$$S_{p-2} > S_{p-3} \text{ and } S_{p-1} \geq S_{p-3} \text{ and } S_p \geq S_{p-2} \quad (1)$$

$$S_{p-2} < S_{p-3} \text{ and } S_{p-1} \leq S_{p-3} \text{ and } S_p \leq S_{p-2} \quad (2)$$

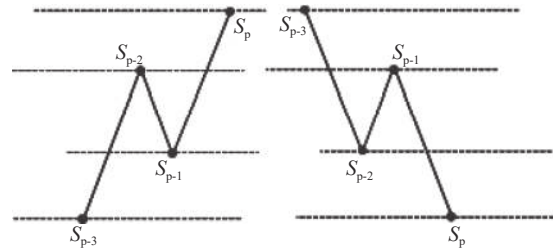


图 2 马尔科夫计数阶段 1 示意图

Fig. 2 Markov counting process stage 1

阶段 2: 将数据序列中剩余数组简单计数, 在对应矩阵元素 a_{ij} 上加 1。

1.3 灌浆连接段的马尔科夫荷载矩阵

灌浆连接段在其 20 年使用期内所承受的疲劳荷载, 可以通过马尔科夫矩阵的形式来表征。如图 3 所示, 对于海上风机的灌浆连接段, 共有 6 个马尔科夫荷载矩阵, 分别为 F_{XF} (轴力)、 F_{YF} (水平力)、 F_{ZF} (水平力)、 M_{XF} (扭矩)、 M_{YF} (弯矩)、 M_{ZF} (弯矩)^[8]。

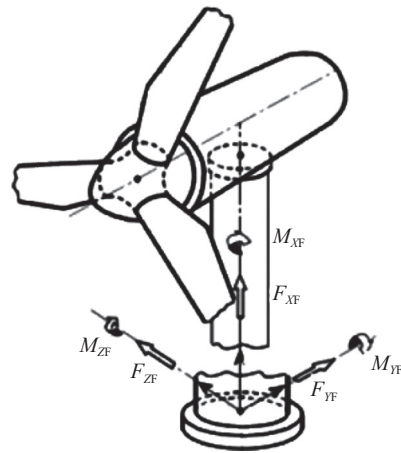


图 3 海上风机荷载示意图

Fig. 3 Offshore wind turbine load

如图 4 所示, 可以把马尔科夫矩阵反映到三维坐标轴中, 其横坐标表示循环荷载的荷载范围, 纵坐

标表示循环荷载的中位值,竖坐标表示循环荷载出现的次数。

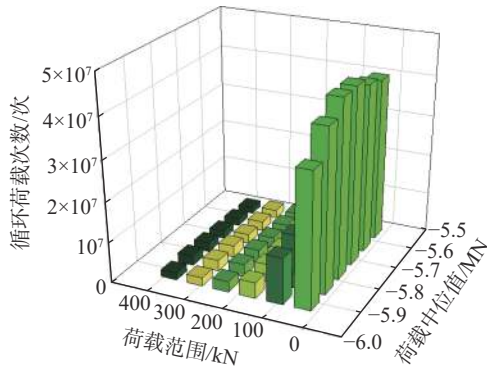


图4 三维坐标下的马尔科夫矩阵

Fig. 4 Markov matrix under three-dimensional coordinate

2 灌浆连接段数值模拟

本文以阳江某 300 MW 海上风电场为例,单台风机功率为 5.5 MW,风机基础采用导管架基础^[9]。取其中的灌浆连接段原型为实例,按照半结构建立有限元模型,利用数值模拟的方式对灌浆连接段的疲劳性能进行研究。

2.1 模型几何尺寸

灌浆连接段的有限元模型主要由内部导管架腿、外部桩管以及两根钢管之间的灌浆料组成。模型的主要尺寸如图5和表1所示。实际工程中的剪力键是采用 25 mm 直径圆钢焊接连接段上,间距为 300 mm。剪力键在导管架腿柱的外表面和桩的内表面之间交替布置,目的是形成斜压短柱,以在两根钢管之间传递荷载。

2.2 材料性能

钢材材料本构为双线性模型;高强灌浆料采用有限元软件中的混凝土塑性损伤模型(CDP)^[10]。

钢材的弹性模量为 200 GPa,屈服和极限强度分别为 355 MPa 和 500 MPa,泊松比取值为 0.3。高强灌浆料的弹性模量取值为 46.8 MPa,抗压强度取值为 121.8 MPa,泊松比取值为 0.185,断裂能取值为 0.175 N/mm。

2.3 网格划分及边界条件

灌浆连接段的钢管和浆体部分均采用 8 节点六面体线性缩减积分实体单元(C3D8R 单元),并在剪力键位置处加密网格。为了保证计算精度,在厚度方向将钢管划分为 3 层,灌浆料划分为 4 层,在环向将整个连接段划分为 50 层,如图6所示。

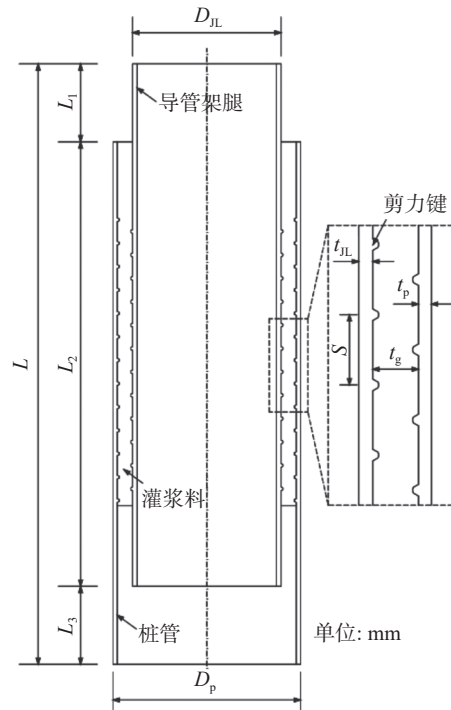


图5 灌浆连接段形状

Fig. 5 Dimension of grouted connection

表1 灌浆连接段数值模型几何尺寸

Tab. 1 Geometrical dimension of numerical models for grouted connections

内部导管架腿		外部桩管		连接段长度			
D_{IL}	t_{IL}	D_p	t_p	L	L_1	L_2	L_3
1 900	60	2 400	55	7 700	1 000	5 700	1 000

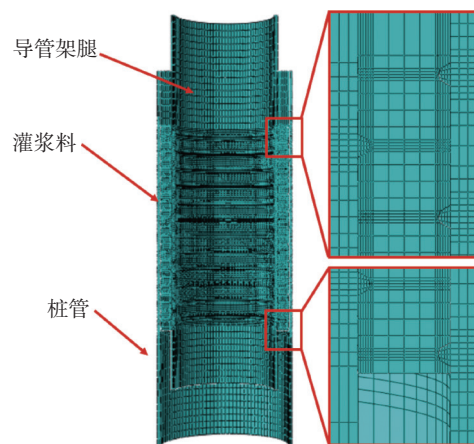


图6 有限元模型网格划分

Fig. 6 Meshing of finite element model

依据几何和荷载条件,数值模型为半模型,对称

面定义对称边界条件, 钢管模型底部定义为固定端。内钢管圆心上部定义参考点并与顶部平面耦合, 参考点上施加外部荷载。不同材料之间的法向接触定义为硬接触, 切向方向定义为库伦摩擦模型, 参考 Lotsberg 和 DNV 的研究成果, 摩擦系数 μ 取值为 0.7。

2.4 荷载施加及分析步定义

导管架式的灌浆连接段主要承受轴向荷载, 根据轴向马尔科夫荷载矩阵, 最大的轴向压力为 6.983 MN, 且灌浆连接段不承受轴向拉力。由于本次建立的模型为半模型, 故对参考点施加竖直向下 3.5 MN 的力。

为了方便后续对马尔科夫矩阵中的循环荷载进行插值, 在分析步中定义固定增量步长, 步长为 0.001 5, 即每一步的荷载增量则为 5.25 kN。

3 模拟结果及疲劳分析

3.1 数值计算结果

由图 7 可以观察到外钢管应力数值从上到下逐渐增大, 与之相反, 内钢管应力则逐渐减小。相应的外钢管最大 Mises 应力出现在最下部剪力键下方焊趾处, 值为 27.11 MPa; 而内钢管最大 Mises 应力则位于最上部剪力键上方焊趾处, 值为 23.91 MPa。由图 8 可得, 灌浆料在靠近剪力键位置处的第三主应力较大, 其最大的第三主应力位于内管的第一个剪力键的下方, 大小为 -10.76 MPa。

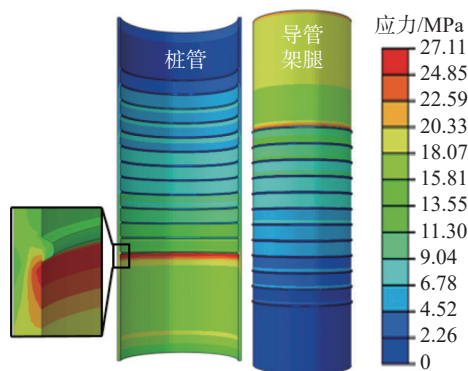


图 7 钢结构 Mises 应力云图

Fig. 7 Mises stress nephogram of steel structure

3.2 钢结构疲劳性能评估

灌浆连接段由钢材和灌浆料组成, 对于易出现疲劳破坏的剪力键部位, 采用热点应力法进行疲劳寿命预测。

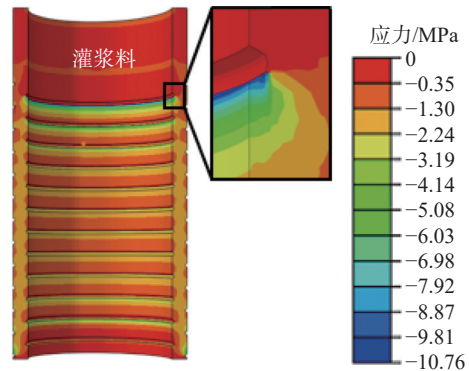


图 8 灌浆料第三主应力应力云图

Fig. 8 Third principal stress nephogram of grouting materials

由于在轴向力作用下, 钢管的最大 Mises 应力位于最下面剪力键的下方焊趾处, 故取该位置处的热点应力。具体为根据距离焊趾 $0.5t$ 、 $1.5t$ 处的应力进行线性外插计算获得, 如图 9 所示。

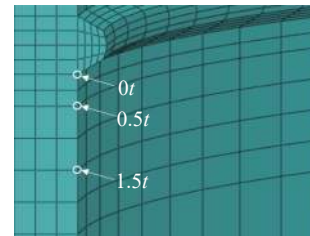


图 9 线性外插计算剪力键焊趾处的热点应力

Fig. 9 Hot spot stress at shear key toe calculated by linear extrapolation

为了实现灌浆连接段钢结构疲劳性能分析, 可以利用 Python 程序提取模型的应力分量; 导入马尔科夫荷载矩阵, 对应力分量进行插值; 然后计算焊接剪力键焊趾处的热点应力; 再通过钢结构的 $S-N$ 曲线求容许荷载循环次数 N_i ; 最后利用线性损伤累积准则求得累积损伤值 D_i 。

轴向荷载的马尔科夫矩阵中共 1 529 个循环荷载, 计算得到的相对较大的 D_i 值以及相应的循环荷载如表 2 所示。

根据累积损伤准则, 将 1 529 个循环荷载下的 D_i 累加, 计算得到累积损伤值 D 为 1.785×10^{-5} 。

3.3 灌浆料疲劳性能评估

灌浆材料最大的第三主应力位于内管第一个剪力键的下方位置处, 可以直接提取该位置处单元的第三主应力, 再利用与 3.2 节类似的方法进行疲劳分析。

在轴向马尔科夫荷载矩阵作用下, 计算得到的相对较大的损伤值 D_i 以及相应的循环荷载如表 3

表2 焊趾处钢结构较大的损伤值 D_i 及相应的循环荷载Tab. 2 Damage value D_i of steel structure at toe and corresponding cyclic load

平均值/MN	应力范围/MN	n_i	N_i	D_i
-5.145	1.715	$6.329 2 \times 10^4$	1.927×10^{11}	3.285×10^{-7}
-5.215	1.995	$2.851 9 \times 10^4$	9.076×10^{10}	3.142×10^{-7}
-5.215	1.855	$3.575 4 \times 10^4$	1.305×10^{11}	2.739×10^{-7}
-5.495	1.785	$3.661 2 \times 10^4$	1.606×10^{11}	2.280×10^{-7}
-5.145	1.785	$3.147 3 \times 10^4$	1.577×10^{11}	1.996×10^{-7}
-4.305	1.365	$1.099 84 \times 10^5$	5.743×10^{11}	1.915×10^{-7}
-5.565	1.715	$3.710 4 \times 10^4$	1.969×10^{11}	1.884×10^{-7}
-5.565	1.925	$1.971 6 \times 10^4$	1.105×10^{11}	1.784×10^{-7}
-5.565	1.855	$2.280 9 \times 10^4$	1.330×10^{11}	1.715×10^{-7}
-5.145	1.925	$1.797 5 \times 10^4$	1.081×10^{11}	1.663×10^{-7}

所示。根据累积损伤准则,将 1 529 个循环荷载下的 D_i 累加,计算得到累积损伤值 D 为 1.71×10^{-10} 。

表3 焊趾处灌浆料较大的损伤值 D_i 及相应的循环荷载Tab. 3 Damage value D_i of grouting materials at toe and corresponding cyclic load

平均值/MN	应力范围/kN	n_i	N_i	D_i
-5.775	35	4.388×10^7	1.156×10^{19}	3.795×10^{-12}
-5.705	35	4.390×10^7	1.188×10^{19}	3.696×10^{-12}
-5.845	35	4.012×10^7	1.126×10^{19}	3.563×10^{-12}
-5.635	35	4.170×10^7	1.220×10^{19}	3.419×10^{-12}
-5.355	35	4.395×10^7	1.338×10^{19}	3.284×10^{-12}
-5.425	35	4.238×10^7	1.308×10^{19}	3.241×10^{-12}
-5.565	35	4.034×10^7	1.248×10^{19}	3.232×10^{-12}
-5.495	35	4.104×10^7	1.278×10^{19}	3.212×10^{-12}
-5.285	35	4.317×10^7	1.370×10^{19}	3.151×10^{-12}
-5.145	35	4.402×10^7	1.435×10^{19}	3.067×10^{-12}

4 结论

本文提出了一种基于马尔科夫矩阵的灌浆连接段疲劳分析方法。通过对灌浆连接段有限元模型分析可知,在轴向荷载作用下,钢结构产生的累积损伤值大于灌浆材料,但均小于 DNV 规范中的限值,说明这两种材料均不会发生疲劳破坏。

参考文献:

- [1] 刘东华,元国凯,陈涛,等.海上风电灌浆连接段疲劳机理研究综述[J].南方能源建设,2016,3(增刊1):68-72. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.015.
LIU D H, YUAN G K, CHEN T, et al. Review on fatigue mechanism of grouted connection in offshore wind farm [J].

Southern Energy Construction, 2016, 3(Supp. 1): 68-72. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.015.

- [2] ČERVENKA, J., ČERVENKA, V., PRYL D. Fatigue assessment of grouted connections from high-strength concrete in offshore wind power plants [C]//Czech Concrete Society. 20th Czech Concrete Day, Hradec Kralove, Nov. 27-28, 2013. Hradec Kralove: Czech Concrete Society, 2013: 1-6.
- [3] International Federation for Structural Concrete. *Fib* model code for concrete structures 2010 [M]. Lausanne: Wiley, 2013. DOI: 10.1002/9783433604090.
- [4] WILKE F. Load bearing behaviour of grouted joints subjected to predominant bending [D]. Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2014.
- [5] SCHAUMANN P, LOCHTE-HOLTGREVEN S. Schädigungsmodell für hybride verbindungen in offshore-windenergieanlagen [J]. *Stahlbau*, 2011, 80(4): 226-232. DOI: 10.1002/stab.201101414.
- [6] LÖHNING T, MURHOLM U. Design of grouted connections in offshore wind turbines [C]//IABSE Conference. Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures, Rotterdam, The Netherlands, May 6-8, 2013. Rotterdam: Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures, 2013: 410-411. DOI: 10.2749/222137813806501821.
- [7] DE JONGE J B. The analysis of load time histories by means of counting methods [R]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory NLR, 1982.
- [8] DNV G L. Support structures for wind turbines: DNVGL-ST-0126 [S]. Norway: DNVGL, 2018.
- [9] 元国凯,汤东升,刘晋超,等.海上风电机组基础灌浆技术应用与发展[J].南方能源建设,2017,4(1):10-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.002.
YUAN G K, TANG D S, LIU J C, et al. Grouting technology application and development in offshore wind farm [J]. *Southern Energy Construction*, 2017, 4(1): 10-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.002.
- [10] CHEN T, WANG X, GU X L, et al. Axial compression tests of grouted connections in jacket and monopile offshore wind turbine structures [J]. *Engineering Structures*, 2019(196): 109330. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109330.

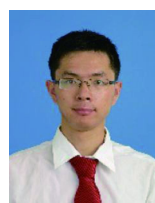
作者简介:



张力

张力(第一作者)

1986-,男,江西南昌人,高级工程师,同济大学结构工程硕士,主要从事水工/海工结构设计及研究工作(e-mail)zhangli@gedi.com.cn。



陈珂

陈珂(通信作者)

1985-,男,湖南衡阳人,高级工程师,结构工程硕士,主要从事水工/海工结构设计及研究工作(email)chenke@gedi.com.cn。

(编辑 李辉)