

基于探地雷达的沥青路面结构内部病害定量化识别研究

许欢

江苏现代工程检测有限公司, 江苏 南京 210049

[摘要] 针对沥青路面结构内部隐性病害采用探地雷达检测时, 通常可以有效的判断结构内部的层间不连续、松散、层间水等问题, 并精确判断发生层位, 但对于病害发展的严重程度无法进行定量化判断识别。本篇文章将结构内部层间不连续及松散状态假设为不同脱空厚度及空隙率的状态, 并通过正演模型进行状态模拟, 建立脱空厚度、空隙率与探地雷达波形信号的关系。结果表明: 当脱空厚度在四分之一波长以下时, 无法根据雷达的回波信号对层间脱空大小进行准确判断, 当脱空厚度在四分之一波长以上时, 回波信号可以准确的判断脱空的厚度大小; 层间孔隙率与回波信号的能量存在较好的相关性, 相关性达到 97%, 且随着层间孔隙率的不断增加, 回波信号的能量增加速度逐渐变慢, 孔隙率的增加对于能量的影响会逐渐减小。并通过现场钻芯取样进行验证, 为探地雷达在沥青路面结构内部隐性病害定量化识别方面提供新思路。

[关键词] 道路工程; 沥青路面; 探地雷达; 定量化识别; 能量谱

DOI: 10.33142/sca.v5i4.6670

中图分类号: U418.6

文献标识码: A

Study on Quantitative Identification of Asphalt Pavement Structure Internal Diseases Based on Ground Penetrating Radar

XU Huan

Jiangsu Modern Engineering Testing Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210049, China

Abstract: When GPR is used to detect the hidden diseases inside the asphalt pavement structure, it can usually effectively judge the problems such as discontinuity, looseness and water between layers inside the structure, and accurately judge the occurrence layer, but it is impossible to quantitatively judge and identify the severity of the disease development. In this paper, the discontinuous and loose state between layers in the structure is assumed to be the state of different void thickness and void ratio, and the state simulation is carried out through the forward model to establish the relationship between void thickness, void ratio and GPR waveform signal. The results show that when the void thickness is below the quarter wavelength, the size of interlayer void cannot be accurately judged according to the radar echo signal. When the void thickness is above the quarter wavelength, the echo signal can accurately judge the size of void thickness; There is a good correlation between the interlayer porosity and the energy of the echo signal, and the correlation reaches 97%. With the continuous increase of the interlayer porosity, the increase speed of the energy of the echo signal gradually slows down, and the influence of the increase of the porosity on the energy will gradually decrease. It is verified by field core drilling sampling, which provides a new idea for the quantitative identification of hidden diseases in asphalt pavement structure by GPR.

Keywords: road engineering; asphalt pavement; ground penetrating radar; quantitative identification; energy spectrum

引言

沥青路面结构通常由沥青面层、基层及底基层组成, 随着行车荷载及环境的综合作用, 各结构层层间由于属于薄弱位置, 会逐渐出现层间不连续、松散等问题, 并不断发展至整个结构及路表。探地雷达是一种利用高频脉冲电磁波来探测介质内部物性分布规律的有效方法, 能够无损、快速的识别路面结构内部隐性病害的状态, 判断隐性病害的类型及位置, 为道路的养护决策提供依据^[1]。但目前的隐性病害识别主要采用经验法, 过于依赖主观判断, 而对于隐性病害的严重程度判断存在局限性^[2-4]。探地雷达采用电磁波运动学特征实现探测目的, 解释方法最常用的是病害图谱对比, 针对发育范围较小的隐性病害只能做定性分析, 判断病害的类型以及层位, 无法准确估算出隐形病害的发育范围^[5-6]。

本文考虑到沥青路面结构内部隐性病害主要发生在

层间, 而层间不连续主要表现为两种病害特点, 一种为层间出现了明显的分层引起脱空, 即层间存在连续的空气层, 而空气层的厚度就是判断病害严重程度的标准; 另一种为层间出现明显的孔洞引起松散, 即层间孔隙率偏大, 而孔隙率的大小也是判断病害严重程度的标准。因此本文需要通过建立雷达正演模型分析探地雷达信号在层间不连续的两种状态中所表现出的特点, 并建立病害严重程度与雷达信号之间的关系, 最终通过现场钻芯取样进行验证, 进一步探索结构内部隐性病害定量化识别方法的可行性。

1 基于层间状况的正演模型分析

1.1 层间状况正演模型建立

根据路面结构内部病害特点, 将正演模型分为两种工况, 一种是模拟层间出现脱空时的雷达回波信号的状况, 另一种是模拟层间没有完全脱空, 但是由于结构层底部孔隙

多引起的层间不连续的状况，正演模型建立具体情况如下。

(1) 层间不同脱空厚度的模型建立

①为了正演不同脱空厚度的雷达回波信号的特点，本文选择了 0.5cm、1cm、1.5cm、2cm、2.5cm、3cm、4cm 及 8cm 的脱空厚度，并假设脱空体内为纯空气状态；②路面结构组成采用面层与半刚性基层的组合结构，上、中、下面层考虑到材料接近因此设置为单层 18cm，基层厚度设置为 18cm；③脱空层位设置在面层与基层之间；④天线频率选择为 1000MHz；⑤各层材料参数设置如表 1 所示：

表 1 模型材料参数一览表

层位	厚度 (cm)	介电常数 ϵ ($^{\circ}2$)	相对磁导率 μ (H/m)	电导率 (S/m)
空气层	5	1	1	0
面层	18	3.7	1	0.0001
脱空层	0.5~8	1	1	0
基层	18	15.2	1	0.0001

表 1 中面层与基层介电常数为通过现场实际测量厚度反算得到的介电常数 (公式 1、公式 2)，脱空层介电常数为空气介电常数：

$$\epsilon = (c/v)^2 \quad (1)$$

$$v = 2 \times (h/t) \quad (2)$$

式中：c——光速， 3×10^8 (m/s)

v——波速，m/ns

h——芯样厚度，面层芯样为 17.9cm，基层芯样为 17.3cm

t——测试时间，面层测试时间为 2.3 (ns)，基层测试时间为 4.5 (ns)

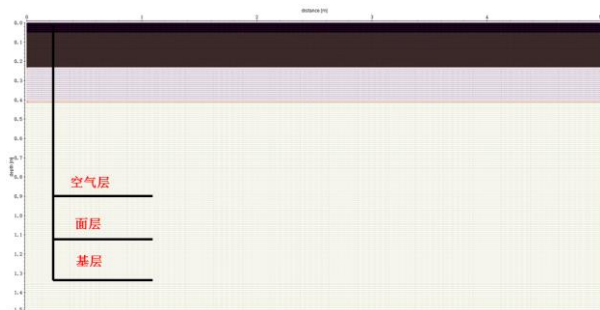


图 1 原始路面结构建模

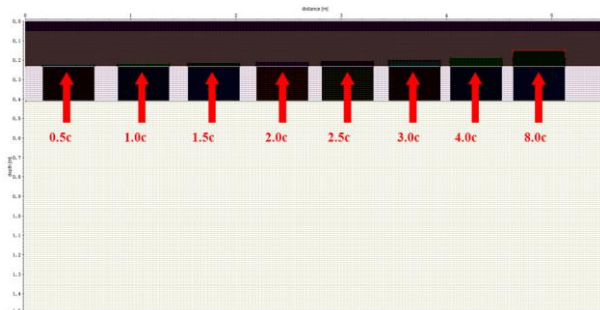


图 2 不同层间脱空厚度建模

通常情况下导体的相对磁导率均为 1 (H/m)；由于面层与基层电导率极低，因此电导率设置为 0.0001 (S/m)，而空气不导电因此为 0 (S/m)。原路面结构模型见图 1，层间不同脱空厚度的模型见图 2。

(2) 层间不同孔隙程度的模型建立

在沥青路面原始结构层模型的基础上建立层间不同密实状况的正演模型，用来模拟层间不连续的复杂状况，主要参数设置如下。

①结构层间除纯粹的脱空外，会出现由于结构层底部孔隙多造成的层间粘结较差、松散等问题，考虑到模型建立过程中无法直观的展示层间粘结不良、松散的状态，且以上状态的介电常数无法准确得到，因此采用结构层底部孔隙率作为关键控制参数来描述层间的状况^[7-8]。层间孔隙率计算公式如下。

$$\sqrt{\epsilon_{ac}} = \theta_s \sqrt{\epsilon_s} + \theta_{as} \sqrt{\epsilon_{as}} + \theta_{air} \sqrt{\epsilon_{air}} \quad (3)$$

式中： ϵ_{ac} 、 ϵ_s 、 ϵ_{as} 、 ϵ_{air} ——分别为沥青混合料、骨料、沥青、空气的介电常数

θ_s 、 θ_{as} 、 θ_{air} ——分别为骨料、沥青、空气的体积比

采用公式 3，以沥青混合料所测介电常数 (见表 2) 作为已知量，分别计算不同孔隙率下的层间介电常数，计算结果见下表。

表 2 不同孔隙率对应的介电常数

孔隙率含量 (%)	介电常数 ϵ ($^{\circ}2$)
5	3.52
10	3.35
20	3.02
30	2.71
50	2.14
80	1.40

②层间孔隙多的厚度均设置为 1cm，层位设置在面层与基层之间，模型建模见图 3。

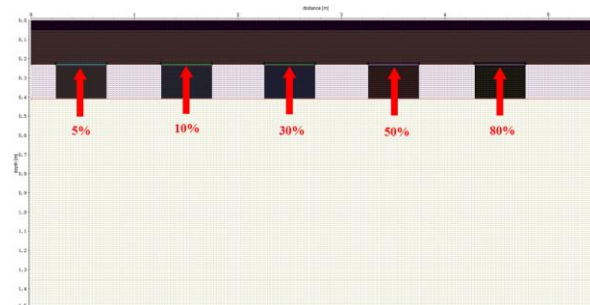


图 3 不同层间孔隙率的建模

1.2 层间不同脱空厚度模型分析

通过图 4、图 5 正演后的雷达灰度图上可以初步看出：

(1) 通过原始路面结构正演模型可知，面层与基层界面的时间深度为 2.97 (ns)；(2) 脱空厚度在 0~3cm 时，

脱空位置的界面在时间深度上基本一致,而当脱空厚度达到 4cm 以上时,脱空界面才出现了明显变化,为了准确分析不同脱空厚度在正演后的精度状况,对 8 种脱空厚度的正演厚度进行计算,计算结果见表 3、图 6。

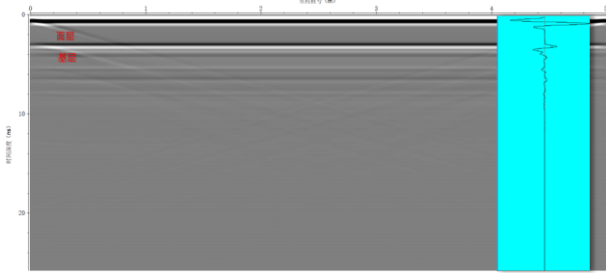


图 4 原始结构层建模后灰度图

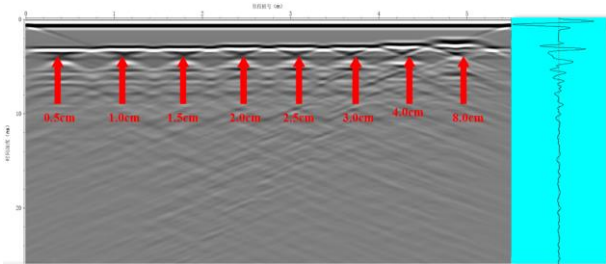


图 5 不同层间脱空厚度建模后灰度图

表 3 不同脱空厚度正演后的实测厚度分析

设定脱空厚度 (cm)	实测脱空时间深度 (ns)	波速 (m/ns)	实测脱空厚度 (cm)
0.5	-0.017	15.6 (面层波速)	-0.1
1	0.037		0.3
1.5	0.048		0.4
2	0.123		1.0
2.5	0.123		1.0
3	0.123		1.0
4	0.499		3.9
8	1.020		8.0

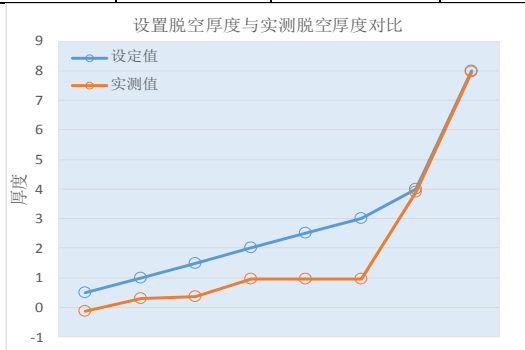


图 6 不同脱空厚度设定值与实测值对比

深入分析表 3 计算结果,当脱空厚度在 4cm 以下时,随着脱空厚度的增加实测值与设定值偏差大,因此无法根据雷达的回波信号对层间脱空大小进行准确判断,当脱空

厚度在 4cm 以上时,回波信号可以准确的判断脱空的厚度大小。出现以上情况的主要原因与选用的天线频率有较大关系,电磁波的最小精度一般为四分之一一个波长,而波长在不同的介质中变化差异较大,根据公式 4 对模型中沥青面层的波长进行计算,1000MHz 频率电磁波在模型中沥青面层的波长为 15.6cm,四分之一波长为 4cm,因此在沥青面层中,当脱空厚度小于 4cm 时,将无法通过回波信号对脱空厚度进行准确判断。

$$\lambda = \frac{v}{\mu} \quad (4)$$

式中: λ —— 波长, m

v —— 波速, 模型中沥青面层的波速为 0.156m/ns

μ —— 频率, 模型中天线频率为 1000MHz

2.3 层间不同密实程度模型分析

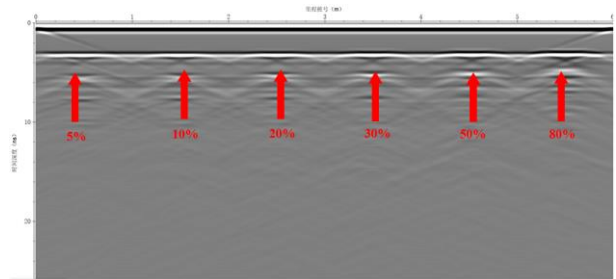


图 7 不同层间孔隙率建模后灰度图

图 7 中为不同层间孔隙率正演后的灰度图状况,仅从图像上无法准确辨别哪一处层间不连续更加严重,但是由于不同孔隙率层间介电常数差异较明显,因此电磁波在这 6 种工况中的界面反射波振幅存在明显的差异,可以根据同一层位不同程度的振幅强度与该层位未出现层间不连续的振幅强度进行对比,分析振幅差异,从而找出不同孔隙率所对应的能量值,计算公式如下所示。

$$e = \left| \frac{(A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n)}{n} - A_0 \right| \quad (5)$$

式中: e —— 能量

A_n —— 存在异常处振幅

A_0 —— 参考振幅

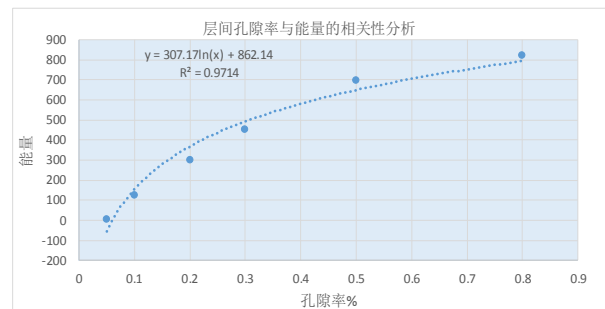


图 8 层间孔隙率与能量的相关性分析

通过图 8 孔隙率与能量的相关性分析可以看出：(1) 层间孔隙率与回波信号的能量存在较好的相关性，相关性达到 97%；(2) 同时随着层间孔隙率的不断增加，回波信号的能量增加速度逐渐变慢，因此孔隙率不断增加后对于能量的影响会逐渐减小；(3) 在进行探地雷达量化指标研究时，可以通过能量与层间孔隙率的关系进行深入分析，从而可以得到实际工程中基于能量的量化指标。

2 基于能量谱特征的量化指标研究

常规情况下，采用探地雷达的灰度图及 A-scan 的特点即可进行病害类型准确分析，但无法对病害本身的严重程度及范围进行量化判断，因此本节通过宁扬高速现场取芯结果结合雷达检测结果进行层间状况与能量的分析，从而得到基于能量的量化指标。本次取芯及探地雷达检测均在宁扬高速公路进行，共选择了 10 个断面的 28 个芯样。

2.1 芯样层间状态与能量谱相关性验证

(1) 面层与基层层间状态与能量相关性验证

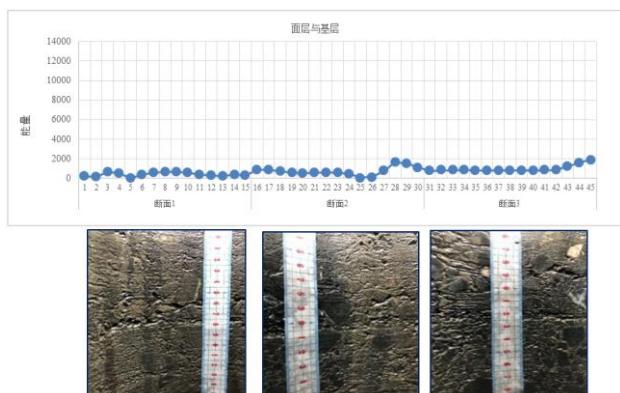


图 9 面层与基层层间状况良好

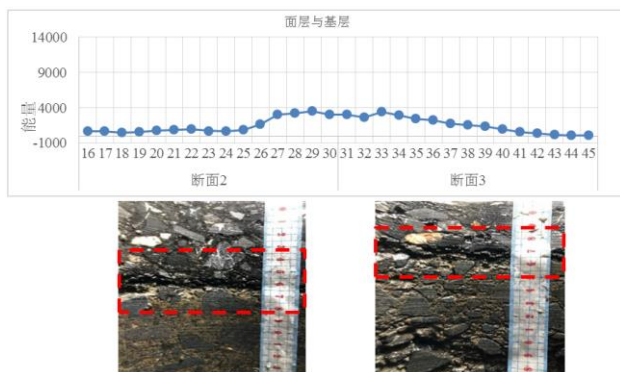


图 10 面层与基层层间不连续

通过图 9 分析可知，面层与基层层间仅存在少量空隙，但整体连续性较好，并未出现明显的缺陷，此时层间能量基本维持在 2000 以下；通过图 10 分析可知，层间存在一定的程度材料离析，从而导致层间的孔隙率偏大、且细集料松散等问题，层间不连续的厚度大约为 0.5cm，而与芯样对应的能量局部位存在 2000~4000 之间波动，因此各断面的层间状况与能量存在较好的对应性。

(2) 基层与基层层间状态与能量相关性验证

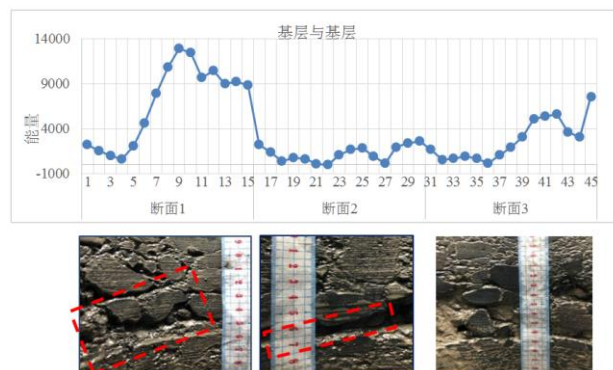


图 11 与基层层间不连续

通过图 11 分析可知：(1) 从电磁波能量谱对比分析可知，断面 1 能量最强，说明层间状况最差，其次是断面 3，断面 2 的层间不连续状况相对较轻；(2) 进一步分析芯样的层间状态，基层与基层层间均存在不同程度的孔隙多的状态，其中断面 1 孔隙最多，其次是断面 3，断面 2 的层间不连续范围最小，与能量谱具有较好的对应性。(3) 同时考虑到取芯过程中因为钻头的旋转振动及取芯用水的冲刷，芯样洞内状态一般会比观测到的状况更好一些。

2.2 实测层间状态与能量谱相关性分析

本文根据上节层间状态与能量谱相关性的验证，初步分析可知，两者之间存在较明显的关联性，即层间孔隙多的程度越重、范围越大，能量谱的能量越强，因此对 10 个断面的 28 个芯样进行了统计分析，分析结果如下。

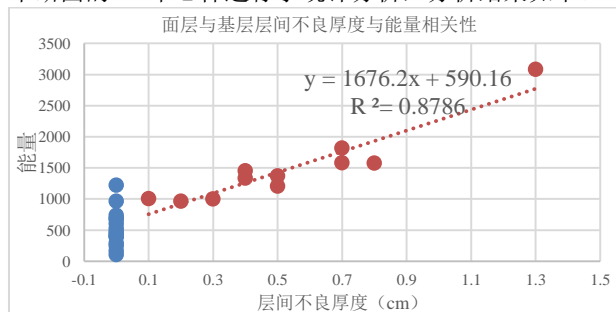


图 12 层与基层层间不连续厚度、能量相关性分析

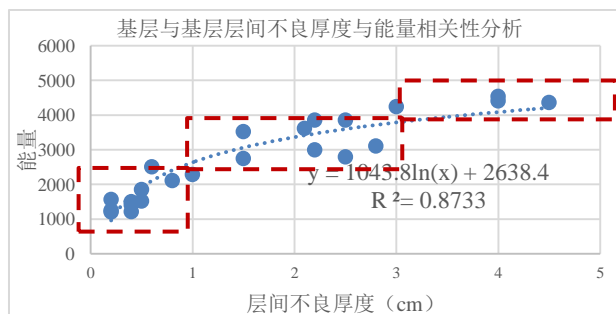


图 13 基层与基层层间不连续厚度、能量相关性分析

通过图 11、图 12 层间不连续厚度与能量相关性分析

可知：(1) 层间不连续的厚度与能量相关性较好，面层与基层的相关性为 87.9%，基层与基层之间为 87.3%；(2) 当面能量小于 1000 时，面层与基层的层间状态良好；(3) 随着层间不连续厚度的增加，层间不连续的状态对能量的影响逐渐减小。

综合以上验证情况，不同能量区间对应了不同层间不连续的厚度，因此提出以下判断标准。由于目前受到建立分级标准的样本数量的限制，后期需要进一步增加样本数量，从而对层间不连续的严重程度的划分标准进行优化。

表 4 层间不连续严重程度分级标准

严重程度	能量	层间不连续厚度 (cm)
良好	≤1000	0
轻	(1000, 2600]	(, 1]
中	(2600, 4000]	(1, 3]
重	>4000	>3

3 结论

本文通过探索沥青路面结构内部层间隐性病害与能量之间的相关性得出以下结论：

(1) 通过对沥青路面结构内部隐性病害特点，建立了层间不连续中，不同脱空厚度及不同孔隙率的雷达正演模型，形成了一种有效的沥青路面结构内部隐性病害正演模型建模方法；

(2) 本文通过模型正演的理论分析，得到了能量与沥青路面结构内部隐性病害严重程度之间的相关性，层间孔隙率与回波信号的能量存在较好的相关性，相关性达到 97%；同时通过现场钻芯取样进一步验证了能量指标在实

际工程中与层间不连续的严重程度存在较好的相关性，相关性为 87%。因此本文提出的采用能量指标进行隐性病害定量化识别均有较高的可行性，后期需要进一步收集现场验证数据完善模型，提高识别精度。

【参考文献】

[1] 张浩浩. 路基病害探地雷达信号识别技术研究[D]. 江苏: 中国矿业大学, 2019.

[2] 李才明. 基于小波能谱分析的岩溶区探地雷达目标识别[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1499-1504.

[3] 左杰. 基于数据子空间的探地雷达图像岩体结构分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(7): 64-68.

[4] 李华. 鲁光银. 何现启, 等. 探地雷达的发展历程及其前景探讨[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1492-1502.

[5] 彭湘桂. 探地雷达在北京市城市道路无损检测中的应用[J]. 市政技术, 2010, 28(5): 29-32.

[6] 黄平云, 石刚. 探地雷达技术在道路检测中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(12): 55-58.

[7] 于景兰, 王春和. 探地雷达探测地下目标时的波速估计[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 477-480.

[8] 王子彬, 蔡迎春, 郭成超. 路面雷达在沥青路面密度和压实度检测中的试验研究[J]. 中南公路工程, 2006, 31(4): 96-101.

作者简介: 许欢(1993.10-)男, 毕业院校: 淮阴工学院; 所学专业: 土木工程, 当前就职单位: 江苏现代工程检测有限公司, 目前职称: 助理工程师