

强夯振动监测应用分析

褚宏宪¹, 史慧杰^{1,2}

(1. 青岛海洋地质工程勘察院, 山东 青岛 266071; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266003)

摘要:结合强夯振动监测的应用实例,阐述了强夯振动监测的原理方法和成果分析过程,以及强夯振动监测应注意的问题。对强夯施工引起的地面振动进行同步监测分析,可给出强夯振动影响的地震烈度评价、振动主频、振动速度参数和振动安全距离。

关键词:瑞雷波 强夯 振动速度 监测 衰减 频谱分析;

中图分类号: P631.4; TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2005)01-0088-05

强夯法,又称动力固结法,是1969年法国 Menard 技术公司首创的一种地基加固方法,是我国目前最为常用和最经济的深层地基处理方法之一^[1]。这种方法是将夯锤(一般为100~400 kN)从高处自由落下(落距一般为6~40 m)对地基以冲击和振动,使土中出现冲击波和冲击应力,迫使土体孔隙压缩,土体局部液化,在夯击点周围产生裂隙,形成良好的排水通道,孔隙水和气体逸出,使土粒重新排列,经时效压密达到固结,从而提高地基承载力,降低其压缩性。高能级的强夯瞬间冲击能量的释放不仅向地层深度方向传播,而且其振动能量沿地面向远处传播,对周围环境造成较大地震效应。强夯振动监测应用主要是监测不同能量的夯击引起地面振动随距离的衰减情况,对强夯震动的影响范围进行评价,为强夯施工提供合理的设计参数。

1 监测任务的提出

青岛北船重工海西湾造修船基地为填海造陆区,拟采用强夯法处理地基。根据回填土厚度的不同,强夯加固区分为2 000、6 000、8 000 kN·m 强夯能级区。8 000 kN·m 强夯能级处理区域距厂房和办公楼较近,厂房内有吊车和吊车道轨,抗震设防烈度为6度。为防止高能级强夯震动对厂房和办公楼造成破坏影响及确定强夯施工设计参数,先期进行强夯能级为8 000、6 000 kN·m 试夯区试验,进行同步夯间振动监测。其内容为测试对A、B和C区强夯区8 000、6 000、3 000、2 000 kN·m 能级强夯引起的地面振动随距离的衰减情况,强夯振动对周围环境的不利影响范围进行评价。

2 振动监测设计

2.1 监测方法原理

夯击振动产生的地震波分为体波和面波,体波分为纵波和横波,主要沿地层深度方向传播,面波主要沿地表传播。夯击震动对周围地物环境的影响主要以地面振动为主,以夯点为圆心,地面能量向远处传播并衰减,因此,地表振动强夯能量监测点的布置应在夯点与受影响建筑物之间由近到远沿直线排列。监测时,在距夯点不同距离的地面上布置检波器,采用仪器记录地表处振动波形曲线,通过对振动曲线分析解释,总结强夯引起地表处振动的规律。

2.2 强夯工艺

8 000 kN·m 能级试夯区强夯分4遍进行,第1、2遍为点夯,夯击能为8 000 kN·m,夯点间距10 m,呈正方形布置。第3遍点夯,夯击能为3 000 kN·m,夯点间距10 m,呈正方形布置。夯点的收锤标准以最后2击的平均夯沉量小于10 cm控制。最后1遍为1 000 kN·m 能级满夯1遍,夯锤底面积搭接1/3。

2.3 观测方法

8 000 kN·m 能级强夯试夯区监测点采用固定监测点、移动夯点的方式。振动监测系统如图1所示:从强夯区域东侧以5 m间隔由近及远至60 m布设12个监测点,前12个点位布置12个 $f_0=4$ Hz垂直速度检波器,第13个监测点位于66 m处在厂房西道轨上,布置CDJ-S2C三维检波器1个,用于重点观测强夯施工振动对厂房的垂直、水平(东西、南北)3个方向上的影响。监测时间在强夯的第1~3

遍单点夯击过程中,监测仪器采用 24 道 SE2404 综合工程探测仪,同时记录不同距离处 13 个监测点的 15 道振动数据。

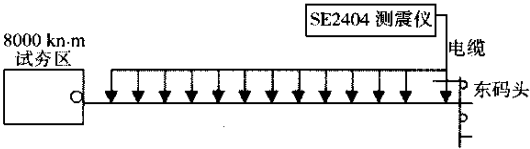


图1 振动监测系统示意

2.4 仪器标定与试验

工作前,对主机计算机、采样率、道间一致性、道间隔离度、噪声检测进行自检,对检波器的灵敏度进行了标定,中心频率 $f_0=4\text{ Hz}$,垂直速度检波器灵敏度为 $0.25\text{ V}/(\text{cm}\cdot\text{s})$,CDJ-S2C 三维检波器灵敏度为 $2.0\text{ V}/(\text{cm}\cdot\text{s})$ 。进行强夯施工现场采集试验,确定采集参数。

3 资料处理过程

图 2 显示的观测结果为 8 000 kN·m 强夯能级 6 号夯点第 1 遍第 9 击不同距离处 12 道振动波形曲线,距夯点起点为 23 m,以 5 m 间距共 12 道。

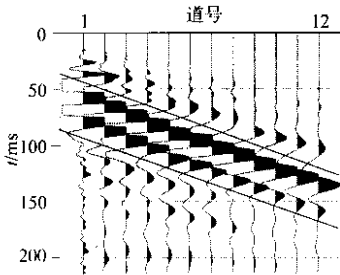


图2 实测振动波形曲线

振动测试资料处理采用波速和频谱分析法,室内调用数据,回放振动实测曲线,对所采集的信号进行积分变换和微分变换,确定每道的振动最大位移 d 、最大振动速度值 v_{max} 和最大加速度值 A ,选取时间段对每道数据进行频谱分析,确定强夯振动的主频。依据垂向 v_{max} 进行地震烈度评价,绘制每个夯击时 v_{max} 与距离的关系曲线,对强夯的震动效应随距离的衰减进行评价。

4 振动监测成果

4.1 振动监测数据统计

根据 8 000、3 000、6 000 和 2 000 kN·m 强夯能级典型测点的垂向的 d 、 v_{max} 、 A_{max} 和振动的主频 f ,以及对应的地震烈度,统计各夯点各击测试结果见表 1、2。 v_{max} 与夯击遍数的关系曲线见图 3,各能级各击数典型夯点距离的衰减关系曲线见图 4。

表 1 8 000 kN·m 第 1 遍 6 号夯点第 1 击测试结果

夯点位/m	$A/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{\text{max}}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	d/cm	f/Hz	烈度/级
23	310.66	3.6531	0.082173	5.37	6
28	142.84	1.5587	0.021413	5.13	5
33	114.25	1.1781	0.023609	6.59	4
38	72.457	1.088	0.02672	6.1	4
43	63.937	0.68685	0.016654	5.86	3
48	63.506	0.5463	0.017935	5.62	3
53	49.474	0.40611	0.0096997	5.37	3
58	41.467	0.32192	0.0023792	6.84	2
63	28.966	0.23902	7.3206E-4	6.84	2
68	31.35	0.23481	9.1507E-4	5.37	2
73	23.497	0.20479	5.4904E-4	5.13	2
78	27.435	0.18997	1.8301E-4	4.88	1
84	12.456	0.10924	1.0521E-4	3.98	1

表 2 8 000 kN·m 第 1 遍 6 号夯点第 2 击测试结果

夯点位/m	$A/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{\text{max}}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	d/cm	f/Hz	烈度/级
23	463.3	6.5872	0.13049	7.81	>6
28	289.68	4.2639	0.065336	7.32	>6
33	206.74	2.4513	0.055636	6.59	6
38	138.71	2.4255	0.057832	6.1	6
43	138.25	2.335	0.060029	5.86	6
48	117.17	1.3971	0.026354	5.86	4
53	91.011	0.98956	0.017935	5.86	4
58	88.726	0.64988	0.012811	6.35	3
63	74.174	0.48224	0.010066	5.86	3
68	73.631	0.48242	0.0067715	5.13	3
73	73.948	0.43795	0.0065885	5.13	3
78	70.075	0.43283	0.0058564	5.13	3
84	15.518	0.29603	0.0011873	3.91	2

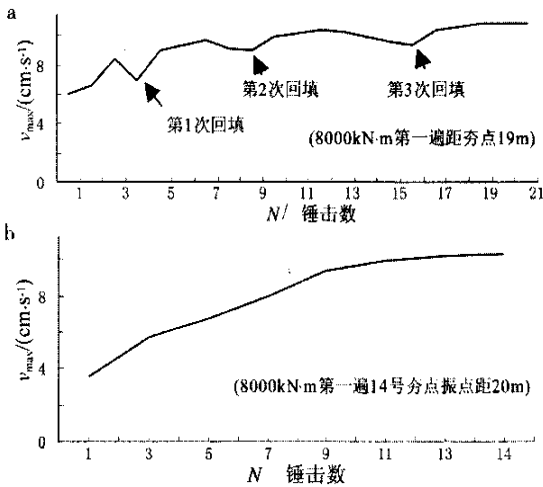


图3 v_{max} 与锤击数关系曲线

4.2 强夯有效击数的确定

强夯有效击数是指夯锤夯沉量达到规范要求时的击数。常规强夯试验,统计观测夯沉量的变化,绘制夯沉量与锤击数关系曲线,由此确定强夯的夯击锤数,通过强夯振动监测,我们利用 v_{max} 与锤击数关系对强夯有效击数进行评价。从图 3 中可以看出,随着锤击数的增加, v_{max} 不断提高,回填土后,第 1 击 v_{max} 略有下降,继续夯击则 v_{max} 逐渐提高,曲线逐渐趋于水平。

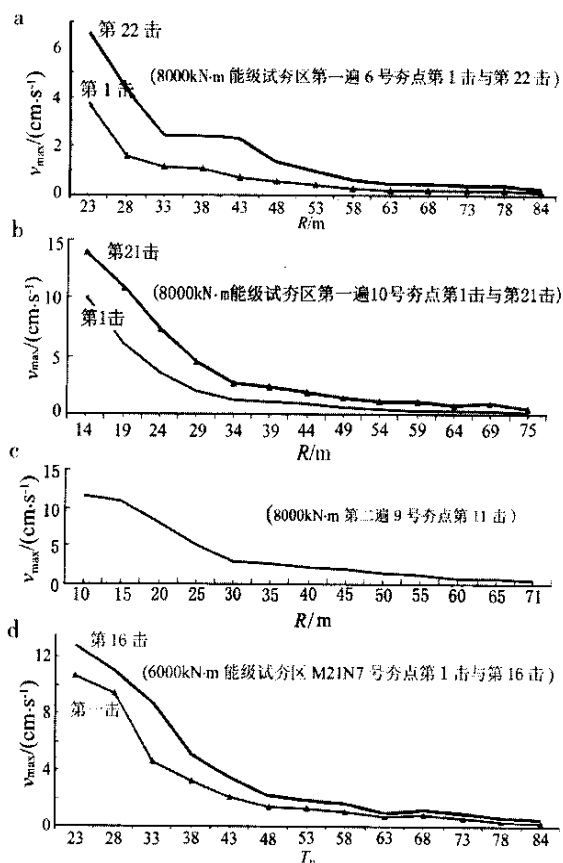


图4 $v_{\max}$ 与传播距离 T_u 关系曲线

这反映了土体的压缩挤密过程, $v_{\max}$ 与土体密实程度呈正相关关系。首先填土在夯击前是松散的, 第1击挤密的幅度是最明显的, 以后各击由于土体密实度提高, 抵抗外力的能力加大, 同一夯击能下变形逐渐减弱, 直至土体强度趋于稳定, 不再随锤击数变化。此时的夯击能几乎都消耗在土体振动上, $v_{\max}$ 最高, 但振动速度增加较缓或不增加, 在 $v_{\max}$ 与击数曲线上趋于水平, 对应水平段的锤击数为强夯有效击数。此时强夯的地震效应最强, 对周边的建筑物破坏力最大。此时即使增加锤击数, 对土体的挤密效果甚微或不经济。

强夯有效击数还与填土质量和下覆淤泥层有关。本次8 000 kN·m能级第1遍夯监测夯点的强夯击数范围为14~22击。各夯点击数离散性大, 当夯点下存在巨石或大块石时, 夯沉量小, 但 $v_{\max}$ 较大, 最大振速提高值偏大, 表现为振速异常。按夯沉量控制已达到质量控制要求, 但实际未达到加固要求, 因强夯时大石块的存在屏蔽了下部地层, 造成下部地层加固效果差。如8 000 kN·m能级第1遍14号夯点强夯击数为14击, 按夯沉量控制已满足质量要求, 但振速最大值和提高幅度比其它夯点偏大, 该点的动力触探结果也表明下部加固效果差。因此, 只用最后2击的平均夯沉量来控制强夯质量是不够完善的, 尤其在填

土不均、场地土均匀性不好的工程, 如只按夯沉量控制, 易造成满足质量要求的假像, 而强夯竣工质量检验往往不合格。所以强夯有效夯击数的确定不能只用夯沉量控制, 应结合振动速度分析, 全面有效确定强夯施工参数。

4.3 最大振速提高值的变化规律

松散土体和密实土体的振动速度是不一样的, 可用强夯施工引起的土体振动速度的变化值, 对强夯的效果进行评价。下面分析举例。

根据图4a, 在距夯点23~45 m范围内, 最大振速增值幅度为80.5%~239.1%, 平均增幅144.4%。根据图4b, 8 000 kN·m能级第1遍夯振点距19 m处第1、22击的振速最大值提高幅度为81.7%, 14号夯振点距20 m处第1、14击的振速最大值提高幅度为191%, 10号夯振点距23 m处第1、22击的振速最大值提高幅度80.5%。经统计分析推断, 8 000 kN·m能级强夯第1遍夯振点距20 m处最后1击与第1击的垂直最大振速提高值应大于80.0%, 且距20 m处最后1击的垂直最大振速值应大于10 cm/s, 因此固定振点距的地面垂直最大振动速度值和提高幅度数据, 与控制最后2击夯沉量一样, 可作为评价强夯施工效果的一个重要指标。用地基土的振动参数指标对强夯施工质量检验是可行的。

4.4 强夯震动影响评价

地面振动速度的大小反映了振动的能量, 利用不同能级 $v_{\max}$ 在传播距离上的变化曲线, 可评价强夯震动对周围地物的影响。从图4可以看出, $v_{\max}$ 在距离的变化上明显分为2段, 近处表现为直线陡降段, 远处为近于水平的直线, 说明强夯振动在传播过程中近处衰减较快。 $v_{\max}$ 反映了振动能量的强弱, 可用不同距离地面振动 $v_{\max}$ 的降低幅度来表示强夯振动能量的衰减。8 000 kN·m能级强夯监测结果的统计分析表明, 由强夯引起的 $v_{\max}$ 在距夯点10~45 m内降低幅度为70%~86%, 在距夯点45~80 m远处降低幅度为20%~50%。从同一夯点第1击与最后1击的 $v_{\max}$ 与传播距离相关曲线可以看出, 第1击曲线形状较缓, 最后1击近处曲线形状较陡, 即同一夯点近处振速最大值增幅随击数增加表现出逐渐增大趋势, 而远处最大值增幅随击数增加变化较小或不明显。这说明强夯震动影响主要在近处, 强夯能级越大, 强夯震动影响的半径也越大, 强夯震动的影响距离与强夯能级呈正相关关系。

4.5 强夯震动的安全距离分析

强夯施工对周边地物产生地震效应, 地面振动速度的大小反映了强夯施工震动的影响程度, 可依据规

范文件用垂向最大振动速度值进行地震烈度对比评价^[2]。知道了周边地物的抗震设防烈度与对应的振动速度值,根据最大振速与传播距离曲线可确定强夯施工振动安全距离。通过对强夯施工振动的头 3 遍夯的同步监测,从中找出最后 1 击的 $v_{\max}$ 的最大值,用此值进行地震烈度评价,可客观地评价强夯震动影响程度。按抗震设防烈度 6 度计算,强夯 8 000 kN·m 能级加固区第 1 遍强夯点和建筑物的最小安全距离为 40 m,8 000 kN·m 能级第 2 遍强夯点和建筑物的最小安全距离为 45 m,第 3 遍 3 000 kN·m 能级强夯在第 1 遍夯和第 2 遍夯后进行,在土体已被挤密的基础上强夯,因此,强夯震动影响效应较大,夯击遍数越多,影响半径越大。所以,8 000 kN·m 能级加固区强夯点和建筑物的最小安全距离为 45 m,3 000 kN·m 的最小安全距离为 36 m,2 000 kN·m 的最小安全距离为 18 m。

4.6 强夯振动的频率分析

强夯所产生的振动的主振频率是影响建筑物的一个重要参数。夯击引起的质点振动是一个脉冲振动过程,是由多种不同频率、相位和振幅的简谐振动叠加而成,主振频率是指振动频谱中振幅最大的谐波分量的频率。频谱分析的目的也是避开建筑物固有频率,以免发生共振。经频谱分析,各夯击能的强夯振动的主频见表 3。

表 3 强夯振动主频					Hz
强夯能级 kN·m	8000	6000	3000	2000	
范围	3.91 ~ 11.72	6.03 ~ 12.45	4.51 ~ 9.28	8.06 ~ 20.26	
均值	6.51	8.99	7.12	13.23	

从上表看出,强夯产生振动的主振频率较低,在同一夯点上,前几击由于土体处于夯实挤密过程中主振频率更低,随夯实击数的增加,主振频率增大。同一夯点同一击不同距离处的主振频率不同,表现为近处频率高,远处频率低。通过频谱分析可以看出,4 个强夯能级的主频均小于 25 Hz,强夯震动产生的地震波以低频瑞雷面波对周边地物振动影响最大,但普通民房的固有频率为 2 ~ 3 Hz,一般不易发生共振破坏。

4.7 厂房固有的振动频率分析

当振动的主振频率接近周边地物的自振频率时,可能产生共振破坏。厂房及西道轨固有振动频率测试点于夜间进行观测,采集记录时间内无机械、车辆、人员等震动干扰,共完成 3 个测点(表 4)。东码头及西道轨垂向固有振动频率为 10.38 ~ 12.57 Hz,东西向水平固有振动频率为 4.03 ~ 4.27 Hz,南北向水平固有振动频率为 4.27 ~ 4.88 Hz。

表 4 厂房与西道轨固有振动频率测试点测试结果				
测点号	方向	$A/(cm \cdot s^{-1})$	$v_{\max}/(cm \cdot s^{-1})$	自振频率/Hz
1	垂直向	0.37694	0.0029053	10.99
	东西向	0.74224	0.0057192	4.27
	南北向	0.69232	0.00334	4.88
2	垂直向	0.28342	0.0033858	10.38
	东西向	0.77852	0.004644	4.03
	南北向	0.51418	0.0032256	4.27
3	垂直向	0.12907	0.0018988	12.57
	东西向	0.74763	0.0033629	4.27
	南北向	0.47332	0.0020818	4.39

4.8 厂房强夯振动影响评价

厂房及西道轨距 8 000 kN·m 强夯试夯区 65 m,按抗震设防烈度 6 度考虑,东码头及西道轨处于强夯震动安全区域内,大于 45 m 的强夯点与建筑物最小距离的要求。分析东码头及西道轨地表垂直、水平(东西、南北)3 个方向上的最大加速度、最大振动速度、最大位移、振动主频等,得出强夯震动对厂房及西道轨的影响,垂直向振动最大位移为 0.17 mm,振动主频为 3.66 ~ 3.91 Hz,东西向振动最大位移为 0.42 mm,振动主频为 3.42 ~ 4.15 Hz,南北向振动最大位移为 0.09 mm,振动主频为 4.39 ~ 9.52 Hz,主要以东西水平向的振动为主,东西向水平振动最大位移为 0.42 mm。东码头及西道轨固有振动频率与强夯的主振频率不同,但较接近,因强夯在厂房产生的主振频率振幅较小,且处于最小安全距离以外,距强夯边约 65 m,大于 45 m 的强夯点与建筑物最小距离的要求,可不考虑共振影响破坏。强夯施工震动影响程度在现有建筑的安全允许范围之内。

5 强夯振动监测成果应用总结

- (1) 强夯试验时不但要进行夯沉量监测,还应进行振动监测,用最大振动速度的变化来确定强夯参数是非常有效的,尤其是强夯有效击数的确定。振动监测可以为工程抗震和隔震设计提供最大振动加速度、最大振动速度、最大振动位移、震动主频等地基土振动参数特性。
- (2) 应对监测仪器、检波器的灵敏度、道一致性等进行标定,对软件功能进行测试,保证监测数据的可靠性。
- (3) 强夯施工过程应进行同步振动监测,可用最大振动速度和最大振动位移的变化对比分析评价强夯施工效果,对其深入研究可作为评价强夯施工质量的一项技术指标。
- (4) 强夯施工产生的地震效应在传播过程中,其振动能量的衰减随距离变化存在陡降拐点,这对有效掌握强夯地震效应具有指导意义,强夯夯击能大,地

震效应影响大,强夯施工遍数多,地震效应影响远,夯击能、夯击遍数均与震动影响程度呈正相关关系。

(5)强夯震动产生的地震波以低频面波对周边地物振动影响最大,地震波沿地表在传播距离上产生垂直向和水平向振动分量,其中水平振动速度最大,振动位移也最大,所以强夯产生的地震效应以水平向振动分量为最大。

(6)强夯振动监测应设计为系统监测,不能只监测个别点,不同的施工遍数均要监测,尤其是强夯的最后一击更应监测,利用其中最大振动速度值或振幅值进行震动影响评价。

(7)强夯振动监测的成果分析,应根据项目的具体要求,与建筑场地类型、周边地物抗震设防等级、回填料种类级配、场地土均匀性和强夯施工工艺等有关,并注意与其他强夯施工监测方法相结合,进行全面系统的评价。

参考文献：

[1] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[S]. 北京 中国建筑出版社,1992.
[2] 于亚伦,刘殿中. 爆破安全规程 GB6722 - 2003 [S]. 北京 中国标准出版社. 2003.

AN ANALYSIS OF TAMPER VIBRATION MONITORING APPLICATION

CHU Hong-xian¹, SHI Hui-jie^{1,2}

(1. China University of Oceanography, Qingdao 266003, China ;2. Institute of Oceanographic Geology, MLR, Qingdao 266071, China)

Abstract : Using the synchronous monitoring analysis of tamper vibration, we can obtain seismic intensity evaluation affected by tamper vibration, basic frequency and maximum velocity parameters. With a practical example of tamper vibration monitoring, this paper has analyzed the vibration monitoring result and the contents of practical application.

Key words : tamper ;vibration ;monitoring ;Rayleigh wave ;vibration velocity ;reduction ;curve of frequency distribution

作者简介：褚宏宪(1973 -)，男，山东枣庄人，助理研究员，1996年毕业于东北农业大学水利与建筑工程专业，2004年获中国海洋大学环境工程专业工程硕士学位，主要从事岩土工程研究与工程物探研究，公开发表学术论文数篇。

上接 87 页

THE APPLICATION OF GEOPHYSICAL TECHNIQUE TO
SUPERVISING CONTROLLED BLAST IN A TUNNEL

ZHONG Shi-Hang

(China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract : In the construction of Ningbo Bridge, Zhaobaoshan highway tunnels were designed as twin tunnels with large span and excessively small interval of 4 m, only 1/7-1/10 of ordinance in the norm. A series of measures should be adopted for the safety of tunnels. One of the crucial measures is the protection of the rock mass between the two tunnels, which includes the utilization of controlled blast to protect rock mass. The author used such techniques as sonic wave measurement, Landsonar method and vibration velocity measurement to measure the depth and condition of rock mass under blasting. In addition, the displacement, the strain and the pressure of the tunnels and the shotcreting or the lining were also measured to inspect the safety of the tunnels. With the help of the measuring data, the construction plan, construction procedures and blasting parameters were determined. The engineering is successful and the economic benefits are obvious.

Key words : tunnel ;supervision ;controlled blast ;geophysical technique ;mountain ;static correction ;stack

作者简介：钟世航(1940 -)，男，研究员，1962年毕业于北京地质学院地球物理勘探系，后在铁道部科学研究院从事工程与环境地球物理的研究和勘察及工程检测的实践，70年代中又涉足隧道及地下工程的理论、设计、施工工艺和技术、施工地质及质量检测 and 文物保护及考古方面。2000年6月后并到北方交通大学中国铁路工程总公司隧道及地下工程试验研究中心，并自成立钟世航工作室，公开发表学术论文数篇。