

DOI: 10.7672/sjgs2025070097

倾角传感器在三轴搅拌桩垂直度控制中的应用*

刘 杰^{1,2,3}, 马 超^{1,2,3}, 姚兆龙^{1,2,3}, 周腾龙⁴

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业
重点实验室, 湖北 武汉 430040; 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心,
湖北 武汉 430040; 4. 中国葛洲坝集团市政工程有限公司, 湖北 宜昌 443002)

[摘要] 针对目前三轴搅拌桩施工垂直度无法有效监测和控制的问题, 依托张靖皋长江大桥南航道桥南锚碇基础地下连续墙槽壁加固试验段工程, 通过在三轴搅拌桩机上安装倾角传感器, 并对应用情况及监测数据进行总结和分析。研究结果如下: 倾角传感器的应用能够实现对成桩垂直度的有效监测和控制; 施工中导向架仅在钻头入土、叶片穿过护筒和反向提升时存在短暂的较大晃动, 其他阶段垂直度满足要求; 导向架垂直度保证率曲线呈现增长速率先增大后减小的趋势, 曲线上升并逐渐收敛至 100%; 典型首开幅、正常时间间隔两侧套接中间幅和超长时间间隔单侧套接幅施工时导向架垂直度 1/250 的保证率分别为 89.09%, 97.70% 和 81.68%; 三轴搅拌桩施工中优先考虑跳打方式, 搭接施工间隔时间应控制在 24h 以内。

[关键词] 桥梁工程; 基础; 三轴搅拌桩; 倾角传感器; 垂直度; 监测

[中图分类号] TU472.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0097-05

Application of Tilt Angle Sensor in Verticality Control of Three-axis Mixing Piles

LIU Jie^{1,2,3}, MA Chao^{1,2,3}, YAO Zhaolong^{1,2,3}, ZHOU Tenglong⁴

(1. CCCC Second Harbour Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China; 4. China Gezhouba Group Municipal Engineering Co., Ltd., Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Aiming at the problem that the verticality of three-axis mixing pile construction cannot be effectively monitored and controlled, based on the testing section of underground continuous wall reinforcement of the South Anchorage Foundation of the Zhangjingao Yangtze River Bridge, a tilt sensor is installed on the three-axis mixing pile machine, and the application and monitoring data are summarized and analyzed. The research results are as follows that the application of the inclination sensor can effectively monitor and control the verticality of the pile. During the construction, the guide frame only has a brief yet large shaking when the bit is buried, the blade passes through the casing, and during the reverse lifting. While the verticality in the other stages basically meets requirement. The verticality assurance rate curve of the guide frame shows a trend of increasing before decreasing, and the curve rises and gradually converges to 100%. The guarantee rates of the guide frame for typical initial opening span, normal intervals with double-side overlap, and ultra-long intervals with single-side overlap are 89.09%, 97.70% and 81.68%, respectively. In the construction of a three-axis mixing pile, the method of jump-hitting is preferred, and the interval time of lapping construction should be controlled within 24hours when using a single-side squeezing method.

Keywords: bridges; foundations; three-axis mixing pile; tilt angle sensor; verticality; monitoring

* 交通运输行业重点科技项目(2022-ZD4-060)

[作者简介] 刘 杰, 工程师, 硕士, E-mail: 1035616643@qq.com

[收稿日期] 2024-11-01

0 引言

三轴搅拌桩工艺以其施工速度快、成桩效果好、造价低廉等优点而被广泛应用于围护结构、止水帷幕、坝体防渗、软基处理和槽壁加固等领域^[1-4]。

三轴搅拌桩施工过程中,准确地控制搅拌桩的垂直度对于保障工程质量和安全具有至关重要的作用。以往三轴搅拌桩研究主要集中在本构特性^[5-7]、施工工艺^[8-9]和质量检测^[10]等方面,而在设备信息化施工尤其是垂直度监测及控制等方面的研究相对较少。现场一般采用铅锤法对搅拌桩机导向架垂直度进行简单测量,但该方法存在测量结果不准确、测量结果无法量化和无法实时监测等问题。

本文依托张靖皋长江大桥南航道桥南锚碇地下连续墙槽壁加固试验段工程,创新性地 在桩机导向架上加装倾角传感器,对各桩施工全过程导向架倾角进行了监测,以某典型桩为例对导向架垂直度监测时程结果进行分析,并对典型首开幅、正常时间间隔两侧套接中间幅和超长时间间隔单侧套接幅施工全过程导向架垂直度保证率进行分析,旨在为三轴搅拌桩施工质量控制提供一定参考和启示。

1 工程概况

1.1 项目概况

张靖皋长江大桥南航道桥南锚碇基础位于张家港,邻近长江及长江南大堤(距离最近点约 47.6m)。周围沟渠分布较多,地表水体较发育。锚碇区域位置原状为农田和菜地,施工前已进行场地平整,地表标高+2.200m。工程周边环境如图 1 所示。



图 1 周边环境
Fig. 1 Surrounding environment

南锚碇基础采用双回字形支护结构复合地下连续墙形式,基础顺桥向长 110m,横桥向宽 75m,厚 1.5m。顶板高程+1.000m,外围双层地下连续墙深 83m,双层墙净间距 4.3m。南锚碇基础结构如图 2

所示。

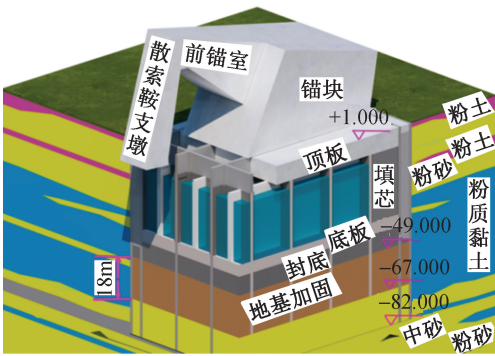


图 2 南锚碇基础结构
Fig. 2 Foundation structure of south anchorage

1.2 地质条件

1) 水文地质

场地位于长江流域,地形平坦,水力坡度小,地表水系主要为长江及田间沟塘,水文条件相对复杂,受上游及潮汐影响较大。

潜水含水层接受大气降水与田间沟塘水补给,潜水含水层主要岩性为粉砂。勘察期间测得钻孔稳定水位埋深低潮时 1.560m,高潮时 1.010m。场区潜水、承压水含水层与长江通过侧向径流存在水力联系。

2) 工程地质

地质勘察报告显示,槽壁加固深度范围主要分布有①₄种植土、松散②粉砂、稍密③粉砂和中密④粉砂,软塑状⑤粉质黏土,均为饱和状态,标贯击数 8~18 击。地层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 地层物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil formation

地层名称	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力 c/kPa	内摩 擦角 φ/ (°)	标贯 击数/ 击	渗透 系数/ (cm·s ⁻¹)
① ₄ 种植土	18.9	17.3	13.7	—	4.91×10 ⁻⁶
②粉砂	19.1	7.0	31.3	8	2.49×10 ⁻³
② ₁ 淤泥质粉 质黏土	17.9	19.5	12.0	2	5.11×10 ⁻⁷
② ₁₋₁ 淤泥	16.0	—	—	2	—
③粉土	19.0	8.7	27.0	6	1.88×10 ⁻⁵
③粉砂	19.0	7.2	31.5	12	1.02×10 ⁻³
③ ₁ 粉土	18.8	12.5	31.7	10	9.10×10 ⁻⁴
③ ₂ 粉质黏土	18.2	15.3	9.5	7	3.60×10 ⁻⁷
④粉砂	18.8	5.5	32.6	18	1.58×10 ⁻³
④ ₂ 粉质黏土	18.1	21.1	13.7	8	2.46×10 ⁻⁶
⑤粉质黏土	17.9	17.5	16.0	14	2.26×10 ⁻⁶

2 槽壁加固设计

本工程地下连续墙成槽深度达 85m,为保证槽壁

稳定,需对砂层范围内地层进行槽壁加固。槽壁加固采用三轴搅拌桩工艺($\phi 850@600$),共计 1 830 幅,其中槽壁加固 A 区 1 670 幅,设计标高为-18.800~1.200m,即导墙底以下加固深度 20m;槽壁加固 B 区(十字形槽段阳角加强区) 160 幅,设计标高为-28.800~1.200m,即导墙底以下加固深度 30m。施工采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,桩体 28d 无侧限抗压强度 $\geq 0.8\text{MPa}$,水泥掺量建议值取 20%。搅拌桩中心偏位 $\leq 50\text{mm}$ 、导向架垂直度偏差 $\leq 1/250$ 墙深。

为验证三轴搅拌桩施工工艺及施工参数,在地下连续墙试验段进行了试桩,试验段槽壁加固共计 37 幅,其中槽壁加固 A 区 29 幅,槽壁加固 B 区 8 幅,各区加固标高与主体段一致。采用两搅两喷方式施工,桩机施工顺序上采用跳打方式,搭接方式为套接一孔。试验段槽壁加固平面布置如图 3 所示,试桩参数如表 2 所示。

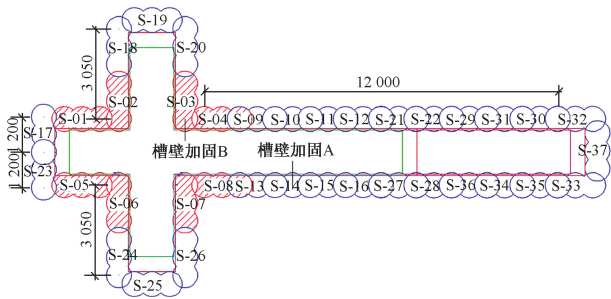


图 3 试验段槽壁加固桩位平面布置

Fig. 3 Layout of trench wall reinforcement pile location in test section of slurry wall

表 2 试桩参数

Table 2 Test pile parameters

序号	项目	参数
1	水泥掺量	20%
2	水灰比	1.2
3	单泵流量	145L/min
4	气体压力	0.6MPa
5	泵浆压力	1.5~2.5MPa
6	下沉速度	0.9m/min
7	提升速度	1.56m/min

3 倾角传感器的应用

GB 51004—2015《建筑地基基础工程施工规范》和 JGJ/T 199—2010《型钢水泥土搅拌墙技术规程》要求立柱导向架的垂直度不应大于 1/250。现场一般是在桩架上焊接一半径为 4cm 的铁圈,10m 高处悬挂一铅锤,利用经纬仪校直钻杆垂直度,使铅锤正好通过铁圈中心,每次施工前必须适当调节钻杆,使铅锤位于铁圈内,即把导向架垂直度误差控制在 1/250 以内。该种方式存在如下缺陷:首先

铅锤易受风力影响,测量结果不准确;其次该种方式无数数据量化和记录,无法实现质量问题追溯;另外桩机司机在驾驶室内也无法实时掌握导向架垂直度,无法实时干预和校正。

为加强对三轴搅拌桩垂直度的控制,在导向架上加装倾角传感器,在驾驶室加装显示终端,通过倾角传感器测量结果实时反映导向架垂直度。

3.1 设备配置

1) 三轴搅拌桩机

综合成桩深度、地层特性、施工效率及成墙精度等因素,本工程选用 JB160B 型成桩设备。桩机设备参数如表 3 所示。

表 3 桩机设备参数

Table 3 Equipment parameters of three-axis mixing pile machine

序号	项目	参数
1	打桩架型号	JB160B
2	钻杆直径	273mm
3	立柱筒体直径	0.92m
4	立柱角度调整范围	$\pm 1.5^\circ$
5	斜撑油缸行程	2.8m
6	桩架功率	45kW
7	动力头功率	110×3kW
8	接地比压	$\leq 0.1\text{MPa}$
9	桩架质量	130t

2) 倾角传感器

倾角传感器型号为 BWS5700,是一款采用 MEMS 技术、数字输出的双轴高精度倾角传感器。传感器内部采用高分辨力差分分数模转换器,内置自动补偿和滤波算法,最大程度减小了环境变化引起的误差。传感器把静态重力场的变化转换成倾角变化,通过数字方式直接输出当前的横滚角和俯仰角。传感器参数如表 4 所示。

表 4 倾角传感器参数

Table 4 Tilt sensor parameters

序号	项目	参数
1	产品型号	BWS5700
2	精度	0.001°
3	分辨率	0.000 5°
4	测量轴	x,y 轴
5	测量范围	$\pm 15^\circ$
6	工作温度	-40℃~+85℃
7	抗振性能	>2 000g
8	零点温度漂移	$\pm 0.000 3^\circ/\text{℃}$

3.2 仪器安装、标定及使用

3.2.1 仪器安装

1) 将倾角传感器安装在导向架底部侧面,应尽量保证传感器安装面与导向架安装面平行,传感器

盒面上的 x/y 轴线与桩机平面轴线垂直及平行。安装必须牢固以防止振动移位。

2) 显示屏摆放在驾驶室操作台上,内置传感器配套软件并具有存储及导出功能,采用专用屏蔽线缆将传感器与显示屏连接好。

3.2.2 仪器标定

倾角传感器出厂前设置有绝对零点,为了消除现场安装误差,应将导向架调竖直后进行相对零点的标定,标定步骤如下。

- 1) 桩机停放在平坦的场地内(坡度 $\leq 1.5^\circ$)。
- 2) 在桩机前方 60~80m 位置架设全站仪,对导向架垂直度进行测量。根据测量结果通过点动桩机斜撑油缸调整导向架垂直度,通过数次测量、调整,使导向架处于竖直状态,以垂直度 $\leq 1/1\,000$ 为宜。
- 3) 以导向架此时的状态为基准,对倾角传感器设置相对零点并保存。后续施工将以该初始值为基准进行导向架垂直度的监测。

3.2.3 仪器使用

- 1) 将 $\pm 0.191^\circ$ (对应 1/300 垂直度)设置为预警值,将 $\pm 0.229^\circ$ (对应 1/250 垂直度)设置为报警值。
- 2) 每次移动桩位后、下钻前,桩机司机根据屏显倾角数值点动桩机斜撑油缸调整导向架垂直度,使倾角数值绝对值不大于 0.191° 。
- 3) 搅拌桩施工过程中,当数值大于设置的预警值时会蜂鸣提示,需及时点动桩机斜撑油缸对导向架姿态进行调整,保证导向架倾角不超过设计要求,从而实现三轴搅拌桩垂直度的全过程高精度控制。
- 4) 施工完成后可将相应施工时间段内倾角传感器监测数据导出及分析。

3.3 监测数据分析

3.3.1 成桩全过程垂直度分析

桩体施工完成后将倾角传感器监测数据导出分析。以 S11 号桩为例,对施工全过程倾角传感器监测数据进行分析,导向架倾角时程监测数据如图 4 所示。

根据施工流程及图像形状,1 个成桩周期可分为 5 个阶段:调平→调平后待下钻→下钻至桩底→提升至桩顶→桩机移位。

钻头开始入土时导向架晃动,钻头入土后导向架倾角波动正常,均在报警值范围内;钻杆叶片完全下入护筒后又有晃动,之后下钻到桩底标高期间导向架倾角波动正常,基本均在报警值范围内;钻杆提升时导向架晃动,之后提钻到桩顶标高期间导向架倾角波动正常,基本均在报警值范围内,但期间个别数值较大。钻机移位至下一桩位期间导向

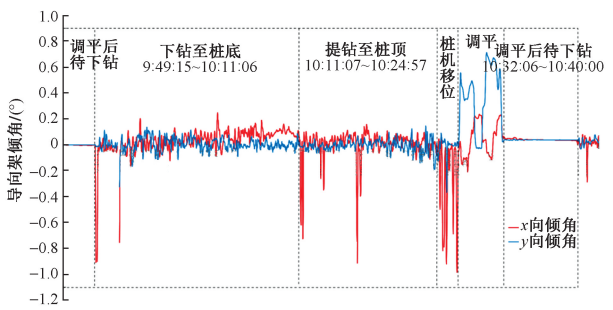


图 4 S11 号桩施工全过程导向架倾角监测时程

Fig. 4 Time history of monitoring the inclination angle of the guide frame during the entire construction process of pile S11

架晃动(历时 2min25s);桩机移位完成后进行调平,通过调节左右两根斜撑油缸伸缩量确保导向架初始垂直度,使 x,y 倾角绝对值不大于 0.191° (即垂直度 1/300),调节过程中 x,y 值发生明显变化(历时 4min41s)。调平完成后等待下钻,随后继续进行下一根桩施工。

3.3.2 垂直度保证率分析

S10,S12 号桩为首开幅,S11 号桩为中间的套接幅,S11 号桩开始施工时其两侧的 S10,S12 号桩已施工完成了 15h 和 1h。S22 号桩为单侧套接幅,S22 号桩开始施工时与之套接的 S21 号桩已施工完成了 5d5h。以 S10(首开幅)、S11(正常时间间隔两侧套接中间幅)和 S22 号桩(超长时间间隔单侧套接幅)3 根典型桩为例,对施工全过程导向架倾角监测数据进行分析。

倾角传感器每秒采集 1 组数据,S10,S11 和 S22 号桩从下钻破土到提钻出土分别采集了 2 291 组、2 131 组和 5 717 组有效数据。以垂直度为横坐标、垂直度保证率(即满足相应垂直度的频率)为纵坐标,绘制 S10,S11 号和 S22 号桩施工全过程导向架垂直度保证率曲线,如图 5 所示。

由图 5 可知,S10,S11 号和 S22 号桩图形都先是增长速率不断加快,反弯点之后增长速率不断减慢并逐渐收敛至 100%。3 根典型桩施工过程中,导向架垂直度 1/250 的保证率分别为 89.09%,97.70%和 81.68%。

S11 号桩导向架垂直度保证率基本最高,因为为该桩位两侧套接桩,两侧桩已施工完毕(分别早于该桩 15h 和 1h),两侧桩体强度还较弱,只有中间钻杆需要钻入原状土层,钻杆受力较小,故垂直度保证率基本最高。S22 号桩导向架垂直度保证率基本最低,因为该桩为单侧套接桩,且该桩施工时与之套接的桩已施工完毕 5d5h,桩体早已终凝,S22

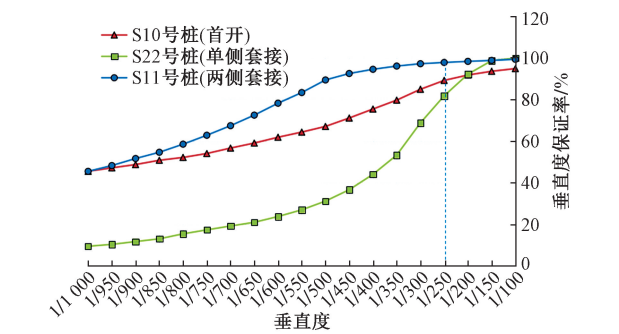


图 5 S10,S11 和 S22 号桩施工全过程导向架垂直度保证率

Fig.5 Guarantee rate of verticality of guide frame during the entire construction process of piles S10, S11and S22

号桩成桩过程中钻杆及钻机会产生较大抖动,故垂直度保证率基本最低。S10 号桩导向架垂直度保证率基本介于两者之间,原状土强度介于未凝固桩体和终凝桩体,钻杆受力也介于两者之间,故垂直度保证率基本介于两者之间。

为保证成桩垂直度,搅拌桩施工顺序尽量选择跳打方式,特殊情况时再选择单侧挤压方式;搭接施工的间隔时间不宜大于 24h,当超过 24h 时,钻杆会产生较大抖动,搭接施工时应放慢成桩速度。

4 结语

本文以张靖皋长江大桥南航道桥南锚碇基础地下连续墙槽壁加固试验段工程为背景,在桩机导向架上加装倾角传感器,并对倾角监测数据进行分析,主要得到以下结论。

- 1)在导向架上安装倾角传感器可以实现对成桩垂直度的有效控制。
- 2)导向架仅主要在钻头开始入土时、叶片穿过护筒时和反向提升时会发生短暂较大晃动,其他成桩过程中导向架倾角垂直度满足 $\leq 1/250$ 的要求。
- 3)三轴搅拌桩施工全过程中导向架垂直度保证率曲线先是增长速率不断加快,反弯点之后增长速率不断减慢,并逐渐收敛至 100%。
- 4)典型首开幅、正常时间间隔两侧套接中间幅和超长时间间隔单侧套接幅施工时,导向架垂直度 1/250 的保证率分别为 89.09%,97.70%和 81.68%。
- 5)三轴搅拌桩施工顺序尽量选择跳打方式,特殊情况时再选择单侧挤压方式,搭接施工的间隔时间不宜大于 24h。

参考文献:

[1] 李焕容,时晓晨,段崇宝,等. 高压旋喷桩与三轴搅拌桩组合加固杂填土地基监测数据分析[J]. 施工技术(中英文), 2022,51(1):54-57.

LI H R, SHI X C, DUAN C B, et al. Monitoring data analysis of

combination of high-pressure jet-grouting piles and triaxial mixing piles to strengthen miscellaneous soil foundation [J]. Construction technology, 2022, 51(1): 54-57.

[2] 郭文学,惠海鹏,陈芋如,等. 提高盾构隧道进出洞端头土体加固质量的技术研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(7): 6-10,22.

GUO W X, HUI H P, CHEN Y R, et al. Technical study on improving the quality of soil reinforcement at the entrance and exit ends of shield tunnels[J]. China harbour engineering, 2022, 42(7): 6-10,22.

[3] 张磊,陈强,李强,等. 三轴水泥搅拌桩在深层地基防渗中的应用[J]. 施工技术,2020,49(23):102-106.

ZHANG L, CHEN Q, LI Q, et al. Application of tri-axis cement mixing pile in anti-seepage construction of deep foundation[J]. Construction technology 2020, 49(23): 102-106.

[4] 孙威,赵晓光,高文生,等. 某核电站核岛厂房地基处理方案分析[J]. 建筑结构,2022,52(8):135-139,79.

SUN W, ZHAO X G, GAO W S, et al. Analysis of the ground treatment scheme for the nuclear island plant of a nuclear power station[J]. Building structure, 2022, 52(8): 135-139,79.

[5] 黄天荣. 多种支护结构并用的深大基坑工程设计与分析[J]. 中国港湾建设,2020,40(6):9-13,46.

HUANG T R. Design and analysis of deep and large foundation pit engineering with multiple supporting structures[J]. China harbour engineering, 2020,40(6): 9-13,46.

[6] 张玉伟,宋战平,翁效林,等. 黄土地铁隧道湿陷性基底地基处治优化模型试验[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(9): 1912-1920.

ZHANG Y W, SONG Z P, WENG X L, et al. Model test on treatment of collapsible loess foundation of metro tunnels[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(9): 1912-1920.

[7] 赵殿鹏,潘国华,张权,等. 船闸基坑施工对临近在建桥梁的影响及变形控制方法研究[J]. 公路,2022,67(2):76-82.

ZHAO D P, PAN G H, ZHANG Q, et al. Influence of ship lock foundation pit construction on adjacent bridges and deformation control methods[J]. Highway, 2022, 67(2): 76-82.

[8] 曹浪,杜文,孟小伟,等. 广州地区深厚淤泥质软土地层三轴搅拌桩施工工艺研究[J]. 施工技术,2020,49(13):65-68.

CAO L, DU W, MENG X W, et al. Research on construction technology of triaxial mixed piles in deep mucky soft soils layer in Guangzhou area[J]. Construction technology, 2020, 49(13): 65-68.

[9] 高宗立,黄贵,王维,等. 广西文化艺术中心三轴搅拌桩施工技术[J]. 施工技术,2019,48(1):53-55.

GAO Z L, HUANG G, WANG W, et al. Construction technology of three axis mixing pile in Guangxi culture and art center[J]. Construction technology, 2019, 48(1): 53-55.

[10] 梁志荣,李忠诚,刘江,等. 三轴水泥土搅拌桩强度分析及试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(S2):1562-1567.

LIANG Z R, LI Z C, LIU J, et al. Strength tests on soil-cement mixed piles by triaxial stirring machine[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2009,5(S2):1562-1567.