

圆柱形钢管柱及预制柱垂直度控制测量技术研究与应用

张瑞康 牛瑞强 张光辉

中国建筑第二工程局有限公司

DOI:10.12238/ems.v7i9.15221

[摘要] 本文系统研究了圆柱形钢管柱及预制柱垂直度高精度测量技术，新研究了圆柱形钢管柱及预制柱垂直度测量方法（母线垂直度法），分析了全站仪三维坐标法、测量标记圆柱形钢管柱及预制柱母线垂直度法及实时监测自动调垂系统等核心方法的技术原理与适用场景。工程案例表明，先进测量技术可使垂直度偏差控制在 1/1000 以内，满足严苛工程要求。研究结果对提升桩基施工质量与工程安全具有重要指导意义。

[关键词] 圆柱形钢管柱及预制柱；垂直度测量；免棱镜全站仪；圆柱形钢管柱及预制柱垂直度；实时监测；圆形柱母线垂直度法

1 引言

圆柱形钢管柱及预制柱作为基础工程的核心承重构件，其垂直度偏差直接影响结构安全。根据现行规范《钢管混凝土结构技术规范》(GB50936-2014) 中表 9.5.3 的要求及设计图纸的垂直度要求需 $\leq 1/1000$ （即偏差 $\leq 1\%$ ）。传统“水平尺法”因缺乏严密数学模型支撑和“经纬仪扫边法”估读偏差不够精确，测量结果仅能作为施工参考，难以满足高精度需求。近年来，随着智能化测量技术的发展，高精度垂直度检测方法在算法优化、实时监测和自动调控等方面取得显著突破。本文结合前沿研究成果与工程实践，系统阐述圆柱形钢管柱及预制柱垂直度高精度测量技术体系，为工程应用提供理论依据与方法参考。

2 工程概况

2.1 西丽综合交通枢纽是深圳市南山区科技创新轴的重要链接点，东西长约 2300m、南北宽约 590m，面积 $1.36 \times \text{km}^2$ ，是深圳市西部、城市规划的“前海中心”腹部。

2.2 西丽综合交通枢纽一标桩基：钢管柱管内填充混凝土采用 C60 自密实混凝土。盖挖逆作法竖向支承构件中的钢管柱采用桩基形式，一柱一桩，钢管混凝土柱桩基础桩基进入中、微风化岩

3 圆柱体垂直度测量原理

垂直度表征桩体轴线相对于铅垂线的偏离程度，其数学定义为：

$$p = \Delta L / H \times 1000\%$$

式中： ΔL 为桩顶与桩底圆心水平投影偏移量 (mm)， H 为桩体高度 (mm)。

4 现代圆柱体垂直度测量方法分析：

4.1 圆心拟合法：

(1) 原理：

通过全站仪采集钢管柱顶部/底部圆周上多个点的三维坐标，利用最小二乘法拟合出圆心位置，通过对比顶部与底部圆心的偏移量计算垂直度。

(2) 优点：

精度高

通过多点拟合圆心，可有效消除钢管局部变形或椭圆度的影响，理论精度可达 $\pm 1 \sim 3 \text{mm}$ （依赖仪器和点数）。

数据全面

可同时获取柱顶位移、扭转角等参数，适用于高精度控制（如超高层、异形柱）。

受环境干扰小

无需直接接触柱体，适合高空、狭窄空间作业。

(3) 缺点：

操作复杂

- 需采集多个点（通常 ≥ 6 点），测量和计算耗时较长。

依赖设备与软件

- 需高精度全站仪和专业数据处理软件（如 BIM 模型配合），成本较高。

对测量点要求高

- 若钢管柱表面锈蚀或附着物多，可能影响测点精度。

4.2 经纬仪扫边法：

(1) 原理：

将经纬仪架设在柱体附近，瞄准柱底部边缘一点，然后

抬升望远镜扫描柱顶边缘，通过上下边缘的偏移量计算垂直度（需配合钢尺或激光测距）。

优点：

操作简单快捷

传统成熟方法，工人易掌握，单方向测量仅需 1~2 分钟。

成本低

仅需普通光学经纬仪（或电子经纬仪），无需复杂数据处理。

直观性强

可直接观察柱体边缘偏差，适合现场快速校核。

缺点：

精度有限

受人为瞄准误差、柱体椭圆度、大气折射等影响，精度通常±3~5mm（对圆形柱较差）。

单方向局限

一次只能测量一个方向的垂直度，需旋转仪器 90° 测量另一方向。

环境要求高

需通视条件良好，振动、强光或大风天气影响测量。

无法消除截面变形影响

若钢管不圆或局部凹陷，边缘点不能代表真实圆心位置。

4.3 母线垂直度法：

原理：本文研究讲述圆柱母线测量法，即将圆心拟合法过程转移到吊装前测出圆柱母线并标记，在吊装时测量圆柱母线任两点三维坐标即可得出垂直度偏差，本方法适用于钢管桩和混凝预制桩

优点：将圆心拟合法测量计算繁琐过程转移至吊装前，安装时只需要测量母线任两点三维坐标即可计算得出实时垂直度，即利用圆心拟合法的精度高、数据全面、受环境干扰小，又避免了操作复杂影响施工进度

5. 本文研究母线垂直度法方法及技术特征

该方法利用钢管柱的标准圆形特性，通过两端截面圆拟合计算圆心轴线标记圆柱母线，测量母线垂直度得到相应钢管柱垂直度：

（5.1、5.2、5.3 在吊装前完成，5.4、5.5、5.6 在安装时完成）

5.1. 数据采集：在两端截面各测取 8 点坐标

5.2. 圆心轴线：使用计算器圆心拟合法计算出两端点圆心坐标 01、02，01、02 建立圆心轴线 L1（图 1）

5.3

（1）标记母线：用免棱镜全站仪在圆形柱两端测设出到圆心轴线 L1 相同高差或偏距的两点做标记，两点连直线即为圆形柱母线 L2 并做明显标记（例：弹墨线）（图 1）

（2）圆柱体异形复核：标记出两条大概 90° 夹角的母线，测量每条母线任意一点均与圆心轴线高差偏距相等，即得出圆形柱无变形，反之得到相对应方向的变形量

5.4. 垂直度测量：钢管柱吊装后，柱底精确定位，用免棱镜全站仪测量 L2 底部三维坐标 X1、Y1、Z1，L2 顶部三维坐标 X2、Y2、Z2（图 2）

5.5. 垂直度计算：偏移量 $\Delta x=X2-X1$ 、 $\Delta y=Y2-Y1$ 、 $\Delta h=Z2-Z1$ ，计算垂直度 $P_x=\Delta x/\Delta h$ 、 $P_y=\Delta y/\Delta h$

5.6. 垂直度调整：固定钢管柱底部，通过计算的偏移量 Δx 、 Δy 调整钢管柱上部对应方向偏差，重复 5.5 计算垂直度 p，调整至垂直度 $p<1\%$

全站仪精度要求：测角精度 $\leq 1''$ ，测距精度 $\leq 2\text{ mm}+2\text{ ppm}$

技术优势：

- 精度达 Δx 、 $\Delta y \pm 4\text{ mm}$ ，H 越大，p 越小；
- 算法可编程化，适配自动化监测系统。

工程价值：

- 避免高空作业，测量效率提升 50%以上；
- 精度达 $\pm 4\text{ mm}$ （桩高 H10 m 时垂直度 $p \leq 0.4\%$ ）。

6 实时监测自动调垂系统

逆作法施工中，液压全自动调垂系统实现“测量-反馈-调控”一体化：

- 监测系统：激光倾斜仪实时采集 X/Y 双向偏角，精度 1/2000；
- 执行机构：四组同步千斤顶抵靠桩身，通过推杆位移纠偏；
- 控制逻辑：PLC 根据偏角信号控制千斤顶伸缩量，形成闭环控制。

自动调垂系统与传统方法性能对比

指标	液压自动调垂系统	传统导向架法
调垂精度	$\leq 1/800$	$\leq 1/300$
施工效率（根/天）	2	0.5
设备高度	2.5 m	5.0 m
安全性	远程操作，风险低	人工高空作业

7 典型工程应用案例分析

7.1 深圳市西丽综合交通枢纽站钢管桩垂直度测量

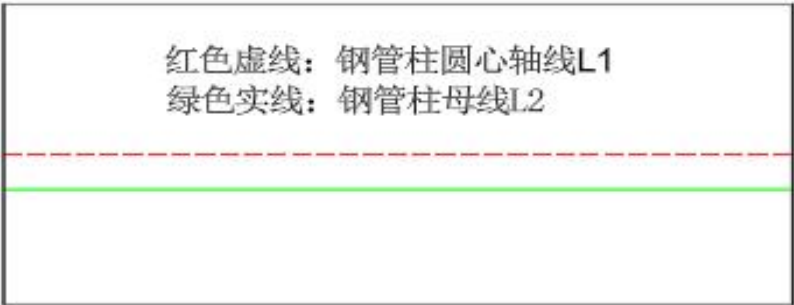
在深圳市西丽综合交通枢纽站施工中，传统经纬仪观测法受人员观测圆柱体侧边误差显著。于是采用圆形柱母线垂直度法：

- 利用母线上下两点三维坐标，通过勾股定理计算倾斜角；
- 开发专用算法软件，集成至打桩控制系统；

- 结果验证：母线法值 0.36‰与圆心拟合值 0.34‰偏差仅 0.2‰，满足施工要求垂直度 $p \leq 1\%$ 。

8. 总结

本文研究讲解的圆形柱施工控制垂直度测量方法，亦可以在后期圆形柱位移变形和垂直度监测时使用，可做到精度高、数据全面、受环境干扰小。



钢管柱侧面图

图 1



钢管柱竖向侧面图

图 2

[参考文献]

[1]韩庆祝,对改进一柱一桩垂直度的探讨[J]. 资源环境与工程, 2006 (5): 28-29

[2]廖秋林,张玉东,曾志献,逆作法钢管混凝土立柱垂直度控制系统设计和应用[J]. 岩土工程界,2009(5):78-120.

[3]康 忠,张斌,谢飞,等,导向法固定架在一桩一柱施工中的应用[J]. 江苏建筑, 2012 (S1): 80-81.

[4]王志坚,逆作法一柱一桩实时监测自动调垂技术的应用, 山西建筑, 1009-6825 (2013) 13-0083-03