

数据拟合在海洋工程结构测量中的应用

夏嘉辉

北斗智云(天津)科技有限公司, 天津 300192

[摘要] 数据拟合是基于一系列数据点构造一个最适合的曲线(面)或数学函数的过程。在工程中, 根据一组测量点进行图形拟合是非常必要的。文中通过实例, 介绍了数据拟合在海洋工程结构测量中的应用, 并通过相关的案例分析, 阐述了数据拟合相对于其他测量方法的优越性。

[关键词] 数据拟合; 图形拟合; 结构测量

DOI: 10.33142/sca.v5i4.6720

中图分类号: P258

文献标识码: A

Application of Data Fitting in Offshore Engineering Structure Measurement

XIA Jiahui

Beidou Zhiyun (Tianjin) Technology Co., Ltd., Tianjin, 300192, China

Abstract: Data fitting is a process of constructing a most suitable curve (surface) or mathematical function based on a series of data points. In engineering, it is very necessary to fit the graph according to a group of measurement points. This paper introduces the application of data fitting in offshore engineering structure measurement through examples, and expounds the superiority of data fitting over other measurement methods through relevant case analysis.

Keywords: data fitting; graph fitting; structural measurement

1 介绍

在海洋工程结构测量中, 应用数据拟合的目的是: 根据测量点, 拟合规则的几何图形, 通过推导出的图形特征, 评估结构建造的尺寸精度, 或进行结构的精确定位与定向。根据结构的轮廓特征, 所拟合的图形通常包括: 平面、圆、圆柱及圆锥四种。期望推导出的图形特征, 包括: 平面的法线向量、圆心、圆柱(锥)的轴线向量等。

需要拟合的原因是: 由于测量误差的存在, 根据观测数据直接解算结构的几何要素, 精度不可靠, 通过拟合可以提高精度。其次, 在结构建造阶段, 可能会出现建造偏差超差, 在后续的组装或安装施工测量中, 通过拟合, 会在一定程度上降低建造偏差的影响。

2 几何形位公差

海洋工程结构建造通常分为两个阶段: 预制与组对阶段、组装阶段。这两个阶段, 都需要设置相应的几何形位公差, 来控制杆件或结构的形状与位置特征。在预制与组对阶段, 需要控制的特征主要包括: 直线度 (Straightness)、平面度 (Flatness)、圆度 (Circularity)、圆柱度 (Cylindricity) 以及同心(轴)度 (Concentricity) 等。在组装过程中, 需要控制的特征包括: 垂直度 (Perpendicularity) 以及位置度 (Position)。其中, 垂直度 (Perpendicularity) 主要是通过控制柱体的垂直度 (Verticality) 和平面的水平度 (Levelness) 来实现的。

结构建造过程中, 为了提高检验精度, 拟合被广泛应

用于测量数据处理中, 以便获得最优解算精度, 有效地将各项建造偏差控制在指定的公差要求范围内。

3 应用

下面为数据拟合在海洋工程结构测量中的几个应用实例, 测量采用的仪器为徕卡 TS15 全站仪, 数据拟合采用由美国 New River Kinematics 公司开发的 SpatialAnalyzer (SA) 工业测量软件。

3.1 圆拟合实例

假设有一条 20 寸的空间管线已经组对完成(图 1a), 要求对两段直管 AB 与 CD 的夹角进行焊前检验。

本实例采用圆拟合法, 作业模式为: ①在每段直管段靠近两端点处, 利用模具分别画出两个垂直于管线轴线的圆, 圆要尽量垂直轴线, 否则解算出来的圆心偏差会较大; ②在每个圆的圆周上, 大致均匀地标记出 5 个点; ③通过自由设站(后方交会)的方式, 测出每个圆上所标记的 5 个点的坐标; ④将测量数据导入 SpatialAnalyzer 软件, 根据测量点拟合出每个圆, 软件自动标注出各自的圆心; ⑤根据圆心定出每段直管的轴线, 并进行角度标注(图 1b)。每个圆上需要 5 个测点的原因如下:

首先, 进行圆拟合的目的是, 确定圆心的三维坐标 $C(X_c, Y_c, Z_c)$ 与半径 R 的最佳估值, 这就涉及了解算 4 个未知参数的问题。圆的空间曲线是由球面与过球心的平面相交所形成的, 二者的方程如下所示:

$$\text{球面方程: } (X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2 + (Z_i - Z_c)^2 = R^2 \quad (1)$$

式中, X_i, Y_i, Z_i 为测量点坐标值。

平面方程: $AX_c+BY_c+CZ_c+D=0$ (2)

式中, A、B、C、D 由空间三个向量共面的充分必要条件解算。

根据最小二乘法建立法方程时, 每个测量点贡献一个观测方程, 为了解算出 4 个未知参数的最佳估值, 至少需要 5 个测量点, 才能产生多余观测。

其次, 圆周上的 5 个点, 会部分稀释管径在制作阶段产生的局部圆度偏差。实践表明, 测点在每个圆上分布得越广, 拟合结果就越接近真实。如果测点的分布只涵盖了一段劣弧, 拟合结果将会失真。测点超过 5 个, 对拟合精度没有实质的促进作用。

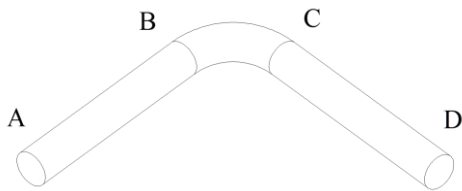


图 1 a 组对完成的管线示意图

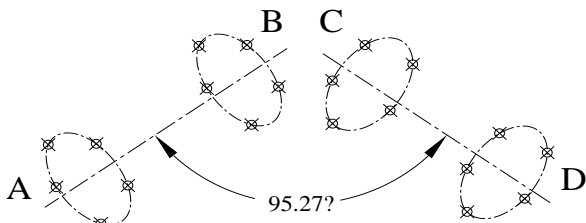


图 1 b 测点分布示意图

圆拟合法通常用来测定外径较小的柱体间距、夹角、交点坐标、垂直度、同心(轴)度等。

3.2 圆柱拟合实例

假设一根单桩由两节直径为 4 米的圆柱构成(图 2a), 在组对完成后, 需要对整体的同心(轴)度进行焊前检验。

本实例采用圆柱拟合法, 作业模式为: ①在每节柱体两端靠近端面处, 分别选定两个测量截面, 如果单个柱体较长, 中间可以内插截面; ②通过自由设站(后方交会)的方式, 在每个测量截面上分别测量 5 个点, 每节共测量 10 个点; 每节柱体的测点总数不能少于 8 个(图 2b); ③将测量数据导入 SpatialAnalyzer 软件; ④根据每节柱体的测量数据, 分别拟合出对应的圆柱面, 求得各自的轴线; ⑤根据整体全部测量数据, 对整根单桩进行拟合, 求得整体轴线; ⑥以整体轴线为基准, 由每节柱体的轴线端点向基准轴线做垂线, 根据垂距求得同心(轴)度。

在进行圆柱面测量时, 测量截面应该选在圆柱的端面附近, 总的测量点数不能少于 8 个, 原因如下:

首先, 圆柱拟合的目的是, 确定圆柱轴线向量的空间方位与半径 R 的最佳估值。而轴线的空间方位是由轴线上任意一点 $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ 和轴线的方向向量 $n(a, b, c)$ 决定的, 这就涉及到了解算 7 个未知参数的问题。假设

$P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 为圆柱面上的任意一点, 则圆柱面方程的两种形式如下:

圆柱面的向量方程: $\| (P_i-P_0) \times n \| = R$ (3)

圆柱面的坐标方程:

$$[a(Z_i-Z_0)-c(X_i-X_0)]^2 + [b(X_i-X_0)-a(Y_i-Y_0)]^2 + [c(Y_i-Y_0)-b(Z_i-Z_0)]^2 = R^2$$
 (4)

根据最小二乘法建立法方程时, 每个测量点贡献一个观测方程, 为了解算出 7 个未知参数的最佳估值, 至少需要 8 个测量点, 才能产生多余观测。

其次, 如果测量点都过分集中在圆柱面的中间区域, 则拟合出来的圆柱面不能确切可靠地表达实际柱体, 解算出来的轴线方位就会失真。

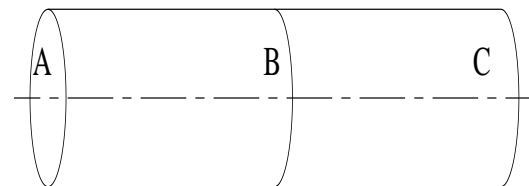


图 2 a 两节柱体构成的柱体

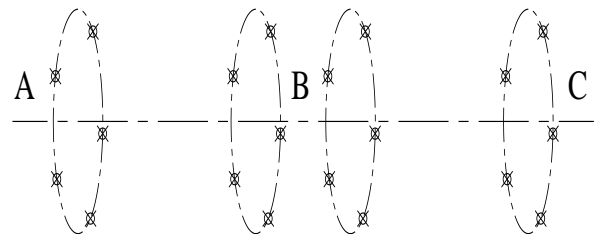


图 2 b 测点分布示意图

圆柱面拟合法通常用来测量外径较大的柱体间距、夹角、交点坐标、垂直度、同心(轴)度等。

3.3 平面拟合实例

假设一台绞车, 其滚筒的轴 C 与两端侧板 A、B 组对完成(图 3a), 要求对两侧板的平行度及二者与轴的垂直度进行焊前检验。

从数学理论得知, 如果两个平面平行, 则二者的法线向量平行; 直线与平面垂直, 则直线与平面的法线向量平行。由此, 本实例采用平面拟合和圆拟合的方式, 分别导出两个平面的法线向量和圆柱的轴线向量, 根据所得向量的空间方位, 确定平行度及垂直度。作业模式为: ①在轴上两端靠近侧板处, 利用模具各画出一个垂直于轴线的圆, 并在每个圆上均匀的标记出 5 个测点(图 3b); ②在每个侧板的内侧边缘处, 沿着圆周均匀地标记出 5 个测点, 并在侧板上与轴相交的位置附近, 大体均匀地标记出 3 个测点(图 3b); ③采用自由设站(后方交会)的方式测量所有的测点, 将测量数据导入 SpatialAnalyzer 软件; ④根据测量数据, 分别拟合出两个侧板的内表面和轴的圆柱面; ⑤根据软件解算出的平面法线向量和圆柱的轴线向量, 求得平面度及垂直度。

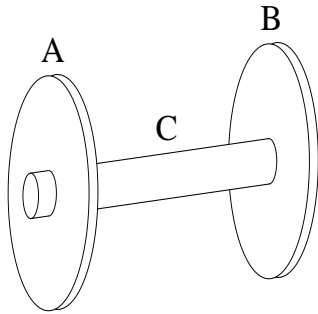


图3 a 吊车绞车滚筒示意图

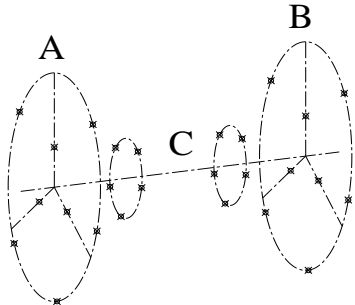


图3 b 测点分布示意图

要进行平面拟合,平面上应该均匀分布至少5个非共线的测点。原因如下:

首先,平面的一般方程形式为 $Ax+By+Cz+D=0$, 包含4个未知数,其中, x 、 y 、 z 的系数为该平面的一个法线向量 n 的坐标,即 $n=(A, B, C)$ 。根据最小二乘法建立法方程时,每个测量点贡献一个观测方程,为了解算出4个未知参数的最佳估值,至少需要5个测量点,才能产生多余观测。

其次,如果所有测量点都分布在一条直线上,那么,任意三个测量点构成的两个向量重合共线,根据这两个向量的向量乘积,无法解算出唯一的方向向量;表现在几何图形上,意味着通过空间一条直线,可以有无数个平面;而测点的分布过于集中,由于测量误差的影响,解算出来的法线向量亦可能会产生较大偏转。

平面拟合通常用于检验平面度、平行度、垂直度等。

3.4 圆和圆柱拟合实例

某海上风电单桩建造场地,一根单桩的首段桩体 C 与顶部法兰 F 已经组对完成(图4a),要求进行焊前尺寸检验,检验内容为法兰的椭圆度、法兰与桩体之间的同心度与垂直度。法兰的外径 $\Phi=7500\text{mm}$, 内径 $\Phi=6870\text{mm}$, 法兰共有158个机加工孔,孔径 $\Phi=67\text{mm}$, 孔中心与法兰中心等距,在圆周方向均匀分布(图4b)。桩体高3.3米,外径 $\Phi=7500\text{mm}$, 与法兰外径相等。

检验采用与实例3.3相同的方式,通过拟合圆,求出法兰中心与法线向量;通过拟合圆柱得到柱体轴线向量;根据各个法兰孔中心到法线的垂距,求得法兰椭圆度,由法兰中心到柱体轴线的垂距,求得同心度,再根据法兰法

线与柱体轴线间的平行度,推导出垂直度。

工业制造中,规定法兰中心为法兰孔中心所在圆周的几何圆心。为此,便直接测量法兰孔中心,根据所测得的数据进行圆周拟合,解算出法兰的中心坐标。为了确保孔中心的测量精度,根据孔内径 $\Phi=67\text{mm}$, 按照负公差机加工了一个柱形工装,工装与孔之间的间隙极小,使得工装放入孔内后,水平方向上不会产生移动。工装顶部中心加工有测量孔,做为测量孔中心时的测量点,Mini 棱镜依据此测量孔进行对中。从158个法兰孔中,间隔均匀地选择40个孔进行测量,样本数量较为合理。将柱体表面按8条母线、6个圆周进行大体等分,选取大约48个点进行测量。由于现场有部分遮挡,最终,通过四次自由设站(后方交会)的方式完成了该次测量。

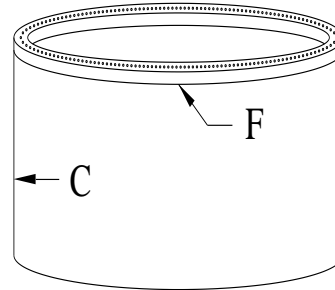


图4 a 待检状态的桩体与法兰

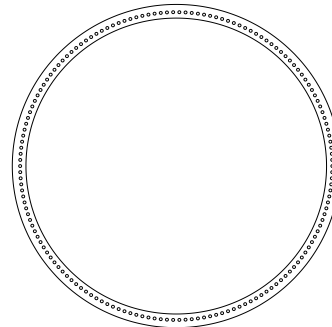


图4 b 顶部法兰

4 案例分析

下面列出两个与海洋工程结构测量相关的案例,来分析一下一般结构测量中存在的问题。

4.1 案例一

某海上风电项目,在进行导管架安装时,四根导管腿无法对接进入水下的四根基桩中。经分析,四根基桩的施工工序合理,定位定向数据正常,满足施工偏差要求范围。由此可见,问题应该是与导管架腿相关,经检验,有一根导管腿与其他三根腿的相对位置超差。为什么会产生这个问题呢?在导管架运输过程中,桩腿产生变形的可能性很小,那么,问题就出在建造过程的尺寸控制方面。

结构建造过程中,建造人员与部分质检员,一般采用的测量方法都比较传统。桩体的垂直度通常使用铅锤和角尺进行测量,测量时,通常在桩体顶端选择沿圆周方向成

90° 夹角的两点, 分别在两点垂下铅锤线, 然后通过角尺量取桩体表面到铅锤线的间距, 作为垂直度测量值。由此产生的问题是, 首先, 两个点的测量样本太小, 测量值不一定代表最大倾斜方向上的垂直度; 其次, 如果垂线经过的区域的局部圆度建造偏差较大, 则对测量值将会产生误导; 另外, 铅锤因风的影响而产生摆动, 又会导致较大的测量误差。

桩体间距一般是使用全站仪, 采用测量三点求圆心的方式导出, 三点的选择比较随意, 其所在的平面既不垂直于桩体轴线, 也不覆盖一个大圆弧, 由此, 容易引入较大误差。

4.2 案例二

某海上风电项目, 基础单桩沉桩后, 要求垂直度偏差控制在 3% 之内。但在施工过程中, 发现个别单桩的表面直线度较大, 主要表现为首尾相接的两段桩体, 在焊缝的两侧产生错位, 导致局部最大直线度达到 1.1%, 这在沉桩过程中, 对测量控制垂直度产生极大的干扰。按照结构建造质量要求, 通常情况下, 直线度公差一般都是指定在 0.3% 左右, 为什么会出现这样大的超差呢? 主要原因是, 在建造过程中, 两个环节的质量控制没有做好, 分析如下。

首先, 在单节桩体的制作阶段, 周长和圆度超差。一般情况下, 桩体的周长采用钢尺进行测量, 圆度是通过将圆周等分 8 或 16 份, 通过测量直径, 求得差值而导出。这种检验方法存在的问题是, 桩体的周长较长, 只能测量底部周长, 中部和上部周长不易测量; 通过直径测量值计算桩体圆度, 在等分圆周的过程中, 标记的直径可能不是真正的直径, 没有通过桩体轴线, 由此, 测量值与直径真实值可能存在较大偏差。这些都可能导致尺寸控制无法达到预期。

通过上述两个案例的分析, 可以看出, 普通的测量检验方法, 将原本完全可以利用全站仪进行测量的任务, 分解成了采用各种原始手段进行测量的步骤, 而且, 检验结

果很难满足质量控制的要求。唯有通过数据拟合的方式, 才能更加有效地实现质量控制的目的。

5 结束语

本文介绍了圆、圆柱及平面的拟合在结构测量中的应用实例。就测量而言, 任何可靠的结果, 都取决于测量仪器的性能、观测水平的熟练程度以及数据处理方法的严密性。在当前的工业测量领域, 激光扫描仪被广泛使用, 通过拟合点云进行数据处理效率似乎更高。然而, 在海洋工程建造场地, 激光扫描仪却很难发挥其优势。主要原因是, 在建造场地, 各种遮挡干扰因素众多, 采用激光扫描仪扫描时, 很难将指定对象的扫描数据从背景干扰数据中分离出来, 降低了内业数据处理的效率。其次, 进行扫描时, 采用标靶转站的精度, 要远低于全站仪后方交会的精度。因此, 本文对测量点位分布的论述, 是基于使用全站仪进行外业测量的前提之上的, 点位分布总的原则是: 测量点应最大程度地、均匀地覆盖待拟合对象的整个表面; 因为测量误差的存在, 点位密度不应导致拟合结果的失真。在工业测量方面, SpatialAnalyzer 是一款非常优秀的应用软件。拟合算法的应用, 虽然增加了外业测量的总点数, 但在优秀软件的辅助下, 内业和外业的总体效率还是得到了充分的提升, 而且, 也增强了检验结果的可靠性。

[参考文献]

- [1] 史瑞鳌, 眭洁, 孙澈. 高等数学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
 - [2] 沃尔夫. 平差计算[M]. 北京: 测绘出版社, 1983.
 - [3] 吉尔伯特斯特朗, 凯博尔. 线性代数、大量测量与 GPS[M]. 韦尔斯利: 剑桥出版社, 1997.
 - [4] 赫尔曼, 劳斯勒, 拜尔. SpatialAnalyzer 与不同平差程序之比较[M]. 斯普林格: 国际出版社, 2015.
- 作者简介: 夏嘉辉(1973.9-)男, 天津, 汉族, 本科学历, 工程测量中级工程师, 从事工程测量工作。