引文：孙剑，鲍星龙 . 超大型 LNG 薄膜型陆地储罐内罐划线关键因素分析与方案优化 [J]. 天然气工业，2022, 42(12): 117-124.
SUN Jian, BAO Xinglong. Inner tank marking of ultra-large LNG film tanks: Key factor analysis and scheme optimization[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 117-124.

超大型 LNG 薄膜型陆地储罐内罐划线关键因素分析与方案优化

孙 剑　鲍星龙

江苏科技大学船舶与海洋工程学院

摘要：为了提高 MARK III 型 LNG 陆地储罐内罐围护系统划线施工的划线精度及划线效率，以达到提高生产效率、降低生产成本、保障生产质量的目的，对划线施工的方案和施工中出现的各项关键问题进行研究，并寻找对划线精度影响较大的关键问题，再结合现场情况及作业条件提出相应的解决方案，最终提出内罐划线关键区域的精度控制策略，进而优化施工方案。研究结果表明：①影响内罐划线精度的关键因素有：划线设备的作业距离以及在复杂环境下的作业精度、内罐底面和壁面交界处防潮层淤积影响、次层端部区域防潮层流挂影响、角区位置线平行关系及误差控制、内罐划线期间的精度检验方案、内罐平整度计算方案。②划线方案的部分优化方向有：将角区位置线提前标记，降低打磨混凝土造成的影响；简化移位标记点的定位流程。③影响划线精度的关键区域及针对关键区域的精度控制策略包括：底部中心点检验，通过多扇区轴线交汇点与设备确定的底部中心点对比检验；底部划线精度，采取三段式检验方案；壁面划线关键参数检验，通过壁面高度环线检验。结论认为，以国内最大的 MARK III 型 LNG 陆地薄膜储罐也是近年来世界上在建的最大薄膜型陆地储罐为研究对象，研究结果对于国内乃至世界 LNG 陆地薄膜储罐的划线效率、精度提高和划线方案优化都有着重要的指导意义。

关键词：LNG 储罐；薄膜罐；MARK III；围护系统；划线方案；划线检验；流程优化；精度控制
DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.12.012

Inner tank marking of ultra-large LNG film tanks: Key factor analysis and scheme optimization

SUN Jian, BAO Xinglong

(*School of Naval Architecture & Ocean Engineering*, *Jiangsu University of Science and Technology*, *Zhenjiang*, *Jiangsu* 212100, *China*)

Natural Gas Industry, Vol.42, No.12, p.117-124, 12/25/2022. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In order to improve the marking accuracy and efficiency of inner tank containment system of the MARK III LNG film tanks for purpose of increasing the production efficiency, reducing the production cost and ensuring the production quality, the problems existing in marking scheme and marking operation were investigated, and key factors that have great impact on marking accuracy were identified. Then, depending upon the site and operation conditions, proper solutions were proposed. Finally, the precision control measures for key marking zones were put forward, and the marketing operation scheme was optimized. The results show that key factors influencing the inner tank marking accuracy include marking device' operation distance and operation accuracy under complex environment, moisture barrier silting at the junction of bottom and wall of the inner tank, moisture barrier sagging at the end of sublayer, parallel relation and error control of corner position line, precision check scheme during inner tank marking, and inner tank flatness calculation scheme. The marking scheme can be optimized by, for example, marking the corner position line in advance to mitigate the impact of concrete grinding, and simplifying the locating process of displacement marked point. Different precision control measures are taken for key areas: (1) the bottom center point defined by the device is checked with the axial intersection of multiple sectors; (2) the bottom marking precision is checked by three segments; and (3) key parameters of wall marking are checked by wall height loop line. It is concluded that the research on MARK III LNG film tanks, the largest aboveground LNG film tanks in China and even the world, is of significant guidance to the marking efficiency and precision improvement and marking scheme optimization of LNG film tanks worldwide.

Keywords: LNG tank; Film tank; MARK III; Containment system; Marking scheme; Marking check; Process optimization; Precision control

作者简介：孙剑，1975 年生，正高级工程师；主要从事 LNG 船液货舱及 LNG 陆地罐建造技术、策划等方面的研究工作。地址：（212100）江苏省镇江市丹徒区长晖路 666 号江苏科技大学。ORCID: 0000-0001-7632-6259。E-mail: sun-hu@163.com

天然气工业 版权所有

0　引言

随着国家能源战略的推进，对于能源结构的优化已经成为国内能源行业的常态化工作，液化天然气（Liquefied Natural Gas，LNG）具有燃烧热值高、无污染且便于运输的优点，在越来越多的国家中开始大面积使用[1]。随着相关技术的不断进步，国内逐步形成气源、储运、市场协同发展的天然气工业[2-6]，LNG 在陆上的储存技术成为 LNG 能源应用的关键技术之一。MARK III 薄膜型陆地储罐作为一种安全、经济的新型储罐形式，其建造过程在国内的研究基本处于空白阶段。

随着天然气液化技术的不断成熟，全球天然气消费量持续提升。大型偏远气田的天然气液化后可输送至管线无法到达的市场，已发展形成全套产业链[7-8]。作为 LNG 产业链中不可或缺的存储设施，也是 LNG 接收站建设投资最高、工期最长、技术最先进、难点最多的关键环节。随着 LNG 储罐应用日益广泛[9]，相关技术发展备受业界关注。

在 LNG 产业链中，LNG 储罐是最重要的组成部分之一，相对于欧美及日韩等发达国家，中国在 LNG 储罐的建设技术水平上还不够成熟[10]。整个产业链中，LNG 储罐的设计和建造十分关键，技术要求高，投资大、建设时间长[11]。常规储罐以全容储罐为主，由主容器和次容器两部分组成，其优点是安全性高、占地少、完整性高[12]。薄膜储罐是金属薄膜内罐、绝热层及混凝土外罐共同形成的复合结构[13]，优势是更低的材料成本、更好的结构独立性、气密性和高度的模块化。

近年来，LNG 储罐呈现大型化的发展趋势，薄膜型储罐的优势逐渐凸显[14]，相较于全容罐，薄膜罐的内罐容积没有理论极限，可以设计容量更大的储罐[15]。得益于结构的优化和薄膜内罐体系的厚度，在混凝土外罐尺寸相同情况下，薄膜型储罐比 9%Ni 钢全包容储罐有效容积大 10%[16]。

薄膜罐的外罐包括混凝土外罐、承台和拱顶，内罐包括主层屏蔽和次层屏蔽两部分，次层部分主要为绝缘填充层，主层为不锈钢波纹板[17-18]，在主层和次层安装开始前都需要进行划线工作。首先进行的就是罐内的打点划线工作，此项工作保证了整个内罐的安装精度，并影响后续安装工作的安装质量[19]。对于薄膜型围护系统，划线精度对于绝缘模块的安装精度，次屏蔽黏连质量以及波纹板安装精度都有很大影响，是整套体系最基础、最重要的工作之一。

笔者研究载体是天津南港在建的 LNG 应急储备项目薄膜储罐，该项目采用薄膜型 LNG 储罐建造的前沿技术，是国内最大的 LNG 薄膜储罐项目群，同时是正在实施的国内甚至世界上单罐容量最大的 LNG 陆上薄膜储罐，也是近十几年来国内建造容量最大的薄膜型 LNG 储罐。

笔者主要对薄膜罐内罐安装前打点划线工序的技术关键点进行研究，通过对薄膜罐内罐划线理论方案进行实际验证，解决实际施工时遇到的各种问题，优化相关划线方案和策略，降低成本、提高生产效率，为内罐安装精度控制和质量控制提供重要支撑，对后续国内外超大型薄膜型陆地储罐的建造具有指导意义，也为相关技术国产化进程作出贡献。

1　罐内区域划分

围护系统作业中，许多相似工序会在不同的基准面上进行，出现问题时难以定位。为了便于作业区域的标记、定位和模块化作业，通常按照以下原则对内罐的底面和壁面各个区域进行划分命名。

通常将整个底面区域划分为 4 个区域，笔者以 A、B、C、D 进行标识，其中包含一个中心区域和多个均分的扇形区域，以引导系统所在位置为参考，将此区域作为划分起始点，即底部 A 区域的中间扇形区域。以此区域为基准，每个区域根据罐体尺寸等分为各个小区域，并依次标记。图 1 所示为 225 000 m^3 薄

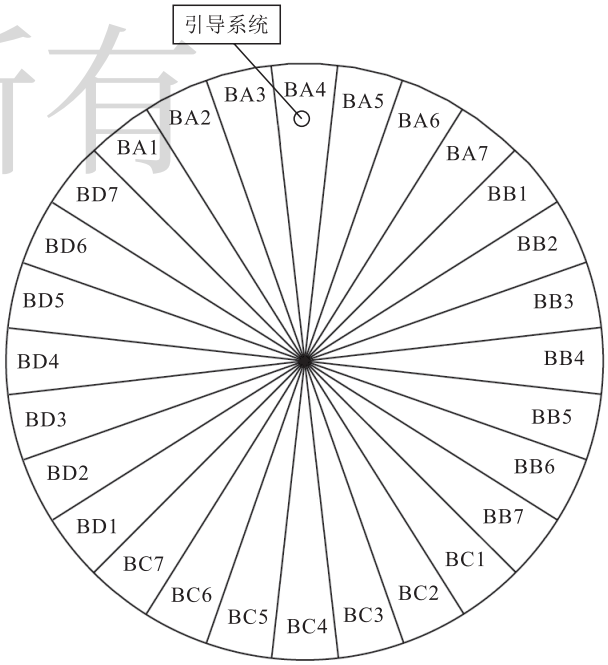

图 1　底部扇形区域划分图

天然气工业　版权所有

膜罐的划分方案，以底面 A 区为例，将其命名为 BA 区域（Bottom A, BA）将其划分为 7 个小扇区，分别以 BA1 ～ BA7 命名，B、C、D 区域同理。

壁面区域的划分以底面为基准，底面的每个扇区，对应壁面区域的一个或多个平面区域。本文研究对象划分的底部 28 个扇区对应着 56 个壁面区域（图 2）。

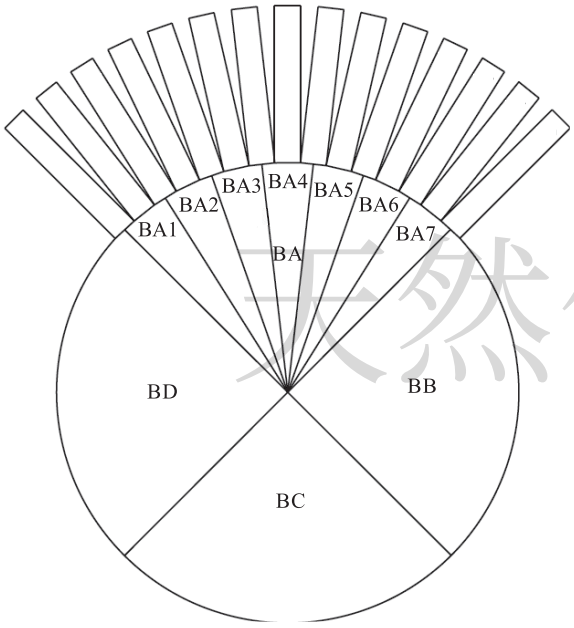

图 2　壁面区域划分图

内罐建造过程中，次屏蔽黏连端部区域（Second Barrier End Area，SE）和主屏蔽焊接端部区域（Primary Barrier End Area，PE）两个特殊区域界线以及 PE 区域氮气管高度是划线工作定位及精度控制的重要参考。需提前标明。

在壁面需确定 3 个高度环面 Δ1、Δ2、Δ3。其中 Δ1 表示 PE 区域预埋件中心线距离底面高度；Δ2 表示 SE 区域预埋件中心线距离底面高度；Δ3 表示次层区域氮气管进气管高度。

这 3 个高度环面用以确定氮气管、温度传感器、次层端部盖板和主层连接件的相对位置，图中以壁面 A 区域 01 和 11 区域为例（图 3）。

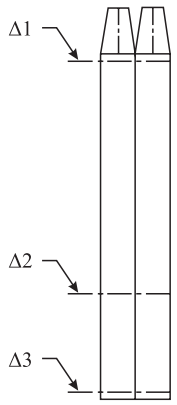

图 3　3 个高度环面图

2　内罐划线关键问题分析

2.1　划线设备及精度控制要求

不同于 LNG 船舱内划线，LNG 陆上储罐罐体内径和高度尺寸都比较大，这对于划线装备的作业距离及作业精度都有较高要求。本文参考的罐体内罐底面为半径 43 m 左右的圆形，罐体高度 44 m 左右，因此设备至少需满足 45 m 作业距离，设备选用 API 激光跟踪仪，使用前保证设备最大作业距离下调试误差不大于 0.03 mm[20]，并且在作业环境较差时仍能保持良好的作业精度。

由于混凝土外罐存在建造误差，测量开始前需确定罐底基准平面，通过该平面建立理论罐体，在内罐表面布置靶球，便于设备移位后定位第一次建立的理论罐体（图 4）。

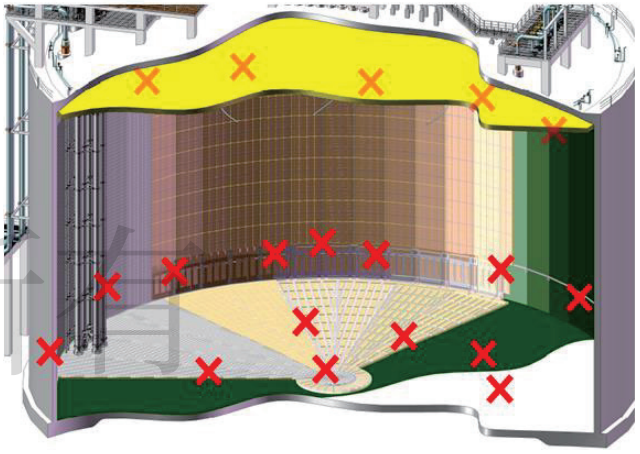

图 4　罐内靶球分布图

2.2　底面及壁面交界处误差分析及解决方案

混凝土外罐建造完成后进行防潮层施工，施工后会在底面及壁面交界处产生防潮层淤积，该区域测量时会产生测量误差，影响该区域绝缘模块的安装精度。防潮层淤积如图 5 所示。

为避免破坏防潮层，采用移位标记法，在划线定位时将需要定位的点沿壁面偏移一定的距离 M，避开防潮层淤积区域，确定角点时按照标记点向下偏移 M，该点即为角区基准楔块调平时的参考角点。

天然气工业　版权所有

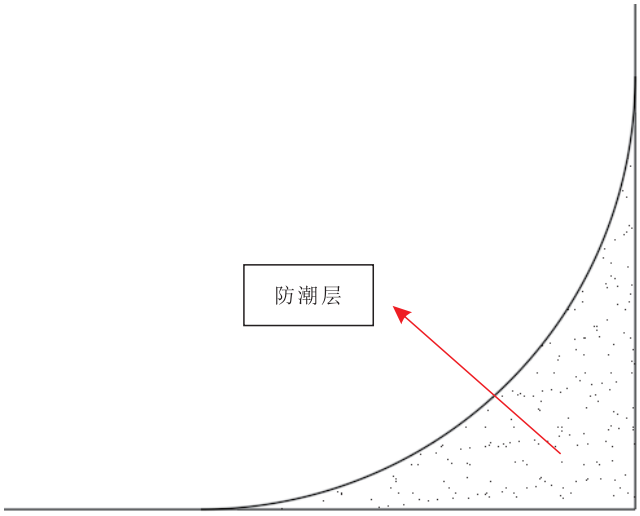

图 5　角区的防潮层图

使用移位标记需保证与原始角点始终在同一竖直轴线上。偏移距离 M 的确定需要综合底部防潮层淤积情况，在底面保护施工后仍便于测量，在此前提下选择最短的偏移距离，同时也降低因角点偏移产生误差的风险。

一般流程如下：

1）在距离需要标记的角区左右两侧一定距离处，使用模板在距离底面 3 个不同高度处各做一个高度标记，两侧相同高度处的两个标记连接为一条水平线。

2）在最高和最低的高度标记水平连线上，使用量规确定最深的角点，连接这两点，与中间高度处水平线角点就是底部移位标记点。

以 225 000 m^3 薄膜型陆地储罐为例，壁面宽度为 4 870.6 mm，基于此壁面宽度在距角点位置左右两侧 150 mm 处确定距底面高度值分别为 150 mm、250 mm 和 350 mm 的标记点。

2.3　SE 区域测绘基点

SE 区域是内罐区域划分的关键位置，本身是整个内罐次层屏蔽黏连的端部区域，由于 SE 区域上方与下方具有不同形式的绝缘板材，安装方式以及相关零件区别较大，并且 SE 区域零件较多，工序复杂，在划线阶段就需要保证良好的施工精度。

防潮层施工时未凝固的防潮层会流挂污染 SE 区域，使得 SE 区域界限变得不明显，妨碍后续的测量工作（图 6）。为解决此问题，采取在 SE 区域标记测绘基点的方案，预先标记测绘基点，防潮层流挂后无法完全遮盖所有基点，通过 SE 区域部分基点即可测量找出所有基点位置，根据基点位置测绘所需网格线，为了便于定位，测绘基点一般选在角区位置。

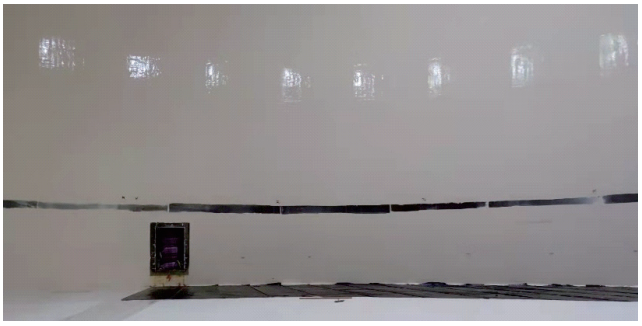

图 6　被污染的 SE 区域图

SE 测绘基点的标记在防潮层施工前进行，在 SE 区域不锈钢焊接环线角区位置标记一个样冲点，同样在 SE 区域角区模块安装位置进行标记，连接两点，在连线中点上标记一个样冲点，这 3 个点即为 SE 区域的角区测绘基点。

测绘基点可以在防潮层施工完成后，标记 SE 区域划线、模块安装以及预制件焊接位置，降低黏连和焊接误差。

2.4　角区位置线误差控制

对于内罐绝缘模块安装，角区位置是安装位置控制和精度管理的关键部分，角区位置线是控制绝缘板安装位置的限制线，也是确保波纹板准确安装的定位线。

由于混凝土外罐建造误差的影响，角区位置线的确定是划线作业精度控制工作的难点，在 SE 区域和 PE 区域需要绘制各自对应的角区位置线，将激光分别打至 SE 和 PE 区域，每个角标记两点并连线，此线段即为角区位置线。

为保证波纹板焊接位置不产生偏移，同一角区 SE 区域和 PE 区域角区位置线必须控制在同一轴线上，且各轴线必须保证严格的平行关系。一旦 SE 区域和 PE 区域的角区位置线产生偏移，会影响绝缘模块安装精度，一旦误差过大，波纹板将无法对齐。

通常在角区位置线完成后，所得的壁面平面区域不是一个标准的矩形，是由于混凝土存在建造误差，对误差进行修正后角区为直线会产生微小偏移，此时需要测量偏移量，依据专利商标准，上下偏移误差需控制在 ±5 mm 以内。

2.5　内罐划线方案及精度控制

靶点设置及内罐数据计算完成后开始进行具体划线工作，在划线过程中需注意网格线的精度管理策略，防止误差累积。

天然气工业　版权所有

2.5.1　底面扇区及壁面中轴线

底面扇区和壁面中轴线是 90° 绝缘模块安装的关键，通常需要保证壁面中轴线与对应底部扇区中轴线的连续性。这一步通过人为测量通常不能很好地考虑多个面的相互影响，因此通过软件在理论平面上绘制轴线，消除由于外罐建造误差产生的影响，激光打点后进行人工复核。

在软件中绘制一个垂直于底面的理论平面，保证需要绘制的底面扇区中轴线位于平面内，坐标系法线方向垂直于底面扇区中轴线，打点时 z 值为 0 的点即为中轴线上的点，仪器打点误差控制在 0.03 mm 以内。

打点工作开始后，每 3 m 标记一个点，进行弹线，每 9 m 进行精度检查，需要保证每 9 m 的划线精度在 ±1.5 mm 内，以控制弹线精度。

2.5.2　壁面高度环线

壁面高度环线是网格线绘制的定位线和检验线，也是保证 SE 和 PE 区域定位的标记线，壁面高度环线的确定需根据现场情况确认，需要根据建造时氮气管位置、底部涂层厚度和底部整体平整度情况确定。

2.5.3　网格线及平面螺柱划线

网格线与底面扇区及壁面中轴线相同，为减少人工测量产生的精度问题，采用设备打点，建立理论平面后找点划线的方案。平面螺柱划线需要使用特殊工装，防止出现人工测量误差。

根据国际专利商要求，在壁面接近底部位置、半高位置和接近穹顶位置分别对网格线宽度进行测量，每个壁面与理论宽度的误差需控制在 ±10 mm 之内。同时各网格线需使用量具测量对角线距离，大网格误差 ±5 mm 以内视为合格，小网格误差 ±3 mm 以内视为合格。

2.5.4　角区螺柱划线

角区划线在平整度测量及角区基准楔块数据计算完成后进行，并且角区螺柱的位置与角区基准楔块的厚度有关。角区绝缘板一般衔接 2 个或 3 个平面，对连接处的层差和平整度有较高要求，角区螺柱线划线误差控制在 ±1.5 mm 内，但由于基准楔块的影响，难以进行定位。

针对上述情况，角区的螺柱划线将根据以下两种方式的其中一种进行（图 7）。

1）方案一：在平整度测量计算完成之后进行，由于角区螺柱的位置与角区基准楔块的厚度有关，因此螺柱的定位需使用模板。

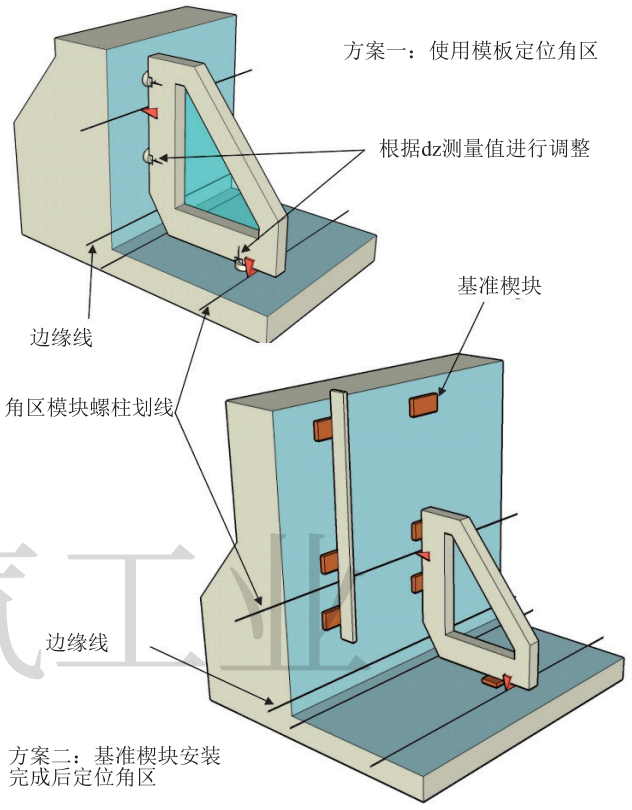

图 7　角区螺柱划线示意图

2）方案二：将螺柱安装分为两个部分进行，先平面区域，然后是角区部分，则可在平面区域基准楔块计算完成后进行螺柱定位。

2.6　数据处理及平整度计算

在底部的各点测量完成后，由于测量工作需要人工介入，测得各点可能会出现位置偏差，因此需要将数据与理论数据进行对齐，保证实测数据与理论数据的严格对应关系。

为提高效率，使用 PolyWorks 软件进行对齐操作（图 8）。

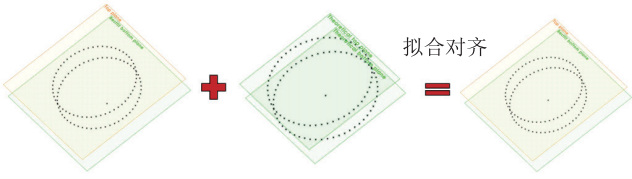

图 8　对齐操作示意图

由于外罐建造时的公差，理论壁面中轴线一般会与实际壁面中轴线位置产生偏移，根据陆罐建造公差和划线计算参数，计算后可得到壁面中轴线的偏移量和陆罐的中心位置。

在网格线划线结束后对平面平整度进行测量，

平整度测量时存在角区划线裕量，需要通过计算将底面和壁面区域的平整度情况进行修正，出具基准楔块安装方案。

图 9 以壁面 WA34 为例，通过仪器初步测量平整度后整体情况。

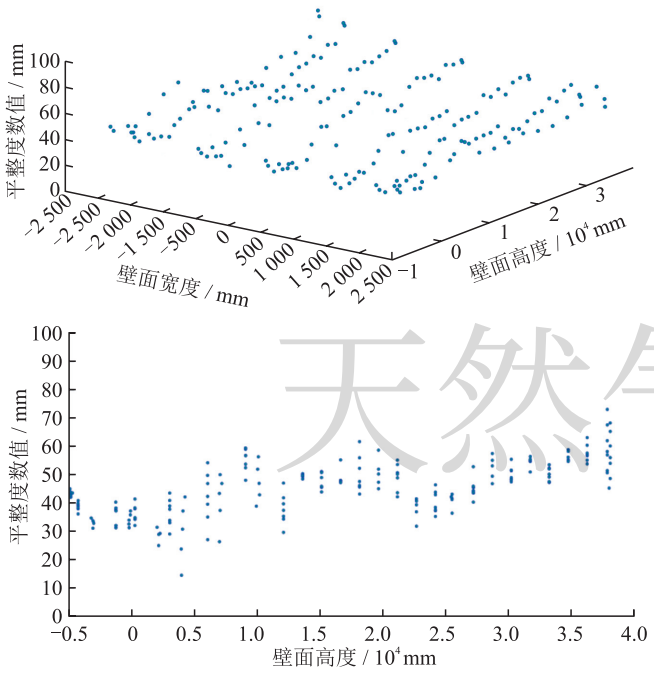

图 9　计算前壁面 WA34 平整度状况图

计算前的平整度数据包含未进行合并计算的角区裕量，在进行多个壁面的同时计算时，根据该区域理论尺寸及计算出的偏移量，拟合计算后消除角区裕量，并得到一个相对平整的平面（图 10）。

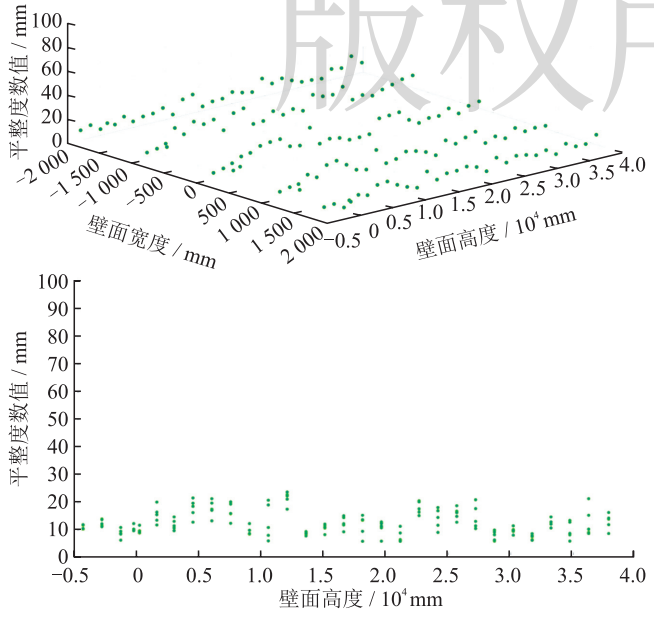

图 10　计算后的平整度数据图

计算后的平整度数据可作为实际生产的基准楔块数据参考。

3　划线方案优化

在实际生产过程中，存在着许多与理论划线方案不同的情况，需要边施工边验证，不断根据实际情况对划线方案修改优化，提高生产效率。

3.1　划线流程优化

由于混凝土外罐的建造误差，会对某些角区进行打磨，这会导致这些角区变得不明显，导致后续的打点划线时难以准确定位角区，产生误差。

为解决这个问题，在划线开始前人工测量并标记出一条角线，测量墙面宽度，对照理论数据对壁面宽度进行相应调整，以调整后的宽度为准，在不明显的角上做标记，后续以此标记为基准进行打点划线。

3.2　移位标记点定位流程优化

对于 SE 区域及 PE 区域角区测绘基点以及移位标记点流程，先前的方案需要分别在 SE 和 PE 区域分别进行定位，在实际测绘工作进行后对其流程进行了优化。

将 SE 区域及 PE 区域角区测绘基点标记工作提前至移位标记定位之前进行，SE 区域角区标记完成后可以通过测绘基点辅助移位标记点的定位，不需要使用量规确定角点，只需通过仪器将角区标记线垂直延伸出一条线，即可确定移位标记定位点，提高整体效率。

SE 区域移位标记点完成后，可通过仪器以及 SE 区域移位标记点向上延伸直接在 PE 处确定 PE 区域移位标记点。

4　关键区域精度控制策略

4.1　底部中心点检验

内罐底部中心点是全罐安装工作的中心点，也是划线工作的起始点，因此中心点的定位精度直接关系到内罐安装精度和安装质量，中心点的检验工作成为精度管理的重点工作。

正式打点工作开始前，需要验证底部中心点，以保证内罐扇区中心点的准确性。

选择 3 个以上的底面扇区，在底面绘制其轴线及边界线，检查所有线的交点是否在中心点范围内，在范围内中心点检验通过；若中心点检验没有通过，检查施工流程及工作文件，找出相关问题（图 11）。

天然气工业　版权所有

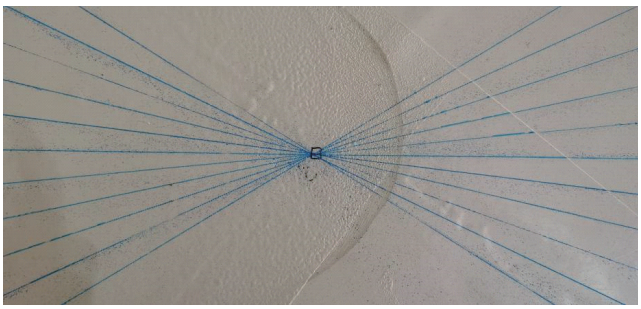

图 11　底部中心点检验图

4.2　底部划线检验

由于划线以内罐底部为基准开始，底部区域的划线影响整个罐体的划线质量，因此底部划线工作结束后需确定划线误差、复核划线质量，制订相应的检查检验方案。

尤其重要的是底部扇区轴线的精度控制，关系到底面和壁面绝缘模块的衔接过渡，由于罐体内径较大，采取三段式检验的方法。将底部中心区域到罐壁的距离定为 L，选择底部扇区轴线上 1/3L、2/3L、L 位置的点，通过激光跟踪仪在底部进行标记，标记完成后进行测量，每处允许误差 ±1 mm 以内，超出允许误差的轴线视为不合格。

检验过程中，如果出现检验点与弹线不重合的现象，需立即检查是否打点有偏差或出现弹线误差，以免后续工作产生更大的精度问题。

4.3　壁面划线及壁面水平线检验

位于壁面的 3 条环线 Δ1、Δ2、Δ3 是确定绝缘模块安装位置、保证氮气管、次屏蔽和波纹板安装精度的重要基准，因此壁面环线的确定及误差控制是壁面划线工作的重要环节。

环线 Δ3 必须在氮气管上方，测量环线 Δ3 高度值、壁面中心轴线上距 Δ2 环线 250 mm 位置高度值和 Δ2 至 Δ1 高度值。随机选择几个壁面，测量每个面上述 3 个位置点，测量完成后计算得出距离报告，多个壁面之间高度差误差不得超过规定值，该误差范围根据绝缘模块安装层差允许范围确定。

5　结束语

1）划线工作是整个 MARK III 型 LNG 薄膜罐安装工作的前提，后续的螺柱及绝缘模块安装都需要按照划线提供的基准进行，也保证了波纹板安装连续性及安装精度。笔者以 22.5×10^4 m^3 的大型薄膜型 LNG 陆地储存罐为研究载体，在实际施工过程中发现总结了内罐划线过程中的关键点和问题，并通过实际检验，优化了内罐划线方案，制订了关键区域精度控制策略和标准。

2）在整个划线工作的前期准备、实际施工过程中都遇到了许多计划外的问题，对划线方案和精度控制策略进行了多次修改、优化，最终形成了适合实际施工，效率更高、成本更低的施工方案和精度问题解决办法，对国内后续薄膜罐的施工建造具有一定指导意义。

3）作为国内最大的 LNG 薄膜型陆地储罐项目，该项目的成功投产不仅代表着国内大型 LNG 储罐发展取得进一步成就，也代表着 LNG 薄膜型围护系统在新的领域得以实际应用，为后续相关技术的国产化、自主化提供了理论依据和技术支撑。

天然气工业　版权所有

参　考　文　献

[1] 张云峰 , 李腾飞 , 滕振超 . LNG 储罐研究现状及展望 [J]. 当代化工 , 2021, 50(7): 1662-1666.
ZHANG Yunfeng, LI Tengfei, TENG Zhenchao. Research current situation and prospect of LNG tank[J]. Contemporary Chemical Industry, 2021, 50(7): 1662-1666.

[2] 万华旭 , 冯钰润 , 吕正华 . 浅谈中国天然气液化技术开发与应用现状 [J]. 云南化工 , 2018, 45(10): 168-169.
WAN Huaxu, FENG Yurun, LYU Zhenghua. Development and application of natural gas liquefaction technology in China[J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(10): 168-169.

[3] 高文晓 . 液化天然气 (LNG) 储运安全问题与发展前景研究 [J]. 石化技术 , 2018, 25(5): 68-69.
GAO Wenxiao. Safety and development prospect of liquefied natural gas (LNG) storage and transportation[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(5): 68-69.

[4] 张学武 . 液化天然气技术优点及其应用 [J]. 信息记录材料 , 2018, 19(11): 218-219.
ZHANG Xuewu. Advantages and applications of LNG technology[J]. Information Recording Materials, 2018, 19(11): 218-219.

[5] 杨护恩 . 推广液化天然气应用保障城市气化与安全 [J]. 内蒙古自治区人民政府公报 , 2011(1): 31-32.
YANG Huen. Popularize the application of LNG to ensure urban gasification and safety[J]. Communique of the People's Government of Inner Mongolia Autonomous Region, 2011(1): 31-32.

[6] 杨发炜 . 浅谈国内液化天然气的发展和前景 [J]. 石化技术 , 2020, 27(10): 220-221.
YANG Fawei. Talking about the development and prospect of LNG in China[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020,

27(10): 220-221.

[7] 张丹 , 许佳伟 , 明红芳 , 等 . LNG 薄膜罐技术发展现状及其在国内推广的前景 [J]. 化工管理 , 2021(5): 9-10.
ZHANG Dan, XU Jiawei, MING Hongfang, et al. Development status of LNG membrane tank technology and its application prospect in China[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(5): 9-10.

[8] 李鹭光 . 中国天然气工业发展回顾与前景展望 [J]. 天然气工业 , 2021, 41(8): 1-11.
LI Luguang. Development of natural gas industry in China: Review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 1-11.

[9] 周艳成 , 李海龙 . LNG 储罐安装施工技术 [J]. 环球市场 , 2017(11): 176.
ZHOU Yancheng, LI Hailong. LNG storage tank installation and construction technology[J]. Global Market, 2017(11): 176.

[10] 黄群 , 夏芳 . LNG 储罐国产化的可行性 [J]. 天然气工业 , 2010, 30(7): 80-82.
HUANG Qun, XIA Fang. A feasibility study of China-made LNG storage tanks[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(7): 80-82.

[11] 崔文亮 . LNG 储罐应用现状与问题研究 [J]. 中国化工贸易 , 2019, 11(23): 10.
CUI Wenliang. Application status and problems of LNG storage tanks[J]. China Chemical Trade, 2019, 11(23): 10.

[12] 彭京旗 . 大型 LNG 低温储罐施工技术 [J]. 石油化工建设 , 2005, 27(4): 12-14.
PENG Jingqi. The construction of large scale LNG storage[J]. Petroleum and Chemical Construction, 2005, 27(4): 12-14.

[13] 常旭宁 . LNG 薄膜储罐在亚洲的应用 [J]. 煤气与热力 , 2020, 40(6): 17-20.
CHANG Xuning. Application of LNG membrane storage tanks in Asia[J]. Gas & Heat, 2020, 40(6): 17-20.

[14] 张超 , 扬帆 , 屈长龙 . LNG 储罐大型化及国产化发展趋势分析 [C]//2014 年第三届中国海洋工程学术年会论文集 . 宁波 : 中国造船工程学会近海工程学术委员会 , 2014: 133-140.
ZHANG Chao, YANG Fan, QU Changlong. Analysis on development trend of large-scale and nationalization in LNG storage tank[C]//Proceedings of the Third Annual Conference of China Ocean Engineering in 2014. Ningbo: Offshore Engineering Academic Committee of China Shipbuilding Engineering Society, 2014: 133-140.

[15] 季超 , 杨琴 . 中国建造薄膜罐可行性分析 [J]. 石油规划设计 , 2016, 27(3): 24-26.
JI Chao, YANG Qin. Feasibility analysis of the construction of the membrane tank in China[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2016, 27(3): 24-26.

[16] 韩猛 . 国内薄膜型 LNG 储罐可行性分析 [J]. 石化技术 , 2019, 26(7): 168-169.
HAN Meng. Feasibility analysis of membrane type LNG storage tanks in China[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(7): 168-169.

[17] 章泽华 , 张奕 , 艾绍平 . 薄膜型 LNG 储罐 [J]. 石油工程建设 , 2013, 39(3): 1-3.
ZHANG Zehua, ZHANG Yi, AI Shaoping. Membrane-type storage tank: A new type of LNG tank[J]. Petroleum Engineering Construction, 2013, 39(3): 1-3.

[18] 吴峤 . LNG 储罐基础设计浅析 [J]. 天津化工 , 2015, 29(2): 53-56.
WU Qiao. Analysis the LNG storage tank foundation design[J]. Tianjin Chemical Industry, 2015, 29(2): 53-56.

[19] 赵建宇 , 邹振山 , 李毅 , 等 . MARK Ⅲ薄膜舱模拟舱划线作业精度控制研究 [J]. 江苏船舶 , 2021, 38(1): 33-35.
ZHAO Jianyu, ZOU Zhenshan, LI Yi, et al. Research on the precision control of marking operation of MARK III membrane cabin simulation cabin[J]. Jiangsu Ship, 2021, 38(1): 33-35.

[20] 刘硕 , 刘光博 , 刘尚国 , 等 . 激光跟踪仪的测量误差解析与精度仿真 [J]. 测绘工程 , 2021, 30(6): 21-26.
LIU Shuo, LIU Guangbo, LIU Shangguo, et al. Measurement error analysis and accuracy simulation of laser tracker[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(6): 21-26.

（修改回稿日期 2022-10-10 编辑 何 明）

本文互动

天然气工业 版权所有