

零件)。对异形件或复杂加工需求,无能为力,需依赖其他设备配合。加工类型单一,核心功能集中于钻孔、攻丝等简单工序,难以实现复杂加工(如铣槽、镗孔或3D轮廓加工)。通过增减伺服轴模块、末端执行器(如夹具、工具头)快速扩展功能。现代数控加工中心可通过换刀和编程完成多工序集成,自动化多轴器通过编程实现复杂加工、空间避障等,进而更好地适应多样化产品需求。

1.3 传统多轴头技术的不足

传统多轴头缺乏数控系统的柔性化控制,无法通过编程快速切换加工参数或路径。难以集成自动化功能(如自动换刀、在线检测),限制了智能化升级潜力。此外对操作人员技能要求高,需熟悉机械调整、刀具选型和故障排查。在高精度需求场景下的不足。自动化多轴器柔性产线集成可与其他自动化设备(如AGV、视觉系统)无缝对接,形成灵活的生产单元。自动化多轴器利用“伺服驱动+闭环控制”可实时反馈位置、速度、力矩,动态修正误差(如振动补偿)。操作人员标准化操作流程,通过程序预设和向导式参数输入,普通员工也可以完成复杂任务。

精度依赖调试,各轴同步性需精细调整,维护成本较高可能涉及长期使用后的磨损,导致精度下降,需要频繁校准调试与维护成本高。初始调试复杂,各工作轴的同步性(转速、进给一致性)需依赖经验丰富的技工进行精细校准,调试不当会导致加工误差(如孔位偏移)。维护频繁-机械传动部件(齿轮、链条、皮带)易磨损,需定期更换和润滑,否则会影响加工精度和设备寿命。自动化多轴器的智能算法支持路径优化、碰撞检测、负载自适应调节(如力控打磨)。可通过传感器(振动、温度、压力)实时监控设备健康状态,预测性维护。

1.4 能耗与空间的占用

在传统多轴器多轴同步运行时,主电机负载较高,可能导致能耗效率低于分散式单轴加工(尤其在低负载工况下)。体积庞大,若需搭配分度盘或多工位夹具,会进一步占用车间空间。

综上可使传统多轴器与数控自动化编程技术实现更复杂的加工路径和自动化控制来弥补其缺点。

2 自动化多轴器设计的介绍

2.1 自动化多轴器总体构成

此多轴头机构主要由外壳体1、固定盘2、伺服电机3、若干可伸缩传动杆万向节联轴器4、滑轨机构5、旋转盘6和齿轮齿条7组成。外壳体主体由锥台与圆盘构成,壳体内部设有一固定盘用来限制该机构运动时的半径,当运动半径发生变化时固定盘可根据程序需要进行更换,并且适配不同孔型尺寸工件,这样就在更改其他工作程序时缩短多轴头换机时间,降低劳动成本。

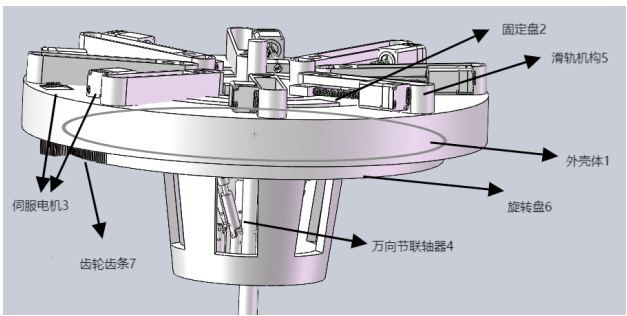


图 2-1 多轴器的组成

2.2 活动盘的选择

在传统多轴器运行过程中,可伸缩轴的数量发生变化又或者需要运行其他程序指令需要减少可伸缩轴的数量时,需要重新编写其他工作指令。这样会浪费有效工作时间和耗费人工成本,为了改变这一弊端,这里利用伺服电机驱动“可旋转活动盘”来控制滑块运动进而控制可伸缩轴的数量。

活动盘主要的作用是当工作中的伸缩轴数量减少时可以利用活动盘把伸缩轴移动到圆盘外侧然后固定住。当多轴器程序发生改变时,利用电机使齿轮齿条结构驱动,当滑块到达活动盘“S”型口的位置时,再次利用电机驱动齿轮同时将滑块移动到外侧不工作的区域。其主要是为了其余可伸缩轴可以继续运行程序,这样就能保证后续多轴器执行程序指令和工作的进行。

2.3 伺服电机的选取

因为伺服电机^[1]只需驱动伸缩轴进行工作进程且要便于其安装在导轨外一侧,所需的驱动力仅克服滑块与导轨之间的摩擦力即可,消耗的功率不大,所以伺服电机的选择一般都是以微小型的为主。经过长时间的查找发现市面上的电机型号非常齐全,在这里伺服电机选择的是SAMS R山社电机(ISO8P-01)

表 2-1 伺服电机型号

种类	机长	轴长	轴径	保持扭矩	重量
IS08P-01	42.5mm	18mm	4mm	0.015N	80g
IS11P-01	46mm	26mm	5mm	0.08N	115g
IS17P-01	58.5mm	21mm	8mm	0.4N	450g
IS23P-01	75mm	21mm	8mm	1.3N	800g

伺服电机利用螺杆机构与不规则滑块进行连接。伺服电机控制机构运行,若机构要开始运行时可通过控制系统发送目标信号,驱动器将目标信号转换为电机可执行的指令,电机收到指令进行驱动与指令,编码器会持续监测电机转子的实际位置、速度、加速度同时反馈信号将通过电缆传回驱动器,驱动器将实际值与目标值进行比对,计算误差并根据误差动态调整输出信号,然后形成闭环控制。

2.4 可伸缩万向节

可伸缩万向节联轴器内部使用花键连接,万向节结构允许两轴间有一定的角度补偿,花键轴的设计提供了轴向移

动范围，补偿了热膨胀、安装误差或机械振动引起的轴向位移。精密加工的花键配合间隙可控制在 0.02~0.05mm 内，减少传动过程中的冲击和振动，花键齿面常采用渗碳淬火或涂层处理，万向节轴承使用高硬度钢或陶瓷材料，集成密封润滑系统，确保花键与万向节在恶劣环境中仍能长期稳定运行。花键磨损后可通过调整伸缩量补偿齿隙，万向节轴承采用标准化件，支持快速更换，降低停机成本。采用高强度合金的轻量化花键轴，结合紧凑型万向节设计，整体重量比传统法兰连接减轻 30%~50%。另外这种连接方式可以根据需要调节长度。自动化定半径多轴器通过多轴同步加工，可一次性完成多个孔位或加工面的作业，相比单轴设备效率提升 3~8 倍。单次循环时间仅为传统单轴设备的 1/5，特别适合大批量生产场景，显著降低单位工件加工成本。每个工作位置都是根据预设的孔数和角度自动定位，同时，需要设计控制系统，能够接收孔数参数，自动计算每个孔的位置，并驱动轴到相应位置。

2.5 滑轨机构部件的设计

滑轨机构内部含有不规则滑块，当电机驱动滑块时，滑块在滑轨机构内开始随指令运动，导轨^[2]一侧开有长方形滑轨方便不规则滑块与伺服电机的连接，伺服电机与不规则滑块这里我选择使用螺杆连接。滑轨机构是一种将电机旋转运动转化为滑块精准直线运动的传动系统，电机通过驱动螺杆旋转，螺杆的螺旋槽与滑块相互作用，将旋转运动转换为滑块的直线运动，配合滑轨机构实现高精度导向。选择梯形螺杆是因为其自锁性好并且成本低，非常适用于垂直升降机构。使用滑动导轨是因为成本较低，但需定期润滑。预紧消除间隙（如过盈配合或弹簧预压），提升定位精度。导程（P）决定速度（ $v = n \times P$ ），其中 n 为转速，直径需满足临界转速与抗弯刚度要求。导轨跨距应≥滑块长度的 1.5 倍，确保抗倾覆能力。电机启动可以通过控制滑块来进行工作程序。

此滑块与滑轨机构的设计需综合考量动力匹配、传动精度、动态响应与可靠性，通过参数化计算与仿真，优化结构。在自动化与智能化的趋势下将重点聚焦于轻量化（碳纤维螺杆）、智能化（集成力传感器）与高集成度（直线电机替代传统传动）。

3 结论

多轴器设计结论如下：

①自动化定半径多轴器通过多轴协同、智能控制与柔性设计，在效率、精度、成本、可持续性等方面展现出显著优势，适用于高精度、大批量或复杂工件加工领域。构建柔性生产线，适应小批量多品种生产需求。

②克服了半径“固定”这一缺点。支持钻孔、攻丝、铣

削、倒角等多种工艺集成，一机多用。实时监控刀具磨损、温度、振动等参数，自动调整加工参数或预警故障。

③自动化加工减少人工干预。内置故障代码库与维护指引，降低了对专业技师的依赖。

表 3-1 多轴头构件具体尺寸

构件名称	具体参数	其他参数
可伸缩万向节联轴器花键套动轴	外径 25mm 内径 14mm 可伸缩范围 170~210mm	内孔精度 H7
壳体	上部半径 100mm 下部半径 80mm 高 150mm 圆盘半径 155mm 圆盘厚度 30mm	
伺服电机	机身长 42.5mm 轴长 18mm 轴径 4mm	保持扭矩 0.015N.m 重量 80g
滑轨机构	长 130mm 圆弧半径 15mm 高 50mm 厚 3mm 不规则滑块 25x25x50 滑块圆孔半径 12.5mm	
活动盘	半径 200mm 高度 50mm	

关键部件（如导轨、轴承）采用重载防护结构，寿命可达 10 万小时以上。模块化组件支持快速更换，例如单个轴故障可在 30 分钟内拆卸维修，不影响整体运行。多轴共享动力系统（如集中式主轴），比多台单轴设备节能 20%~40%。紧凑型设计减少车间空间占用。分体式壳体结构（锥台+圆盘组合，总高 180mm），梯形螺杆+预紧导轨（130×50mm）实现运动转换（导程比传统结构降低 30%），模块化万向节组件（10 万小时寿命 / 0.02~0.05mm 间隙控制），多轴协同效率提升 3~8 倍（单件工时减少至传统 1/5），能耗降低 40%（集中式动力系统）且减少占地 35%，自动补偿系统（温度 / 磨损）与预测性维护技术（MTBF > 10,000h）。加工一致性显著提高（同批次孔径偏差 0.01mm 内），换型时间缩短 90%（从小时级降至分钟级），人工介入减少 80%（单机单班仅需 0.2 人）。随着工业 4.0 的推进，其与数字孪生、云端协同等技术的结合将进一步提升制造系统的智能化水平。

参考文献

[1] 胡幸鸣主编 电机及拖动基础 机械工业出版社 2000

[2] 【英】R.M.韦布 B.D.乔特 编 英国生产工程师学会

[3] 王绍杰 胡潮曾 译 殷鸿梁 校 自动装配图集传送机构 上海科学技术出版社 1980

[4] 第一汽车制造厂工艺装备设计室 编 齿轮传动多轴头设计 机械工业出版社 1979

[5] 尹玉杰 张清双主编 阀门制造工艺 化学工业出版社 2011

Research on the Installation of Bolted Water Tank

Huahceng Liu

China Petroleum Engineering Construction Co., Ltd., Beijing, 100120, China

Abstract

This paper takes the Basra Natural Gas Processing Plant Project (BNGL) in Iraq as an example to introduce the bolted tank installation process in the water treatment area. The study focuses on quality control during construction, covering bolt torque standards, tank circularity measurement, sealant application, liner installation, and overall assembly procedures. It specifically explores the impact of tank expansion on sealing performance and proposes optimized construction techniques to enhance structural stability and long-term sealing integrity. The findings demonstrate that the bolted tank structure effectively reduces labor and equipment requirements, improves installation efficiency, shortens the construction period, and lowers project execution costs, providing a valuable reference for similar engineering projects.

Keywords

Bolted tank; Installation process; Sealing performance; Construction optimization; Iraq BNGL project

螺栓连接水罐安装研究

刘化成

中国石油工程建设有限公司, 中国 · 北京 100120

摘要

本文以伊拉克巴士拉天然气处理厂项目 (BNGL) 为例, 详细介绍了水处理区原水罐的螺栓连接安装工艺。研究围绕螺栓拼装罐的施工质量控制展开, 涵盖螺栓扭矩标准、罐体圆度测量、密封胶应用、内衬安装及整体施工流程。重点探讨了罐体膨胀对密封性能的影响, 并提出优化施工工艺以提升结构稳定性和长期密封性的措施。研究表明, 螺栓连接结构能够有效降低人员及设备需求, 提高施工效率, 缩短工期, 同时降低项目执行成本, 为类似工程提供了可行性参考。

关键词

螺栓罐; 安装工艺; 密封性能; 施工优化; 伊拉克BNGL项目

1 引言

巴士拉天然气公司 (BGC) 是由伊拉克南方天然气公司、荷兰壳牌公司和日本三菱商事组成的联合体公司, 该公司的运营由荷兰壳牌公司主导。巴士拉天然气处理厂项目 (BNGL) 由 BGC 开发, 包含两套天然气处理装置 (生产线), 每套装置的处理能力为 2 亿立方英尺 / 天, 总计可增加 4 亿立方英尺 / 天的天然气处理能力, 从而提升 BGC 的整体产能。工厂投运后, 每年可减少约 1000 万吨温室气体排放。

BNGL 是一项重要的天然气项目, 包含 1.5 万吨设备, 这些设备在全球多个地区制造。其中原水罐和消防水罐的设计时采用螺栓连接的结构形式, 这种设计方案非常有特点, 在现场安装过程中, 该方案对水罐安装提出了一个新型、高效的解决方案。

螺栓连接罐相比于焊接罐, 因其安装快捷、无需焊接

以及焊道检测、人员需求低、无需大量吊车台班、维护简易等优点, 在该项目的执行过程中大幅提高了施工工效、人力资源投入和作业周期。然而, 其施工质量直接关系到罐体的使用寿命和密封性能。为此, 本文对其关键施工环节进行深入研究, 旨在提高施工质量, 降低后期维护成本, 并提升罐体的整体安全性。见图 1。



图 1 螺栓连接罐

【作者简介】刘化成 (1983-), 男, 中国黑龙江哈尔滨人, 本科, 工程师, 从事地面建设与油气储运专业研究。

2 施工前准备

2.1 材料储存

材料到货后穹顶面板及封边件应垂直存放，严禁铝板水平放置或直接接触潮湿或吸湿性表面，以避免造成材料腐蚀。材料需覆盖防水篷布进行遮挡，但不得严密包裹于塑料或纸质包装内，以确保通风，防止冷凝水聚积。

内衬材料必须存放于干燥的室内环境，远离任何可能导致其损坏的物品，任何刺破或穿刺内衬的情况都会使其失效，需特别注意存储安全。

厂家要求所有材料的储存期限不得超过6个月，所以在材料到货后需在此期间内展开安装工作。

2.2 混凝土基础检查

检查前需要标记混凝土基础中心点，罐体直径以及确定起始点。沿罐体外圆周线，每隔1米进行一次测量，相邻两个测量点的高差不得超过2.5毫米，直径两端（对称点）之间的高差不得超过5毫米。

3 螺栓连接罐安装

螺栓连接式钢罐的安装顺序是先安装罐底板，再安装罐体。罐体由多层钢板和环圈重叠组装而成。施工顺序为先安装罐底板，其安装遵循“自上而下”的原则，即先安装顶部环圈，然后依次向下组装，并借助顶升装置进行逐步提升。

3.1 罐底板安装

从已准备好的基础中心点开始，标出一个圆，圆的直径等于标称罐体直径加150毫米。标出 0° - 180° 和 90° - 270° 的中心线，确保它们在圆外可清晰识别。安放基础角钢以确认垫片包的位置，并将垫片包安装到正确的半径和水平位置。在罐体圆内铺设沥青砂（8:1:1的比例：砂：沥青：水泥），并用垫片包平整。必须小心确保沥青砂表面平整。中心需略微升高。在铺设地板前，铺设聚乙烯薄膜并覆盖沥青砂。在地板和罐体施工期间，必须特别小心保护地板面板。

先铺设周边板，再从外向内铺设。期间，确保第一排地板板材排成直线再进行紧固。在铺设每张板之前，在螺栓杆周围涂抹密封胶，确保充分覆盖凸出的螺栓。在地板板材与基础角钢之间的接缝区域安装锥形插入件。在紧固螺栓之前，安装整排的面板，使用标准扭矩设置帮助对齐。对所有面板的边缘进行倒角处理。螺母盖需在罐体施工完成并移除顶升设备后再安装。钻孔并安装基础螺栓、PVC隔离垫圈，并密封内部周边接缝。

最上层安装30~50毫米厚隔热层，隔热板安装前需切割出螺栓孔，以便螺栓能够平齐地坐落在下方；然后使用密封胶和泡沫将隔热板粘到钢地板的顶部，留出钢地板边缘至少2米距离，供安装顶部环使用。

3.2 顶部安装

当底板安装完成后，可以开始组装顶部环：定位起始

点（通常是板材的接缝处），将一块板材的中心对准该点，并支撑住板材，直到第二块板材插入第一块板材内部。使用3颗螺栓（干装，无密封胶）将板材固定在底部角钢上，以保持板材竖直。板材边缘需进行准备处理，并在垂直接缝处涂抹密封胶（顶部无密封胶）。放置第二块板材，并在垂直部分固定3颗螺栓。重复以上步骤，直到整个环完全安装完成。

顶部环安装完成后进行穹顶安装，该项目采用的是铝制穹顶，防水自支撑结构，由铝制三角形面板和铝制框架组成。穹顶的组装分为5个步骤：1. 安装穹顶结构。在安装过程中，结构支脚和罐体顶部角钢的采用螺栓固定，需确保绝缘垫片安装就位，以防止金属腐蚀或电化学反应。结构从外侧向中心搭建；2. 安装穹顶盖板；3. 密封穹顶盖板，封边板接缝处使用硅胶材料密封，封边板下方放置密封条以防止昆虫进入罐体；4. 安装附件，包含通风口、检修口、劳动保护等。5. 安装内胆，内胆直接固定在罐顶，随着罐体的安装会逐步展开。见图2。



图2 穹顶安装

3.3 罐体安装

安装罐板前需仔细核对到货材料，明确罐板标记。所有钢板按照安装顺序成套打包，罐板按照顺时针方向拼装，出厂前标有预设编号。罐板拼接方向采用下图3方式：

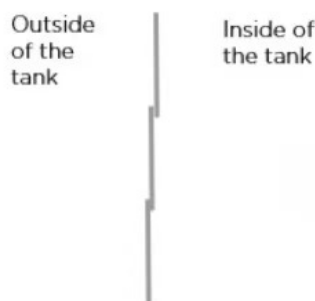


图3 罐板拼接方向

按照编号顺序拼接罐板，直至完成整个环圆。期间，要确保所有钢板切角和底部缺口保持一致，以保证罐体的密封性和结构的稳定性。