

石化钢框架模块化应用研究

邵新龙

连云港沃利工程技术有限公司成都分公司 四川 成都 610000

摘要：模块化建造技术因其在规避项目建设地劳动力短缺，人力成本过高，环保要求苛刻等不利因素方面所具有的独特优势，一些发达国家的大型油气公司已经大量采用这一建造技术，而国内因较低的人工成本和超高的生产制造能力，不仅吸引着其他国家石化企业将设计与生产制造工作转移进来，同时推进着模块化建造技术在国内的加速发展。本文旨在为模块结构工程提供指导，它讨论了工业中陆上结构模块的陆运和吊装考虑因素，并提供了实施结构工程的必要细节。

关键词：石化；钢框架；模块化

引言：模块化技术的应用改变了传统工程项目的执行方式，即改变了传统的设计、采购、施工配合模式，并且贯穿于项目前期、招投标、策划、基础工程设计、详细工程设计和施工安装等不同阶段。目前国内石油化工工程项目模块化技术的应用尚处于探索期，也缺乏相应的法律法规和标准规范，仅外资公司因其资源优势掌握的更细致。

1 模块化的意义

石油化工模块化是根据工艺流程特点，结合总图运输和设备布置，将工艺装置切分成一定数量的、具有一定功能的工艺模块，每个工艺模块将该单元内相关的设备、管道、电气设施、仪表设施以及支撑件等集成到模块结构框架内进行设计、制造，并将模块在制造厂内进行预组装及初步调试，再通过海运或者陆路运输，将模块运送到项目现场进行安装、调试并投产运行。项目模块化的最终目的是在满足工艺要求、安全可靠、经济合理、整齐美观、操作方便、检维修方便等方面的前提下，还应满足所有模块的预制、运输和安装要求，同时保证模块与模块之间、模块与非模块之间界面的精准对接，尽量减少现场工作。

2 陆地运输

进行陆运分析的目的是确保要运输的模块结构能承受运输过程中施加的加速度^[1]，而不会出现构件过度受力或不可接受的变形，并始终满足一般运输系统稳定性要求，陆运包含卡车/拖车运输，PMT/SPMT运输及铁路运输，其中铁路运输因其尺寸限值实际运用很少，在此不做说明。

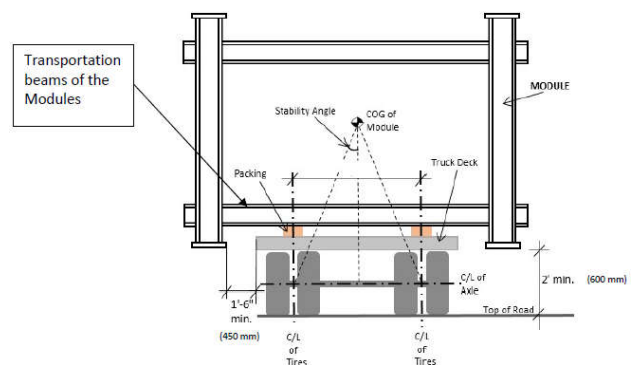
2.1 卡车/拖车运输

一般来说，这些设备用于撬装和轻型模块，以及需要较长距离移动模块的地方。由于卡车/拖车的速度较快

（与PMT/SPMT相比），运输模块会受到较大的力。在进行详细工程设计之前，物流/重型运输承包商应审查项目的具体间隙是否满足运输要求。

2.2 PMT/SPMT运输

PMT/SPMT是自推进式模块运输车的缩写，PMT不带动力装置，SPMT配备动力装置，两者均具有极高的机动性，每个轮胎组/车轴均可旋转，使设备能够在任何方向上纵向、横向、蟹形（角度移动）、旋转（围绕中心轴旋转）和转盘（围绕任意点旋转）。对于较长模块的运输，可将不同的PMT/SPMT连接在一起，形成4轴或6轴的长模块，以适用于各种尺寸的模块运输。另外，这些装置均采用液压连接，能够将力均匀地分散到地面上。



典型的陆运布置

2.3 基本的陆运分析方法

不管是哪种运输方式，其运输的所有模块均应针对静荷载和以下动态水平荷载进行设计。

2.3.1 风压

陆地运输过程中的风压通常用于确定施加在拖车上的动态载荷，而不是用于模块本身的设计。模块结构表面的风压决定了产生的风力。风压的近似值为：

$$\text{压力} = 1/2 \times \text{空气密度} \times \text{风速}^2 \times \text{挡风系数}$$

风力 = 风压 × 车厢长度 × 车厢高度 × 挡风系数

风矩 = 风力 × (货物高度的一半 + 平台拖车高度 - 车轴高度)

2.3.2 离心力

当运输系统在道路弯道行驶时会产生离心力。离心力取决于物体的质量、速度和弯道半径，物体所受离心力的计算公式为：

$$\text{离心力} = m \times v^2 / r$$

其中，"v"为速度 (m/s)，"r"为曲线半径 (m)。由于速度和转弯半径不同，使用这一公式非常不切实际，因此建议考虑一个影响系数，以涵盖最可能发生的情况。常规运输（一般货物）和自行运输的影响系数是不同的。

I. 常规运输：（用于较小构件）

平均最小弯道半径：60m

通过弯道的平均最高速度：60km/h (= 16.7m/s)

II. 自行运输：(PMT/SPMT)

SPMT 平均最小曲线半径：8m

SPMT 最高速度：5km/h (= 1.389m/s)

2.3.3 加速/减速

加速或减速力发生在运输工具的驱动方向上，由加速、制动和惯性引起。物体所受的加速/减速力计算公式为：

$$\text{加速度力} F = m \times v / t$$

其中，"v"是速度 (m/s)，"t"是时间 (s)。

例如对于使用 SPMT 的移动，我们认为带负载的最大速度为 5.0km/h (1.39m/s)，制动后的停止时间为 3s。

$$\text{则加速度力} = m \times 1.39 / 3.0$$

陆路运输应考虑以下主要荷载组合对结构构件进行分析：

1.0G+1.0Q+1.0E——用于构件挠度检查

1.3G+1.3Q+0.7E——用于最大压缩情况下的构件和连接设计

1.0G+1.0Q+1.3E——用于最大拉力情况下的构件和连接

G：永久荷载，所有重力净荷载

Q：可变荷载，因加速度和离心力产生的荷载

E：环境荷载，风荷载

2.3.4 加速度参数

加速度力发生在运输模块的纵向和横向，由惯性引起。根据运输工具的不同，加速度也各不相同。在没有具体项目数据的情况下，运输分析建议使用以下加速度参数，但在最终设计之前，运输承包商应对这些参数进

行确认。

方向	卡车/拖车	SPMT
纵向加速度	0.5g	0.05g
横向加速度	0.8g	0.02g
垂直加速度	+/-0.2g	不适用

2.4 构件设计要求

对于陆地运输过程中的关键模块支撑构件，在初步设计阶段，构件利用率最好限制在 0.7 以内，而在详细设计阶段，当重量和结构重心已有较高精度时，构件利用率可以限制在 0.9 以内。设计时不建议充分利用运输梁，因为最终的运载量和拖车位置可能会因实际运输条件而略有不同。作为初步指导，构件设计应遵循以下挠度限值：

轻型模块的横向挠度 = H/150

中型和重型模块的横向挠度 = H/200

梁的垂直挠度 = W/240

以上限制仅作为建议，可能会根据项目的具体要求和结构设计可用输入的成熟度而有所变化。

3 吊装分析

结构吊装分析是针对结构上所有可能的自重进行的，目的是找出结构上合适的吊点、起重机的吊钩位置和吊索载荷，确保结构构件本身和吊耳在吊装过程中保持在允许的应力范围内。

负责模块设计的工程师必须确定首选的吊装配置（起重机数量和索具安排），并征得项目施工团队的同意。最终的吊装计划应在吊装承包商选定后由其确认，采用的配置必须与设计假设一致。

3.1 吊装布置选择

根据模块的尺寸和重量、吊装承包商的偏好和可用性，可以采用不同的吊装布置。

吊装布置可分为 4 点式、8 点式和全点式，各有其优缺点，可根据项目情况进行选择合适的吊装布置。

4 点式/8 点式吊装应索具倾斜会导致吊点受到垂直和侧向力的共同作用，在结构布置时，可能需要设置临时的垂直支撑以确保吊装过程中的结构完整性，这将导致用钢量的增加。同时，结构分析时也需要对代表性索具进行建模，导致结构分析变得复杂；全点式吊装吊点主要承受垂直力，吊装过程中的全点支撑无需增设额外的垂直支撑，从而减少了操作或维护时的障碍，用钢量也相应减少。结构分析时也无需对代表性索具进行建模，简化了结构分析。

吊装设计中应避免使用 6 点式吊装，因为这种布置很难在吊装过程中保持模块的平衡。从施工和物流的角度来看，在可能的情况下，可采用利用吊架的全点垂直吊

装方式以优化结构设计。全点垂直升降机可将升降载荷均匀地分配到所有框架上，从而避免在升降过程中使用临时支撑。

3.2 吊装分析因素

在进行吊装分析时，应对吊装的载荷应用适当的系数^[2]，以考虑在计算模块重量和模块重心等方面产生的误差。下表列出了根据一般行业准则建议用于吊装分析的荷载系数及计算示例，设计中使用的放大系数应是这些适用系数的乘积。

吊装系数	取值	
重量放大系数	$W \leq 100T$	1.05
	$W > 100T$	1.10
动态放大系数	$3T < W \leq 100T$	1.10
	$100T < W \leq 300T$	1.05
	$300T < W \leq 1000T$	1.05
重心不确定系数	$W \leq 100T$	1.05
	$W > 100T$	1.10
偏心荷载系数	单吊车	1.00
	双吊车	1.05
倾斜荷载系数	简单的确定性的吊装绳索布置	1.00
	吊装绳索布置包含2个或以上吊梁	1.10
	复杂的不确定性的吊装绳索布置	1.25
后果系数	未进行负荷试验的起重设备（如吊具框架或吊梁、卸扣等）	1.30
	吊点，包括与结构连接的附属设施	1.30
	直接支撑吊点的构件	1.15
	其他结构构件	1.00
横向吊点载荷	作用点最大吊索力的 3%	

例：模块重量小于100吨的吊装影响系数计算：

适用于吊点，包括与结构连接的附属设施

影响因子 $A = 1.05 \times 1.1 \times 1.05 \times 1.1 \times 1.00 \times 1.3 = 1.75$

适用于直接支撑吊点的构件

影响因子 $B = 1.05 \times 1.1 \times 1.05 \times 1.1 \times 1.00 \times 1.15 = 1.53$

其他结构部件

影响因子 $C = 1.05 \times 1.1 \times 1.05 \times 1.1 \times 1.00 \times 1.00 = 1.33$

吊装分析应考虑以下主要荷载组合对结构构件进行分析：

1.0×模块重量——用于构件挠度检查

1.0×影响因子A×模块重量——用于吊耳设计和最大吊索力计算

1.3×影响因子B×模块重量——用于直接支撑吊点的构件和连接设计

1.3×影响因子C×模块重量——用于第三荷载组合中

未涉及的构件和连接设计

注：与上述荷载组合相关的钢材料系数应等于或大于 $\gamma_m = 1.15$

3.3 构件设计要求

在初步设计阶段，构件利用率最好限制在 0.7以内，而在详细设计阶段，当重量和结构重心已有较高精度时，构件利用率可以限制在0.9以内。以上限制仅作为建议，可能会根据项目的具体要求和结构设计可用输入的成熟度而有所变化。模块结构构件的垂直挠度最好限制在跨度/200之内。

3.4 吊耳

吊耳应根据项目适用的结构设计规范或相关行业准则进行设计，设计吊耳时必须进行以下最低限度的检查：

a) 根据适用的设计规范和卸扣尺寸满足最低几何尺寸要求；

b) 根据适用的设计规范，对吊耳的强度进行检查，包括抗拉强度、抗拉强度、承载能力、抗剪能力、抗弯强度和连接强度；

c) 应根据适用荷载检查焊缝尺寸；

d) 吊耳的所有焊缝都必须进行100%的无损检测（NDT）。

结束语

除正常使用工况和上述简要描述的陆运和吊装工况外，海运工况也是模块化项目中的关键环节，但因其考虑因素较多，需分别考虑模块在船舶中受海浪加速度影响产生的滑移、翻滚、旋转等状态，本文不再做额外介绍，将在以后单独对海运状态分析进行介绍。

模块的各类设计工况、承受的荷载种类及组合的形式是繁多的，合理准确的确定结构承受的荷载大小、作用位置及荷载组合是确保计算结果可靠的关键所在。目前，国内的模块化设计还处于初步发展阶段，这意味着在实施模块化撬装化技术时，可能缺乏统一的标准和规范，导致不同项目之间的兼容性和互换性问题。但我们应该相信，随着石化行业的不断发展和技术进步，钢框架模块化设计标准会逐渐完善。

参考文献

- [1]纪旭,张洪涛.石化钢框架模块化技术应用研究[J].山西建筑,2021,47(18):57-59.
- [2]徐鸿波.石油化工装置大型钢结构模块化吊装技术[J].安装,2019,(03):47-49.