

漂浮式海上风电张力腿平台筋腱选型与防腐蚀论述

鲁进亮¹, 张继彪²

(1. 中交第三航务工程局有限公司 上海 200032; 2. 中交上海三航科学研究院有限公司 上海 200025)

摘要:文章通过对现有的漂浮式平台张力腿筋腱进行调研,简要分析了筋腱类型及优缺点,总结了常见漂浮式平台筋腱防腐蚀措施。在此基础上,探讨了受限于海洋腐蚀环境的两种筋腱提高耐久性的防腐措施,为漂浮式风电深水平平台筋腱选型提供参考和依据。

关键词:漂浮式;海上风电;张力腿;筋腱;防腐蚀

0 引言

风能作为一种清洁、可再生能源正在得到快速开发,受陆上环境区域限制,难以进行大面积开发,故开发的范围由陆地逐步转向海洋,由近海向远海开发是大势所趋,广阔的深海具有巨大开发潜能。海上风电由于传统的固定式平台基础是基于变形和稳定性条件进行设计的,其自重与工程造价往往随海水深度增加而大幅增长,不适用于深水环境。因此,借鉴海洋油气平台技术,采用浮动式结构作为风机、塔筒的承载平台,在深水海域建设风电场已成为各国争相建设和研究的新方向。

漂浮式风电场采用漂浮式基础及锚泊系统将风电机组安置于深海区域。相比于固定式风机,漂浮式风机制造安装成本更低,能适应更深的水深环境,在深远海域具有更加广阔的市场前景。

1 浮式风电 TLP 结构型式

目前浮式风电存在 3 种平台结构型式:半潜式、立柱式和张力腿式(TLP)。张力腿平台是近年来迅速发展的一种新型深水系泊稳定结构,经过几十年的设计生产实践,已被证明具有良好的运动性能,无论是在施工技术还是装备上都已在海外漂浮式风场的建设中取得了良好的示范效果。

海上漂浮式风电 TLP 的概念最初来源于深海张力腿采油平台。现阶段 TLP 已发展出传统型、迷

你型、延伸式 3 种结构型式。

漂浮式风电场采用 TLP 结构型式具有 4 个优点:①结构重量小;②陆上风机组装;③稳性佳;④无主动压载设备。以 Blue H 为例,Blue H 是世界上首座漂浮式风电项目,也是首座采用 TLP 结构型式的漂浮式风电项目。该项目于 2009 年在意大利海岸建成,采用了 2 叶风机,上部结构由 6 个侧立柱和中央的 1 个风机塔承台构成,基础型式采用 660 t 的混凝土重力式基础^[1]。

2 TLP 结构筋腱类型

TLP 锚泊系统主要包括筋腱和锚固基础两部分,TLP 主要依靠锚固基础来抵抗结构受到的较大的竖向荷载,其锚固结构型式包括桩基、重力式基础和吸力锚基础^[2]。由于 TLP 结构受到的浮力远远大于结构自重,而抵消自重后的剩余浮力与预张力相平衡,该预张力最终作用在锚泊系统上,造成筋腱时刻处于张拉的绷紧状态,这使得锚泊系统的锚固基础及筋腱设计选型变得十分重要。不同的锚固基础选取不同的筋腱类型及材料,由于受海上风电设计寿命影响,整个基础考虑使用寿命在 25~30 a,这对筋腱防腐性能提出非常高的要求。根据《DNV-OS-C101》《DNV-OS-C105》《DNV-OS-E303》等标准规定以及工程应用情况,TLP 筋腱采用的材料主要包括:锚链、钢丝绳、超高分子量

聚乙烯纤维、碳纤维材料及钢管材料等。通过调研发现不同的材料各有优缺点,采用何种材料受多种因素影响,某种材料是否适用于海上风电 TLP 结构,需要根据具体情况进行选择。

2.1 锚链

锚链作为 TLP 平台张力腿筋腱,其结构简单,加工难度小,价格相对便宜,对连接器要求较小,性能稳定,易于施工,但是其耐久性差,抗冲击性能差,介于锚链的高性价比,可通过一些防腐手段实现其长时间腐蚀导致的锚链伸长问题,从而实现锚链在漂浮式风电 TLP 结构中应用。

2.2 钢丝绳

抗旋转钢丝绳可分为单股绳和多股绳,而多股绳从钢丝绳截面特征看又分为圆截面钢丝绳和非圆截面钢丝绳,其中圆截面钢丝绳可再细分为单层股钢丝绳和多层股钢丝绳。FPSO 是英文 Floating Production Storage and Offloading 的缩写,中文译为浮式生产、储油、卸油装置,与水下采油装置和穿梭油船组成一套完整的生产系统,是海洋工程船舶中的高技术产品^[3]。FPSO 系泊用钢丝绳一般要求 10~30 a 的使用寿命。FPSO 系泊系统用钢丝绳大多采用 $\Phi 65\sim 153$ mm 的高强度六股钢丝绳和单股钢丝绳,密封钢丝绳的使用量也在逐渐增加。在系泊系统中,六股绳和多层股钢丝绳可以被认为是一种每隔几年就被更换的“易耗品”,然而处于系泊线中低段的钢丝绳不容易更换。最受欢迎的系泊系统实际上是采用单股钢丝绳,这是因为普通钢丝绳缺乏单股钢丝绳的扭转刚度(抗扭劲度)和抗腐蚀性。采用高密度聚乙烯涂塑的单股钢丝绳能达到 40 a 的使用寿命。钢丝绳的结构选择应根据使用条件而确定。从对国际知名钢丝绳企业海工钢丝绳的调查了解得知,企业根据生产和应用实际,选择不同结构的钢丝绳,有些结构属于非标特殊结构。对于漂浮式风电筋腱如选用钢丝绳,可能需要考虑作为特殊结构进行设计制造。

2.3 超高分子量聚乙烯纤维

通过大量调研了解到,海工船舶领域,纤维缆绝大多数均采用超高分子量聚乙烯这种材料作为系泊缆绳,但其实际使用寿命在 8~10 a,且长时间

承载会发生永久性变形,使绳索变长,从而影响筋腱的预张力,也会影响纤维材料的力学性能。采用超高分子量聚乙烯纤维作为漂浮式风电平台用筋腱,需要考虑绳索永久变形伸长对预张力影响,同时在即将到寿命期后可更换性及性价比等问题。

2.4 碳纤维及其复合材料

碳纤维及其复合材料具有高比强度、高比模量、耐高温、耐腐蚀、抗蠕变、导电、传热和膨胀系数小等一系列优异性能,但其横向抗剪强度很低。在工程界越来越多的使用碳纤维产品,尤其是碳纤维增强复合材料缆索,已有大量工程成功应用案例。采用碳纤维复合材料作为 TLP 平台张力腿的筋腱材料,不但要解决缆索两端的锚具和平台结构摆动带来的轴向剪应力,同时还要解决使用过程中防砂保护层、防鱼类咬食及海上漂浮物撞击带的轴向剪切力等。虽然目前碳纤维材料越来越多的得到应用,技术也越来越成熟,同时国外的一些 TLP 漂浮式风电概念设计也提出采用碳纤维材料作为筋腱材料,但目前采用碳纤维材料应用在 TLP 漂浮式风电的筋腱仍然有许多问题没有解决,安全风险很大。

2.5 钢管

采用钢管作为筋腱其安全性和稳定性高,加工工艺简单,制造成本低,其本身重量可以采用两端密封的方法解决,防腐方面,潮差段表面采用喷涂重防腐涂料或玻璃钢+防腐层包覆的方式进行防腐^[4],水下同时采用阳极块进行保护,技术相对来说都比较成熟。就目前而言,钢管筋腱的可靠性、安全性都是最高的,采用钢管作为 TLP 平台的筋腱是最可靠的。但钢管筋腱两端连接装置是最大问题,国内没有相关产品,国外相关产品也甚少,且价格昂贵,即使自主研发也需要对其进行多方面验证,短期内无法得到工程推广应用,目前阶段可能受限于此连接装置的问题,钢管筋腱无法得到应用。

3 TLP 筋腱材料选型与防腐

筋腱选用受当前生产制造技术、性价比、材料耐久性等因素影响,选择筋腱需要综合考虑,才符合漂浮式风电稳健发展。在上述 5 种类型的筋腱材料中,其中锚链、钢丝绳、钢管 3 种受海洋腐蚀影响严重,限制其推广使用。实际上,每种筋腱材料均可

以通过系列防腐措施提高其耐久性,从而满足工程应用寿命要求。钢管防腐技术较为成熟,且目前两端连接器问题,使用受到一定限制,故不再介绍。本文主要针对锚链、钢丝绳两种可能用于漂浮式风电张力腿筋腱进行耐久性改进分析,并提出改进建议。

3.1 锚链耐久性改进措施

锚链在未使用时,各链环是活动的,作为张力腿筋腱使用时,基本是笔直不动的,此时状态类似一条钢筋,只是表面积较大。表面积越大受海洋腐蚀的风险越大,锚链作为筋腱必须采取一些手段改进其耐久性。

热喷涂铝涂层保护锚链在海洋石油张力腿平台上有较多应用。Hutton TLP 平台 1984 年投产,其张力腿采用热喷涂铝涂层保护,在经过 8 a 的应用后涂层均未发生失效问题,仍有效保护筋腱。设计寿命达 50 a 的 Heidrun 张力腿平台也采用了热喷涂铝涂层,以期达到防腐蚀可靠,减少维修工作量和长时间保护的目。有试验研究表明 125 μm 和 100 μm 的热喷涂铝涂层分别经过 15 a 和 18 a 的海上暴露试验,表现良好。不同的涂层厚度,保护的周期不同。锚链作为张力腿筋腱,可以通过增加腐蚀裕量,热喷涂铝涂层,同时加焊接牺牲阳极的方法实现锚链张力腿接近 30 a 的使用要求,锚链在环接位置只要不发生腐蚀,即可解决了腐蚀伸长影响张力的问题,从而实现锚链作为张力腿筋腱在漂浮式风电中的应用。

3.2 钢丝绳防腐措施

海工钢丝绳在海洋环境下工作,因遭受海水或海洋气氛的侵蚀,大多要进行防腐处理,常用的防腐方法是制绳钢丝镀锌或钢丝绳涂塑。对于长期锚固的单股钢丝绳,如,作为 FPSO 的锚固钢丝绳,就是在绳外包覆耐海水腐蚀的塑料。为了减少钢丝绳中股与股之间的磨损,提高钢丝绳使用寿命,需要在股间填塑,或在绳芯外涂塑,这样的塑料应

具有耐磨性,但这种耐磨性的塑料能否承受在漂浮式风电基础平台摇摆过程中产生的摩擦力,有待验证。故在没有得到验证的情况,如果采用钢丝绳作为张力腿筋腱,需要解决其耐久性问题。防腐带在海工工程中有较多应用,其防腐性能优异,保护寿命超过 40 a,满足漂浮式风电设计寿命要求。由于钢丝绳较细,热喷涂铝涂层或其他涂层适用性有限,故可选用包覆防腐带加保护壳的结合的方式进行防腐,防腐带不固化,具有一定的延展性,在钢丝绳受力时不会破坏防腐性能,加保护壳主要是固定保护防腐带的作用,基本不受钢丝绳受力情况影响。

4 结语

漂浮式风电发展目前正处于概念设计、物理模型试验、数值计算分析、建设样机阶段,未来漂浮式风机的大规模应用指日可待,相关的深远海风资源开发也将进入新的时代。

现阶段,国内 TLP 只在深海石油平台上应用过,而漂浮式风电的荷载条件、水深与海上石油平台有较大差别。漂浮式风电基础张力腿筋腱的选择,直接影响风电的施工成本及使用寿命。本文通过对几种可能用于漂浮式风电基础张力腿筋腱的介绍,简单分析其应用优缺点,通过对其中受耐久性影响的两种常见材料进行防腐改进建议,为在后续工程中筋腱选型时提供更多选择,以降低施工成本以及基础后期运维成本,提高深海的漂浮式风电使用寿命。

参考文献

- [1] Floating Offshore Wind Market and Technology Review.UK: The Carbon Trust,2015.
- [2] 董艳秋,胡志敏,马驰.深水张力腿平台的结构形式[J].中国海洋平台,2000,15(5):1-5.
- [3] 窦光聚,宋为,王宝玉,等.海工钢丝绳的应用及生产技术研究[J].金属制品,2015,41(6):1-6.
- [4] 乐治齐,林毅峰.海上风机基础钢结构防腐蚀设计[J].中国港湾建设,2013(4):18-22.