

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0001-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.001

预制体外预应力混凝土风电塔施工过程监测

曹雨奇¹, 张明熠², 阳荣昌³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 江苏金海新能源科技有限公司, 江苏 盐城 224400; 3. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 分阶变径预制体外预应力混凝土风电塔在钢绞线张拉前, 各筒段之间依靠自身重力和摩擦力保持整体性。钢绞线张拉顺序对施工过程中结构受力状态的影响尚缺乏研究。本文采用分层壳单元建立混凝土塔筒的分析模型, 模拟了塔筒在钢绞线张拉前及钢绞线张拉过程中的受力状态, 并根据分析结果制定了施工方案。同时, 采用振弦式应变计对钢绞线张拉过程中关键位置的应变进行跟踪监测。结果显示基于分层壳单元的建模技术所得分析结果和实测结果吻合较好, 可以用于预制塔筒的施工过程分析; 而且所制定的施工方案合理, 结构在钢绞线的张拉过程中保持稳定, 可为类似结构提供参考。

关键词: 体外预应力; 风力发电塔; 振弦式应变计; 施工监测; 分层壳单元

中图分类号: TU758.12

文献标志码: A

Monitoring of construction process for a prefabricated external prestressed concrete wind tower

CAO Yuqi¹, ZHANG Mingyi², YANG Rongchang³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China; 2. Jiangsu Jinhai New Energy Technology Co., Yancheng, 224400, China; 3. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: The prefabricated external prestressed concrete wind tower with split and variable diameters keeps its integrity by its own gravity and friction before the steel strand is stretched. There is no previous research about the influence of the stressing order on the stress state of the tower. A layered-shell element model is built to simulate the unstressed state and the stressing process. Construction procedure is developed according to those results. Vibrational chord strain gauges are adopted for monitoring the strain of key positions during the stressing process. It is found that the results produced by layered-shell element model are compatible with those from the field test and it is suitable for construction process analysis of the prefabricated tower. The stability of the structure during the stressing process proves the validity of the construction procedure, which can provide a reference for similar projects.

Key words: external prestressed; wind tower; vibrational chord strain gauge; construction monitoring; layer-shell element.

风电是世界各国实现非化石能源发展目标的最重要的可再生能源。在我国, 为解决风电消纳问题, 风电场分布逐渐由三北地区向中东部低风速区转移。高风塔是低风速区风能开发的必然选择。高风塔对支撑结构的强度、刚度和阻尼提出了更高的要求。这使得在刚度、阻尼、造价和耐久性等方面相对传

统钢筒塔有明显优势的混凝土塔日益受到关注。

分阶变径预制体外预应力混凝土风电塔^[1]是预制混凝土塔和体外预应力技术结合的产物。它的主体由分阶变径预制预应力混凝土筒段和顶部钢筒转接段组成。混凝土筒段竖向固定高度分节, 筒身内部环向均布钢绞线, 钢绞线施加设计预应力, 确保

收稿日期: 2018-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378381)

作者简介: 曹雨奇(1993-), 男, 河北邢台人, 博士, 从事风机支撑结构研究。

混凝土段在风机正常运行工况全截面受压，各接触面完全压紧不脱开。

在结构施工前期，结构预压力有效建立前，混凝土预制段由大到小、从下到上逐段吊装，筒段之间依靠自身重力抵抗弯矩，依靠摩擦力抵抗剪力和扭矩，保持整体性。在钢绞线张拉过程中，由于钢绞线锚点处于筒壁附近，预压力会在结构上产生附加弯矩，使预制段间接触面处在非均匀受压状态。结构高度超过 100 m，且自重较大，国内仍未有针对此类混凝土塔结构的施工过程监测和研究。鉴于此，有必要对施工过程中结构的受力状态进行分析，制定合理的施工方案，并在施工过程中进行监测，以保证施工过程中结构的稳定性。

1 工程概况

本文所研究的风电塔机组额定功率为 3 MW，塔架高度为 117.6 m，其中底部 104.16 m 为预制体外预应力混凝土塔筒，顶部 13.44 m 为钢塔筒。钢筒通过混凝土转接段上的高强螺栓与混凝土塔筒连接。混凝土塔筒由基础现浇段和预制段组成，预制段分为三个直筒段和两个过渡段，每节高 3.08 m。直筒段的截面从下到上分别为 $\Phi 8\,000\times 350$ ， $\Phi 6\,600\times 350$ 及 $\Phi 4\,500\times 400$ ，对应高度分别为 27.72、30.80 及 24.64m，过渡段为锥筒，每个过渡段都由两节预制段组成，每个过渡段高度为 6.16 m。各节配置内外两圈纵向受力筋（非预应力筋），保护层厚度为 50 mm。混凝土筒内部环向均匀布置 16 股钢绞线，钢绞线在从下往上第二个过渡段位置有 1.2° 转折。每股钢绞线施加预紧力 3 200 kN，确保混凝土筒段在正常运行工况下全截面受压。

2 施工过程分析

分层壳单元基于复合材料力学原理，将壳单元分层，各层根据需要设置不同的厚度、材料性质及积分点数，在厚度方向上每一个积分点独立计算应力和应变，已成熟运用于剪力墙^[2]结构的模拟中。鉴于混凝土塔筒配筋和受力与剪力墙的相似性，采用分层壳单元进行模拟，在 ABAQUS 中实现。塔筒从内到外分为三层，依次为内侧保护层，混凝土核心区，外侧保护层，在交接处建立内外两个钢筋层。经过材料非线性分析可发现，当采用塑性损伤本构

时，结构混凝土材料（钢绞线锚固区附近等个别应力集中区域除外）受拉应变未超过受拉峰值应变，受压应力未超过抗压强度的 70%，混凝土未进入塑性，本构接近线弹性。故在本文的分析中，直接采用了线弹性本构，参数取值参考 GB50010-2010(2015 版)混凝土结构设计规范^[3]，具体如表 1 所示。

表 1 材料本构表
Tab.1 Material property

材料	弹性模量 /GPa	泊松比
预制段混凝土	35.5	0.2
现浇段混凝土	32.5	0.2
钢筋	200	0.3

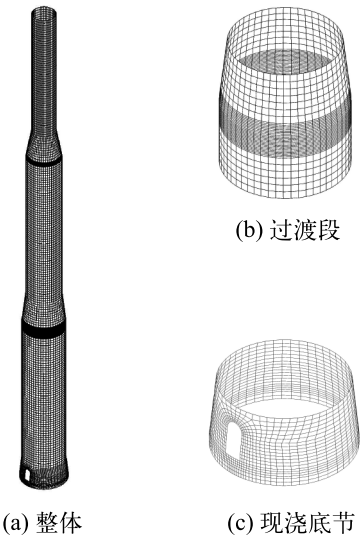


图 1 网格划分

Fig.1 Meshing of this tower

塔身基础部分包含塔门，对网格进行加密，对塔门附近区域采用 Medial axis 算法进行划分，其他区域采用结构化网格（图 1）。单元类型为四节点曲壳单元 S4R，单元个数为 13 094。

为模拟混凝土塔筒未张拉阶段，建立 2 个分析步，第一个分析步施加重力荷载，第二个分析步施加风荷载。

为加快施工进度，考察是否能将一根钢绞线一次张拉到设计预拉力，此时在风荷载组合下结构是否稳定，建立 3 个分析步进行分析，第一个分析步施加重力荷载，第二个分析步施加预紧力，第三个分析步施加风荷载，风向由圆心指被向张拉钢绞线。

按照 GB50135-2006 高耸结构设计规范^[4]计算风荷载，对混凝土塔筒壳表面施加压力，压力分布由解析场定义。按 10 m 高度风压为 0.2 kN/m²，相

当于 17.9 m/s, 属 8 级风。由于张拉完成后钢绞线预应力变化较小, 且不是本文关注的要点, 在模型中不建立钢绞线, 直接在顶部施加压力。在结构顶端中心位置建立参考点, 与顶部壳边缘耦合约束, 在钢绞线锚点位置建立参考点, 与顶部中心位置的参考点采用 MPC 刚性梁连接。采用此方法, 对钢绞线锚点位置施加压力, 同时给结构施加压力和相应附加弯矩。钢绞线在从下到上第二个过渡段有 1.2° 转折, 可以计算出钢绞线对第二个过渡段顶部内筒壁的横向向外的挤压力。在张拉钢绞线的分析步, 同时施加顶部压力和第二个过渡段横向挤压力。

计算结果显示, 在 8 级风下, 混凝土塔筒仍可保证各截面紧密接触, 最不利位置 $\Phi 4\ 500 \times 400$ 段底部迎风侧, 竖向压力由于风荷载作用, 从 0.658 MPa 降低至 0.555 MPa, 这表明, 在未安装钢筒和机头时, 混凝土塔筒可以在自重作用下长时间保持稳定。张拉单根钢绞线时, 各主要截面 $\Phi 4\ 500 \times 400$ 、 $\Phi 6\ 600 \times 350$ 、 $\Phi 8\ 000 \times 350$ 底端距钢绞线最远位置压应力分别降低 0.39、0.0 和 -0.03 MPa。在张拉单根钢绞线同时遭遇 8 级风作用时, $\Phi 4\ 500 \times 400$ 底部迎风侧 (同时为距钢绞线最远位置) 压力降至 0.165 MPa, 结构仍可保持稳定。钢绞线一次张拉到位, 会造成最顶部 $\Phi 4\ 500 \times 400$ 第一段和第二段、第二段和第三段之间局部脱开, 脱开面积分别约为 15% 和 9% (未受风荷载时), 若按连续体计算, 产生的最大拉应力约 0.2 MPa, 此位置由于处于顶部受风载小, 随风载增大应力变化可忽略, 在 8 级风下, 应力云图如图 2 所示。

分析结果表明, 可以将单根钢绞线一次张拉到设计预拉力值, 但不宜连续张拉相邻位置钢绞线, 以防止结构在钢绞线偏心预拉力和风荷载作用下预制段接触面脱开。最终拟定的张拉方案为: 钢绞线

一次张拉到位, 张拉完一根后接着张拉与它中心对称的钢绞线, 再张拉这两根钢绞线连线垂直平分线上的两根钢绞线, 完成一组 4 根钢绞线的张拉, 以此方法完成 4 组 16 根钢绞线的张拉。考虑后一次张拉造成的混凝土压缩会导致之前张拉钢绞线产生预应力损失, 对前 15 次张拉的钢绞线进行超张拉, 张拉力从 3 332 kN (第一根) 递减到 3 209 kN (倒数第二根)。最后一根钢绞线张拉到 3 200 kN。

本塔张拉于 2017 年 12 月进行。分四个批次张拉 16 根钢绞线。将门洞处左 (东) 侧第一根钢绞线编为 1 号, 顺时针依次编号, 实际张拉顺序为: ⑩ ② ⑥ ⑭ / ⑪ ③ ⑤ ⑦ / ④ ⑫ ⑬ ⑧ / ① ⑨ ⑬ ⑤, 如图 3 所示。张拉期间, 当地风速未超过 5 级。

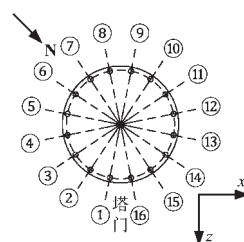


图 3 钢绞线编号

Fig.3 Numbering of strands

为模拟钢绞线张拉过程, 建立 17 个分析步, 第一个分析步施加重力荷载, 剩余 16 个分析步按拟定施工顺序依次施加预紧力。压力大小统一为 3 200 kN, 这样对于超张拉的钢绞线, 误差最大为 3%, 在可以接受的范围内, 同时最终受力状态与实际一致。

3 现场实测

3.1 实测原理

振弦式应变计已成熟运用于钢结构^[5]、混凝土结构^[6]、预应力混凝土结构^[7]的施工过程监测, 并取得了良好的效果。应变计利用弦振频率与弦张力的变化关系测量所在位置应变, 频率信号不受电缆长度影响。本工程顶部测点距离采集箱距离较远 (70 m 左右), 因而采用振弦式应变计对施工过程进行监测, 测量结构关键位置混凝土的应变。

应变按如下方式计算:

$$\varepsilon = (f^2 - f_0^2) * k + (\alpha_1 - \alpha_2) \times (t_1 - t_0)$$

式中: f 为当前频率; f_0 为初始频率; k 为仪器标准系数; α_1 为钢弦的温度膨胀系数, $12.2 \mu\text{e}/^\circ\text{C}$; α_2 为其他材料的温度膨胀系数, 如混凝土取 $10.4 \mu\text{e}/^\circ\text{C}$; t_1 为当前温度; t_0 为初始温度。

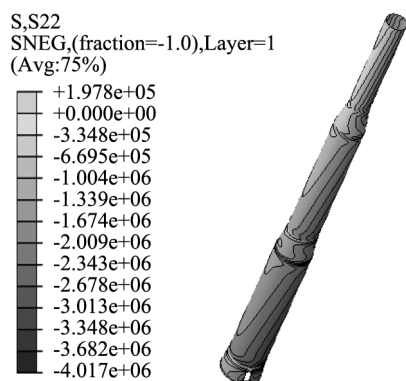


图 2 单根钢绞线张拉后竖向应力云图

Fig.2 Vertical stress contour plot after stressing of single strand

3.2 测点布置

根据初步分析判断,将应变计布置在受力较大的混凝土塔筒过渡段底部,同时在现浇基础段的塔门顶部、底部和侧壁布置3个应变计。应变计的具体分布和编号见图4。 $\Phi 8\,000\times 350$ 段顶部为s组,共4个应变计,全部竖直放置;第一过渡段底为t1组,共7个应变计,其中5个平行于筒壁纵向受力筋放置,2个平行于筒壁环向加强筋放置;第二过渡段底为t2组,共7个应变计,5个平行于筒壁纵向受力筋放置,2个平行于筒壁环向加强筋放置。

3.3 测量过程

在预制段制造过程中,将振弦式应变计埋入混凝土中。由于采用了预制的钢模板,无法直接将信号线引出模板。先将振弦式应变计的信号线藏入焊在钢筋骨架上的预埋管中,在拆模后找到预埋管口,将信号线取出。用手持式读数仪检查应变计的活性并记录频率和温度作为初值 f_0 和 t_0 。然后连接四芯

屏蔽电缆,将电缆预留足够长度,盘起固定到筒壁内侧的预埋件上。经过预制段运输和吊装两个步骤,在混凝土塔筒各节吊装就位后钢绞线张拉前,将电缆沿着爬梯释放到底层地坪。最后将电缆与采集箱连接,完成振弦式应变计监测系统的搭建。该监测系统不仅可用于施工过程监测,也可用于安装完成后运营阶段的长期结构健康监测。张拉过程中采集箱全程进行采集,采样频率为每2 min一次。

4 实测结果及与分析结果对比

张拉过程中通过关注结构关键部位应变变化对结构进行监测,使整个张拉过程在可知可控的条件下进行。张拉全过程各测点应变变化稳定。

$\Phi 8\,000\times 350$ 段顶部s-2测点应变结果如图5所示,从图中可以看出,在张拉前期,没有在全截面形成均匀预压力时,应变的增长并不稳定,不完全符合上小下大锥筒段底端内侧应变大、外侧应变小的理想情况。

过渡段t1和t2应变变化规律相似,在此给出第二过渡段t2实测应变结果与有限元分析结果的对比,如图6所示。各测点数据变化趋势与有限元分析结果一致,其中测点t2-1-v结果最接近,测点t2-4-v结果偏差较大。

筒门顶、筒门侧壁及筒门底应变结果与有限元分析结果对比如图7所示。需指出,在筒门顶部监测到了微裂缝的产生,根据微应变值和应变计标距,可估算出裂缝的宽度约为0.03 mm,在规范^[3]允许范围,不会对结构安全性产生影响。

实测结果和有限元模拟结果均显示,上部混凝土塔筒应变处于 $-400\sim +110\mu\varepsilon$ 范围内,而现浇基

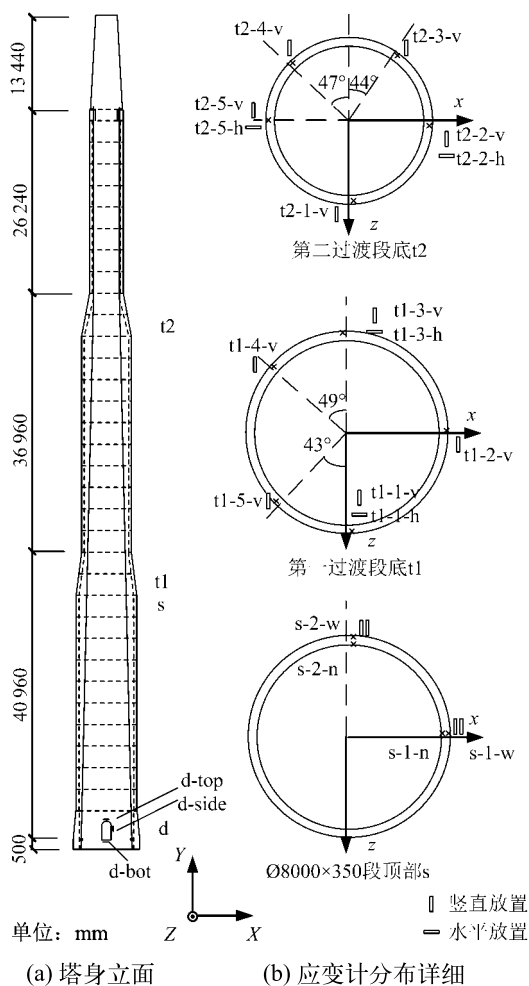


图4 应变计分布图
Fig.4 The distribution of strain gauges

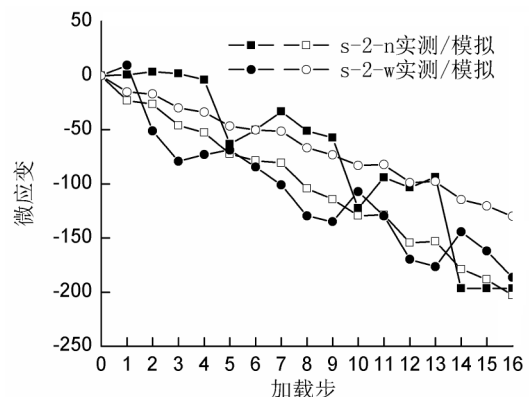
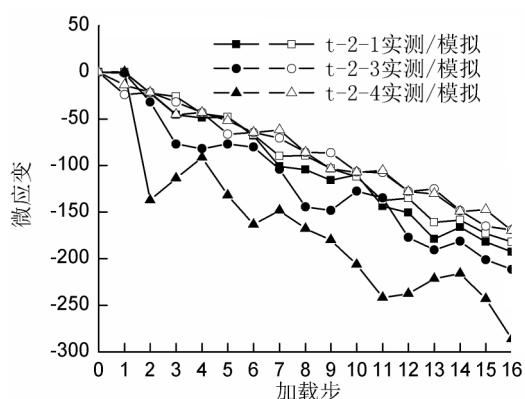
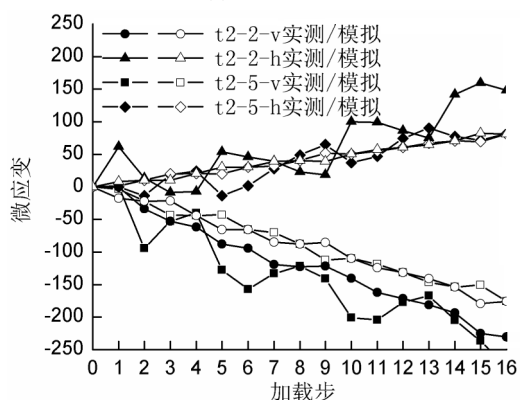


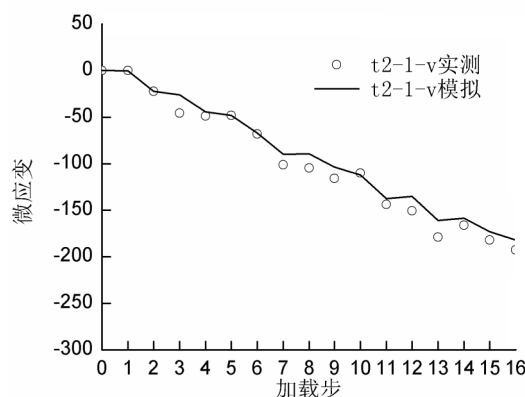
图5 张拉阶段 $\Phi 8\,000\times 350$ 段顶部测点实测值与模拟值对比
Fig.5 Comparison of measured strain and calculated one for the top of section $\Phi 8\,000\times 350$



(a) t2-1/3/4-v



(b) t2-2/5-v/h



(c) t2-1-v(从(a)中提取)

图6 张拉阶段第二过渡段测点实测值与模拟值对比
Fig.6 Comparison of measured strain and calculated one for the 2nd transition section

础部分个别位置(d-top)实测表明产生了微裂缝,有限元分析结果基本与实测结果符合且仍在弹性范围内,这表明有限元计算中混凝土材料采用线弹性本构是合理的。

5 结论

1) 采用分层壳单元验算了施工过程中未张拉阶段和张拉过程中混凝土塔筒的受力状态,并制定了

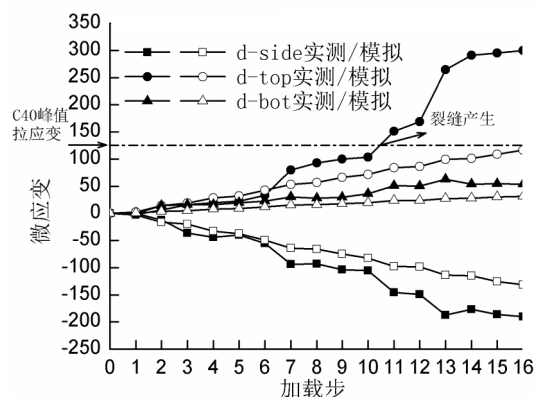


图7 张拉阶段现浇基础段测点实测值与模拟值对比
Fig.7 Comparison of measured strain and calculated one for the base section

“单根一次张拉到位,中心对称成对张拉”的施工方案。采用振弦式应变计进行监测,振弦式应变计信号稳定,测点应变随张拉进行稳步变化,这说明张拉过程中结构保持稳定,施工方案合理。

2) 采用分层壳单元模型模拟张拉过程,有限元分析结果各测点数据变化整体趋势与实测结果一致,个别测点结果误差较大,推测原因可能为混凝土材料离散型较大,模型对钢筋对混凝土约束作用考虑欠缺,模型在厚度变化不连续位置无法反映实际受力情况。总体来说壳单元模型定义直观、计算效率高、结果合理,可以用于此类预制预应力混凝土筒式结构整体结构层次的数值模拟。

参考文献

- [1] LOCKWOOD J D, LOCKWOOD W D. Precast concrete post tensioned segmented wind turbine tower; U.S. Patent 9175670 B2[P]. 2015.
- [2] 廖志伟,陆新征,叶列平. 分层壳单元在剪力墙结构有限元计算中的应用[C]// 中国建筑学会建筑结构分会混凝土结构基本理论和工程应用学术会议. 2006.
- [3] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范(2015版)[S].
- [4] GB50135-2006, 高耸结构设计规范[S].
- [5] 张慎伟,楼昕,张其林. 钢结构施工过程跟踪监测技术与工程实例分析[J]. 施工技术, 2008, 37(3): 62-64.
- [6] 程瀛,邵泉,李敏健. 大梁施工过程的监测应用与分析[J]. 施工技术, 2016(S1): 553-556.
- [7] 杨雅勋,李子青,郝宪武,等. 预应力混凝土连续刚构桥主梁应力测试技术研究[J]. 铁道建筑, 2007(8): 1-4.

(责任编辑 王利君)