

海底管道整体屈曲分析方法研究

刘黎明^{1*}, 徐东², 高晓雷², 白英¹, 刘斗来¹

(1. 中国石油管道局工程有限公司天津分公司, 天津 300457;

2. 中油管道建设工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要:通过研究管道屈曲机理及影响因素, 归纳整体屈曲的设计分析方法, 运用计算机软件 MATHCAD 对某海底管道工程实例进行研究分析, 总结海底管道整体屈曲发生的基本规律。

关键词:垂向屈曲; 侧向屈曲; 屈曲波长; MathCAD

中图分类号: TE88

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)06-0212-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.06.051

Analysis methods on whole buckling of seabed pipeline

LIU Li-ming¹, XU Dong², GAO Xiao-lei², BAI Ying¹, LIU Dou-lai¹

(1. Tianjin Design Institute, China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Tianjin 300457, China;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang 065000, China)

Abstract: The buckling mechanism and influence factors for pipeline buckling are researched and then the design and analysis methods for whole buckling are summarized. The computational software MATHCAD is used to study and analyze a certain seabed pipeline project practical example, therefore the basis principle for the occurrence of seabed pipeline whole buckling.

Key words: vertical buckling; lateral buckling; buckling wavelength; MathCAD

随着海底管道工程的快速发展, 海洋工程逐步向深水区域开展, 在该区域海底管道设计条件高、需考虑的因素较多。目前, 国内海底生产管线的设计温度均在 100℃ 以上, 并且随着深海开发, 长距离输送也避免不了增大输送压力, 普遍的设计压力在 10 MPa 以上。因此, 管道屈曲分析成为海底管道设计的关键问题。

海底管道的失效方式主要包括稳定性失效、屈服强度失效、疲劳、断裂等, 其中稳定性失效即为海管屈曲。海管屈曲包括局部屈曲(管壁屈曲)和整体屈曲。海管局部屈曲主要由外压或内压、轴向力和弯矩造成, 而管道整体屈曲主要与介质输送压力和温度有关, 因此整体屈曲也被称之为欧拉屈曲。

1 海管屈曲研究现状

海底管道深处海洋底部, 受到波浪、海流、土体的相互作用, 所受环境荷载复杂, 加上高温高压的工作条件, 因此可以说海底管道屈曲失效的影响因素很多。目前, 许多国内外学者针对管道失效的主要影响因素, 通过各种假设进行了广泛研究。

1984 年 Roger^[1] 对海底管道在高温高压条件下的屈曲变形进行了研究, 提出了垂向屈曲的假设模态以及侧向屈曲的 5 种假设模态, 同时提出了屈曲

区域内的变形微分方程, 推导出相应屈曲波长、屈曲轴向力以及屈曲位移幅值的解析公式。Roger 的论文中假设管道不存在初设缺陷, 即材料为线弹性, 屈曲为小坡角。

1988 年, Pedersen 等^[2] 研究埋设条件下高温海底管道在热膨胀和内压作用下垂向屈曲, 解释了管道在温差和初始缺陷共同作用下屈曲机理, 并给出了计算临界温度和最小埋设的数学模型。

1990 年, Palmer 等^[3] 在国际海洋技术大会上提出了海洋管道隆起屈曲校核的设计方法, 给出基于应变设计准则的计算校核方法。假设管道敷设在平整海床上, 管道纵断面上存在山丘凸起的缺陷, 并描述了管道埋设在平整海床上发生初始屈曲的过程。

1994 年 Taylor 等^[4] 对海底管道进行了实验和理论上的研究, 研究了管道初始缺陷对屈曲特性的影响, 并提出了各种不同缺陷模型的实验研究情况。

2004 年 Junes 等^[5] 用有限元方法对管道在温度及压力条件下的变形进行了分析研究。论文中考虑非线性边界条件的影响, 运用了有限元大变形理论对管道屈曲进行分析, 具有积极意义。

2007 年 Yu 等^[6] 建立蛇形管道侧向屈曲的 2D 和 3D 模型, 分析了管道土体的相互作用, 给出了管

道直径、重量以及竖向荷载对屈曲的影响,同时论文对循环水平荷载下的管道屈曲情况开展了研究。

2012年梁光强等^[7-8]总结高温高压海洋管道分析方法,运用有限方法研究了不同初始缺陷影响下的埋设管道垂向屈曲情况。

海底管道屈曲研究正随着计算方法和计算手段的提高得到了进一步完善,但海底管道屈曲机理有待更多的学者参与到研究中。本文中主要在海底管道整体屈曲分析方法的工程应用方面开展研究,以对海洋管道的基本设计提供应用指导。

2 海底管道整体屈曲理论分析

2.1 海底管道整体屈曲响应模型

在较高的操作温度及输送压力下,海底管道不受约束时,在高温高压条件下工作就会膨胀。当管道的端部自由移动时,由于管道的轴向移动受土壤约束,管道将产生较大的轴向力,距热端和冷端一定距离内,由于土壤摩擦力的累积效应会平衡管道由于膨胀产生的轴向力,该部分管道可视作虚拟锚固不动,即当两端完全受约束时,管道就会形成轴向压缩力^[9]。

假定海底管道横截面积为 A , 杨氏模量为 E , 线性热胀系数为 α , 轴向力为 P_0 , 温差为 ΔT , 管道完全约束情况下可得:

$$P_0 = EA\alpha\Delta T \quad (1)$$

在内外压差 P 作用下管道产生的轴向应变为:

$$\varepsilon = (1/E)[Pr/2t - \nu(Pr/t)] \quad (2)$$

式中, ν 为泊松比; t 为管道厚度; r 为管道半径。

如果管道轴向应变受到限制,管道就会产生轴向力,就有可能引起管道的屈曲。压力差引起的管道轴力表示为:

$$P_0 = EA\varepsilon = (APr/t)(0.5 - \nu) \quad (3)$$

管道整体屈曲通常为垂向屈曲和侧向屈曲,垂向屈曲也叫隆起屈曲,2种屈曲形态如图1所示。

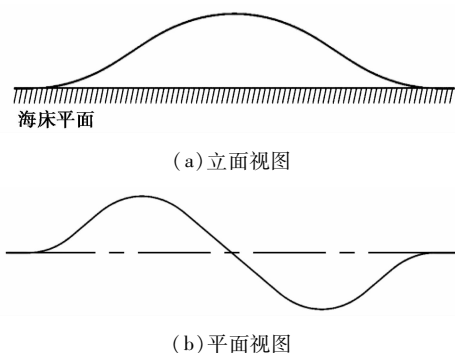


图1 垂向及侧向屈曲模态示意图

2.2 管道垂向屈曲分析

当管道埋至一定深度时,管道的垂向和横向均被土壤约束。其中垂向约束包含管道自身重量、抗弯刚度和土壤阻力。当管道施加于土壤的力超过抵抗管道抬升运动的垂向约束,管道就会向上拱起,且会产生相当大的垂向位移。如果管道出现过大的垂向位移或过大塑性屈服变形,这种现象就称为垂向屈曲。海底管道垂向屈曲分析理论主要有不考虑管道初始缺陷 Hobbs 垂向屈曲理论模型和考虑初始缺陷的 Palmer 垂向屈曲理论模型。

2.2.1 Hobbs 垂向屈曲理论模型

Hobbs 屈曲理论不考虑管道的初始缺陷,假定管道平直地放置在海底面上,建立如图2所示的受力分析模型。

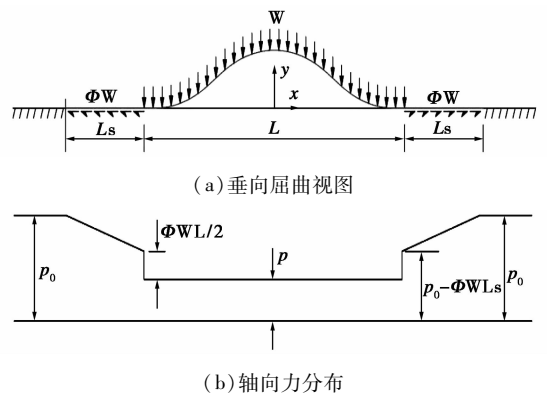


图2 垂向屈曲即轴力分布图

模型假定管道梁柱结构,管道自重为均布荷载,并假定了管道脱离地面的起始处不存在弯矩,根据压杆稳定的研究方式建立微分方程:

$$y'' + n^2y + (m/8)(4x^2 - L^2) = 0 \quad (4)$$

式中, y'' 为管道偏离位移对横坐标轴 x 的二阶导数; ω 为单位长度管道的自重; E 为杨氏模量; I 为管道截面惯性矩; $m = \omega/EI$; $n^2 = p/EI$; L 为屈曲波长。

Hobbs 通过微分方程及一系列求解,得到屈曲轴力为:

$$p = 80.76(EI/L^2) \quad (5)$$

管道在屈曲发生的过程中,初始轴力 p_0 为:

$$p_0 = p + (\omega L/EI)[1.597 \times 10^{-5}EA\Phi L^5 - 0.25(\Phi EI)^2]^{1/2} \quad (6)$$

其中, Φ 为管道与地基土的摩擦系数。由此推得屈曲管道的最大垂向位移为:

$$\hat{y} = 2.408 \times 10^{-3}(\omega L^4/EI) \quad (7)$$

屈曲管道的最大坡角为:

$$\hat{y}' = 8.657 \times 10^{-3}(\omega L^3/EI) \quad (8)$$

Hobbs 公式是通过求解平衡方程而得到,从公

式中可以得到经典屈曲变形模态的基本规律, Hobbs 垂向屈曲模态形式的提出及整体性研究具有很好的参考作用。但由于公式不考虑初始缺陷,而实际上管道初始缺陷对管道是否发生整体屈曲具有很重要的影响。

2.2.2 Palmer 垂向屈曲理论模型 (OTC6335)

Palmer 屈曲理论是典型考虑初始缺陷的垂向屈曲理论模型,假设垂向屈曲是由温度引起的轴向力和管线纵断面上隆起的初始缺陷相互作用引起。当管道敷设在平整的管沟底部,埋设回填后,由于操作状态下的温度和压力要远大于安装条件,随着有效轴力的增长,会在管道隆起处发生向上抬升的现象,甚至可能顶出海床表面,如图 3 所示。

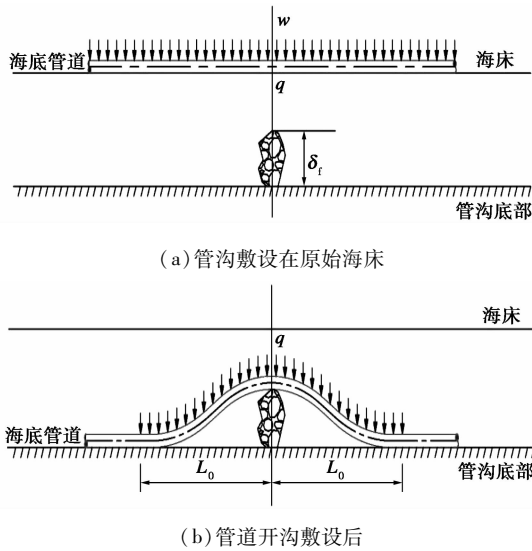


图 3 管沟基底形成初始缺陷示意图

因此,管道在初始缺陷条件下是否稳定的关键在于管道所处位置的土壤能否提供向下的作用力使管线保持不变。根据梁柱力学理论可知,管道在单位向下的力 $w(x)$ 条件下稳定的平衡条件:

$$w(x) = -EI d^4 y / dx^4 - Pd^2 y / dx^2 \quad (9)$$

考虑管道纵断曲线简化为一个由缺陷高度 δ 和长度 L 定义的正弦曲线得:

$$w = 2\delta P (\pi/L)^2 - 8\delta EI (\pi/L)^4 \quad (10)$$

式中, w 为稳定管道在纵断曲线波峰上所需要单位长度向下荷载。

将上式进行无量纲处理,得到:

$$\Phi_w = 2\pi^2 \Phi_L^2 - 8\pi^4 \Phi_L^4 \quad (11)$$

式中, Φ_w 为最大压载, Φ_L 为最大屈曲波长。各自自定义表达式如下:

$$\Phi_w = wEI / \delta P^2 \quad (12)$$

$$\Phi_L = L(P/EI)^{1/2} \quad (13)$$

对于任意纵断曲线,由上述公式及实验数据得

到下列 3 个条件公式来确保管道线的稳定性:

$$\Phi_L < 4.49, \Phi_w = 0.0646 \quad (14)$$

$$4.49 < \Phi_L < 8.06, \Phi_w = 0.0646 \quad (15)$$

$$\Phi_L > 8.06, \Phi_w = 9.6 / \Phi_L^2 - 343 / \Phi_L^4 \quad (16)$$

对于给定屈曲波长 L ,可以得到最大屈曲波长 Φ_L ,进而利用上述 3 个条件公式获得使管线稳定所需最大压载 Φ_w 。

在不考虑土壤抗力系数变化,简化埋设管道的设计模型,可以得到土壤上升阻力和埋设深度的对应关系:

$$q = \begin{cases} \gamma_s HD(1 + FH/D) & \text{对于沙、粉沙和岩石(无内聚力)} \\ S_u D \cdot \min(3, H/D) & \text{对于黏土和淤泥(有内聚力)} \end{cases} \quad (17)$$

式中, Q 为土壤上升阻力; γ_s 为水下回填材料单位重量; H 为管顶埋设深度; D 为管道外径; F 为上升系数; S_u 为回填材料不排水剪切强度。

2.3 管道侧向屈曲分析

根据实验结果观察,侧向曲线模型主要有 4 种类类似于正弦曲线的模态形式,幅度沿峰值逐步衰减,如图 4。

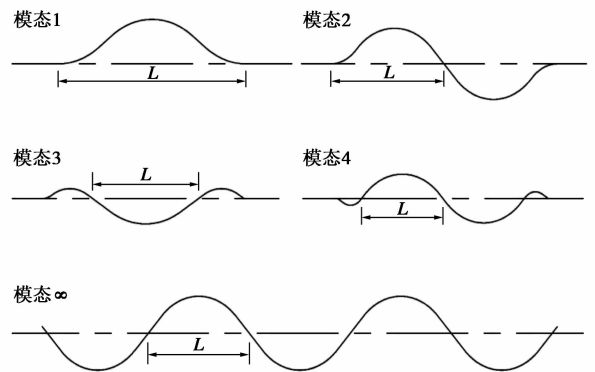


图 4 侧向屈曲模态图

海底管道侧向屈曲同样是由操作温度及输送压力引起的轴向力同土壤相互作用产生的屈曲现象,不同的是防止管道横向侧移屈曲的阻力是由土壤侧向阻力提供的。因此,决定侧向屈曲的参数和公式可类似得出。

导致管道屈曲临界轴向力 P :

$$P = k_1 EI / L^2 + k_3 \mu w L \cdot \{ [1.0 + k_2 (EA \mu w L^5 / (EI)^2)]^{1/2} - 1.0 \} \quad (18)$$

相对于原始轴线管道最大屈曲幅度为 \hat{y} :

$$\hat{y} = k_4 (\mu w L^4 / EI) \quad (19)$$

式中, L 为屈曲波长; μ 为海床摩擦系数; w 为管道单位水下重量; A 为钢管横截面积; E 为钢管杨氏模量; k_n 为屈曲常数,取值参看表 1。

表1 侧向屈曲模态下的屈曲常数

| 屈曲模态 | k_1 | k_2 | k_3 | k_4 | k_5 |
|------|-------|------------------------|-------|------------------------|--------|
| 1 | 80.76 | 6.391×10^{-5} | 0.5 | 2.407×10^{-3} | 0.0694 |
| 2 | 39.48 | 1.743×10^{-4} | 1.0 | 5.532×10^{-3} | 0.1088 |
| 3 | 34.06 | 1.668×10^{-4} | 1.294 | 1.032×10^{-2} | 0.1434 |
| 4 | 28.20 | 2.144×10^{-4} | 1.608 | 1.047×10^{-2} | 0.1483 |

表3 土壤设计参数

| 项目 | 参数 |
|---|------|
| 水下土壤单位重量 $\gamma_s / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 6.8 |
| 不排水剪切强度 $/ (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 1.23 |
| 上升系数 f (沙土) | 0.1 |

3 工程实例

3.1 MathCAD 简介

Mathcad 是美国 PTC 公司旗下的一款工程计算软件,作为工程计算的全球标准,与专用的计算工具和电子表格不同,Mathcad 允许工程师利用详尽的应用数学函数和动态、可感知单位的计算来同时设计和记录工程计算。Mathcad 是一种交互式数值计算系统,当输入一个数学公式、方程组、矩阵等,计算机将直接给出计算结果,而无需去考虑中间计算过程。

MathCad 目前在很多科技领域中承担着复杂的数学计算、图形显示和文档处理,是工程技术人员不可多得的有力工具。

3.2 管道设计基本参数

某海底天然气管道,设计温度 55°C ,环境温度 21°C ,设计压力 9.7 MPa ,钢管 API 5L X65,直径 610 mm ,壁厚 22.23 mm ,混凝土配重层厚 95 mm ,密度 3040 kg/m^3 ,海底管道采取原状土回填埋设方式进行保护,详细参数见表2、表3。

表2 管道设计基本参数

| 项目 | 数值 |
|---|---------------------|
| 位置分类 | 1 |
| 材料等级 | API 5L X 65 PLS2 |
| 管道外径/mm | 610 |
| 管道壁厚/mm | 22.23 |
| 钢管密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 7850 |
| 额定最小屈服强度/MPa | 450 |
| 额定最小抗拉强度/MPa | 535 |
| 钢材杨氏模量/MPa | 2.034×10^5 |
| 外部防腐涂层厚度/mm | 3.2 |
| 混凝土配重层厚度/mm | 95 |
| 最高工作温度/ $^\circ\text{C}$ | 50 |
| 设计温度/ $^\circ\text{C}$ | 55 |
| 设计压力/MPa | 9.7 |
| 水压试验压力/MPa | 11.20 |
| 介质密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 75 |

3.3 计算结果分析

3.3.1 垂向屈曲计算结果

图5为缺陷屈曲波长与压载系数的对应关系;图6为不同屈曲波长下管道的最大允许初始缺陷高度;表4为临界初始缺陷高度。

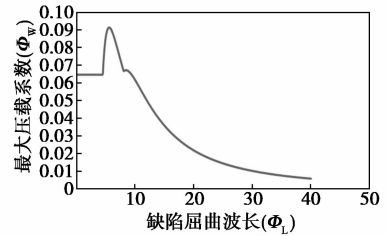


图5 缺陷屈曲波长与压载系数的对应关系

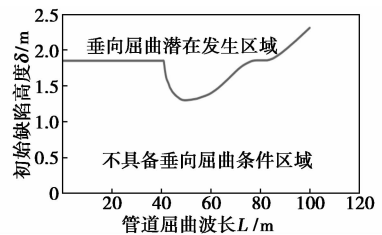


图6 不同屈曲波长下管道的最大允许初始缺陷高度

表4 临界初始缺陷高度

| 回填安全系数 | 混凝土配重厚度/m | 临界初始缺陷高度/m |
|--------|-----------|------------|
| 1.4 | 95 | 1.30 |

3.3.2 侧向屈曲计算结果

因管道回填埋设在管沟中存在土壤的侧向阻力,几乎不可能发生侧向屈曲。因此本文中仅针对海底管道直接敷设在海床上的情况。侧向屈曲埋设管道发生侧向屈曲考虑侧向屈曲分析结果见表5。

表5 侧向屈曲计算分析结果

| 屈曲模态 | 设计温度/ $^\circ\text{C}$ | 屈曲临界温度/ $^\circ\text{C}$ | 有效轴力/kN | 屈曲临界轴力/kN | 校核结果 |
|------|------------------------|--------------------------|---------|-----------|-------|
| 1 | 55 | 57.46 | 4099 | 4340 | 无侧向屈曲 |
| 2 | | 55.96 | | 4193 | 无侧向屈曲 |
| 3 | | 55.21 | | 4120 | 无侧向屈曲 |
| 4 | | 55.13 | | 4112 | 无侧向屈曲 |

结果显示,设计温度在 55℃ 以下,海底管道在操作期间有效轴力在屈曲临界轴力的范围内,因此管道在该条件下不发生屈曲。

4 结语

海底管道设计温度、设计压力引起轴向力是管道发生整体屈曲的 2 个主动因素。介质设计温度、设计压力作为输送介质基本参数,当管道受土壤约束时,不能自由膨胀,管道就会形成轴向力,构成了管道发生屈曲的必要条件。同时,初始缺陷的存在会大大减小管道的抗屈曲能力,即初始缺陷越大管道越易发生屈曲。

(1) 在海底管道前端设计时,应采用保守设计理念,理论计算海底管道的临界温度和临界缺陷高度,以制定合理的管道操作温度;对施工图阶段,可通过增大壁厚和直径,增加覆盖层厚度,管道回填埋方式选择,以及开挖平整降低管线路由上的初始缺陷高度等设计施工措施来降低或消除海底管道整体屈曲对管道安全的影响。

(2) 海底管道铺设时,管道发生侧向屈曲的可能性要比发生垂向屈曲的可能性大;对于埋设海底管道,由于土壤侧向阻力比较大,不易发生侧向屈曲,因此主要计算校核管道的垂向屈曲。

(3) 主要针对一般条件下的海底管道运用理论

方法进行解析计算校核,而针对复杂条件下海底管道整体屈曲分析,由于对海底管道屈曲机理以及决定性因素的不确定性,解析法计算存在局限性,有限元方法应用于海底管道整体屈曲设计是今后的研究方向。

参考文献

- [1] Roger E Hobbs. In-service buckling of hearted pipelines[J]. Journal of Transportation Engineering, 1984, 110(2): 175-189.
- [2] Pedersen P T, Jensen J. Upheaval creep of buried pipelines with initial imperfections[J]. Marine Structure, 1988, 1: 11-22.
- [3] Palmer A C, Ellinas C P, Richards D M, et al. Design of submarine pipelines against upheaval buckling[C]. 1990, No. OTC 6335.
- [4] Taylor Neil, Tran Vinh. Experimental and theoretical studies in subsea pipeline buckling[J]. Marine Structures, 1996, 9(2): 211-257.
- [5] Junes A Villarraga, José F Rodríguez, Cora Martínez. Buried pipe modeling with initial imperfections[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2004, 126: 250-257.
- [6] Yu S, konuk I. Continuum FE modeling of lateral buckling[C]. No. OTC 18934.
- [7] 梁光强, 张伟, 齐金龙, 等. 不同初始缺陷影响下的埋设管道垂向屈曲分析[J]. 中国造船, 2012, (A02): 305-309.
- [8] 梁光强. 高温高压下海底管道屈曲研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] Det Norske Veritas. DNV-RP-F110 (2007). Global Buckling of Submarine Pipelines[S]. ■

储能促进政策将尽快发布, 储能产业政策扶持力度将加码

5月23日国家能源局能源节约和科技装备司副司长修炳林在“储能国际峰会暨展览会 2017”上透露,由国家能源局科技司牵头编制的我国第一部针对储能的综合性政策文件——《关于促进储能技术和产业发展的指导意见》已完成意见征求,正在进行修改完善,并争取尽快发布。

据介绍,作为未来推动新能源产业发展的前瞻性技术,我国储能技术已经初步具备了产业化的基础,加快储能技术与产业发展,对于构建“清洁低碳、安全高效”的现代能源产业体系,推进我国能源行业供给侧改革,推动能源生产和利用方式变革具有重要战略意义。

今年3月,国家能源局印发《关于促进储能技术与产业发展的指导意见(征求意见稿)》,首次明确了储能在我国能源产业中的战略定位,提出未来10年储能领域的发展目标并强调了储能的5大任务。

业内人士认为,征求意见稿首次明确储能战略定位,再次提升其重要性,可以预见未来相应扶持政策会陆续出台。从储能发展目标和任务来看,行业依然处于发展示范期,商业化亟待加速。

修炳林介绍,指导意见将在营造良好政策环境、引导社会资本投资、指导技术研发示范、推动商业模式建立等方面起到积极作用。

“国家能源局还将持续推动配套措施出台,开展试点

示范,完善标准化体系,建立行业信息平台等相关工作,切实为储能行业发展提供好支撑,营造好氛围。”修炳林说。

近几年来,我国储能技术与产业发展迅速。中关村储能产业技术联盟发布的《储能产业研究白皮书》显示,截至2016年底,中国投运储能项目累计装机规模 24.3 GW,同比增长 4.7%,其中,锂离子电池的累计装机规模占比最大,为 59%,同比增长 78%;熔融盐储热在国内的应用还比较少,去年底仅有在青海投运的 10 MW 熔融盐储热项目,该项目也是全球第三座规模化熔融盐储热塔式光热电站。

在中关村储能产业技术联盟秘书长张静看来,目前储能产业发展有 5 个新的特点:一是项目规模扩大,技术路线聚焦,应用向多领域延展;二是可盈利和可复制推广模式是发展重点;三是市场发展、市场机制和价格机制的建设相互推动;四是国内外金融资本参与技术研发和项目融资;五是储能技术和项目的规范标准工作开始启动。

从储能市场应用来看,张静预计,作为增强可再生能源并网消纳和电力系统调峰能力的重要手段,大型储能调峰系统将得到发展;结合配售电改革和能源互联网发展机遇,开展以储能为核心的综合能源服务成为侧储能发展的重要趋势;分散电池资源的储能化应用和管理(数据中心、通信基站、轨道交通、电动汽车等),并关联电力市场的调节功能也是一种趋势。(中化新网)