

大容量持续弹性变形储能技术研究

郝晓宇^{1,2}, 张堰铭^{1,2}, 左宏^{1,2}, 李群^{1,2}, 侯俊玲^{1,2}

(1. 西安交通大学复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安)

摘要: 针对机械储能问题,研究了一种基于弹性变形的大容量持续弹性变形储能技术。设计了可实现这一目标的传动及控制机构。该机构通过同步两个不同半径绕线轮的转速,或固定转速比的两个相同半径绕线轮,实现缠绕在两个同步轮上的可弹性变形拉线的持续弹性变形,进而在弹性线收放过程中实现能量的连续储能与释放。在储能过程中,将外界输入的机械能转化为弹性拉线伸长的弹性势能;在释放能量时,弹性拉线变形回复,进而释放其储存的弹性势能。相比传统的机械储能技术,该大容量持续弹性变形储能技术具有结构设计简洁紧凑,单位体积内储能密度高,系统响应速度快,制造与维护成本低、可持续性强等优势。研究成果可为风、光等可再生能源的收集提供技术支持,并能发挥电力系统调频调峰、紧急备用等功能。

关键词: 弹性变形储能技术;储能与释放;机械储能;储能密度

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202505003 **文章编号:** 0253-987X(2025)05-0023-07

Research on Large-Capacity Continuous Elastic Deformation Energy Storage Technology

HAO Xiaoyu^{1,2}, ZHANG Yanming^{1,2}, ZUO Hong^{1,2}, LI Qun^{1,2}, HOU Junling^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the field of mechanical energy storage, a large-capacity continuous elastic deformation energy storage technology based on elastic deformation has been researched. A drive and control mechanism capable of achieving this objective was designed. This mechanism facilitates the continuous elastic deformation of the tensile line wound around two synchronized pulleys by either synchronizing the rotational speeds of two pulleys with different radii or utilizing two identical pulleys with a fixed speed ratio. Consequently, this allows for the ongoing storage and release of energy during the extension and retraction of the elastic line. During the energy storage process, mechanical energy input from the external environment is converted into elastic potential energy through the elongation of the elastic line. Conversely, when energy is released, the elastic line undergoes deformation recovery, thus releasing its stored elastic potential energy. In comparison to traditional mechanical energy storage technologies, this large-capacity continuous elastic deformation energy storage system boasts several advantages: a compact and straightforward

收稿日期: 2024-09-09。 作者简介: 郝晓宇(1999—),男,硕士生;侯俊玲(通信作者),女,副教授,硕士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(12472081,12172270);中央高校基本科研业务费资助项目(xzy012023021)。

网络出版时间: 2025-01-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250110.1059.002>

structural design, high energy density per unit volume, rapid system response times, low manufacturing and maintenance costs, and sustainability. The research findings provide technical support for the collection of renewable energy sources such as wind and solar power, while also enhancing power system functions like frequency regulation, peak shaving, and emergency backup capabilities.

Keywords: elastic deformation energy storage technology; mechanisms of storage and release; mechanical energy storage; energy density

能源问题是事关国家发展和安全的战略必争领域^[1-2]。低碳技术创新与颠覆性能源技术的突破是推动能源革命与工业革命、落实我国2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和目标中关键的核心动力。随着能源需求的不断增加,环保且可持续的可再生能源快速发展^[3-7],标志着能源结构的重大转型。然而,可再生能源的间歇性和波动性给电力系统的稳定运行带来了新的挑战,使得储能技术重要性日益凸显^[8-9]。

目前,储能技术在风力发电、光伏发电、不间断电源(UPS)、电动汽车、航天航空、电力调峰调频等领域广泛应用^[10-15]。现有的机械储能技术因其不够成熟,还没有获得广泛的应用。例如:抽水蓄能^[16]对场地选取要求较严格,既要控制上下水库的距离,又要控制上下水库的高度差,此外其投资成本高、回报周期长、经济效益低;飞轮储能^[17]的自放电率高,能量长时间储存会自行耗尽,而且高速旋转的飞轮,对材料的要求非常高,危险系数大且存在安全隐患;压缩空气储能^[18]的系统复杂,而且受地域影响非常大;重力储能^[19]投资高且占地面积多。诸如此类的技术,底层逻辑其实都基于材料的弹性变形,因此研究可实现持续变形的储能技术,避免其对环境、地域及空间等的依赖,是极具吸引力的。

在机械弹性储能领域,国内外许多专家学者已开展了相关研究。单文泽等^[20]使用平面蜗卷弹簧作为储能介质,以飞轮作为能量载体,对能量的释放和回收进行了仿真分析,研究了蜗簧和飞轮初始速度对能量回收效率的影响。刘美娇^[21]以最大化储能密度为目标,对蜗卷弹簧进行了优化设计,并通过动力学仿真分析验证了优化结果。Carpino等^[22]提出以蜗卷弹簧作为弹性驱动柔性系统的基本组件,利用蜗簧作为能量缓冲器来模拟机器人腿部的运动过程。汤敬秋^[23]提出了一种以大型蜗卷弹簧为核心的机械弹性储能系统设计方案。华北电力大学机械弹性储能技术团队提出了机械弹性储能技术^[24-25],该技术采用大型平面蜗卷弹簧作为弹性储能介质进行储能。理论上,蜗簧技术中的蜗簧变形

与飞轮变形类似,其变形在材料中呈梯度分布,并未实现材料的完全变形,储能效率大打折扣。

本文通过研究实现弹性线的逐步持续弹性变形,可将输入的能量以弹性势能的形式持续储存在变形拉线中,释放能量过程则是弹性拉线逐步弹性变形回复,将储存的弹性势能转变为所需的能量形式输出。该大容量持续弹性变形储能技术具有储能容量大(主要取决于所选择弹性拉线的弹性变形能力及长度)、储能密度高、响应速度快、机械结构简单、安全性可靠、经济实用性强、不对环境造成污染、而且不受地理条件和外部环境特点。

1 大容量持续弹性变形储能结构及原理

1.1 技术构成及实施方案

为实现大容量可持续变形,本文设计了相应的机械结构。包括主绕线轮、辅助卷线轮、弹性拉线、主动同步轮、从动同步轮、同步带、转动轴、轴承、锁死装置及结构框架等。该机械弹性储能结构的连接及装配如下:主绕线轮同轴套接在转动轴上,转动轴上还同轴固接有主动同步轮;辅助卷线轮同轴套接在另一根转动轴上,转动轴上还同轴固接有从动同步轮;主动同步轮与从动同步轮通过同步带配合传动;主绕线轮与辅助卷线轮之间通过弹性拉线连接,弹性拉线的一端缠绕在主绕线轮上,另一端缠绕在辅助卷线轮上;结构框架通过轴承与转动轴连接。所设计的机械结构可采用同步两个不同半径的绕线轮转速或固定转速比的两个相同半径绕线轮进行,下文中通过固定转速比的两个相同半径绕线轮方案举例介绍。

结构储能原理如下:采用两个半径不同的同步轮,在同步带的约束下,通过角速度相同,线速度不同的设计,使两个绕线轮拉线速度点强制差异,实现弹性拉线的变形及弹性势能的储存。该装置的锁死功能通过可逆电机实现,在装置进行储能时,电机处于正转状态,利用机械运动将能量转化为弹性势能

进行储存;当需要释放能量时,电机则反转,将储存的弹性势能转化为机械能并向外输出。这样一来,所设计的机械结构不仅能够有效完成能量的储存与释放过程,还可以通过电机的可逆特性在两者之间灵活切换,从而实现能量的高效管理和锁死控制。图 1 和图 2 分别给出本技术的二维和三维原理结构示意图。

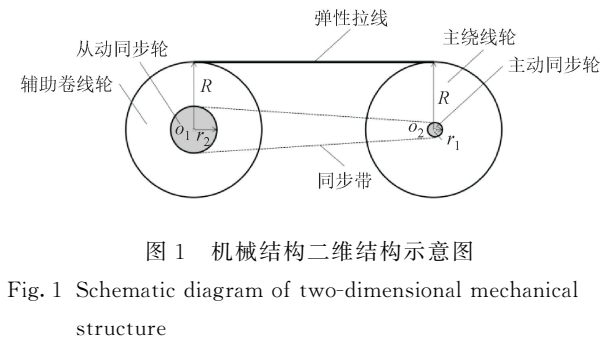


Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional mechanical structure

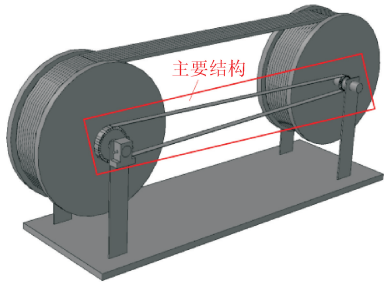


Fig. 2 Schematic diagram of three-dimensional mechanical structure

本文提出的储能技术的基本构成及运行原理,如图 3 所示。

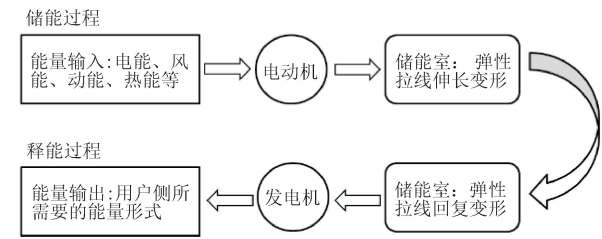


Fig. 3 Basic composition and operating principle diagram of energy storage technology

1.2 工作原理

本研究设计的机械结构工作原理是:对一条(或一组)轻质高弹性拉线进行拉伸并缠绕于主绕线轮上实现能量储存,通过与该绕线轮同角速度辅助卷线轮

的收线,实现所储存能量的连续释放。设计的大容量持续弹性变形储能技术的机械结构如图 4 所示。

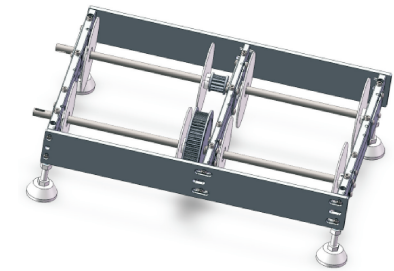


图 4 机械结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of mechanical structure

该机械结构中:主绕线轮和辅助卷线轮采用结构框架进行并排固定,主绕线轮与辅助卷线轮的转速通过同轴固接的一对同步带轮所限制;弹性拉线的一端缠绕在主绕线轮上,另一端缠绕在辅助卷线轮上。

当外界输入能量时,即储能过程:通过转动轴驱动主绕线轮,使弹性拉线自辅助卷线轮缠向主绕线轮,弹性拉线由于同步带半径的差异,在运行过程中逐渐被拉伸,产生弹性伸长变形,进而储存能量,以此持续进行,可不断储存能量;当弹性拉线在主绕线轮缠绕多圈后,后续的弹性拉线可叠压于前面已缠绕的弹性拉线上,进而形成自锁,其后缠绕的主动力矩趋于稳定。当向外输出能量时,即放能做功过程:松开锁死装置,由伸长变形后弹性拉线上的张紧力驱动主绕线轮逆向转动,在此过程中弹性拉线的变形回复,并自主绕线轮缠向辅助卷线轮,弹性拉线储存的能量稳定释放。该装置的锁死功能依赖于可逆电机的运作,如图 4(b)所示。具体实现锁死功能是通过电机的正反转切换,该电机能够灵活实现能量的存储和释放,确保在锁死状态下的稳定性和能量传递的有效性。当装置储能时,电机通过正向旋转将机械能转化为弹性势能,并将其储存;当装置需要释放能量时,电机反向旋转,将弹性势能转化为电能并输出。

本文储能技术中,弹性拉线的单位长度内能量

储存量由材料性能与同步轮半径之比决定。总储存能量的大小可以通过选择弹性拉线的长度、根数以及相应的机械结构进行串联组合,实现更大范围的能量存储能力,从而在不同行业和场景下提供灵活的解决方案。这种设计可有效优化能量存储的效率与灵活性,从而满足不同应用需求。

2 大容量持续弹性变形储能技术储能性能

大容量持续弹性变形储能技术的储能容量可按如下方法计算。当外界输入的能量使转动轴转动、转动轴带动主绕线轮运转时,弹性拉线从辅助卷线轮缠绕向主绕线轮,弹性拉线产生伸长变形,输入的能量转化为机械能,再转化成弹性势能储存在伸长变形的弹性拉线中,弹性拉线在伸长变形条件下所做的功即可认为是弹性拉线的理论储能容量。理论储能容量为

$$W = \int_0^\Delta F d\Delta \tag{1}$$

式中: F 为广义力; Δ 为与力对应的位移。

一般情况下,弹性拉线按照线弹性理论进行假设,此时单位体积的弹性体变形能,即应变能密度为

$$w = \frac{1}{2} \sigma \epsilon = \frac{1}{2} E \epsilon^2 \tag{2}$$

式中: E 为材料的弹性模量; σ 为材料的应力; ϵ 为材料的应变。

为了能够提升储能密度,一般会选用由天然橡胶或者合成橡胶制成的材料,这些材料通常具有超弹性的特性,在大应变范围内具有显著的非线性趋势。Ogden 模型能够较好地描述橡胶材料在大变形情况下的非线性应力-应变关系。该模型的应变能密度表达式为

$$w = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \tag{3}$$

式中: N 为使用的项数(通常取 $N = 1, 2, 3$); μ_i 和 α_i 为材料参数; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为主伸长比。

此时,质量能量密度为

$$\rho_0 = \frac{wV}{m} = \frac{wV}{\rho V} \tag{4}$$

式中: ρ 为弹性拉线材料的密度; V 为弹性拉线体积; m 为储能系统的质量。

下述算例中使用的高弹性拉线为橡皮筋,橡皮筋总长度取 5 km,密度取 950 kg/m³。算例 1 橡皮筋的伸长变形为原长的 5 倍,采用真实应变,并利用线弹性的应变能密度进行计算;算例 2 橡皮筋的伸

长变形为原长的 10 倍,同样采用真实应变,并利用线弹性的应变能密度进行计算。由于实际的弹性拉线材料一般具有超弹性,因此算例 3、4 利用 Ogden 模型的应变能密度进行计算,其中 $N = 1$, $\mu_1 = 700$ MPa, $\alpha_1 = 2$ 。算例 3 橡皮筋的伸长变形为原长的 5 倍,采用真实应变,并利用 Ogden 模型的应变能密度进行计算;算例 4 橡皮筋的伸长变形为原长的 10 倍,应变值同样采用真实应变,并利用 Ogden 模型的应变能密度进行计算。

算例 1~4 的储能密度与现有物理储能密度对比如表 1 所示。

表 1 算例与现有物理参数的对比

Table 1 Comparison of the case study with existing physical parameters

储能方式	储能密度/(J · kg ⁻¹)	循环寿命/a
算例 1	1.18 × 10 ⁶	15~30
算例 2	2.12 × 10 ⁶	15~30
算例 3	1.29 × 10 ⁷	15~30
算例 4	4.42 × 10 ⁷	15~30
抽水蓄能 ^[1]	5.4 × 10 ³	40~60
飞轮储能 ^[1]	1.08 × 10 ⁵	5~20
压缩空气储能 ^[1]	2.16 × 10 ⁵	20~40

通过表 1 的对比可以看出,本储能技术在同类型的物理储能技术中能量密度相对较高且容量较大。由于本技术是将外界输入的能量以机械能的形式从转动轴输入,以驱动两个绕线轮转动进而使弹性拉线自辅助卷线轮绕向主绕线轮,而释放过程同样是被拉紧的弹性拉线自主绕线轮释放迅速缠绕向辅助卷线轮。在此过程中,能量得到释放,储存的弹性势能迅速转化机械能向外输出变为电能,且机械能向电能的转化可以瞬间完成。后续可以进一步的优化外部的机械结构框架以及绕线轮的旋转问题,将整个装置的摩擦阻力减至最小的状态。

这一技术以弹性势能的形式储存能量,通过两个绕线轮的转动所带来的周长差使弹性拉线处于变形伸长的状态,弹性拉线在储能时层层叠压形成自锁,且弹性势能和机械能都属于高级的能量形式,基本不会发生自放电。无论输入的能量是电能、动能或者其他形式的能量,都被转换成机械能通过转动轴带动绕线轮运转,将能量储存在发生伸长变形的弹性拉线中,以弹性势能的形式储存在储能室;释能时两个绕线轮反转,将能量转递给发电机转化成用户侧所需要的能量形式。

本文储能技术在不产生任何污染的情况下,契合国家绿色可持续发展的战略目标。本技术还具有机械结构简单,开发成本低等特点。此外,采用高弹性拉线可实现储能容量扩大,同时能够提升储能密度。

3 关键技术问题分析

3.1 机械结构中转速比控制

因两绕线轮有多种组合方案,且在初始阶段先将弹性拉线缠绕在辅助卷线轮上,随缠绕圈数的增加,辅助卷线轮上弹性拉线的半径逐渐增大。在进行储能过程时,弹性拉线从辅助卷线轮绕向主绕线轮,在开始时主绕线轮上无弹性拉线,此时对应关系为辅助卷线轮是大半径状态,主绕线轮是小半径状态。随着储能过程的进行,两轮上的弹性拉线半径比例逐渐发生变化,辅助卷线轮上弹性拉线的半径逐渐减小,而主绕线轮上弹性拉线的半径逐渐增大,导致最初设置的速比发生极大的变化,从而不能按照预设的伸长比进行储能。

本文解决方案如下。

(1)设计专用变速器。将同步轮设计成多级变速器,即多种齿轮副,当辅助卷线轮上卷满弹性拉线且主绕线轮刚准备进入储能工作状态时,两轮半径比例正是预设比例。随着主绕线轮的转动,弹性拉线逐渐从辅助卷线轮绕向主绕线轮,变速器实时调整比例,以保证两轮速比与预设值保持一致。

(2)采用可变直径的旋转轴。将机械结构中的旋转轴设计成直径可变换的旋转轴,当储能装置处于预储能状态时,两旋转轴之比正是储能装置预设之比,随着主绕线轮进行储能工作过程,主绕线轮所对应的直径可变轴受到径向压力,该轴直径随着压力的变化自动调整,以确保两轮速比与预设状态相同,同时直径可变轴的内部结构也可进行能量存储,如图 5 所示。储能过程结束时,辅助卷线轮所套接的直径可变轴,直径恢复到初始状态,以确保两轮在释能过程时,速比与预设状态一致。



图 5 可变直径轴示意图

Fig. 5 Schematic diagram of variable diameter shaft

3.2 弹性拉线排线问题

因本储能技术的总储能容量主要依靠弹性拉线的伸长量和材料属性,所以在大型设备的应用场景

下,需要长达数千米的弹性拉线进行储能。弹性拉线长度较长时容易引起排线混乱,上下层叠压等问题。

本文解决方案如下。

(1)设置排线装置。由于弹性拉线长度较长时容易引起排线混乱,上下层叠压等问题。因此,设计特定的排线装置,通过变速以及丝杠运动进行排线,保证弹性拉线不乱窜,规律排布;或将弹性拉线置于槽中,随着机械结构的移动,稳定将弹性拉线排布在绕线轮上。

(2)采用定制形状弹性拉线,并设计拉伸槽位,如图 6 所示。使用与拉伸槽位匹配形状的弹性拉线,以其宽度设置槽位宽度,每个槽中放置一根弹性拉线,由于其形状贴合,拉线叠压后就会产生自锁,并可同时设置多个槽位。

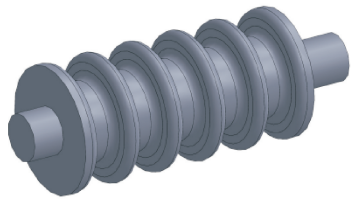


图 6 含拉伸槽位的旋转轴示意图

Fig. 6 Schematic diagram of rotation axis with stretching slot

3.3 装置监测及寿命问题

弹性拉线若长期处于循环拉伸的工作状态下,易造成材料损伤、断裂。

本文解决方案如下。

采用在线监测系统,实时监测弹性拉线的健康情况,对其表面定期涂抹特殊润滑剂。利用数字图像相关法,在能观测到弹性材料的位置,架设高速相机,拍摄被测材料表面的图像。图像经过软件进行处理后,识别表面的特征点,通过比较特征点在变形前后的位置变化,可以计算得出每个像素点的位移以及形变信息来判断弹性拉线的状态^[26-27]。另一种方法是采用光栅光纤应变测量法,由于光栅光纤受到外界应变时,折射率会发生变化,从而引起光波的特性发生变化,进而判断弹性拉线的状态^[28-30]。将上述所采集数据通过局域网、蓝牙等上传至健康监测系统中进行实时监测与分析,可以提前预测弹性拉线寿命及出现疲劳及损伤的位置。

4 结 论

本文提出了一种基于弹性变形的大容量持续弹

性变形储能技术,并设计了相应的机械结构以实现该技术。该机械结构通过控制两个相同半径绕线轮的转速比或同步两个半径不同绕线轮的转速,能够有效实现弹性拉线的持续变形。在本研究中,通过设计不同半径的同步轮,使得两个绕线轮具有不同的线速度,从而在弹性拉线由辅助卷线轮缠绕至主绕线轮的过程中,产生与周长差相当的变形。这一过程以弹性势能的形式实现了能量的连续存储与释放。该大容量持续弹性变形储能技术展现出一系列优越的特性,如高储能密度、低自放电率、低成本以及结构简单等。这些特点使其具备显著的应用优势,能够在风、光等可再生能源的收集以及工业园区低谷电的储存中发挥重要作用。此外,该装置具有较长的使用寿命,对场地条件无特殊要求,且无污染、危险系数低。该技术能够有效支持电力系统的调频调峰及紧急备用等功能,进一步推动可再生能源的应用与发展。

参考文献:

- [1] 吴皓文,王军,龚迎莉,等. 储能技术发展现状及应用前景分析 [J]. 电力学报, 2021, 36(5): 434-443.
WU Haowen, WANG Jun, GONG Yingli, et al. Development status and application prospect analysis of energy storage technology [J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(5): 434-443.
- [2] 戴兴建,张小章,姜新建,等. 清华大学飞轮储能技术研究概况 [J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1): 64-68.
DAI Xingjian, ZHANG Xiaozhang, JIANG Xinjian, et al. Flywheel energy storage technology in Tsinghua University [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 64-68.
- [3] 赵攀,苟非非,许文盼,等. 风-火-储耦合系统储能容量配置优化对比 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(8): 38-48.
ZHAO Pan, GOU Feifei, XU Wenpan, et al. Comparison of storage capacity configuration optimization in wind-thermal power-storage coupling system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(8): 38-48.
- [4] AMIRYAR M E, PULLEN K R. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications [J]. Applied Sciences, 2017, 7(3): 286.
- [5] 郑明阳,赖杰. 中盐金坛建压缩空气储能电站,储能领域“前沿中的前沿” [J]. 中国盐业, 2019(9): 29-32.

- ZHENG Mingyang, LAI Jie. Zhongyan Jintan builds compressed air energy storage power station, the forefront of energy storage field [J]. China Salt Industry, 2019(9): 29-32.
- [6] 葛刚强,王焕然,李瑞雄,等. 压缩空气储能蓄热器性能分析和优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 45-54.
GE Gangqiang, WANG Huanran, LI Ruixiong, et al. Performance analysis and optimization design of heat accumulator in compressed air energy storage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 45-54.
 - [7] 王焕然,席光,李瑞雄,等. 先进抽水压缩空气复合储能技术 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(5): 1-9.
WANG Huanran, XI Guang, LI Ruixiong, et al. A study on the combined pumped-hydro and compressed air energy storage system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(5): 1-9.
 - [8] 吴海峰,鲁军勇,马伟明,等. 大功率混合储能装置控制策略研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2): 93-98.
WU Haifeng, LU Junyong, MA Weiming, et al. Control strategy for high power hybrid energy storage device [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 93-98.
 - [9] 周生喜,陶凯,秦卫阳. 振动能量俘获专题序 [J]. 力学学报, 2021, 53(11): 2891-2893.
ZHOU Shengxi, TAO Kai, QIN Weiyang. Preface to the special topic of vibration energy capture [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(11): 2891-2893.
 - [10] XU Yanhe, LI Chaoshun, WANG Zanbin, et al. Load frequency control of a novel renewable energy integrated micro-grid containing pumped hydropower energy storage [J]. IEEE Access, 2018, 6: 29067-29077.
 - [11] FERTIG E, APT J. Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: a case study in ERCOT [J]. Energy Policy, 2011, 39(5): 2330-2342.
 - [12] BUCKLES W, HASSENZAHN W V. Superconducting magnetic energy storage [J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(5): 16-20.
 - [13] SUO Liumin, BORODIN O, GAO Tao, et al. "Water-in-salt" electrolyte enables high-voltage aqueous lithium-ion chemistries [J]. Science, 2015, 350(6263): 938-943.
 - [14] 范玮. 储能技术研究进展及经济性分析 [J]. 煤质技术, 2024, 39(3): 21-29.

FAN Wei. Research progress and economic analysis on energy storage technology [J]. Coal Quality Technology, 2024, 39(3): 21-29.

[15] 刘荣峰, 张敏, 储毅, 等. 新型储能技术路线分析及展望 [J]. 新能源科技, 2023, 4(3): 44-51.

LIU Rongfeng, ZHANG Min, CHU Yi, et al. Analysis and prospect of new energy storage technology routes [J]. New Energy Technology, 2023, 4(3): 44-51.

[16] 王楠. 我国抽水蓄能电站发展现状与前景分析 [J]. 电力技术经济, 2008, 20(2): 18-20.

WANG Nan. Current situation and prospects of the pumped-storage power plant in China [J]. Electric Power Technologic Economics, 2008, 20(2): 18-20.

[17] 张维煜, 朱焜秋. 飞轮储能关键技术及其发展现状 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 141-146.

ZHANG Weiyu, ZHU Jiqu. Key technologies and development status of flywheel energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 141-146.

[18] 梅生伟, 李瑞, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2893-2907.

MEI Shengwei, LI Rui, CHEN Laijun, et al. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2893-2907.

[19] 王粟, 肖立业, 唐文冰, 等. 新型重力储能研究综述 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1575-1582.

WANG Su, XIAO Liye, TANG Wenbing, et al. Review of new gravity energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1575-1582.

[20] 单文泽, 潘孝斌, 陈元泰, 等. 涡卷弹簧式制动能量回收装置研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44(10): 73-77.

SHAN Wenze, PAN Xiaobin, CHEN Yuantai, et al. The development of equipment for braking energy recovery with spiral spring [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2015, 44(10): 73-77.

[21] 刘美娇. 弹性储能系统平面涡卷弹簧优化设计及模拟仿真 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.

[22] CARPINO G, ACCOTO D, SERGI F, et al. A novel compact torsional spring for series elastic actuators for assistive wearable robots [J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 134(12): 121002.

[23] 汤敬秋. 机械弹性储能用大型蜗卷弹簧力学特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

[24] 郑晓明, 米增强, 余洋, 等. 机械弹性储能箱结构及并网控制策略优化 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4708-4718.

ZHENG Xiaoming, MI Zengqiang, YU Yang, et al. Optimization of energy storage box mechanical structure and Grid-Connected generation control strategy for mechanical elastic energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(22): 4708-4718.

[25] 米增强, 余洋, 王璋奇, 等. 永磁电机式机械弹性储能机组及其关键技术初探 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 26-30.

MI Zengqiang, YU Yang, WANG Zhangqi, et al. Preliminary exploration on permanent magnet motor based mechanical elastic energy storage unit and key technical issues [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 26-30.

[26] 杨恒, 柯玉超, 王申, 等. 航空橡胶密封件力学与密封性能检测技术 [J]. 航空制造技术, 2017(22): 106-109.

YANG Heng, KE Yuchao, WANG Shen, et al. Measurement technologies of mechanical and seal performance for aviation rubber seals [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(22): 106-109.

[27] 陈振英. 基于数字图像相关法的应变测量研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

[28] 尹辉. 基于光纤光栅传感的卡套式管路接头应力测试与密封性能研究 [D]. 烟台: 烟台大学, 2024.

[29] LIANGLei, WANG Renliang, XU Gang, et al. Analysis and study of FBG sensor in crack monitoring of aircraft structure [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol, United Kingdom: IOP Publishing, 2019: 022111.

[30] KIM J H, PARK Y, KIM Y Y, et al. Aircraft health and usage monitoring system for in-flight strain measurement of a wing structure [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(10): 105003.

(编辑 杜秀杰)