

文章编号:1672-3031(2020)06-0462-07

流动空气压差比拟与风电叶片翼型线确定理论的探讨

张维恩, 王娅萱, 张淼淼, 吴彤, 刘舒萱

(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要:翼型是风电叶片设计的关键元素,对风电叶片的气动性能、风能转化和利用率都有重要影响。因此,翼型研究一直是风电叶片研究的热点和难点。论文深入分析了流动空气与风电叶片的相互作用,提出了用空气重力比拟其流动前后压差产生的动力的概念,建立了流动空气沿风电叶片流动的能量转化关系,以此为基础推导出了风电叶片翼型线理论公式,并用Xfoil软件对比分析了翼型线理论公式确定的新翼型和BRUXEL36翼型,发现在 $-2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 攻角条件下,新翼型具有较高升阻比,其中在攻角为 3° 时,新翼型升阻比高出BRUXEL36翼型25左右。论文研究为流动空气与风电叶片相互作用理论及风电叶片翼型线理论的发展提供了新尝试和重要借鉴。

关键词:风力发电;风电叶片;压差比拟;翼型

中图分类号: TK83

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jjwhr.20200062

1 研究背景

文献[1]研究发现,目前,风力发电叶片翼型基本沿用航空器翼型,尽管根据风力发电叶片自身工况研制出了一些风电叶片翼型,但这些所谓的风电叶片专用翼型仍以探索为主,在流动空气与叶片相互作用规律的认识及以这种认识为基础的风电叶片翼型理论尚须进行更深入的研究工作。风力发电叶片就是其翼型沿风轮径向的分布,因此,翼型影响着流动空气与风电叶片的相互作用,也就影响着风电叶片捕获风能的能力,所以研究风电叶片翼型线设计理论就是研究流动空气与风电叶片的相互作用规律。常见的风电叶片翼型主要有三种表达方法:形函数扰动法、外形参数化方法^[2]和解析函数法。形函数扰动法是在原始翼型基础上添加扰动形函数进行线性叠加而产生翼型的方法^[3],形函数较多采用Hicks-Henne函数^[4],但此种方法对原始翼型依赖性强。外形参数化法是用数个参数描述翼型各个部位的几何尺寸,设计变量的几何意义明确,但难以用解析式表达^[5]。解析函数法是用函数式直接表示翼型,如早期用多项式表达的NACA 4位数、5位数系列翼型等。目前仍有学者对翼型进行较深入的研究工作,文献[6]提出了一种基于Trajkovski共形变换理论的风力发电翼型的广义函数,此函数可用于拟合现有的翼型型线,可通过调整广义函数系数创建新的翼型型线,并以FX66-S196-V1翼型为例,通过选取适当的拟合项数,求解出了其解析式,为风力发电专用翼型设计理论和方法的研究拓宽了思路;文献[7-9]分别基于保角变换、儒可夫斯基翼型变换和西奥道生法,提出了翼型型线的集成设计理论及方法,推导出了能够广泛应用的翼型集成的级数表达式;文献[10]提出了一种设计大型风力发电叶片翼型系列的集成方法。对于给定的转子直径和叶尖速比,基于局部速度比设计最佳翼型。文献[11]基于梯度算法、XFOIL代码以及与贝塞尔曲线的原始参数化相结合描述翼型,结果表明新翼型与现有候选翼型相比具有更好的气动性能和控制性能;文献[12]根据一种演化算法优化工具链接到几何模块以生成翼型的几何形状;文献[13]提出了一种基于翼型积分表达式和B样条曲线设计出了两种具有相似厚度的新翼型;Yiu等^[14]利用流逸技术和最小二乘法设计翼型;Shenoy^[15]结合优化算法和流程代码以及实施一次性方法解决最佳翼型设计问题;Thina-

收稿日期:2020-05-20;网络首发时间:2020-12-09

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20201207.1007.003.html>

基金项目:北京工业大学第二十一届“星火基金”(XH-2020-05-03)

作者简介:张维恩(2000-),主要从事环境与能源工程领域的研究。E-mail: ratham@163.com

karan^[17]使用人工神经网络(ANN)研究了翼型的反设计方法,测试表明该方法可以准确地预测翼型型线^[16];SOBIECZKY提出可通过控制翼型几何参数来设计现代翼型,并命名为PARSEC翼型设计法。文献[18]通过研究流动空气与风力发电叶片的相互作用分别提出了风力发电叶片迎风面流出角的确定理论和相应公式及流动空气从风力发电叶片背风面后缘流出角的确定理论和相应公式,文献[19]还给出风力发电风轮出力的计算公式。对已有翼型设计的研究发现:领域学者非常重视研究风电叶片翼型,但研究方法基本以翼型优化或对已有翼型变量取值的优化提高风力发电叶片的气动性能为主;而研究流动空气与风电叶片的相互作用,提出并建立风电叶片翼型线设计理论并进行应用的研究,在公开资料中尚未看到。为此,我们认真观察了流动空气吹向风电叶片,尤其是与风电叶片前缘接触瞬时状态的变化及沿风电叶片表面的流动情况,提出并建立了风力发电叶片翼型线设计理论并进行了相应研究,导出了根据流动空气压差比拟确定的风电叶片翼型线理论公式。

2 流动空气的压差比拟

风将空气吹向风电叶片迎风面,当其触碰到叶片相应处的翼型线时,该空气将沿此翼型线的切线方向向风电叶片尾缘运动,见图1所示。容易理解,此空气是在其前后空气压差的作用下流动的。因为,流动空气的空气压差难以精确测量,且不同风速流动的空气前后压差也不相同,但总存在某个常数 C ,其流动的空气压差等于或近似等于该流动空气质点的重量 Δmg (其中, Δm 为该空气质点的质量, g 为重力加速度)与该常数 C 的乘积。忽略空气及空气与风电叶片间的摩擦,则,可将此空气质点在其前后空气压差作用下沿翼型线的流动看成是在真空条件下,在其重力作用下沿相应翼型线的运动。此即流动空气的压差比拟。

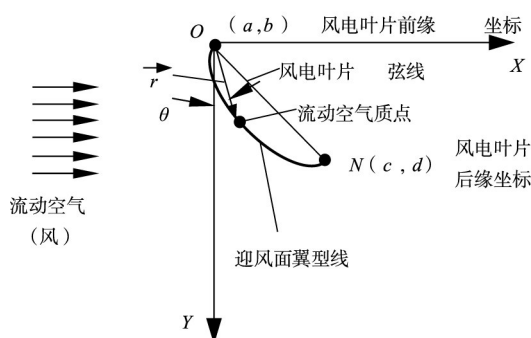


图1 流动空气与风电叶片迎风面翼型线作用模型

3 压差比拟条件下的空气运动能量转换

流动空气触碰到风电叶片时,由于叶片的节流效应,将促使空气流动速度加快,亦即,在空气压差的作用下,空气将由其接触到的风电叶片前缘向后缘快速流动,此过程中,该空气质点前后压差沿风电叶片翼型线做的功将转化为其动能增加量。

该空气质点位置用矢径 \vec{r} 表示,其极角用 θ 表示,则该质点的位置极坐标为 (r, θ) 。根据流动空气的压差比拟,空气质点运动过程中其前后压差沿风电叶片翼型线所做的功 E_s 可表示为

$$E_s = C\Delta mgr \quad (1)$$

在这里,功 E_s 转化为了空气质点运动的动能 E ,包括沿矢径运动的动能和绕坐标原点转动的动能,则

$$E = \frac{1}{2}C\Delta mv^2 + \frac{1}{2}C\Delta mr^2\omega^2 \quad (2)$$

式中： v 为空气质点沿矢径运动的速度； ω 为空气质点绕坐标原点转动的角速度。

根据上述分析，有

$$E_s = E \quad (3)$$

此即压差比拟条件下空气运动能量的转换关系式。

4 风电叶片翼型线确定理论

由于

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

将式(1)、式(2)代入式(3)并注意到式(4)，得

$$C\Delta mgr = \frac{1}{2}C\Delta mv^2 + \frac{1}{2}C\Delta mr^2\omega^2 = \left[\frac{1}{2}C\Delta m \left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 + \frac{1}{2}C\Delta mr^2 \right] \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (5)$$

将式(5)整理，得

$$\begin{aligned} 2gr &= \left[\left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 + r^2 \right] \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \\ \frac{2gr}{\left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 + r^2} &= \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \\ dt &= \frac{d\theta}{\sqrt{\frac{2gr}{\left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 + r^2}}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 + r^2}{2gr}} d\theta \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)表明， dt 时间内，沿风电叶片翼型线运动的质点绕坐标原点转过角度 $d\theta$ ，两端积分，得

$$T = \int dt = \int \sqrt{\frac{\left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 + r^2}{2gr}} d\theta \quad (7)$$

在一定风速条件下，式(7)若取得极大值，说明空气质点由风电叶片前缘运动到后缘所需要的时间较长，同时还表明，在任一瞬时，作用在风电叶片翼型线上的空气质点与翼型线上的对应点有着较强作用；反之，式(7)若取得极小值，说明空气质点由风电叶片前缘运动到后缘所需要的时间较短，同时还表明，在任一时间段内，流过风电叶片翼型线上的空气质点较多，亦即，有较多的空气质点向风电叶片传递能量。由此，可得出结论，式(7)无论取极大值还是极小值，曲线 $r(\theta)$ 所对应的翼型线都有较好的捕风能力。因此，设

$$F = \sqrt{\frac{\left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 + r^2}{2gr}} = \sqrt{\frac{r'^2 + r^2}{2gr}} \quad (8)$$

根据 Euler-Lagrange 方程，式(7)取极值的必要条件，有

$$\frac{\partial F}{\partial r} - \frac{d}{d\theta} \left(\frac{\partial F}{\partial r'} \right) = 0 \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)并整理，得

$$r - 2r'' + \frac{3r'^2}{r} = 0 \quad (10)$$

解式(10)，得

$$\sqrt{Ar - 1} = \tan \left(\frac{\theta + B}{2} \right) \quad (11)$$

式(11)中, A 、 B 为积分常数, 由风电叶片弦长及其位置坐标确定。

此即根据流动空气压差比拟确定的风电叶片翼型线理论公式。

由式(8), 得

$$F_{r'} = \frac{\partial F}{\partial r'} = \frac{1}{\sqrt{2rg}} \frac{r'}{\sqrt{r'^2 + r^2}}$$

由式(10), 得

$$r' = r\sqrt{Cr-1}$$

式中 C 为积分常数, 则 $Cr-1 \geq 0$, $Cr \geq 1$, $\sqrt{Cr} \geq 1$

根据式(8), 有

$$F(\theta, r, r') = \sqrt{\frac{r'^2 + r^2}{2gr}}$$

则

$$F_{r'}(\theta, r, r') = \frac{1}{\sqrt{2gr}} \frac{r'}{\sqrt{r'^2 + r^2}}$$

$$F_{r'r'}(\theta, r, r') = \frac{1}{\sqrt{2gr}} \frac{\sqrt{r'^2 + r^2} - r' \frac{r'}{\sqrt{r'^2 + r^2}}}{r'^2 + r^2} = \frac{1}{\sqrt{2gr}} \frac{(r'^2 + r^2) - r'^2}{(r'^2 + r^2)\sqrt{r'^2 + r^2}} \quad (12)$$

即

$$F_{r'r'}(\theta, r, r') = \frac{1}{\sqrt{2gr}} \frac{r^2}{(r'^2 + r^2)\sqrt{r'^2 + r^2}} \quad (13)$$

根据勒让德条件^[20], 式(13)可表示为

$$F_{r'r'}(\theta, r, q) = \frac{1}{\sqrt{2gr}} \frac{r^2}{(q^2 + r^2)\sqrt{q^2 + r^2}} \geq 0 \quad (14)$$

其中 q 介于 r' 与 p 之间, 而 p 为极值曲线场中极值曲线的斜率, 其它符号意义同前。

即勒让德条件满足勒让德强条件, 则式(11)为极大值曲线方程, 说明空气质点由风电叶片前缘运动到后缘所需要的时间较长, 即在任一瞬时, 作用在风电叶片翼型线上的空气质点与翼型线上的对应点都有着较强作用, 从而使风电叶片具有较强捕风能力。

5 风电叶片新翼型线确定理论的验证和评价

为验证式(11)给出的翼型线的正确性, 从翼型库中选取翼型几何参数与式(11)给出的翼型弦长相等、最大相对厚度相差 2.896%的 BRUXEL36翼型, 见图 2(a)所示, 图 2(b)即为式(11)确定的风电叶片新翼型。

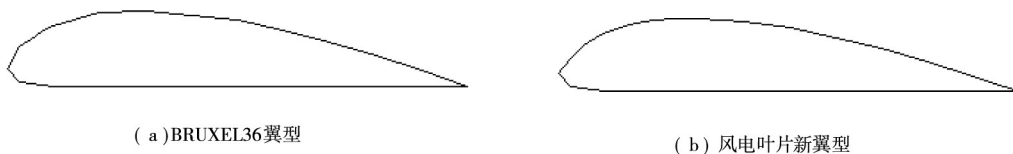


图2 风电叶片新翼型(b)和对比翼型(a)

利用 Xfoil 软件, 分别计算出两种翼型的升力系数 C_l 和阻力系数 C_d 随攻角 α 的变化关系曲线, 如图 3所示。从图 3可以看出, 攻角在 $-2^\circ \sim 6^\circ$ 范围内, 风电叶片新翼型的升力系数明显高于 BRUXEL36翼型的升力系数, 同时, 风电叶片新翼型的阻力系数明显低于 BRUXEL36翼型的阻力系数。软件给出的两种翼型的升阻比见图 4所示, 从图 4可以看出, 风电叶片新翼型在 $-2^\circ \sim 6^\circ$ 的攻角

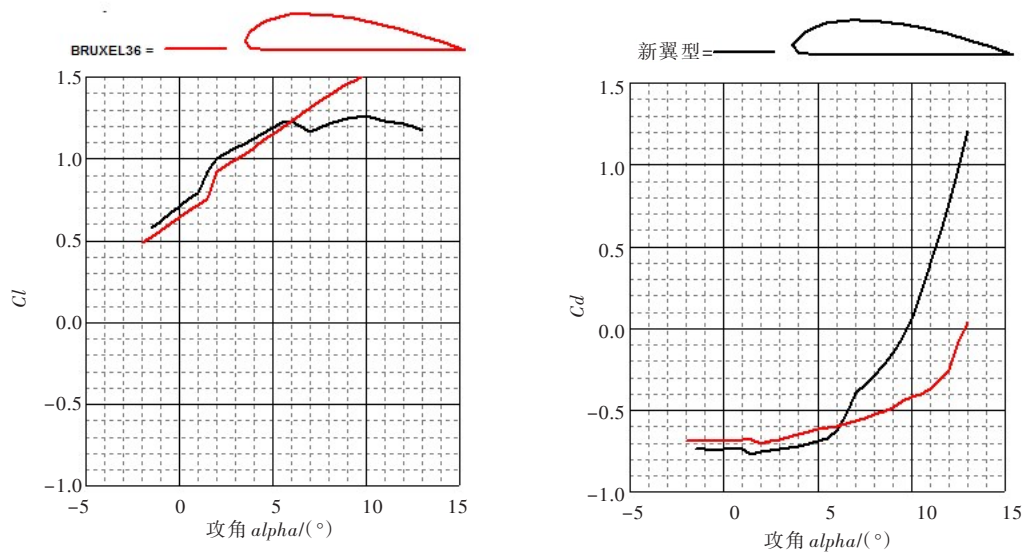


图3 风电叶片新翼型和对比翼型升阻力系数随攻角的变化关系曲线

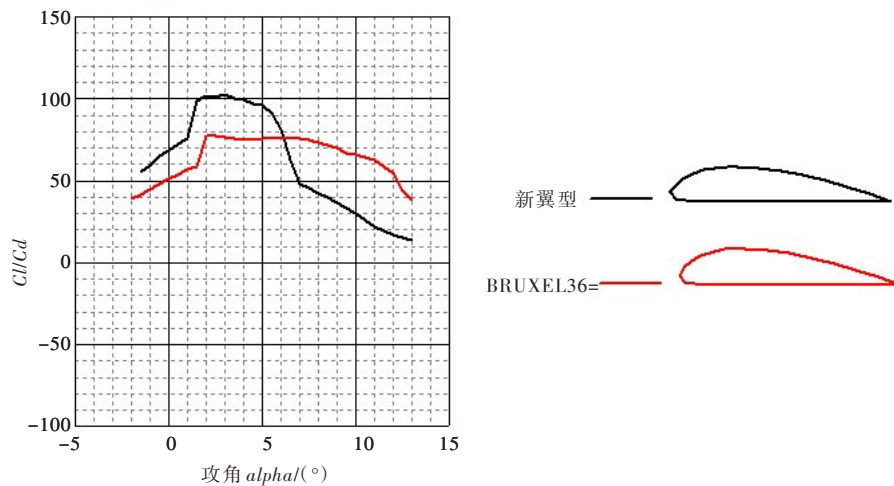


图4 风电叶片新翼型和对比翼型升阻比随攻角的变化关系曲线

范围内拥有较高的升阻比，其中在攻角 $\alpha=3^\circ$ 时，新翼型升阻比高出 BRUXEL36 翼型 25 左右。由此可见，在攻角 $\alpha=-2^\circ \sim 6^\circ$ 工况下，选择风电叶片新翼型比 BRUXEL36 翼型具有更好的风能转化率和利用率，尤其在攻角 $\alpha=3^\circ$ 时，新翼型具有更好的优越性能。

6 结论与讨论

目前，风电叶片翼型线的设计基本借用航空翼型或借鉴航空翼型的设计方法，因此，论文通过对流动空气与风电叶片相互作用的研究及根据这样研究设计风电叶片翼型线的理论在领域内是非常有益的新尝试和发展。将论文理论设计的新翼型与翼型库中相似翼型 BRUXEL36 通过 Xfoil 软件对比研究发现：(1) 新翼型在攻角 $-2^\circ \sim 6^\circ$ 范围内，升力系数明显高于对比翼型 BRUXEL36，而阻力系数明显低于对比翼型 BRUXEL36；(2) 新翼型在攻角 $-2^\circ \sim 6^\circ$ 范围内，升阻比明显高于对比翼型 BRUXEL36，尤其在 3° 攻角时，新翼型升阻比高出 BRUXEL36 翼型 25 左右。因此，新翼型在攻角 $-2^\circ \sim 6^\circ$ 工况下，优于与之相似的对翼型 BRUXEL36。

参 考 文 献:

- [1] ZHANG Z, AQEEL M, JUN Z, et al . Analogy theory and application of pressure difference of wind turbine blade profile[J] . Journal of Harbin Institute of Technology (New Series) , 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1378.T.20200130.1940.002.html>.
- [2] LIANG X, MENG G, TONG S, et al . Rapid design and optimization of airfoil based on improved genetic algorithm[J] . Acta Aerodynamica Sinica, 2016, 31(6): 803–812 .
- [3] DAVID Z, TIMOTHY L, Laslo D, et al . Improvements to a Newton–Krylov Adjoint Algorithm for Aerodynamic Optimization[C]//17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, 2005 .
- [4] HICKS R M, HENNE P A . Wing design by numerical optimization[J] . Journal of Aircraft, 1978, 15(7) : 407–412 .
- [5] RAY T, TSAI H M . Swarm algorithm for singleand multiobjective airfoil design optimization[J] . AIAA Journal, 2004, 42(2): 366–373 .
- [6] CHEN J, WANG Q, PANG X, et al . Improvement of airfoil design using smooth curvature technique[J] . Renewable Energy, 2013, 51: 426–435 .
- [7] 王旭东 . 风力机翼型通用型线理论及叶片形状优化研究[D] . 重庆: 重庆大学, 2009 .
- [8] 陆群峰, 陈进, QIN N, 等 . 基于翼型集成和混合式尾缘改型理论的风力机叶尖翼型设计[J] . 太阳能学报, 2013, 34(4): 555–561 .
- [9] 王旭东, 陈进, 张石强 . 风力机叶片翼型型线集成设计理论研究[J] . 中国机械工程, 2009, 20(2): 211–213, 228 .
- [10] WEI J Z, WEN Z S, SØRENSEN J N . Integrated airfoil and blade design method for large wind turbines[J] . Renewable Energy, 2014, 70(5):172–183 .
- [11] GRASSO F, COIRO D P, BIZZARRINI N, et al . Design of advanced airfoil for stall–regulated wind turbines [J] . Journal of Physics: Conference Series, 2016, 2(2): 403–413 .
- [12] MÉNDEZ B, MUNDUATE X, SAN MIGUEL U . Airfoil family design for large offshore wind turbine blades[J] . Journal of Physics: Conference Series, 2014, 524(1): 12022–12032 .
- [13] WANG Q, CHEN J, PANG X, et al . A new direct design method for the medium thickness wind turbine airfoil [J] . Journal of Fluids and Structures, 2013, 43: 287–301 .
- [14] YIU K F C, MORTON K W . Airfoil design via transpiration and optimal control theory[J] . Inverse Problems in Science and Engineering, 1996, 3(1/3): 46–65 .
- [15] SHENOY A, HEINKENSCHLOSS M, CLIFF E M . Airfoil design by an all–at–once method[J] . International Journal of Computational Fluid Dynamics, 1998, 11(1/2): 3–25 .
- [16] THINAKARAN K, RAJASEKAR R . Design of Airfoil Using Backpropagation Training with Combined Approach [M] . Springer India, 2014 .
- [17] SOBIECZKY H . Parametric Airfoils and Wings[M]//Recent Development of Aerodynamic Design Methodologies . Vieweg Teubner Verlag, 1999 .
- [18] 张照煌, Muhammad, 刘青 . 提高风电叶片风能利用和转化率的新理论和新方法——风力发电叶片出流角计算公式的建立及应用[J] . 应用基础与工程科学学报, 2017, 5(25): 1040–1047 .
- [19] MUHAMMAD A, 高延伟, 李永强, 等 . 流动空气与风力发电叶片作用特性研究[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 6(15): 425–429 .
- [20] 老大中 . 变分法基础[M] . 北京: 国防工业出版社, 2017 .

Research on flowing air pressure difference analogy and wind turbine blades airfoil profile determination theory

ZHANG Weien, WANG Yaxuan, ZHANG Miaomiao, WU Tong, LIU Shuxuan
(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Airfoil is the key factor in wind power blades design, which has an important influence on the aerodynamic performance, wind energy conversion and wind energy utilization of wind turbine blades. Therefore, blade airfoil research is a difficult problem and hot issue in wind turbine blade research. In this thesis, the interaction between flowing air and wind turbine blades is analyzed in depth, the concept of analogy between the air gravity and power is generated by flow between pre- and post air pressure difference is put forward, and the energy conversion relationship of air flows along wind turbine blades is established. Based on this, the theoretical formula of wind turbine blades airfoil profile is derived. And the Xfoil software was used to compare and analyze the new airfoil determined by the theoretical formula of the airfoil profile and BRUXEL36 airfoil. It was found that the new airfoil had a higher lift-drag ratio under the attack angle of -2° to 6° , in which the attack angle was 3° the lift-drag ratio of the new airfoil is about 25% higher than that of the BRUXEL36 airfoil. The research of the thesis provides a new attempt and an important reference for the development of the theory of the interaction between flowing air and wind power blades and the theory of wind blade airfoil profile.

Keywords: wind power generation; wind turbine blades; analogy of pressure difference; airfoil

(责任编辑: 祁 伟)

《中国水利水电科学研究院学报》2019年度优秀论文公告

为不断提高论文质量和学术影响力,鼓励为《中国水利水电科学研究院学报》撰写高水平学术论文的作者,根据《〈中国水利水电科学研究院学报〉优秀论文和优秀审稿人奖励办法》规定,经编委会投票推荐、编委会主任审定,《胶结人工砂石筑坝材料性能研究》等6篇论文被评选为2019年度优秀论文。

2019年度《中国水利水电科学研究院学报》优秀论文

序号	论文题目	第一作者	第一作者单位	发表期数
1	胶结人工砂石筑坝材料性能研究	贾金生	中国水利水电科学研究院	第1期
2	Sentinel-1 SAR数据在四川茂县山体滑坡灾害监测中的应用研究	高思远	中国水利水电科学研究院	第2期
3	三峡库区消落带土壤金属污染特征的研究进展	李艳艳	华北水利水电大学	第2期
4	滇池草海水污染治理工程措施及其防治效果评估	姚云辉	中国水利水电科学研究院	第3期
5	改进的模糊综合评价法在洱海水质评价中的应用	张倩	中国水利水电科学研究院	第3期
6	小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析	刘昌军	中国水利水电科学研究院	第4期

《中国水利水电科学研究院学报》编辑部