

采用低温太阳能集热的旋转热浮力 射流风能利用概念

顾兆林, 张铭旭

(西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过与自然界尘卷风诱发条件与气象要素的类比,将低温太阳能能量聚集与旋转热浮力射流相结合,提出一种可控热成旋风风能利用系统的概念,属于涉及大气物理学、流体力学、工程热物理等的交叉学科工程科学问题。分析了可控热成旋风风场的流体力学基础、特点,以及关键科技问题,包括聚热棚的结构与温度场分布、入流预旋导叶结构与涡量生成、上部敞口结构与旋转热浮力射流的卷吸特性、旋转上升气流流场与螺旋风叶的相互作用等,为可控热成旋风风能利用系统的应用与开发提供了研究思路。

关键词: 旋转浮力射流;风能;低温太阳能

中图分类号: O358;TK89 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0007-04

A New Wind Energy Concept of Swirling Buoyant Jet Driven by Low-Temperature Solar Energy

GU Zhaolin, ZHANG Mingxu

(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Dust devil is a short-life and small-scale surface-heated whirlwind system in nature. Sustainable dust devil-like whirlwind possesses potential of wind power generation. Analogous to the induced conditions of dust devil, a new wind energy concept of swirling buoyant jet driven by low-temperature solar energy was proposed by using artificial solar-concentrating shed and air inflow prerotation technologies. This kind of swirling buoyant jet is an interdisciplinary concept, relating to atmospheric physics, fluid mechanics and thermophysics. The theory of stable swirling buoyant jet and the key technologies of the heating design of solar-concentrating shed and the air inflow prerotation part were initially put forward for the development of such a new wind system of low-temperature solar-powered whirlwind.

Keywords: swirling buoyant jet; wind energy; low-temperature solar energy

能源在国民经济中具有特别重要的战略地位,满足快速增长的能源需求和能源的清洁高效利用,对能源科技发展提出了重大挑战。在能源领域,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》提出的发展思路包括:能源结构多元化,增加能源供应,风能、太阳能、生物质能等可再生能源技术获得

突破并实现规模化应用。目前,风能与太阳能规模化利用处于快速发展中,对于风电和光伏发电的不稳定性,人们正致力于解决电力调配技术,同时也在不断探索太阳能及风能新的利用方式。

本文介绍一种低温太阳能-旋转风能系统新概念及其力学基础,这是通过低温太阳能聚热棚装置

产生的新型旋转风能系统及利用模式,它的原理来源于自然界的尘卷风。

1 尘卷风的气象要素特征

在自然界中,尘卷风是一种在沙漠、戈壁、干河滩等地区,特别是春夏交际炎热的午后,经常出现的旋转气团^[1-5]。在尘卷风形成的过程中,外围空气通过贴近地面的薄层(汇流层)被地面加热后流向中心区,外围空气的旋转角动量汇聚到中心区,从而形成尘卷风,其旋转方向由热对流胞的初始旋转方向所决定,如图1所示。由于得不到地表的持续加热以及粉尘的摩擦耗散,尘卷风的寿命一般在几分钟到十几分钟。

根据观测,尘卷风的气象要素特征是:温升为4~8 K,压降为2.5~4.5 hPa,最大切向速度和垂直上升速度均大约为15 m/s。据Sinclair观测,美国亚利桑那地区的尘卷风直径一般为数十米,尘柱高度小于600 m^[6],而据Hess和Spillane在澳大利亚的观测,尘卷风的直径为32~141 m,尘柱高度为300~660 m^[7]。野外观测表明,尘卷风经常发生在微风或者小风速的环境中,如果环境风速达到某一阈值,尘卷风则很少形成^[8-9]。Oke等人的观测认为:尘卷风形成的风速范围为1.5~7.5 m/s;如果水平风速过低,则缺乏水平涡的生成条件,而若风速过高,生成的水平涡又容易遭到破坏,不易演变成垂直涡^[10]。对于迁移的尘卷风,其路径变化很大,本质上是随机性的,有时呈现直线式或规则的螺旋式。当环境风速较低(小于5 km/h)时,其路径受局部地形控制;当环境风速高于5 km/h时,环境风向成为主要控制因素,尘卷风向下风向移动的速度和环境风速几乎相同^[11]。

Renno等将尘卷风看成是一个热力发动机,提出了一种尘卷风的热机动力学理论^[12]。根据这一理论,尘卷风的微气象参数,如最大旋转速度、转角

区内的上升气流速度及在旋涡核心处的压降等,由热胞内气体温度及环境大气温度的温差决定;给定温差,就可以预测最大旋转速度、转角区内的上升气流速度以及在旋涡核心处的压降。

实际上,尘卷风是一种发生在大气对流边界层内的垂直涡。近地层的水平风切作用产生水平涡,水平涡逐渐倾斜翘起成为热对流胞的环境(背景)涡量,因此,热浮力对流和近地层的水平风切产生的涡量是垂直旋涡形成的必要条件。

综上所述,尘卷风是一种寿命较短的热成旋风,地面加热和环境涡量是诱发尘卷风的基本条件^[13-15]。同时,尘卷风的气象要素表明,尘卷风的风场是一种能量密度相对较高(风速较大且集中)的旋转风场,可持续维持的尘卷风风场(或可控热成旋风)具有作为风能利用的潜力。

2 可控热成旋风风能利用的概念

实现可控热成旋风的风能利用,关键在于提供热成旋风的生成条件并对其进行有效控制。如前所述,形成热成旋风的两个基本条件为:具有强烈的中心上升运动的热对流胞;气团具有一定的旋转角动量。

为满足热成旋风的第一个条件,可在平坦的地面上设置太阳能聚热棚,对流入棚中的空气进行持续加热,被加热的热空气通过聚热棚上部的敞口流出聚热棚,形成热浮力射流^[16-17],即为初始热胞。

进气预旋调节是叶轮机机械流量的重要调节技术。为了实现热成旋风的第二个条件,可在太阳能聚热棚内的空气入口处安装可调的预旋导叶风门以提供涡量源,使流出聚热棚的热浮力射流具有旋转角动量,从而在聚热棚敞口的上部大气中形成旋转热浮力射流,气象学上称为旋转上升热对流胞,亦即可控热成旋风风场。

最后,在可控热成旋风流场中安装螺旋式叶片,即可实现风能的输出。

初步物理建模及数值模拟计算^[18]表明,通过加入入口气流预旋、利用聚热棚获得稳定温度场等措施之后,在聚热棚内部及出口上部空间能够形成良好的旋转风场,具有输出功的潜力。按照是否设置出口导流壁,文献^[18]提出了2种聚热棚的结构形式,如图2所示。设置出口导流壁的聚热棚的整体高度不超过30 m,所形成的热成旋风的切向速度场如图2c所示。

因此,本文基于自然界尘卷风的大气物理学机

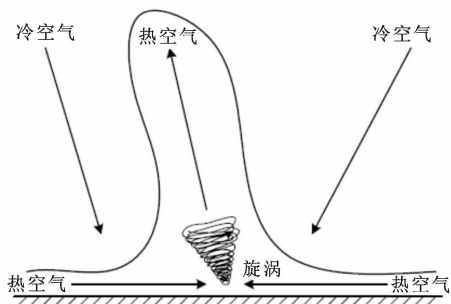
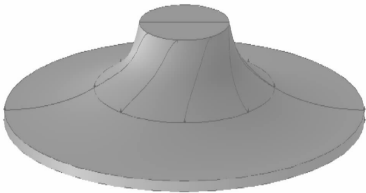
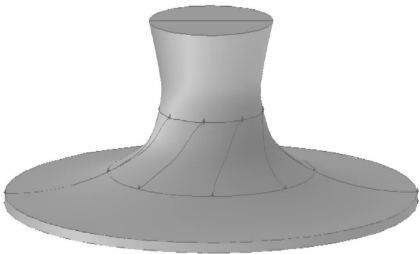


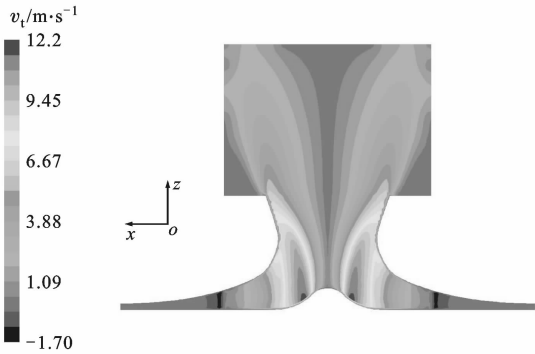
图1 自然界尘卷风的物理结构示意图



(a)简单聚热棚



(b)带出口导流壁的聚热棚



聚热棚加热温度与大气温度差为 30 ℃

(c)带出口导流壁聚热棚旋转浮力射流的切向风场

图 2 聚热棚模型及其热成旋风流场

理及热力学条件,提出一种利用太阳能聚热棚的可控热成旋风风能系统的概念,属于涉及大气物理学、力学以及工程热物理的交叉工程科学问题。

3 可控热成旋风风能利用系统的特点及关键科技问题

可控热成旋风风能利用系统具有以下特点。

首先,可控热成旋风风能系统是一种旋转风场的风能模式,可以不受地理条件限制,也可以不受季节变化限制。因为热成旋风的热力学基础是聚热棚温度与周围大气温度的温度差,白天大气平均温度高,聚热棚储热温度可以相应提高;夜间大气温度降低,即使聚热棚的供热温度有所降低,也有足够的温度差来保证热成旋风的运动。与此相比,在国内外快速发展的风力发电是一种水平风场的风能利用模

式,其风场通常由地理和地形条件所决定,由于水平风场的日变化和季节变化剧烈,现有风电利用中能量的获取与储存仍然是影响其大规模应用的因素之一。

其次,太阳能聚热棚加热是低温差加热,可以利用低温太阳能集热及储热技术。我国在低温太阳能热利用技术方面,已经实现了太阳能集热器和热水器技术的产业化^[19]。本文的研究课题有望利用低温太阳能集热/储热技术的成熟性,获得一种可控低温太阳能热成旋风风电利用的新方法,实现高效、持续、稳定的旋转风能利用。

第三,旋转上升气流的中心速度很低,易于布置风能动力输出结构而不破坏基本流场,因此,热成旋风风场更接近自然环境尘卷风。热成旋风的上升高度(射流高度)取决于聚热棚的加热温差和涡量的参数匹配,为可控参量。与其相比,太阳能烟囱发电技术利用太阳能加热烟囱下部吸热空间的空气,在热浮力作用下热空气向上流动,带动风塔内的风力发电机输出电力^[20],而风塔一般需达到 300 m 以上高度,才有实际利用的价值。在太阳能烟囱研究中,有时也考虑入流热空气的预旋,但由于烟囱固体壁面的作用,气流预旋在上升过程中很快消减,不能形成稳定的旋转上升气流。同时,李卉梓等的数值模拟计算^[21]表明,与西班牙太阳能热气流试验电站实验相比,在烟囱出口流动与传热特性参数及输出功率相同的情况下,螺旋集热型太阳能热气流的集热棚半径可减小 25%,占地面积可减少 44%,说明带预旋的入口气流可显著提高聚热棚内旋转风场的能量密度。

综上所述,本文提出的可控热成旋风风能系统是综合了自然环境下聚热棚集热技术与风力发电技术的一种新型太阳能利用新方法,以旋转风场形式进行风能利用。

从热力学循环效率角度看,低温太阳能直接热发电效率低下,没有技术应用前景,而将低温太阳能能量聚集与热成旋风风能利用技术相结合,可以显著提高风能的平均功率密度,使低温太阳能热发电技术具有可行性。作者所在课题组的初步数值模拟计算表明,可控热成旋风风能利用系统的概念在理论上能够实现。

按照可控热成旋风风能系统的概念,其下部的聚热棚相当于自然界尘卷风的近地面汇流层,气流在向聚热棚中心的汇流过程中不断被加热和加入涡量,然后在聚热棚的上部敞口处形成旋转上升的热

对流胞。旋转上升的热对流胞实际上是旋转热浮力射流,其卷吸特性及流场特征不同于一般的浮力射流,将影响到旋转风场与螺旋风叶的相互作用及风能利用效率。因此,聚热棚的结构与温度场分布、入流预旋导叶结构与涡量生成、上部敞口结构与旋转热浮力射流的卷吸特性、旋转上升气流流场与螺旋风叶的相互作用等,是关系到可控热成旋风风能高效利用的关键科技问题,也是可控热成旋风风场研究的流体力学基础问题。

参考文献:

- [1] BALME M, Greeley R. Dust devils on Earth and Mars [J]. *Review of Geophysics*, 2006, 44: 1-22.
- [2] 顾兆林, 邱剑, 鲁录义, 等. 尘卷风及沙尘悬移运动的研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2007, 27(5): 843-850.
GU Zhaolin, QIU Jian, LU Luyi, et al. Advances in study of dust devils [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(5): 843-850.
- [3] GU Zhaolin, ZHAO Yongzhi, LI Yun, et al. Numerical simulation of dust lifting within dust devils: simulation of an intense vortex [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 63 (10): 2630-2641.
- [4] 顾兆林, 赵永志, 郁永章, 等. 尘卷风的形成、结构和卷起沙尘过程的数值研究 [J]. *气象学报*, 2003, 61 (6): 751-760.
GU Zhaolin, ZHAO Yongzhi, YU Yongzhang, et al. Numerical study of the formation evolution and structure of dust devil [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(6): 751-760.
- [5] HALL F F. Visibility reductions from soil dust in the western United States [J]. *Atmospheric Environment*, 1981, 15(10): 1929-1933
- [6] SINCLAIR P C. The lower structure of dust devils [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1973, 30(8): 1599-1619.
- [7] HESS G D, SPILLANE K T. Characteristics of dust devils in Australia [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29(6): 498-507.
- [8] SINCLAIR P C. General characteristics of dust devils [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8(1): 32-45.
- [9] RENNO N O, ABREU V J, KOCH J, et al. MATA-DOR 2002: a pilot field experiment on convective plumes and dust devil [J]. *Journal of Geophysics Research*, 2004, 109: 1-10.
- [10] OKE A M C, TAPPER N J, DUNKERLEY D. Willy-willies in the Australian landscape: the role of key meteorological variables and surface conditions in defining frequency and spatial characteristics [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 71(2): 201-215.
- [11] IVES R L. Behavior of dust devils [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1947, 28(1): 168-174.
- [12] RENNO N O, BURKETT M L, LARKIN M P. A simple thermo-dynamical theory for dust devils [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 55(21): 3244-3252.
- [13] GU Zhaolin, QIU Jian, ZHAO Yongzhi, et al. Simulation of terrestrial dust devil patterns [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25(1): 31-42.
- [14] 顾兆林. 风扬粉尘: 近地层湍流与气固两相流 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-14.
- [15] GU Zhaolin, WEI Wei, ZHAO Yongzhi. An overview of surface conditions in numerical simulations of dust devils and the consequent near-surface air flow fields [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2010, 10(3): 272-281.
- [16] 李炜, 槐文信. 浮力射流的理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1-52.
- [17] 王玲玲, 岳青华. 窄缝热浮力射流影响因素的数值模拟 [J]. *水科学进展*, 2009, 20(5): 632-638.
WANG Lingling, YUE Qinghua. Numerical simulation of influence factors of slot-generated thermal buoyant jet [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20 (5): 632-638.
- [18] 杨静. 太阳能热成旋风发电的物理模型、数值模拟及可行性分析 [D]. 西安: 西安交通大学, 2011.
- [19] 徐伟, 郑瑞澄, 路宾. 中国太阳能建筑应用发展研究报告 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 1-322.
- [20] 左璐, 郑源, 周建华, 等. 太阳能烟囱发电技术研究进展 [J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(1): 41-47.
ZUO Lu, ZHENG Yuan, ZHOU Jianhua, et al. Progress of solar chimney power generation technology [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2002, 37(1): 41-47.
- [21] 李卉梓, 陈念桥, 周洲, 等. 一种新型的太阳能热气流发电系统 [J]. *水电能源科学*, 2009, 27(3): 223-225.
LI Huizi, CHEN Nianqiao, ZHOU Zhou, et al. New type of solar chimney power generation system [J]. *Water Resources and Power*, 2009, 27(3): 223-225.

(编辑 葛超青 赵大良)