

文章编号: 1673-5196(2020)01-0048-05

液压能量调节型风力发电机组储能发电的恒频控制

刘增光^{1,2}, 杨国来^{1,2}, 魏列江^{1,2}, 赵宇阳¹, 王 刚¹, 岳大灵^{1,2}

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 兰石研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了消除风能波动性和间歇性对电网平稳运行的冲击影响, 实现风轮捕获能量的储存与调节, 将储能系统引入到液压型风力发电机组的泵控马达闭式液压系统中, 利用 AMESim 软件建立了无风时独立依靠储能系统储存液压能驱动马达旋转的数学模型. 针对这种新型液压风力机液压系统的组成和工作原理, 提出了一种恒压差+恒转速的双闭环马达恒转速控制策略以保证储能发电时发电机始终工作在同步转速. 对比分析了在恒压差单闭环与恒压差+恒转速双闭环控制作用下系统各变量的响应曲线和变化趋势. 仿真结果表明所设计的双闭环马达恒转速控制策略可以使马达转速稳定在 1 500 r/min, 满足储能单独发电时对输出电能频率的要求.

关键词: 液压型风力机; 能量调节; 储能系统; 恒频控制; AMESim

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A

Constant frequency control of energy-storage power generation of wind turbine set with hydraulic energy regulation

LIU Zeng-guang^{1,2}, YANG Guo-lai^{1,2}, WEI Lie-jiang^{1,2}
ZHAO Yu-yang¹, WANG Gang¹, YUE Da-ling^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Lanshi Research Institute, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to eliminate the impact of wind fluctuation and intermittence on the smooth operation of power grid and realize the storage and regulation of the energy captured by wind wheel, an energy storage system is introduced into the closed-loop hydraulic system with pump-controlled motor in hydropower-type wind turbine set. A mathematical model of motor rotation driven independently by stored energy in energy storage system is established by using AMESim software in the case of still wind. Aimed at the composition and working principle of such a novel hydraulic system of hydropower-type wind turbine, a double closed-loop control strategy of motor with constant pressure difference plus constant speed is proposed to ensure that the power generator with always operate at synchronous speed in the case of power generation with stored energy. The response curves and changing trends of various system variables are compared and analyzed under condition of single closed-loop with constant pressure difference and double closed-loop control with constant pressure difference plus constant speed. The simulation result shows that the designed double closed-loop motor with constant speed control strategy will be able to stabilize the motor speed at 1 500 r/min, meeting the requirement of the output power frequency in case of independent power generation with stored energy.

Key words: hydropower-type wind turbine; energy regulation; energy storage system; constant frequency control; AMESim

收稿日期: 2017-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51765033), 甘肃省科技重大专项计划(17ZD2GA010)

作者简介: 刘增光(1978-), 男, 山西临猗人, 博士, 副教授.

风能作为一种可再生的清洁能源, 受到世界各国的重视. 随着风力发电技术的快速发展, 风力机的单机容量也不断增加. 传统的风力发电机组主要是由齿轮增速箱传递能量, 这种传动形式存在故障率

高,机舱重量大,维护费用高等缺点.部分风力发电机组取消了齿轮增速箱发展为直驱式,但是直驱式风力机组仍然需要庞大的整流逆变装置.液压型风力机具有将液压传动系统功率密度大、柔性传动和风力发电机组大功率能量传递相结合,取消齿轮箱和整流逆变装置的优点已成为当前研究的热点^[1].

赵克刚等^[2]在借鉴复合液压传动技术的基础上,提出了将行星结构与液压传动结合的新型变速恒频风力发电的技术方案,并对所提方案的各种工作模式进行详细描述.陈建业等^[3]提出采用变量液压泵和定量液压马达的闭式容积调速回路作为风力发电机组的能量传递系统,论述了采用液压传动代替齿轮传动带来的塔架承重减轻、能量柔性传递等优点.艾超^[4]对风力机采用定量泵-变量马达液压传动系统的转速与功率控制进行了研究,并在 30 kV·A 液压型风力发电机组模拟实验平台进行了马达恒转速和最优功率追踪控制方法的有效性验证.韩利坤^[5]用 Matlab 与 AMESim 软件对风力机采用液压介质传递能量过程中的“变速恒频”控制进行建模与仿真研究,并搭建试验台验证了能量液压传递变速恒频技术的可行性.王存堂等^[6]对风电液压增速传动及风能的储能方案进行了描述与分析,得出风能的储能对于解决风能资源的随机性有重要作用.艾超、孔祥东等^[7-9]开展了利用小信号线性化方法建立变量马达在稳定转速附近抗干扰控制方式、主传动系统瞬态特性和基于直接控制变量马达摆角的低电压穿越控制方法的研究.李飞龙、林勇刚等^[10-12]提出对变量泵+变量马达进行电液比例控制来达到最大能量捕获与马达恒转速控制.艾超等^[13-17]提出基于输出功率单一控制以及输出功率和风力机转速联合控制的两种风力发电机组最佳功率追踪方法,并分别对这两种最佳功率追踪控制方法进行了建模仿真和可行性实验验证.以上的研究工作主要集中在对用液压传动代替传统的齿轮变速箱传动后马达的恒转速控制和风能最大跟踪利用的研究,而对利用储能系统来消除风能间歇性对风力发电机组和电网带来的不利因素的相关研究成果未有报道.

兰州理工大学研究人员较早就开展了风力机的相关研究,并关注风力机静液压传动和储能调节的国内外研究热点^[18].2016年由兰州理工大学和兰州兰石集团联合成立兰州理工大学兰石研究院进行 600 kW 液压能量调节型风力发电试验机组的研发设计与与风力机液压能量传递与储存的相关技术研究.刘增光等^[19]对 600 kW 液压能量调节型风力发电机组非常规泵控马达闭式系统的风轮变转速输

入和恒马达转速输出控制技术进行研究,提出了一种新型控制策略来实现在风能波动时充分利用储能系统实现马达的恒转速输出控制.

加入储能系统还有一个重要的作用是无风时依靠储能装置储存的液压能来提供不间断的发电机功率输出,这也是项目组所设计的 600 kW 液压能量调节型风力发电试验机组的突出优点.因此本文对单独储能发电时马达的恒转速输出的控制技术和方法的研究将对液压能量调节型风力发电试验机组的工程应用和产业推广有重要的意义.

1 系统工作原理

液压能量调节型风力发电机组主要由风轮、定量液压泵、变量马达、储能系统、比例控制阀、同步发电机和补油系统等构成,其原理如图 1 所示.由图可知,加入储能系统后整个液压系统已经不是常规的泵控马达闭式调速系统.风轮吸收风能并驱动安装在机舱里的液压泵旋转,液压泵将风轮输出的机械能转换为液压能,把低压管路中的油液加压后送到地面的储能系统和变量马达,变量马达直接拖动同步发电机进行发电.当风速变化引起风轮转速波动时,储能装置通过吸收液压泵输出的部分油液或释放储存的液压能实现发电机输出功率的恒定.当风速很小或无风时依靠储能装置储存的液压能驱动马达进行发电,提高风力发电机组输出电能的稳定性.与储能系统相连的比例阀主要用来控制储能装置的切入与切出,与变量马达相连的比例阀用来控制进入马达的油液流量,实现马达转速保持在发电机同步转速.补油泵起防止机舱内主泵吸空和油液热交换的作用.

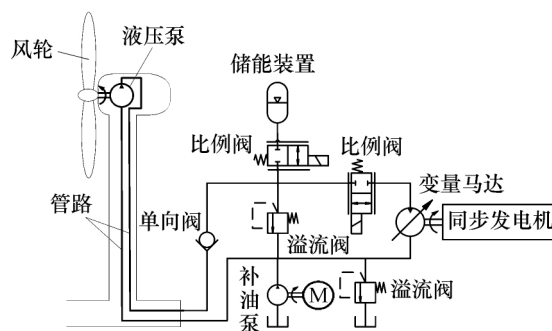


图 1 液压能量调节型风力发电机组原理图

Fig. 1 Schematic diagram of wind turbine set with hydro-power energy regulation

2 AMESim 仿真模型与控制策略

在 AMESim 软件的 sketch mode 下从 mechan-

ical、hydraulic、signal 和 control 库中选取相应元件的图形模型,依照系统工作原理进行连接,建立单独依靠储能装置储存液压能驱动马达的 AMESim 仿真模型,如图 2 所示. 仿真模型主要由 4 部分构成: 马达恒转速闭环控制部分; 变量马达的模拟负载部分,通过调节溢流阀的溢流压力来模拟同步发电机输出功率的变化; 比例阀恒压差闭环控制部分; 储能装置通过比例阀驱动变量马达的液压部分.

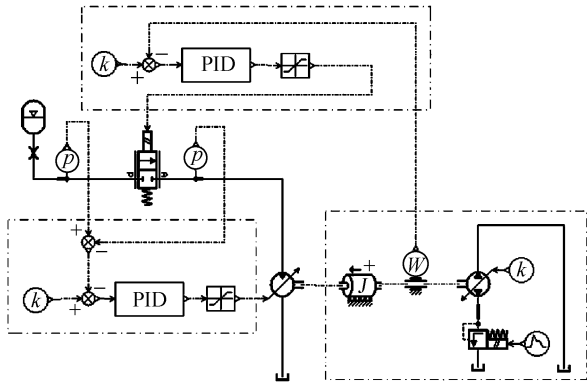


图 2 AMESim 仿真模型

Fig. 2 Simulation model based on AMESim

在储能装置单独驱动马达和发电机发电过程中,储能装置内部储存油液的压力随着液压能持续转换为电能而逐渐降低,使得比例阀入口压力也一起降低. 同时发电机输出功率的改变也导致比例阀出口压力发生变化,引起比例阀前后压差和进入马达流量的变化. 为了保持马达转速恒定且减小比例阀上损失的液压能,提出了一种新型的恒压差+恒转速的双闭环控制策略,如图 3 所示.

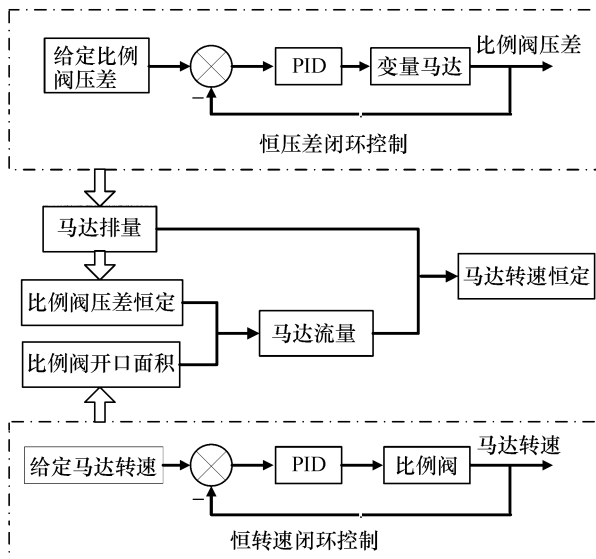


图 3 双闭环控制策略

Fig. 3 Double closed-loop control strategy

双闭环控制过程如下: 正常工作时在比例阀开口和变量马达排量保持不变的情况下,由于储能油液压力降低或发电机输出功率增加造成比例阀前后压差降低(压差偏差信号变为正)和通过比例阀的油液流量减小,马达转速相应变小(速度偏差信号变为正). 在恒压差闭环控制作用下,正的比例阀压差偏差使马达排量增大,比例阀出口压力降低直到比例阀前后压差等于给定偏差值. 此时,虽然比例阀的前后压差恢复到给定偏差值,但由于比例阀开口面积保持不变和马达排量的增加,马达转速仍然小于给定转速. 如果在恒压差闭环控制作用的同时加入恒转速闭环控制实现双闭环控制,则在比例阀前后压差保持给定压差的基础上,正的转速偏差信号控制比例阀开口面积增大,通过比例阀的流量变大. 如果比例阀流量增大的比例与马达排量变化比例相同则马达转速恢复到给定的发电机同步转速.

3 仿真分析

3.1 仿真参数

依照研发设计的 600 kW 液压能量调节型风力发电试验机组所选用各元件实际参数,设置仿真模型中的各参数,见表 1.

表 1 主要元件的仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of main components

参数	数值
蓄能器容量/L	8 000
蓄能器充气压力/MPa	10
蓄能器初始压力/MPa	16
比例阀额定流量/(L · min ⁻¹)	1 000
马达最大排量/(cmL · r ⁻¹)	500
恒压 PID 比例系数	1
恒压 PID 积分系数	6
恒转速 PID 比例系数	0.3
恒转速 PID 积分系数	0.000 1
给定比例阀压差/MPa	2
给定马达转速/(r · min ⁻¹)	1 500

3.2 仿真结果

将模拟负载溢流阀压力调定为 1 MPa,采用软件内置标准的积分求解器,设置仿真结束时间为 9 s 进行仿真运算,得到恒压差闭环控制单独作用与恒压差+恒转速双闭环同时控制下的蓄能器压力变化曲线(见图 4)、比例阀出口压力变化曲线(见图 5)、比例阀压差变化曲线(见图 6)、比例阀开口面积变化曲线(见图 7)、马达流量变化曲线(见图 8)、马达排量变化曲线(见图 9)和马达转速变化曲线(见图 10).

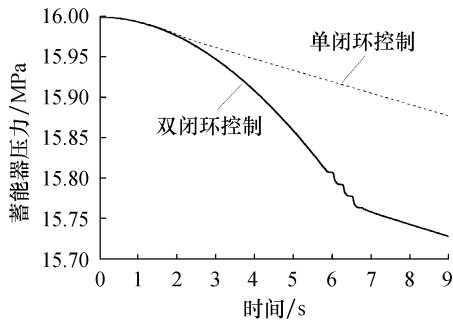


图 4 蓄能器压力变化曲线

Fig. 4 Pressure variation curve of energy accumulator

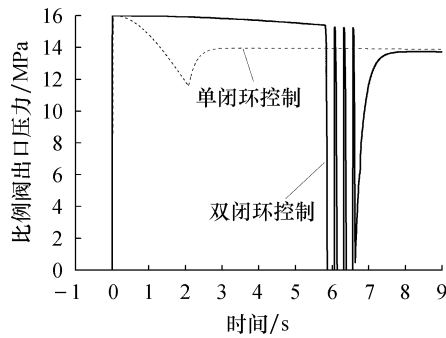


图 5 比例阀出口压力变化曲线

Fig. 5 Outlet pressure variation curve of proportional valve

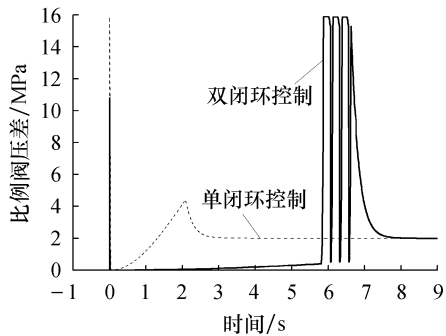


图 6 比例阀压差变化曲线

Fig. 6 Pressure difference variation curve of proportional valve

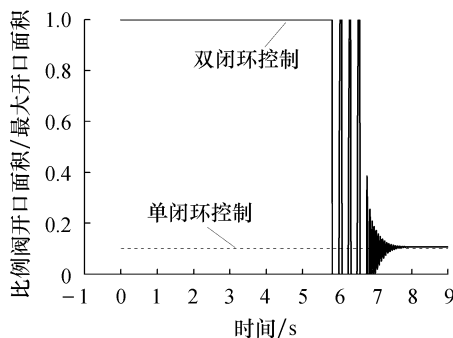


图 7 比例阀开口面积变化曲线

Fig. 7 Area variation curve of proportional valve opening

由图 4 可知, 两种情况下蓄能器内部油液压力随着油液流出蓄能器驱动马达旋转而逐渐降低, 但是在双闭环控制作用下由于蓄能器释放油液流量较

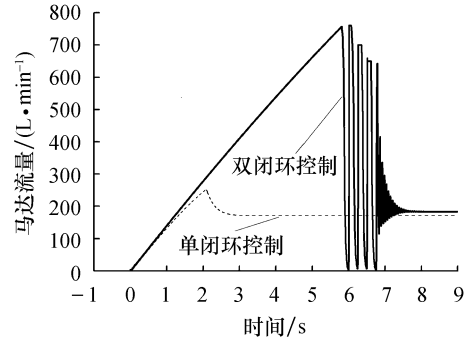


图 8 马达流量变化曲线

Fig. 8 Motor flow variation curve

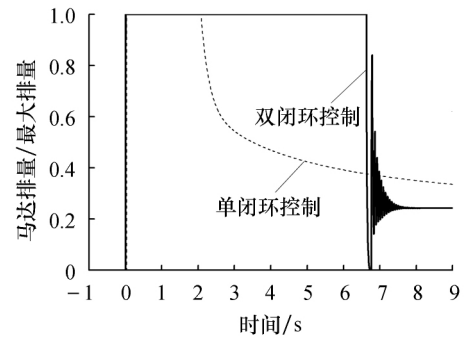


图 9 马达排量变化曲线

Fig. 9 Motor displacement variation curve

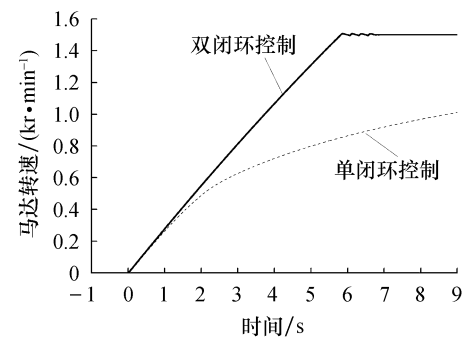


图 10 马达转速变化曲线

Fig. 10 Motor speed variation curve

大而压力下降的速度更快。

由图 5 可知, 比例阀出口压力在仿真开始的瞬间同时达到蓄能器油液压力 16 MPa. 在恒压差单独控制作用下比例阀出口压力快速降低到 11.5 MPa 后又迅速升高到 14 MPa. 而双闭环控制作用下比例阀出口压力在 6 s 之前从 16 MPa 下降的非常缓慢. 6 s 之后由于恒转速闭环控制的作用使比例阀开口面积发生振荡变化造成比例阀出口压力振荡后保持在 14 MPa.

由图 6 可知, 在恒压差单闭环作用下比例阀压差在 2 s 时有超调, 超调最大值约为 4 MPa; 3 s 以后压差降低到设定压差值并保持恒定. 在双闭环作用下 6 s 之前由于比例阀处于全开状态而使比例阀

压差远小于设定值;压差在 6 s 之后经过振荡于 8 s 达到设定值并保持恒定。

在恒压差单闭环作用时,为充分利用蓄能器储存的能量将比例阀的开口面积设置为最大开口面积的 10%。在双闭环控制作用下,比例阀的开口面积由恒转速闭环控制来决定。从图 7 可以看到,在正速度偏差信号作用下比例阀的开口面积在 6 s 之前一直保持为最大开口面积,6 s 之后经过振荡衰减后于 7.5 s 达到稳定值。同时可以看出由于比例阀开口面积较大幅度的振荡引起通过比例阀的油液流量和比例阀前后压差都发生大幅度波动,因此可通过调整双闭环控制参数来限制比例阀开口面积变化的速度和幅度,以免系统出现剧烈波动。

由图 8 可知,在单闭环控制作用下,由于比例阀开口面积始终恒定和比例阀压差在 3 s 后达到设定值,因此马达流量在 3 s 后也恒定为 170 L/min。而在双闭环控制作用下马达的流量在 6 s 之前一直是增加,最大流量约为 750 L/min,6 s 之后经过短暂振荡后保持在 183 L/min。

由图 9 可知,在恒压差单闭环控制作用下马达的排量 2.2 s 后开始逐渐减小。而在双闭环控制作用下马达的排量从 6.7 s 后开始振荡衰减,最后保持在最大排量的 24%。

通过图 7~10 可知,虽然在恒压差单闭环控制作用下通过马达的流量很快为恒值,但是由于马达排量的逐渐减小使马达的转速逐渐增大。而在双闭环控制作用下,由于恒转速闭环控制回路的加入,比例阀开口面积开始一直处于最大,通过比例阀的流量持续增加,马达转速在 6 s 时就达到设定的同步转速。

4 结论

1) 本文建立了液压能量调节型风力发电机组储能系统独立发电时的仿真模型,应用提出的恒压差+恒转速的双闭环控制策略实现了无风时依靠储能系统驱动马达恒转速输出发电。

2) 只采用恒压差单闭环控制时马达排量在 2 s 时开始变化,使比例阀压差 3 s 时就开始稳定在设定的 2 MPa,但由于比例阀开口不能根据马达转速自动调节,因此马达转速无法保持要求的同步转速。

3) 采用双闭环控制时,在马达转速没有达到设定转速之前比例阀始终处于最大开口,此时压差远小于设定值,马达排量也处于最大排量。转速高于给定转速后在恒转速闭环控制作用下比例阀开口面积减小,通过比例阀油液对应的压差大于设定压差时

恒压差闭环控制回路起作用,使马达排量发生变化,最后两个闭环控制回路都达到平衡后马达转速恒定在 1 500 r/min。下一步将在研发的 600 kW 液压能量调节型风力发电试验机组上进行双闭环恒转速控制策略的实验验证和控制参数优化研究。

参考文献:

- [1] 孔祥东,艾超,王静. 液压型风力发电机组主传动控制系统综述 [J]. 液压与气动,2013(1):1-7.
- [2] 赵克刚,柳文斌. 基于液压复合传动的变速恒频风力发电系统研究 [J]. 液压与气动,2008(3):53-56.
- [3] 陈建业,周强. 液压传动在风力发电系统中的应用 [J]. 移动电源与车辆,2011(1):30-32.
- [4] 艾超. 液压型风力发电机组转速控制和功率控制研究 [D]. 秦皇岛:燕山大学,2012.
- [5] 韩利坤. 基于能量液压传递的风力机“变速恒频”技术研究 [D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [6] 王存堂,朱宏,杨明泽,等. 风电系统的液压增速传动及储能技术 [J]. 流体传动与控制,2012(5):1-4.
- [7] 艾超,孔祥东,陈文婷,等. 液压型风力发电机组主传动系统稳速控制研究 [J]. 太阳能学报,2014,35(9):1757-1763.
- [8] 艾超,孔祥东,闫桂山,等. 液压型风力发电机组低电压穿越过程主传动系统瞬态特性研究 [J]. 机电工程,2014,31(9):1127-1131.
- [9] 孔祥东,艾超,闫桂山,等. 液压型风力发电机组低电压穿越控制方法研究 [J]. 中国机械工程,2014,25(16):2137-2143.
- [10] 李飞龙,林勇刚,李伟,等. 风能静液压传动控制技术 [J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(6):1664-1668.
- [11] 林勇刚,王贤成,王菁,等. 基于液压传动的离网型风力机“变速恒频”控制研究 [J]. 太阳能学报,2014,35(10):1965-1970.
- [12] LIN Y G, TU L, LIU H W, *et al.* Hybrid power transmission technology in a wind turbine generation system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(3): 1218-1225.
- [13] 艾超,陈立娟,孔祥东,等. 液压型风力发电机组功率追踪方法研究 [J]. 热能动力工程,2015,30(6):946-952.
- [14] 艾超,陈文婷,孔祥东,等. 基于反馈线性化的液压型风力发电机组最佳功率追踪控制 [J]. 控制理论与应用,2015,32(6):778-786.
- [15] 艾超,孔祥东,闫桂山,等. 液压型风力发电机组最优功率追踪控制方法研究 [J]. 动力工程学报,2015,35(2):126-133.
- [16] 艾超,闫桂山,孔祥东,等. 液压型风力发电机组最佳功率追踪控制研究 [J]. 热能动力工程,2015,30(1):138-144.
- [17] 艾超,陈立娟,孔祥东,等. 基于有功功率控制的液压型风力发电机组最佳功率追踪策略关键问题研究 [J]. 机械工程学报,2017,53(2):192-198.
- [18] 李仁年,李银然,王秀勇,等. 风力机翼型的气动模型及数值计算 [J]. 兰州理工大学学报,2010,36(3):65-68.
- [19] LIU Z G, YANG G L, WEI L J, *et al.* Variable speed and constant frequency control of hydraulic wind turbine with energy storage system [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017,9(8):1-10.