

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.04.009

达里厄垂直轴风力机叶片螺旋变异优化研究

顾怡红¹, 巫少龙¹, 胡树根²

(1. 衢州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 衢州 324000; 2. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要:针对传统达里厄(Darrieus)直叶片垂直轴风力机在运行过程中出现叶片动转矩周期波动性大,动转矩系数曲线震荡剧烈,造成对风轮旋转主轴的强烈冲击及风力机功率输出不稳定等问题,文章提出对 Darrieus 垂直轴风力机传统直叶片进行螺旋扭曲变异设计,以改善风力机叶片的动转矩输出性能。结合 SolidWorks 和 MATLAB 完成风力机模型的三维参数化建模,在流体仿真软件 FLUENT 中完成模型的数值模拟仿真计算。通过螺旋扭曲角的单因素试验验证了变异设计叶片输出的动转矩性能周期波动性降低,平均动转矩得到提高,并确定螺旋扭曲角的优化区间。文章构建了风力机系统模型建立与仿真体系,采取螺旋扭曲变异设计,改善了风力机叶片输出的动转矩性能,初步确定合理的螺旋扭曲角分布范围为:70°~110°。

关 键 词:Darrieus 风力机;螺旋扭曲;计算流体动力学(CFD);动转矩;动转矩系数周期标准差

中图分类号:TK83

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)04-0044-05

Research on Optimization of Helical Twisted Blade of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine

GU Yihong¹, WU Shaolong¹, HU Shugen²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problems of strong torque pulse, lower average torque, and strong cyclic fatigue force on the blades and unsmooth power output in the operation of traditional Darrieus straight-blade vertical axis wind turbine (VAWT), a helical twisted design for the traditional straight-blades was put forward in this paper. By combining SolidWorks and MATLAB, the parametric modeling of variant wind rotor was finished, and the dynamic numerical simulation for the operation process of Darrieus wind rotor was done with the CFD software of FLUENT. The single factor experimental study of helical twisted angle showed that the new design reduced the cyclic pulse of the torque and improved the torque, which determined an initial reasonable distribution range of helical twisted angle. This paper indicated the construction of the wind turbine system model and simulation system and helical twisted design could be used to improve the output of the wind turbine blade dynamic torque performance, the range had been optimized helical twist of the foot which was between 70° and 110°.

Key words: Darrieus wind turbine; helical twisted angle; CFD (Computational Fluid Dynamics); torque coefficient; standard deviation of torque coefficient

目前针对 Darrieus 风力机的研究主要集中在对直叶片垂直轴风力机的研究^[1-2]。由于风轮的性能是决定风力机性能的重要因素,许多学者对风轮进行优化设计来提高风能利用率,而叶片的气动和外形对风轮的空气动力学性能起着关键作用,影响着风力机的风能利用率,因此风轮的优化主要集中在叶片的优化。

叶片基本结构参数的优化,是在满足风轮强度、稳定性、可靠性等基本结构性能基础上,叶片不同的参数匹配设计使得风轮具有最高的风能利用率,达到最大的经济效益。Payam Sabaeifard 等人通过 CFD 数值模拟和风洞试验对比,对 Darrieus 直叶片垂直轴风力机的叶片数目、截面翼型、风轮实度等参数对风力机功率

收稿日期:2016-02-25;修回日期:2016-05-06

作者简介:顾怡红(1988),女,浙江海宁人,硕士,主要研究方向为现代设计理论与方法。E-mail:448286040@qq.com

系数的影响进行定性和定量的分析,得出风力机的功率系数随着风轮实度的增加先增大后减小,曲线变得陡峭,而且当叶片数目为3时风力机的功率系数最高^[3]。Sung-Cheoul Roh 等人采用多流管模型数值分析方法,研究翼型、雷诺数、实度对直叶片垂直轴风力机性能的影响,研究结果表明叶片翼型的变化直接影响风机的性能,在一定范围内,风力机的功率系数随着雷诺数的增大而增大,超过一定值后随着雷诺数的继续增大功率系数反而降低^[4]。杨从新、巫发明等人基于双向多流管理论模型研究叶尖速比和风轮实度对直叶片垂直轴风力机的空气动力学性能的影响,计算结果表明随着叶尖速比的增加,风轮的功率系数呈现先增大后减小的趋势,近似抛物线变化规律;随着实度的增加,风力机的功率系数先增大后减小,且最高效率点向低尖速比区移动,风能高效区范围变窄^[5]。国内外对风轮气动结构参数的研究大多是基于理论模型计算或者数值模拟的单因素研究,只是探索出参数的变化趋势,但对于各参数的综合影响考虑较少。

为了降低直叶片垂直轴风力机运转中出现的较大的周期疲劳应力,Martino Marini 等人曾对直叶片进行扭曲设计,研究其对风力机叶片受力的影响,分别通过促动盘理论模型和自由涡流模型这两种半经验法则进行理论计算,计算结果表明与传统的直叶片相比,扭曲叶片所受的合力周期波动较小,叶片受力情况得到改善^[6]。

综上所述,针对 Darrieus 直叶片垂直轴风力机在运行过程中出现叶片动转矩周期波动性大,动转矩系数曲线震荡剧烈,造成对风轮旋转主轴的强烈冲击,风力机功率输出不稳定等问题,本文对传统的 Darrieus 风力机直叶片采取螺旋扭曲变异设计,以期改善风力机叶片输出的动转矩性能。

1 Darrieus 风力机建模及仿真

1.1 Darrieus 风力机模型的建立

本文选择 Van Bussel 等人^[7]研究的 Darrieus 3 叶片垂直轴风力机的模型为试验模型进行性能研究,并对该试验模型的结构参数进行变异优化设计,目的是降低传统 Darrieus 直叶片垂直轴风力机的动转矩周期波动性,提高风力机叶片输出的平均动转矩水平。具体参数如表 1 所示。

Darrieus 垂直轴风力机由叶片、旋转轴、支撑、塔架、发电机等组成。由于影响风力机空气动力学性能的关键部位是风轮,且三维模拟仿真网格数量多,计算量大、计算时间长,故对模型进行简化,选取了影响风

表 1 原型机叶片的基本气动参数

Table 1 Basic parameters of blade

叶片数目 N	风轮直径 D/mm	叶片长度 L/mm	风轮扫略 面积 S/m^2
3	2 000	2 650	5.3
叶片截面 翼型	叶尖速比 λ	额定风速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	叶片截面弦 c/mm
NACA0018	3	10	120

力机空气动力学性能的主要因素——风轮的叶片和主轴为研究对象,忽略塔架和支撑的影响。图 1 为直叶片风轮计算简化模型。在传统直叶片风轮的气动结构参数的基础上,本文提出一个新的结构参数,即螺旋扭曲角 ξ ,将传统直叶片沿着逆时针方向螺旋扭曲一定角度,形成新的变异风轮,如图 2 所示为 80° 扭曲风轮示意图。



图 1 直叶片风轮计算简化模型示意图

Figure 1 Straight blade wind turbine calculation simplified schematic model

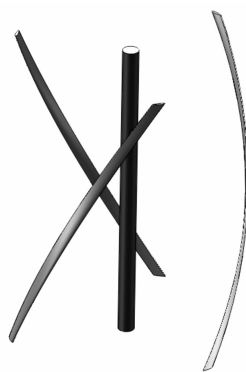


图 2 80° 扭曲变异风轮计算简化模型示意图

Figure 2 80° twisted variation simplified model of wind turbine schematic

本文选取叶片螺旋扭曲角 ξ 的结构参数为研究对象,其中选取决定风轮实度的具体因素——叶片的弦长 c 为参数变量,结合 MATLAB 并利用 SolidWorks 对风轮进行参数化建模。以叶片输出的动转矩性能为优化目标,对风轮气动结构参数进行优化设计分析^[8-9]。

本文对叶片的旋转运动采用瞬态仿真,综合考虑计算结果准确度、计算量、计算时间等因素,采用 FLUENT 滑移网格技术,需要将流动风场的计算域分为2个部分:旋转域和静止域。2个域之间用风场交界面分割,风场边界与交界面之间的计算区域为外部静止域,叶片与交界面之间的计算域为内部旋转域,交界面示意图如图3所示。经过多次试验验证最终选取风场尺寸为:风场沿着风向长度为2 000 mm,宽度为1 600 mm,风场高度为1 000 mm,旋转域为高300 mm,直径为240 mm的圆柱面。

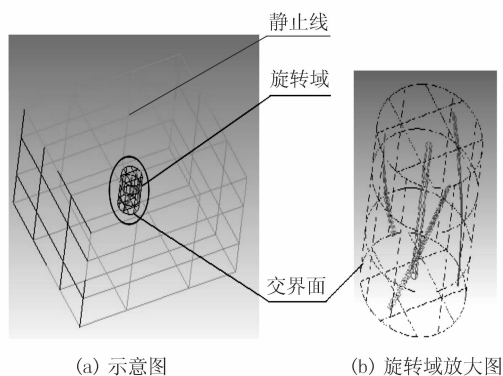


图3 风场及交界面示意图

Figure 3 Wind and interface schematic

1.2 变异风轮模型的仿真与验证

本文采用流体模拟仿真软件 FLUENT 对 Darrieus 风轮叶片的旋转运动进行瞬态模拟仿真,并实时监测叶片输出的动转矩曲线变化。叶片周围的空气流动属于湍流模型,选择湍流模型中的 Realizable κ - ε 模型,并设定初始边界条件入口风速为 10 m/s,根据已知参数计算设定入口湍流的湍动能为 $0.126\ 74\ \text{m}^2/\text{s}^2$,湍动能耗散率为 $0.086\ 04\ \text{m}^2/\text{s}^3$ 。

对旋转流体机械而言,尤其是在非定常流动情况下,一般至少需要计算3到5个循环周期才可能得到理想的稳定流动状态。本文设定时间步长为0.001 s,单步内最大迭代次数为20次,时间步数为850,约为4.1个旋转周期。

经过约16~20 h的计算求解后,直叶片和螺旋扭曲角为80°的风轮叶片转矩曲线的计算结果如图4所

示,从图中可以看到经过初期的剧烈震荡后,流场开始趋于稳定,输出的转矩曲线在0.3 s以后,即从第2个风轮旋转周期开始平稳变化。图中2条曲线的对比可以看到,螺旋扭曲叶片的动转矩曲线周期波动性明显低于直叶片,平均动转矩水平也不低于直叶片,这验证了对直叶片的螺旋扭曲变异能够改善风力机叶片输出的动转矩性能,可达到预期的目标。

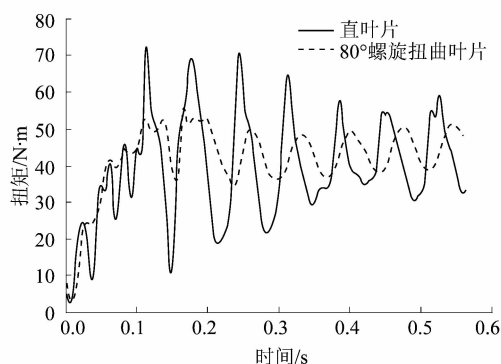


图4 直叶片和80°螺旋扭曲叶片动转矩变化曲线

Figure 4 Straight blade and movable blade
80° helical twist torque curve

2 基于螺旋扭曲角因素试验优化

对叶片螺旋扭曲变异设计是指将叶片由单纯的垂直方向延伸成周向的螺旋方向^[10]。假设叶片的螺旋扭曲角为 ξ ,叶片长度为 L ,则叶片在单位高度内周向扭转了 ξ/L 角度,其物理意义可以视为不同高度的叶片微元段产生动转矩的时刻发生了滞后或者提前,则将叶片在高度方向上微分后,不同微元段的叶片在不同的时刻产生转矩,风轮转动时叶片无论是在顺风区还是逆风区都能产生转矩,因此,叶片动转矩之和是在整个旋转周期内连续产生的,避免了传统直叶片的极值情况,降低传统直叶片输出动转矩的周期波动性,从而改善功率输出情况。因此,在风轮高度一定的情况下,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 区间内,总存在一个合理的螺旋角 ξ 分布区间,使得动转矩周期波动相对较小,平均值相对较大。本文利用单因素试验法的目的就是要确定合理的螺旋扭曲角分布区间。

由于叶片扭曲角过大会降低叶片的强度,反而不利于动转矩的产生^[11],因此选择螺旋扭曲角范围为 $0^\circ \sim 150^\circ$,对 FLUENT 输出的动转矩系数文件进行计算处理后得到实际动转矩 T ,并从中提取出稳定流场时风轮运行单个周期内的动转矩离散点进行研究分析,如图5所示为螺旋扭曲角为 $0^\circ \sim 150^\circ$ 时各变异叶片在单周期内动转矩变化曲线。

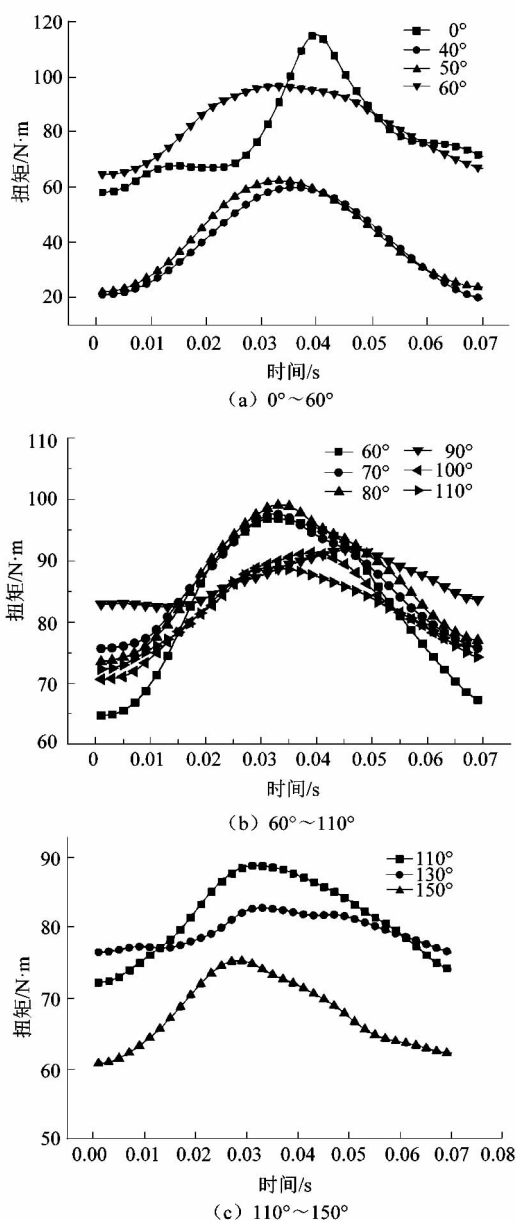


图5 Darrieus 风力机不同螺旋扭曲的变异叶片单周期内动转矩变化曲线

Figure 5 Dynamic torque curve of variation within a single cycle Darrieus wind turbine blades of different helical twist

从图5中可以直观看出,就动转矩曲线的波动幅度而言,经过螺旋扭曲的 Darrieus 风力机叶片输出的动转矩性能普遍优于直叶片(螺旋扭曲角为 0°),而且 $60^\circ \sim 110^\circ$ 范围内螺旋扭曲叶片输出的动转矩曲线震荡幅度较小,动转矩输出变得平稳,而且平均动转矩系数具有较高水平,是理想的范围区间。

风力机叶片输出的平均动转矩衡量了风力机的风能转化能力。平均动转矩越大,风力机实际输出的轴

功率就越大,风力机的发电能力就越强。标准差能反映一个数据集的离散程度,若标准差值越大,则此数据集的波动性越大,变化越不稳定。传统上针对叶片转矩的研究主要集中在平均动转矩上,但平均数相同时,标准差未必相同,则动转矩输出平稳性也未必相同,因此动转矩平均值不能全面衡量动转矩输出性能的优劣。故文本引入动转矩周期标准差这个评价指标来衡量叶片输出动转矩曲线的波动性。动转矩周期标准差不仅能反映出动转矩的变化范围,而且能反映出整体的波动大小。因此,研究叶片输出动转矩的标准差对于确定合理的螺旋扭曲角,降低动转矩曲线波动性有重要意义。

本文对风力机叶片输出的实际动转矩经过计算处理,得到 $0^\circ \sim 150^\circ$ 范围不同螺旋扭曲角下的叶片单周期内的平均动转矩离散点和动转矩周期标准差,在 Origin 软件中对这些离散点进行多项式曲线拟合,得到如图6~7所示的变化曲线图。

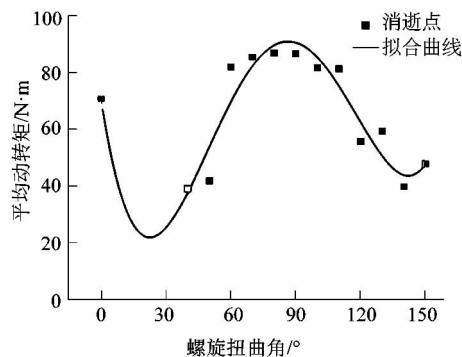


图6 变异叶片单周期内平均动转矩变化规律

Figure 6 Average fixed blade torque variation within a single cycle

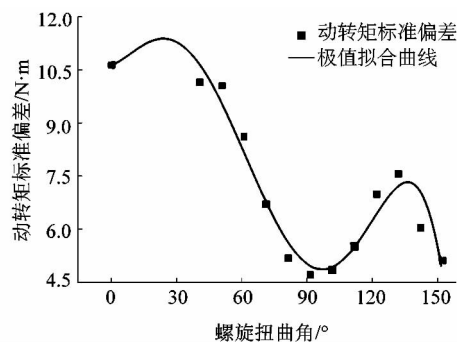


图7 变异叶片单周期内动转矩标准差变化规律

Figure 7 Fixed blade variation within a single cycle torque variation of standard deviation

从图6中可以看出,随着螺旋扭曲角从 0° 到 150° 变化时,平均动转矩值先变小后变大,近似符合四次函

数的变化规律。在 0 到 150° 之间,直叶片(即螺旋扭曲角为 0° 时)的平均动转矩值约为 $70.796 \text{ N} \cdot \text{m}$,平均动转矩曲线中出现了 1 个极大值点,在 90° 附近约为 $86.880 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。理想的平均动转矩应该取波峰附近,因此本文中理想的叶片螺旋扭曲角范围为 $60^\circ \sim 110^\circ$,在该范围内,与传统的 Darrieus 垂直轴风力机直叶片相比,平均动转矩值最大可提高约 22.7% ,这表明在相同条件下,螺旋扭曲的叶片输出的平均动转矩较大,风能利用率较高,发电能力更强。

从图 7 中可以看到,螺旋扭曲角从 0° 到 150° 变化时,叶片输出的动转矩周期标准差曲线近似符合五次函数的变化规律,直叶片动转矩周期标准差值约为 $15.398 \text{ N} \cdot \text{m}$,曲线中有 1 个极小值点位于 90° 附近,此时叶片动转矩周期标准差值达到极小值约为 $3.848 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。从动转矩周期标准差变化的角度出发,理想的螺旋扭曲角应选在波谷附近,图 6 中 90° 附近为第 1 次波谷, 130° 之后的叶片动转矩周期标准差虽然在逐渐减小,但螺旋扭曲角变大,对叶片的强度损伤随之增大,加工工艺也变得复杂,所以,理想的 Darrieus 风力机叶片螺旋扭曲角的取值范围在 $70^\circ \sim 110^\circ$ 之间较合适。该范围内动转矩周期标准差值与直叶片相比,降低了约 $49.7\% \sim 75\%$,即叶片输出的动转矩波动性大幅度降低,动转矩曲线变化比较平稳。

综合以上分析,最终初步确定合理的螺旋扭曲角分布范围为: $70^\circ \sim 110^\circ$ 。此范围内,平均动转矩值提高了 $15\% \sim 22.7\%$,动转矩周期标准差降低了 $49.7\% \sim 75\%$ 。

3 结语

传统 Darrieus 直叶片垂直轴风力机在运行过程出现叶片输出动转矩周期波动性过大,造成对旋转轴的强烈冲击、功率输出不稳定等问题,导致风力机寿命下降,严重时甚至发生失效故障。为降低风力机叶片的动转矩波动性,改善动转矩输出性能,本文采用螺旋扭曲的方式对直叶片进行变异设计,并结合风轮的重要气动结构参数,以优化风力机叶片输出的动转矩综合性能为目标,对风轮叶片展开了优化设计,主要工作总结如下:

1) 风力机系统模型建立与仿真体系的构建。以螺旋扭曲角 ξ 、风轮实度 σ 为变量,利用 MATLAB 强大的矩阵运算功能设计叶片各个截面曲线,并基于 SolidWorks 方程式驱动样条曲线建模,完成变异叶片的三维模型建立。利用 ANSYS Workbench 提供协同仿真环境平台建立数值模拟仿真体系。在 ICEM CFD

中完成对风轮和风场模型的网格划分,在 FLUENT 仿真软件中进行求解参数的设置,并使用滑移网格技术和 Realizable $\kappa\text{-}\varepsilon$ 湍流模型对变异 Darrieus 风力机叶片的旋转运动进行动态仿真,利用 CFD-Post 后处理模块对求解结果进行后处理。

2) 通过对螺旋扭曲角进行单因素试验初步确定螺旋扭曲角的优化分布区间。根据螺旋扭曲角在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 范围变化安排 13 组试验,得到各变异叶片的动转矩曲线,结果表明,螺旋扭曲叶片的动转矩曲线变化直观上比直叶片的波动性小,动转矩周期标准差普遍地比直叶片的低,以较平稳的动转矩曲线、较低的动转矩周期标准差和较高的平均动转矩值为评价标准,初步确定合理的螺旋扭曲角分布范围为 $70^\circ \sim 110^\circ$,该范围内螺旋扭曲叶片动转矩周期标准差降低了 $49.7\% \sim 75\%$,平均动转矩值提高了 $15\% \sim 23\%$,动转矩综合性能优于直叶片。

参考文献:

- [1] 马海波. Darrieus 风轮的空气动力特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010:1-7.
- [2] 张凯. 兆瓦级 Darrieus 型立轴式风力机空气动力学性能评价和结构动特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010:4-6.
- [3] ISLAM M, TING D S K, FARTAJ A. Aerodynamic models for Darrieus-type straighted-blade vertical axis wind turbines[J]. Renewable and sustainable energy review, 2008, 12(4): 1087-1109.
- [4] ROH S C, KANG S H. Effects of a blade profile, the Reynolds number, and the solidity on the performance of a straight bladed vertical axis wind turbine[J]. Journal of mechanical science and technology, 2013, 27(11): 3299-3307.
- [5] 杨从新, 巫发明, 王立鹏, 等. 设计参数对直叶片垂直轴风力机功率系数的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(5): 47-50.
- [6] MARINI M, GAZZANO R, SATTI A. Semi-empirical methods for the analysis of vertical axis wind turbines with helical blades[C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Glasgow, UK: American Society of Mechanical Engineers, 2010: 883-890.
- [7] Van BUSSEL G J W, MERTENS S, POLINDER H, et al. Turby: concept and realization of a small VAWT for the built environment[C]//The science of making torque from Wind. Delft, Netherlands: EAWE/EWEA Special Topic Conference, 2004: 19-21.
- [8] 杨声虎. 唐代古建筑风荷载体型系数的数值风洞模拟计算[D]. 西安:长安大学, 2013: 21-23. DOI: 10.7666/d. D407397.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 116-143.
- [10] 李岩. 垂直轴风力机技术讲座(五): 垂直轴风力机设计与实验[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 120-122. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-5292. 2009. 05. 029.
- [11] SMITH T C. Aerodynamic design of wind turbine blades for maximum wind power extraction[D]. Sheffield, UK: The University of Sheffield, 2006: 1-15.