

基于长期实测资料的风速测量相关推测方法对比

蔡彦枫¹, 王海龙¹, 周川¹, 陈德辉¹, 彭明²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广东省风力发电有限公司, 广州 510630)

摘要: 针对海上风电的风能资源评估, 利用4个沿海自动气象站2003—2010年的逐时测风数据与同期MERRA再分析资料, 通过6组数值试验, 从平均风速、风速标准差、平均风功率密度和风力发电机组的年发电量等4个评价指标全面对比分析了8种风资源测量-相关-推测方法。结果表明: 简单正交回归法、简化主轴回归法、分位数回归法、Weibull尺度拟合法和矩阵时间序列法对平均风速的推测结果更优, 简单正交回归法、简化主轴回归法和Weibull尺度拟合法对风速标准差和平均风功率密度的推测结果更优, 联合概率分布法对风向-风速联合频率分布和风机发电量的推测结果明显优于其他方法。参证站自身的数据质量和空间代表性对测量-相关-推测方法的表现具有潜在影响, 在实际工作中应对多种测量-相关-推测方法进行集成运用和综合判断, 以符合海上风电多层次、多目标的风资源评估需求。

关键词: 风速; 测量-相关-推测方法; 海上风电

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)03-0097-06

Comparison of Measure-correlation-predict Algorithms in Offshore Wind Power Assessment with Multi-year Observation of Automatic Weather Stations

CAI Yanfeng¹, WANG Hailong¹, ZHOU Chuan¹, CHEN Dehui¹, PENG Ming²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Guangdong Wind Power Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

Abstract: For offshore wind power assessment, eight kinds of Measure-Correlation-Predict (MCP) algorithms have been employed to compare mean wind speed, standard deviation of wind speed, mean power density and annual energy output of wind turbine in six numerical experiments with wind observation of four automatic weather stations in Pearl River Delta and reanalysis dataset MERRA from 2003 to 2010. The results show that Simple Orthogonal Regression (SOR), Reduced Major Axis regression (RMA), Quantile Regression (QR), Weibull Scale Fitting (WS) predict better mean wind speed. Besides, SOR, RMA and WS predict better standard deviation of wind speed. Joint Probability Distribution algorithm (JPD) predicts better energy output of wind turbine.

Key words: wind speed; measure-correlation-predict; offshore wind power

海上风电作为风能利用的新阶段与新方向, 与陆上风电相比具有更稳定的风能资源、更可观的开发规模、更高效的发电效率、更节省的土地利用、更便利的电网接入等独特优势, 因此在世界范围内受到普遍关注。海上风能资源的调查与评估是海上

风电开发面临的首要问题, 目前通行的做法是: 首先在场址内树立不少于1座且高度不低于100 m的海上测风塔, 接着进行持续至少2年的连续测风调查, 然后根据场址周围长期测站(参证站)的同期测风数据对测风塔(目标站)进行相关, 最后利用相关模型从参证站的长期测风数据推测目标站的长期风能资源状况。

在欧洲和北美, 上述做法被称为测量—相关—推测方法(Measure-Correlation-Predict, MCP)。MCP方法经过二十多年的不断研究和发展, 已经

收稿日期: 2016-07-07

作者简介: 蔡彦枫(1986), 男, 广西柳州人, 工程师, 硕士, 主要从事电力工程水文气象条件评估工作(e-mail) caiyanfeng@gedi.com.cn。

形成包含一元线性回归、多元线性回归、非线性拟合、一阶和二阶马尔可夫链、快速傅里叶变换、贝叶斯网络、人工神经网络等多种手段,涉及风速序列拟合、风速频率分布和风向频率分布拟合的庞大体系^[1-3],其中不少方法被业界所认可,成为海上风电资源评估的推荐方法,并纳入到知名的评估软件中^[4-5]。

在我国,陆上风电场的风能资源评估研究工作开展较多,已利用实测资料对多种 MCP 方法进行对比并取得相应成果^[6-7];而海上风电场的相关研究仍处在起步阶段,亟待开展面向近海风场环境的 MCP 方法对比与评价。本文将利用4个沿海自动气象站的长期观测资料,设计数值试验和评价指标,对8种不同类型的 MCP 方法进行对比分析,从而为今后海上风电项目可行性研究阶段的风能资源评估提供建议。

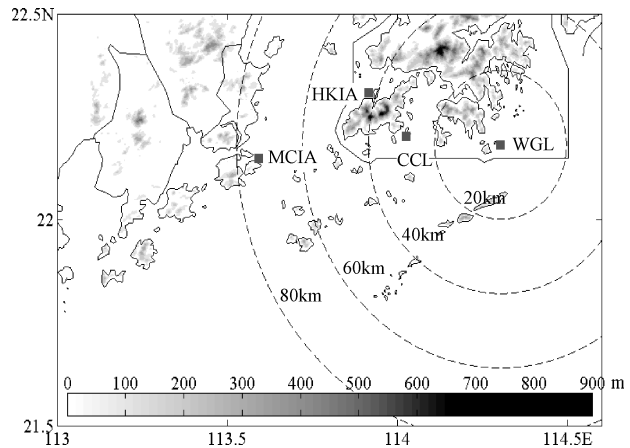
1 资料与方法

1.1 地面气象站资料

地面气象站资料来自美国国家海洋大气局(NOAA)的全球地面逐时观测数据库^[8]。该数据库因为收录了全球约2万个地面气象站近60年的气温、气压、露点温度、风速、风向、降水量等历史气候资料而被广泛引用。本文涉及该数据库中香港和澳门地区的4个地面气象站,并采用上述站点经过数据质量控制后的逐时风速、风向序列,资料年限为2003—2010年,站点信息见表1,站点分布如图1所示。

1.2 再分析资料

再分析资料来自美国国家航空航天局(NASA)的戈达德地球观测系统及其资料同化系统,简称MERRA再分析资料集^[9]。该资料集的水平分辨率为 $\frac{1}{2}$ 纬度 \times $\frac{2}{3}$ 经度,垂直分层为72层;覆盖全球陆地区域以及离岸50 km以内的近海区域,提供气温、海平面气压、位势高度、风速和风向、降水量等逐时气象要素,在气候变化、大气模式评估以及区域风能资源评估等领域受到广泛关注。本文采用该资料集10 m高度的风速、风向诊断数据,格点编号(441, 225),对应21.75°N~22.25°N, 113.0°N~113.67°E的区域范围,资料年限与地面气象站资料相同。



注: WGL 为香港横澜岛自动气象站; CCL 为香港长洲岛自动气象站; HKIA 为香港国际机场自动气象站; MCIA 为澳门国际机场自动气象站; 虚线表示以其余气象站到达 WGL 的空间距离, 单位为 km; 色阶表示地形海拔高度, 单位为 m。

图1 地面自动气象站的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of automatic weather stations

表1 地面气象站说明

Tab. 1 Introduction to automatic weather stations

项目	WGL	CCL	HKIA	MCIA
属地	香港	香港	香港	澳门
站点名称	横澜岛	长洲岛	香港机场	澳门机场
经纬度	22.183°N 114.3°E	22.2°N 114.017°E	22.309°N 113.915°E	22.15°N 113.592°E
平均风速	6.4 m/s	5.1 m/s	4.8 m/s	4.7 m/s
主导风向	ENE (19%)	E (24%)	E (21%)	N (22%)

注: 资料年限为2003—2010年。

1.3 MCP方法

1.3.1 风速相关方法

1) 普通线性回归

普通线性回归(Ordinary Linear Regression, OLR)认为目标站与参证站的风速在不同的风向扇区内存在一元线性关系:

$$v_t = av_r + b \quad (1)$$

式中: v_t 为目标站风速, v_r 为参证站风速, a 为斜率, b 为截距。

基于最小二乘法原理, a 和 b 的表达式分别为:

$$b = \overline{v_t} - a \overline{v_r} \quad (2)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (v_t^i - \overline{v_t})(v_r^i - \overline{v_r})}{\sum_{i=1}^n (v_r^i - \overline{v_r})^2} \quad (3)$$

式中: v_t^i 和 v_r^i 为目标站和参证站的逐时风速, $\overline{v_t}$ 和 $\overline{v_r}$ 为两站风速序列的平均值。

2) 简单正交回归

简单正交回归 (Simple Orthogonal Regression, SOR) 认为目标站与参证站间的关系形如(1), 截距 b 的表达式形如式(2), 但斜率 a 的表达式为:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (v_t^i - \bar{v}_t)^2 - \sum_{i=1}^n (v_r^i - \bar{v}_r)^2}{2 \sum_{i=1}^n (v_t^i - \bar{v}_t)(v_r^i - \bar{v}_r)} + \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^n (v_t^i - \bar{v}_t)^2 - \sum_{i=1}^n (v_r^i - \bar{v}_r)^2]^2}{4[\sum_{i=1}^n (v_t^i - \bar{v}_t)(v_r^i - \bar{v}_r)]^2} + 1} \quad (4)$$

3) 简化主轴回归

简化主轴回归 (Reduced Major Axis regression, RMA) 可以认为是 OLR 的变形, 其斜率 a 的表达式如下:

$$a = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_t^i - \bar{v}_t)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_r^i - \bar{v}_r)^2} \quad (5)$$

4) 分位数回归

分位数回归 (Quantile Regression, QR) 可以认为是 OLR 的延伸, 通过在不同分位数 τ 下建立形如(1)的不同分位函数, 形成描述目标站与参证站关系的函数群, 从而避免风速序列中的极端值所引起的异方差以及对 v_t 与 v_r 关系式的冲击。

通常取 $\tau = 0.5$, 即中位数条件下寻求斜率 a_τ 和截距 b_τ 。根据最小一乘法原理, 利用单纯形法求解如下的线性代数问题:

$$(a_\tau, b_\tau) = \operatorname{argmin}_{a_\tau, b_\tau \in R^n} \left\{ \sum_{v_t \geq a_\tau v_r + b_\tau} \tau |v_t - a_\tau v_r - b_\tau| + \sum_{v_t < a_\tau v_r + b_\tau} (1 - \tau) |v_t - a_\tau v_r - b_\tau| \right\} \quad (6)$$

5) 分段线性拟合

分段线性拟合 (Vertical Slice, VS) 首先以相关时段的 v_t 与 v_r 分别为横、纵坐标 x 、 y , 一一对应形成散点分布图; 然后将 x 等距划分成 N_v 个风速区间; 接着再在每个风速区间内求取 x 、 y 坐标的平均值 x_m 和 y_m 作为分段线性关系式的计算点, 最后计算分段线性关系式的斜率 a_i 和截距 b_i :

$$b_i = y_m^i - a_i x_m^i \quad i = 1, 2, \dots, N_v$$

$$a_i = (y_m^{i+1} - y_m^i) / (x_m^{i+1} - x_m^i) \quad i = 1, 2, \dots, N_v \quad (7)$$

6) Weibull 尺度拟合

Weibull 尺度拟合 (Weibull Scale, WS) 认为 v_t 与 v_r 存在幂指数关系:

$$v_t = c v_r^k \quad (8)$$

式中: c 为系数; k 为指数。

指数 k 与两个站点风速拟合的 Weibull 分布的形状参数 k_x 、 k_y 有关:

$$k = k_x / k_y \quad (9)$$

系数 c 则与两个站点风速拟合的 Weibull 分布的尺度参数 c_x 、 c_y 有关:

$$c = c_y / c_x^k \quad (10)$$

7) 矩阵时间序列法

矩阵时间序列法 (Matrix Time Series, MTS) 首先对 v_t 划分若干个风向扇区 N_d , 对每个风向扇区内对应的 v_t 和 v_r 划分风速区间 N_v 并统计各自的出现概率 $p(v_r^i, v_t^j)$, $i = 1, 2, \dots, N_v$; $j = 1, 2, \dots, N_v$, 形成每个风向扇区的概率矩阵 M ; 然后在 M 中按照 v_r 的风速区间计算对应的 v_t 累积频率曲线; 接着根据资料序列中同期的 v_t 与 v_r 生成每个时次 v_t 对应的累积频率序列, 并利用一阶马尔可夫链将上述序列延长至整个参证站的推测时段; 最后根据新的累积频率值反向推算目标站的风速, 形成推测时段的风速序列。

8) 联合概率分布法

与上述方法不同, 联合概率分布法 (Joint Probability Distribution, JPD) 同时利用参证站与目标站的风速与风向。JPD 首先对风速 v_t 、 v_r 以及风向 d_t 、 d_r 划分 N_v 个风速区间和 N_d 个风向区间, 求取各个区间对应的出现概率: $p(v_r^i, d_r^j, v_t^l, d_t^m)$, $i = 1, 2, \dots, N_v$; $j = 1, 2, \dots, N_d$; $l = 1, 2, \dots, N_v$; $m = 1, 2, \dots, N_d$, 形成四维联合概率分布函数 P ; 然后求取参证站推测时段的风速—风向联合频率分布 $p_r^h(v_r, d_r)$; 接着利用 P 和 $p_r^h(v_r, d_r)$ 计算四维联合概率分布函数的边缘分布, 即目标站推测时段的风速—风向联合频率分布 $p_t^h(v_t, d_t)$, 表达式如下:

$$p_t^h(v_t^l, d_t^m) = \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{j=1}^{N_d} p(v_r^i, d_r^j, v_t^l, d_t^m) p_r^h(v_r^i, d_r^j) \quad (10)$$

与其他模型不同, JPD 中 P 的维数没有限制, 因此可纳入更多的参证站; 已有研究表明, 利用两个参证站的 JPD 能够获得更符合实际情况的风向频率分布^[10]。

1.3.2 风向订正方法

除 JPD 外, 其余风速相关方法均无法直接获取

推测时段目标站的风向。为此本文附加如下的风向订正方法：首先对相关时段参证站的风向划分若干风向扇区，分别计算每个扇区目标站与参证站风向的平均偏差；然后将上述风向偏差应用到推测时段并最终形成目标站的风向序列。

2 数值试验

2.1 试验设置

本文共设计6组数值试验，如表2所示。其中，T1~T3的目标站发生变动，参证站固定为WGL，对比分析参证站空间代表性的变化以及不同MCP方法推测结果的差异；T3~T6的目标站固定为MCIA，参证站发生变动，对比分析MCP推测结果改善的可能途径。

6组试验均取2009—2010年作为相关时段，共17 520个的逐时风速、风向作为MCP方法中的相关样本，模拟海上测风塔持续两周年的测风过程，由此推测之前6年(推测时段2003—2008年)的目标站风速、风向结果，模拟包含年际变化在内的多年平均状况。

表2 数值试验说明

Tab. 2 Introduction to numerical experiments

数值试验	目标站 / 参证站	MCP 方法
T1	CCL / WGL	全部
T2	HKIA / WGL	全部
T3	MCIA / WGL	全部
T4	MCIA / CCL	全部
T5	MCIA / WGL、CCL	JPD
T6	MCIA / WGL、MERRA	JPD

注：所有MCP方法中的 N_d 设为16；VS的 N_v 设为10，MTS和JPD的风速区间宽度设为1m/s。

2.2 评价指标

由于目前海上风电项目的风能资源评估重点关注测风塔的年均风速、风功率密度、全年风向玫瑰，以及多年平均风况下的风力发电机组发电量。因此与以往研究不同，本文的评价重点放在与发电量计算密切相关的风向—风速联合频率分布 $p_i^H(v_i, d_i)$ 上。利用 $p_i^H(v_i, d_i)$ 进一步计算推测时段目标站的平均风速、风速标准差、平均风功率密度和年发电量，并与实测统计结果对比，分析绝对偏差和相对偏差。

在本文的计算中，空气密度取 1.225 kg/m^3 ；

发电量计算取某型IEC IB类风力发电机，单机容量为4 MW，叶轮直径为130 m，运行风速区间为 $4 \sim 25 \text{ m/s}$ 。

3 试验结果分析

3.1 数值试验T1~T2的对比

T1的试验结果表明：如表3所示，所有方法的平均风速偏差均 $<0.2 \text{ m/s}$ ，其中RMA、QR、WS、MTS和JPD的偏差 $<0.1 \text{ m/s}$ ，MTS的推测结果最优；所有方法的风速标准差偏差均 $<1 \text{ m/s}$ ，其中SOR、RMA和WS的偏差 $<0.5 \text{ m/s}$ ，WS的推测结果最优；所有方法的平均风功率密度偏差均 $<50 \text{ W/m}^2$ ，其中SOR、RMA和WS的偏差 $<20 \text{ W/m}^2$ ，WS的推测结果最优；而就风机发电量而言，JPD的偏差 $<5\%$ ，推测结果最优，次之为WS、RMA和SOR，再次为OLR、MTS和VS，QR的偏差 $>20\%$ ，推测结果最次。风向—风速联合频率分布的相关系数均 >0.7 ，SOR、RMA、WS和MTS接近0.8，JPD高达0.9。

表3 数值试验T1的统计结果

Tab. 3 Results of T1

MCP 方法	平均风速偏差	风速标准差偏差	平均风功率密度偏差	发电量偏差	风频相关系数
OLR	0.15(3%)	-0.7(-27%)	-35(-21%)	-1.8(-20%)	0.76
SOR	0.13(3%)	-0.3(-10%)	-10(-6%)	-1.3(-15%)	0.79
RMA	0.04(2%)	-0.1(-1%)	-6(0%)	-1.2(-11%)	0.80
QR	0.03(1%)	-0.6(-24%)	-37(-22%)	-2.1(-23%)	0.73
VS	0.16(3%)	-0.8(-29%)	-36(-22%)	-2.0(-22%)	0.73
WS	0.06(1%)	0	0	-1.0(-11%)	0.79
MTS	0.01(0%)	-0.5(-19%)	-33(-20%)	-1.9(-21%)	0.79
JPD	-0.06(-1%)	-0.6(-21%)	-43(-26%)	-0.4(-5%)	0.91

注：平均风速偏差、风速标准差偏差、风功率密度偏差和发电量偏差的单位分别为 m/s 、 m/s 、 W/m^2 和 GWh ，()内为相对偏差，后同。

T2的试验结果表明：如表4所示，所有方法的平均风速偏差均 $<0.2 \text{ m/s}$ ，其中RMA、QR、WS和MTS的偏差 $<0.1 \text{ m/s}$ ，MTS的推测结果最优；除VS外，其余方法的风速标准差偏差均 $<1 \text{ m/s}$ ，其中SOR、RMA、WS和JPD的偏差 $<0.5 \text{ m/s}$ ，RMA的推测结果最优；所有方法的平均风功率密度偏差均 $<50 \text{ W/m}^2$ ，其中SOR、RMA和JPD的偏差 $<20 \text{ W/m}^2$ ，RMA的推测结果最优；而就风机发电量而言，JPD的偏差 $<3\%$ ，推测结果最优，次之为WS、RMA和SOR，再次为MTS、

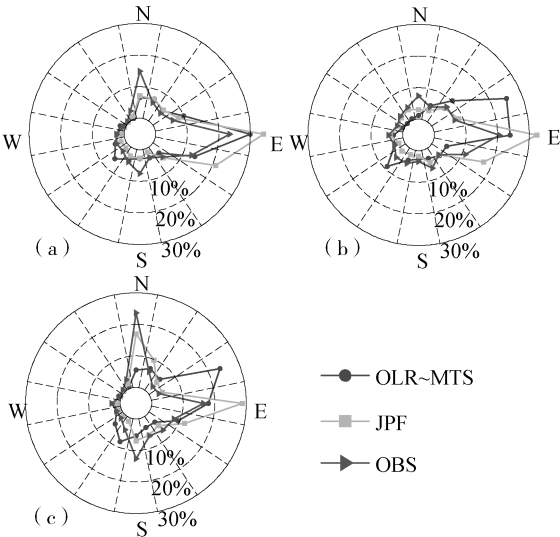
OLR 和 VS, QR 的偏差 > 30%, 推测结果最差。风向—风速联合频率分布的相关系数均 > 0.7, SOR、RMA、WS 和 MTS > 0.8, JPD > 0.9。

表4 数值试验 T2 的统计结果

Tab. 4 Results of T2

MCP方法	平均风速偏差	风速标准差偏差	平均风功率率偏差	发电量偏差	风频相关系数
OLR	0.16(3%)	-1.0(-43%)	-29(-24%)	-1.5(-22%)	0.76
SOR	0.11(2%)	-0.5(-20%)	-14(-12%)	-1.0(-15%)	0.84
RMA	-0.05(1%)	0.1(-1%)	0	-0.7(-8%)	0.84
QR	-0.10(-2%)	0.9(-38%)	-38(-32%)	-2.2(-32%)	0.73
VS	0.16(3%)	-1.1(-46%)	-31(-26%)	-1.6(-23%)	0.73
WS	0.02(1%)	0.3(14%)	27(22%)	-0.4(-6%)	0.83
MTS	0	-0.5(-23%)	-23(-19%)	-1.4(-20%)	0.85
JPD	0.13(3%)	-0.2(-10%)	-6(-5%)	0.2(3%)	0.93

综合来看, RMA、QR、WS 和 MTS 对平均风速的推测结果较好, SOR、RMA 和 WS 对风速标准差和平均风功率密度的推测结果更优, SOR、RMA、WS、MTS 和 JPD 能够获得更接近实际情况的风向—风速联合频率分布, 但 JPD 对风机发电量的推测结果明显优于其他方法, 且风向频率分布的还原程度也较好, 如图2所示。



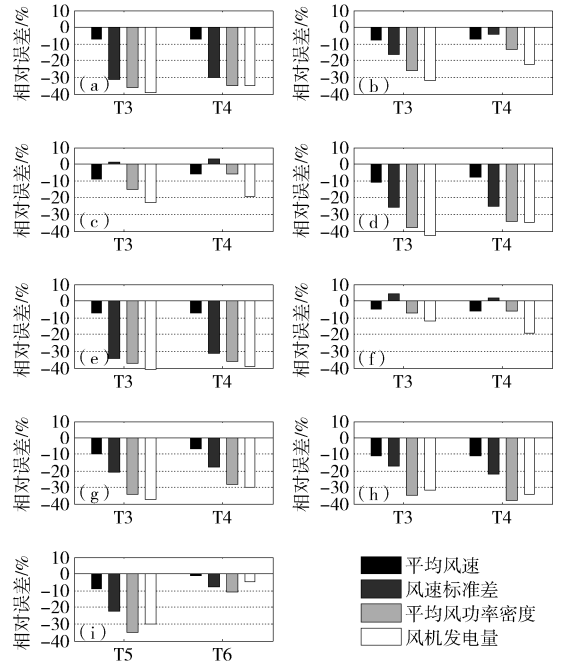
注: (a)为数值试验 T1; (b)为数值试验 T2; (c)为数值试验 T3

图2 风向频率分布的对比

Fig. 2 Comparison of wind rose

3.2 数值试验 T3 ~ T4 的对比

T3 的试验结果表明: 如图3所示, 与 T1、T2 相比, 大多数方法风向—风速联合频率分布的相关



注: (a)为 OLR; (b)为 SOR; (c)为 RMA; (d)为 QR; (e)为 VS; (f)为 WS; (g)为 MTS; (h)和(i)为 JPD。

图3 数值试验 T3 ~ T6 的统计结果对比

Fig. 3 Comparison of T3 ~ T6

系数明显下降, 导致平均风速偏差和发电量偏差大幅增加。可能原因是 MCIA 地处珠江口西岸, 比 CCL、HKIA 更加远离 WGL, 其风场形态已经出现明显差异, 全年主导风向由 ENE、E 转变为 N, T3 中 WGL 作为参证站的代表性降低, MCP 方法中相关模型的构建受到限制, 但 JPD 对目标站风向频率分布的还原不受影响, 并且风向—风速联合频率分布相关系数仍然高达 0.8 以上。

为此在 T4 中将参证站换成空间距离更近, 风向频率分布更相似的 CCL, 再次进行试验。结果表明: 如图3所示, 与 T3 相比, 所有方法的平均风速偏差均出现改善, 降幅在 1% ~ 3%; 除 VS 和 JPD 外, 其余方法的风速标准差偏差均出现改善, 降幅在 1% ~ 12%; 除 JPD 外, 其余方法的风功率密度偏差出现改善, 降幅在 1% ~ 13%; 而风机发电量偏差降幅在 2% ~ 10%。其中, SOR、QR 和 MTS 推测结果的改善较为显著。

3.3 数值试验 T5 ~ T6 的对比

根据 3.2 节的分析, T4 中 JPD 的推测结果并没有显著提升。为此利用 JPD 对参证站数量没有限制的特点, 在 T5 和 T6 中设置两个参证站, 共同参

与联合概率分布函数 P 的构建,再次进行试验。结果表明:如图3所示,T5的平均风速偏差和发电量偏差出现改善,降幅为2%;而T6中的所有评价指标均出现大幅改善,平均风速偏差下降10%,风速标准差偏差下降9%,风功率密度偏差和风机发电量偏差分别下降24%和27%。

对比而言,T5和T6虽然都应用了多个参证站,但是推测结果出现显著差别,可能原因是T6中MERRA再分析资料对应的是 $21.75^{\circ} \sim 22.25^{\circ} \text{N}$, $113.0^{\circ} \sim 113.67^{\circ} \text{E}$ 的区域平均风况,减轻了WGL、CCL等地面自动站的局地风的潜在影响。但值得注意的是,在JPD中单纯使用再分析资料同样无法与T6接近的推测结果,说明地面自动站实测数据所代表的小尺度环流与再分析资料所代表的大尺度环流在 P 的构建过程中发挥了不可替代的作用,由此也揭示了近海风场的空间相关性与内在的复杂性。

3.4 综合分析

根据T1~T6的结果分析可知,各种MCP方法有各自的侧重点和适用范围。其中,OLR、QR和VS旨在描述统计量条件均值的线性相关关系,因此平均风速偏差的表现尚可,但在其他指标上与其他方法差距较大。而SOR、RMA作为OLR的改进,在斜率 a 的确定过程中同时考虑目标站和参证站的方差,因此风速标准差偏差更优。WS不再局限于线性关系,而是在参证站和目标站均服从Weibull分布的前提下刻画非线性关系,因此更贴近风速频率分布的实际情况,风功率密度和发电量偏差更优。MTS和JPD不再考虑特定的风速分布形体,而是从实测数据出发构建联合概率分布函数,能够适应风速的非Weibull分布情形;另外值得注意的是,JPD还能同时获取风向的频率分布,对参证站数量没有限制,因此具有更大的适应性和灵活性。

另一方面,T1~T6的试验结果也说明:任何单独一种MCP方法都不能同时满足所有评价指标的要求,因此对于海上风电多层次、多目标的资源评估需求,应当建立一个风资源评估的技术集成体系,同时运用多种MCP方法给出综合性的评估结果,避免单一方法在评价指标中带入的系统性误差。综合来看,SOR、RMA、WS和JPD可以成为MCP集成运用的候选方法。

4 结论

本文引入4个沿海自动气象站的长期测风数据和再分析资料,通过6组数值试验,从基于风向—风速联合频率分布的平均风速、风速标准差、平均风功率密度和风力发电机组的年发电量等4个评价指标对8种MCP方法进行对比分析,结论如下:

1)SOR、RMA、QR、WS和MTS对平均风速的推测结果更优,SOR、RMA和WS对风速标准差和平均风功率密度的推测结果更优,JPD对风向—风速联合频率分布和风机发电量的推测结果明显优于其他方法。

2)参证站自身的数据质量和空间代表性对MCP方法的表现具有潜在影响,但JPD在风向频率分布的推测中对参证站的选取不敏感。

3)多种MCP方法的集成运用以及对推测结果的综合判断更加符合海上风电多层次、多目标的风资源评估需求。

需要说明的是,由于所用资料年限和评价指标的限制,本文结论只针对年平均情形,没有考虑风速的季节变化和日变化。在今后的研究过程中,笔者将进一步考虑季节平均和日平均的评价指标,并针对不同测风高度进行分析。

参考文献:

- [1] ANDERSON M. A review of MCP techniques [R]. UK: RES, 2004.
- [2] ROGERS A L, ROGERS J W, MANWELL J F. Comparison of the performance of four measure-correlate-predict algorithms [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 93(3): 243-264.
- [3] CARTA J A, VELAZQUEZ S, CABRERA P. A review of measure-correlate-predict(MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27(6): 362-400.
- [4] THOGERSEN M L, NIELSEN P, SORENSEN T, et al. An introduction to the MCP facilities in WindPRO [R]. Denmark: EMD International A/S, 2010.
- [5] LAMBERT T. Windographer [R]. USA: AWS Truepower, 2013.
- [6] 刘郁珏, 胡非, 朱蓉. 五种风速测量相关预测方法的比较研究 [J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1241-1249.
LU Y J, HU F, ZHU R. Comparison of five MCP algorithms in Long-term wind speed prediction of wind power assessment in grassland [J]. Acta Energicae Solaris Sinica, 2013, 34(7): 1241-1249.

表2 路径优化前后指标对比表

Fig. 2 Comparison table of indicators before and after path optimization

指标	优化前	优化后	变化量
线路长度/km	326	324	减少 2 km
线路曲折系数	1.78	1.77	减少 0.01
拆迁量/m ²	59 174	19 500	减少 39 674 m ²
通信基站/基	1	0	减少 1 基拆迁
铁塔减少/t	0	157	减少 157 t
投资减少/万元	0	5 987.5	减少 5 987.5 万元

4 结论

实践证明,将机载激光雷达技术应用于输电线路优化设计,具有先进性。采用高分辨率的正射影像图(DOM)、高精度的数字高程模型(DEM)进行三维优化设计,尤其在南方地表植被茂密、地形复杂的山区,可有效提升输电线路的设计深度和质量,并优化工程建设投资预算。不过,在森林植被覆盖极其茂密、而激光点云难以穿透地表的地区,将需要传统的人工勘测辅助机载LIDAR航测,以获取精确的地面高程。随着机载激光雷达技术的迅速发展,将在输电线路路径优化中发挥更大的作用,并对输电线路的设计、施工和运行带来革命性的变化。

参考文献:

[1] 殷金华,孙朝阳,郑彦春.机载激光测量技术在特高压输电线路工程中的应用研究[J].电力建设,2007,28(7):9-13.

(上接第102页 Continued from Page 102)

[7] 叶林,杨丹萍,赵永宁.风电场风能资源评估的测量-关联-预测方法综述[J].电力系统自动化,2016,40(3):140-151.
YE L, YANG D P, ZHAO Y N. Overview of wind resource measure-correlate-predict methods for wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 140-151.

[8] SMITH A, LOTT N, VOSE R. The integrated surface database: recent developments and partnerships [J]. Bulletin of the

YIN J H, SUN C Y, ZHENG Y C. Application study of airborne laser measurement technology in uhv transmission line construction [J]. Electric Power Construction, 2007, 28(7): 9-13.

- [2] 胡峰,范亮.三维激光扫描技术在变电站扩建工程中的应用研究[J].南方能源建设,2016,3(2):92-95.
HU F, FAN L. Research on the application of 3D laser scanning technology in substation expansion project [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 92-95.
- [3] 余洁,穆超,冯延明,等.机载LiDAR点云数据中电力线的提取方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(11):1275-1279.
YU J, MU C, FENG Y M, et al. Research on extracting power line from airborne lidar point cloud data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(11): 1275-1279.
- [4] 密威.机载激光雷达技术在电力线路勘测中的应用[J].科技资讯,2009(19):5-8.
MI W. Application of airborne light detection and ranging technology in power line surveying [J]. Science & Technology Information, 2009(19): 5-8.
- [5] 廖新育,窦延娟.机载激光雷达技术在电力线路设计中的应用[J].中国电力教育,2011(36):148-149.
LIAO X Y, DOU Y J. Application of airborne light detection and ranging technology in power pine designing [J]. China Electric Power Education, 2011(36): 148-149.
- [6] 张芳宁.基于机载激光雷达的输电线路优化技术研究[J].科技资讯,2011(6):128-128.
ZHANG F N. Research on optimal technology of transmission line based on airborne light detection and ranging technology [J]. Science & Technology Information, 2011(6): 128-128.

(责任编辑 郑文棠)

American Meteorological Society, 2011, 92(6): 704-708.

[9] RIENECKER M, SUAREZ M, GELARO R, et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications [J]. Journal of Climate, 2011, 24(14): 3624-3648.

[10] CASELLA L. Improving long-term wind speed assessment using joint probability functions applied to three wind data sets [J]. Wind Engineering Volume, 2012, 36(4): 473-483.

(责任编辑 郑文棠)