风能

WIND ENERGY

传播专业知识　　启迪成长智慧

2010年
08
总第6期

国际标准刊号：ISSN 1674—9219
国内统一刊号：CN 11—5942/TK

中国可再生能源学会风能专业委员会

促进风电产业健康发展的财税政策分析及建议

>P22

>P10 整合两岸资源优势　促进风电产业升级
>P34 中国规模化风电场发展中的几个问题与对策
>P37 中国风电叶片制造业现状与未来

ISSN 1674-9219
9 771674 921104 08
人民币 25 元

让历史启迪未来

文 / 秦海岩

历史是什么？历史是一种积淀，历史更是一种启迪。回首中国风电 30 年的风雨历程，感受中国风能人 30 年的奋斗积淀，我们有足够的理由相信，下一个 30 年的中国，一定会把风电培育成中国的主流能源。这是我们的长远目标，也是几代风能人为之奋斗的夙愿。

我们关注历史，期望从历史事件中挖掘价值点，以此映照现实、启迪未来。基于这样的考虑，《风能》杂志尝试以“ 中国风电地标 ”方式再现历史上一件件不可忘却的重大事件，包括成功的经验，失败的教训。今天的风电往事，不仅让人回味无穷、温故知新，更让人牵挂它的后续“ 命运 ”，这也是本刊想要告诉读者的事情。

本期“ 封面 ”刊发了《中国风电地标 ：达坂城 1989》一文，正是本刊实施以“ 地标 ”方式再现中国风电经典、启未来之新风的开始之作，期望得到读者的阅读，更期望读者在阅读中感知、感悟 1989 年的达坂城，想到心目中的另一个风电地标。从一个风电地标，到另一个风电地标，正是本刊致力于要再现的事情，直到让今天的风电地标也成为历史的里程碑。

那么，1989 年 10 月建成投产的达坂城风电场究竟有哪些历史价值，1991 年 9 月水利部组织召开的鉴定会已对此作出了“ 非常成功 ”的鉴定结论。达坂城风电场运行可靠，技术指标优异，已达到当时世界风电场运行的先进水平 ；更具有启示意义的是，较好地吸收、消化了国外先进技术，在风电场设计布局、工程施工方面有所创新 ；尤其通过项目实施培训了一支风电专业队伍，成为新疆乃至中国风电的一支骨干力量。

20 多年过去了，1989 年建成的达坂城风电场对于今天正在建设或筹备建设的风电场仍具有启迪意义。比如选择质量可靠的设备、结合风场实际情况大胆创新、积极而慎重地推进零部件国产化改造、努力做好技术消化吸收、不折不扣地按制造商《运行维护手册》中的要求做好定期维修等等，都是今天风电场建设及运行过程必须做好的事情。

从本期开始，我们将启动对中国风电地标的历史再现工作，有多少历史事件可以启迪未来，我们就有多少次的“ 寻根 ”。但愿读者透过中国风电地标的历史事件，看到我们的良苦用心，看到与我们血脉相通、心心相印的中国风电企业，看到我们置身并热爱的、给予我们机会和挑战的中国风电事业。

卷首语／From The Editor
01 让历史启迪未来 秦海岩

06 风向／Direction

专访／ Interview
12 建设输电大通道 实现风电大发展 牟 迈
16 起步正确是成功开发海上风电的关键 于贵勇

封面／Cover Article
18 中国风电地标：达坂城1989 陈 雪 牟 迈
26 达坂城风电场13台Bonus150kW机组20年运行分析 于午铭等

产业／Industry
34 达坂城:中国风电发展的见证 于午铭
38 积极推动风电发展是国家电网义不容辞的责任 舒印彪
40 美国小型风电产业的发展及其激励政策分析 张素芳

技术／Technology
46 平坦地形及复杂环境风电场数值模拟计算 朱明亮
50 双馈发电机柔性联轴器及电机转子偏心联合故障的特征分析 唐德尧 曾承志
60 定桨距机组实现低电压穿越的几种方法 许国东 杨 靖
64 兆瓦级风电机组焊接机架和结构螺栓的分析计算 杨兆忠等

CHINA WINDPOWER 2010 13-15,October Beijing,China

www.chinawind.org.cn

2010北京国际风能大会暨展会

2010年10月13日 – 15日
中国国际展览中心(新馆)

CHINA WIND POWER 2010,BEIJING
13-15 October,2010
China International Exhibition Center(New Venue)

联系电话：（86）10-68450820/ 68451467/ 68450650　E-mail：info@chinawind.org.cn

主管： 工业和信息化部　**主办：** 中国电子信息产业发展研究院

风能
WIND ENERGY

中国可再生能源学会风能专业委员会

顾问 **Consultant**

石定寰　史立山　杜祥琬　黄其励　Shi Dinghuan　Shi Lishan　Du Xiangwan　Huang Qili
徐建中　倪维斗　胡文瑞　杨裕生　Xu Jianzhong　Ni Weidou　Hu Wenrui　Yang Yusheng
李宝山　韩文科　朱俊生　贺德馨　Li Baoshan　Han Wenke　Zhu Junsheng　He Dexin
王承煦　朱瑞兆　戴慧珠　马学禄　Wang Chengxu　Zhu Ruizhao　Dai Huizhu　Ma Xuelu
王斯永　吴运东　齐同庆　于午铭　Wang Siyong　Wu Yundong　Qi Tongqing　Yu Wuming
宫靖远　Gong Jingyuan

社长： 卢　山　**President:** Lu Shan
主编： 施鹏飞　**Editor-in-Chief:** Shi Pengfei
执行主编： 秦海岩　**Excutive Editor-in-Chief:** Qin Haiyan
副主编： 王仲颖　夏丽华　**Associate Editor-in-Chief:** Wang Zhongying Xia Lihua

编辑部主任： 秦海岩（兼）　**Editorial Director:** Qin Haiyan
编辑部副主任： 陈　雪　蔡丰波　**Deputy Editorial Director:** Chen Xue　Cai Fengbo
本期责编： 牟迈　**Duty Editor:** Mu Mai
编　辑： 佘焱生　陈小慧　牟　迈　于贵勇　**Editor:** She Yansheng　Chen Xiaohui　Mu Mai　Yu Guiyong
美术编辑： 姜坤鹏　**Art Editor:** Jiang Kunpeng
广告及发行： 王　艳　张　超　**Advertising & Distribution:** Wang Yan　Zhang Chao

编辑制作： 《风能》杂志社　**Produced by:** *Wind Energy* Magazine
地址： 北京市北三环东路28号易亨大厦1108　**Address:** Room 1108, Yiheng Building, No.28, the 3rd Ring Road East, Beijing, P. R. China
邮编： 100013　**Zip Code:** 100013
电话： 010-59796665（编辑部）　**Tel:** 010-59796665（Editorial Office）
010-64405232（广告部）　010-64405232（Advertising Office）
传真： 010-64228215　**Fax:** 010-64228215
投稿邮箱： gaojian@cwea.org.cn　**E-mail:** gaojian@cwea.org.cn

国际标准刊号： ISSN 1674-9219
国内统一刊号： CN 11-5942/TK
广告经营许可证： 京海工商广字第8006号
印刷： 北京国彩印刷有限公司
出版日期： 每月6日出版
国内定价： 人民币25元

广告索引

封二	北车	前彩 7	ABB 传动	P33	运达风电
封二对页	南车	前彩 8	科诺	P37	北京天山
前彩 1	FAG	前彩 9	南瑞	P39	大连尚能
前彩 2	赛米控	前彩 10	美孚	P59	可汗之风
前彩 3	华仪	卷首语对页	铁姆肯	P71	菲尼克斯
前彩 4	科孚德	目录对页	CWP2010	封三对页	合肥阳光
前彩 5	无锡阳通	版权对页	龙源电气	封三	川润
前彩 6	敏泰	P17	华润电力	封底	鉴衡认证

版权声明

在本刊发表的文章、图片等版权归本刊所有，未经本刊书面许可，不得转载、翻印及传播。
向本刊投稿文责自负（含图片），由作者原稿产生的版权纠纷或其他法律纠纷，本刊概不承担连带责任。

中国国电
CHINA GUODIAN

国电龙源电气有限公司
GUODIAN LONGYUAN ELECTRICAL CO., LTD.

专注于为风电行业提供
专业的功率控制解决方案和技术服务！

1.5MW双馈型风电变流器产品特性：

- 先进的控制技术，灵活多样的通信方式，主动适应各种机型
- 友好的电网适应性，保障用户投资回报收益
- 高可靠性设计，适应各种严酷的道路运输和风场运行环境
- 人性化纯中文操作界面，模块化结构，便于安装维护
- 完善的保护功能，丰富多样的备件选配

科学利用绿色能源
努力营造美好家园

国电龙源电气有限公司：
地址：北京市海淀区曙光花园中路11号北京农科大厦B座8层　邮编：100097
电话：010－51502501/02/03/　　传真：010－51502500
E-mail：service@gdlyec.com.cn　　http://www.gdlyec.com.cn

1

2

声音

1 史立山：超前布局大型机组技术

本刊讯　6 月 2 日，国家能源局新能源司副司长史立山在北京举行的“清洁能源、能效投资和企业实践论坛暨《‘基础四国’企业清洁能源投资趋势》”报告发布会上指出，风电是一个基础性产业，机组运行的年限长，因此应超前对一些大型风电机组技术进行布局，才能适应产业的发展。陆上风电的主力机型应该到 3MW，海上应该在 5MW 以上，同时应加速 10MW 机组的技术研发。

史立山说，大规模的风电并网面临的技术和管理问题越来越突出，有些问题已经成为制约风电发展的重要因素。近来不管是政府还是企业，都在研究风电并网面临的问题，但解决这一问题需要一个较长过程。我们应该确立基本的思路，并朝着这个方向去努力。

史立山指出，要解决风电发展过程中遇到的问题，一方面应加强对风能规律的研究，建立风力发电预测和预报体系。另一方面，要提高风电设备的技术水平，建立更加完善的技术标准和认证体系。风电机组不仅需要具备低电压穿越功能，而且还要具备有功功率调节和无功补偿等功能。

市场

2 云南成为风电企业开发新热点

本刊讯　在 6 月 6 日至 10 日举行的第 18 届中国昆明进出口商品交易会上，多达 17 个风电项目签约。大唐、中广核等均与云南省多个州市签署风电开发协议。

大唐发电云南分公司与云南文山丘北县签约，将建设一个装机容量为 9.9 万 kW 的项目，预计投资 11 亿元，将用 3-5 年时间完成开发建设。该项目预计年内将正式开工建设，明年完成一期工程。此前，大唐集团已在大理和昭通等地合作开发风能项目，其中大理项目装机容量 4.9 万 kW，今年将竣工投产。

中广核华南分公司和云南宣威市签约合作，将投资 25 亿元，建设一个 25 万 kW 的项目，预计将用 4-7 年时间完成建设。

云南的电力结构主要是水电和火电。在冬季枯水期水电发电量少，而云南冬季恰好是风力发电的最佳时期，因此风电可与水电形成良好的互补。另外，良好的电网接入条件也是云南省发展风电得天独厚的优势，目前，全省已形成了 500kV 的主体电网构架及 220kV 电网覆盖，只要风电场建好，就能接入电网。

4

3 湖北省风电设备企业抱团发展

本刊讯　6 月 8 日，湖北省的 25 家风电企业在武汉东湖开发区成立了“湖北风电装备产业技术创新战略联盟”，整合当地资源，开拓风电市场。

25 家企业包括从事风电相关产品生产、研发与服务的骨干企业、大学、科研机构等单位。他们将在诸多领域全面合作，共同打造湖北风电品牌。联盟将在东湖开发区建设风电产业园、大型风电关键零部件测试平台和整机研发平台。

专家表示，虽然湖北省风电产业起步较晚，但湖北省有强大的机械制造、电力产业基础及丰富的科教资源，风电制造产业链比较完整，建立联盟，整合地区产学研资源抱团发展，瞄准国际国内顶尖风力发电设备技术，将带动湖北地区风电产业持续发展，在全国建立起自己的后发优势。

工程

4 东海大桥海上风电机组全并网

本刊讯　6 月 8 日 15 点 58 分，上海东海大桥海上风电场 34 台机组调试完毕，全部并网投入运行，其每年 2.6 亿 kW·h 的发电量可供 20 余万户居民用一年，相当于每年节约燃煤近 10 万吨，每年减排二氧化碳 20 万吨。

据了解，东海大桥海上风电场总装机容量 10.2 万 kW。2 月底，由华锐风电提供的 34 台 3MW 机组整体安装完毕。

开发商

5 龙源联手振华重工掘金海上风电

本刊讯　6 月 18 日，龙源电力和振华重工合资成立的江苏龙源振华海洋工程有限公司在南通揭牌。

新公司注册资本 3 亿元人民币，由振华重工和龙源电力各持股 50%，主要经营钢结构制作、安装，海上风电设施基础施工、设备安装及维护，海底电缆系统工程施工、维护；海洋工程施工、设备安装及维修以及安装设备租赁等。

振华重工是我国重型装备制造行业的知名企业，在上海、南通和江阴等地设有 8 个生产基地。此次合作，标志着振华重工正式进军海上风电。

振华重工总裁康学增表示，海上风电制造安装中的塔筒、基础和齿轮箱等大型结构件，以及中国海上风电从潮间带走向近海所急需的专用船、特种工程船等都是振华的优势产品。振华重工此次与龙源电力合作，也是调结构、实施多元化发展、规避单一化风险的重要举措。

龙源电力总经理谢长军表示，根据我国沿海地区今后数年内约有 1000

6

7

万 kW 海上风电装机的市场容量，合资公司将首先在眼下潮间带风力发电综合条件最好的江苏地区参与项目建设，今后还要积极参与境外海上风电项目的竞标，寻求更大的市场空间。

6 华能风电建设再提速

本刊讯 5 月 24 日，华能集团和 6 家国内主要风电机组设备制造商签署了总价 80.6 亿元、装机规模近 180 万 kW 的风电整机集中采购协议。根据协议，东方电气、上海电气、中船重工、浙江运达、华锐风电、阳明风电分别向华能集团公司提供 29.7 万 kW、30 万 kW、30 万 kW、29.7 万 kW、29.7 万 kW、29.7 万 kW 的风电机组，用于华能在东北、蒙西、西北和东南沿海等地风电场的建设。

这是华能集团首次进行风电设备大规模集中采购，其中大部分机组为目前国内主力机型，具有技术先进、产业化程度高、设计制造已趋成熟等特点。部分机组为国内有关单位自行设计、生产，对加快我国风电装备国产化进程具有积极的推进意义。此举有助于华能集团在有效控制风电工程单位千瓦造价水平上，进一步打造华能集团风电发展的规模优势和品牌优势。

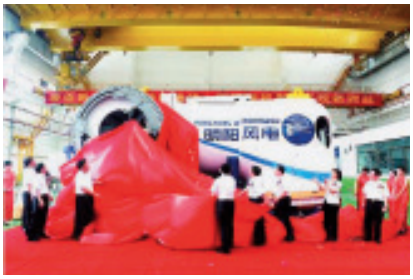
目前，华能集团已建成投产风电装机 280 万 kW。华能将以此次大规模集中采购为契机，按照基地型和效益型要求，加快推进百万千瓦级风电基地以及大型海上风电场的开发，形成区域化、规模化与专业化管理相结合的风电开发模式，力争到 2020 年，公司风电装机达到 2000 万 kW 左右，约占公司同期电力装机的 10%，为促进我国低碳经济建设和绿色电力发展再立新功。

7 华电加快推进风电开发

本刊讯 6 月 8 日，华电集团公司在南京召开风电发展工作座谈会，研究公司风电项目发展规划与“十二五”能源规划对接情况，确定将进一加快风电开发步伐。

华电集团公司副总经济师杨家朋分析了集团公司风电发展工作的现状和存在的问题，要求大家要进一步增强加快开发风电的紧迫感。杨家朋对今后风电发展工作提出五点要求：一要加快项目的前期工作进度，积极协调有关政府部门和电网企业，认真做好项目核准催批工作；二要进一步提高风电项目的经济效益；三要重点加大规划中的 7 大风电基地区域、东南沿海地区和海上风能资源的争取工作；四要切实加强与电网企业沟通，做好接入系统审批和送出工程建设；五要加强对相关标准、规范、管

8



9

理办法的学习和研究，积极适应国家电网对风电入网的相关要求。

整机

8 金风科技正式布局北美市场

本刊讯 5月23日，金风科技在美国达拉斯宣布其全资子公司美国金风正式开业。该公司旨在为北美市场提供包括销售、服务、制造等在内的整体风电解决方案，是金风科技全球化布局的重要组成部分。

美国金风于2009年底在美国注册成立，办公地点位于芝加哥，包括CEO在内的管理团队已经到位。

早在2009年，金风科技就与美国和加拿大的两家风电公司组建合资公司，投资开发位于明尼苏达州的奥克（Uilk）风电场。同年底，金风科技为该项目提供的3台1.5MW机组全部并网发电。在这个项目中，金风科技展示了其在风电场投资、开发、运营及服务方面强大的整体实力，也向当地市场证明了其直驱永磁技术与产品的可靠性和高效性。

在过去的几年内，金风科技通过合作与资本运作，将其德国子公司Vensys先进的整机设计技术与金风科技的规模化、产业化生产管理相结合，取得了长足的技术进步和商业成功。

除美国公司外，金风科技在澳大利亚的全资子公司也将于近期成立并开展业务。

9 明阳3MW海上风电机组下线

本刊讯 5月29日，明阳风电首台3MW超紧凑型（SCD）风电机组在广东中山下线，该机组由明阳风电与德国埃若旦（Aerodyn）公司专门针对海上风电的特点共同研发。

明阳风电集团董事长张传卫介绍，该机组未采用国际流行的三叶片设计，而创造性地采用两叶片设计，整机重量比同功率级别的其他机组轻1/3，可直接在船上拼接后吊装，便于即时维护与检修，适合我国海上大规模风电机组的建设与发展。

SCD3MW风电机组传动链由主轴承、两级行星齿轮和中速永磁同步发电机组成，结构更紧凑，体积更小，重量更轻，效率更高。

张传卫表示，明阳风电将在SCD3MW机组基础上，积极研制更大容量的6MW风电机组，并将基于风电延伸性研究，着手低风速兆瓦级风电机组的开发、风光储能系统的研发，使明阳的产品覆盖从南到北、从东部沿海到西部高海拔地区，并向无电地区提供风光储能系统。

10

11

10 维斯塔斯瞄准中国海上风电市场

本刊讯 6 月 7 日，维斯塔斯针对中国海上风电市场推出了 V112-3MW 风电机组，这是维斯塔斯为适应全球海上风电市场的发展，特别是中国海上风电市场，推出的全新旗舰产品。

维斯塔斯海上风电总裁简森说：维斯塔斯此次推出的机组与此前的 V90-2MW、V80-2MW 海上风电机组相比，是一款全效运转、功能稳定的机组，其扫风面积比 V90 机组大 55%，机组转子效率、适用性和可靠性更高，风能可利用率和发电量也将更高，因此其将更具市场竞争力。

1990 年，维斯塔斯安装了首批海上风电机组，并于 2001 年建成了全球首个大规模海上风电场，即 160MW 的丹麦荷恩礁风电场。如今，维斯塔斯海上风电装机容量已超 900MW。

简森称，V112-3MW 海上风电机组将主要面向欧洲、美洲和中国风电市场。

维斯塔斯中国总裁唐玛勒表示，“凭借在欧洲开发的多个海上风电项目，我们在规划、设计、运营和维护海上风电厂方面具备强大实力。我们愿意与客户分享这一切，并根据中国本地市场情况做出适应性调整。”

11 东汽开发3MW风电机组

本刊讯 6 月 18 日，东方汽轮机有限公司与美国超导有限公司（AMSC）旗下全资子公司 Windtec 公司（以下简称 Windtec）签署 3MW 风电机组合作开发协议。

这是东汽在与 Windtec 已签署联合设计、开发 5MW 的海上风电机组合作协议的基础上再次引进大型风电整机技术。

东方汽轮机有限公司总经理在签字仪式上表示，东汽与 Windtec 有过良好的合作基础，这次合作，双方要本着符合中国可持续发展的国情，适应国际、国内风电市场需求，采用结构更紧凑、布局更合理、技术更先进的策略，以实现共赢为目标，进一步加快合作步伐，争取产品早日投放市场，丰富东汽风电整机品种。

零部件

12 铁姆肯公司推出9种新产品

本刊讯 5 月 22 日，在美国达拉斯举行的 2010 年国际风能大会暨展览会上，铁姆肯公司发布了新型抗磨轴承、新型风能设备润滑系统、新型中频感应加热器和 Timken 洁净钢等 9 种新产品，一次性发布如此多的新产品，这在铁姆肯公司尚属首次。

通过在全球经济衰退时期持续不断的资产优化，铁姆肯公司不断扩大在美国、欧洲和中国的产能，以适应这些市场的产品需求。

13

14

除了目前在中国无锡、印度钦奈和罗马尼亚普洛耶什蒂的工厂进行风电轴承的生产以外，铁姆肯公司还对位于美国北卡罗来纳州阿什伯勒和南卡罗来纳州泰格河的工厂进行了设备更新和厂区扩建，以更好地服务客户。今年 5 月，铁姆肯公司在中国湖南省湘潭市的合资工厂生产的首批产品也已交付使用。此外，铁姆肯公司位于美国总部俄亥俄州坎顿的钢厂，除为其自有轴承产品供应洁净钢之外，还为众多风能客户提供多种钢制零部件。

现在，铁姆肯公司与世界领先的风电设备制造商在多个研发层面开展广泛合作，并凭借其广泛分布于全球的产品制造和服务网点建立起一套专门服务于风能行业的供应链系统。

13 5家丹麦风电企业天津联合建厂

本刊讯 6 月 21 日，西西延森、朗森、希卓希那、迪发、莱斯乐斯 5 家丹麦企业在天津市武清开发区举行新建工厂联合开业典礼。丹麦环境部部长凯伦·埃勒曼 (Karen Ellemann)、丹麦驻华大使馆代理(执行)大使索伦·雅各布森(Søren Jacobsen)、天津市武清区区长张勇等领导以及五家企业的负责人出席了开业典礼。

埃勒曼部长在致辞中表示，近年来风电逐渐成为丹麦的支柱产业，由此诞生了一大批有实力的风电企业，这些企业都期待着以自身的技术和经验与中国进行合作，此次 5 家企业新建工厂的联合开业是两国在风电领域的又一次重要合作，这必将对两国风电发展起到积作用。

作为成熟的风电机组配套企业，这五家企业于 2007 年先后设立了中国分公司，2010 年初开始实施中国本土化生产策略，最终将工厂选定在天津武清。入驻武清的 5 家丹麦企业在风能行业均有自己独特的核心技术，其产品相互关联，并在中国市场具有优异的销售业绩。

14 ABB全球第二大传动产品中心落成

本刊讯 6 月 22 日，北京 ABB 电气传动系统有限公司新工厂落成，这是 ABB 全球第二大传动产品生产中心。

ACS 800-67 空冷双馈变频柜、ACS 800-77/87 水冷柜和 ACS 5000 中压变频器等产品系列都将在新厂生产。另外，高度集成的传动柜测试系统每年可对数千台产品进行出厂前测试，这将大幅提升产品质量与测试效率，缩短交付周期。同时，新工厂专门设置了约 1500m^2 的服务区域，可为客户提供变频器产品的测试、维修、翻新改造和备件服务。

北京 ABB 电气传动系统有限公司总经理陶诺·海诺拉 (Tauno Heinola) 说：“新工厂落成之后，公司的生产规模仅次于 ABB 全球最大的传动产品生产中心 ABB 芬兰公司。随着公司产能的扩大和产品线的进一步丰富，产品交付将更加高效可靠，同时能够为客户提供更优质的服务。”

建设输电大通道 实现风电大发展

专访内蒙古自治区国有资产监督管理委员会主任苏和

■本刊记者 | 牟　迈

《风能》：目前内蒙古风电送出的必要性和紧迫性表现在哪些方面?

苏和：内蒙古是我国重要的电力能源基地，外送电量居全国第一。内蒙古风电的年利用小时数高，风电完全成本低于 0.46 元／千瓦时（南方省份火电上网电价已超过 0.52 元／千瓦时），若再加上碳汇贸易，每千瓦时风电还可获得 0.1 元左右的补偿。为积极落实科学发展观、节能减排和《可再生能源法》，风电企业对内蒙古风电的投资热情持续高涨。目前，内蒙古制定的短期、中期和长期风电发展及送出规划已得到充分论证，如果能尽快实施，完全可以促进风电更好更快发展。

然而，由于缺少外送通道，内蒙古风电及火电大量闲置，送不到缺电地区。因此，建议国家电网尽快建设蒙西电网外送通道，以促进内蒙古风电发展以及全国共享清洁能源。预计到 2010 年底，内蒙古风电并网装机容量将达 650 万千瓦。如果不能从根本上解决电力送出难题，那么无论春夏秋冬，内蒙古电网都会出现大范围限制风电出力的情况。

《风能》：内蒙古火电装机出现大量富余的真正原因是什么?

苏和：首先要说明的是，从 2003 年至 2004 年，沿海和内地遭遇“电荒”，国内外高耗能产品市场需求增大，因看好内蒙古能源基地的资源优势和低电价优势，大量高耗能工业项目从沿海和内地一窝蜂地涌入内蒙古，各大发电企业也争相到内蒙古兴建电厂，推进了内蒙古电力的高速发展。2006 年，国家陆续出台了节能环保、上大压小及限制高耗能产业的政策，拟建和在建的高耗能用电项目停工，已建成的用电项目大量停产，电网失去大量负荷。另外，5 年前国网公司提出了变输煤为输电，用特高交、直流（或超高压）线路长距离送电，这是非常好的规划。但在具体规划实施中，由于种种原因，蒙西电网第三、第四送出通道建设没有立项和开工。相

一方面，在供暖期夜夜弃风，风电企业的经济效益受到严重影响；另一方面，火电机组也因为风电调峰和限电而效益不高，内蒙古电网对此也感到十分可惜。而通道建设拖后是造成内蒙古电力富余、夜夜弃风的重要因素。

对而言，通道建设拖后是造成内蒙古电力富余、夜夜弃风的重要因素。

《风能》：面对迅速增长的风电装机，蒙西电网的压力很大，内蒙古电力公司如何履行保障风电送出的职责?

苏和：蒙西作为送端电网，大胆科学创新，采取大开机方式创造出风电大容量接入的世界水平，在送出通道受阻的情况下，已竭尽所能，然而却不能从根本上解决问题：一方面，在供暖期夜夜弃风，风电企业的经济效益受到严重影响；另一方面，火电机组也因为风电调峰和限电而效益不高，内蒙古电网对此也感到十分可惜。

蒙西风电东送华北的通道建设滞后致使风电企业的效益受到严重影响的情况也引起了有关部门的高度重视。国家能源局多次到现场进行深入调查，并下发了[2009]346号文件，要求国家电网增加蒙西电网后夜东送潮流。但是，两月的平均送出容量实际只增加了30万千瓦左右，蒙西电网在后半夜的风电出力仅能保证50万千瓦，弃风最多可达290万千瓦。因通道建设滞后及电力送出受阻，蒙西电网背负着社会各界巨大的压力。可以预测，如果风电送出通道问题不解决，我们背负的压力会越来越大。

《风能》：采取大开机的方式大容量接纳风电的“专利”意义是什么?

苏和：在自治区党委、政府的正确领导下，内蒙古电网凭借其特有的体制优势，为我国节能减排跨入世界前列起到积极的推动作用，也为风电在全国电力市场内消纳提供了重要的参考依据，尤其是采取大开机的方式大容量接纳风电，是内蒙古在外送电力通道受阻的情况下总结出来的经验，是对我国风电事业的巨大贡献。这个实验成果已经成为内蒙古电力的“专利”，我们把这项专利成果奉献给国家，全国任何一个省市都可共享，这项专利必将为中国的节能减排工作作出积极贡献。

《风能》：三峡水电站的建设为内蒙古风电的送出提供了哪些可借鉴的经验? 另外，内蒙古电网在大规模风电送出方面积累了哪些经验?

苏和：10多年前，国家在规划建设三峡水电站时，也提前规划设计了送出通道，因此保证了三峡水电站电力的可靠送出。内蒙古的风能资源是国家的宝贵绿色资源，携手建设全国人民的“风电三峡”，并启动全国的电力市场消纳风电，以实现节能减排和为民造福是社会共同的责任。

蒙西地区具有建设国家级“风电三峡”基地的资源优势、区位优势、人力优势、环境优势和大容量接纳风电的技术优势。特别是内蒙古享有模范民族自治区的美誉，自治区历届领导和全区2430万各族人民共同营造的民族团结、边疆稳定、社会和谐、经济快速发展的良好局面是建设“风电三峡”基地的政治优势。完全值得借鉴三峡水电站的发展之路，建立全国电力市场消纳风电的机制。鉴于风电开发规模大、汇集风电的输变电工程距离长和单位投资大的实际情况，建议采用国家对农网改造和电气化铁路建设方面出台的扶持政策，同时也为电网出台针对风电送出的还本付息电价政策。

内蒙古有 7 万平方公里的优良风区，风能资源可开发容量达 1.5 亿—2.1 亿千瓦，约占全国陆上风能可开发容量的 30%。截至 2010 年 2 月，内蒙古电网接入风电容量达 450 万千瓦，占电网开机容量的 20%，占电网最大发电负荷的 25％、最高供电负荷的 29％以及最低供电负荷的 36.4%。以上数据说明，内蒙古风电的并网比例等多项指标已经达到全国乃至世界领先水平。丹麦等国的风电容量消纳比例之所以比蒙西电网高，是因为它是受端电网，“背靠背”与欧洲联网，风电发电量充足时向欧洲电网供应，不足时则由欧洲电网供给，有强大的保障。如果蒙西地区是像丹麦或北京、上海、广州一样的受端电网，风电消纳比例还可以更高。2010 年 1 月，为保供热，后半夜风电被大量限发，但发电量仍达到 7.7%。如不弃风，2010 年蒙西电网风电上网电量可达 10%，如果解决好送出通道，风电电量一定会超过 12%。无论用哪个指标比较，风电电量不能超过 5% 这个说法都不能成立。蒙西电网风电发电量现已远远超越了 5%，供电质量没有受到任何影响，是成功的实践。如果解决了风电通道送出及在全国范围内消纳风电的问题，作为送端的蒙西电网，风电的各项比例还可以再提高。

《风能》：您如何看待某些方面对风电的偏见?

苏和：有些人士以自己的想象评论风电是垃圾电源，这是没有理论和实践依据的，违背了《可再生能源法》，这个观点不利于国家节能减排战略的实施，应该纠正。事实胜于雄辩，目前风电已成为内蒙古电网的第二大主力电源，将来也势必会成为整个国家的重要电源。

我国风能资源丰富地区多在北方贫困地区，在这些地区打造风、光能源基地，不仅可以促进边疆稳定、民族团结、社会和谐，还可以拉动贫困地区的经济发展，促进老、少、边、贫地区农牧民脱贫致富，对恢复生态环境、农牧业产业化和电气化将起到重要作用。此外，草场灌溉是牧区基础设施建设的重点，但因输电线路长、工程投资大而成为“老大难”问题。现在内蒙古东西 4000 多公里、南北 200 多公里的区域内已建设近百处风电场，风电分布极广，拉近了电源与草场的距离，形成了新时期发展的契机。从长远来看，“风电三峡”还可为海水淡化提供能源。将海水引上高原加以淡化，用淡水浇灌干旱的草场，同时提取的盐碱等工业产品可为内蒙古在建的资源深加工企业提供原材料，这不但能创造巨大的效益，同时有利于风电的就地消纳。

《风能》：有观点认为内蒙古风电送出的障碍与内蒙古电网的独立性有关，您怎么看这个问题?

苏和：这种言论是不负责任的。如果只是内蒙古电网相对独立存在的体制影响到风电送出通道建设，那么这种观点势必会影响中国节能减排战略的实施，影响中国向国际社会兑现承诺的大局，那就不仅仅是某个企业的认识问题和经济问题了。

虽然内蒙古风电装机超过最高供电

负荷的29%，内蒙古电网通过优化调度，使风电在白天能够满负荷运行，但到后半夜低谷期，为保证城市居民供热，不得不采取“弃风”的措施，预计后半夜弃风达150万—290万千瓦，不仅造成严重的风能资源浪费，使风电企业遭受经济损失，而且挫伤了企业发展绿色清洁能源的积极性。有风电企业苦恼地说说：“为什么节能减排天天喊，内蒙古风电却要夜夜‘泣’”？

2007年国务院19号文件特别强调，要实现全国跨省、跨地区远距离电能交换，实现能源大范围优化配置。国务院文件和有关规划方案为内蒙古能源基地建设指明了正确的方向，遗憾的是没有抓紧实施。

《风能》：您认为内蒙古风电发展是否过快？风能资源是否得到有序和合理地开发？

苏和：如果以中国向国际社会作出的节能减排承诺来衡量，风电发展得并非太快，而是还有差距。国家能源局批准了内蒙古蒙东和蒙西两个千万千瓦级风电基地的规划，现已建成66个风电场，还有40个在筹建。目前，内蒙古已投产和在建的风电项目都通过正式的核准程序，其中大部分是国家特许权项目，完全符合国家产业政策，我们应给予正确的引导和大力支持。

《风能》：内蒙古风电发展的近期目标是什么？如何实现风电与火电的协调发展？

苏和：如果解决了风电汇集和外送问题，并在全国范围内消纳，“十二五”末，内蒙古风电装机容量可达3000万千瓦。

作为送端的内蒙古电网，责任是汇集内蒙古这个国家级能源基地的火电、风电，并大容量外送，支持全国经济发展。“风火相济，打捆外送”将是内蒙古能源基地目前乃至今后长期科学发展的必由之路。风电必须借助火电的强力支撑，在火电的深度调峰下实现大比例接入，可谓“风进火退，风退火进；风大火小，风小火大；风借火势，火助风威”。鉴于输送技术已非常成熟，内蒙古电网完全可以通过超高压、特高压直流通道，采取风火打捆方式向内地和沿海地区负荷中心输送。经权威部门测算，内蒙古至广州的直流特高压通道输送电成本仅为0.1元／千瓦时，而从内蒙古到南方运煤费用是煤炭坑口价的1倍以上，而输电成本仅为20%—30%，何况输电又能为国家节省大量的燃油等交通成本。

维斯塔斯中国区总裁唐玛勒

维斯塔斯海上风电公司总裁简森

起步正确是成功开发海上风电的关键

访维斯塔斯中国区总裁唐玛勒和维斯塔斯海上风电公司总裁简森

■本刊记者 | 于贵勇

9月12日，是中国首批海上风电特许权示范项目投标的截止日期，评标后将诞生4个海上风电项目的中标企业组合，有关中国海上风电发展的一系列产业政策将由此逐渐形成，有媒体称2010年是中国海上风电“元年”。面对崭新而颇具诱惑的中国海上风电市场，在本土风电设备制造企业加紧布局的同时，外资企业也纷纷高调进入，其中维斯塔斯更是有针对性地推出新型海上风电机组。作为首家海上风电机组制造商，维斯塔斯已经形成比较系统的海上风电业务，其设备、服务以及经验对中国海上风电的发展有怎样的意义，维斯塔斯在激烈的竞争中如何稳定自己的地位？就这些问题，本刊记者于“2010上海国际海上风电及风电产业链大会暨展览会”期间采访了维斯塔斯中国区总裁唐玛勒（Jens Tommerup）和维斯塔斯全球海上风电总裁简森（Anders Søe-Jensen）。

《风能》：今年5月中国海上风电招标工作启动，与施工方组合进行投标的开发商大部分都是中国国有发电企业，在风电机组的选购上对维斯塔斯是否有影响？

唐玛勒：首先，参与投标的开发商大部分是维斯塔斯的用户，某些新用户也有发展海上风电业务的计划和投资意向。近年来，维斯塔斯与现有用户都进行了密切的合作，同时，针对中国海上风电，我们与大用户进行了深入细致的讨论，我们认为这方面的合作意向非常明确。实际上，我们的合作从早期就已经开始了，包括在招标过程中对风电机组型号的选择、整体流程的设计以及人员培训，为用户提供完备的解决方案。维斯塔斯中国殷切期待海上风电之旅的来临，我们在海上风电机组制造方面及服务方面都做好了准备，希望与中国政府、设计院及开发商开展密切合作。

《风能》：具体讲，维斯塔斯有哪些经验可与中国同行分享？

简森：多年前，当维斯塔斯在欧洲首次开发海上风电时，我们也经历了非常痛苦的过程，因为那时我们没有经验。10多年来，我们一直在学习、积累，所以在发展中国海上风电时，我们希望起步就是正确的。

我们得到的经验是“丰富的经验，广泛的知识、可靠的技术和可行的方案”是发展海上风电的关键。需要指出的是，欧洲首个海上风电机组生产开始于20多年前，而第一个大规模海上风电场，即丹麦荷恩礁海上风电场的开发是在10多年前。开发海上风电场的企业需要具备三大要素：首先，海上风电开发的可靠技术，建造和运维能力；其次，需要适合特定风电场的风电机组；最后，具有开发海上风电的经验和切实可行的方案。

唐玛勒：回顾中国陆上风电发展，我们很高兴地看到，2009年，中国风电行业对运营多年的风电场在风电机组质量、可持续发展和商业确定性方面进行了深入的讨论。维斯塔斯将竭尽所能，在中国海上风电发展的初期，避免陆上风电已发生的问题，尽量缩短学习阶段，从海上风电发展之初就准确定位。用一

句话来总结维斯塔斯的技术优势和经验，就是“商业案例的确定性”，即实现之前对商业案例所做的预期，从而实现用户的预期投资回报率。

《风能》：从维斯塔斯全球经验来看，海上风电的电价由哪些因素决定？如何有效地降低开发成本？

简森：海上风电的度电成本由风电机组在 20 年中的发电量所决定，而发电量又受风能资源、风电机组选型、风电场所处位置等（滩涂、潮间带、近海或深海区域）的影响。因此，欲获得海上风电成本，需要具体的工程投资建设经验。在项目设计阶段，我们需要与用户比较双方的成本方案，对项目整体成本达成一致，将欧洲海上风电开发的所有教训、经验和知识与中国海上和陆上风电开发事实情况相结合，从而比较海上与陆上风电成本。

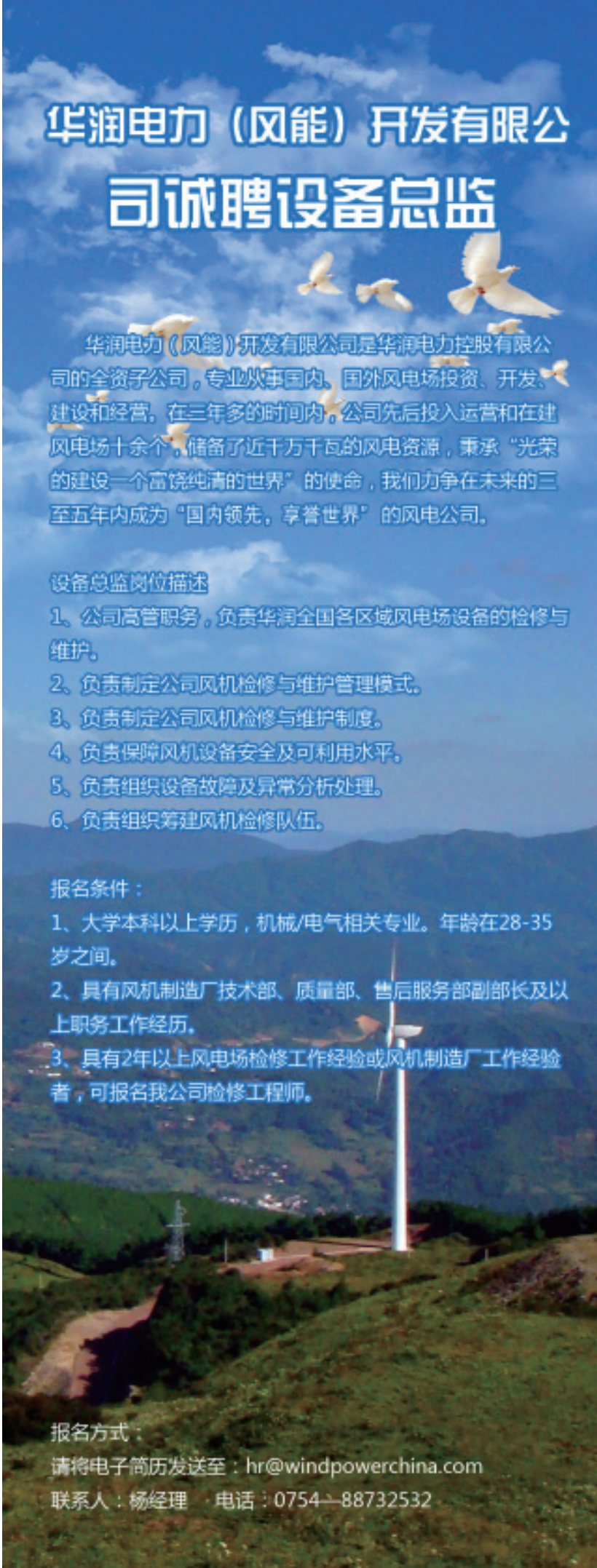
海上风电成本尤其需要关注度电成本，如果风电机组本身成本不高，却不发电，这对于海上风电的损失要远远大于陆上；如果你的预见能力、风电机组检验、预防维护服务均到位，风电机组的发电能力就会得到保证。谈及海上风电时，我们最关注的就是风电机组能够充分利用风能资源。风起时，由于海浪大，靠近风电机组的难度很大，因此风电机组质量和预防性维护就变得尤为重要，可有效降低度电成本。

荷恩礁海上风电场是在 10 年前的政策规划下投建的，丹麦的情况，不能与英国的可再生能源义务证书下的电价相比，更不能与德国实行补贴政策的电价相比。中国应该讨论电价补贴政策。荷恩礁的电价，已经是历史数据，对当前我们要投建的项目来说，借鉴意义非常有限。

《风能》：最近维斯塔斯推出了 V112-3.0MW 新机型，该机型通过了多长时间的实际运行测试？维斯塔斯的一贯理念是“风电机组并不是越大越好”，现在推出全新大容量机型，是技术发展路线发生变化，还是迫于中国市场的竞争压力？

唐玛勒：我们在推出新机型时，是整合不同技术的过程，通常历经多项测试，时间跨度较大。在此过程中，产品在丹麦的测试中心接受全方位的测试。所有测试过程完成后，将确认样机的各种技术指标，样机核准通过后即可进行批量生产。若新机型整合了很多全新技术，且这些全新技术并不是百分之百可控的，样机的测试将历时很长。

简森：需要强调的是，当今风电机组测试同以往大不相同。过去，风电机组完成制造后就进行测试。现在，我们拥有测试中心，可进行风电机组全仿真动态模拟测试，如同进行实际风电机组测试。我们以不同以往的方式测试风电机组各零部件，因此实际测试程序并不是测试，而是对设计过程准确性的核实，这大大缩短了测试过程。



中国风电地标：达坂城1989

■本刊记者 | 陈　雪　牟　迈

达坂城，位于乌鲁木齐和吐鲁番之间，70年前，这个极其普通的村镇，因为音乐家王洛宾编写的一曲《达坂城的姑娘》，一举成为世人梦想到达的地方。

从地理角度看，达坂城位于天山山脉中部一个谷地的终端，虽然相对地形不高，但海拔有1000多米，是天山在此地的分水岭。特殊的气象与地理条件造就了达坂城谷地常年不衰的大风，比“漂亮姑娘”的历史更悠久。

1989年10月，历史发生了改变。因为一片“发电风车”的崛起，达坂城在中国乃至世界风电发展史上有了地标意义。这一年，总装机容量2050 kW的达坂城风电场，成为当时中国也是亚洲规模最大的风电场。

20年，是一台风电机组在野外正常运行的设计寿命，而1989年10月29日投产并网运行的丹麦Bonus公司13台150kW失速型风电机组与1台Wincon公司100kW机组，到今天已在达坂城风电一场连续运行超过20年。

值得关注的是，目前设备仍在正常运行，故障率、维修状况也处于正常水平。多年平均折算满发小时数约为2430。业内资深专家于午铭称，“这是中国风电场投入商业化运行历史最长、运行效果最好的机群，也是达坂城风区创造的首个全国之最。”

<<1987年，新疆水利厅厅长维吾尔（右）与英国风电专家。

>>时任新疆风能公司副经理兼达坂城风电场场长的武钢（左）和外国专家在一起。

风起于柴窝堡湖畔

实测数据显示：达坂城风区10m高度的年平均风速为6.5-7.0m/s，每年“有效风速小时”数超过7000，占全年日历小时数的80%。而这儿的“富风”真正称得上“风起于叶片”，则是从1987年元旦——柴窝堡风力发电试验场投产发电开始的。

据于午铭介绍，上世纪80年代初，新疆水利水电研究所的科研人员在所长王文启的带领下，开始了风力发电探索，这在当时曾被有些人讥讽为“想干月球上的事情”。

但是，王文启不为所惑，继续进行风力发电试验。直到1985年11月，他随同新疆维吾尔自治区副主席黄宝璋、新疆水利厅厅长维吾尔、水电部农电司王兰一起参加了水电部组织的风电考察团赴欧洲考察回来之后，风力发电试验工作才终于有了实质性进展。

王文启主导的风力发电试验工作得到了黄宝璋副主席的全力支持，新疆水利厅也专门成立了由王文启任所长的新疆风能研究所，由此拉开了达坂城风区试验开发的序幕。

此后，在新疆自治区政府的大力支持下，新疆风能研究所筹资购买了丹麦Wincon公司55kW独立型风电机组与100kW并网型风电机组各1台，在达坂城谷地的柴窝堡湖畔建立了风力发电试验场。

回忆柴窝堡风力发电试验站的建设情景，已80岁高龄的王文启依然记忆犹新，叙事当年依旧激情澎湃，这让俯身倾听的记者深受感染。“我下那么大的决心，花那么大的精力，用那么多的工夫，一定要建设好柴窝堡风力发电试验场，这可不只是仅仅是为了电量，更大的‘野心’是要培养中国风电自己的队伍和人才。”

当年，购买丹麦Wincon公司的两台风电机组的时候，王文启就执意把中方人员到丹麦接受培训写进了合同。1986年10月，新疆风能研究所的首批专业人员走出国门，到风电先进国家接受技术培训，这为达坂城风电场的后续建设积累了

>>时任新疆风能研究所所长的王文启（右四）与丹麦使馆参赞合影。

技术力量。

1986 年 11 月，丹麦 Wincon-100kW 并网机组和 Wincon-55kW 独立运行机组运抵柴窝堡。于是，在那“人心炽热”而气候寒冷的冬天，王文启带领一些年轻的学生，硬是在柴窝堡湖畔立起了两台“大风车”，并于 1987 年元旦那天正式投产发电。

柴窝堡风电试验场立起了风电机组，实现了由零到有的突破，但下一步的学习和探索如何进行却成为王文启心中的一个大问题。23 年后，王文启向记者谈起柴窝堡风电试验场时感叹道：“与现在相比，那个时候真是什么也不懂呀！”知识不够，经历不多，甚至连教训也没有。怎么办？请个“洋拐棍”带着走路吧！王文启想到了英国人李普曼（Lipman）教授。

王文启是在随水电部组织的风电考察团赴欧洲考察时结识李普曼教授的。于是，李普曼教授受邀来到新疆达坂城，在柴窝堡风电试验场做过短暂的讲学和研究，认为这儿是“世界上少有的风能富矿”。

李普曼教授回国后，推荐了一对年轻的英国夫妇来到新疆达坂城，做风能技术培训和风能开发利用的“援助工作”，男的叫保罗·加德纳（Paul Gardener），是风能资源分析专家，女的叫艾丽森（Elisen），是教育心理学方面的专家。据见证这段历史岁月的周凌女士介绍，这对英国夫妇不计报酬，是为“达坂城风能开发利用做义工”。周凌女士说，这对英国夫妇在达坂城工作了 7 个月，一天接着一天，从早到晚忙个不停，保罗除了为风电试验场人员上培训课，还要做达坂城风区风能资源的收集、分析和研究工作。艾丽森则选择适当的时间和员工谈心，围绕风电发展做心理辅导，并分级举办英语培训班，初级的，中级的，高级的，所有员工都能找到适合自己的班级。那一段日子，英语几乎成了达坂城柴窝堡风电试验场的“官方用语”。

值得关注的是，保罗回国后，写了一篇题为《新疆达坂城——中国的加利福尼亚？》的文章，发表在一本国际知名的能源杂志上，具体描述了他在新疆达坂城做风能资源研究的情况，以及他的太太在达坂城如何最大限度地发挥作用等方面的事情。尤其是保罗先生在文中公布了新疆达坂城柴窝堡风电试验场两台机组“惊人”的运行数据，引起了世界风电界的高度关注。据此，国外有评论预言，“新疆达坂城将成为中国的加利福尼亚”[1]。

赠款项目的“背后”

据资料记载，1987 年 5 月，由中国外经贸部和丹麦外交部开发署（DANIDA）联合组成的项目评估团对柴窝堡试验场及达坂城风区进行了考察和评估。1988 年 6 月，中国和丹麦政府批准

1. 当时美国的加利福尼亚是世界上风电场开发规模最大的地方

了达坂城风电场建设评估报告，双方签订了丹麦政府赠款 320 万美元的协议，用作购买丹麦风电机组及塔架设备，而中方则负责土建、电网等配套建设，投入费用约 700 万元人民币。

人们在回顾这一赠款项目背景时，大多提到了丹麦政府推销风电设备的动机，以及新疆达坂城优质的风能资源，但却忽略了这一项目的前因和由来。仅仅铭记结果的历史，是不够的。

1986 年 7 月，在北京举办的新能源展览会上，王文启遇到了丹麦维斯塔斯（Vestas）中国区销售经理，这位经理问他是否愿意扩大风电场规模，他说当然愿意。这位热心的经理立即带他跑到民族文化宫找丹麦政府的官员，结果没有找到，可这位经理很执着，硬是把他带到了中国外经贸部的大门口，而且给里边的人打了个电话。原来 DANIDA 有个贷款项目要和中国外经贸部一起执行。“这之前，”王文启回忆说，“我们并不知道这一信息。”

王文启在外经贸部大门口见到了一位姜姓官员，便直接说，“这位丹麦 Vestas 的朋友告诉我，我们新疆风能研究所可以使用丹麦贷款建设风电场。”

“可以。”姜姓官员说，“但你要立项，写项目建议书，先到你们自治区计委审批。”

王文启喜出望外，赶紧回到宾馆收拾东西，退房，火速赶往首都机场，心想：我们不只是要做试验，还可以建达坂城风电场了。

回到新疆，王文启直接找到自治区副主席黄宝璋，当面汇报了可以申请丹麦贷款建风电场的事情，得到了黄宝璋主席的支持。那一段时间，王文启从新疆到北京、由北京回新疆，来来回回的飞，缺什么文件补什么文件，直到外经贸部的官员说“可以了，先放这儿吧”，他才终于松下一口气。

到了这年的 10 月下旬，外经贸部在武汉东湖宾馆召开会议，其主要内容是介绍如何申请国外的贷款项目，以及项目可行性研究报告的撰写。当时，会上立项项目有 50 多个，但风电立项项目仅有达坂城风电场这一个。这也引起了丹麦政府一位负责贷款项目官员的特别重视，这位官员找到王文启，问他可行性研究报告写的怎么样了，一再说达坂城风电场是个好项目。

但是，王文启却强调了这个项目的困难。他向丹麦官员作了一番解释：新疆自治区政府批复的文件是，可以贷款 100 万美元，可我拿什么、什么时候才能还上这 100 万美元的贷款？在新疆风电上网电价套用小水电标准，每度电只有 5 分钱，我们就是一辈子不吃不喝也还不上啊！可这位丹麦官员却坚定地告诉王文启，“可研报告一定要继续写，贷款的事情我来想办法，改成无息贷款。”

会议结束的前一天，丹麦官员又找到王文启，“无息贷款，35 年还清可以吗？”

“35 年，”王文启开玩笑说，“那时我早就不干了，你到哪找我？”

“不急，不急！”丹麦官员很认真地说，“咱们到北京再想办法。”

后来，王文启就得到了外经贸部姜姓官员的通知，“你们这个项目通过了，丹麦对这个项目十分有兴趣，给你们改为一半贷款，一半赠款了，各 160 万美元。”

1987 年 5 月，由中国外经贸部和 DANIDA 联合组成的项目评估团就到了新疆达坂城，王文启全程进行了陪同，带他们考察柴窝堡风电试验场、走风区。丹麦官员看到达坂城斜着长的树，就连喊：“Stop，Stop！（停，停！）”他们一边照相，一边说这儿的风能资源真好！通过这次考察和评估，DANIDA 将赠款改为 200 万美元。

1987 年 11 月，丹麦里索（Risø）国家实验室的几位专家来到达坂城实地考察研究，写出了达坂城风电场可行性研究报告。通过这份报告，经协商，丹麦政府同意将混合贷款改为全额赠款约 320 万美元，以支持中国边疆民族地区的风能资源开发利用。

此后，由当时的中国技术进出口公司代理，进行了风电设备招标。引进丹麦赠款这件事，因为 Vestas 中国区销售经理而起，但设备招标的时候 Vestas 正遭遇经营上的困难，没能参加这次招标，这令王文启深感遗憾。

在对投标厂商进行资格审查时，王文启和同事到了丹麦，一连考察了 4 家投标商，几经比较，最终选择了 Bonus-150kW 失速型机组。接下来，和 Bonus 公司有一个商务谈判，包括购买多少台风电机组，塔架怎么配，需要配备多大吨位的吊车（当时国内吊车吨位比较小，达不到机组吊装要求）等等。其实这是一个 320 万美元的一揽子商业合同，从生意的角度看，中方希望尽可能多的采购机组设备，而丹方也想尽可能的“榨干”这 320 万美元。按照丹方的想法，除去其他必须的项目，可以买到 11 台机组设备。

可真正进入合同内容的实质性谈判时，却发生了两件不愉快的事情。

1989年10月新疆自治区领导为达坂城风电场投运剪彩

郭健（右一）与风电场职工同挖电缆沟

吐来姗与外国留学生交流

一件事是，丹方强调，若因为内战或天灾等因素，致使设备不到位，丹方不负责。这一条款令王文启很不爽。他说，“我们国家不可能发生内战，”并坚持去掉这一条款。于是，双方一番争吵，最终还是取消了这一条款。

另一件事是，丹方安排了一家叫“科威”的咨询公司帮助中方做风电场设计工作，当然也要取走 320 万美元的一部分。这也是合同内容一个“必须”的项目条款。王文启当即表态：“不需要这项服务。在新疆，我们自己完全可以做好这项工作。”对方说，“那不行。丹麦援助约旦等国家的风电场都是这家公司设计的。”

双方僵持不下，这件事就传到丹麦驻中国使馆的一位参赞那儿，这位参赞立即飞到新疆实地了解情况，然后，通过电话对丹麦相关人员说了两句话：“约旦是约旦，中国是中国，王先生这儿的情况我知道，就按王先生的意思办；王先生这儿已经做了大量的富有成效的前期工作，他们自己可以做好风电场的设计工作，那就由他们做，相信他们好了。”

王文启说，尽管双方在合同谈判上有分歧，甚至有过激烈的争执，但还是很真诚、很友善的，毕竟都想把事情做好。最终的谈判结果是，中方采购到了 13 台机组设备，还有 1 台法国产 75 吨吊车，以及对中方人员的技术培训。

施工中的苦乐和“意外”

1989 年 4 月，达坂城风电场正式动工建设，安装了 13 台丹麦 Bonus-150kW 风电机组，以及由原柴窝堡风电试验场迁移来的丹麦 Wincon-100kW 风电机组，总装机容量为 2050kW，历经 6 个月的施工和调试，于同年 10 月并网发电，成为当时中国也是亚洲装机规模最大的风电场。

当年的亲历者吐来姗（现任新疆风能有限责任公司副总工程师）向记者讲述了达坂城风电场建设施工期间的那段“苦乐岁月”。她说，“印象最深的就是，风电场的每个人都被分到了开挖 100m 电缆沟的繁重任务。人工挖沟的工作很苦，但因风电而多了快乐。”

吐来姗说，7 月的达坂城风区，烈日曝晒，十分炎热，从市区运来的西瓜也在烈日下蔫巴儿了。不知谁出了个“土里埋西瓜”的主意，他们就试了一把。果然，埋在土里的西瓜切开后仍然十分的水灵。见此情景，一向严谨、不苟言笑的丹麦专家也忍俊不禁，竖着大拇指连声说道，“Smart Chinese（聪明的中国人）！”

↳Bonus-150kW风电机组机舱及叶片吊装

↘1994年10月16日，时任新疆风能公司总经理的于午铭（前排右一）在风电场迎接韩国客人。

大家挥汗如雨，很多人的手上磨出了水泡，越是辛苦和劳累，越是体现了团结友爱、助人为乐的精神，尽管各有任务分工，但最终还是大家一起完成了开挖电缆沟的任务。这其中就有后来在风电界耳熟能详的人物，比如王文启、郭健、路峰。

风电场最初施工的工作基本顺利，但进入设备安装阶段的时候却遇到了“很意外”的问题：本该早已到场的法国吊车仍旧被“卡”在俄罗斯的里加港口，致使已经运抵风电场的 13 台机组设备只能摆在场地。回忆这件“很意外”的吊车事件时，王文启说：“绝没有想到”。

盛夏的达坂城酷热难当，王文启和他的同事们显得更为焦灼：国内没有符合吊装要求的吊车，而负责机组安装、调试的厂家工程师，以及负责工程监理的丹麦工程师均已来到风电场，只欠法国吊车的“东风”了。等还是不等？王文启决定，不等！

于是，王文启和当地吊装公司的师傅一起讨论，考虑吊车的吨位，制定了新的吊装方案：3 节的塔筒两次起吊，即先在地面把两节塔筒组装，完成起吊后，再进行第 3 节塔筒的吊装。为了加大保险系数，起吊塔筒时使用了 3 台吊车，1 台吊车在中间起吊，另外两台吊车分别在一侧“抬升”，以确保起吊安全。

丹麦工程师们对这个吊装方案提出了异议：“这样的塔筒吊装方案在丹麦和其他国家从未有过！”他们认为，必须先在地面组装好 3 节塔筒，再整体吊装。没有符合要求的起吊设备，就不能进行机组吊装。

“你们没有做过的事情，我们就不能做成吗？”王文启的不妥协，惹怒了丹麦工程师们，他们气愤地说：“出了任何问题，都由你们自己负责！”

“我当然会负责！”王文启坚持己见，大胆实施新的吊装方案。而丹麦工程师们也很执着，他们又是记录，又是照相取证，以证明这样的机组吊装方式不是他们想要的。

回忆当年与丹麦工程师的争执，王文启说，那时候什么事情能干、什么事情干不了，他还是心中有数的。实践证明，当时采用的吊装方案是成功的，13 台机组全都顺利完成了安装和调试，并于当年 10 月 29 日并网发电，这标志着亚洲装机规模最大风电场的诞生。而此时，专为 13 台机组吊装而购买的法国产 75 吨吊车依旧被“卡”在俄罗斯里加港口，依旧没有起运的消息。直到第二年，这台吊车才来到达坂城风电场，为机组维护以及新疆风能公司的生产经营作出了很大的贡献。

项目建成后的价值影响

1989 年 10 月建成的达坂城风电场，究竟给中国风电发展带来了哪些积极影响？据有关资料显示，1991 年 9 月 4 日，该项目通过了由水利部科教司主持的鉴定。15 名中外专家一致认为，“该项目技术指标优异，发电设备平均年利用小时数 2749，已达到世界风电场运行先进水平，在国内处于领先地位。该风电场建设为我国风力发电事业提供了有益的经验，起到了很好的示范作用。”该项目也因此获得 1992 年度水利部科技进步三等奖。

1991 年 3 月至 2001 年 5 月，一直担任新疆风能公司总经理、新疆风能研究所所长的于午铭先生，从亲历者角度向记者解析了该项目的价值。他说：“从一定程度上，这个项目起到了种子的作用。在中国，凡是搞风电的人几乎都来过达坂城，凡是中国搞风电的地方，也几乎都可以找到新疆人的身影，这种影响对中国风电发展产生了积极作用。”

首先是观念上的影响。比如，新疆风能公司就是根据丹麦政府赠款项目要求而成立的。接受这个项目的时候，丹麦方面提出“科研单位（新疆风能研究所）不能经营风电场”的要求。为适应这一要求，1988 年 6 月新疆风能公司成立，由其管理和经营达坂城风电场。正是企业化运营促进了新疆风能公司不断壮大，也催生了后来的金风科技公司。

比如，该项目在丹麦实施设备招标，由中方进行评标，即使丹麦制造商也不能躺在援助项目上吃饭，也要依靠竞争拿到援助中国的项目。新疆风能公司的管理人员在项目合同中，第一次看到多处提到“工程师”的职责，起初很不理解，因为那时国内还没有工程监理这个概念。新疆风能公司在后来的某些工程建设中，模拟了工程监理这一监管方式，确保了工程质量。

比如丹麦人的严谨、细致工作精神。他们做事很有计划性，明天要做的工作，今天晚上必须做好一切准备，要用的工具，也要对着清单一一检查。由他们组织的会议或会谈，不仅内容具体、详细，就连时间安排也要具体到几点几分。这些细节都在当时的新疆风能公司产生了“震动”。于

是，新疆风能公司也在后来的日常工作和接待活动中进行了应用，公司内部的应用有了积极的效果，可在国内接待活动中的应用却遭到了“挖苦”：“你们这是火车时刻表吗？”一张小小的日程表反映在观念上，绝不是一张纸的差距。

其次是技术上的“吃惊”效应。控制系统是该项目的最大亮点，主控室就一台计算机，而且可以显示每台机组的即时数据，这在当时连搞电站监控技术的人也倍感吃惊。该项目中央监控系统由 286AT 微机和三条数据采集链路组成，一条连接 6 台风电机组，一条连接 7 台风电机组，一条连接测风塔，记录包括风速、环境温度、大气压力、空气密度、机组状态、运行小时数、功率、发电量、日期及时间，以及机组故障显示和记录，并适时监测有功功率、无功功率等等，同时可以遥控机组起动、停机、复位、偏航等等，还可以根据记录数据统计，打印生产率、利用率、故障、产量及风能资源分析等等。“就其功能而论，是当时国内引进机组中最完善、最先进的一套监控系统。”于午铭说，“这为国内引进风电项目提供了标杆，也为国内风电场中央监控技术学习和研发提供了借鉴版本。”

第三是项目附加的“学校”作用。随项目合同“捆绑”的，是走出去、请进来的学习和培训方式；随设备而来的，是丹麦专家的技术服务，以及现场培训。“这个项目最大的附加值，就是它发挥了学校的作用，不只是培养了新疆本地的风能技术人才，也让全国的风能人受益匪浅。”

1989 年 10 月建成投产的达坂城风电场，因为 1992 年 11 月达坂城风电二场的开工建设，而改名为达坂城风电一场。名字只是历史的一个符号，重要的是，现在我们还能够看到 1989 年 10 月 29 日并网发电的 13 台机组仍在正常发电。现在，一场还叫一场，可装机规模已数十倍于 20 年前的容量。20 年前，13 台机组的容量，今天看来似乎微不足道，但记者用了 7000 多字的篇幅加以表述，当然不仅仅期望它们在达坂城的天空能够继续长远，更在于今天的风能人想想这样一个问题：

我们现在的风电机组、我们现在的风电场，能不能运行 20 年？

达坂城风电场全貌

达坂城风电场13台Bonus150kW机组20年运行分析

■国家风力发电工程技术研究中心 | 于午铭
■新疆风能有限公司 | 王世伟
■新疆金达坂风电技术有限公司 | 李　平

众所周知，风电机组的设计寿命一般为20年。这一设计数据究竟能否实现，是风电业界普遍关心的问题。新疆达坂城风电一场的13台150kW机组用事实作出了肯定的回答：不但可以，而且有可能超过20年。

这13台失速型机组产于丹麦Bonus公司（现被西门子并购），于1988年购进，1989年10月29日并网发电，其单机容量和技术水平在当时处于世界领先。这一批13台风电机组叶轮直径23m，轮毂高23m，至今已连续运行满20年，达到机组设计寿命。目前设备仍在正常运行，故障率、维修状况正常。多年平均折算满发小时数约为2430h，这是中国风电场投入商业化运行历史最长、运行效果最好的机群。

20年弹指过去。回顾这13台机组的运行历史，总结其运行状况与经验教训，对我国风电产

业发展应该是有益的。

一、风能资源及发电量数据

达坂城风区位于中天山和东天山之间的谷地，西北起于乌鲁木齐南郊，东南至达坂城山口，长约 80-100km，宽约 15-30km。根据达坂城气象站以及多年来多座测风塔的实测资料，该风区 10m 高度年平均风速为 6.5-8.1m/s，风功率密度为 319-709W/m^2；50m 高度年平均风速为 7.8-9.3m/s，风功率密度为 526-1197W/m^2。风区主导风向为东南风和西北风，实测极大风速 36.3m/s，年有效风速小时数在 6250h 以上。风区风能资源丰富，风向集中，无破坏性风速，风能品质极好，是新疆乃至全国风能资源最优良的地区之一。

13 台 Bonus 150kW 机组自 1989 年 10 月投运至今 20 年来，在新疆几代风电人的精心管理维护下，到目前机组运行状况仍然良好，处于正常发电状态。截至 2009 年 10 月，13 台 150kW 机组已累计发电 9434.65 万 kW·h，单台年均发电量为 36.28 万 kW·h、最高年发电量达到 45.01 万 kW·h，比平均值高出 24%。年平均标准运行 2428h，年平均发电 6176h，年平均实际可利用率达 97.33%。在 1990 年至 2009 年的 20 年间，全场轮毂高度（23m）实测平均风速为 6.6m/s。

1989 年至 2009 年 13 台机组的年发电量和实测风速数据见图 1。发电量变化与风速变化规律基本符合。

从图 2 所示的单台机组前后 10 年分段累积发电量的对比情况，可以看出：1）大部分机组运行情况较稳定，发电量差距不是太大，变化趋势基本一致；2）各台机组后 10 年发电量比前 10 年普遍明显下降，平均降低约 15%。其原因之一主要是风速降低。从图 1 可以看出，后 10 年全场实测风速下降约 5%；其二可能是因机组老化、维护量加大、叶片污染等方面的影响。这提示我们，对于已投运风电场而言，风速的年度变化是对发电量影响最大的因素之一，所以对风电场的电量指标考核应注意风速采集以及统计的科学性和规范性，如果能进行风频分布的统计分析，剔除极限风速对统计数据的干扰，找出场区风速与机组出力的实际对应关系，同时结合机组可利用率等指标考核，则对运维部门的工作评价将会更加科学合理。

除了发电之外，由于这 13 台机组当时还是单机与总容量最大的风电场，所以也成了国内风电行业的参观和考察的重点，也为国家“八五”200kW 国产风电机组攻关提供参考资料与其他支持，为我国风电产业起步发展起到了引领与示范作用。在风电场运行近两年后，1991 年 9 月水利部组织了技术鉴定，由时任科技部工业司司长石定寰为组长，由 17 名中外专家组成的鉴定委员会对“中国新疆达坂城风力发电试验场”项目作出鉴定结论认为，“该项目是非常成功的”、“风电场运行可靠，技术指标优异，已达到目前世界风电场运行的先进水平，在国内处于领先地位”、“较好地吸收消化了国外先进技术，在风电场设计布局、产量工程评价等方面有所创新”；“通过项目实施培训了一支年轻的风电专业队伍，为今后的发展打下了基础”以及“为我国发展风力发电事业提供了有益的经验，起到很好的示范作用等”。

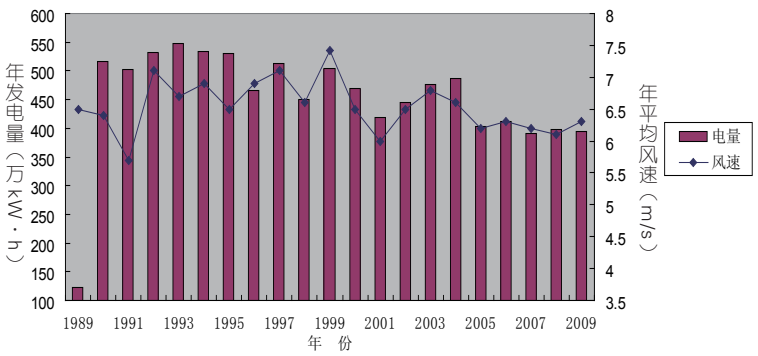


图1 1989年至2009年13台Bonus150kW机组年发电量及风速统计

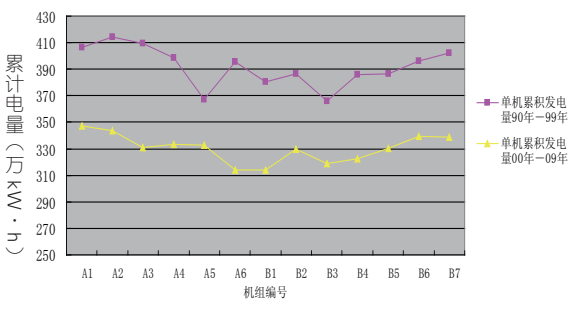
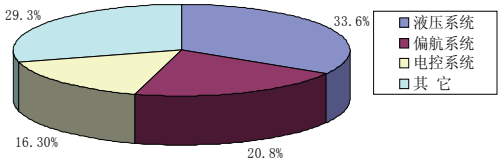


图2 Bonus 150kW机组10年分段累积发电量对比



2003年—2009年 Bonus150kW机组故障时间比例图

二、运行状况、故障数据统计与主要问题

总体而言，由于该型机组质量较好，在投运至今的 20 年间，除常规性消耗品外，很少发生机组大件损坏，13 台机组 20 年来仅维修过一台齿轮箱和两台发电机。齿轮箱损坏主要是高速轴个别齿面崩裂，运行中振动和噪音明显增大，通过专业厂家的测绘，待加工零件修复后恢复正常。发电机损坏主要是前轴承损坏后发生扫膛，导致绕组绝缘损坏，更换轴承并由专业厂家重新绕制线圈后恢复正常。在机组订货时由于缺乏经验，最担心叶片损坏，专门定购了 3 支叶片做为备用，实际上 20 年来没有发生过叶片主体结构损坏。这和近几年来有的机组刚投运，叶片事故就频繁发生的情况形成鲜明对比。

对于机组故障类型，由于数据读取限制，我们仅选择数据较完整的 2003 年至 2009 年进行了分析对比，如图 3 所示。在统计期内，液压系统和偏航系统故障出现较多，分别占到了总故障时间的 33.6% 和 20.8%，电控系统故障约占 16.3%，其他因素导致的故障占 29.3%。

（一）液压系统

Bonus150kW 机组的液压系统主要用于实现叶尖气动刹车和低速轴刹车功能。3 个叶尖气动刹车共用一个液压回路，超速保护通过机械式压力开关实现。均布于低速轴刹车盘的 4 组液压刹车也共用一个液压回路，在机组失电状态主要依靠液压蓄能器提供压力补充。机组的液压系统设计虽未像后来更成熟的定桨机组一样采用多回路冗余保护，但整个运行期内机组制动还是较为可靠的，没有发生过失控飞车现象，主要存在的问题是机组长期停机后由于压力损失，刹车制动力降低甚至失效，只能靠叶尖气动刹车制动，存在一定的安全隐患，增加了相应的维护难度。

就液压元件而言，损坏率较高的是液压旋转接头，主要是由于机械磨损导致的密封处间隙增大出现渗漏，一般通过更换四氟乙烯油封及芯轴进行处理，同时加装了集油盒避免渗漏的油液造成机组表面大面积污染。机组蓄能器的损坏原因主要是内部薄膜损坏，个别为氮气泄露。电磁阀阀芯故障率较低，损坏多出现在线圈发热老化导致短路。压力开关损坏的原因主要是长期使用内部弹簧的弹力改变，直接影响了动作值的精确度。液压泵及电机工作较为可靠，故障率极低。

总体而言，该型机组的液压系统设计相对比较简单，部分影响机组安全稳定运行的因素考虑得不是十分周全，但系统自身工作的可靠性尚可，基本满足了机组运行的需要，随着运行时间的增加，部件出现老化使得液压系统的故障率有所增加。

（二）偏航系统

该机组偏航系统采用单减速器，外齿圈驱动的形式，偏航轴承采用了中心滑动轴承，偏航制动主要由偏航电机的电磁刹车提供。均布的 4 组尼龙滑块和铜基滑块为机组提供了偏航阻尼和稳定机舱的作用。采用上述设计虽然简化了偏航制

动的结构，但存在运行状态机舱晃动较大的问题，偏航减速器在机组运行状态要承受绝大部分偏航制动力，存在一定设计缺陷，随之而来的影响是在盛行风向的偏航齿轮工作位置多数齿根出现了疲劳裂缝，有的发生断裂现象，偏航减速器也因此发生过多起输出轴断裂和行星架断裂的现象，上述疲劳损坏现象大约在机组运行满 10 年后开始出现并逐步增多。这一设计方式在后续的更大功率的机组中没有再继续沿用，而是较多选择液压偏航制动、齿圈式偏航轴承等更为先进的技术。

针对上述现象，运行人员通过测绘加工，对减速器易损部件进行了国产化替代，同时增加了对日常阻尼间隙的检查、调整和工作面润滑的次数，相对缓解了上述问题对机组正常运行的影响，但实际运行中偏航过载故障发生的频次还是较高。对于偏航盘部分齿根出现疲劳裂缝的现象，由于达坂城风区常年盛行风向相对固定，而齿根发生损坏的位置也正是盛行风向的工作位置，所以在 2000 年运维人员根据探伤结果，决定将全部机组的偏航盘相对于塔架位置旋转 90° ，使得发生疲劳损伤的区域调整到不经常工作的位置，基本解决了机组偏航盘齿根疲劳损伤的问题，延长了机组的运行寿命。

（三）电控系统

Bonus 150kW 机组的控制系统由丹麦 KK 公司制造，该系统是由两块 MC6809 微处理器构成的多 CPU 系统，由两个独立的 CPU 板组成，各自独立承担部分系统功能。在关键操作中互为后备，通过共享总线相互联系监视，提高了可靠性，简化了硬件系统。其共享方式为单向共享，从而使硬件配置简单可靠，避免了由于总线竞争造成的延时和紊乱，具有较快的数据传输能力。微处理器部分和外部输入输出回路通过光电耦合器进行隔离，提高了计算机抗外部干扰的能力。

机组控制回路中共有 7 个独立的电源，分别作为计算机电源、通信电源、直流控制电源、交流控制电源等。各独立电源间不存在共同点，按功能将各控制回路的电源独立，实现了相互隔离，防止一条回路出现故障时波及其他控制回路，较好地避免了电磁干扰，保证了机组的安全运行。

机组选用的继电器和接触器设计电气寿命大于 100 万次，机械寿命 1000 万次，理论上可满足机组 20 年运行期的要求。但由于现场的实际工况差别较大，所以运行中仍有损坏现象发生，尤其是主接触器和旁路接触器的故障相对较多，表现为线圈发热，绝缘老化短路，导致接触器不能

正确动作，损坏比例约占 1/4。从柜体布置看，机组主接触器、旁路接触器和可控硅单元同在一个柜内，与之相邻的是电容补偿单元。由于柜体空间较小相对密封，没有设计通风装置，所以夏季高温季节柜内气温往往超过 55℃，甚至更高，这应该是主接触器损坏的主要原因之一。对于控制回路，随着运行时间的增加，部分电源插接头氧化、印刷电路板老化、熔断器底座弹性降低导致接触不良，以及部分 IC 元件受外部环境因素影响稳定性下降而影响控制器正常工作等原因，使电控系统运行后期的故障率也有所增加。

此外，机组早期使用的 DOS 版本编制的中控程序由于硬件置换等原因不能正常运行，而且其一些功能也需要优化。后续通信系统出现工作不稳定现象主要是通信线路老化，线路压降增大导致信号衰减所致，要彻底解决这些问题尚存在一定的难度。

总体而言，Bonus 150kW 机组控制系统设计比较完善，思路清晰，结构简单，运行可靠，虽然是上世纪 80 年代末的产品，但其设计思路和功能实现方案在后续机型中仍能看见延续。

（四）叶片

该型机组叶片主体结构较好，在 20 年运行期内未发生过叶片断裂、胶合部件开裂、结构分层等主体损坏现象。发生的主要问题是叶尖钢丝绳由于磨损及疲劳发生断股及断裂现象，影响叶尖正常释放与回收，需进行更换处理。而处理这类故障由于受工作空间及天气条件等限制，往往耗时较多，对该型机组而言属于停机时间较长的故障。有个别由于叶片内部 PVC 导向管断裂错位不能正常穿入钢丝绳的叶片则需进行更换处理，运行期内共更换过 2 支叶片。

三、运行中的技术改进与创新以及国产化改造情况

20 年来，为保证 13 台机组安全稳定运行，运行人员在没有国内经验可以借鉴的情况下，以厂家的《机组运行维护手册》为基本依据，首先进行扎扎实实的消化吸收，弄清楚机组各方面的工作原理，同时结合现场实际和不断变化的客观条件，积极稳妥地推进技术改进与技术创新，实施国产化零部件替代。这不仅对保持机组良好工作状态、保证发电量以及降低运行维护成本起到很好的作用，也为后来的大型风电机组国产化创造很好的条件。

（一）机组出力优化

对失速型风电机组而言，如果安装在冬夏季温差很大的风电场，由于冬夏空气密度变化较大，会造成叶片安装角难以兼顾的情况。即如果按夏季满发选择安装角，将会造成冬季严重超发。而选择冬季满发，又会造成夏季欠发。达坂城这 13 台失速型机组正处于这样的条件。达坂城地区冬夏季温差可达到 70℃以上，运行初期也确实出现了欠发与超发的问题。

为了解决这个问题，Bonus 150kW 机组在运行初期曾采取过安装角调整方式，但每年需调节两次，工作量与危险性都较大。后来在原中国风能技术中心龙泽强研究员的指导下，采用了在叶片适当部位加装失速贴条以减少超发出力等措施，取得一定效果。以后较长期的措施，主要是探索选择最佳安装角，使机组出力控制在较合理的范围内，尤其要注意减少机组超发状态的机率。这虽然损失了部分发电量，但从机组整体运行周期看，有利于机组长期安全稳定运行，综合效益好。需要强调的是，最佳安装角根据不同风电场的气温变化、风频分布等条件各有不同，甚至同一风电场的不同机组也不尽相同，需要在较长时间的实践探索后确定。

（二）中央监控系统改进

早期随 13 台机组配置的中央监控系统采用 DOS 操作系统，使用很不方便。同时随着后来风电场陆续扩建，不同厂家生产的机型增加，监控系统不能互相兼容，有的机型只有两三台，也需要配置一套中央监控系统，造成控制室内比较零乱而且运行管理很不方便的局面。为解决上述问题，我们在科技部“863”计划支持下，完成了“风电场通用中央及远程监控系统”攻关研制，统一配置了 WINDOS 操作系统的中央监控系统，对机组同样进行了改造。这一成果获得了新疆电力科学技术进步奖。

（三）联轴器国产化替代与维护

该型机组的联轴器选用橡胶织物复合材料。这种联轴器在满足补偿和缓冲减振的同时，提高了承载能力。但在使用过程中大约从投运后第 6 年起，开始有损坏现象发生，接着几乎所有的联轴器都由于疲劳和材料老化相继发生损坏。由于质保期已过，国内又很难找到完全匹配的联轴器，为此，我们在国内寻找联系厂家进行专门设计制造，实现了该部件的国产化替代，较彻底地解决了问题。

运行中也有个别机组是由于机组对中超差，加速了联轴器的损坏，在重新对中后，使用寿命趋于正常。建议对于投运机组在日常运行中如果发生联轴器损坏或机组振动增大，应首先检查齿轮箱和电机的对中情况，即使运行维护手册中没有明确要求的，也最好结合机组实际情况在维护过程中抽测，避免因对中超差导致机组相关部件损坏。此外，对于橡胶元件，如联轴器、减振阻尼元件、机械限位开关护套等，由于实际运行过程中温度、油污等因素的影响，往往达不到设计寿命，在机组运行一定期限后要注意检查、更换。

（四）叶片的运行维护

随着运行时间的增加，叶片表面不可避免地会出现不同程度的污染，并受到风沙的侵蚀，表面光洁度有所下降，这对机组出力将带来不利影响。13 台机组在运行中，主要采取以 3—5 年为周期，分批次清洗全部叶片，同时结合每年两次检修，逐一近距离检查叶片表面状况与叶尖结构，对表面污染较严重的叶片进行清洗。受条件制约，运行期内没有进行过叶片的抛光与涂蜡。从日常维护中的目测观察看，达坂城风区风沙危害不算严重，13 台机组叶片的表面光洁度保持较好，表面涂层没有明显损伤。所以并没有进行每年清洗叶片或者进行抛光涂蜡等专项维护。但在检修中发生过磕碰导致叶片小面积损坏的现象，我们结合其他项目学习掌握了局部修补技术，可以适时修复。

结合后续更大容量定桨机组的运行经验看，在达坂城风区，对于风电机组的叶片而言，与风沙侵蚀及表面污染导致粗糙度变化对机组发电量的影响相比，更重要的是叶片自身质量因素带来的不利影响（如叶片低温性能、叶片共振、叶片结构可靠性以及叶片附件质量等），这些因素对机组的发电量甚至安全稳定影响更大，更需要给予足够重视。

（五）对高龄机组进行全面“体检”

2005 年，由于机组运行时间接近其设计寿命，同时多台机组偏航系统及其他故障频次较高，运行人员选取了一台故障率较高的机组进行了拆检，重点对主轴和偏航齿圈进行了探伤检测；对偏航盘中心的滑动轴承进行了清洗、磨损情况尺寸测量；对机舱底座整体进行了清洗，并对所有焊缝进行了目测检查；对齿轮箱齿面及轴承进行了目测检查；对发电机绝缘情况进行了测试。检查测试结果基本正常。通过上述检查测试，较充分地掌握了机组整体状况，做到了心中有数，使后续的机组运行维护工作更加具有针对性。

（六）积极推进零部件与消耗品的国产化替代

在机组质保期满后几年间，面临随机供应的备品备件逐步减少、采购价格高涨的情况，甚至有些部件甚至高价也难以买到的情况，我们被迫采取多种措施，积极推进零部件与消耗品的国产化替代。这不但保证了机组运行、降低了成本，还促进了技术消化吸收，为整个机组的国产化生产创造了条件。除了前面已经介绍的联轴器、偏航减速器外，进行国产化替代的还有塔筒内爬梯、润滑油脂、电控元器件等等。

1. 从最简单的梯子开始

机组投运后尚在质保期内，由于在国外风电场发生了塔筒内爬梯断裂伤人的事故，制造厂家准备全部更换原来的铝合金爬梯，打算从国外运来再逐一更换。我们了解情况后提出由厂方支付费用，中方负责自行制造更换，用焊接钢结构爬梯代替了铝质爬梯，效果很好。这样做既解决了问题，又小赚了一笔外汇，更重要的是坚定了我

↘达坂城风电一场中央控制室（1989年）

们因地制宜、发挥强项、量力而行地实现机组零部件国产化替代的信心。

2. 各类润滑油脂

机组使用的各种润滑油脂，开始几年是严格按厂家指定的规格与品牌使用的。随着机组配套供应油品的耗尽以及从国外采购成本的增加，我们很早就开始试验寻找替代品。当时国外品牌油脂进入国内销售还很少，主要使采用国产或者国内容易采购的油脂作为替代。我们采取谨慎方针，在分析比较选用技术性能相同或相近产品的前提下，对某些关键指标还进行专门化验，确定可以替代后先在少量机组上试验，没有问题后再大面积推广。运行后期各类国外知名品牌已经广泛进入国内市场，选用与采购比较方便，一般能够保证机组安全运行的需求。

对齿轮箱润滑油等用量较大的油品，我们在运行维护中通过几次换油后的油质观察和对比，后来没有再完全按照《运行维护手册》中要求的，单纯以时间标准为依据进行更换，而是在接近润滑油使用年限时，分批次进行油品化验，根据化验粘度、清洁度、金属微颗粒含量等指标的数据，进行分析对比，对没有明显变化的机组，适度延长润滑油更换周期，在保证润滑质量与机组安全的前提下，有效降低了润滑油使用成本。

3. 电控元器件

在运行初期，电控元器件，特别是弱电器件损坏较多，我们自己尚不具备维修能力。在质保期满的每次故障后，外方都要求把怀疑有问题的零部件（如整个线路板）寄到国外，修复后再寄回。既耽误时间，还必须支付包括往返运费在内的高额费用，而实际修复可能只是某个简单零件的更换。为了摆脱这一制约，我们下决心攻下电控系统技术消化吸收难关，组织力量进行电控系统原理图的解密测试，测绘出系统图，搞清楚每个零部件的规格性能与型号，弄懂系统工作原理，学习掌握分析事故、寻找问题元器件、排除故障的方法。经过较长时间的努力，基本上可以自行分析处理事故，并且能够用国产零部件或者可以在市场上采购到的零部件维修电控装置，解决了机组运行维护中的一个难题。

四、可以汲取的一些经验教训

（一）在设备订货时一定要注意选好制造厂家

13 台机组能够实现 20 年的运行寿命，最根本的原因是设备制造质量比较可靠。应该说当年经过招标选择 Bonus 公司的产品是明智的。当时参加投标的一些公司现在已经不复存在。虽然绝大多数业主都希望能够选择好的制造厂家，但往往限于信息不对称或者受其他因素干扰，往往不容易办到。同样在达坂城风区，就有一个风电项目因为选择制造厂家不当，50 多台总容量 2 万多 kW 的机组安装后一直不能投运发电，至今已达 10 多年，全部机组已接近报废。

（二）在运行维护中，一定要不折不扣地按生产厂家《运行维护手册》中的要求做好定期维修

13 台 150kW 机组 20 年来雷打不动地坚持了每年两次的定期维修，虽然主要进行的是螺栓紧固、加油、换油、检查调整、功能测试等枯燥费力而又危险的工作，但认真扎实地做好了，就能使机组始终保持良好的工作状态，同时还要注意根据设备不同运行周期的特点，在手册规定的检修内容之外，合理增加一些额外的检查调整内容，这有利于机组减少故障几率，延长运行寿命。

（三）鼓励结合风电场实际情况大胆创新

每个风电场都有自己的特殊性，再好的机组也不可能同时适应所有风电场的实际，因此必须鼓励创新。前文所介绍的达坂城风场进行出力优化、中央监控系统改进、偏航盘旋转 90° 等事例，都是积极创新、解决本风场实际问题的例证。

（四）积极而慎重地推进零部件国产化改造

受历史条件限制，这 13 台机组包括塔架在内全部为进口，这为国产化改造提供了原动力与广阔的空间。随着改革开放的深入和国际化市场机制的建立，现在机组所需要的备件与消耗品已大多可以通过市场采购解决。

（五）努力做好技术消化吸收

在当年，国内风电运行与设备制造技术几乎还是空白。鼓励对国外技术消化吸收是解决实际问题、培养人才、培育自主创新能力的有效举措。围绕 Bonus150kW 机组进行的资料翻译、论文撰写、协助科技攻关等对技术消化吸收起到了良好的作用。消化吸收、技术创新以及国产化替代，这些对后来金风科技的创立与发展都起到了积极作用。

本文撰写中承蒙范炜红、冶鹏、满强、张超、张晓玲等同志提供部分数据或者其他帮助，特表示感谢。

运达风电
WINDEY

运达公司根据欧洲风力发电技术的发展趋势，在考虑国内风场的风资源情况、国内供货商的配套能力，确定了适用于中国市场的兆瓦级风电机组总体设计为：三桨叶、上风向、水平轴风轮，三级变速齿轮箱，双馈式感应电机（DFIG）和交流励磁变频器。功率控制采用基于DFIG的变速恒频技术和电机伺服驱动的独立变桨技术，这是目前国际上大型风力发电机组的主流先进技术，其可靠性和成熟度已经得到了世界范围的广泛认可。

WD77(70)—1500kW风力发电机组特点：

- 高可靠性、低风险
- 较高风能利用率、提高发电量
- 具有良好的电网适应性，电能品质高
- 机组自主设计具有不断改进和优化的能力
- 机组具备抗低温、抗风沙、抗雷击等特点，适合中国风资源特点

浙江运达风电股份有限公司

地址：浙江省杭州市西湖国际科技大厦A座22F

电话：0571—87397666

传真：0571—87397667

邮编：310012

达坂城:中国风电发展的见证

■国家风力发电工程技术研究中心 | 于午铭

达坂城的风

达坂城其实并无城堡，只是一个小镇。“达坂”是蒙语，大意是指分水岭那样的山顶。达坂城位于天山山脉中部一个谷地的终端，虽然相对地形不高，但海拔也有一千多米，是天山在此地的分水岭。一条白杨河从这里经过弯曲的后沟流向南疆，属于北疆水系。从这里往西北可以方便地到达乌鲁木齐、伊犁等地，往东南沿着白杨河谷可以去往吐鲁番、托克逊、哈密等南疆东疆重镇，所以自古以来就是交通要道与兵家必争之地。千百年来，达坂城四周的群山默默地注视着这座小镇一次次毁于兵火，又一次次地重新建立。达坂城因王洛宾的歌曲《达坂城的姑娘》一夜成名，过往的旅客多么想一睹达坂城姑娘辫子长的风姿，但得到的多是失望。除了沿街摆满叫卖的蚕豆(新疆叫大豆)能给人留下一些印象以外，别无可引人关注的风物。

然而，这里的风，特别是从达坂城往西北方向直到乌鲁木齐这长一百余公里谷地的风，却是自古以来就颇有名气的。这块宽约三十公里的谷地，西北连接广袤的准噶尔盆地，气温相对较低，冷空气入侵频繁，气压变化较大；东南则连接吐鲁番、鄯善、托克逊盆地，是世界著名的“热极”，

夏季气温经常在 40℃以上。达坂城谷地就成了两大盆地冷热气流交换对流的通道。这种特殊的气象与地理条件造就了达坂城谷地几乎常年不衰的气流：不是来自东南的热风，就是来自西北冷空气入侵的冷风。唐朝诗人岑参“一川碎石大如斗，随风满地石乱走”、“北风卷地白草折，胡天八月即飞雪”等诗句，就是对此地的真实写照。到吐鲁番旅游经过达坂城时，导游会介绍当地的“三歪”：老汉的胡子歪；姑娘的裙子歪；地上长的树歪，这都是风的效应。

千百年以来，怒号的风带给人们的只是生活的不便与灾害，大家讨厌风、躲避风。达坂城风区看不到什么发展前景。

几乎与改革开放同步，上世纪 80 年代，达坂城开始了风力发电的试验探索，拉开了风区历史上新的一页。20 多年来，在一批批风电人的奋斗下，达坂城创造了多项风电产业的全国第一，谱写了可歌可泣的壮丽诗篇，可以不夸张地说，这里全面见证了中国风电发展的历史。达坂城这个世界少有的“风电富矿”，已经为越来越多的人们所认识与关注。

达坂城风区创造了五个“全国之最”

上世纪 80 年代初，新疆风能研究所、新疆风能公司（当时还叫新疆水利水电研究所（水电））的科研人员，在所长王文启的带领下，开始了风力发电的探索。1985 年开始引进 20-30kW 风电机组进行初步试验。1986 年 12 月，在自治区领导及水利部的支持下，在达坂城谷地的柴窝堡湖畔建立了风力发电试验场。他们历时 1 年多的试验取得了大大超出预期的良好效果，证实了这里具有优越的风能资源。两台风电机组的发电量很好，年设备利用小时数接近 3000h，达到世界先进水平。在这些好消息的鼓舞下，在当时国家加快对外开放形势的推动下，经过中国外经贸部与丹麦外交部开发署（DANIDA）协商同意，使用 320 万美元赠款，于 1989 年 10 月安装了丹麦 Bonus 公司 13 台 150kW 失速型风电机组与 1 台 Wincon 公司 100kW 机组，总装机为 2050kW 的新疆达坂城风电一场建成投产。这是达坂城风区创造的第一个全国之最。当年参加风电场建设的王文启、武钢、郭健、任生荣、路峰等人，现在仍然是国内风电产业中执着的参与者及推动者。

上世纪 90 年代，国家改革开放势头更盛，利用外资开发建设风电场步伐加快。由新疆自治区电力局引进丹麦政府混合贷款的达坂城风电二场 1992 年开始建设，1994 年 12 月建成投运。该厂装机达到 10.1MW，成为中国第一家装机突破 1 万 kW 的风电场，其中包括 4 台 Bonus 500kW、叶轮直径 35m 的失速型机组，为当时全国单机容量最大。为此，1995 年，电力工业部副部长汪恕诚在达坂城主持召开现场会，总结推广经验，推动加快全国风电开发利用。这是达坂城风区创造的第二个全国之最。

1995 年至 1996 年，德国政府推出了“黄金计划”，提供设备价格 2/3 的赠款援助，支持发展中国家建设风力发电和其他新能源项目。新疆风能公司经过努力，争取到了利用“黄金计划”的 3 个项目扩建达坂城风电一场，共接收援款 380 万美元，引进了 3 个厂家的 8 台大型风电机组，装机容量增加了 4050kW，其中 2 台 Tacke 600kW 机组 1996 年投运时为全国单机容量之冠，3 台 Jacbos 500kW 机组项目为大陆与澳门合作风电项目。“黄金计划”项目的实施，不仅扩大了达坂城风电一场规模，也引进了国外多个风电机组制造厂家在当时仍属世界先进水平的不同技术，为进行大型风电机组国产化研制奠定了技术和思想条件。这是达坂城风区创造的第三个全国之最。

1997 年至 2000 年初，新疆金风科技股份有限公司与新疆风能公司、新疆风能研究所共同承担了国家“九五”重点科技攻关项目——600kW 国产风力发电机组的研制。他们在引进消化吸收国外先进技术的基础上，进行了机制创新、技术创新和管理创新，经过 3 年奋战，他们陆续研制成功国产化率分别为 33%、54%、78%、96% 的 10 台 600kW 风电机组，在达坂城风电一场先后投运，圆满完成攻关任务，1999 年 12 月该成果

顺利通过科技部与自治区科委联合组织的成果验收及鉴定。该成果在总体设计改进、国产电控系统、发电机、齿轮箱设计研制等方面有技术创新和自主知识产权，被评为 2000 年度自治区科技进步一等奖，2002 年度国家科技进步二等奖。与以前的科技攻关成果明显不同的是，600kW 风电机组在成果转化为产品以及生产规模化、市场化方面也取得良好成绩，成为科研面向经济建设主战场、科技成果催生科技企业、形成高科技产品的一个成功典范。达坂城风电一场不仅为前 10 台国产化研制机组提供了试验基地，而且是最初几十台机组的总装场地。当参观者看到风电一场的简易厂房，听到这里是中国首批 600kW 风电机组的诞生地，无不为当年创业者的拼搏奋进精神所折服。当年参与科技攻关以及市场开拓的武钢、郭健、李力、王相明、马鸿兵、蔡晓梅、任生荣、宫靖远、马辉等团队成员，有的仍在金风科技辛勤工作，有的到其他风电专业单位服务，都成长为我国风电战线的骨干力量。科技攻关取得了科研成果与专业人才双丰收的良好效果。这是达坂城风区为发展风电产业创造的第四个全国之最。

在 600kW 风电机组良好销售业绩的鼓舞下，金风科技公司乘胜而进，不断取得新的业绩。从 2000 年开始，连续 9 年实现销售额与利润逐年翻番，销售额从 1200 万元增加到 2009 年的 107 亿元，利润总额从 120 万元增加到 19.9 亿元。2009 年销售风电机组总容量约 273 万 kW，成长为国内风电设备制造龙头企业，创造了科技企业连续高速超常规增长的奇迹。金风科技公司还陆续承担了国家“十五”科技攻关、“十一五”科技支撑、“863”攻关、可再生能源专项等重点科研项目，开发、研制、投产销售了 750kW、1200 kW、1500kW 等新产品，正在开发研制 2500kW、3000kW 新产品，为企业发展储备了后劲。2006 年、2007 年和 2009 年，胡锦涛总书记、温家宝总理先后亲临金风科技视察，传达了党和国家对风电产业发展的亲切关怀与高度重视。2007 年底，金风科技成功在深圳上市，当日股价达 136 元，创深交所历史新纪录。这是达坂城为中国风电产业创造的第五个全国之最。

达坂城风区经过 20 多年的开发，目前已经投运的国内外各类风电机组 300 多台，总容量约 40 万 kW。装机容量在全国虽然不是最大，但品种型号很多，从最小、最早的 20kW、30kW 机组，到 55kW、150kW、250kW、300kW、450kW、500kW、600kW、660kW、750kW、1200kW 和 1500kW，直到 2009 年底投运的、单机容量最大的 3000kW 机组，涉及制造厂家 10 多个，构成了一个足以反映中国与世界风电发展历史的风机博物馆。

达坂城风区发展前景广阔

达坂城这块风能富矿、风电胜地，究竟能建设多大容量的风电场，归根结底是由其风能资源的蕴藏量所决定的。对达坂城的可利用风能资源数量，经历了较长的认识过程。

在上世纪 80 年代，在达坂城风电刚开始起步时，达坂城风区规划可建设 5 个风电场，总装机容量为 100 万 kW，这已超过了当时新疆电网水火电总装机容量，曾被认为是非常宏伟的发展目标。

上世纪 90 年代，在气象学者提出的新疆 9 大风区风能资源数据中，达坂城风区的可利用风能为 7.5TW·h，即 75 亿 kW·h，相应可装机容量为 300 万 kW。

2005 年，新疆气象部门完成了《新疆风能资源评价报告》，其中达坂城风区可利用风能资源为 412 万 kW。

数据的变化反映了认识的深化。然而这些数据是否真的反映了达坂城风能资源的真实情况？达坂城风能资源的实际可开发量究竟是多少？能够安装多少风电机组？这是风电人不能不关心的问题。为了弄清楚这个基础性、根本性的问题，新疆风能公司的科技人员花费了近 3 年的时间，在达坂城风区已经建立的 10 座测风塔及相对完整的测风数据的基础上，利用自己独创的风能资源工程性普查新方法，对达坂城风区可开发风能资源进行了普查，取得了崭新的、大大超出了原有数据的、能够用于指导规划与风电工程实践的新成果。

在创新理论与方法的指导下，他们获取了以下主要成果：达坂城风区按照同时符合 50m 高度风功率密度大于 300W/m^2；地形坡度小于 15° 两个条件，即可以建设风电场的工程条件进行筛选，地域面积为 2118km^2，其中不能用于风电场建设的各类地块（如居民区、农林地、交通设施附近、湿地、军事设施等）面积为 403km^2，可用于安装风电机组的地域面积为 1715km^2，考虑留有余地，乘以 0.9 系数后，可安装风电机组的净面积为 1545km^2。如按照目前国内风电场通常采用的，以叶轮直径的 8 倍为机组纵向间距，叶轮直径的 4 倍为机组横向间距的常规布置方式计算，可安装风电机组 1545 万 kW。达坂城风区的

主导风向比较固定，多为沿谷地纵向的西北或者东南风，在这种条件下，如果按在美国等地已经广泛采用的加密布置，即以叶轮直径 8 倍为纵向间距，2 倍为横向间距计算，可安装风力发电机组 3090 万 kW。这比起以前得出的 100 万 kW、300 万 kW，以至于 2005 年《新疆风能资源评价报告》中所列的 412 万 kW 都是巨大的突破。新成果有别于以往各种风能资源普查数据的一个突出特点是把风能资源从空中落实到了地面，1545 万 kW 装机的位置已经准确地标注在相应比例尺的地形图上，可以直接指导风电场宏观选址。在这一成果的支持下，新疆发改委组织编制了达坂城地区千万千瓦级风电基地建设规划，提出到 2015 年，该区装机达到 400 万 kW，到 2020 年，达到 1100 万 kW，实现千万千瓦级风电基地建设目标。规划根据现已掌握的风能资源情况，将达坂城分为 7 个块区，可以依次进行有序开发。其中风能资源较好的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区可首先进行开发。现在可以肯定地说，达坂城建设千万千瓦级风电基地，在风能资源条件方面不存在任何制约因素。

达坂城区除了风能资源十分丰富外，其他风电场建设条件也很好。这里风能品质优良，风频分布有利于发电，特别是没有破坏性风速，多年实测最大风速仅为 40m/s；经过 20 多年的运行实践检验，风电设备利用小时数在全国居于前列；风区地形平坦，地质条件好，多为荒漠戈壁，人烟稀少，基本没有与农业或生态保护争地的问题，建设条件十分优良；交通非常方便，距首府城市仅 30 分钟车程，这在全世界也极为罕见；风区地处新疆电网负荷中心，位于南北疆以及新疆与西北电网电力输送通道附近，接入电网地理条件较好。这里建设大规模风电场的唯一制约因素就是接入电网与风电电力电量送出问题。这个难题可以也应该与新疆常规能源的送出问题统筹考虑解决。令人高兴的是，新疆电网与西北电网联网，新疆能源送出问题已经被政府有关部门、电网公司所关注，提上了议事日程。

达坂城千万千瓦级风电基地成就再创辉煌之梦

以 2005 年初《中华人民共和国可再生能源法》通过为标志，我国风电产业发展近几年进入了爆发阶段。中国成为风电装机容量世界第一国家的前景，已经不很遥远。

与全国风电爆发式发展的形势相比，曾经创下过辉煌的达坂城风电，由于种种原因（其中包括新疆独立电网容量较小这一主要因素），近几年的发展速度有所放缓。目前装机仅约 50 万 kW，这与全国如火如荼的大发展形势极不协调。新疆风电装机在全国各省区中的排名，从前些年的前一二名在逐年下降到 2006 年的第六名，2008 年更是下降到第八名。

可喜的是，这种情况已经得到国家、地方政府的重视，正在采取措施逐步扭转。国务院在关于加快新疆经济与社会发展的 32 号文件中明确指出，要“在有序开发水电的同时，加快推进风能、太阳能开发利用，扩大达坂城等大型风电基地建设规模，建成我国可再生能源规模化利用示范基地。”这是新疆加快可再生能源发展的根本依据及有力保障，具有极其重要的现实指导意义。

自治区政府、自治区发改委为了贯彻 32 号文件精神，做了大量工作，组织重新编制了新疆风电发展规划，把原规划中到 2010 年、2020 年的风电装机规模 70 万 kW、140 万 kW，大幅度调整为 480 万 kW、2470 万 kW，特别明确了达坂城到 2020 年要建成千万千瓦级风电基地，2010 年风电装机要达到 100 万 kW。

达坂城千万千瓦级风电场建成后，年发电量将达到 275 亿 kW·h，可替代燃煤 1100 万 t，相应减少数目可观的污染物与温室气体排放。除带来巨大的经济与社会效益外，还将对我国风电实现超大规模发展，以可再生能源逐步取代化石能源的进程又一次发挥带头示范作用。在我国建设全面小康社会、走向繁荣昌盛的过程中，达坂城风电必将继续谱写出新的历史辉煌篇章。

积极推动风电发展 是国家电网义不容辞的责任

■国家电网公司 | 舒印彪

按照“建设大基地，融入大电网”的规划布局，2020 年我国风电装机容量有望达到 1.5 亿千瓦，建成七个千万千瓦级风电基地。随着特高压交直流输电技术的成熟、国内风电机组制造能力的提升和并网技术的不断完善，实现风电等可再生能源大规模开发、大范围消纳配置成为可能，我们将迎来风电发展的新阶段。

作为以建设运营电网为主营业务的国有重要骨干企业和能源重要企业，国家电网公司在风电的接网、输送和收购等方面承担着重要的职责。企业的特点和性质决定了国家电网公司必须做好各项工作，既要保证电网安全，又要积极推动风电等可再生能源的发展。

推动风电科学发展是我们共同的责任，需要政府有关部门、电网企业、发电企业、设备制造企业、科研单位等多方共同努力。作为以建设运营电网为主营业务的国有重要骨干企业，国家电网公司将结合风电发展的新形势、新情况，着力抓好四个方面的工作：一是全面做好“十二五”发展规划。要紧密结合经济社会发展规划和能源电力供需形势，积极谋划“十二五”电网发展，要将风电发展规划作为“十二五”发展规划的重点内容予以考虑，深入开展大型能源基地特别是七大风电基地大规模集中送出等重大问题研究，进一步优化调整电网布局，着力解决特高压和配电网“两头薄弱”的问题，统筹考虑配套调峰电源建设，科学制定“十二五”电网发展规划。

目前，国家能源局正在组织开展风电接入电网和市场消纳研究工作，作为此项研究工作的副组长单位，国家电网公司将在国家能源局的领导下，与水规院、电规院、各省发改委等单位密切配合，加强沟通与协作，拓展研究深度，提高研究的科学性和权威性，为我国风电科学发展提供技术支撑。

二是加强并网技术管理的程序化和规范化，建立检测制度。为保证公共电网的安全，风电场必须具备低电压穿越、功率控制、预测预报等基本功能，满足《风电场接入电网技术规定》的要求。在风电工程前期工作阶段，要对风电场提出相关技术要求，对接入系统方案进行审查。对属于百万千瓦级风电基地的项目，要首先开展输电系统规划设计，指导接入系统设计；在风电工程设计招标阶段，应贯彻《风电场典型设计（电气部分）》的要求，推广风电场的标准化、规范化设计；在签订并网协议阶段，要做好并网检测工作，确保技术要求的落实；在并网运行阶段，要加强监测与考核。

要加快研究制定并网检测等配套规定，建立强制性入网认证和并网检测制度。今后，对新投产风电场，要按照《风电场接入电网技术规定》的要求，开展风电机组的入网认证和风电场的并网检测工作，保证入网风电机组的技术性能，提高电网运行的可靠性和安全性。对已投产的风电机组要进行评估，不符合并网技术规定的风电机组，要逐步实施改造。

三是进一步加强调度运行管理。全面落实《风电调度运行管理规范》，优先调度风电。进一步加强风电功率预测工作，有关省网公司要进一步完善预测系统功能，提高预测覆盖面和预测精度，同时督促指导各风电场建立本场风电功率预测系统，要加强风电场发电计划申报和准确度考核工作，在日前调度计划中优先安排风电；加强风电运行控制，强化对风电场涉网继电保护和安全自动装置的协调配合和技术监督，确保电网安全稳定运行；继续深化常规电源（包括供热机组）调峰能力调查分析，科学合理安排电网运行方式，最大限度挖掘系统的调峰潜力；加快建立完善风电场运行监控系统，尽快实现风电场实时运行数据接入相应调度机构，为优先科学调度风电提供基本技术支撑；严格执行电监会《电力二次系统安全防护规定》，防止风电控制系统非法外联，确保电力系统的安全稳定运行。

四是加快电网和抽水蓄能建设，全力做好保障性全额收购工作。加大跨区电网建设力度，加快构建“三华”特高压同步电网，建设锡盟—南京、陕北—长沙、蒙西—潍坊等 1000 千伏特高压输电工程，建设东北与华北直流背靠背扩建以及哈密、酒泉直流外送工程，提高电网大范围资源优化配置的能力。积

极推进智能电网建设，加快抽水蓄能等调峰电源建设，改善电网调峰性能，提高电网接纳风电的能力。

加快风电接入工程建设，确保风电工程按计划并网。对于国家同意开展前期工作的风电项目，要加快电网配套送出工程前期工作，力争与风电项目同步核准；对于已经取得政府核准的风电项目，要加快电网建设，保证配套送出工程和发电项目同步建成投产。

严格执行保障性全额收购政策，及时与发电企业签订购售电合同，在保证电网安全的情况下，金额收购电网覆盖范围内符合并网技术要求的风电上网电量。

促进我国风电科学发展，需要社会各方面的共同努力。

一是将国家电网“十二五”电网规划和七个风电基地输电规划纳入国家能源发展战略和“十二五”电力发展规划。国家电网公司全面开展了“十二五”电网规划编制工作，并在国家能源局的领导下组织开展风电接入电网和市场消纳研究。建议国家将风电发展规划、国家电网“十二五”规划纳入国家能源发展战略和“十二五”电力发展规划，进一步调整电源结构、优化能源输送方式，实现在全国范围内的能源资源优化配置。

二是加强统一规划和项目管理，建立网场协调机制。建议结合我国风电资源开发利用的总体规划，确定“十二五”风电开发总量、布局以及分期建设规模，并严格按照规划方案审批，科学有序地进行风能资源开发和利用。建立风电与电网发展的协调机制，风电场与电网工程同步建设、同步投产；风电场信息通信系统、功率预测预报系统与风电场同步建设、同步投产。

三是进一步完善支持风电发展的配套政策。尽快出台风电保障性全额收购实施细则等配套政策；研究制定风电跨省区消纳的价格机制和辅助服务定价补偿机制，完善风电配套送出输变电工程定价补偿机制和抽水蓄能电站的电价机制；尽快出台风电并网国家或行业技术标准，制定强制性风电入网认证和并网检测制度。

风电的发展事关我国能源战略调整和国家能源安全，事关节能减排目标的实现和经济发展方式的转变，意义重大。在促进风电发展过程中，国家电网承担着重大的责任，肩负着重要的任务。国家电网公司愿意与各方面共同努力，为我国风电的科学发展作出积极的贡献。

（本文整理自国家电网公司副总经理舒印彪在国家电网公司风电发展工作座谈会上的讲话，题目为编者所加。）

FT Technologies公司 · 尚能科技发展有限公司
www.fttech.co.uk · www.se-tech.com.cn

FT702LT 风机控制专用风传感器
采用声共振传感技术
对标准温度与低温下WTG 应用而言均为理想的解决方案

产品特征
- 专为风机控制应用开发
- 获得专利的声共振技术（欧洲专利号：NO.EPO 801 311 A1）
- 固态设计，无任何运动部件
- 集风速与风向测量于一体
- 设计坚固耐用，重量轻
- 功率强大的99W加热器，适用于易结冰地区
- 适用于陆地与海上安装
- 在风机上的安装和对准极为简便
- RS 485 或 4-20mA 接口选项
- 额定保护等级 IP67
- 经 HALT 试验，可靠性更高
- 根据 ISO9001标准设计制造

防冰冻 防雷击 防沙尘 防盐蚀

自2009年1月起，我们为中国地区用户提供风场内替换原有传统风速风向仪的服务！

联系方式 总部地址：辽宁省大连市高新技术产业园区黄浦路541号网络产业大厦 1802室
邮编：116023
电话：86-411-39735098 传真：86-411-39735099
网址：www.se-tech.com.cn 邮件：sales@se-tech.com.cn

美国小型风电产业的发展及其激励政策分析

■华北电力大学经济与管理学院 | 张素芳

美国是小型风电产业的大国。尤其是近5年，美国小型风电产业发展迅猛，在世界市场独占鳌头。据美国风能协会发布的《Small Wind Turbine Global Market:2009》(《2009年小型风电机组全球市场研究》)，2008年美国小型风电新增装机容量达17.3MW，累计达80MW，美国市场新增装机容量、销售台数及销售额分别占全球市场的44.7%、55.26%和49.36%。

我国小型风电产业也具有较强的竞争力，是我国具有自主知识产权、并与国外技术没有太大差距的产业之一，在我国的应用范围也十分广阔。但是，目前小型风电在我国能源结构中所占比例极小，2008年仅占我国总装机容量的0.0126%。

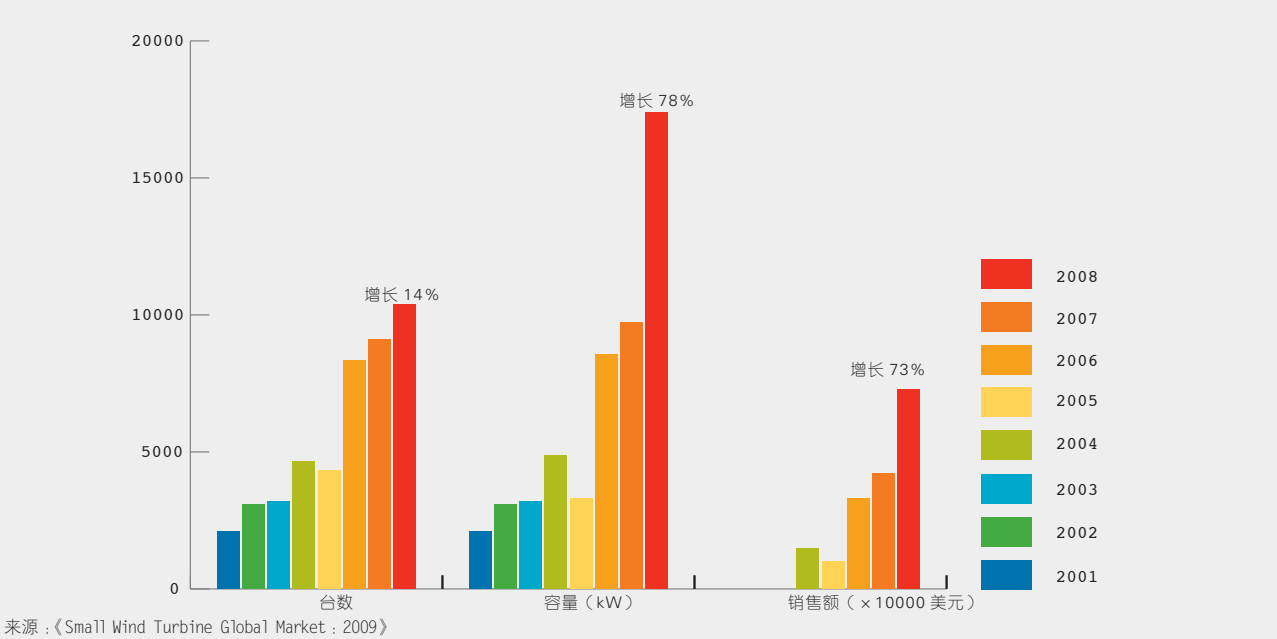
大力发展小风电产业对于保护生态环境、改善能源结构、帮助农民脱贫致富以及拉动内需等都有重要意义。近期，国家有关部门开始关注小型风电产业，着手调研小型风电产业发展现状，并已将小型风电产业列入国家新能源发展规划。研究美国小型风电产业发展经验，可为我国小型风电产业的快速、健康发展提供有益的借鉴。

一、美国小型风电产业发展情况

（一）发展历史

美国现代小型风电产业源于20世纪70年代的能源危机，此次能源危机导致美国电价大涨。为了应对危机，美国联邦政府和州政府采取了许多激励小型风电产业发展的政策。在这些政策激励下，美国小型风电产业的发展于1983年达到顶峰。之后，能源价格下跌，联邦能源免税政策到期，各州激励政策也渐渐减少。20世纪80年代中期，联邦政府免税政策不再适用于小型风电机组，导致小型风电产业的急剧萎缩。1986年，美国只有一些偏远地区使用小型风电，且均为离网型的。由于国内市场较小，美国小型风电机组制造商加大了在海外市场销售的力度。但是，自1999年以来，电价开始上涨，且能源供应安全及全球变暖问题受到日益关注，美国政府又开始实施小型风电产业发展的激励政策。

近年，美国政府更加重视小型风电在其能源结构中的重要地位和作用，认为应增加小型风电在美国能源结构中的比例。原因在于：第一，小型风电具有增加能源供应的潜力。据预测，2020年美国小型风电可占美国能源消费的3%；第二，小型风电技术是美国本土技术。尽管其他可再生能源技术被外国公司垄断，但美国小型风电技术在全球居领先地位；第三，小型风电产业能带动包括钢铁、电力等相关产业的发展；第四，小型风电不会污染环境；第五，小型风电有助于满足国家能源多样化和能源安全的需要；第六，美国绝大多数民众支持可再生能源的发展，并希望有更多的能源选择。



来源：《Small Wind Turbine Global Market：2009》

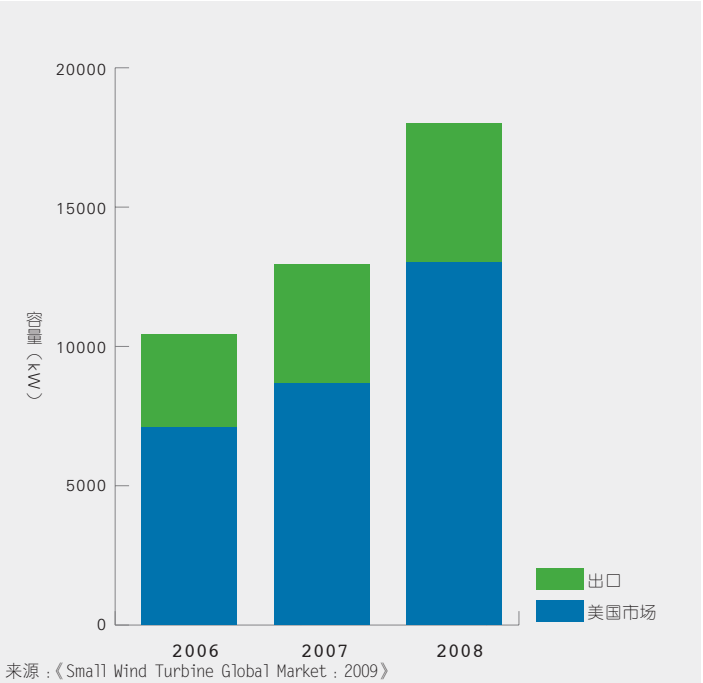
图1　2001年-2008年美国小型风电市场增长情况

（二）发展现状

据美国风能协会《2009 年小型风电机组全球市场研究》，自 2001 年以来，美国小型风电市场发展呈现逐年增长的趋势。2008 年，小型风电机组销售台数和容量分别增长了 14% 和 78%，销售额增长率也高达 73%（见图 1）。

风电产业的快速发展增加了对零部件的需求。自 2007 年以来，新建、扩建或宣布将建的零部件制造厂达 70 家，全球约有一半零部件在美国生产。目前，风电产业从业人员总数超过 85000 名，小型风电机组出口量也在逐年增加（见图 2），风电产业成为就业的发动机，也成为美国经济的一个亮点。

美国生产的小型风电机组分为离网型和并网型。0kW-0.9kW 为离网型，1kW-10kW 兼有离网型和并网型，11kW-100kW 均为并网型。无论是离网型还是并网型，按销售台数计算，美国小型风电机组在世界市场所占份额均超过 50%；按容量计算，所占份额均在 50% 左右（见表 1 和表 2）。



来源：《Small Wind Turbine Global Market：2009》

图2　2006年-2008年美国小型风电机组出口情况

表 1　2008 年美国各类小型风电机组销售量

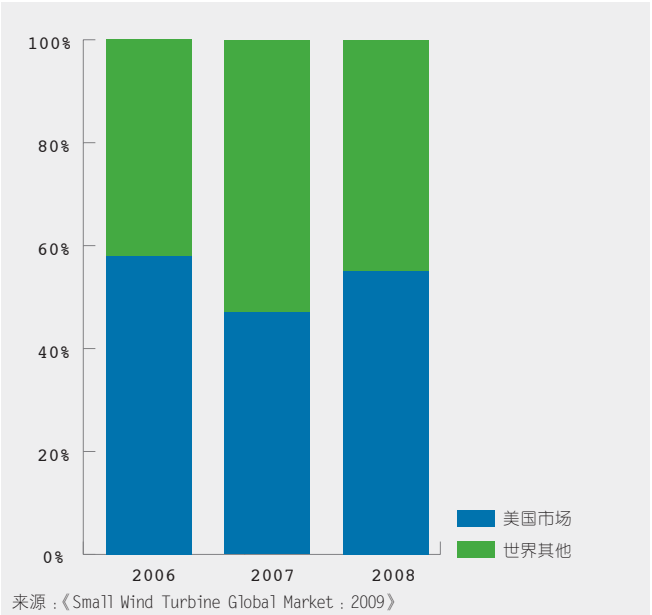
容量（kW）	0-0.9		1-10		11-20		21-100		合计	
单　位	kW	台	kW	台	kW	台	kW	台	kW	台
离网型	2784	6706	980	696	0	0	0	0	3764	7402
并网型	0	0	6619	2825	1331	72	5660	87	13610	2984
合　计	2784	6706	5799	3521	1331	72	5660	87	17374	10386

来源：《Small Wind Turbine Global Market：2009》

表 2　2008 年全球小型风电机组市场总体情况及美国份额

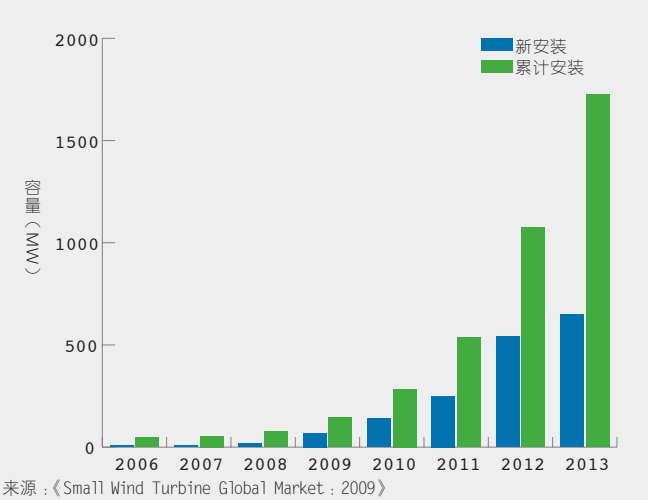
类型	全球合计	单位	美国份额（%）
离网型	13902	台	53.24
	7536	kW	49.95
并网型	4992	台	59.78
	26065	kW	52.22

来源：《Small Wind Turbine Global Market：2009》



来源：《Small Wind Turbine Global Market：2009》

图3　2006年-2008年美国小型风电产业在全球的份额



来源：《Small Wind Turbine Global Market：2009》

图4　美国小型风电市场预测

（三）发展趋势

2008 年 10 月，美国通过了新的 8 年期联邦投资免税方案。对小型风电业主而言，最直接的好处就是从 2008 年 10 月 3 日至 2016 年 12 月 31 日，拥有小于 100kW（含 100kW）的小型风电机组业主能享受占装机总成本 30% 的退税，并且退税不封顶。小型风电产业已获得与其竞争对手——光伏发电产业几乎相同的联邦政策激励，处于平等竞争地位。因此，尽管遭遇全球经济衰退，预计美国小型风电累积装机容量将在 2013 年达到 1700MW。美国风电市场一直以并网型机组为主，且随着机组成本的降低，并网型机组今后仍将主导市场。预计到 2020 年，小型风电累积装机容量将达 50GW，约占美国电力供应量的 3%。

二、美国小型风电产业激励政策分析

政策激励是美国小型风电产业发展的驱动力，包括联邦及州政府政策激励。这些政策可分为四类：一是经济激励，包括提供初始投资激励、减免财产税或销售税、提供低息贷款等；二是强制性法令，包括实行可再生能源配额制、制定分布式发电上网电价及实施年度净值计量制等；三是市场开拓与推广，包括设立可再生能源公共利益基金、支持公用事业单位的绿色定价项目、在政府资产上安装小型风电机组以及启动公共教育及延伸项目等；四是创造良好的市场环境，包括支持小型风电机组测试及认证，保证所有小型可再生能源技术平等发展以及并网规则标准化等。

（一）经济激励：主要针对消费者

1. 初始投资激励：使消费者买得起风电系统

由于小型风电机组价格昂贵，许多美国家庭无法承受。例如，一套足够一个家庭使用的小型机组初始成本高达 7 万美元。为了使美国普通家庭能负担起这笔费用，联邦及州政府采取了一系列激励措施。联邦政府对小型风电机组免征 30% 的装机税，而且对 2008 年 12 月 31 日之后服役

的小型风电机组无最高限额。马萨诸塞州、俄勒冈州和亚利桑那州等都制定了各自的激励政策。例如，马萨诸塞州对装机容量达 99kW 的微型风电机组的装机费用给予折扣。

2. 减免财产税或销售税：缩短小型风电机组的投资偿还期

这种激励政策使小型风电更加经济，可为家庭或企业资产带来可见价值。通过对新增的小型风电机组减免财产税，安装小型风电机组对消费者来说就更具可行性。美国已有 16 个州实施了这项政策。

3. 向消费者提供低息贷款：为可再生能源设备提供低成本融资

私人银行对类似小风电这样的可再生能源技术的贷款成本要求很可能比大风电更高，也更严格。然而，美国州政府为可再生能源项目提供了低息贷款以支持这些项目的发展。贷款可直接通过州某个机构办理，或者由州政府机构与私营贷款机构，地方政府或电力部门一起做出安排。直接贷款项目可采用经济发展债券、政府和公用事业债券、社区发展债券及绿色债券等多种形式。

（二）强制性法令

1. 实行可再生能源配额制：要求电力公司使用一定比例的可再生能源发电

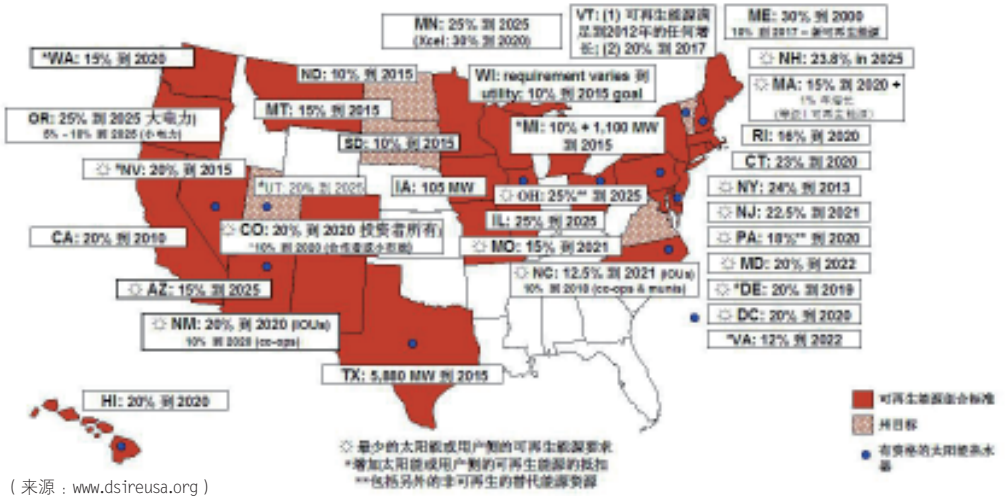
可再生能源配额制是指政府向电力公司提出可再生能源发电比例的强制性要求，电力公司通过使用可再生能源发电或购买可交易的可再生能源信用额(有时称为“绿色标签”)完成其法定义务。1997 年，马萨诸塞州开始实行可再生能源配额制政策。目前，美国已有 22 个州和哥伦比亚特区实施了这项政策（见图 5）。例如，加利福尼亚州 2006 年的配额标准要求可再生能源比例达到 12%，每年逐步提高比例，2010 年达到 20%。2006 年，美国可再生能源理事会提出了将可再生能源的比例由当时的 4% 提高到 2025 年的 25% 的发展目标。可再生能源配额制政策有力地促进了风电装机容量的增长。

2. 制定分布式发电上网电价：制定一个可再生能源上网电价，由电力部门对小型风电机组机主及其他可再生能源生产商所发的多余电量给予补偿

制定可再生能源上网电价与可再生能源配额制相似，不同的是它不要求电力部门使用一定量的可再生能源发电，而是设定一个电力部门从可再生能源发电商购买剩余电量的价格。这样，能源的供应和需求就可由自然的市场力量进行相应的调节。此外，由于该政策是基于发电量，而不是像前期投资折扣及免税那样基于机组功率，因此它是对小型风电机组性能给予的补偿。上网电价通过联网协定标准化，着眼于让小系统平等进入配电网，同时简化了协定谈判，为小型风电机组（及其他技术）和电力公司节约了交易成本，也为发电商提供了同等待遇，保证了联网系统安全、可靠地运营。

3. 实施年度净值计量制：消费者生产但没有消费的电力可从电力部门获得公平的信用额

净值计量（净能源计价）制是一种电价结算政策，要求电力部门以一定价格从安装了可再生能源发电技术的用户买回多余电力，或者从消费者总账单上扣除可再生能源发电数量。净值计量

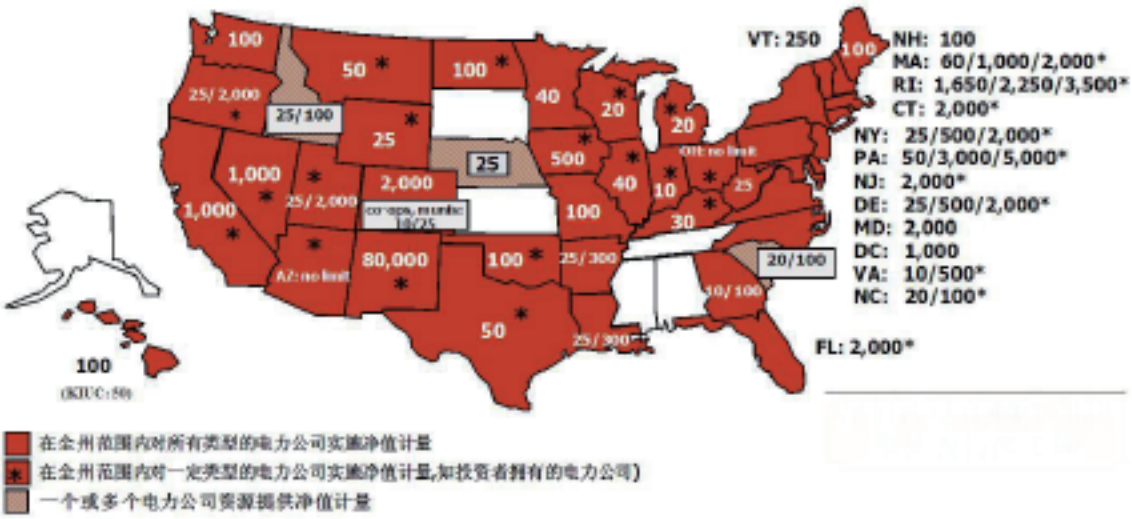


（来源：www.dsireusa.org）

图5　已实施可再生能源配额制的州及华盛顿特区

政策已在美国 44 个州和华盛顿特区实施（见图 6）。各州对系统规模有不同的限制，主要根据用户类型、采用的技术和应用而有所不同。

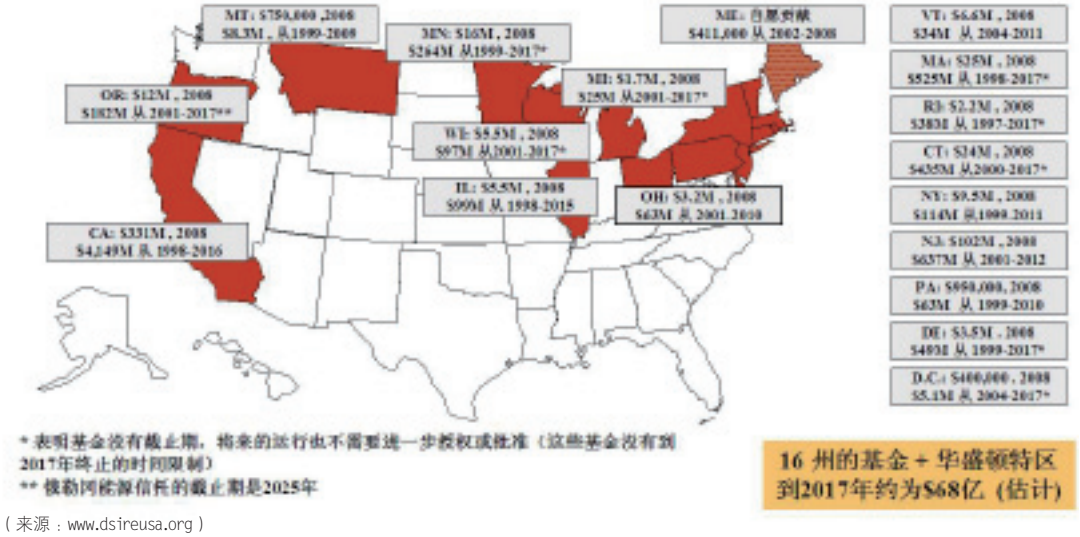
例如，如果某个家庭联网小型风电机组所发电量超过了该家庭的消费量，那么多余电量便可送回到配电网，供其他人使用。按照净值计量政策，这些多余的电力可使机主家的电表回转到显示“负”的用电量并有效地积存多余电力。净值计量使顾客在电费计费期末可以得到“信用额”，最好在一年（也就是年度化的）时间内的净消费或净发电量。由于单一计量表既计量流入，也计量流出量，所以客户的多余电量可自动按照零售电价从电力部门得到补偿。当净值计量政策为“年度化”时，用户净电力消费或生产便按跨度为整一年，而不是按一个较短时间段的平均数计算，由此减少了电力部门的行政成本，也使机主因用电和发电季节性变动而得到报偿。



说明:数表明对系统规模的限制(kW)。各州的限制根据用户类型、采用的技术和应用有所不同。上面中一个州有多个数字的就是这种情况。

（来源：www.dsireusa.org）

图6　已实施净值计量的州及华盛顿特区



（来源：www.dsireusa.org）

图7　已设立可再生能源公共基金的州及华盛顿特区

（三）市场开拓与推广

1. 设立可再生能源公共利益基金：保证风电投资能够盈利

由于风电财务成本高于传统电力财务成本，同时作为一种新兴产业，风电开发具有较高的风险，各州采取了一些激励措施以保证风电投资能够盈利，许多州还设立了可再生能源公共基金。估计到 2017 年，美国 16 个州以及华盛顿特区的可再生能源公共基金约为 68 亿美元（见图 7）。

2. 支持电力部门的绿色定价项目：可再生能源的消费者通过支付附加电费来支持可再生能源发展

支持电力部门的绿色定价项目为人们提供了另一种支持小型风电发展的方法。绿色定价允许用户通过选择，帮助电力部门更多地投资可再生能源。参与项目的用户多支付一点电费，用以抵消电力部门新增的可再生能源增量成本。美国 28 个州的 750 家电力企业，包括投资人所有的、市政所有的企业都提供绿色电价选择权。

电力部门将绿色能源附加费集中到一个基金中，然后将该基金用于降低新的小规模可再生能源的安装成本。按照这种方法，电力部门可为机主提供初始投资退税，或者向机主溢价支付其发电量。

3. 在政府资产上安装小型风电机组：公共设施可支持可再生能源的公共利益

2005 年美国能源政策法案（第 203 节）规定，联邦政府应购买或使用可再生能源，作为其运营的一部分。美国一些政府部门通过在公共建筑物上使用小型风电，树立了学习榜样，并为风能技术创造了巨大市场。此外，政府官员通过选择、购买及安装小型风电机组，也亲历了地方许可程序，更好地了解了许多繁琐的规划及许可规则，并最终使这些规划及许可规则得到改善。

4. 启动公共教育及延伸项目：让公众知道小型风电是一种可选能源

准确、广泛的信息对于小型风电产业的成功非常关键。为了使公众更多地了解小型风电知识，美国将小风电纳入由公共基金资助的能源促销项目之中，向企业宣传清洁能源发电在节约企业成本及“风险规避”方面的潜力，宣传激励小型风电发展的项目信息及其他相关政策，并普及小型风电机组的基础知识。

（四）创造良好的市场环境

1. 支持小型风电机组检测及认证：通过帮助产业而帮助自己

支持小型风电机组检测及认证可加强小型风电产业的可靠性，并帮助消费者选择风电机组。自 2009 年起，小型风电机组可由美国小型风电认证理事会（SWCC）进行安全性、性能、可靠性以及声音标准的认证。这个项目是为了帮助消费者更专业地购买风电机组，同时强化行业实力。但是，检测和认证过程可能会花一年甚至更长时间。美国政府认为，向小型风电认证理事会提供管理成本支持可以有效的帮助该项目更好地为消费者、产业以及向消费者和产业提供激励的政府服务。

2. 保证对所有小型可再生能源技术一视同仁：让市场来决定

保证对所有小型可再生能源技术一视同仁，可促进消费者的自行选择以及市场的公平竞争。小型风电产业的确小，可能会被其市场竞争对手尤其是太阳能光伏发电的光芒所遮蔽。这两种技术分享着几乎完全等同的市场，往往受益于同一激励政策，如并网规则或净值计量制。按照公共政策平等对待这两种技术，能促进市场竞争并鼓励企业生产更好的产品。

（3）并网规则标准化：使小型风电机组联网程序更透明、更可预测且更为简化

并网规则标准化可以不断避免程序重复，减少交易成本，并保证技术之间享受平等待遇。电机系统是小型风电机组市场的主体，这些系统可与电网相联，而不使用电池或其他储电设备。通过与电网相联，小型风电机组所发电量可超过机主所需电量并将多余电量通过电网供给邻居使用。在风力不大而用电量大时，电网可向机主正常供电。

四、结语

美国小型风电产业的迅猛发展受益于广泛而有效的激励政策，这些激励政策既有针对所有可再生能源的，也有专门针对小型风电产业的。虽然其中一些政策在我国已经采用，但是在我国几乎还没有一项政策是落实到小型风电产业的。

如何借鉴美国小型风电发展经验，大力发展中国的小型风电产业，是今后需要进一步思考的问题。

平坦地形及复杂环境风电场数值模拟计算

■金风科技集团北京天润新能投资有限公司 | 朱明亮

在实际风电场的开发中，由于各种地形地貌条件及气象条件的影响，给当地的风能资源评估带来相应的困难，应针对具体环境条件采取不同的粗糙度设置以及热稳定度调整进行风能资源模拟计算，以期达到更好效果。以往线性模型软件如 WAsP 或者基于 WAsP 计算内核的 windpro 等无法对热稳定度直接进行调整，这些软件都是默认中性稳定性，这就造成模拟计算的前提条件就与风电场实际情况不符，造成风流场模拟计算的误差。如 WAsP 等线性软件本身采用 Weibull 拟合进行计算，不能以真实风流时间序列数据直接进行计算分析，同时也不能输出模拟计算之后的风流时间序列值以方便比较，即使在平坦地形上进行风能资源评估可能也会带来较大的不确定性。本研究选择基于计算流体力学技术的 Meteodyn WT 软件对中国黑龙江省某平坦地区风电场进行分析，该区域含有大面积水域，并且冬夏季节温度及附近地表粗糙度变化显著，导致风电场环境较为复杂，通过在 WT 软件中载入不同季节粗糙度文件与不同季节风流数据以及对热稳定度进行调整，可以准确模拟来自湖面方向扇区的风加速效应以及测风塔实际测量风廓线与模拟计算风廓线的吻合，这为准确客观计算风电场风能资源奠定坚实基础。

1 研究方法及过程

为更好地实现研究目的，首先对该区域按照冬夏季进行不同的粗糙度设置，计算拟分不同季节月份、角度进行。在不知道当地热稳定度的情况下，第一次模拟计算将默认该区域为中性稳定度，然后比较模拟计算生成的风廓线与测风塔实际测量值的差异；第二次模拟计算将大气热稳定度默认为等级 9，即非常稳定状态，看其模拟计算的风廓线与实际值的差异，从而更加深刻的了解热稳定度以及不同季节粗糙度文件对模拟计算的影响；第三次，将在前两次模拟计算的基础上，根据前两次计算的差异以及各个扇区计算值与实际值的比较，对热稳定度再次调整，以求最好的模拟计算结果。

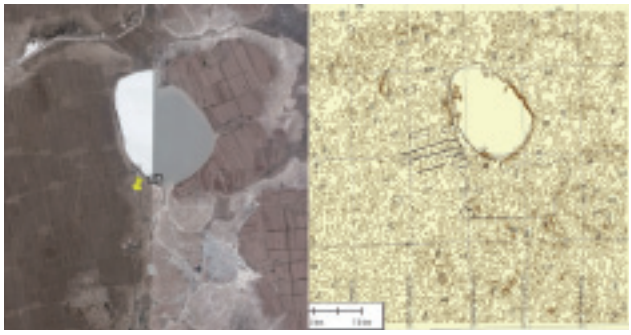


图1 Google earth中该案例项目的卫星图片及地形数据

2 风电场环境及数据描述

2.1 测风塔环境及地形介绍

该研究项目只有一个测风塔，测风塔在5个不同高度(90m、70m、50m、30m、10m) 安装了风速仪。在该测风塔西北面为村庄，距离该测风塔约为 170m；在该测风塔的东北方向为一大片水域 (水域面积为 4km × 2.7km=10.8km^2)，测风塔距其最短直线距离为 740m；在该测风塔的东南边有一小工厂，该厂区距离测风塔 840m 左右；在测风塔正南方向有一中等规模厂区，距离约为 1500m；在测风塔东边属于盐碱地地貌，在测风塔西边为庄稼。由于考察是在冬天，庄稼已经收割完毕，在该案例项目中，我们将根据正常玉米种植情况，来设置该区域夏天的粗糙度值。

该研究案例采用的地形数据来自于美国 SRTM 数据库，地形数据分辨率为 90m，采用高斯 6 度带，北京 1954 坐标系。该区域最高海拔为 155m，最低海拔为 131m，如图 1 所示。

2.2 测风塔风流数据基本分析

测风塔搜集 8 个月的数据，从 2008 年 7 月至 2009 年 2 月，总共有 29820 个数据样本。根据当地气候特点，在该研究项目中我们将 7 月至 10 月为夏季，样本数量为 15270 个，采用夏季粗糙度地图；而 11 月至第二年 2 月作为冬季，样本数量为 14550 个，采用冬季粗糙度地图。现将该测风塔风流数据情况按照冬夏季分别列示如下 (见图 2)，可以看出，该区域风流分布基本上符合 Weibull 分布，无特异情况，夏季 90m 处最高风速在 6.5m/s 左右，冬季 90m 处最高风速在 5.9m/s 左右。

表 1 大气热稳定度表

热稳定度等级	Monin-Obukhov 长度	热稳定度层级描述
0	-80	极不稳定
1	-500	不稳定
2	10000	中性
3	1500	稳定
4	800	…
5	500	…
6	300	…
7	200	…
8	130	…
9	60	非常稳定

2.3 粗糙度值设置情况

由于东北地区特殊气候情况，在该研究案例中分为冬季与夏季进行粗糙度设置。冬季庄稼收割完毕，地表粗糙度发生显著变化，同时由于附近有大面积水域，在冬季将结冰，也将导致粗糙度不同程度的变化，下面两图（见图 3）是在 WT 软件中不同粗糙度的设置情况，红点表示测风塔的位置。

3 Meteodyn WT软件计算参数描述

3.1 项目参数定义及定向计算参数

计算区域半径	4471m		
垂直廓线	Zmin=10m	Zmax=100m	步长=10m
绘图区域步长	步长=100m		
计算最小水平分辨率	50m		
计算最小垂直分辨率	4m		
水平扩展系数	1.1		
最大迭代次数	25		
垂直参数	0.7		

3.2 模拟计算方向扇区的设置

由于测风塔东北面为大面积水域，为进行更好的模拟计算，我们将 0°-90° 区域，照每 20° 一个区间进行定向模拟计算，而从 110°-0°，按照每 30° 一个区间进行定向模拟计算，在每一个区间，根据不同情况，可以设定不同的热稳定度，以此达到更好的模拟效果。

3.3 热稳定度的设定

大气稳定度对风速廓线有影响，在该研究项目中，在不同季节将采用不同等级的热稳定度进行计算，并且在同一季节的不同方向可能也将根据实际情况进行不同热稳定度等级的设置。在 WT 软件中，允许用户设置 10 个不同的热稳定度等级，在软件中所定义的每一个热稳定度等级都对应于一个给定的 Monin-Obukhov 长度，它是大气运动所引起的剪切力与热浮力之比。如表 1 所示。

在平坦地面上不同热稳定度状态下对应的风廓线形状显示如图 4。

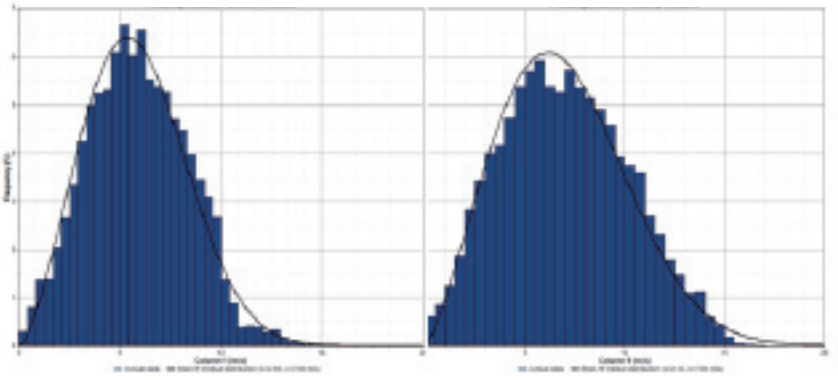


图2　夏冬季测风塔90m处风流数据的Weibull拟合曲线

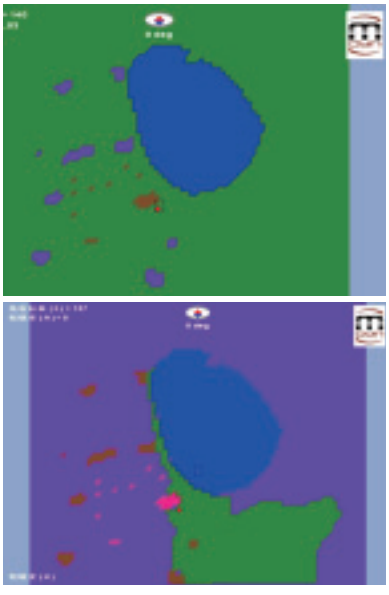


图3 冬夏季风电场区不同粗糙度值在WT软件中的显示

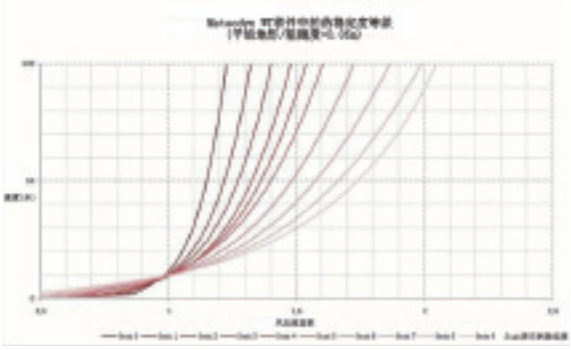


图4　WT软件中不同热稳定度等级情况下的风廓线示例

4 模拟计算

4.1 第一次计算

按照夏冬季的区分，采用不同的粗糙度地图，热稳定度设置为中性稳定性，即在 WT 软件中热稳定度等级为 2，表 2 列示了计算属性，并通过定向模拟计算结果查看来自湖面的风加速效应。

表 2 定向计算参数（夏冬季）及属性

计算方向	网格数量	热稳定度	收敛率	计算时间
10	1095255	2	100%	4min46s
30	1351210	2	100%	7min08s
50	1386000	2	100%	7min39s
70	242920	2	100%	7min26s
90	916300	2	100%	4min44s
110	1242920	2	100%	5min45s
140	1392930	2	100%	9min58s
170	1101240	2	100%	5min04s
200	1242920	2	100%	5min39s
230	1392930	2	100%	6min02s
260	1101240	2	100%	5min05s
290	1242920	2	100%	5min41s
320	1386000	2	100%	7min49s
350	1095255	2	100%	4min24s

通过上面的 50° 定向模拟计算，模拟风是从 50° 方向扇区吹来，即从湖面吹来，可以看出夏天在湖面所产生的加速效应显著，在该计算中夏季湖面粗糙度设置为 0.0001；同时也可以发现冬季风加速效应减低，由于湖水结冰，并且上面覆盖积雪，其粗糙度变化升高。WT 软件可以准确模拟实际情况发生的变化，同时也说明在东北地区，按照不同季节设置不同的粗糙度，可以更好地模拟实际风流情况。

图 6 给出了 WT 软件在中性热稳定度条件下综合所有方向的定向模拟计算结果而得到的测风塔风廓线与实际测量风廓线之间的差异。

通过上面的比对，我们发现并不是中性稳定性适用于所有的风电场环境，即使在平坦地形，如果不分情况而简单地使用中性稳定性也将出现较大误差，尤其是在低风速段，我们应根据不同扇区实际测量结果，选用不同的热稳定度等级，以达到更好的模拟计算结果。

4.2 第二次计算

冬夏季在所有方向热稳定度设置为等级 9，即非常稳定状态。图 7 显示了 50° 定向模拟计算结果，图 8 则给出了 WT 软件在热稳定度等级为 9 的条件下综合所有方向的定向模拟计算结果而得到的测风塔风廓线与实际测量风廓线之间的差异。

通过第二次计算，可以发现风廓线较第一次计算有很大改进，但是在底层的模拟上面仍有一些差异，在下面的第三次计算中，我们将继续调整热稳定度，同时通过不同扇区计算结果与实际测量结果的比对，根据实际情况在不同方向扇区可能也将设置不同热稳定度值。

4.3 第三次计算

基于前面模拟计算结果，我们比对了每一个方向扇区的实际测量值与计算值的差异，根据这些差异，重新对热稳定度进行调整，在第三次计算中，将对夏季各方向的热稳定度等级设置为 6；而冬季在 10°-70° 扇区，我们将设置热稳定度为 7，而在剩余扇区设置热稳定度为 9。图 9 显示了 50° 定向模拟计算结果，图 10 则给出了 WT 软件在热稳定度调整之后，综合所有方向的定向模拟计算结果而得到的测风塔计算风廓线与实际测量风廓线之间的比对。

通过第三次计算的调整，我们可以发现模拟计算的风廓线与实际测量的风廓线最为吻合，也充分说明通过热稳定度的调整，以及在不同季节设定不同的粗糙度值，可以达到更好的模拟效果。

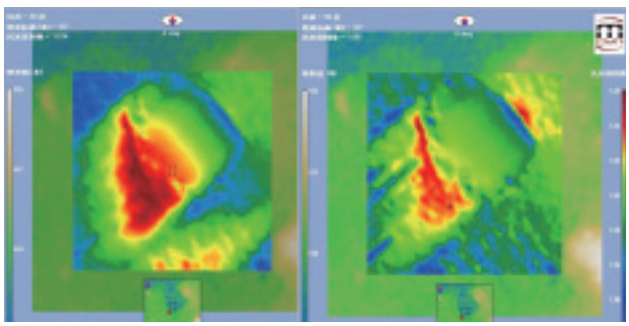


图5 定向计算结果——来自50° 方向扇区风流模拟情况（夏季与冬季）

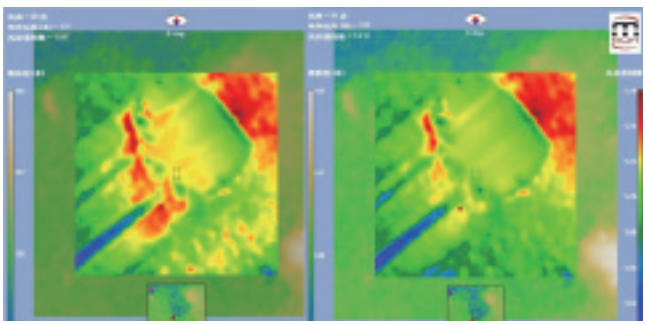


图7　50° 方向模拟计算结果举例（夏季与冬季）

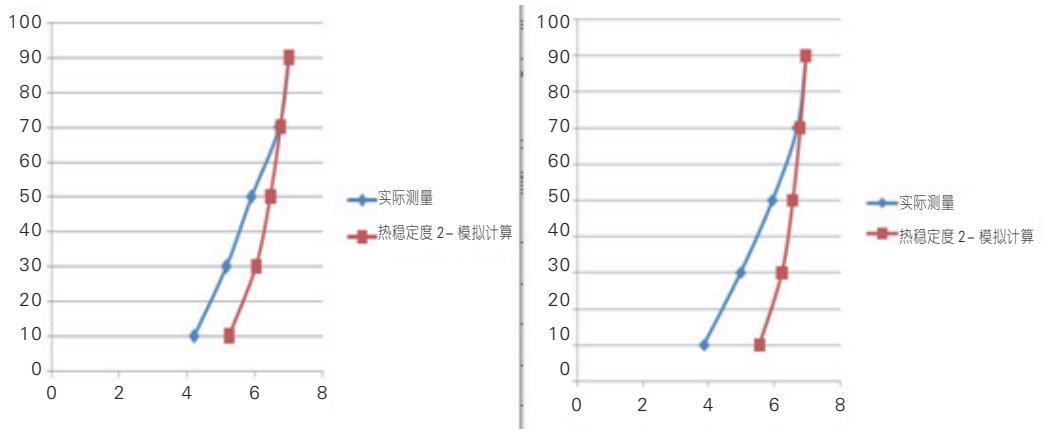


图6 夏季与冬季综合所有方向实际测量值与模拟计算比对图（蓝色为实际测量，红色为模拟计算）

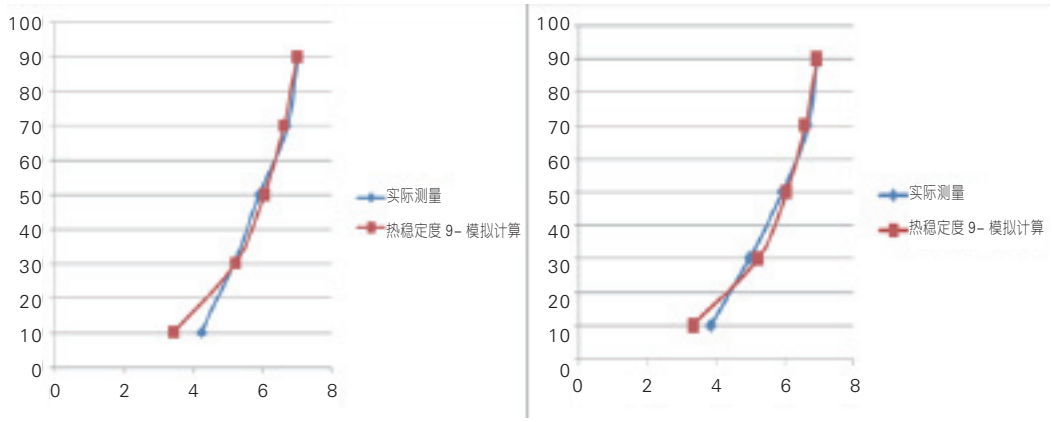


图8 夏季与冬季综合所有方向实际测量值与模拟计算比对图（蓝色为实际测量，红色为模拟计算）

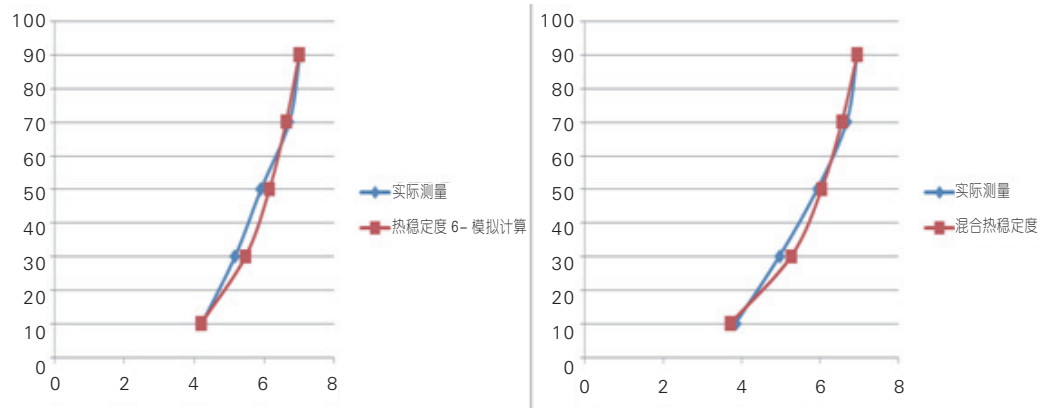


图 10夏季与冬季综合所有方向实际测量值与模拟计算比对图（蓝色为实际测量，红色为模拟计算）

6 结论

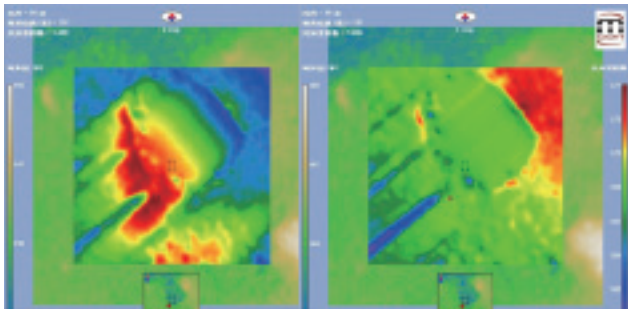


图9 50° 方向模拟计算结果举例（夏季与冬季）

在不同区域、不同气候条件下，应根据实际情况对大气热稳定度进行调整，同时根据实际季节变化情况设置不同的粗糙度，尤其在中国东北开发风电场，虽为平坦地形，但冬夏季气候变化显著，环境较为复杂，以往线性模型软件所带来的限制应值得大家注意，应结合 WT 这样的软件进行综合分析，保证结果的可靠性。同时通过该研究项目，也可以得出在 WT 软件中对相关计算参数的一般调整方法以及过程，以达到更准确的模拟计算结果，为今后项目的风能资源评估奠定基础。在未来研究中，也将尽量选取有多测风塔的案例研究项目，可以通过多测风塔的数据以及相关因素的分析，再进行确认与验证。

双馈发电机柔性联轴器及电机转子偏心联合故障的特征分析

■北京唐智科技发展有限公司｜唐德尧　曾承志

1 双馈发电机与永磁发电机激振力的区别

发电机转子与定子如果存在不同心，则会对转子产生电磁不平衡力；如果转子的机械不平衡则产生机械不平衡力；转子的非恒定刚度则将受上述力作用产生相关的振动。由于永磁发电机总是保障机械转动频率 FN 等于发电频率 FG 的整分数 FG/N，所以机械不平衡力的频率 FN 等于电磁不平衡力频率 FG（发电频率）的整分数 FN=FG/N，N 是磁极的对数。而在双馈发电机中，由于机械轴的转动频率 FN 经常不等于 FG/N，故机械振动力的频率 FJ 也经常不等于 FG/N。必须通过励磁控制保障磁场的旋转频率等于 FG/N 来适应。由于发电频率总是保障等于工业电网频率，因此，双馈发电机的电磁不平衡力的频率是固定的，例如 FG=50Hz。于是，在双馈发电机中存在着不同于永磁发电机的外力机制，即同时存在着频率为 FG 的电磁力和频率 FJ ≠ FG 的机械不平衡力。

姚大坤等（2005）提出了“不平衡磁拉力引起的水轮发电机电磁振动问题”，认为“是转子偏心产生不平衡磁拉力”，而转子偏心是发电机中或大或小都存在的问题，作者通过非线性函数关系（笔者认为：线性关系是各因素的线性叠加关系，而非线性关系则是相关因素的相干关系——乘积关系）研究所得到的结论是“不平衡磁拉力会引起两倍转频的振动”；那里引起振动的机制既不能肯定是电磁力的，也不能肯定是机械不平衡力的，因为两者的频率（对于永磁发电机而言）是相等的，即 FG=FJ；但对于双馈发电机而言，则如上所述，这两者的频率是不同的。

2 双馈发电机中可能存在着的振动因素

（1）转子因为电磁偏心而受到的电磁不平衡力总是指向电磁偏心的方向，这是因为这个方向的转子与定子电磁间隙最小。其最可能方式是：转子与定子机械几何同心（不排除存在质量偏心）而转子电磁因素与定子不同心。但由于转子的机械不平衡力以频率 FJ 旋转，而电磁力以频率 FG 旋转，于是，两者同时作用于轴系时相互干涉，对转子产生的作用合力的频率 F 既不等于 FG，也不等于 FJ，而是两种力作用的乘积的混频。假定两种力的交变幅度都是 1 而频率则分别是 FG 和 FJ，其中 FG=50Hz，而 FJ 随机械的转速变化而变化，下面的仿真试验中选择为 FJ=FN=22Hz，对应转速 1320r/min。总相干振动为 a。

a=sin（2πFJ）[x+sin（2πFG）]

（2）电磁力分为 3 种状态：

转子严重电磁偏心，始终受到强大电磁拉力，仅因电磁力交变而综合呈现为单向脉动力；相干振动的频谱是 FG 与 FJ 的和频与差频以及转子力的频率 FJ。该状况比较多见。

转子较小电磁偏心，始终受到小电磁拉力，并因电磁力交变而综合呈现为偏向交变力；相干振动的频谱是 FG 与 FJ 的和频与差频以及转子力的频率 FJ。该状况十分多见。

转子没有电磁偏心或没有励磁，则没有受到交变电磁力，只有转子不平衡力引起的振动，出现的频谱是 FJ。这种理想状况只有在不励磁、不发电的空转状态下见到。

3 信息发生机制的推理与仿真分析

下面分别是上述 3 种情况的简单仿真分析。

图 1 – 图 2 为电磁不平衡力与转子不平衡力的相干振动分析。电磁不平衡力的频率为 FG；转子不平衡力的频率为 FJ。两者的非线性相干关系以两者的乘积实现。

但是，上述模拟双馈发电机的分析中由于转子不平衡力只有 1 阶频谱 FJ=FN，所以其与电磁力相干振动中都没有出现转

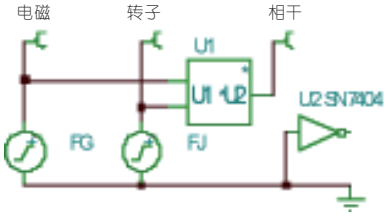


图1 电磁不平衡力FG与转子平衡力FJ的相干

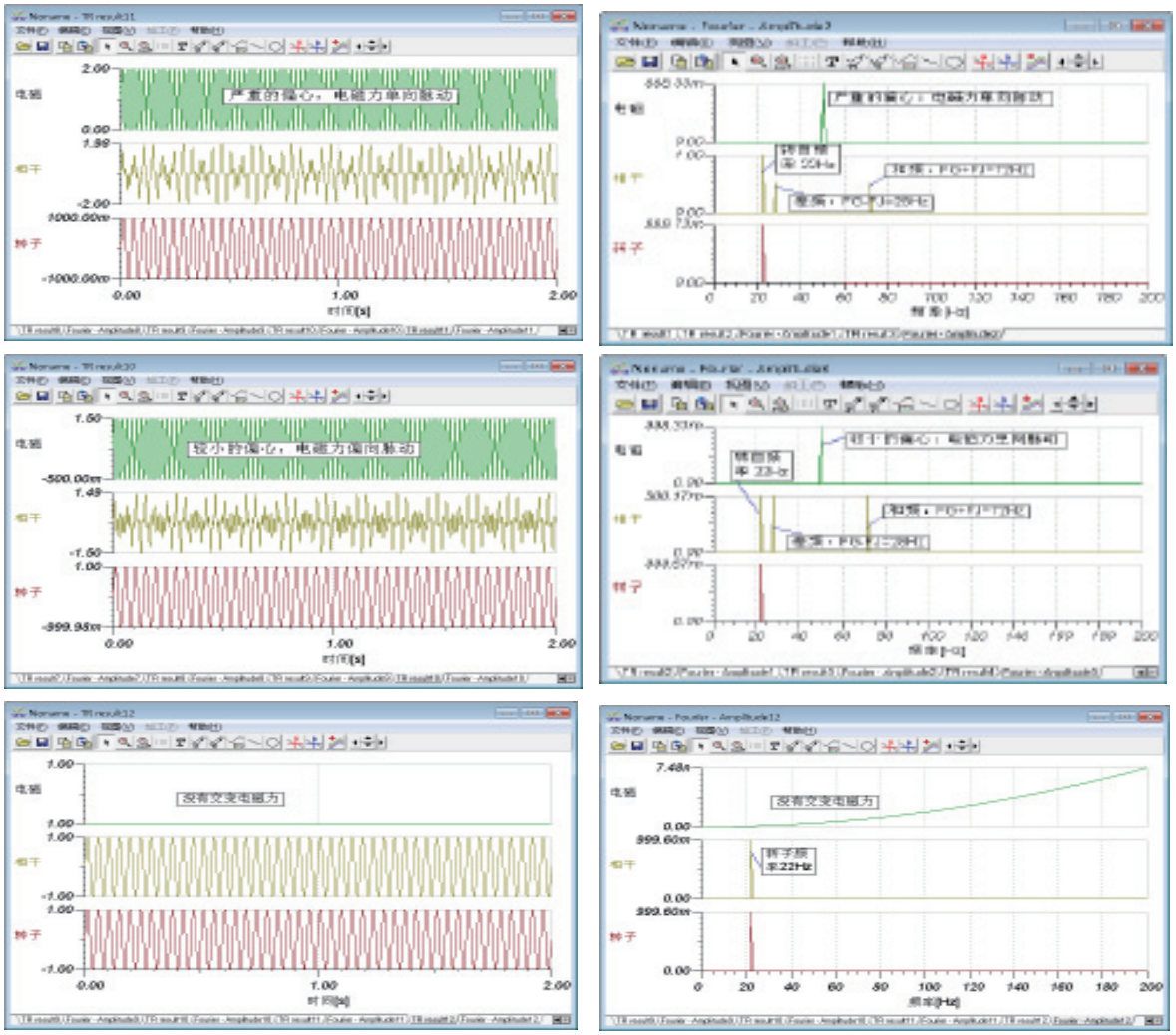


图2 1 电磁不平衡力与转子不平衡力的相干振动分析。电磁不平衡力的频率为FG；转子不平衡力的频率为FJ。两者的非线性相干关系以两者的乘积实现。

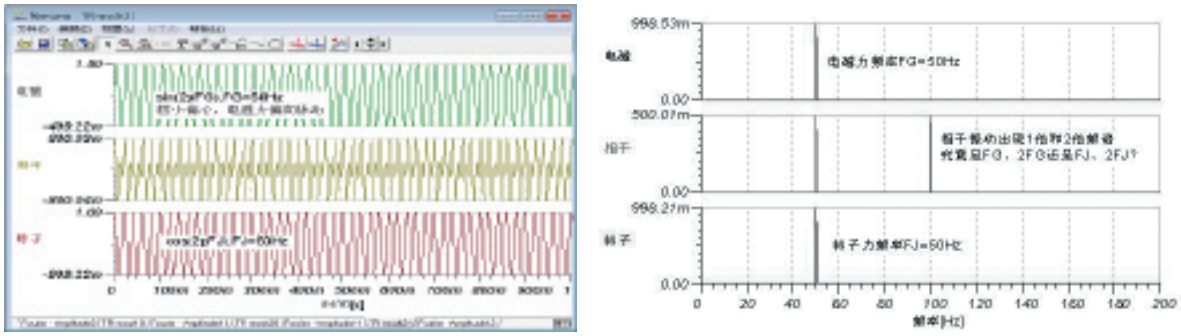


图3 永磁发电机的转子1阶不平衡力和电磁不平衡力引起的2阶振动

子频率 2 倍的频谱 2FN，只有转子频率及其与电磁频率的和频与差频。而图 3 模拟的永磁发电机分析中，则出现转频 FJ=FN(或电磁频率 FG，FG=FJ) 的 1 倍和 2 倍频谱。

我们不再讨论永磁发电机中由电磁力而出现的振动中之 1 倍频和 2 倍频振动是怎样引起的。但是我们要强调：在双馈发电机系统中如果只有转子 1 倍频率 FN 的不平衡因素，就不会出现转频 2 倍的振动频谱。反之，如果转子出现 2 倍转频 2FN 的不平衡因素 FJ=2FN，则一定引起转频 2 倍频的频谱。近似仿真分析如下 (转速频率 FN=22Hz，发电频率 FG=50Hz)：

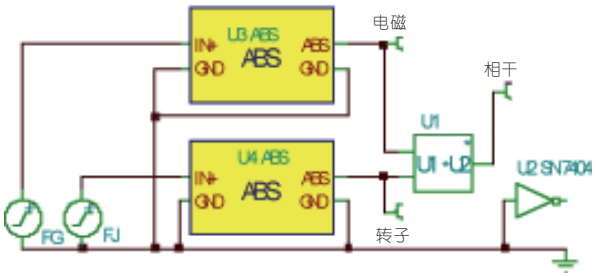


图4 转子不平衡力与电磁不平衡力相干引起的振动仿真分析。其中的绝对值检波器在于把FG、FJ偏心正弦振动调理为FG、FJ的多阶非正弦振动。

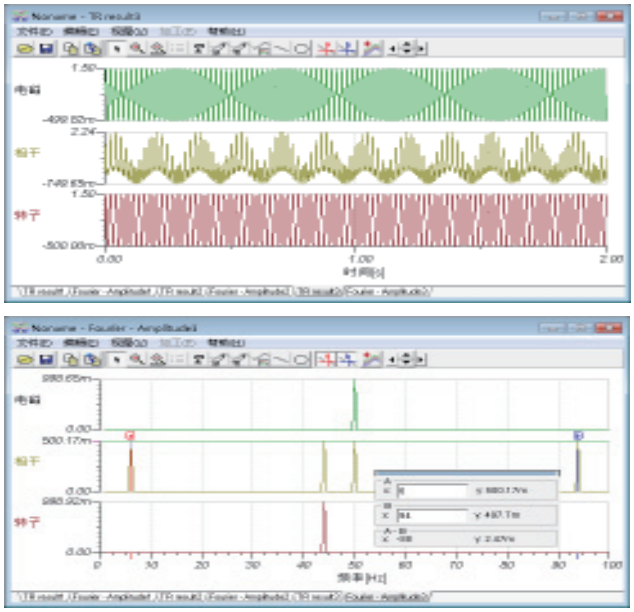
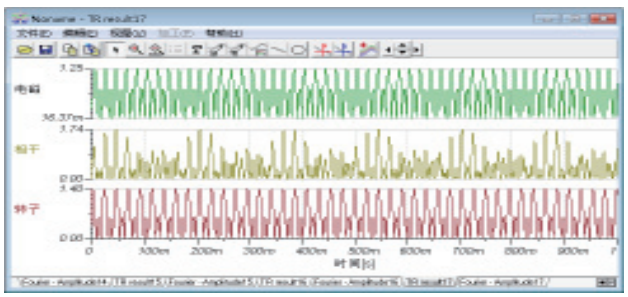


图5 FG=50Hz偏心电磁正弦振动与FJ=44Hz偏心转子正弦振动相干，出现转子谱FJ、电磁振动谱FG、FJ与FG的和频94Hz与差频6Hz。可将FD=FG-FJ差频理解为调制谱，而且相干波形中确实存在每秒钟6次的幅度调制。



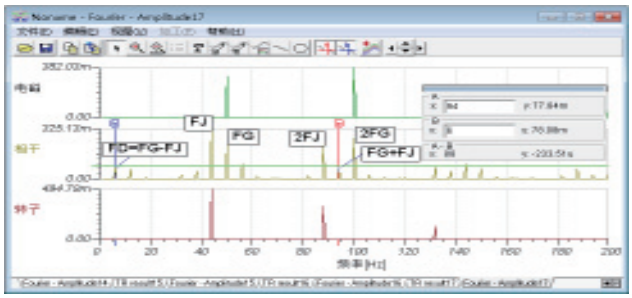


图6 FG=50Hz、FJ=44Hz均有多阶的振动相干，出现FJ、FG多阶谱及等于其差频的调制谱和边频。

由上述仿真分析，我们得到双馈发电机机械不平衡力与电磁不平衡力相干后产生的振动频谱规律是：

如果转子只存在 1 阶不平衡力的频谱 FJ=FN，则相干振动中的主频谱就是 FN，调制谱 FD=FG-FN；FJ、FG 的边频差为 FD；如果转子只存在 2 阶不平衡力的频谱 FJ=2FN，则相干振动中的主频谱就是 2FN，调制谱 FD=FG-2FN；FJ、FG 的边频差为 FD。

表 1 双馈发电机电磁偏心振动与转子振动相干的振动频谱其他低频特征

电磁力频谱	转子力频谱	相干振动主频谱	相干振动差频谱及调制谱	相干振动的和频谱
FG=50Hz	FJ=FN	FJ=FN，FG	FD=FG-FN	FG+FN
FG=50Hz	FJ=2*FN	FJ=2*FN，FG	FD=FG-2*FN	FG+2*FN

上述归纳是否正确？可用下述某风电机组齿轮箱输出端的冲击共振解调检测频谱的实例加以验证。

首先，图 7 所示的是在 861r/min 时的数据，按照运行规程，该低转速时不能发电，也就没有励磁，不存在电磁力和电磁振动。测试数据表明，这时只有转子运转频率 2 倍的冲击：FJ=2FN，谱号为 51.2。

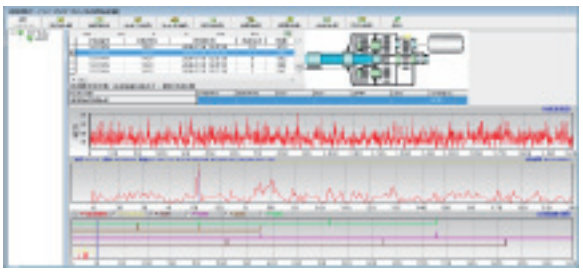


图7 风电机组没有电磁不平衡力时的测试数据低转速861r/min，转频FN=14.35Hz。停止发电，没有励磁，也就没有磁场力。只有51.17号谱线对应转轴2阶谱FJ==14.35×2=28.7Hz=2·FN，没有转轴的1阶谱线（25.6号谱线）。

在转速 1391r/min 的时候，转频 FN=1353/60=23.1833Hz，双馈发电机为两对极，发电频率 FG=50Hz。这时，发电机在发电，自然也就有励磁。按照前面的推理，对于此时的信息状况做出如表 2 的预计。

表 2　转子只有 1 阶不平衡力和具有 2 阶不平衡力的信息规律

转子状态	转子只有 1 阶不平衡力	转子具有 2 阶不平衡力
电磁力频谱理想值	FG=50Hz	FG=50Hz
转子力的主频谱	FJ=FN=1391/60= 23.18	FJ=2FN=46.34
相干振动主频谱	FJ=FN=23.18	FJ==2FN=46.34
相干振动差频调制频谱	FD=FG-FN=26.82	FD=FG-2FN=3.66
相干振动 1 阶边频谱	FJ ± FD=50，3.64	FJ ± FD=50，42.68

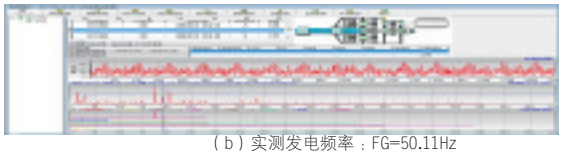
图 8 是实际测量的数据。其频谱符合上表中“转子具有 2 阶不平衡力”的推测。10 号测点是齿轮箱高速轴远离联轴节轴承座的测点。

由图 8 的分析可见，在双馈发电机没有励磁也没有发电的低转速（861r/imn）时，具有转子的 2 阶冲击，而没有转子的 1 阶冲击和电磁不平衡力引起的等于发电频率 FG=50Hz 的冲击。

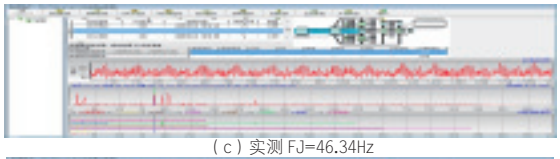
在双馈发电机励磁并网发电的高转速（1391r/imn）时，具有转子的 2 阶冲击 FJ=2FN=46.34Hz，没有转子的 1 阶冲击，却有电磁不平衡力引起的等于发电频率 FG=50Hz 的频谱，它作为 FJ 的上边频出现；还有 FJ 的下边频。边频与主频之差为调制谱 FD=FG-2FN 及其整数阶谱。

这不仅说明发电时存在因为转子电磁偏心引起的、频率为

（a）转速 1391r/min，转频 FN=46.367/2，发电有励磁有磁场力状态。有 178 号谱线对应的转轴 2 阶谱 FJ=46.34。等于 2FN。按实测 FG=50.20 计算，FD=FG-2FN=3.77Hz。实测 FD=3.76Hz　2FD=7.52Hz。



（b）实测发电频率：FG=50.11Hz



（c）实测 FJ=46.34Hz

（d）实测下 2 边频 38.82Hz，计算 FJ-2FD= 46.34-7.52=38.82Hz

图8　10号测点，具有电磁不平衡力时的测试数据

图9　联轴器的初期疑似故障状态

FG=50Hz 的电磁不平衡力，而且转子的振动力主要频谱是 2 阶转子频率 FJ=2FN 的冲击因素。

那么，这个 2 阶的振动冲击力是怎样产生的?

4　柔性联轴器固有的时变刚度与故障所致2变刚度引起的2阶谱

上面的检测是用基于共振解调技术的“JK07460 风电机组在线故障诊断系统”实现的。基于“2 孤谱”理论推测，认为这是发电机所使用的 4 爪柔性联轴器发生初期故障的表现。

图 10（a）所示“爪”数甚少的联轴器存在明显的“时变刚度”，即轴每转一周，轴的横向刚度发生数次（4 爪式为 4 或 8 次,6 爪式为 6 或 12 次)变化。也许人们认为这是可以允许的。但始料不及的是由此引起齿轮啮合出现对应次数的脉动冲击，不仅影响齿轮安全，也引起连轴器疲劳。这时的共振解调监测的频谱特征是：出现轴频率乘以联轴器爪数倍的谱线。4 爪联轴器具有 4 或 8 阶时变刚度，转轴每转一周，对于一个固定的横向作用力（典型的是齿轮啮合副两个齿轮相互的径向推力），例如转轴呈现的刚度变化 4 次时，外力对准联轴器对角线时轴的刚度大，该轴转过 45° 时刚度最小。这势必使该柔性轴每

（a）某发电机的进口柔性连轴器

（b）地铁的进口柔性连轴器

（c）某风电破损的联轴器

图10　柔性联轴器

转一周发生 4 次或 8 次幅度很大的横向振动，而轴的横向振动必然引起其所支撑的小齿轮平面发生 4\8 次偏扭进而使齿隙变化 4\8 次，使它与大齿轮的啮合出现 4\8 组冲击。因此，在

柔性联轴器驱动的齿轮上出现等于柔性联轴器爪数的或 2 倍爪数的冲击几乎是必然的；图 11（a）是在 G45 发电机上输入轴上发现的柔性联轴器上、等于该轴小齿轮频率 4 倍的冲击谱的例子。该联轴器轴的谱号是 25.6，图中出现的谱号是 102.33，102.33/25.6 ≈ 4，正是该特征的表现。图 11（a）则是 G17 机组在不发电时联轴器时变刚度引起的 4 和 8 阶谱的特征。由于分别还存在滑环的和外环的故障信号，所以信息不够单纯、清晰，但却反映了风电柔性联轴器普遍存在的时变刚度特征。

现在的情况是，如果联轴节发生故障，则首先总是从某一个方向开始损坏，如图 10（c）是 6 爪联轴器簧片破损的情况。这种疲劳首先在连轴器簧片的某一方位发生，使轴系出现一个新的、轴每转一周变化两次的时变刚度，即“2 变刚度”，轴和齿轮在两齿轮中心的连接线方向上振动 2 次。

同理，这种刚度变化又将引起齿轮每转一周出现 2 组强烈的啮合冲击。这就是发电机柔性联轴器出现的 2 阶不平衡力和冲击的一个可能是最主要的根源。

5 双馈风力发电机柔性联轴器及电机转子偏心故障联合作用频谱特征的仿真证明

图 13 是上述推测的电子仿真分析。设发电机转速 n=1350r/min，联轴器初期故障引起的 2 变刚度因素的频率为 FJ=1350/60*2=45Hz，而电磁力的频率为 FG=50Hz，并由于偏心，其作用幅度为 1+sin（2p*50）。两者相干，输出干涉信号，引起冲击，然后由传感器共振器检测、解调，输出共振解调波形 IFD（早期故障检测）。对上述信号作 FFT 分析。

图11（a） G45机组上4爪联轴器时变刚度引起轴每转1周（160采样点）出现4组冲击和4阶孤立谱

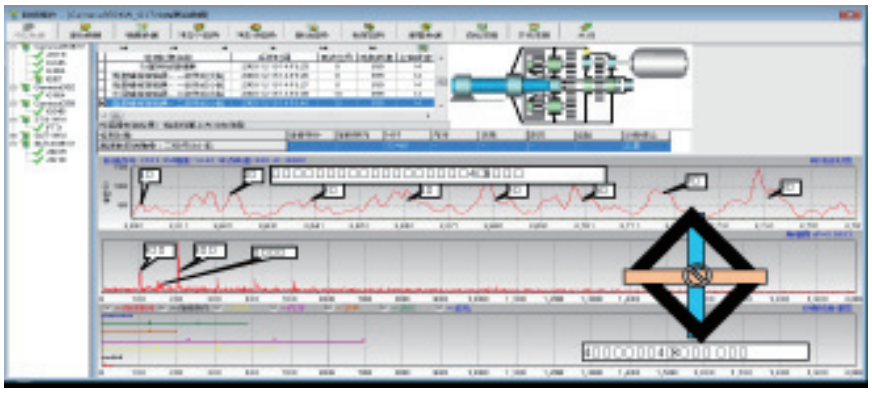


图11（b） G17机组上4爪联轴器时变刚度引起轴每转1周（160采样点）出现4或8组冲击和4、8阶谱

图11（c）是联轴器故障初期的2孤谱表现。转轴每转一周，出现2组冲击。

一个更为贴切的仿真分析如图 14，它揭示了齿轮间隙、转子不平衡力及电磁不平衡力对于齿轮冲击影响的关系。非线性因素体现在：不管何种因素引起齿轮间隙减小到零就发生冲击。说明如下：

“2 电机齿轮”：1289r/min19 个齿的齿轮波形幅度 10~-10。

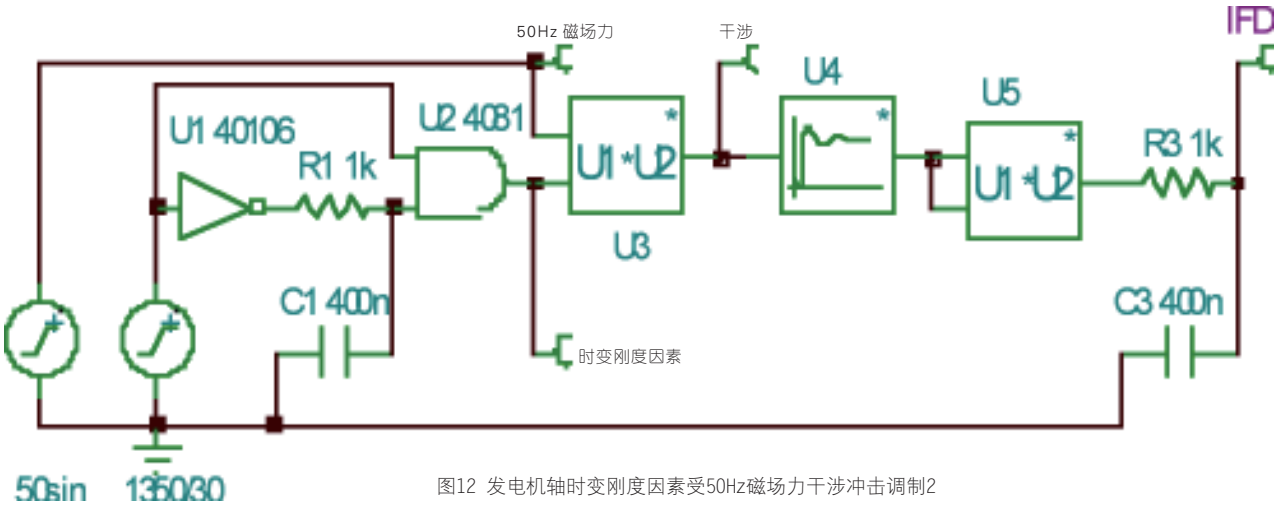
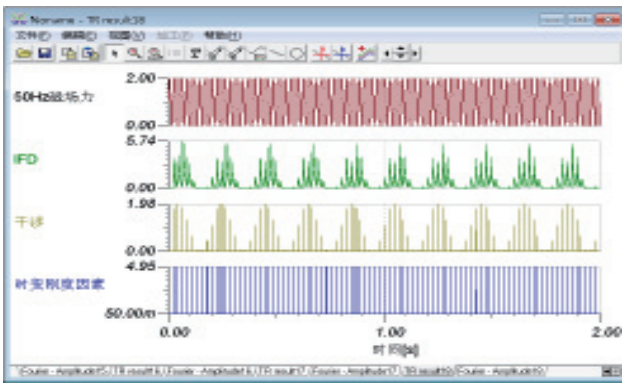


图12 发电机轴时变刚度因素受50Hz磁场力干涉冲击调制2



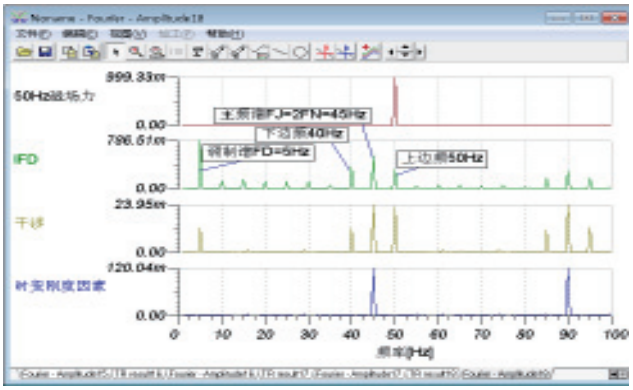


图13 联轴器2变刚度因素受发电机转子偏心电磁力的作用产生冲击的2孤谱分析（1350转/分。转轴2变刚度频率FJ=2FD=45Hz，调制谱频率为5Hz，边频频率40Hz和50Hz）。

“1 主动齿轮”：与电机齿轮模数相同，齿隙为 1，波形幅度 9~-11。若无振动则该两齿轮啮合永远存在 1 的齿隙而不会冲击。

“3 机械振动”：如为 1 阶振动则频率 21.5Hz，如为 2 阶振动则频率 43Hz。设幅度为 0.9。

“4 电磁振动”：双馈发电机的电磁振动永远为 50Hz，设幅度为 0.3。

“2 电机齿轮”通过 U1 受到 3 机械振动的叠加调制，通过 U2 受到 4 电磁振动的叠加调制，输出为“5 电机轴振动”。

“1 主动齿轮”与“5 电机轴（电机齿轮）振动”啮合相减，得到“6 啮合振动”。

开关 SW1 的鉴别域门：ON=0，OFF=1mV，目的是识别“6 啮合振动”的间隙若消失（=0）则输出啮合间隙消失信息，经过 U6 放大为“7 啮合冲击”。

“7 啮合冲击”经过 U4 的二阶系统共振、U5 的平方检波、R3C3 平滑滤波输出共振解调波形“IFD”。

下面，逐一分析各种典型状态的共振解调早期故障检测 IFD 频谱。

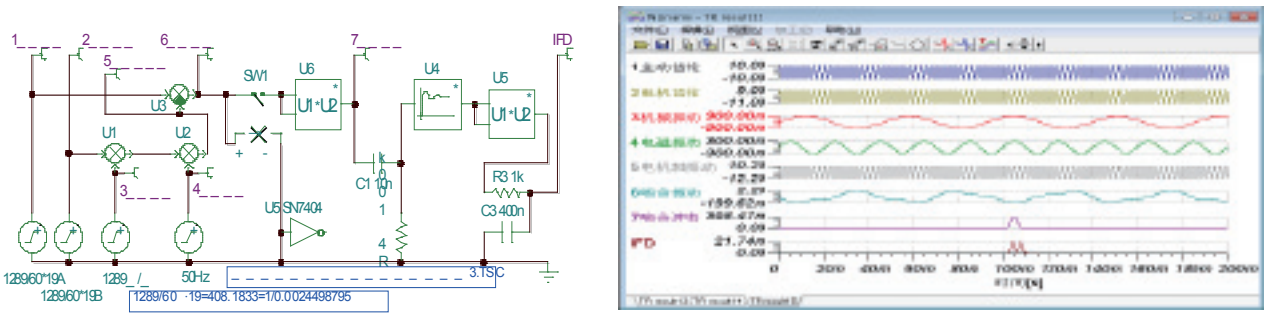
比较机械振动频率为 21.5Hz 和 43Hz 的仿真，可以发现明显的差别特征：

在机械振动为 21.5Hz 时，主频谱 21.5Hz，边频差 7Hz，调制谱 7Hz。有主频谱的 2 阶谱及其边频。

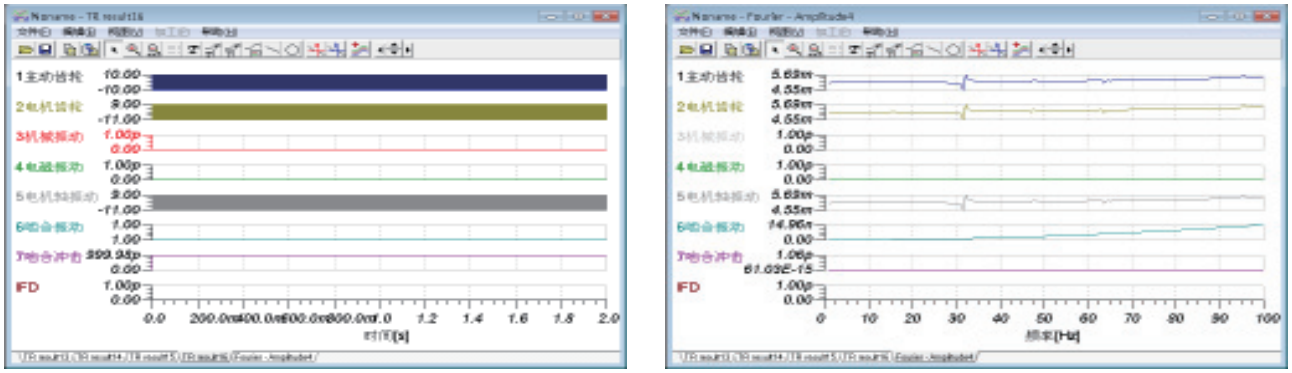
在机械振动为 43.0Hz 时，主频谱 43.0Hz，边频差 7Hz，调制谱 7Hz。无 21.5Hz 的谱及其边频。

以上分析证明：发电机因为机械主轴不平衡而存在振动、转子与定子因为电磁作用力存在电磁振动都是不可避免的。但这两种振动叠加引起齿轮振动的幅度如果小于齿轮的间隙，则不会引起啮合冲击。

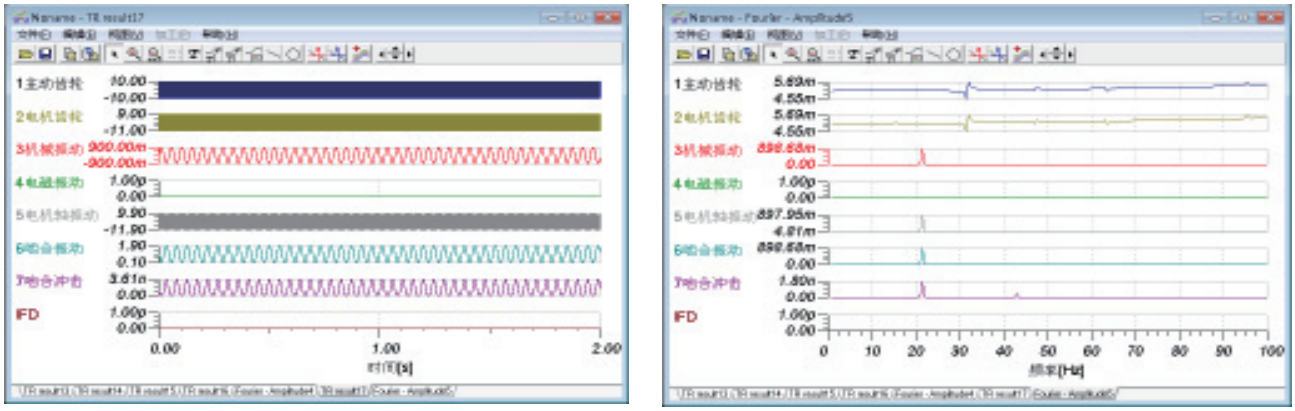
如果任意一种振动，或叠加振动，或因为发电机转子电磁



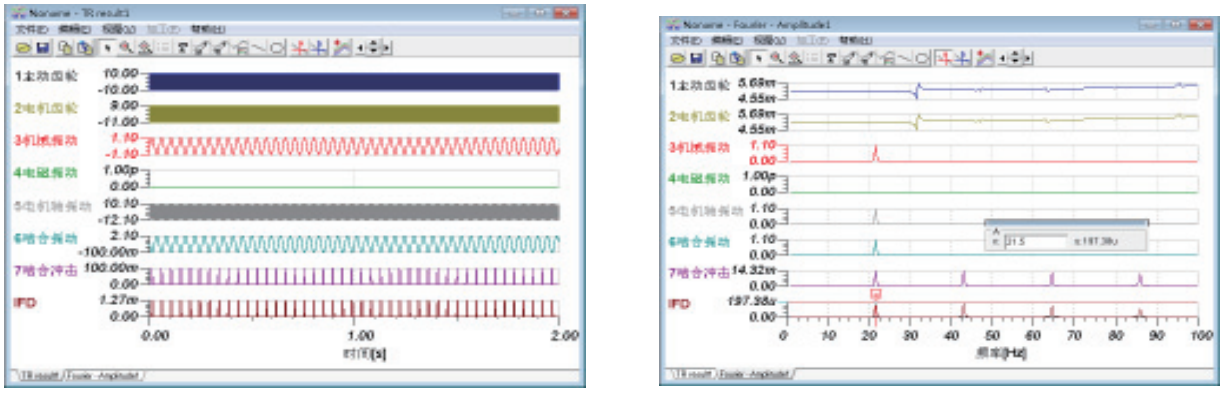
（a）齿轮啮合受机械、电磁振动调制发生冲击



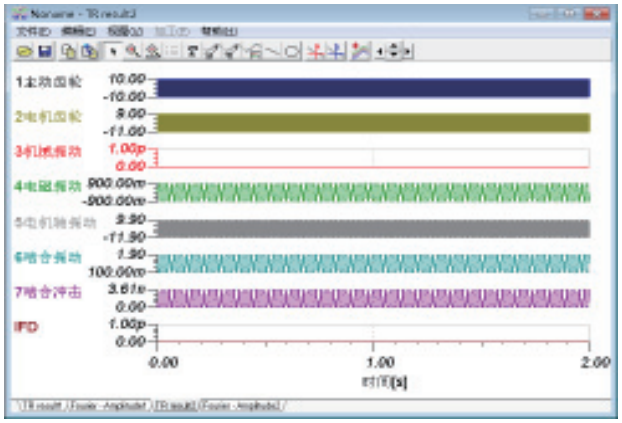
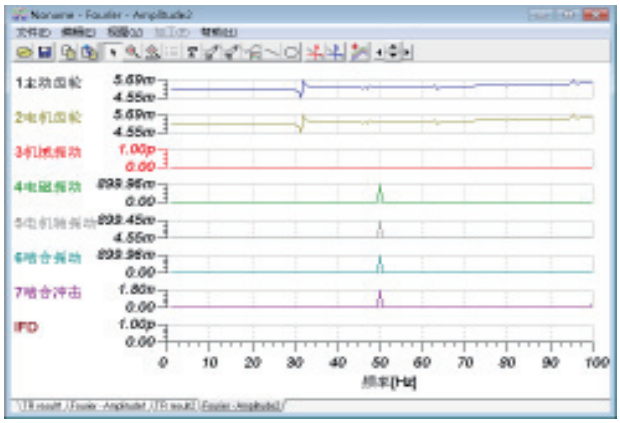
（b）当没有机械振动和电磁振动时，没有IFD输出，共振解调IFD分析没有频谱



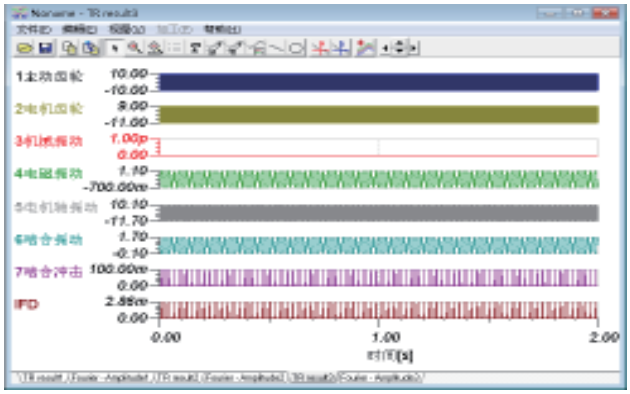
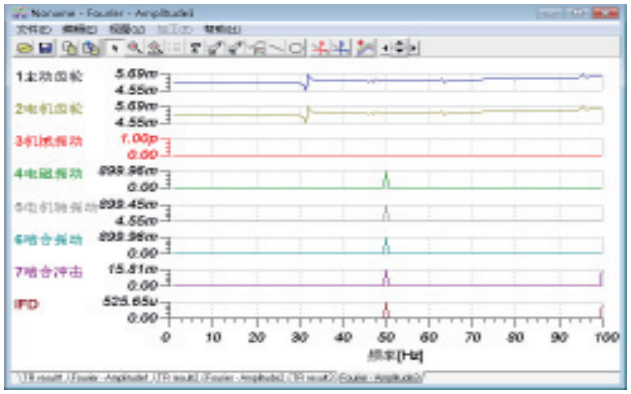
（c）有0.9的机械振动无电磁振动，没有IFD输出。因为啮合振动的最小间隙尚有0.1，共振解调IFD分析没有频谱



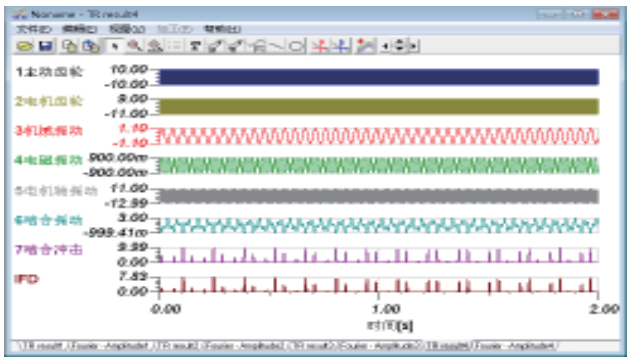
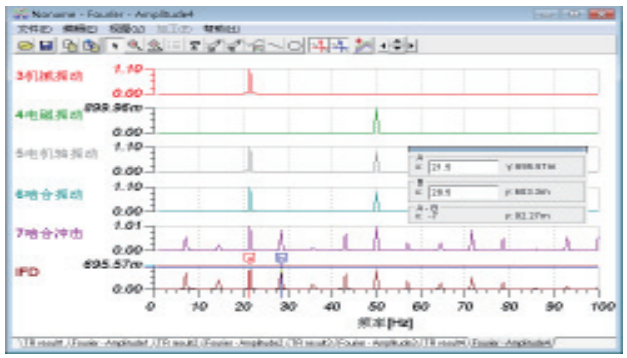
（d）有1.1的机械振动无电磁振动，则有IFD输出。因为啮合振动的最小间隙小于0，引起啮合冲击，共振解调IFD分析出现转频频谱FJ=21.5Hz

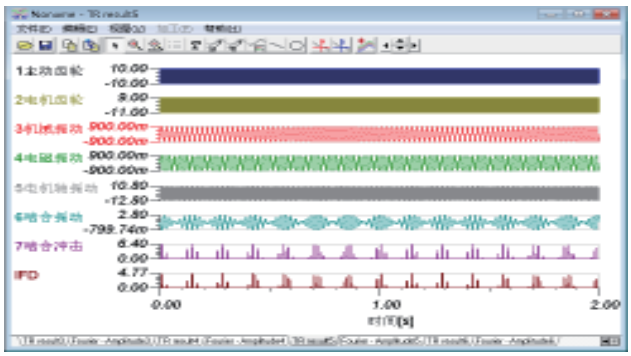
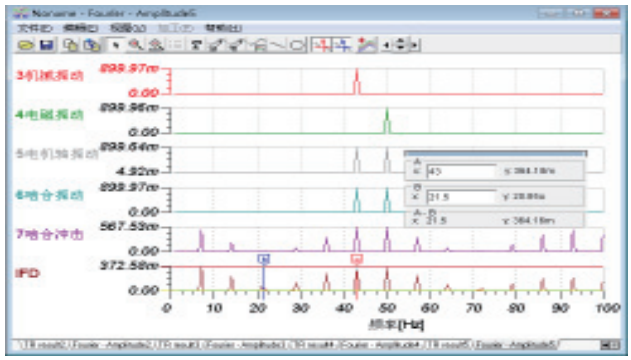
（e）有0.9的电磁振动无机械振动，没有IFD输出。因为啮合振动的最小间隙尚有0.1

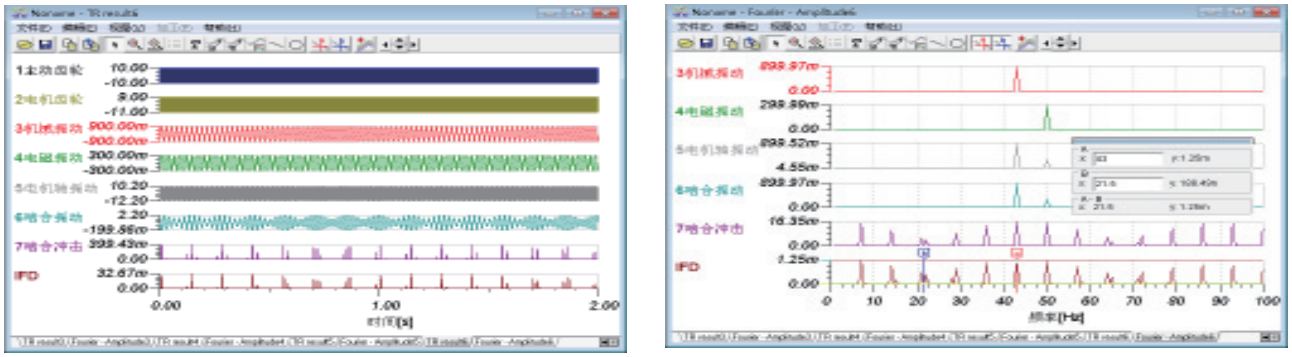
（f）有0.9的电磁振动并偏心0.2而无机械振动时，则有IFD输出。因为啮合振动的最小间隙小于0，

（g）有0.9的电磁振动和1.1的机械振动，则有IFD输出。因为啮合振动的最小间隙小于0，IFD频谱：机械振动21.5Hz，电磁振动50Hz，两者边频与其频差7Hz，调制谱7Hz。

（h）有0.9的50Hz电磁振动和0.9的43Hz机械振动，则有IFD输出。因为啮合振动的最小间隙小于0，IFD频谱：机械振动43Hz，电磁振动50Hz，两振边频与其频差7Hz，调制谱7Hz。没有21.5Hz谱线



（i）有 0.3 的 50Hz 电磁振动和 0.9 的 43Hz 机械振动，则有 IFD 输出。因为啮合振动的最小间隙小于 0，
IFD 频谱：机械振动 43Hz，电磁振动 50Hz，两振边频与其频差 7Hz，调制谱 7Hz。没有 21.5Hz 谱线

图 14 各种典型状态的共振解调早期故障检测 IFD 频谱

偏心，或齿轮偏心，只要转子相对定子的振动与位移使得齿轮的啮合间隙消失，就会引起啮合冲击。

双馈发电机电磁振动的频率是固定为 FG=50Hz 的。机械振动的频率 FJ 则随主轴的转速改变而改变。

如果机械振动的频率等于转速频率 FJ=FN，电磁振动的频率为 FG，则共振解调检测的机械主频谱为 FJ=FN，调制谱频率为 FD=FG-FJ=FG-2FN，机械主频谱与其边频之差频等于 FD；机械主频谱 2 阶 FJ=2FN 与电磁主频谱 FG 互为边频。

如果机械振动的频率因为联轴器发生故障而出现等于 2 倍转速频的“2 孤谱”FJ=2FN，电磁振动的频率为 FG，则共振解调检测的机械主频谱为 FJ=2FN，调制谱频率为FD=FG-FJ=FG-2FN，机械主频谱与其边频之差频等于 FD；机械主频谱 FJ=2FN 与电磁主频谱 FG 互为边频。没有频率为 FJ/2=FN 的频谱。这是识别机械振动性质的重要特征。

基于以上的认识，我们可以对风力双馈发电机的驱动齿轮箱之输出轴测点上发现的共振解调频谱做出中恳的诊断：主要因素是联轴器初期故障引起 2 变刚度诱发齿轮啮合出现频率为 FJ=2FN 的“2 孤谱”；双馈发电机的转子电磁偏心产生了不平衡电磁力；齿轮的 2 阶冲击受频率为 FG=50Hz 的电磁力调制引起调制谱频率为 FD=FG-2FN 的调制谱和 FJ 的边频谱。这是包括发电机在内的柔性联轴故障与发电机转子偏心故障的联合特征。

征稿启事

“工厂车间”、“风电场”是风电产业链上最具活力、最富有感染力的地方，不仅记录风能人的风雨历程，也寄托风能人的奋斗理想；不仅体现风电制造的科技风貌，也展示绿色可再生能源的人文梦想。因此，我们特向工作在工厂车间、风电场的业内人士征集稿件，让更多的业内外人士分享行业精彩。

“车间”征稿内容包括：车间组装线生产案例，车间工艺流程改进案例，车间管理制度案例，质量改进案例，车间新闻事件，车间故事，车间随笔等。

“风电场”征稿内容包括：风电场维护案例，风电场故障排除案例，风电场运维管理案例分析，风电场运行数据分析，风电场运维成本分析，风电场机组发电量实例，风电场机组试验实例，风电场随笔等。

征稿文章字数不限，但期望字句通顺并附有相关图片。

征稿信箱：gaojian@cwea.org.cn

《风能》编辑部

可汗之风
KHANWIND
竹叶片专家

我们的优势

- 25 年木叶生产开发经验
- 5 年竹叶片生产开发经验
- 英国叶片专家与中国叶片设计开发团队
- 国内外各大叶片制造企业多年的合作经验

我们的服务

为叶片制造企业提供 --

- 叶片结构设计
- 叶片认证技术支持
- 叶片原材料优化及工艺改进
- 环保型可回收叶片解决方案
- 全方位叶片成本降低方案——
  更低原材料成本、更高生产效率、更低启动投资

为叶片制造企业、整机制造企业、或投资机构提供 —

- 叶片技术评估
- 叶片故障分析及问题解决

KHANWIND

北京可汗之风科技有限公司

源自欧洲　中国设计

电话：+86（10）87551882　　传真：+86（10） 87551812-8001
网址：www.khanwind.com　　邮箱：info@khanwind.com　　地址：北京市崇文区国瑞城公寓楼 A609

定桨距机组实现低电压穿越的几种方法

■浙江运达风力发电工程有限公司 | 许国东　杨　靖

1 概述

定桨失速型风电机组在我国已发展了多年，目前正在服役的 750kW 机组有 5000 台以上。该型机组成本低廉、可靠性高、经济性好，但目前其发展受到越来越多来自电网的限制，尤其是受到在电网暂态电压跌落时要实现低电压穿越技术的限制。本文就此提出对运行中机组进行轻微改动的经济性方案，实现定桨失速型机组的低电压穿越。

2 定桨失速型风电机组原理分析

定桨失速型风电机组采用鼠笼式异步发电机直接联结电网的方式，在正常运行时以固定电容组来补偿功率因数到 0.98 以上。

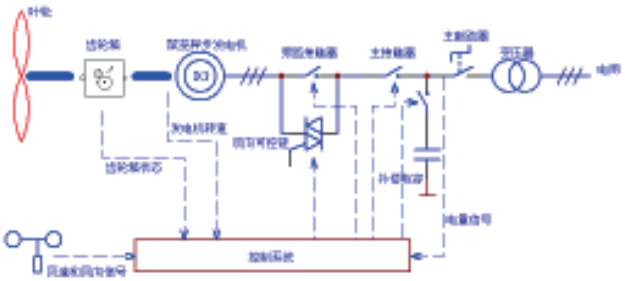


图1 定桨失速风电机组总体结构

定桨失速机组低电压穿越的本质问题在于，电压跌落时，机组对外输送电量的能力下降，叶轮上积聚的机械能量无法对外输送，也无法像变桨机组一样通过调整桨叶角度减小叶轮吸收的风能，因而，电压跌落期间机组无法对外输送的电能就作为机械能在叶轮上累积，造成叶轮转速升高。在电压恢复时，叶轮之前累积的动能又要重新释放到电力系统中，造成短时大电流。

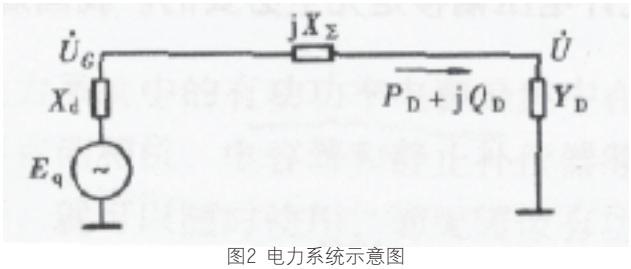


图2 电力系统示意图

在电力系统中，输电线路传递有功功率的能力为

$$P_{trans}=\frac{E_qU}{X}\sin\delta \qquad (1)$$

式（1）中 Eq 为电网电压，U 为机组并网端电压，X 为传输阻抗，δ 为相位差。目前标准定义的暂态低电压都发生在中高压线路，因此在这样的情况下 Eq 和 U 是同时跌落的，因此线路的输电能力下降很大，也即电压跌落过程中，在机组积聚的动能是非常大的。解决这一问题的思路有两种：

（1）将低电压过程中机组无法外送的能量作为电能在机组侧消耗

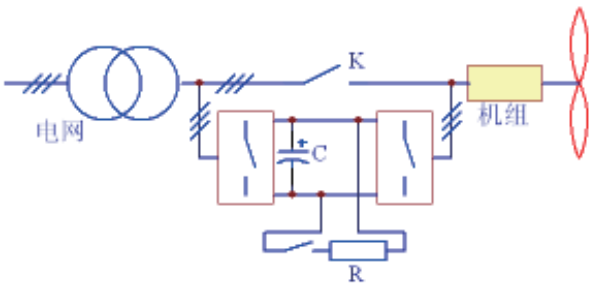


图3 变流器直流电阻耗能法

图 3 所示方法在电网电压跌落时，分断开关 K，保持机组

端电压不变，通过发电机侧变流器将能量消耗在变流器的直流电阻上，并由网侧变流器向电网传递部分能量，但因为变压器后端电压取决于电网电压跌落深度，因而网侧变流器传递的电能量是受限的，电阻 R 将承担消耗能量的主要责任。在电网电压恢复时，通过变流器的调整，使发电机端电压和变压器后端电压实现同频、同相、同幅，从而实现同步并网，变流器退出工作。

使用该方法可以实现机组平稳地穿越低电压故障，但变流器和直流电阻容量要求较大，成本很高，变流器在机组正常工作时可以承担调节动态无功的任务。

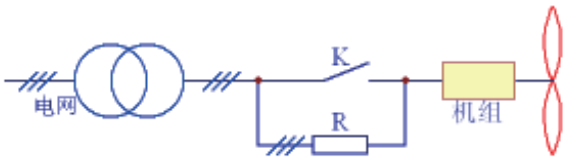


图4 主线路串电阻耗能法

图 4 所示方法在电网电压跌落时，分断开关 K，以电阻 R 来消耗部分能量，此时发电机端电压略高于变压器后端，在电压恢复且机组转速恢复到正常范围时才重新闭合 K。

与图 3 的变流器直流电阻耗能相比，主线路串电阻耗能的时间短，但短时功率大，其主要能耗时间在电压恢复以后的短时间内，但该时段会造成发电机端电压显著升高，在开关切换时也会造成一定幅度的发电机端电压瞬变。此外，串入电阻的大小受到机组接入点电压和发电机转速的双重约束，而接入点电压在低电压穿越过程中动态变化剧烈，因而难以对电阻进行及时有效的调节。

事实上，为控制发电机端电压的平稳，将不得不采取多级电阻分步投切的方法，为实现良好的动态，开关 K 应为采用响应迅速的固态开关，这也会使其成本增加。

（2）减小恢复过程中的电流

并网运行时，定桨失速机组的有功功率和无功功率性能主要由发电机特性决定，其单相等效电路如下：

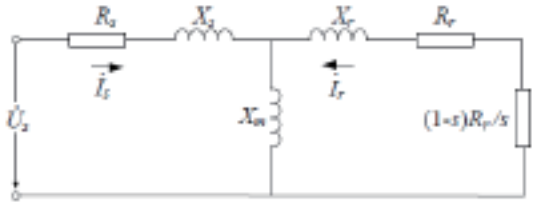


图5 异步发电机等效电路

可见，发电机在运行时为电感性负载，其单相有功和无功阻抗分别为

$$\begin{cases} r_g = r_1 + \dfrac{sr_2 x_m^{\ 2}}{r_2^{\ 2} + (sx_m + sx_2)^2} \\ x_g = x_1 + \dfrac{x_m r_2^{\ 2} + s^2 x_2 x_m^{\ 2} + s^2 x_2^{\ 2} x_m}{r_2^{\ 2} + (sx_m + sx_2)^2} \end{cases} \quad (2)$$

由此，发电机的三相有功和无功功率为

$$\begin{cases} P_g = 3\dfrac{U_p^{\ 2} r_g}{r_g^{\ 2} + x_g^{\ 2}} \\ Q_g = 3\dfrac{U_p^{\ 2} x_g}{r_g^{\ 2} + x_g^{\ 2}} \end{cases} \quad (3)$$

显然，Qg 和 Pg 是相电压有效值 Up 和电机转差率 s 的函数

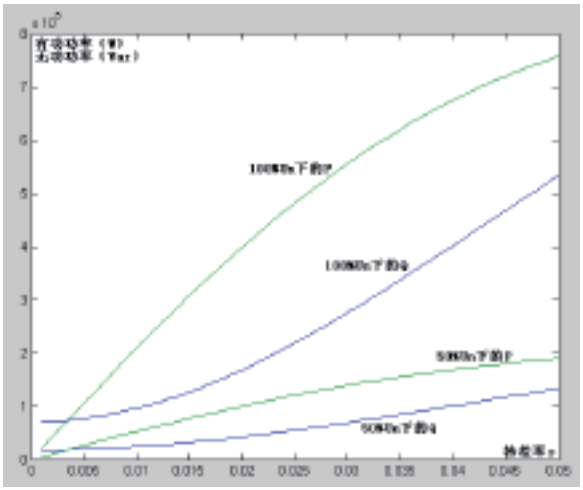


图6 感应发电机有功功率、无功功率和电压、转差率的关系

可见，在电压跌落，发电机转速上升也即转差率增大时，在电压恢复的时刻将产生很大的无功需求。如果整个风电场都产生如此大的无功要求，那么对电压恢复将非常不利，对机组和传输线路容量也带来很大压力。如果在该时刻能进行无功补偿，则能降低发电机电流、转矩和机组对电网的无功需求。

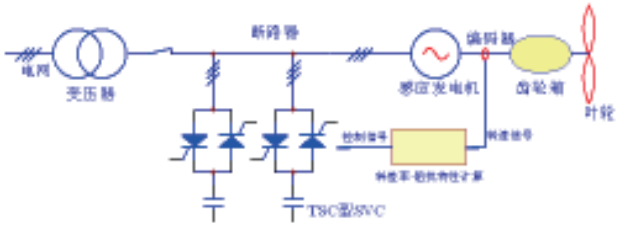
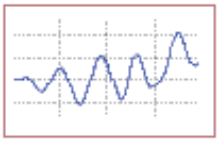
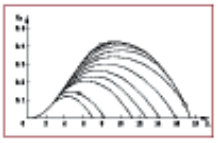


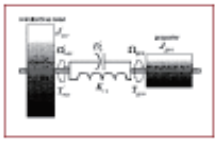
图7 无功补偿法

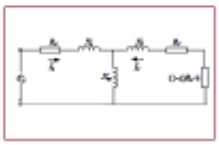
无功补偿可通过结合机组本身具备的无功补偿设备来进行，为实现低电压穿越而增加的无功补偿设备应有快速响应的特性，可选 STATCOM 或者 SVC。

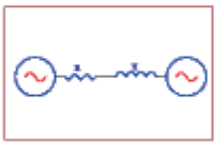
采用该方案时，发电机端电压可以控制得相对平稳，并尽快恢复，增加的设备不产生大的热损耗，成本不高，并且在机组正常运行时可以对机组输出电能进行宽范围的功率因数调节，对已经投入运行的机组进行现场改造也相对简易。


风模型


叶轮模型


传动系统模型


发电机模型


电网模型

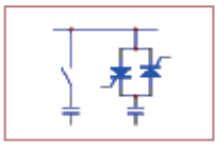

无功补偿模型

图8 仿真模型组成

3 模型仿真

仿真模型基于 MATLAB/SIMULINK 软件，采用了风模型、叶轮模型、传动系统模型、发电机模型、电网络模型和无功补偿控制模型结合的方法，尽可能地采用了实际的机组和电网参数，以达到最接近真实的效果。

其中，风模型以基本风速结合白噪声和叶轮转速形成，叶轮模型设置了机组的 Cp-λ 曲线，传动系统采用两质块弹性模型，发电机采用五阶模型，无功补偿模型中，采用了 8×28KVAR 的固

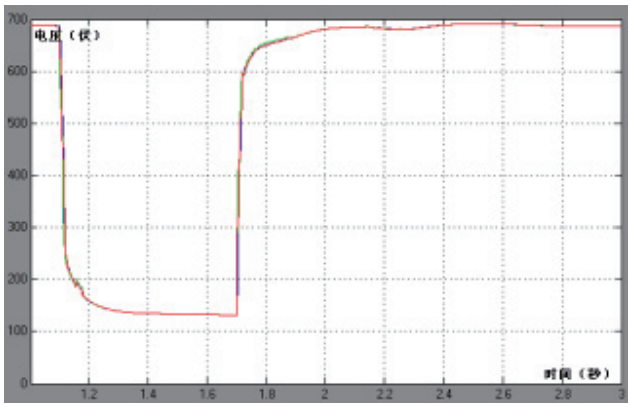


图9-1 机组并网点线电压有效值

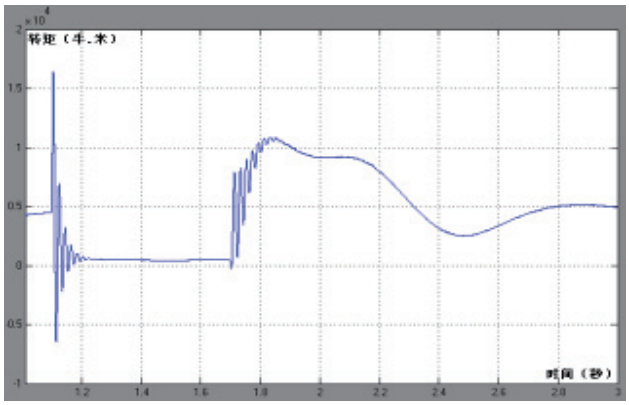


图9-2 发电机转矩

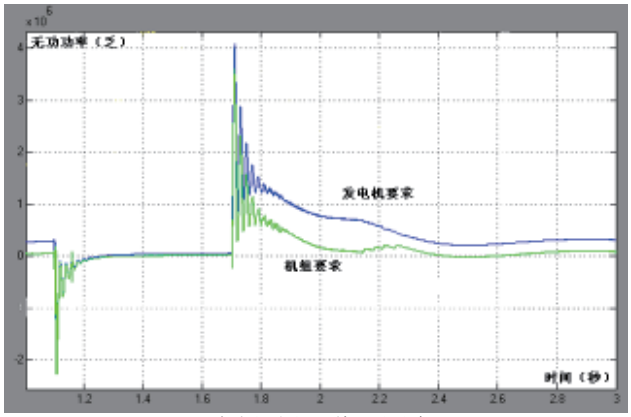


图9-3 发电机和机组的无功功率

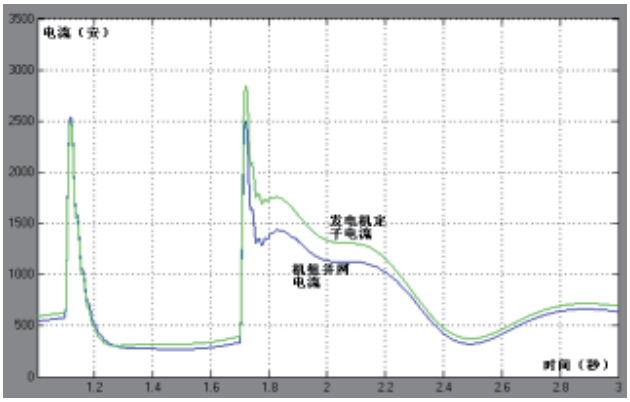


图9-4 发电机定子电流和机组的并网电流有效值

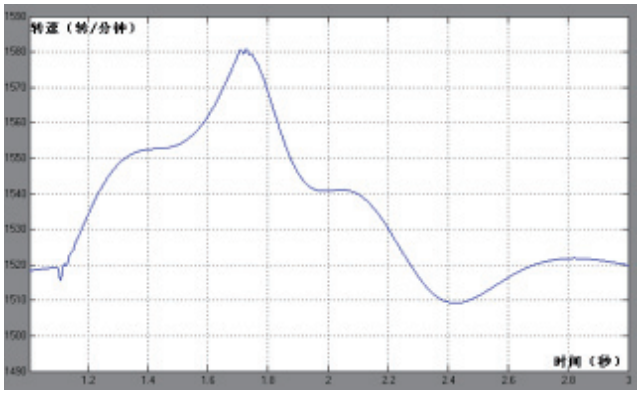


图9-5 发电机转速

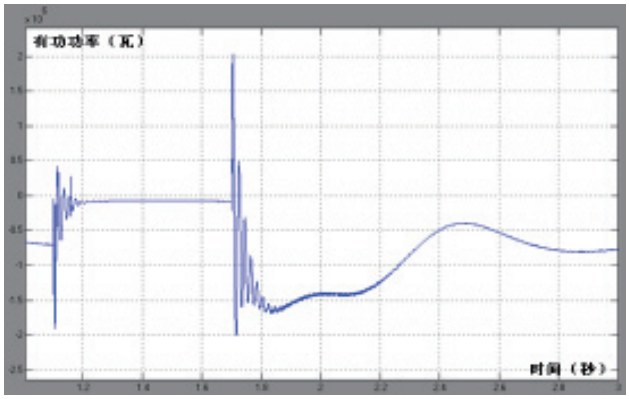


图9-6 机组有功功率

定电容组和 5×100KVAR 的 TSC。

电网由 110kV、35kV 和 690V 三个网段构成，其中 110/35kV 的变压器容量为 63MVA，短路比为 10.5%。35/0.69kV 变压器容量为 800kVA，短路比为 6%。35kV 传输线路长 10km，690V 传输线路长 100m。机组接入点的短路容量为 12.49MVA。

故障在 110kV 发生，故障时间为第 1.1-1.7s，造成电压三相跌落到额定值的 20%，当时平均风速为 13m/s，当时有功功率接近满发，因此在发生电压跌落前，总容量为 224KVAR 的固定电容组完全投入，5 组 TSC 均未投入。当电压发生跌落后，TSC 完全投入，在电压恢复且机组恢复到稳定时，TSC 逐步切除。

从上面的结果可见，在电压恢复时，无功功率补偿起到了很好的效果，机组的并网电流有了显著降低。在电压跌落时，会产生短时电流过冲，这是由于电压相位有陡变，从而产生了很大无功而引起的，这个过冲无法避免，其幅值与故障发生前的机组运行容量有关。在电压恢复时也产生了短时的大电流，这是由于该时刻转差较高，系统的有功和无功较大，补偿的无功容量能抵消一部分发电机的无功需求，但 TSC 容量取得过大也会造成不经济。

此外，虽然 TSC 的单组容量达到 100KVAR，但是在优化控制的作用下，TSC 切除时并未造成电压显著波动。

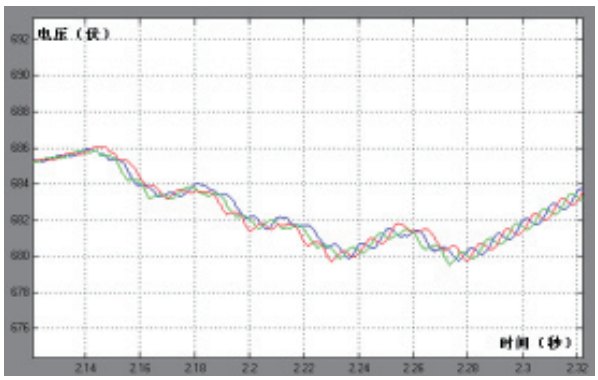


图 10 TSC 切除时的机组并网点电压

如机组在配置 500KVAR 容量 TSC 的基础上加装小容量 TCR 和滤波器，则在机组正常运行时也可实现输出电能量的动态功率因数调节。额定功率时，机组的功率因数调节范围可达 +0.9~-0.9，小功率时，功率因数调节范围将更宽。

4 结语

定桨机组的 LVRT 限制在于以下几方面

（1）转速不超过发电机临界稳定转速；

（2）电流不超过断路器和接触器的承受限度；

（3）传动系统的瞬时转矩不超过设计值；

（4）机组最大载荷不超过承受值。

就 TSC 型 SVC 补偿的 750kW 机组在 600ms 电压跌落的仿真结果而言，有如下结论：

（1）在暂态低电压过程中，会出现发电机转速上升的情况，但从仿真结果看，机组能恢复到稳定运行，不会超越临界稳定转速，如欲实现低电压穿越功能，可能要修改过速保护值。

（2）在电压跌落和恢复时，会出现电流和功率的短时上升，需要修改过电流和过功率保护限制值。经过校核，目前机组使用的主断路器和主接触器具备仿真结果中要求的短时过流能力。

（3）在暂态低电压过程中，可能会出现高速联轴器的打滑，以保护齿轮箱。在三相不对称跌落的情况下，就各指标的极限值而言，不如三相对称跌落时恶劣，但在电压跌落过程中，会出现一定的转矩脉动。

（4）就机组载荷而言，未做详细评估，从国外类似情况下的分析资料看，塔顶载荷短时最大值在电压跌落前的 1.3 倍左右，应在机组设计安全裕量以内。

随着风电入网标准的提高，很多运营商都提出了对已经投入运行的定桨失速型机组进行技术改造的需求，这在全球来讲也是一个比较新的课题，通过本文的研究，希望能给从事这方面工作的技术人员以参考。

兆瓦级风电机组焊接机架和结构螺栓的分析计算

■南车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部 | 杨兆忠　吕杏梅　颜志伟　晏红文

1 概述

为确保现代兆瓦级风电机组设计、制造和运行维护过程的规范，对其进行相关的认证是重要的一步。通过严格认证的风电机组被认为是值得信赖和可靠的，这不但有助于风电设备制造商开拓市场，甚至在某些国家，通过特定的认证是风电机组投产运行的强制法律要求。目前，国际上通用的风电认证规范有 IEC 614001、德国劳埃德（GL）认证规范和丹麦的 DS 472 标准，国内有北京鉴衡认证中心等。

机架结构复杂，是风电机组最主要的承力部件之一。机架承载着主轴传递的轮毂中心载荷、齿轮箱的载荷、发电机的载荷、偏航电机的载荷以及变频柜的载荷。对机架的分析计算是要确保其在 20 年的时间内不失效。目前，较为常见的失效形式有静强度失效和疲劳失效，所以要分别对上述两种强度进行校核计算。另外，为了保证机架在机组工作时不发生共振，允许对其进行模态分析。风电机组的许多关键零部件之间是通过螺栓连接的，对螺栓进行强度分析是确保机组安全的基础。对螺栓的强度分析包括极限强度分析和疲劳寿命分析。本文对连接螺栓的强度分析采用了有限元方法和依据 VDI2230 的工程算法。

2 机架的极限强度分析

一般使用有限元分析算法对机架进行极限强度分析计算。本文中计算所使用的几何模型在三维软件中建立，并根据有限元理论和结构力学理论简化了机架上的一些电缆支架、吊耳、一些凸出的倒角（凹进去的圆角都在模型中考虑，避免应力集中）等对机架强度分析影响不大的细小部分。由于该模型用于校核机架的强度，对于其螺栓连接部分进行了简化处理，并建立齿轮箱和塔筒假体。将建立完的模型导入前处理软件进行网格划分和边界条件的定义。为了计算结果的准确性，对划分好的网格要进行质量检查。为了使静强度分析计算的有限元模型能够用来进行疲劳强度的计算，对焊接结构的机架需要在划分网格时保证 0.4T 和 1T 位置有节点。对建立好的有限元模型塔筒假体底部进行全约束，并在轮毂中心位置施加静止轮毂中心坐标系下的极限工况载荷（共 16 种）和发电机悬臂上的载荷（包括发电机载荷、机舱罩载荷等）。

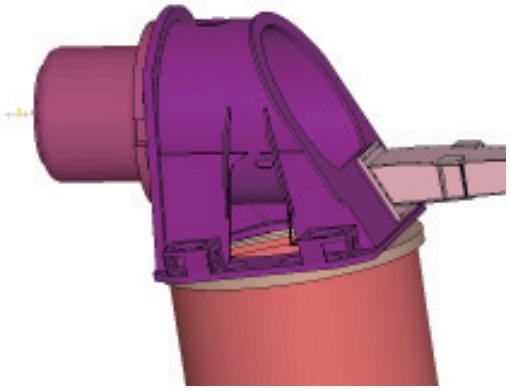


图1 机架几何模型

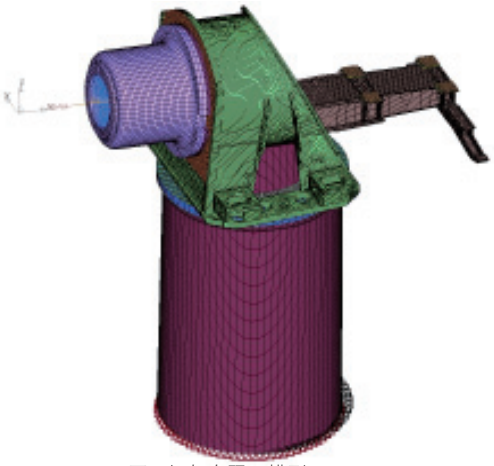


图2 机架有限元模型

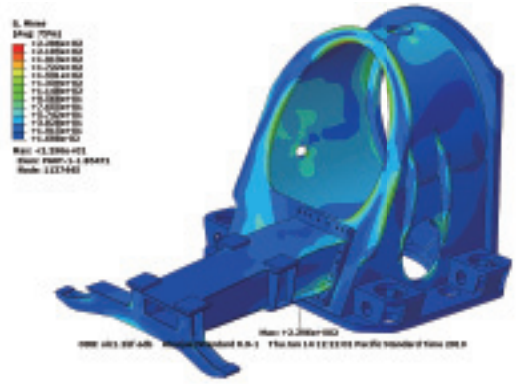


图3 某工况下机架的应力云图

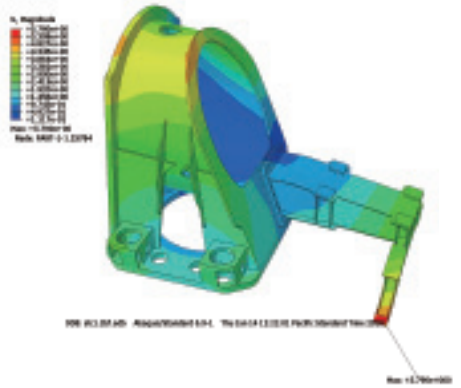


图4 某工况下机架的位移云图

安全裕度 M_{sult} 的定义：$M_{sult}=[\sigma]/\sigma_m-1$，当安全裕度大于 0 时，机架将处于安全状态。其中：$[\sigma]$ 为材料的许用应力，σ_m是计算得到的结构最大应力；，其中，σ_s 是材料的屈服极限，n 为安全系数，对于机架的静强度分析，根据 GL 规范 5.3.2.1 节，取安全系数为 1.1。综合比较了 16 个轮毂静止坐标系下轮毂中心极限工况下机架的应力，机架最大应力值通常出现在 M_{yz} 最大的工况下。

3 机架的疲劳寿命分析

疲劳分析与静强度分析的模型基本相同，但是对于焊接结构的机架，由于机架疲劳破坏主要发生在焊缝位置，需在焊缝处建立 0.4T 和 1T 两层单元（T 表示焊接处两板中较薄的板厚）。施加在轮毂静止坐标系下轮毂中心位置的单位载荷。

焊趾处的应力值通过差值外推得到，可以参看 IIW（国际焊接协会）的规定以及 EC3 1-9 中的论述。有限元计算时，由于几何和数值因素，焊趾位置不可避免地出现应力集中，而且随着网格的细化，应力数值会不断地上升，这是不合实际的。采用应力外推的方法，进行焊趾应力的获取，目前是比较公认的方法。本文采用 IIW（国际焊接协会）的外推方法，即在距离焊趾 0.4 倍壁厚位置和 1.0 倍壁厚位置选取应力，再进行线性外推。对焊缝条数多且不规则的机架，可根据在模型上施加轮毂中心坐标系下轮毂中心的极限载荷和各单位载荷时机架上的应力分布，选择应力值大的位置作为热点位置。

通过有限元软件的后处理模块提取各个热点在 0.4T、1T 处的正应力及切应力，再利用线性插值得到位于焊缝热点处的应力值，最终获得各个热点的应力值 $[\sigma_{\perp f},\tau_{\perp f},\tau_{//f}]$ 与所施加六个单位载荷间的关系矩阵，并应用雨流计数法获得焊址处等效疲劳应力正应力 $\Delta\sigma wf$ 和等效疲劳切应力 $\Delta\tau_{wf}$。

考虑疲劳安全系数，机架焊缝疲劳损伤判据为：

$$\left(\frac{\gamma_M\Delta\sigma_{wf}}{\Delta\sigma xS,d}\right)^3+\left(\frac{\gamma_M\Delta\tau_{wf}}{\Delta\tau xyS,d}\right)^5\le 1$$

γ_m——焊缝的安全系数，取为 1.1

$\Delta\sigma_x S,d$——焊缝许用疲劳正应力，由焊缝疲劳等级确定。

$\Delta\tau_{xy} S,d$——焊缝许用疲劳切应力，由焊缝疲劳等级确定。

$\Delta\sigma_x S,d$ 和 $\Delta\tau_{xy} S,d$ 的数值可通过 GL 规范中提供的 SN 曲线结合疲劳寿命循环次数推导得到。

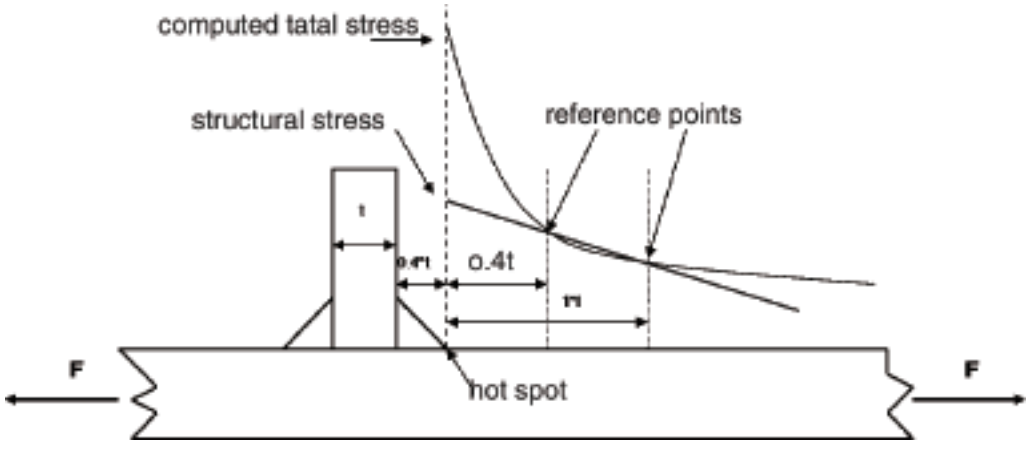
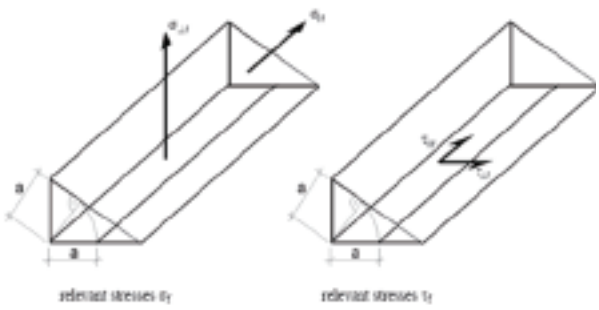


图5 焊趾位置应力线性外推



（a）焊缝处应力分量图示

根据 Eurocode 3 Part 1-9，计算焊缝的正应力和切应力：

$$\sigma_{wf}=\sqrt{\sigma_{\perp f}^{2}+\tau_{\perp f}^{2}}\ ;\ \tau_{wf}=\tau_{//f}$$

σwf——焊缝的等效正应力。

τwf——焊缝的等效切应力。

σ⊥f——垂直于焊缝的正应力。

τ⊥f——垂直于焊缝的切应力。

τ//f——平行于焊缝的切应力。

（b） 焊缝正应力与切应力计算

图6 EC 3 1–9焊缝疲劳外推应力分量

4 机架的模态分析

对机架进行模态分析是防止机架的固有频率和风轮与发电机振动频率一样，在机组工作的适合机架产生共振现象。计算得到了机架前三十阶的固有频率及相应的振型，从模态分析结果来看，机架的频率比较密集，这是与复杂的结构相对应的。

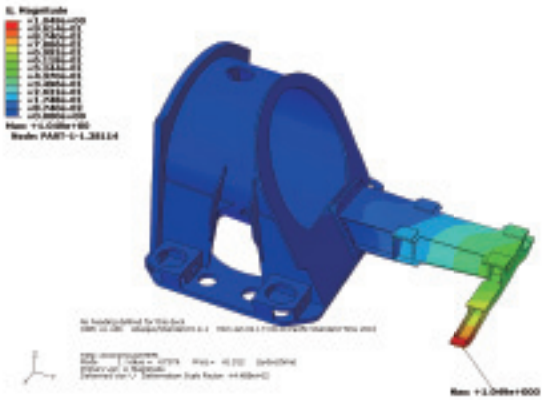


图7 机架的某阶模态振形

5 结构螺栓强度分析计算

风电机组中叶片和变桨轴承、变桨轴承和轮毂、轮毂和主轴、齿轮箱和机架等均采用螺栓连接。因此，为了保证整个机械系统在 20 年的时间内稳定运行，对风力发电机组上连接螺栓进行强度分析是必须的。对螺栓的强度分析包括极限强度分析和疲劳寿命分析。本文对连接螺栓的强度分析采用了有限元方法和依据 VDI2230 的工程算法。

5.1 螺栓强度分析的有限元算法

对螺栓的极限强度进行校核时，用于分析计算的几何模型首先在三维软件（如 Inventor、SolidWorks 等）中创建，然后导入专业的前处理软件（如 Hypermesh、ANSA 等）中进行网格划分和边界条件的定义。本文中螺栓采用了实体单元，为简化计算模型对螺栓和垫片、螺纹和连接体或螺母、垫片和连接体之间的接触和连接均定义为绑定，对需要施加预紧力的螺栓要定义预紧截面。划分好网格的螺栓有限元模型如图 8 所示。在定义载荷时，对有预紧力的螺栓在要先定义螺栓的预紧力，然后在定义外载。将定义好的有限元模型导入计算软件（如 ANSYS Abaqus 等）中进行计算，将计算完的结果文件在后处理模块中打开，可查看到螺栓的结果。螺栓的应力云图如图 9 所示。校核螺栓的极限强度，可根据螺栓的机械性能等级和应力云图进行判断。

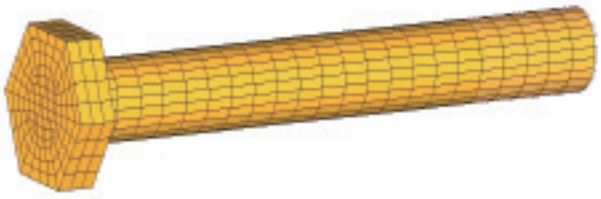


图8 螺栓有限元模型

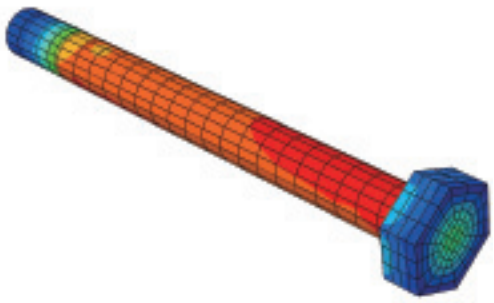


图9 螺栓的应力云图

对螺栓的疲劳寿命进行校核时，需要施加最小螺栓预紧力。风电机组的设计寿命一般为 20 年，在此期间螺栓在外载交变载荷的作用下，容易发生疲劳破坏，因此现对螺栓进行疲劳分析。螺栓疲劳分析的步骤如下：

（1）对模型施加螺栓预紧力和相关的疲劳载荷；

（2）从有限元分析结果中提取螺栓轴向应力；

（3）根据外载荷和螺栓轴向应力之间关系拟合出外载与螺栓轴向应力的公式；

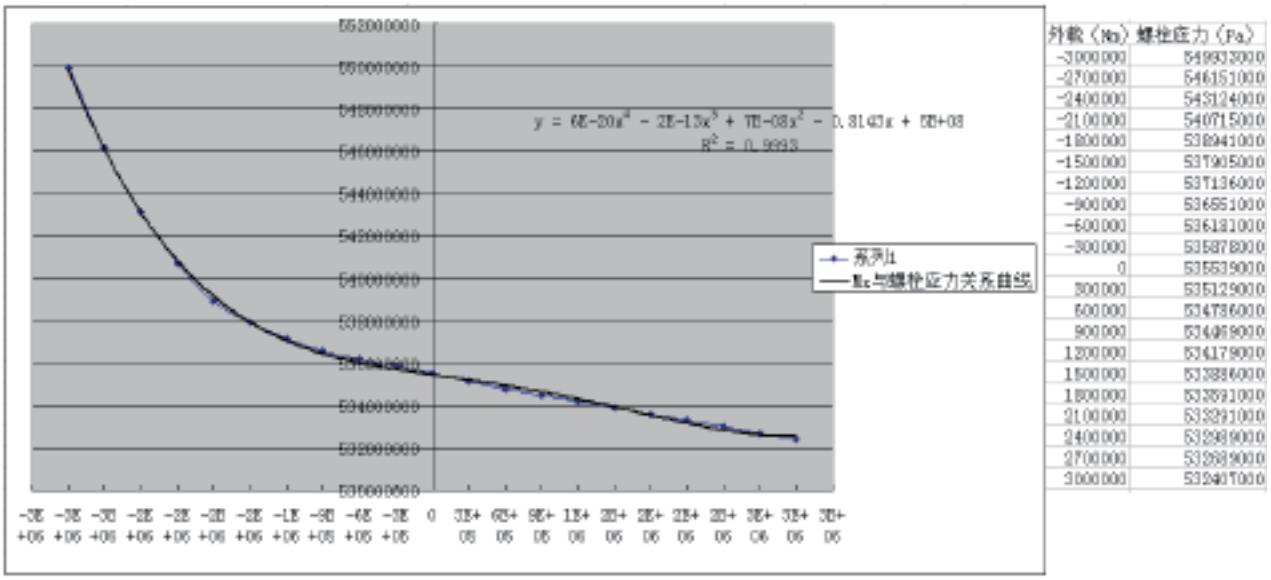
（4）根据外载与螺栓轴向应力的拟合公式和载荷时间历程生成各载荷对应的螺栓轴向应力时间历程，并对不同载荷下的应力时间历程进行多通道合并，生成通道合并后的应力时间历程；

（5）根据通道合并后的应力时间历程、每年各个工况的发生次数以及螺栓材料 S-N 曲线，使用 FE-Safe 软件分析得到螺栓计算寿命；

（6）根据螺栓计算寿命反推出对应的的等效疲劳正应力，再结合 GL 规范中规定的螺栓局部安全系数计算螺栓的损伤值。

利用通道合并功能，应用疲劳载荷的载荷时间历程，并利用螺栓上所施加载荷与其应力关系，生成该螺栓应力时间历程，应用 FE-Safe 软件计算得到螺栓计算寿命。根据寿命值和螺栓的 SN 曲线可得到螺栓的等效疲劳应力△ σ bolt。

根据 GL 规范 5.3.3.4.1 节规定的方法，螺栓件 S-N 曲线的设置需要遵循 Eurocode 3.1.9 的规定。参照 Eurocode 3.1.9。选取螺栓的疲劳等级，当连接螺栓的直径大于 30mm，要根据 GL 规范中的公式（KS=（30mm/d）0.25）对 S-N 曲线中的许用应力进行修正。



外载（Nx）	螺栓应力（Pa）
-3000000	549932000
-2700000	546151000
-2400000	543124000
-2100000	540715000
-1800000	538041000
-1500000	537905000
-1200000	537136000
-900000	536551000
-600000	536181000
-300000	535878000
0	535539000
300000	535129000
600000	534736000
900000	534469000
1200000	534179000
1500000	533886000
1800000	533591000
2100000	533291000
2400000	533069000
2700000	532989000
3000000	532907000

图10 外载和螺栓轴向应力的关系

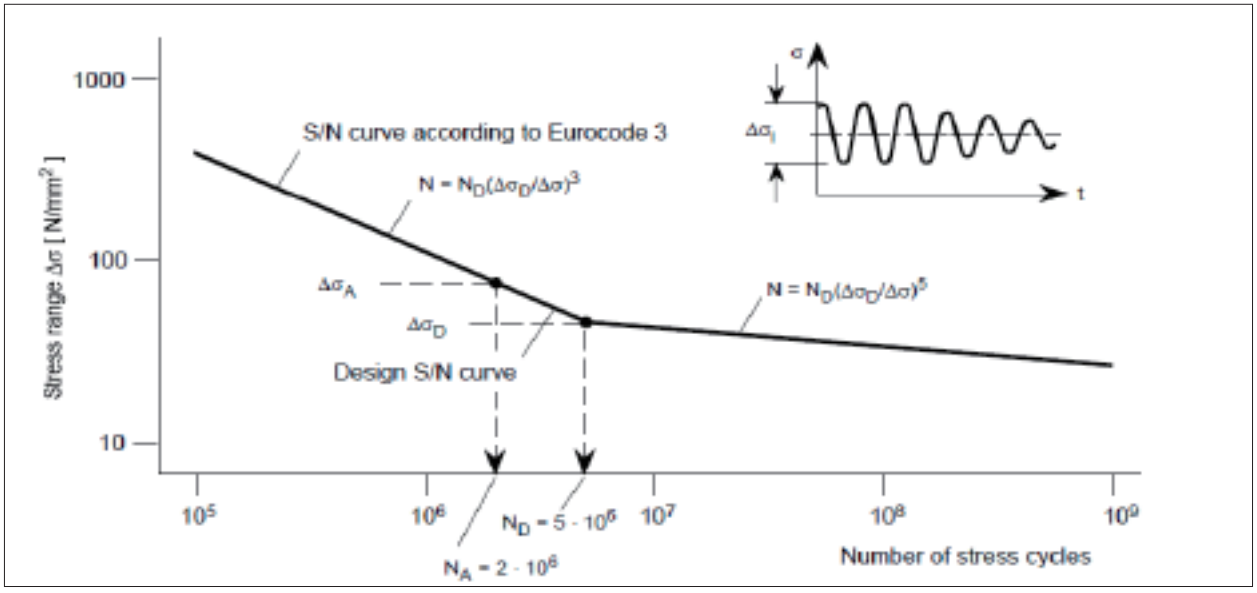


图11 GL规范给出的螺栓SN曲线

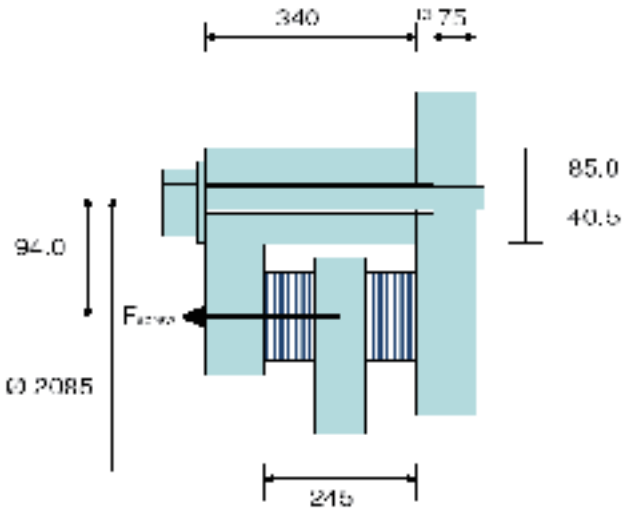


图12 某螺栓连接结构尺寸

根据 GL 规范中 5.3.3.2.2 中的要求，使用简化的疲劳分析方法对螺栓进行疲劳分析时，应考虑局部安全系数，根据 GL 规范中的表格 5.3.1 的描述，取局部安全系数 γ_m 为 1.15，并根据螺栓疲劳损伤公式$\left(\frac{\gamma_m \Delta\sigma_{ion}}{\Delta\sigma_{ion,d}}\right)^4$，可以计算出各螺栓的损伤，当受伤值小于 1 时即为满足要求。

5.2 螺栓强度分析VDI2230工程算法

VDI2230 由德国工程协会出版，向设计人员展示了螺栓连接领域中的最新成果，并推荐一种系统计算方法，以帮助设计人员正确设计螺栓连接。

利用 VDI2230 标准进行设计计算的基本步骤如下：

（1）根据被连接件的结构和螺栓所承受的极限载荷计算出螺栓所承受的轴向力和切向力；

（2）初步选择连接螺栓；

（3）根据拧紧工具确定拧紧系数；

（4）计算出防止接触面分离需要的最小夹紧力；

（5）计算由于拧紧导致的预紧力损失量；

（6）计算螺栓装配所需最小预紧力；

（7）根据所选择扳手的分散系数和最小装配预紧力确定最大装配预紧力；

（8）选择螺栓设计使用的屈服极限，计算装配预紧力；

（9）计算并校核交变应力；

（10）计算并校核表面压力；

（11）计算并校核最小啮合长度；

（12）确定放松安全裕度和剪切应力并校核；

（13）计算确定拧紧力矩。

根据 VDI2230 对风电机组中某个螺栓计算：

使用 30 个 M48×440 精度为 10.9 的六角头螺母进行连接。将螺栓插入机架上已攻丝的通孔中。垫圈使用 125 型 Moser 垫圈，材料等级为 12。夹紧法兰的材料是 EN-GJS-400-18-LT，主框架的材料是 S355K2 +N。

根据结构尺寸和外载计算出螺栓所承受的轴向力和切向力，并使用螺栓计算程序 HEXAGON SR1，版本 17 进行计算。计算的输出结果如图 13 所示。

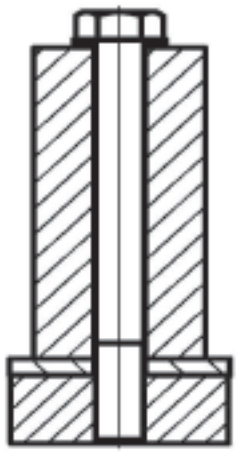
可根据输出的结果确定该螺栓所需拧紧力矩，但需要注意的是，程序中给定的扭矩系数 K 受厂家、润滑剂和涂抹方式的影响较大。所以建议根据输出结果中的预紧力，结合实际的螺栓厂家以及使用的润滑剂和涂抹方式（如螺栓螺纹和垫圈都涂抹），通过扭矩系数试验测得 K 值。根据以下公式确定生产现场所需要施加的拧紧力矩 T：$T = K \cdot F \cdot d$

其中，d – 螺纹直径。

6 结论

由于机架的结构和受力复杂，对其进行静强度分析时采用有限元算法，施加 16 个轮毂中心极限工况载荷和电机悬臂等载荷。对机架进行疲劳寿命分析时，对有限元模型施加静止坐标系下轮毂中心位置的单位载荷，提取出要分析热点对应 0.4T 和 1T 位置的相应应力值，再通过线性差值得到焊址处应力。根据单位载荷和焊址处应力的关系，对疲劳载荷普利用通道合并和雨流统计方法得到焊缝的等效疲劳载荷，再根据 GL 规范提供的材料 SN 曲线和循环次数得到许用疲劳正应力和许用疲劳正应力，利用 EC 3 1-9 中提供的焊缝疲劳损伤判据判断热点是否安全。考察了机架的固有频率，防止风电机组工作中机架与在其它振源激励下发生共振。最后介绍了目前机组结构螺栓计算所使用的有限元法和依据 VDI2230 的工程算法，对机组结构螺栓进行设计和校核计算。

HEXAGON SR1+ Bolted Joint Design to VDI 2230 V17.0



ISO 4014 - M48 x 440 - 10.9 SW75

i	de [mm]	di [mm]	l [mm]	material
1	92.0	53.0	4.5	Moserscheible 42CrMoS4 V
2	92.0	49.0	4.5	Moserscheible 42CrMoS4 V
3	170.0	52.0	340.0	0.6040 GJL400 (GG-40)
4	218.0	52.0	18.0	1.0570 S355J2G3 (St 52-3)

through bolted joint with nut (DSV)		
nut dw= 215, h= 75 mm		
h M	mm	75.0
m tr	mm	73.0
m min Rmmax VDI2230 / Dose	mm	58.7 / 66.0
m min FSmax VDI2230 / Dose	mm	44.7 / 50.4

LOAD		
FA max	N	349024
FA min	N	349024
FQ	N	0
FKreq	N	475466
FKR min	N	475466
FM,Re	N	1269095
FM,max	N	1167567
FMmax,req	N	1167567
FMmin,req	N	833977
fz	mm	0.015
Fz	N	10164
FV min,req	N	823812
FV min	N	823812
FV max	N	1157403
FSA max	N	677.7
FPA max	N	346346
FS max	N	1168245
FS,Re	N	1384760
FS,Rm	N	1532075

ASSEMBLY (Bolt driven)		
nue Rp		0.92
alpha A		1.40
MA max/min	Nm	8198 / 7275
alpha max/min	deg	124 / 88.61

FRICTION	min	max
uG	0.110	0.140
uK	0.110	0.140
uTr	0.300	
K	0.146	

FACTORS OF SAFETY		
safety against loosening	FM,max/FMmax,req	1.00
safety yield point red.B	SF=Rp/Sig,redB	1.12
safety plate surface pressure	Sp=pG/pmax	1.48
safety against disengagement	FKRmin/FKab	0.86
thread strip safety at Rm,max	m tr / m min.	1.11
thread strip safety at FM,max+FSA	tau Rm / tau B,M	1.55
Warning: exz. FK<FKerf2 !		
Error : exz. FK<FKerf2 disengag.!		

Copying of this document and giving it to other and the use or communication of the contents thereof, are forbidden without express authority. Offenders are liable to the payment of damages. All rights are reserved in the event of the grant of a patent or the registration of a utility model or design.

Cond.	Modification	Date	Name

	Date	Name
Compl	09/21/2010	
Check		
Stand		

clamping plate_mianframe

Page

Pg.

CSR Zhuzhou Electric Locomotive Instit.

D:\Hexagon\SR1\clamping plate-main frame.sr1 09/29/2010 10:35

09/29/2010 10:35 - HEXAGON SR1+ V17.0 #0423 - CSR Zhuzhou Electric Locomotive Instit. - D:\Hexagon\SR1\clamping plate-main frame.sr1

图13计算程序HEXAGON SR1输出结果

首届“中国工程院 / 国家能源局能源论坛”及论文征集通知

目前，我国经济仍处于快速发展期，能源供给成为支撑经济增长的关键因素，如何实现能源利用与环境保护相协调，是我国能源界面临的严峻挑战。为此，定于 2010 年 11 月在北京召开首届“中国工程院 / 国家能源局能源论坛”，联合国家相关部委、省、自治区、直辖市及主要能源企业和科研机构，共同探讨、全面了解我国能源的现状、技术发展和改革的情况，集百家智慧，为我国的能源发展建言献策。

本次会议的主题为“科技创新促进中国中国能源可持续发展”。会议将探讨我国现代化建设持续、全面、健康发展对能源的需要，更好地服务和推动环境友好型、资源节约型社会的建设，在政府部门、能源企业、科研机构和专家学者之间架起一座互相沟通的桥梁，加强思想交流，为企业的发展提供理论指导，为国家能源政策和战略的制定提供信息资源和决策依据。

会议基本情况

1、主题：科技创新促进中国中国能源可持续发展

2、形式：大会报告、分会报告。大会设 4 个分会，分别是石油天然气煤炭分会、核能和电力分会、可再生能源分会、节能减排和政策管理分会。

3、时间（拟）：2010 年 11 月 17 日—19 日

4、地点：北京会议中心（北京朝阳区来广营西路 88 号）

会议组织结构

主办单位：中国工程院　国家能源局

支持单位：（拟邀请）

国家发展和改革委员会	教育部
科学技术部	工艺和信息化部
国土资源部	环境保护部
国务院国国有资产监督管理委员会	国家安全生产监督管理总局
中国科学院	国家电力监督委员会
中国科学技术协会	中国石油和化学工业联合会
中国煤炭工业协会	

协办单位：（拟邀请）

中国石油天然气集团公司	中国石油化工集团公司
中国海洋石油总公司	国家电网公司
中国核工业集团公司	中国广东核电集团有限公司

承办单位：中国工程院能源与矿业工程学部中国石油集团钻井工程技术研究院（油气钻井技术国家工程实验室）

中国石油勘探开发研究院廊坊分院

华鼎鸿基石油工程技术（北京）有限公司

创新中国杂志社

论文征集

此次学术会议将面向各单位、各位院士、专家、学者广泛征集能源领域论文。论文截稿日期为 2010 年 7 月 30 日。所收论文将由组委会送交会议学术委员会审核，论文被录用后将收入《首届“中国工程院 / 国家能源局能源论坛”论文集》，并正式出版。

会议组委会联系方式

电话：022-23519125；022-23330582

传真：022-23330582

地址：天津市河西区吴家窑大街 22 号

邮编：300074

电子邮箱：luntan@linkinfo.com.cn

网址：www.nengyuan.tjst.net

风险如何防御?

面对雷击等诸多安全隐患，菲尼克斯电气凭借全球领先的电气控制与连接，雷电防护的综合解决方案，帮助风电设备制造商提升产品质量，消除安全隐患，并将维护成本减至最少，而今愿为中国风电产业的健康发展，成就坚实后盾。

作为电气连接、电子接口、工业自动化和防雷及浪涌保护领域的市场引领者，菲尼克斯电气业已成就的卓越业绩不仅停留于今天，同样会在你可以想像的未来。

始于创新 · 精于细微

菲尼克斯电气

Tel:025-52121888

www.phoenixcontaat.com.cn

PHOENIX CONTACT

INSPIRING INNOVATIONS

© PHOENIX CONTACT 2009 AD-IM-0903

Wind Plus+

致力于清洁高效 Green and Effective

风力机变流器 Power Converter

阳光电源拥有多年的风机变流器研发经验并承担了“十一五”国家科技支撑计划重大项目课题。

拥有完全自主知识产权，可方便与市场主流机型配套。产品已与湘电风能、东汽、山东长星、江西麦德等成功配套，并成功运行于内蒙古通辽、山东烟台、福建六鳌、辽宁仙人岛等风场。

➢全功率变流器

规格：850KW、1.5MW、2MW等

➢双馈型变流器

规格：1MW、1.5MW、2MW、3MW等

2010北京国际风能大会暨展览会
10月13日-15日
地点：中国国际展览中心（新馆）
展位号：E1馆 E816

SUNGROW 阳光电源 合肥阳光电源有限公司 SUNGROW POWER SUPPLY CO., LTD.

地址 安徽省合肥市高新区天湖路2号 (230088) 传真 0551-5327873
E-mail windysale@sungrowpower.com 网址 www.sungrowpower.com

销售热线 (0551) 532 7801 7828