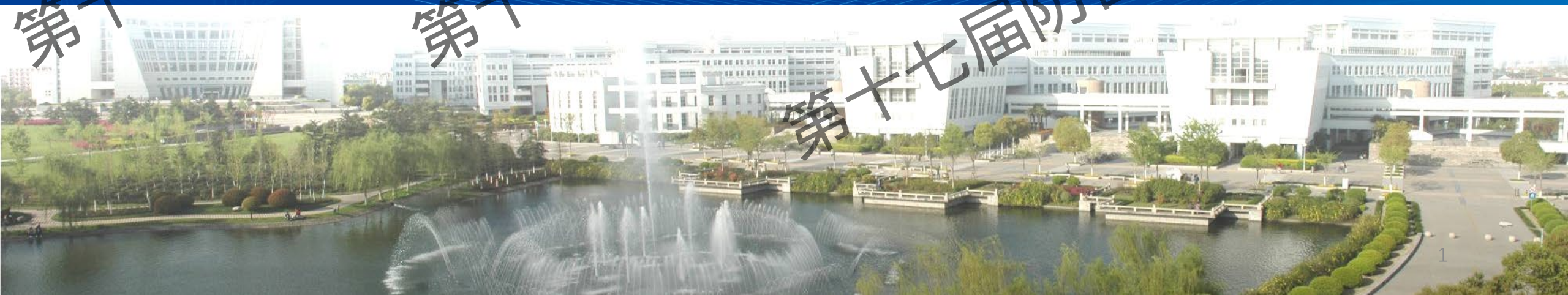


基于机器学习的海上风电场雷击风险区域 划分研究及防雷国际标准介绍

周歧斌

上海大学电气工程系

2023年10月17日

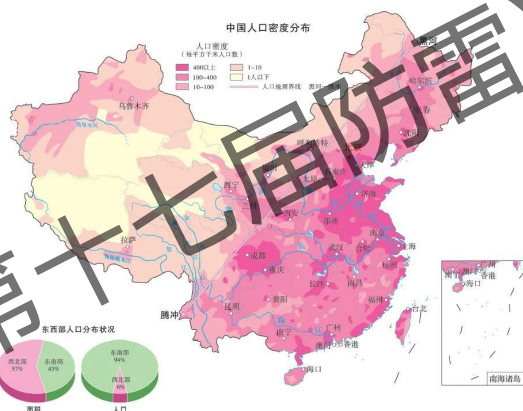




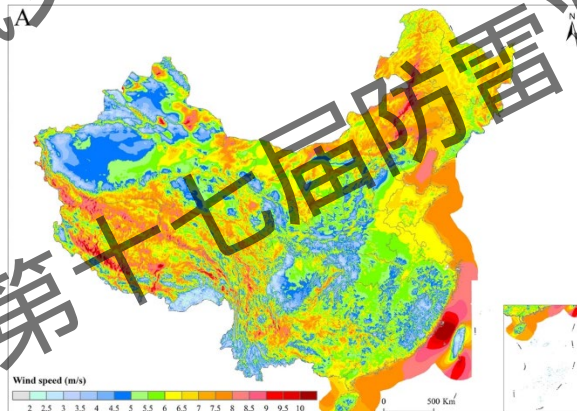
海上风电



当前世界各国都面临着严峻的能源环境危机。目前的能源结构和传统技术不能满足绿色低碳的发展要求，各国正在积极推动“双碳”战略以应对环境变化、能源短缺等切实问题。风能作为新能源非常重要的一部分，正受到广泛的关注。

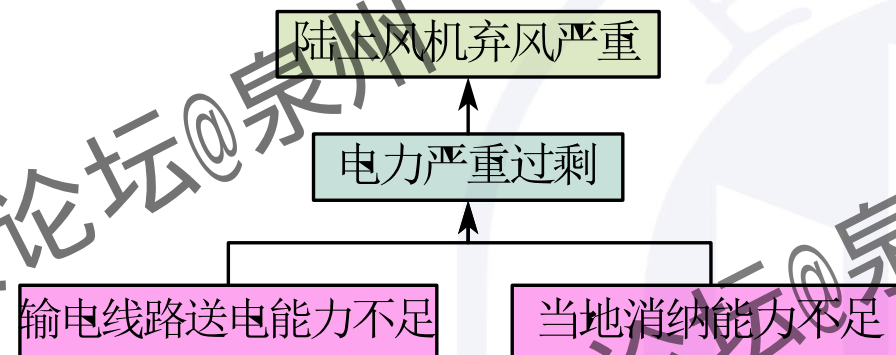


人口密度图



风能资源分布图

风能资源和人口分布不一致

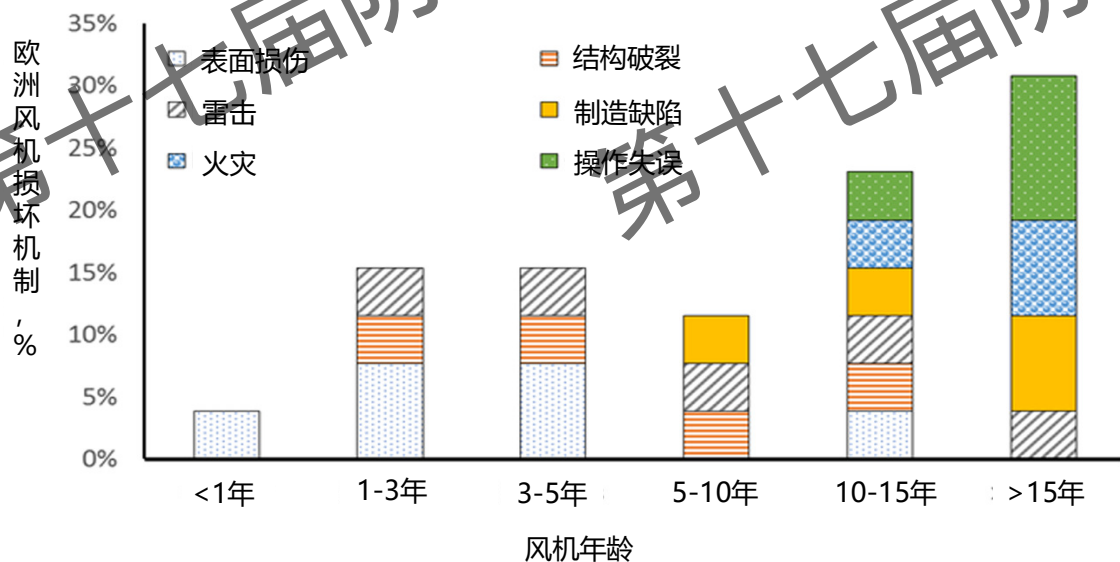




风机雷击损坏



极端自然灾害会使电力设施严重损毁，风电等发电出力受阻，局部地区电网停电并进一步引发电网大面积停电事件应急状态。**而雷击是威胁风机安全可靠运行的主要自然灾害之一。**根据IEC所提供的数据，在欧洲每100台风机有4-8台会因雷击而受损，海上风电场的防雷问题正受到密切关注。



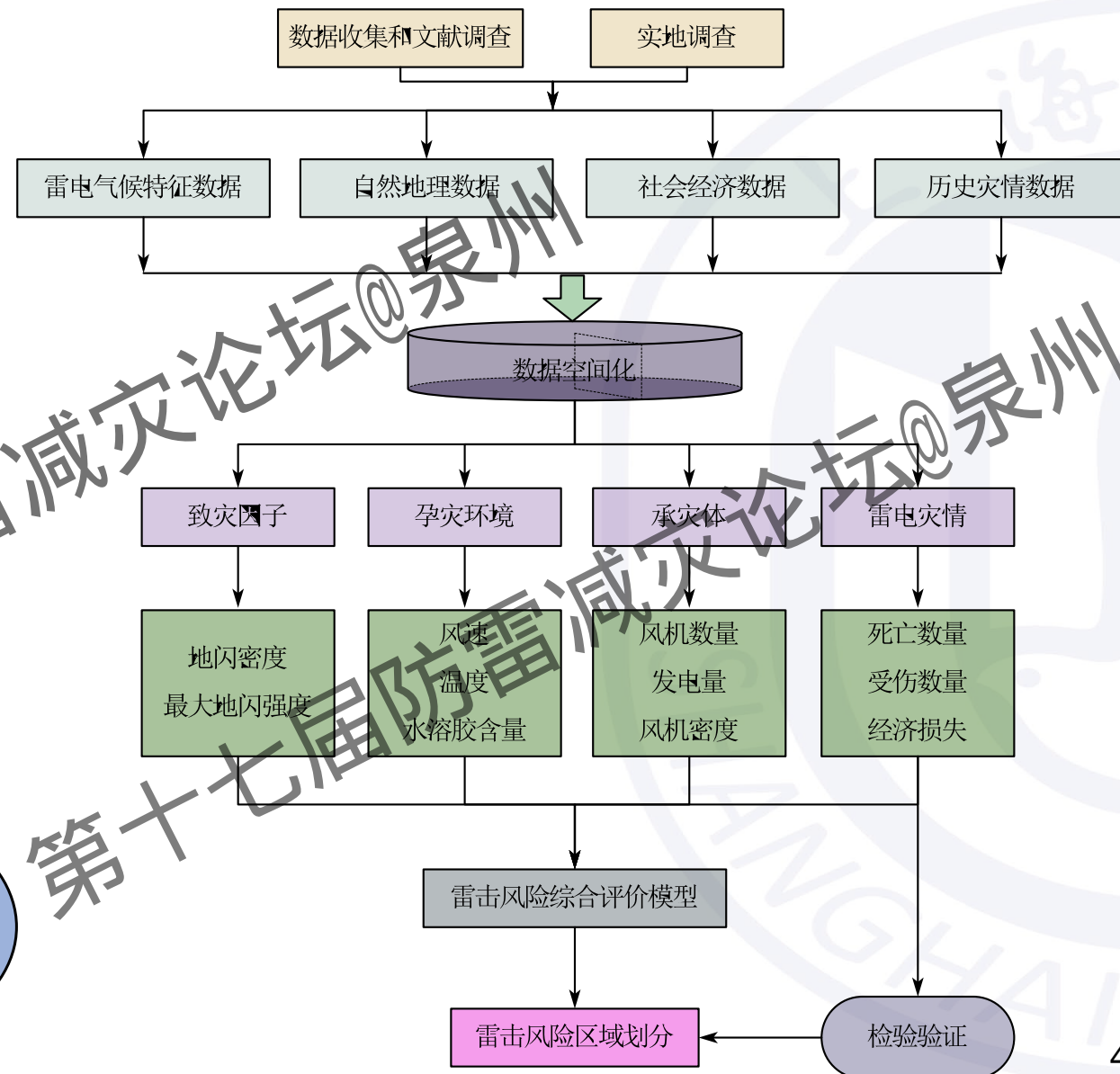
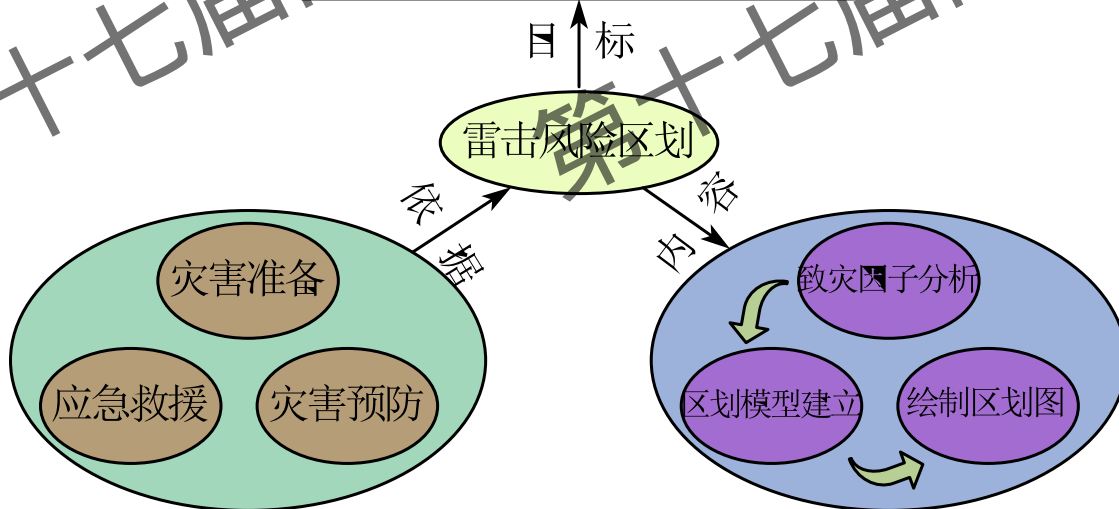


雷击风险区划概述



雷击风险区划以实现系统防雷为目的，运用科学的原理和方法，对系统可能遭受雷击的概率及雷击后产生后果的严重程度进行分析计算，有利于在防雷工程规划，设计、施工、运行管理中向相关单位提供科学合理、经济安全的指导意见。

以最少的成本获得最大安全保障

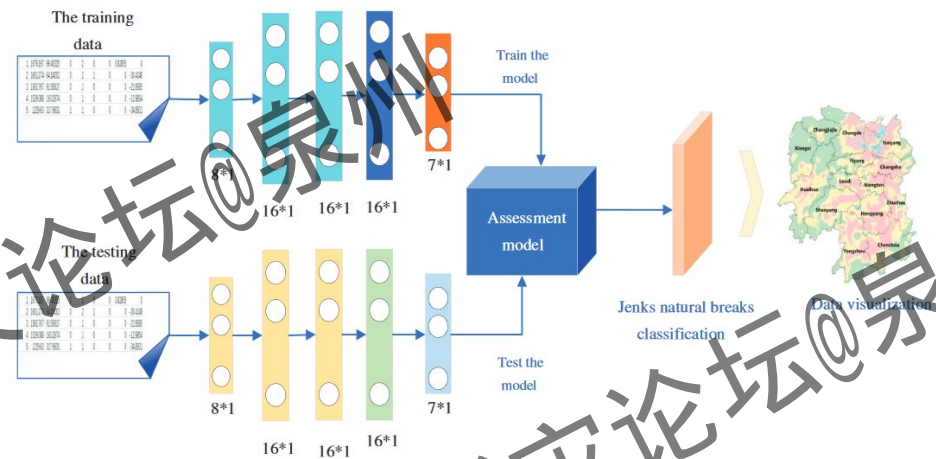




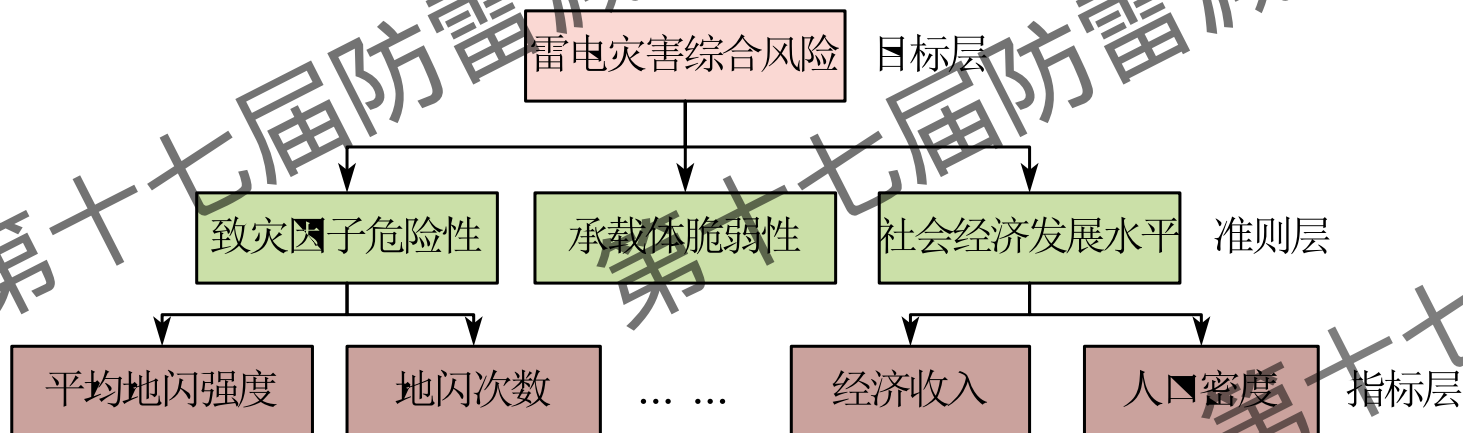
人工智能应用于雷击风险区划



传统雷击风险评估方法中存在**权重分配不合理**、**评估分辨率较为粗糙**等问题，而**人工智能技术**以历年雷灾**数据为驱动**，能有效解决传统方法在分配权重过程中存在偏差的问题。



基于人工智能的雷击风险评估体系



传统雷击风险评估体系

- Sheng J等人通过**支持向量机**探讨一种人工智能技术与雷击风险区划结合的方法。
- Zhang Y等人首次将**k-means**算法和**神经网络**应用于雷击风险区划中，解决了数据不平衡问题。

$$S = \bigcup_{j=1}^c S_j$$



半监督K-means算法



给定数据集 $D = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 是标签数据。 S_j 是属于第 j 个聚类的数据。将 c 类标签数据的中心设置为 c 个聚类中心。剩余 $k-c$ 个聚类中心随机从未标记数据中选取。在每次迭代中, 标签数据与其聚类的从属关系不变。

半监督K-means 算法	
输入:	数据集 $D = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 标签数据 $S = \bigcup_{j=1}^c S_j$, 聚类数量 k ($k > c$)
输出:	聚类 $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$
步骤 1:	将 c 类标签数据的中心设置为 c 个聚类中心, 剩余 $k-c$ 个聚类中心随机从未标记数据中选取。
步骤 2:	使用方程: $d(x_k, x_i) = x_k - x_i ^2$, 计算聚类中心和每个未标记样本的距离。
步骤 3:	将标签数据放入所属的聚类中; 将每个未标记样本放入最近的聚类中。
步骤 4:	将聚类中数据的中心设为新的聚类中心。
步骤 5:	如果聚类中心不变, 算法停止; 否则, 跳转到步骤 2。

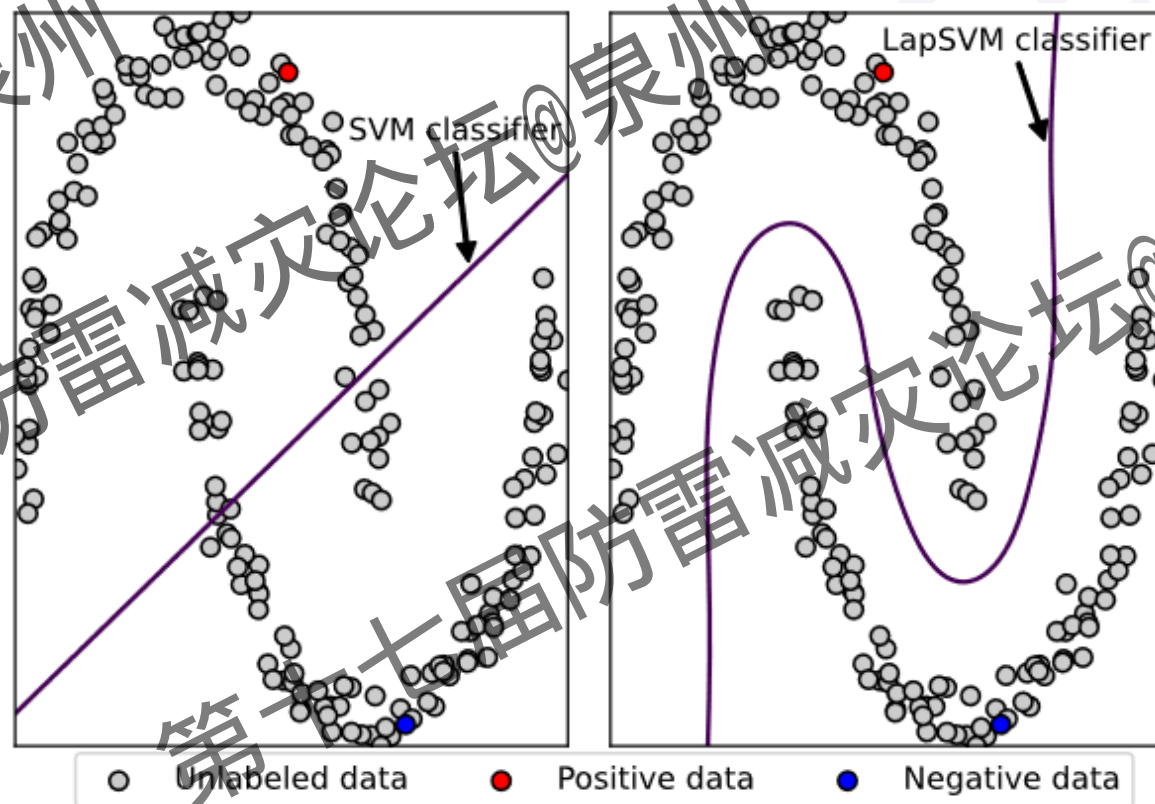
$$S = \bigcup_{j=1}^c S_j$$



拉普拉斯支持向量机



拉普拉斯支持向量机 (Laplacian support vector machine, LapSVM) 是基于图的半监督学习算法。它基于流形假设, 使支持向量机 (support vector machine, SVM) 能获取数据的边缘几何分布信息, 克服了传统SVM需要大量标记数据的问题。





粒子群算法



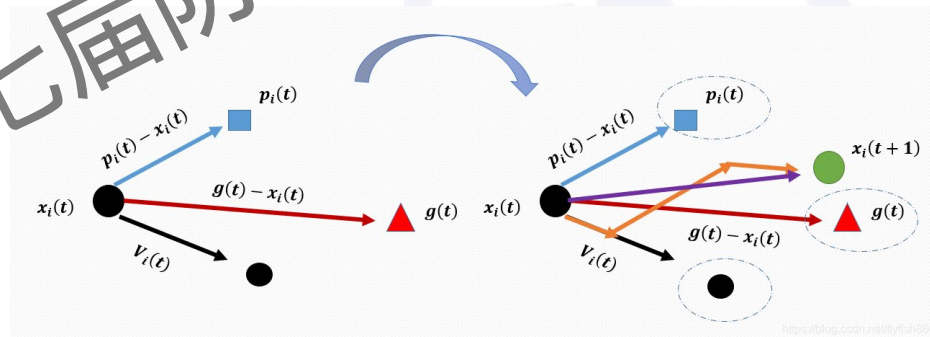
超参数优化问题是改善机器学习算法性能的关键问题之一。使用粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法获得LapSVM的最优超参数 γ_H 、 γ_M 、 σ 。PSO算法是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的搜索算法。PSO算法包含N个粒子, 第i个粒子表示为一个D维的向量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, $i=1, 2, \dots, N$, 第i个粒子的速度表示为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, $i=1, 2, \dots, N$ 。在每次迭代中, 每个粒子的速度和位置通过以下方程更新:

$$v_{id} = w \times v_{id-1} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id})$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id}$$

其中 p_{id} 是第i个粒子的个体最优位置, p_{gd} 是全局最优位置, c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 是0~1之间的随机数, w 是惯性权重。

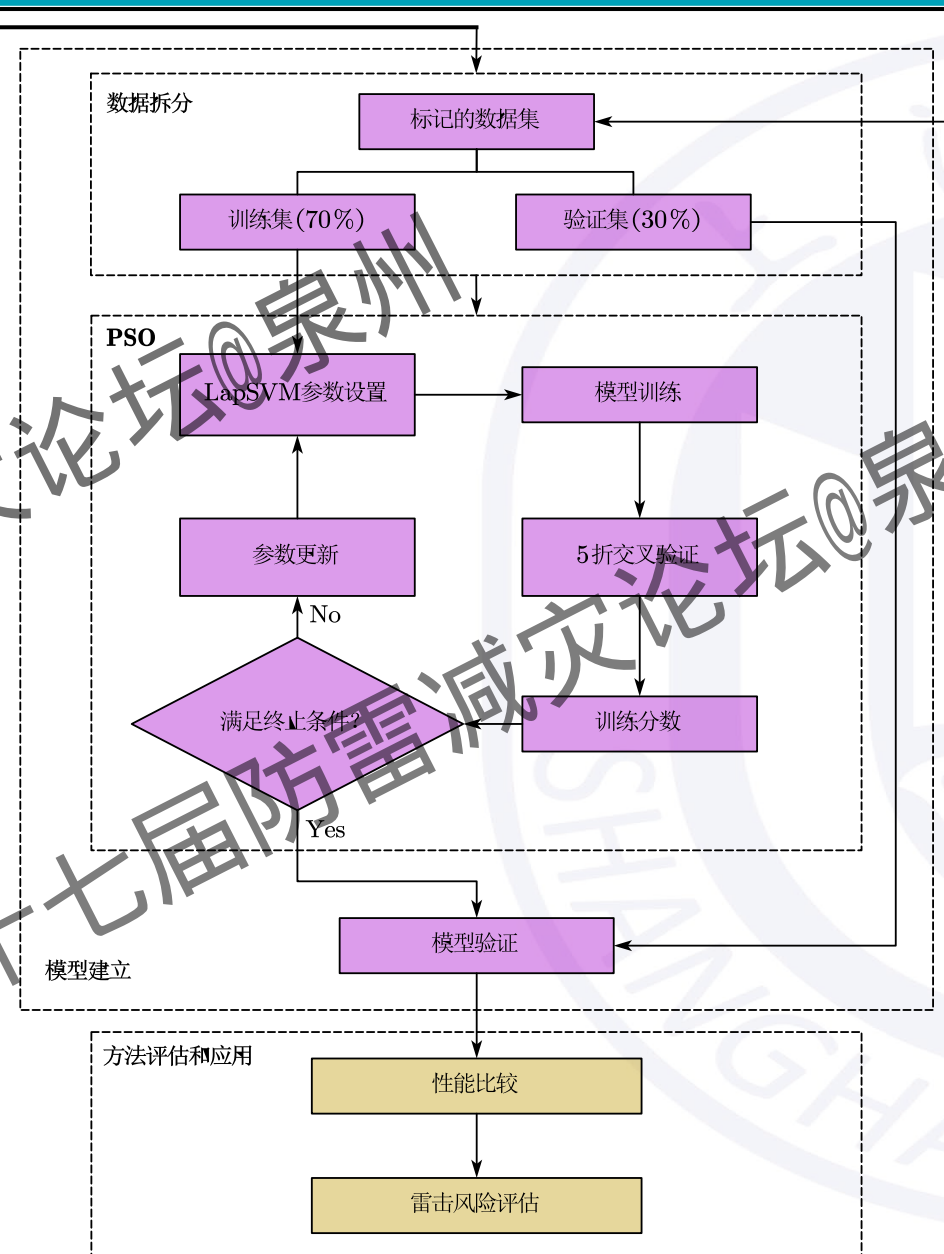
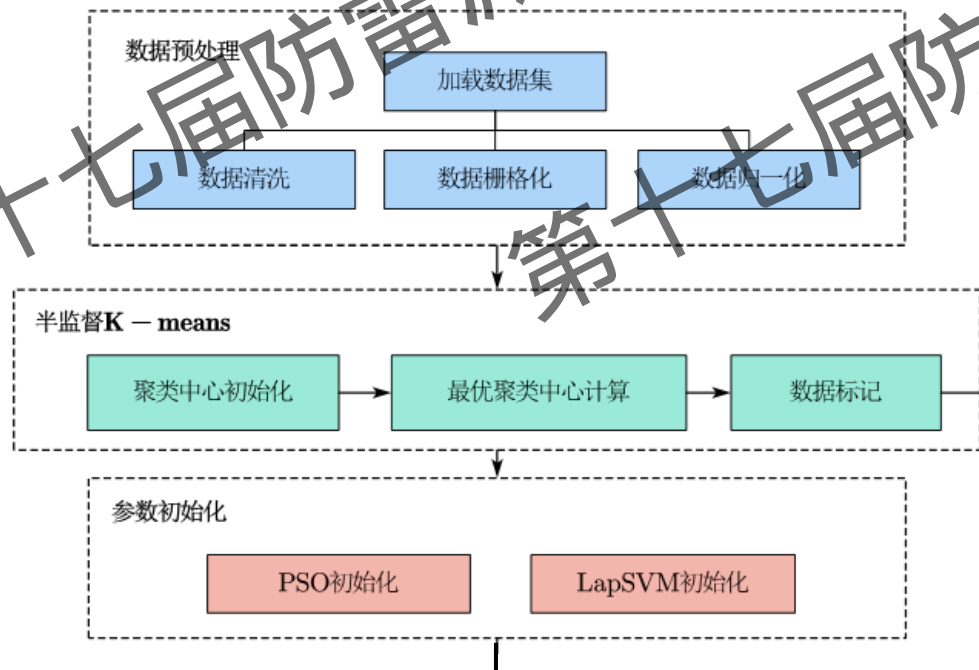
在PSO算法的流程中, 通过改变粒子速度更新粒子位置并最终获得全局最优位置。在本研究中, 粒子通过 $P(\gamma_H, \gamma_M, \sigma)$ 表示。使用ROC曲线下面积 (receiver operating characteristic curve - area under the curve, ROC-AUC) 的平均值和5折交叉验证来评估优化过程中算法的性能。当误差小于界限或迭代次数达到最大时, 算法终止。



$$S = \bigcup_{j=1}^c S_j$$

海上风电场雷击风险评估

研究区域被分为4074个 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的网格。使用的数据集包含4424909个数据。依据IEEE文件中提出的质量控制方法，删除峰值在0~2kA之间以及大于200kA的雷电数据。所有数据被栅格化并转化为年度数据。最终留下23084个数据，包括97个标记数据。数据包含平均雷电峰值，最大雷电峰值，雷击次数，风机容量，风机接闪器数量和风机数量。

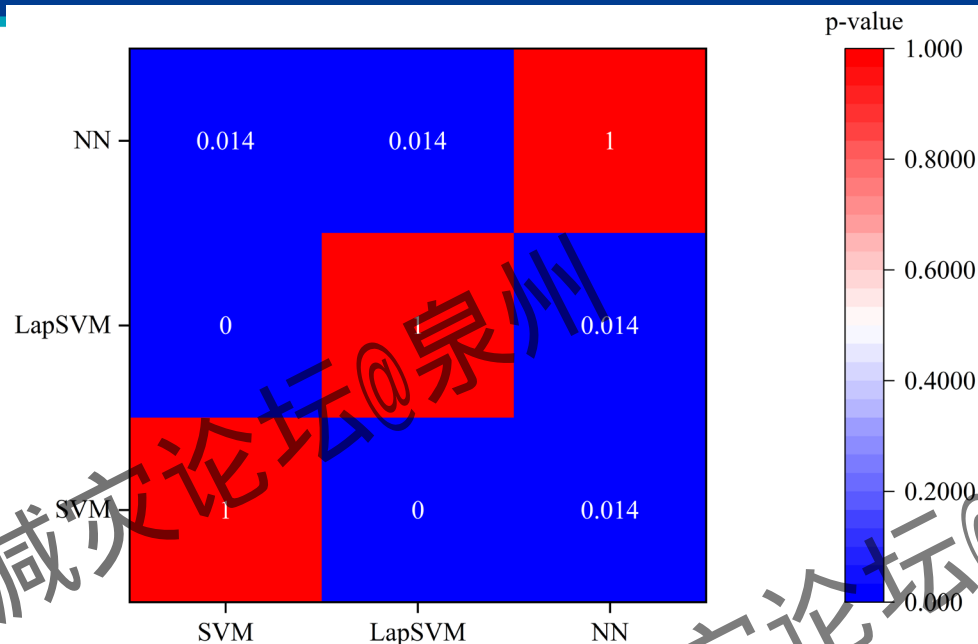




算法性能比较



为了验证提出方法的可靠性，将提出的方法和其他机器学习算法分别比较在训练集和验证集下的预测结果。与其他算法进行比较后可以看出，LapSVM可以在标记数据有限的情况下训练出优秀的性能。



	训练集下的 精确度	训练集下的 召回率	训练集的精 确度	训练集的召 回率	训练集下的 ROC-AUC
SVM	100%	100%	77.1%	100%	0.87
LapSVM	100%	100%	96.4%	100%	0.99
NN	100%	100%	88.9%	100%	0.94
Fine-tuned NN	100%	100%	1100%	92.6%	0.96

通过P值可以看出，几种方法之间存在显著性差异。



IEC防雷相关国际标准体系汇报

第十七届防雷减灾论坛@泉州

第十七届防雷减灾论坛@泉州

第十七届防雷减灾论坛@泉州

- 国际电工委员会（**International Electrotechnical Commission**，简称**IEC**）成立于1906年，是世界上成立最早的非政府性国际电工标准化机构，是联合国经社理事会(ECOSOC)的甲级咨询组织。



IEC的组织架构

IEC TC/SCs List of IEC Technical Committees and Subcommittees

About TC/SCs List of TC/SCs Disbanded TC/SCs

Technical Committees 107 Subcommittees 100 Total 207 (TAs of TC 100 not counted) TC/SC Statistics

Technical Committees & Subcommittees Table search: [] OK X

Committee	Title	Publications	Work Programme
TC 1	Terminology	214	12
TC 2	Rotating machinery	74	19
TC 3	Information structures and elements, identification and marking principles, documentation and graphical symbols	40	3
SC 3C	Geographical symbols for use on equipment	13	2
SC 3D	Colour, process, and data sets and their identification	8	1
TC 4	Hydraulic turbines	29	12
TC 5	Steam turbines	6	3
TC 7	Overhead electrical conductors	21	5
TC 8	System aspects of electrical energy supply	11	12
SC 8A	Grid Integration of Renewable Energy Generation	0	7
SC 8B	Decentralized Electrical Energy Systems	2	8
TC 9	Electrical equipment and systems for railways	152	12
TC 10	Fluids for electrotechnical applications	61	5
TC 11	Overhead lines	13	4
TC 13	Electrical energy measurement and control	87	11
TC 14	Power transformers	42	9
TC 15	Solid electrical insulating materials	229	8
TC 17	High-voltage switchgear and controlgear	4	2
SC 17A	Switching devices	43	12
SC 17B	Assemblies	23	7
TC 18	Electrical installations of ships and of mobile and fixed offshore units	47	11
SC 18A	Electric cables for ships and mobile and fixed offshore units	11	2
TC 20	Electric cables	251	7



防雷元件

- 压敏电阻： IEC 60151-X, IEC 61643-33X
- 放电管： IEC 61643-311
- TVS, TSS, SIT等： IEC 61643-321, -341, -351

防雷产品

- 避雷器： IEC 60099系列
- 电涌保护器： IEC 61643系列
- 雷电防护系统部件： IEC 62561系列

防雷系统

- 雷电监测与预警： IEC 62793, IEC 62858
- 建构筑物防雷设计： IEC 62305系列
- 风电机组防雷设计： IEC 61400-24

1

防雷元件IEC国际标准

2

防雷产品IEC国际标准

3

防雷系统IEC国际标准

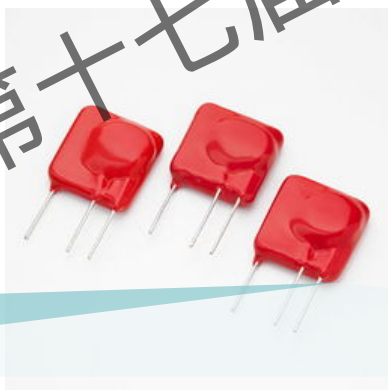


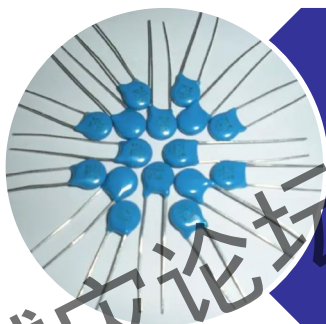
上
SHAN
UNIVERSITY

1
Par

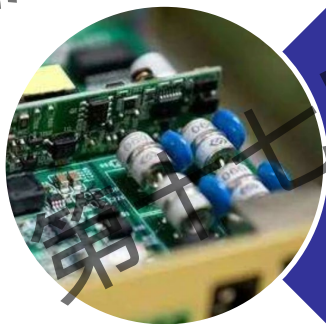
背景

电涌保护元件SPC

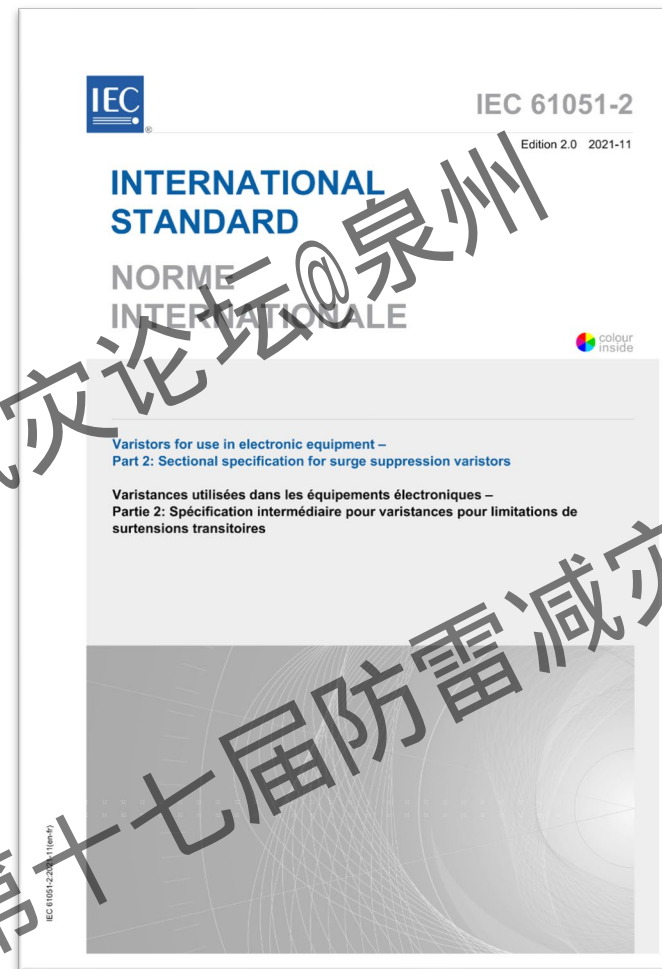
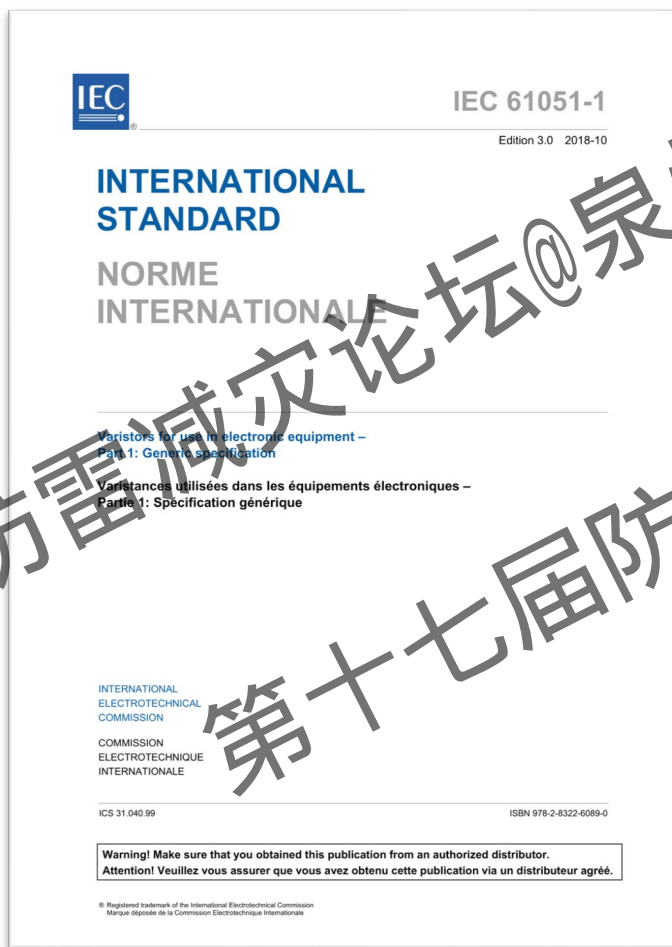




IEC 61051-1 电子设备用压敏电阻 总则

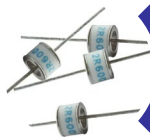


IEC 61051-2 电子设备用压敏电阻 电涌抑制压敏电阻器分规范





IEC SC37B “电涌保护元件”标准系列



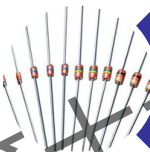
IEC 61643-311 放电管的性能要求和试验方法
IEC 61643-312 放电管的选择和引用



IEC 61643-321 雪崩击穿二极管 (ABD) 规范



IEC 61643-321 压敏电阻的性能要求和试验方法
IEC 61643-322 压敏电阻的选择和引用
IEC TR 61643-333 压敏电阻的寿命和UI特性(起草中)



IEC 61643-341 电涌抑制晶闸管 (TSS) 规范



IEC 61643-351 用于通信和信号系统的隔离变压器SIT的性能要求和试验方法
IEC 61643-352 用于通信和信号系统的隔离变压器SIT的选择和引用



IEC 61643-36X 组合电涌保护元件的性能要求和试验方法 (起草中)



IEC 61643-311

Edition 2.0 2013-04

INTERNATIONAL STANDARD

NORME
INTERNATIONALE

Components for low-voltage surge protective devices –
Part 311: Performance requirements and test circuits for gas discharge tubes
(GDT)

Composants pour parafoudres basse tension –
Partie 311: Exigences de performance et circuits d'essai pour tubes à décharge
de gaz (TDG)



IEC 61643-331

Edition 2.0 2017-12

INTERNATIONAL STANDARD

Components for low-voltage surge protective devices –
Part 331: Performance requirements and test methods for metal oxide varistors
(MOV)



IEC 61643-351

Edition 1.0 2016-10

INTERNATIONAL STANDARD

NORME
INTERNATIONALE

Components for low-voltage surge protective devices –
Part 351: Performance requirements and test methods for telecommunications
and signalling network surge isolation transformers (SIT)

Composants pour parafoudres basse tension –
Partie 351: Exigences de performance et méthodes d'essai pour les
transformateurs d'isolement contre les surtensions dans les réseaux de
signalisation et de télécommunications



目录

1

防雷元件IEC国际标准

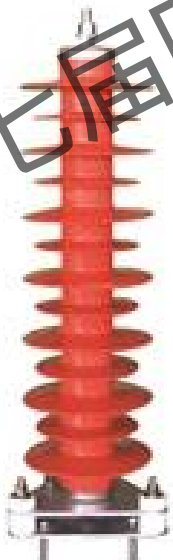
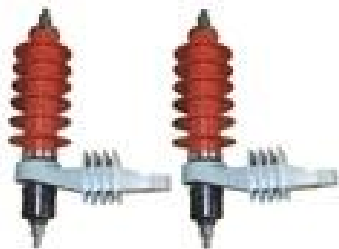
2

防雷产品IEC国际标准

3

防雷系统IEC国际标准

电力避雷器



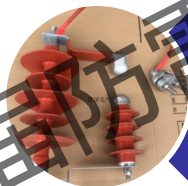
第十七届防雷减灾论坛@泉州



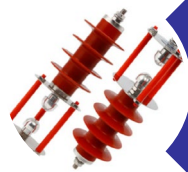
IEC 60099-4 交流系统无间隙金属氧化物避雷器



IEC 60099-5 避雷器的选择和应用



IEC 60099-6 系统电压52kV以下的带串联或并联间隙的避雷器



IEC 60099-8 1kV以上架空线和配电线用带外部串联间隙的金属氧化物避雷器



IEC 60099-9 HVDC换流站用无间隙金属氧化物避雷器

IEC
INTERNATIONAL STANDARD
IEC 60099-4
Edition 3.0 2014-06

INTERNATIONAL
STANDARD

NORME
INTERNATIONALE



Surge arresters –
Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems

Parafoudres –
Partie 4: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour réseaux à courant alternatif

IEC
INTERNATIONAL STANDARD
IEC 60099-5
Edition 1.0 2019-01

INTERNATIONAL
STANDARD



Surge arresters –
Part 5: Selection and application recommendations

IEC
INTERNATIONAL STANDARD
IEC 60099-8
Edition 2.0 2017-11

REDLINE VERSION



Surge arresters –
Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (ESGA) for overhead transmission and distribution lines of a.c. systems above 1 kV

IEC
INTERNATIONAL STANDARD
IEC 60099-9
Edition 1.0 2014-06

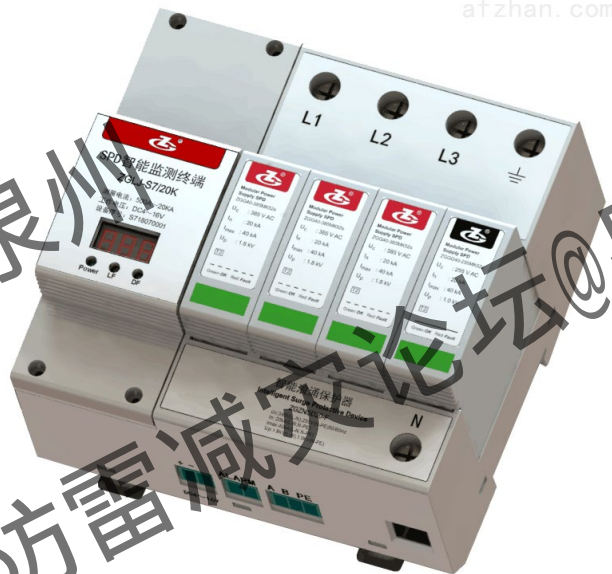
INTERNATIONAL
STANDARD
NORME
INTERNATIONALE



Surge arresters –
Part 9: Metal-oxide surge arresters without gaps for HVDC converter stations

Parafoudres –
Partie 9: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour postes de conversion CCHT

电涌保护器及其附件





IEC SC37A “电涌保护器”标准系列

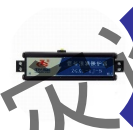


IEC 61643-01 SPD性能要求和测试方法 总则（起草中）



IEC 61643-11 低压交流电源系统SPD的性能要求和试验方法

IEC 61643-12 低压交流电源系统SPD的选择和应用



IEC 61643-21 通信和信号系统SPD的性能要求和试验方法

IEC 61643-22 通信和信号系统SPD的选择和应用



IEC 61643-31 光伏直流侧SPD的性能要求和试验方法

IEC 61643-32 光伏直流侧SPD的选择和应用



IEC 61643-41 低压直流系统SPD的性能要求和试验方法
（起草中）



IEC TS 61643-05 SPD监测装置的性能要求和试验方法（起草中）



IEC TS 61643-06 SPD专用脱离器的性能要求和试验方法
（起草中）



IEC 61643-11

Edition 1.0 2011-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME
INTERNATIONALE



Low-voltage surge protective devices –
Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems –
Requirements and test methods

Parafoudres basse tension –
Partie 11: Parafoudres connectés aux systèmes basse tension – Exigences et
méthodes d'essai



IEC 61643-21

Edition 1.2 2012-07

INTERNATIONAL STANDARD

NORME
INTERNATIONALE

Low voltage surge protective devices –
Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and
signalling networks – Performance requirements and test methods

Parafoudres basse tension –
Partie 21: Parafoudres connectés aux réseaux de signaux et de
télécommunications – Prescriptions de fonctionnement et méthodes d'essais

IEC 61643-21:2000+A1:2008+A2:2012

Copyright International Electrotechnical Commission
Printed by and under license with IEC



IEC 61643-31

Edition 1.0 2018-01

INTERNATIONAL STANDARD

NORME
INTERNATIONALE



Low-voltage surge protective devices –
Part 31: Requirements and test methods for SPDs for photovoltaic installations

Parafoudres basse tension –
Partie 31: Parafoudres pour usage spécifique y compris en courant continu –
Exigences et méthodes d'essai des parafoudres pour installations
photovoltaïques

IEC 61643-31:2018-01(en-4)

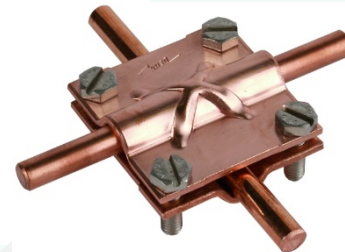
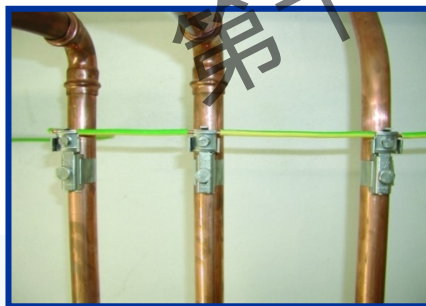
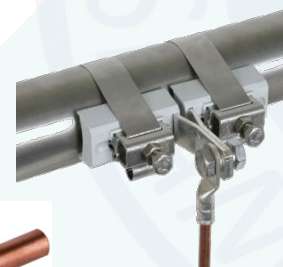


上
SHANGHAI UNIVERSITY

1
Part
t

背景

外部防雷系统部件





IEC 62561-1 连接件的要求



IEC 62561-2 接闪器、引下线 and 接地极的要求



IEC 62561-3 隔离放电间隙的要求和试验方法



IEC 62561-4 导体紧固件的要求



IEC 62561-5 接地板测试箱和接地极密封件的要求



IEC 62561-6 雷击计数器的要求



IEC 62561-7 接地降阻材料的要求



IEC TS 62561-8 LPS隔离部件的要求



IEC 62561-9 危险接触电压防护部件的要求（起草中）



IEC 62561 “外部防雷系统部件” 标准系列

使用方：中国标准化协会



IEC 62561-1

Edition 3.0 2023-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Lightning protection system components (LPSC) –
Part 1: Requirements for connection components

Composants des systèmes de protection contre la foudre (CSPF) –
Partie 1: Exigences pour les composants de connexion

提供机构：国家标准化技术研究中心 网址：www.sac.info.cn 订购：www.sacinfo.cn 订购电话：010-67881000

使用方：TC 81



IEC 62561-3

Edition 2.0 2017-06

INTERNATIONAL STANDARD

Lightning protection system components (LPSC) –
Part 3: Requirements for isolating spark gaps (ISG)

提供机构：国家标准化技术研究中心 网址：www.sacinfo.cn 订购：www.sacinfo.cn 订购电话：010-67881000



IEC TS 62561-8

Edition 1.0 2018-01

TECHNICAL SPECIFICATION

Lightning protection system components (LPSC) –
Part 8: Requirements for components for isolated LPSC

Uit document mag slechts op een beperkt aantal plaatsen gebruik worden gemaakt van een netwerk is alleen
toestaan als een aanvullende licentieovereenkomst met NEN is afgesloten.
This document may only be used on a stand-alone basis. Use in a network is only permitted when a
supplementary license agreement has been concluded with NEN.

谢谢！

第十七届防雷减灾论坛@泉州

第十七届防雷减灾论坛@泉州

第十七届防雷减灾论坛@泉州

