

人工智能 电离层电子总含量(TEC)  
预测技术应用指南

2025 - 05 - 07 发布

2025 - 08 - 07 实施

目 次

前言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 缩略语 ..... 2

5 概述 ..... 2

6 特征因素及获取方法 ..... 3

7 预测评估 ..... 3

8 结果应用 ..... 4

参考文献 ..... 6

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山西省工业和信息化厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对本文件的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省物联网和人工智能标准化技术委员会（SXS/TC22）归口。

本文件起草单位：太原理工大学、中北大学、北方自动控制技术研究所。

本文件主要起草人：李灯熬、赵菊敏、程俊兵、王黎明、赵刚、马强、毕玉、王娟、毋凡铭、降海荣、史丹阳、冯然、赵锦华、张馨方。

# 人工智能 电离层电子总含量(TEC) 预测技术应用指南

## 1 范围

本文件给出了电离层中电子总含量预测的特征因素及获取方法、预测评估及结果应用等的指导。

本文件适用于民用导航中电离层误差的修正和算法的优化，以及无线通信中通信频率的选择、通信故障的预防等。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 31158-2014 电离层电子总含量（TEC）扰动分级

## 3 术语和定义

GB/T 31158-2014界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### 电离层

地球大气中高度范围大约在60 km~1000 km、存在大量自由电子、足以显著影响无线电波传播的区域。

[来源：GB/T 31158-2014, 2.1]

### 3.2

#### 电子总含量

一定电离层高度上单位面积内的总自由电子含量，代表了单位面积内沿高度方向的电子浓度积分。

注：总电子含量的单位为TECU，1 TECU= $10^{16}/\text{m}^2$ 。

[来源：GB/T 31158-2014, 2.2, 有修改]

### 3.3

#### 皮尔逊相关系数

衡量两个变量之间的线性相关程度。

注：其值介于-1和+1之间，+1表示完全正相关，-1表示完全负相关，0表示无相关。

### 3.4

#### 决定系数

衡量回归模型对数据集的拟合优度。

注：其值最大为1，最小为0，当值越接近于1，则说明模型越好。

### 3.5

#### 太阳 F10.7 指数

太阳 10.7cm 波长（2800MHz）的射电辐射通量，表征太阳活动水平。

注：单位为“太阳通量单位”（sfu），其取值的范围在60到300之间。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AE: 极光电集流指数 (Auroral Electrojets)

Dst: 磁暴环电流指数 (Disturbance storm time)

LT: 当地时间 (Local Time)

GNSS: 全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System)

RTKLIB: 全球导航卫星系统GNSS的标准和精密定位开源程序包 (Real-Time Kinematic LIBrary)

SSN: 太阳黑子数 (Sun Spot Number)

TEC: 电离层电子总含量 (Total Electron Content)

5 概述

影响电离层TEC变化的主要因素包括但不限于：

- 太阳活动；
- 地磁活动；
- 时间；
- 位置。

因此，获取特征因素、通过特征选择并按照设定的算法可以进行 TEC 的预测和指标确定等活动，从而预测电离层中 TEC 总量。电离层 TEC 预测技术及应用如图 1 所示。

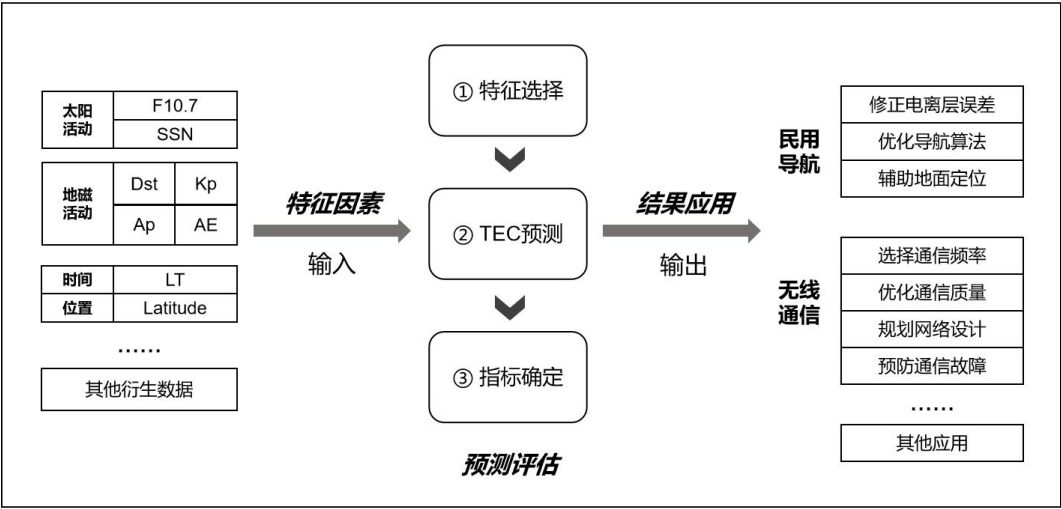


图 1 电离层 TEC 预测技术及应用

TEC 预测技术的基本流程包括：

- a) 获取特征因素；
- b) 特征选择；
- c) TEC 预测；
- d) 确定指标；
- e) 输出应用结果。

通过使用 TEC 预测技术，可以有效地为民用导航和无线通信等提供电离层误差的修正、算法的优化、通信频率的选择、通信故障的预防等。

6 特征因素及获取方法

6.1 特征因素

影响TEC预测的主要特征因素如表1所示，除此之外还可能有各类特征的衍生数据，可以根据具体情况选择。

表 1 特征因素

监测指标		描述
太阳活动指标	F10.7	太阳 10.7cm 波长（2800MHz）的极端紫外辐射通量指数
	SSN	太阳黑子数
地磁活动指标	Dst	赤道磁暴环电流指数，反映磁暴的强烈程度
	Kp	行星际 3 小时指数
	Ap	3 小时等效地磁扰动幅度
	AE	极光电流指数，描述极光地带的地磁扰动程度
时间指标	LT	当地时间
位置指标	Latitude	纬度

6.2 获取方法

6.1中的特征因素通常是使用GNSS数据处理软件（如RTKLIB等）对双频GNSS观测数据进行处理获得，可从中国气象局、国家空间科学中心等官方部门公开获取。

7 预测评估

7.1 特征选择

对特征因素进行特征选择时，需要考虑特征因素与预测目标的相关性。特征选择方法可以选择如随机森林、支持向量机等单一或集成方法，主要是通过分析相关性来评估特征的重要性，最终获得最优特征。

7.2 TEC 预测

对TEC序列进行预测时，需要将经过特征选择后的特征因素输入神经网络或算法。预测方法可以选择如时间卷积网络、长短期记忆网络等方法，主要是捕捉电离层特征因素的非线性变化，最终获得TEC预测结果。

7.3 指标确定

7.3.1 相关指标

统计学中有多类指标能够用于描述和评估预测技术的性能和准确度，TEC预测技术可以使用皮尔逊相关系数和决定系数作为预测评估的指标，前者能够解释变量间是否存在潜在的相关关系，后者则是评估预测技术优劣的重要依据。

7.3.2 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数  $\rho$  能够评估预测结果与实际值之间的线性相关程度，见公式(1)：

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：  
n——数据量；  
 $\hat{y}_i$ ——第 i 个数据的预测结果；  
 $y_i$ ——第 i 个数据的实际值；  
 $\bar{\hat{y}}$ ——预测结果的平均值；  
 $\bar{y}$ ——实际值的平均值。

7.3.3 决定系数

决定系数  $R^2$  能够衡量预测结果与实际值之间的一致性，见公式 (2)：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：  
n——数据量；  
 $\hat{y}_i$ ——第 i 个数据的预测结果；  
 $y_i$ ——第 i 个数据的实际值；  
 $\bar{y}$ ——实际值的平均值。

8 结果应用

8.1 适用条件

太阳活动对电离层变化产生重大影响，根据太阳F10.7指数的数值范围，将太阳活动强度进行分类：F10.7<100sfu代表低太阳活动水平，F10.7>150sfu代表高太阳活动水平。  
TEC预测技术能够初步尝试应用于民用导航、无线通信等场景时，在不同太阳活动水平下技术性能要求如表2所示：

表 2 TEC 预测技术适用条件

太阳活动年	指标名称	指标值
低太阳活动年	$\rho$	$\geq 0.87$
	$R^2$	$\geq 0.81$
高太阳活动年	$\rho$	$\geq 0.84$
	$R^2$	$\geq 0.80$
注：地磁暴期间（Dst<-100nT），需额外验证		

8.2 应用场景

8.2.1 民用导航

TEC预测技术在民用导航方面的应用包括但不限于：  
a) 修正电离层误差：  
1) 预测电离层的电子总含量变化；

- 2) 估算出电离层对导航信号的延迟;
  - 3) 修正接收到的信号;
  - 4) 消除电离层延迟误差且提高定位精度。
- b) 优化导航算法:
- 1) 优化导航系统的定位算法;
  - 2) 处理到电离层活动较为剧烈时的导航信号;
  - 3) 降低电离层对定位的影响。
- c) 辅助地面定位:
- 1) 提供电离层状态信息(向地面基站);
  - 2) 辅助基站准确计算信号传播时间;
  - 3) 实现更精确、更稳定的定位;
  - 4) 更新并优化预测结果。

## 8.2.2 无线通信

TEC预测技术在无线通信方面的应用包括但不限于:

- a) 选择通信频率:
- 1) 辅助通信系统选择合适的通信频率(如电离层活动剧烈时选择更高频段的信号);
  - 2) 减少电离层对通信的干扰。
- b) 优化通信质量:
- 1) 预测电离层对通信信号的影响程度;
  - 2) 调整通信系统的参数(如功率、调制方式等)。
- c) 预防通信故障:
- 1) 预测波动事件的发生时间;
  - 2) 采取预防措施(如增加备份通信链路、调整通信策略等);
  - 3) 降低通信故障的风险。
- d) 规划网络设计:
- 1) 提供规划和设计的重要参考(如卫星通信网络、地面移动通信网络等);
  - 2) 辅助合理布局通信基站或卫星、优化网络拓扑结构等;
  - 3) 提高网络的覆盖范围和通信质量。



## 参 考 文 献

- [1] 李涌涛, 李建文, 代桃高, 等. 太阳活动对电离层 TEC 变化影响分析[J]. 空间科学学报, 2018, 38(06): 847-854.
- [2] 杨鼎, 方涵先, 杨升高, 等. 磁暴期间全球 TEC 扰动特性分析[J]. 空间科学学报, 2017, 37(05): 524-530.
- [3] Fejer, B. G., E. R. dePaula, S. A. González, et al. Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1991, 96(A8): 13901-13906.
- [4] Zhao J, Ren B, Wu F, et al. TECX-TCN: Prediction of ionospheric total electron content at different latitudes in China based on XGBoost algorithm and temporal convolution network[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2023: 106091.
-