

临近空间虚拟日照环境模型的开发

颜 坤¹, 林连雷², 丁养禹², 张 迪¹, 柳亚男³

(1. 北京临近空间飞艇技术开发有限公司, 北京 100070; 2. 哈尔滨工业大学
电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 金陵科技学院网络安全学院, 江苏 南京 211169)

摘 要: 虚拟日照环境作为一种最常用的虚拟试验自然环境, 主要应用于对日照条件敏感的装备中, 比如太阳能供电的飞行器等。为了给临近空间飞行器开发虚拟日照环境资源, 建立日照环境模型, 生成临近空间范围内任意时间、任意地点的日照环境数据, 开发了虚拟日照环境数据生成软件, 实现了基于综合环境数据表示与交互规范(synthetic environment data representation and interchange specification, SEDRIS)的日照环境数据表示与交互方法, 数据表示与交互的规范性得到了提高。仿真实验结果表明, 软件生成的数据具有可重用性, 符合 SEDRIS 标准。

关键词: 临近空间; 虚拟试验; 日照环境; 模型; SEDRIS

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2021)01-0001-07

Development of Virtual Sunshine Environment Model in Near Space

YAN Kun¹, LIN Lian-lei², DING Yang-yu², ZHANG Di¹, LIU Ya-nan³

(1. Beijing Near Space Airship Technology Development Co. Ltd., Beijing 100070, China;
2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: As one of the most commonly used virtual experimental natural environments, virtual sunshine environment is mainly used in equipment sensitive to sunshine conditions, such as solar powered aircraft. In order to develop virtual sunshine environment resources for near space vehicle, this paper built the models of sunshine environment, generated sunshine environment data at anytime and anywhere in near space and developed the data generation software of virtual sunshine environment. The method of sunshine environment data representation and interaction based on synthetic environment data representation and interchange specification (SEDRIS) was realized, and the standardization of representation and interaction method had been improved. The simulation results showed that the data generated by the software was reusable and met SEDRIS standard.

Key words: near space; virtual test; sunshine environment; model; SEDRIS

虚拟试验能够克服传统试验所具有的周期长、成本高等缺点, 因此被广泛关注^[1-2]。在地球系统中, 距离地面 20~100 km 的空域一般被定义为临近空间^[3]。近年来, 应用于临近空间的飞行器(如使用太阳能供电的太阳能飞机、平流层飞艇和用于高空的超压气球等)发展迅速^[4-5]。深入了解临近空间日照环境对飞行器的影响机制, 能提高临近空间飞行器对于环境的适应性, 有利于优化飞行器的设计, 提高飞行器在复杂环境下的工作能力。

收稿日期: 2020-12-16

作者简介: 颜坤(1982—), 女, 云南红河州人, 研究员, 博士研究生, 主要从事飞行器总体设计和仿真控制方面的研究。

目前,对于日照环境的建模已有了深入的研究,建模需要计算的参数包括太阳的高度角、方位角、辐照度等,其中太阳辐照度最为重要。当前主流的太阳辐照度运算模型包括 Threlkeld&Jordan 模型^[6]、Hot-tel 模型^[6-7]、ASHRAE 晴天模型^[8-9]、半正弦模型等^[10],这些模型大多只适用于海平面或低海拔地区。而对于任意海拔的太阳辐照度的计算则依赖于标准大气模型^[11]。这些研究主要考虑了虚拟试验中太阳辐照度的因素。然而,随着对临近空间研究的日益深入,对日照环境虚拟试验准确度的要求日益严格,主要体现在以下两方面:1)进一步研究需要考虑太阳的高度角、方位角、辐照度等因素,并建立相应的模型;2)使日照环境资源具备良好的通用性与统一性,并且能同时提高日照环境数据的共享性和可重用性,提高数据转换效率,降低开发和维护的费用。

针对这些需求,基于当前临近空间模型研究的现状^[12],本文提出了临近空间虚拟日照环境模型的构建方法。相比较于当前已有的日照模型及其构建方法,本文所研究的模型可生成临近空间内任意时间、任意空间的日照环境数据,包括太阳高度角、方位角和辐照度。此外,为了提高数据的可重用性和交互性,研究了基于综合环境数据表示与交互规范(synthetic environment data representation and interchange specification, SEDRIS)的方法,可以有效提升日照环境数据的通用性和开放性。

1 临近空间日照环境模型的建立

临近空间日照环境受太阳赤纬、时角、真太阳时、天顶角和太阳常数等因素影响^[12]。对这些因素介绍如下:

1)太阳赤纬(δ)也称为赤纬角,指的是地球上太阳直射点的纬度,即地球赤道面与太阳光之间的夹角^[13]。可以使用 Cooper 方程计算太阳赤纬 δ :

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1)$$

其中, n 表示天数,即测试日期距离当年 1 月 1 日的天数。

2)时角(ω)为从观测点所处的天球子午圈沿着天赤道到达太阳所在时圈的球面距离角。

3)真太阳时(T_s)在计算时会受到经度和真太阳时时差的影响,对误差修正后可得出 T_s 的计算公式为:

$$T_s = T_B \pm 4 \times (120 - L_{\text{LOC}}) + E \quad (2)$$

$$E = 0.017 + 0.43 \cos F - 7.35 \sin F - 3.35 \cos(2F) - 9.36 \sin(2F) \quad (3)$$

$$F = \frac{2\pi n}{365} \quad (4)$$

其中, T_B 为北京时间, L_{LOC} 为被测点所在的经度。

4)天顶角(φ)指的是天顶与太阳光入射方向的夹角,其计算公式为:

$$\cos \varphi = \sin L \sin \delta - \cos L \cos \delta \cos(\pi T_s / 12) \quad (5)$$

其中, L 表示目标所在地的纬度。

5)太阳常数(S)是指在日地平均距离上,单位面积的大气顶界垂直于太阳光的部分每分钟所接受的太阳辐射。这里取太阳常数 $S \approx 1\,366 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

基于以上日照环境的影响因素,对日照环境进行建模,第一个参数是太阳高度角。太阳高度角 H_s 指的是太阳光的入射方向和地平面之间的夹角,计算公式为:

$$\sin H_s = \sin L \sin \delta + \cos \delta \cos L \cos \omega \quad (6)$$

然后对太阳方位角进行建模。太阳方位角指的是太阳入射光线在地面上的投影方向与目标物所在地经线的夹角。太阳方位角 A_s 的计算公式为:

$$\sin A_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos H_s} \quad (7)$$

$$\cos A_s = \frac{\sin H_s \sin L - \sin \delta}{\cos H_s \cos L} \quad (8)$$

最后对太阳辐照度进行建模。太阳辐照度指的是单位时间、单位面积上所接受的太阳辐射能量,单位

为 $W \cdot m^{-2}$ 。根据计算与推导,可最终得到临近空间目标表面的太阳辐照度 G_{φ} :

$$G_{\varphi}=Sf\cos\theta\cdot e^{-\frac{C(\lambda)\cdot D(h)}{\cos\varphi}} \tag{9}$$

其中, f 表示引入地球轨道的偏心率后的修正系数^[11]; θ 是太阳光与计算表面的夹角; $C(\lambda)=\frac{\gamma p_0 A(\lambda)}{mg}$, $D(h)=\frac{P_h}{P_0}$, 比例系数 $A(\lambda)$ 是一个常数, P_h 是距海平面 h 高度处的大气压, m 是空气平均分子质量, g 是重力加速度。

2 大气环境数据表示和交换技术

在环境数据异构应用中,SEDRIS 提供了一种标准的交换机制,可用于分配环境数据,并提高数据的可重用性,能够用来充分考虑各种环境因素^[14]。SEDRIS 技术可分为 5 个主要模型:数据表示模型(data representation model, DRM)、空间参考模型(spatial reference model, SRM)、环境数据编码规范(environment data cording specification, EDCS)、SEDRIS 传输格式(SEDRIS transmittal format, STF)以及编程接口(application programming interface, API)^[15]。

2.1 日照环境数据的 DRM 设计

首先要对相关类进行实例化,这个过程在 DRM 中完成。日照环境数据是典型的环境数据,数据分布在空间的网格之中,网格由经度、纬度、高度组成。DRM 中的属性网格类可以用于日照环境数据的表示,使之更为清晰可见,其中与属性网格类有关联的类的组织结构如图 1 所示。

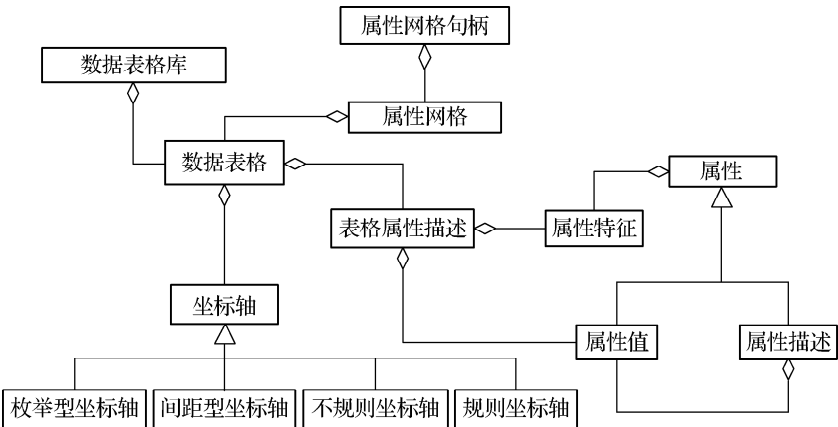


图 1 属性网格相关类的组织结构示意图

2.2 日照环境数据的 SRM 设计

SRM 的主要作用是为自然环境模型不同空间和不同坐标系统中的环境对象提供一种统一转换的方式。针对日照环境,可以进行如表 1 所示的 SRM 参数编码设计。

表 1 针对日照环境数据的 SRM 参数编码设计

SRM 参数	参数编码
SRM 参数信息	SRM_SRFPARAMINFCOD
坐标系统	SRM_RTCOD_WGS_1984
SRM 模板	SRM_SRFTCOD
实体参考模型	SRM_ORMCOD_WGS_1984

2.3 日照环境数据的 EDCS 设计

EDCS 为 DRM 提供语义功能。DRM 用类的形式表示环境对象,因此这些对象的命名标记和标识方法可以由 EDCS 进行实例化。该步骤完成后,环境对象的各个属性值都可以依照 EDCS 规范进行编码。

本文研究的临近空间虚拟日照环境各数据的 EDCS 编码如表 2 所示。

表 2 日照环境数据的 EDCS 编码

要素属性	EAC 属性编码	EUC 单位编码
直射辐照度	EAC_SOLAR_DIRECT_IRRADIANCE	EUC_WATT_PER_SQ_METRE
水平高度角	EAC_SOLAR_RADIANCE_ELEV_ANGLE_HORIZONTAL	EUC_DEGREE_ARC
局部方位角	EAC_SOLAR_RADIANCE_AZIMUTH_LOCAL	EUC_DEGREE_ARC

3 虚拟日照环境数据生成软件的设计

本文中的软件利用 QT Creator 进行设计。QT Creator 是基于 C++ 语言的跨平台应用程序,用于软件系统的可视化和说明构建等方面,作为面向对象的软件开发工具被广泛使用。

临近空间虚拟日照环境数据生成软件支持用户根据需求灵活配置时间范围和空间范围,能够计算出目标表面接收到的太阳辐照度,生成临近空间日照环境数据文件。支持生成符合 SEDRIS 规范的 STF 格式的虚拟日照环境数据,并生成对应的 XML 格式的日照环境资源描述文件,如图 2 所示。

临近空间虚拟日照环境数据生成软件的静态模型包括两部分,分别是日照环境类和格式转换类。各类的主要属性、操作以及各类之间的相互关系如图 3 所示。

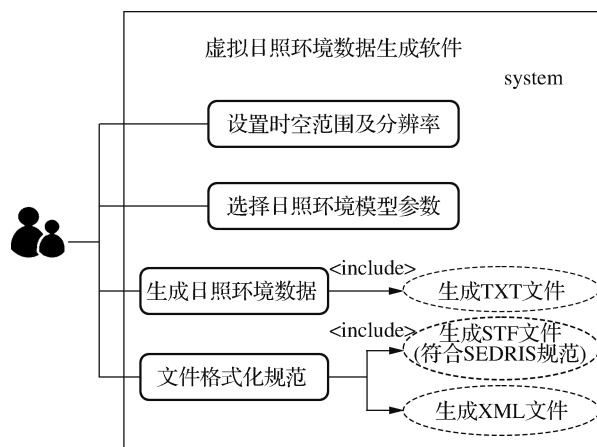


图 2 虚拟日照环境数据生成软件的用例图

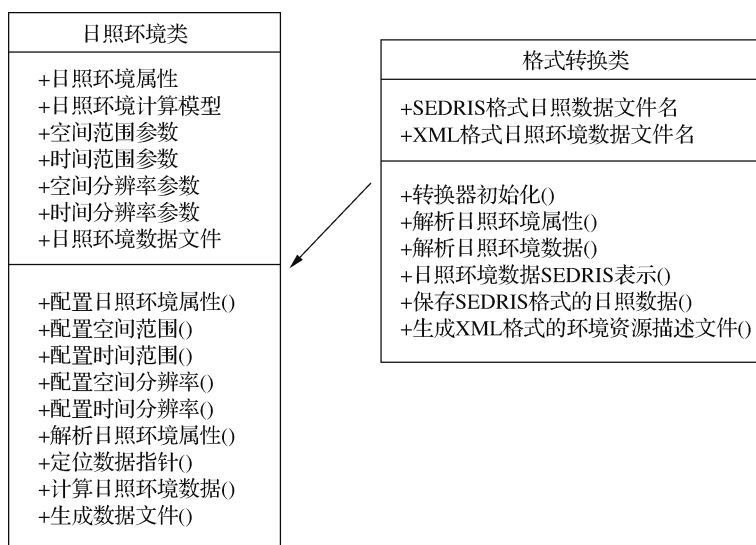


图 3 虚拟日照环境数据生成软件的静态模型

虚拟日照环境数据生成软件的动态交互过程主要包括日照环境属性的配置以及日照环境数据的生成。日照环境数据配置过程的序列如图 4 所示。

虚拟日照环境数据生成软件的操作步骤如下:1)配置日照环境参数。用户根据需求配置空间范围和时间范围,并设置分辨率,自定义时间分辨率和空间分辨率,生成 TXT 格式的文件。2)转换文件格式。按照符合 SEDRIS 规范的数据表示模型,将环境数据进行文件转换,并存储为符合 SEDRIS 标准的 STF 传输格式,进一步生成对应的 XML 格式的日照环境资源描述文件。

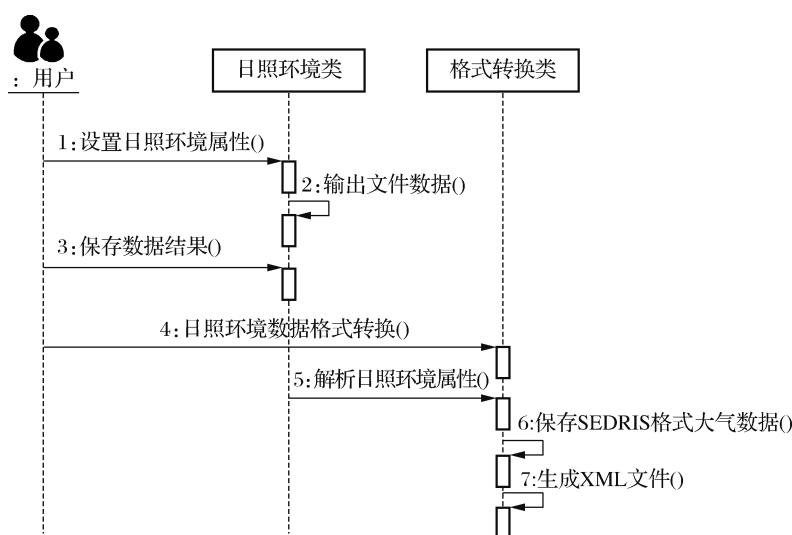


图 4 日照环境数据的配置过程序列

虚拟日照环境数据生成软件的属性配置界面如图 5 所示。

日照模型

时空范围及分辨率设置

起始时间			结束时间			时间分辨率		
年	2018		年	2018		年	0	
月	1		月	1		月	0	
日	1		日	1		日	0	
时	8		时	12		时	4	
分	0		分	0		分	0	
秒	0		秒	0		秒	0	

起始位置			结束位置			空间分辨率		
经度(度)	120		经度(度)	121		经度分辨率(千米)	1	
纬度(度)	20		纬度(度)	21		纬度分辨率(千米)	1	
海拔(米)	200000		海拔(米)	210000		海拔(米)	1000	

中间参数

☐ 太阳赤纬	☐ 时角	☐ 真太阳时	☐ 天顶角
☐ 大气压力	☐ 空气密度	☐ 大气分子浓度	

输出参数

☒ sun	☐ 太阳高度角	☐ 太阳方位角	☐ 太阳辐照度
---	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------

计算 返回

图 5 虚拟日照环境数据生成软件的属性配置界面

4 结果分析与验证

4.1 日照模型仿真验证

将空间位置设置为东经 150° 、北纬 30° , 分别将日期设置为 2018 年 1 月 10 日和 2018 年 7 月 1 日。对一天 24 h 内的数据进行运算, 可以得到太阳高度角、方位角和辐照度的变化曲线, 如图 6 所示。观察高度角的变化可知, 太阳升起时高度角从 -90° 逐渐变为正值, 在正午 12 时达到最大值, 落下时高度角逐渐变为 -90° , 并且夏季时的太阳高度角普遍大于冬季。可见太阳高度角的建模结果符合预期。观察方位角的变化可知, 太阳升起时方位角从 180° 逐渐变为 0° , 落下时方位角从 0° 逐渐变为 -180° , 可见太阳方位角的建模结果符合预期。观察辐照度的变化可知, 从日出时间开始, 太阳辐照度数值开始上升, 即辐照度逐渐增强。当地太阳时为正午 12 时, 太阳辐照度达到峰值。从正午到达日落, 太阳辐照度开始下降, 并且当地夏季时辐照时长和辐照度大于冬季, 可见太阳辐照度的建模结果符合预期。

4.2 STF 格式日照环境数据验证

将日照环境数据转化为 SEDRIS 格式。选取 2018-01-10T08:00~2018-01-10T12:00 的共 5 个整时刻,将日照环境数据进行了转化。利用第三方软件 SEDRIS FOCUS 对 STF 文件进行验证并展开,可以得到如图 7 所示的实例对象详情,其中:图 7(a)为各个时间点所对应的 Time Constraints Data 实例对象,每个此类对象与 Property Grid 类实例对象相关联;图 7(b)为各个实例对象相对时间的属性;图 7(c)为每个 Property Grid 实例对象下有经度、纬度和高度 3 个坐标轴实例对象,以及太阳高度角、方位角和辐照度 3 个表示日照环境要素的实例对象。从结果可以看出,生成的 STF 格式的日照环境数据与设计的 DRM 模型基本吻合,符合 SEDRIS 标准。

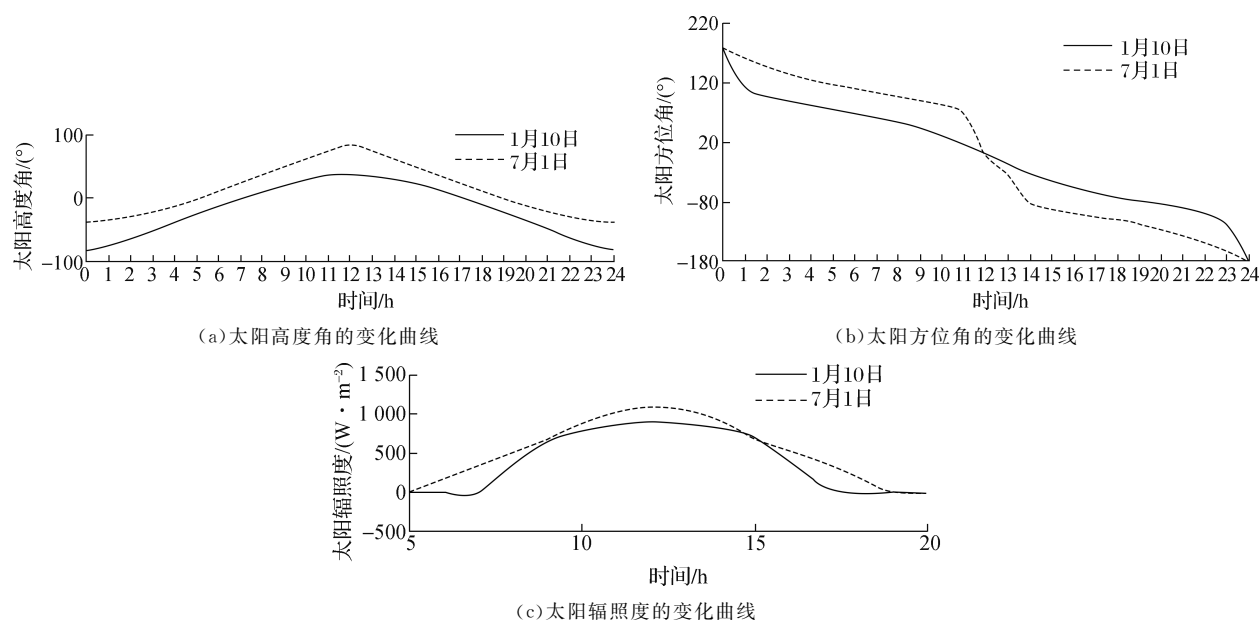


图 6 一天中日照环境模型验证结果

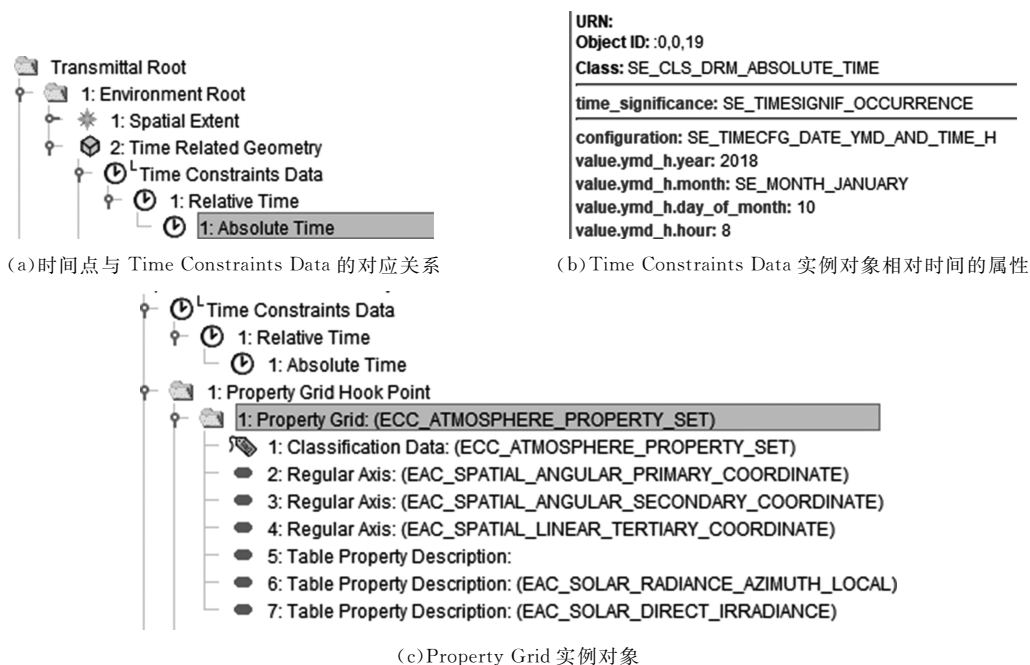


图 7 大气环境标准文件 STF 数据结构细节举例

5 结 语

本研究提出了临近空间虚拟日照环境的建模方法,该方法可以生成临近空间任意时间、任意地点的日照环境数据,包括太阳的高度角、方位角、辐照度等,开发了虚拟日照环境数据生成软件,实现了基于 SEDRIS 的日照环境数据表示与交互方法,提高了日照环境数据表示与交互的规范性。软件生成的 STF 格式的虚拟日照环境数据具有可重用性,可以实现跨平台、无损耗、无歧义的运输,从而提高了数据传递效率,降低了开发维护成本,可为多种平台的虚拟试验系统提供日照环境数据。

参考文献:

- [1] 李楠,杜承烈. 虚拟试验系统框架技术的设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2007,15(10):1367-1369
- [2] 陈雪祺. 船舶制造虚拟试验数据管理系统设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019
- [3] 陈凤贵,陈光明,刘克华. 临近空间环境及其影响分析[J]. 装备环境工程,2013,10(4):71-75
- [4] 冯慧,刘强,姜鲁华,等. 临近空间环境对高空飞艇长时驻空影响研究进展[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(S1):69-75
- [5] 李一鸣,马曙辉,刘鹤,等. 基于专利分析的临近空间飞行器发展策略分析及启示——以谷歌高空气球为例[J]. 科技管理研究,2019,39(20):157-167
- [6] 邱国佳,夏艳君,杨鸿毅. 晴天太阳辐射模型的优化计算[J]. 太阳能学报,2001,22(4):456-460
- [7] 后尚,田瑞,闫素英. 呼和浩特地区太阳辐射模型分析[J]. 可再生能源,2008(2):79-82
- [8] YILDIZ A. Investigation of applicability of ASHRAE clear-sky model to Izmir, Turkey[J]. Journal of Thermal Science and Technology,2011,31(2):25-32
- [9] 李锦萍,宋爱国. 北京晴天太阳辐射模型与 ASHRAE 模型的比较[J]. 首都师范大学学报,1998,19(1):35-38
- [10] ZANG H, XU Q, ICHIYANAGI K. A novel and simple model for estimating the hourly global solar radiation[J]. IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering,2012,7(5):535-537
- [11] 曾理. 关于不同海拔的太阳辐射计算[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015
- [12] 许永辉,成行,程博,等. 虚拟试验中临近空间大气环境仿真技术研究[J]. 测控技术,2019,38(2):13-18
- [13] 卢雪. 临近空间低速目标光学探测研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2014
- [14] 何洪林,于贵瑞,牛栋. 复杂地形条件下的太阳资源辐射计算方法研究[J]. 资源科学,2003(1):78-85
- [15] HWAM W K, CHUNG Y, KWON Y, et al. Conversion the time dependent grid data of NetCDF to SEDRIS transmittal format[C]. New York:5th International Conference on Information Technology and Multimedia(ICIMU),2011:1-6

(责任编辑:湛 江)