

对流层大气温度统计模型研究

杨学军, 梁 磊, 徐 嘉
(北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076)

摘要: 为了获得地理位置上随高度变化的大气温度统计特性, 基于有限的对流层大气温度观测数据, 根据谐波规律给出了大气温度的统计均值和方差, 并采用观测数据的相关性矩阵和随机变量, 建立了对流层大气温度统计模型。根据模型和方法, 统计分析后可以得到对流层大气温度特性, 经过与观测数据统计参数比较, 验证了模型和方法的有效性。

关键词: 对流层; 大气温度; 统计模型; 随机变量; 分布规律

中图分类号: V416.5

文献标识码: A

Statistical Model Research of Atmospheric Temperature at Troposphere

YANG Xuejun, LIANG Lei, XU Jia
(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing, 100076)

Abstract: In order to obtain the statistically characteristics of temperature with altitude at specific location, based on the limited measured data of atmospheric temperature at Troposphere, a statistical model of atmospheric temperature is proposed, in which the mean and standard deviations are provided through harmonic analysis, whereas the correlation matrix and random variable are given from measured data. Then the statistical characteristics of atmospheric temperature at Troposphere can be calculated, and the effectiveness of the proposed methods is verified through comparison with results.

Keywords: troposphere; atmospheric temperature; statistical model; random variable; distribution law

0 引言

大气层内的空气温度是一个重要的物理参数, 它关系着高速飞行器的气动热环境和热防护设计^[1], 也影响着飞机类亚声速飞行器的舱内外环境设计^[2], 是各类航空和航天飞行器设计中必须考虑的因素。温度在大气层中的分布有着明显的层状特征, 对流层是地球大气层最靠近地面的一层, 空气上下对流活动较强, 是大气中最活跃的一层^[3]。对于高度约12 km以下的对流层中的飞行器而言, 其表面换热过程取决于外界空气温度、密度等参数, 而这些参数取决于飞行高度、地理经纬度、季节、一天中时间点等因素, 呈现出受到不同程度太阳辐射、地面反射, 以及近地大气强对流等影响而产生较大随机波动的特点^[4]。

在飞行器表面换热过程的研究中, 通常需要使用标准大气表, 它给出了静态大气参数的平均值与高度的对应关系^[5]。而实际上, 大气参数标准值及其偏差范围, 从统计分析上给出了大气随机特性的分布规律, 为飞行器的气动热分析与设计提供了输入条件。

为了使表面换热过程的分析更精确, 在考虑了季节、地理位置等条件后, 需要实测任意时间和地点的大气参数, 这显然是不现实的, 因此, 有必要研究不同高度下大气参数的随机偏差范围和统计特性^[6]。1976年大气标准中温度参数的系统变化范围见图1。

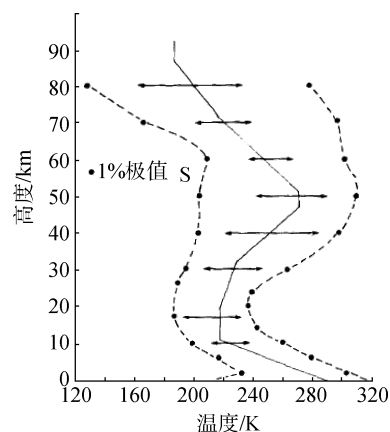


图1 1976年大气标准中温度参数的系统变化范围

Fig.1 Range of temperature in 1976 standard atmosphere

本文基于大气对流层中有限的观测数据, 根据

谐波规律给出大气温度的统计均值和方差, 并按照概率分布给出大气温度相关性矩阵与随机变量, 从而建立了对流层大气温度统计模型, 并通过公开文献中某地全年月度观测数据的统计参数进行比较和验证。

1 计算模型

1.1 大气观测数据

对于 30 km 以下的大气, 一般采用常规无线电探空仪观测大气数据, 为了获得某地理位置上全年大气温度随高度的变化规律, 通常需要获取大量的观测数据^[7-8]。然而, 从公开的资料来看, 受条件限制很难全面和完整地获得不同高度条件下多年内累积的大气温度观测数据。一般在给定的地理位置和高度范围内, 仅能得到全年中几个月的观测数据, 存在温度极值月份的观测数据缺失的情况。因此, 需要运用概率统计手段和近似模拟的方法估算一定时间段内的大气平均温度和偏差, 从而掌握大气温度参数沿高度的分布特性。

1.2 温度均值与偏差

分析观测数据的年度分布规律可知, 给定地理位置和高度, 观测数据的月度平均温度值分布近似服从周期内的谐波叠加规律。因此, 本文采用两项谐波叠加近似表示温度数据的规律, 并采用统计方法得到时间范围内的温度均值和偏差。一般情况, 给出的近似方程表达式为

$$T = \bar{T} + A_1 \sin(ix + \phi_1) + A_2 \sin(2ix + \phi_2) \quad (1)$$

式中 \bar{T} 为温度平均值; x 为观测周期; i 为月份, $i=0, 1, 2, \dots, 11$ 。根据近似方程得到月平均温度数据, 统计得到温度偏差为

$$s = \left[\frac{\sum_{k=1}^n (T_k - \bar{T})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中 n 为样本数量; T_k 为近似的月平均温度值。

1.3 大气温度随机实现

描述大气温度随机实现的方法有很多^[9-10], 规范展开式方法可以估算大气参数统计特性, 得到大气温度随高度的均值和均方差, 但展开式模型依赖随机分量修正。大气随机模型方法可以估算 30~90 km 范围内的大气温度分布, 并考虑了太阳穿过臭氧层引起加热效应后与温度的线性关系, 此方法需要基于历年的充足样本数量, 尤其对对流层温度梯度较大的情况缺少分析。本文给出的大气温度统计模型分析方法, 针对对流层大气温度有限的样本数据, 提供了大气温度

随高度变化的随机统计模型, 保证了温度样本均值和分布特性模拟的有效性。

将大气温度 T 表述为以下形式:

$$T(h) = T_{CT}(h) + \Delta T(h) \quad (3)$$

式中 $T_{CT}(h)$ 为温度的平均值; $\Delta T(h)$ 为相对温度均值的偏差值, 具有随机分布属性。为了给出随机函数 $\Delta T(h)$, 可以使用概率的方法。

在给定的地理位置上, 与高度相关的大气温度随机函数 $\Delta T(h)$ 表示为

$$\Delta T(h) = \tau(h) \cdot S(h) \quad (4)$$

式中 $\tau(h)$ 为一定概率分布的标准随机变量; S 为大气温度的标准偏差, 均由观测数据经分析得到。式 (3) 和式 (4) 为随机大气温度的表示方法, $\Delta T(h)$ 取决于描述大气温度的累积的数据。

随机变量 $\tau(h)$ 表示了一定概率下, 样本与均值的差距程度。基于样本数据的相关性矩阵表示为

$$M(h)_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (T(h)_{ik} - T(h)_{CT,i})(T(h)_{jk} - T(h)_{CT,j})}{\left[\sum_{k=1}^n (T(h)_{ik} - T(h)_{CT,i})^2 \sum_{k=1}^n (T(h)_{jk} - T(h)_{CT,j})^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

式中 $T(h)$ 为对应高度 i 和 j 下的观测数据样本, 相关性矩阵体现了随机分布下的两组数据的相关程度。大气温度的随机分量 $\Delta T(h)$ 是在求解温度相关性矩阵的本征矢量后, 与一套相互独立、标准化的正交随机数相乘得到。

2 结果分析

本文数据来源为给定位置 (经纬度) 和时间范围 (2~8月) 内, 公开文献中发表的对流层内大气温度测量数据。按照上述大气温度模型计算方法, 首先根据谐波规律得到大气温度的均值与偏差, 经过多次随机模拟计算, 获得大气温度参数随高度变化的多个随机实现, 经统计分析后得到大气温度随高度变化的均值与偏差范围。

根据公开文献中的观测数据^[11], 在对流层高度范围内的典型高度位置上, 采用两项谐波叠加给出了近似拟合的曲线, 如图2所示, 拟合曲线体现了周期内的幅值和相位特征。可以看出生成的曲线与源数据规律吻合较好。根据曲线上提供的样本数据, 经过统计分析后可得到大气温度随高度变化的均值与偏差量。

根据上述大气温度随机模型, 计算出了在2~8月对流层高度范围内大量的大气温度随机数据, 例如本例

中产生了1万个随机实现。将模型产生的样本温度均值和偏差与源数据中的大气温度统计参数进行比较分析。

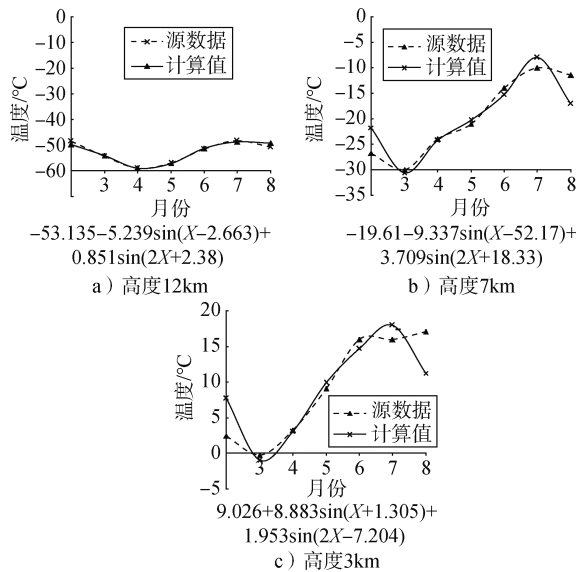


图2 典型高度下月度平均温度谐波分析结果

Fig.2 Harmonic analysis results of monthly average temperature at typical altitude

图3和图4分别比较了大气温度模型计算数据与源数据中经过统计后的温度平均值和偏差量。三角符号曲线代表了模型产生的1万个样本数据得到的分布曲线,而交叉十字曲线代表了源数据样本中统计得到的对应参数。图中平均值沿高度分布的曲线吻合程度较好,由于源数据样本数量有限,所以偏差量沿高度分布的曲线与源数据偏差量在一定高度上存在差别,但沿高度的变化趋势和分布规律基本一致。随着源数据样本规模进一步提高,偏差量的吻合程度进一步提升,达到更佳的效果。

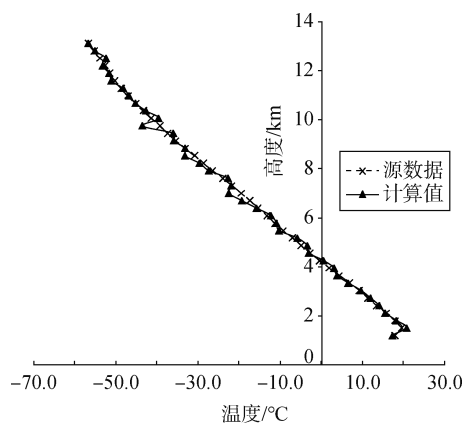


图3 源数据与模型大气温度沿高度的平均值分布情况

Fig.3 Average data distribution along altitude between source data and model atmosphere temperature

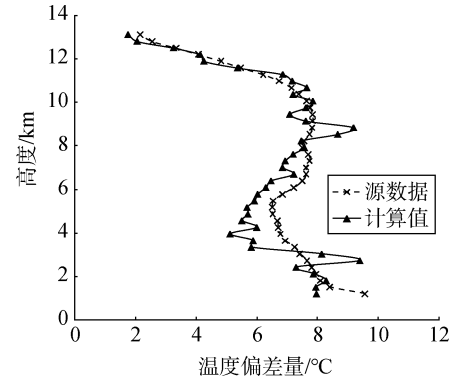


图4 源数据与模型大气温度沿高度的偏差量分布情况

Fig.4 Deviation data distribution along altitude between source data and model atmosphere temperature

3 结论

研究得出以下结论:

a) 本文根据有限的对流层大气温度观测数据,获得了具体位置上随高度变化的大气温度统计特性,建立了大气温度统计模型。计算结果经与源数据统计参数比较,说明模型的统计数据吻合较好,验证了模型和方法的有效性。

b) 基于此方法,可以根据对流层测量的大气温度数据,计算得到全年内大气温度的分布情况,为飞机类飞行器低温环境设计和高速气动加热设计等提供较为合理的热环境条件,从而提升未来飞行器的精细化设计水平。

参考文献

- [1] 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(S): 69-75.
FENG Hui, LIU Qiang, JIANG Luhua, et al. Research progress of near-space environment effects on high altitude airship long duration flight[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(S): 69-75.
- [2] 张雪. 平流层电子设备热设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
ZHANG Xue. Research on thermal design of stratospheric electronic equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [3] 付信传,戴鑫,杨传栋,等. 对流层大气温度高度廓线半定量估算[J]. 大学物理, 2017, 36(1): 56-59.
FU Xinchuan, DAI Xin, YANG Chuandong, et al. The semi-quantitative estimation of the tropospheric temperature profile[J]. College Physics, 2017, 36(1): 56-59.
- [4] JOHNSON D L, ROBERTS B, VAUGHAN W W. Reference and standard atmosphere models[C]. Kansas City: 10th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, 2002.
- [5] 张小达,吕维鉴. 国外运载器、航天器从地面到空间自然环境标准综述[J]. 航天标准化, 2001(1): 29-33.
ZHANG Xiaoda, LYU Weijian. Aircraft from ground to space

- natural environment standard summary[J]. Aerospace Standardization, 2001(1): 29-33.
- [6] YOUNG G, BRUCK H A, GOWRISANKARAN S. Modeling of rocket motor ballistics for functionally graded propellants[J]. Proceedings of the 40th JANNAF Combustion Meeting, 2003: 1-13.
- [7] 耿丹, 赵增亮, 万黎, 等. 冬季西北地区临近空间气象火箭探测数据分析[J]. 空间科学学报, 2022, 42(3): 396-402.
- GENG Dan, ZHAO Zengliang, WAN Li, et al. Analysis of data from near space meteorological rocket sounding in northwest China in winter[J]. Chinese Journal of Space Science, 2022, 42(3): 396-402.
- [8] 罗双, 尹球. 全球大气温度廓线的统计特性分析[J]. 热带气象学报, 2019, 35(4): 556-566.
- LUO Shuang, YIN Qiu. Statistical characteristics analysis of global temperature vertical profile[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, 35(4): 556-566.
- [9] 严东升, 郭珂. 大气参数统计计算模型[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(6): 68-70.
- YAN Dongsheng, GUO Ke. Statistical calculation model of the atmospheric parameters[J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(6): 68-70.
- [10] THOMPSON G, BERNER J, FREDIANI M, et al. A stochastic parameter perturbation method to represent uncertainty in a microphysics scheme[J]. Monthly Weather Reviw, 149(5): 1481-1497+2021.
- [11] CHILDS E, PULKKI W. Using multi-channel spatialization sonification: a case study with meteorological data[J]. Proceedings of the 2003 Internatinal Conference on Auditory Display, 2003(3): 192-195.

作者简介

杨学军 (1979-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为运载器气动与热环境设计。

梁 磊 (1981-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为运载器气动与热环境设计。

徐 嘉 (1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为运载器气动与热环境设计。

(上接第 103 页)

- [3] 王京, 王庆峰, 张健穹, 等. 高速磁浮列车线缆雷电间接效应的耦合特性研[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(1): 138-141+148.
- WANG Jing, WANG Qingfeng, ZHANG Jianqiong, et al. Study on the cable coupling characteristics of indirect lighting effect on high speed maglev train[J]. Railroad Standard Design, 2021, 65(1): 138-141+148.
- [4] 赵京坡, 毛子夏, 董志涛, 等. 航天特种车辆雷电间接效应防护技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(6): 93-96.
- ZHAO Jingpo, MAO Zixia, DONG Zhitao, et al. Research on lightning indirect effects protection techniques of aerospace special vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(6): 93-96.
- [5] 赵涛宁, 刘顺坤. 飞机雷电间接效应试验方法[J]. 上海计量测试, 2018, 45(S1): 6-10+14.
- ZHAO Taoning, LIU Shunkun. Study of the lightning indirect effects test technique on aircraft[J]. Shanghai Metrology Testing, 2018, 45(S1): 6-10+14.
- [6] 黄军玲, 周利军, 谢家雨, 等. 飞机雷电间接效应仿真与研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(7): 104-110.
- HUANG Junling, ZHOU Lijun, XIE Jiayu, et al. Simulation and study of indirect effects of aircraft lightning[J]. Science, Technology and Engineering, 2015, 15(7): 104-110.
- [7] 夏乾善. 基于碳纳米管纸复合材料雷电防护结构的设计及性能表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- XIA Qianshan. Design and performance characterization of composite structures based on the buckypaper for lightning strike protection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [8] 时宇. 碳纤维复合材料雷击损伤试验与仿真研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- SHI Yu. Experimental and simulation study on lightning damage of carbon fiber composites[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [9] 张晓军, 常新龙, 杨海生, 等. 导弹武器复合材料结构环境损伤分析及对策[J]. 飞航导弹, 2008, 284(8): 60-62.
- ZHANG Xiaojun, CHANG Xinlong, YANG Haisheng, et al. Environmental damage analysis and countermeasures of composite structure of missile weapons[J]. Flying Missiles, 2008, 284(8): 60-62.
- [10] 程卫平. 聚丙烯腈基碳纤维在航天领域应用及发展[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(6): 11-16.
- CHENG Weiping. Polyacrylonitrile-based carbon fibers in aerospace applications and development[J]. Aerospace Materials Technology, 2015, 45(6): 11-16.
- [11] SAE. ARP5416A. Aircraft lighting test methods[S]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2013.
- [12] SAE. ARP5414A. Aircraft lighting Zoning[S]. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2005

作者简介

王甜甜 (1994-), 女, 工程师, 主要研究方向为雷电与强电磁环境仿真技术。

刘 凯 (1987-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为雷电与强电磁环境试验技术。

何相勇 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷电与强电磁环境防护技术。

杜鸣心 (1991-), 女, 工程师, 主要研究方向为雷电与强电磁环境仿真技术。

狄玮岚 (1984-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为雷电与强电磁环境防护技术。