

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.020

基于 FlightGear 的飞行数据管理与分析系统

董羽 皮德常

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院, 南京, 210016)

摘要:飞行器是一个庞大的复杂系统,其设计与开发需要几轮迭代,而仿真技术在此过程中起着无法替代的作用。开源仿真软件 FlightGear 主要用于飞行模拟,并不能用于飞行器的系统研发仿真与验证。本文以 FlightGear 为基础,对其进行了扩展,从而实现了一套集飞行数据管理和分析于一体的软件系统。利用 FlightGear 接口,开发了以数据采集为主的通信、存储等模块,使扩展系统能够实时、灵活地采集飞行器的参数,并存储于数据库;设计并实现了用于飞行器姿态预测的分析模块,新预测方法提高了姿态参数的预测精度。目前,该扩展系统已用于某飞行器的研发论证中,取得了较好的经济效益。

关键词:飞行数据;FlightGear;通信;预测;飞行仿真

中图分类号:TP311.52 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2015)03-0446-07

Management and Analysis System for Flight Data Based on FlightGear

Dong Yu, Pi Dechang

(1. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Aircraft is a large complex system, and the development of aircraft system requires several rounds of iteration. The simulation technology plays an irreplaceable role in the process. FlightGear, an open source simulation software, is used for flight simulation. However, it cannot be directly used in aircraft system research and development of simulation and verification. A set of software system combined flight data management and analysis is presented based on FlightGear. In order to collect real-time flight parameters flexibly and store them in database, the system expands and develops storage and communication modules for data collection, thus making the full use of the interfaces of FlightGear. The system designs and implements analysis module for predicting attitude of aircraft, and improves the prediction accuracy of posture parameters. At present, the extended system has been applied in research and demonstration of aircraft system and has achieved good economic benefits.

Key words: flight data; FlightGear; communication; prediction; flight simulation

新一代飞行器系统日趋复杂,不确定因素也逐步增多,系统的实时仿真和综合测试技术变得尤为重要。飞行器系统的开发需要几轮迭代,对其原型系统的设计、建模、实现、评估并给出结果是必要的,这有助于提高系统设计的整体水平。使用仿真技术可以加速原型开发的进程,并给出相对容易讨论的手段来评估原型开发过程中的问题。Flight-

Gear 作为一个开放源代码、多平台的飞行仿真软件,其目标是创建一个先进的飞行模拟器用于科研或者学术环境,追求和开发新颖的飞行仿真思路,并最终成为用户的应用程序端。其主要由动力学模型系统、视景显示系统、仪表系统、驾驶舱系统、音效系统、助航系统、自动驾驶系统等组成。凭借其强大的飞行模拟功能,FlightGear 不仅吸引了众

收稿日期:2015-01-21;修订日期:2015-04-27

通信作者:皮德常,男,教授,博士生导师,E-mail:nuaacs@126.com。

多的飞行模拟爱好者,也赢得了专业用户的青睐,已成为众多科研部门的飞行仿真引擎。

自1997年7月发布第一个跨平台版本至今,国内外已经有很多科研机构已经将FlightGear用于研究项目之中。例如美国伊利诺伊大学将FlightGear用于飞行结冰过程的仿真可视化研究^[1]。Bhandari等人^[2]在FlightGear飞行模拟器仿真环境中进行了基于神经网络的无人机非线性控制器的开发。Khalastchi等人使用机器人Robotican1和飞行模拟器FlightGear进行试验,并提出一个使用结构模型成功地检测诊断传感器在线故障的方法^[3]。Somers等人提出一种反向操控的ACT-R变体模型,将FlightGear作为其运行环境并保持同步^[4]。在国内,黄华等人利用FlightGear飞行模拟器外部数据输入、输出接口,将飞行仿真数据通过网络实时传递,驱动FlightGear可视化引擎^[5]。飞行数据的种类较多,目前针对不同的数据已开展了较广深入的研究,如刘永建^[6]使用了改进的神经网络模型对民用飞机发动机的故障和性能进行了研究;Omkar等人^[7]利用飞行数据研究了直升机的动力学;史勇杰等人^[8]使用飞行数据深入研究了旋翼桨-涡干扰现象影响机理。对于正在执行任务的飞行器而言,对其关键参数和飞行器健康的预测则更具现实意义。王润全等人^[9]使用飞行器的GPS采样数据,提出了一种基于混沌多项式的预测模型。崔建国等人^[10]通过提取水平尾翼声发射信息的关联维数构建特征,提出了一种基于混沌理论的飞机健康预测方法。Duda等人^[11]则为飞机的应用程序研究了横向气流的预测,取得了较好的效果。

在真实飞行环境中,验证极限条件下的飞行器,如战斗机的高过载飞行过程,不仅成本高、风险大,而且安全性低,而仿真技术在此过程中扮演了无法替代的作用。虽然FlightGear提供了专业的飞行动力学模型,具有强大的飞行仿真能力,但是对于仿真试验过程中产生的大量试验数据的处理能力较弱,缺少一个系统的数据管理与分析工具,能够对试验数据动态更新、实时记录,并对飞行状态直观显示、预测和回放,以便领域专家进一步分析和评估飞行器的设计质量。为满足以上需求,本文在FlightGear的基础上,设计并实现了一套数据管理与预测分析的软件系统。该系统可实时采集传输飞行数据,可视化监测关键参数的实时变化情况;可将采集到的数据存入指定数据库并进行离线场景回放;采用改进后的灰色预测方法对关键参

数进行预测。

1 系统框架

该系统主要利用FlightGear内部模型解算、视景显示功能及网络功能对模拟飞行器飞行过程中产生的实时飞行数据进行采集、传输、显示及分析。主要包括FlightGear仿真软件、通信模块、配置模块、存储模块、显示模块、分析模块,如图1所示。

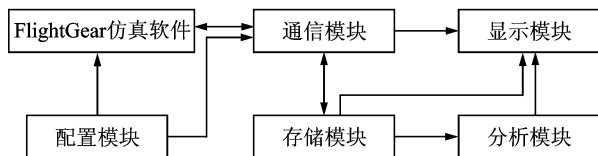


图1 基于FlightGear的飞行数据管理与分析系统
Fig.1 Management and analysis system for flight data based on FlightGear

(1)FlightGear仿真软件接受环境系统和动力学系统的控制,控制结果通过三维可视仿真系统进行渲染或通过通信模块输出。该部分也可以通过外部数据的激励,取代FlightGear内部激励功能,仅使用其视觉子系统功能。

(2)通信模块是该系统的基础模块。主要完成内部其他模块与FlightGear的通信,实现两者之间的数据交换。

(3)配置模块作为辅助功能模块,主要根据XML的配置技术完成以下功能:

①系统配置。实现了FlightGear系统运行环境,外界数据(包含云层、地形等)以及各类飞行器的载入等配置。

②参数配置。包括指定飞行器模型、声音模型、飞行动力学模型、飞行器动作参数等。

③数据传输配置。规定数据传输的内容、格式等。

(4)存储模块主要用于存储大数据量的飞行数据,用于文件回放以及分析预测等。

(5)显示模块实现参数值及飞行状态的直观显示,主要包括参数动态曲线实时显示、参数全程曲线显示及场景回放等。

(6)分析模块是该系统最重要模块,也是可扩展的模块。该模块能够运用统计学及时间序列分析相关领域的技术,灵活地对一些关键飞行状态参数进行预测,并给出相应的误差分析。

下面针对两个最为关键的模块,即通信模块与分析模块,展开详细地介绍与分析。

2 通信模块

FlightGear 在模拟飞行时可以产生大量飞行数据,但 FlightGear 本身并没有提供数据存储功能,一些重要数据只能在飞机座舱的仪表和平视显示器上可以看到。在系统启动之后也可以通过手动打开日志记录功能记录相关的数据,而通过手动打开日志记录界面需要重新添加参数的名称和路径,并且系统不会自动记忆,每次重新飞行都需要重新输入;更不足的是,自带的日志记录系统所能记录的数据量非常有限,不能满足飞行仿真的实际需求。因此,本文分别采用本地数据配置以及自定义两种方式,对飞行数据进行采集与回放。

2.1 本地数据采集及配置

根据 FlightGear 功能,本文给出了一种通过配置 XML 文档的方法来实现本地的数据采集及回放(Generic protocol,一种 FlightGear 自定义协议)。该方式重点在于添加、删除、修改 XML 文档中所需的参数,其采集的数据量理论上不受限制,且能将数据格式化存储于 CSV 文件,便于后期处理分析及场景回放。以 playback 协议为例,该 XML 配置文档“playback.xml”位于 MYMFG-ROOT\data\Protocol 目录下。文档中声明了需要输入输出的属性值、格式和该属性结点在属性树(Property tree)中位置,并声明了属性值之间以“,”隔开。该协议文件可以包含一个<input>和一个<output>定义块,使用哪一个取决于如何调用协议。每个块里面包含若干个<chunk>块,用户可以根据需要自行添加和删减<chunk>块,也可在配置模块中直接调节。

此种基于 FlightGear 配置文件的方式,虽简单且有效,但仅适用于对数据的离线处理,不利于对飞行数据的实时采集与处理。

2.2 自定义数据采集与回放

由于 FlightGear 内部模块实现的功能具有很大局限性,只能按配置文件将采集的数据进行存储后进一步处理,无法在采集过程中实时监控、显示甚至分析数据。为解决此问题,本文根据 FlightGear 源码,设计了系统间的网络通信模块,即基于 UDP 协议(局域网环境中网络负荷不大)的采集与回放,其通信过程如图 2 所示。

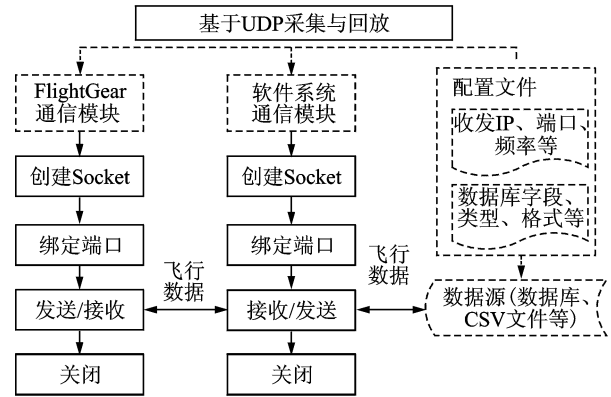


图 2 基于 UDP 采集与回放过程

Fig. 2 Collection and playback process based on UDP

数据采集与回放涉及存储、显示等模块。采集到的飞行数据不仅可存储为 CSV 格式,亦可通过 ODBC 存储到数据库中,其中数据表要求以时间戳为主键;飞行场景回放则根据历史数据,利用 FlightGear 的可视化引擎,实现飞行姿态和地理环境的三维可视化显示。

图 2 为基于 UDP 的采集与回放过程。在数据采集过程中,数据流先从 FlightGear 传到系统的通信模块,再根据配置信息,由格式化存储到数据库或文件中。此外,通信模块中的数据还可传输至显示模块,进行实时状态监测。根据历史数据进行场景回放时,数据流流向与上述过程相反。图 3 即

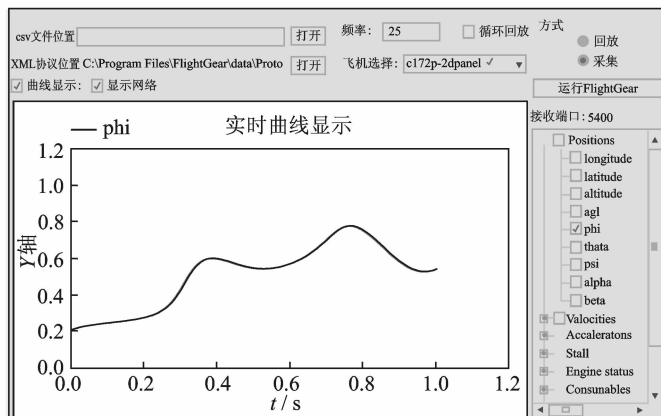


图 3 自定义采集与回放

Fig. 3 Custom collection and playback

为自定义采集与回放的交互界面,在飞行仿真过程中,可在右边树形框内自行选择需要实时显示的参数。

3 分析模块

分析模块是对采集到的典型状态参数,采用合适的数据挖掘算法进行监视预测。飞行器参数很多,飞行状态参数能够直接反映飞行器的运行情况和飞行品质,尤其是在飞行器高过载飞行的系统验证中,具有重要的研究价值。仿真试验中研究飞行状态参数的预测方法,可以进一步为真实飞行任务中的预测研究提供支持,进而提前发现飞机可能出现的意外情况,为飞行器提供安全保障。由于飞行状态参数具有状态点的不可重复性,即代表的系统状态不可能完全复现。除飞行时间和接通次数外,绝大多数飞参数据具有不可叠加性,即数据简单相加不产生任何实质意义。这些特点决定了其处理方法具有特殊性。因此,本文结合飞行数据特点,采用预测精度较高的新陈代谢 GM(1,1)模型对关键参数进行实时预测。

3.1 GM(1,1)及基于新陈代谢的改进模型

GM(1,1)模型是一阶方程一个变量的灰色预测模型。它建模不需要太多的样本,不要求样本有较好的分布规律,定量分析结果与定性分析结果不会不一样,可用于近期、短期和中长期预测,计算量少而且有较强的适应性和较好的精准度,已经成为预测领域一种重要的方法。建模过程是将无规律的原始数据进行累加,得到规律性较强的生成数列后进行建模,由生成模型得到的数据再进行累加得到原始数据的预测值,然后进行预测^[12]。

假设原始数列为

$$X^{(0)} = (X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)) \quad (1)$$

一阶累加后生成新的序列

$$X^{(1)} = (X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)) \quad (2)$$

其中

$$X^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i X^{(0)}(k) \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (3)$$

将原始数据累加后,弱化了原始数据的随机性,若原始数列 $X^{(0)}$ 和一阶累加生成序列 $X^{(1)}$ 满足准光滑性检验

$$\rho(k) = \frac{X^{(0)}(k)}{X^{(1)}(k-1)} < 0.5 \quad \frac{\rho(k+1)}{\rho(k)} \geq 1 \quad (4)$$

则 $X^{(1)}$ 序列具有指数增长的规律,即满足一阶线性微分方程

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (5)$$

式中: a 称为发展灰数(发展系数),反映 $X^{(1)}$ 及原始序列 $X^{(0)}$ 的发展趋势; b 称为内生控制灰数(灰作用量),反映了数据间的变化关系。

(1)当 $-a < 0.3$ 时,模型可用于中长期预测;

(2)当 $0.3 < -a < 0.5$ 时,模型可用于短期预测;

(3)当 $0.5 < -a < 1$ 时,不能直接用模型进行预测,要对模型的残差进行修正,改进模型;

(4)当 $-a > 1$ 时,GM(1,1)模型不适用于此时间序列预测。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = [B^T B]^{-1} B^T y_n \quad (6)$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

$$y_n = [x^{(0)}(2) \quad x^{(0)}(3) \quad \dots \quad x^{(0)}(n)]^T \quad (7)$$

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k-1) + x^{(1)}(k)) \quad k=2,3,\dots,n \quad (8)$$

一旦 a, b 确定,GM(1,1)可以根据式(9,10),来预测对象 $X^{(0)}$ 在 $k+1$ 时刻的数值。

$$x^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (9)$$

$$x^{(0)}(k+1) = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) \quad (10)$$

GM(1,1)模型能够对系统的整体变化趋势进行较为精确地预测,但由于累加生成的数列会消弱系统发展的阶段性规律,对其阶段性发展的规律性产生影响,因此,对于波动性较强的数据,GM(1,1)模型难以处理好局部细节问题,预测效果并不理想。为提高飞行参数的预测精度,本文在系统中集成了一种新陈代谢的改进 GM(1,1)模型。

设定用于构造灰色预测模型的初始数列长度 $m(m \leq n)$, 平移步长 s , 首先对序列 $X_1^{(0)} = (X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(m))$ 进行 1 次灰色 GM(1,1) 预测, 得到对应的预测数列。之后, 平移 s 个数据点得到新数列 $X_k^{(0)} = (X^{(0)}(1+k \times s), X^{(0)}(2+k \times s), \dots, X^{(0)}(m+k \times s))$, 再次采用 GM(1,1) 模型进行预测, 将结果中的最后 s 个数据点追加到上一步得到的预测数列中。如此重复上述步骤, 直到遍历完原始数列。

3.2 预测误差分析

本文采用均方根误差(RMSE)和平均绝对误差百分比(MAPE)对模型的准确性进行检验,公式

如下

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (y_k - x_k)^2 / n} \quad (11)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |(y_k - x_k) / x_k| \quad (12)$$

式中： y_k 为预测值， x_k 为原始值。试验数据为飞行过程中产生的六自由度数据，包含 6 条序列，分别为 longitude, latitude, altitude, roll, pitch, heading。

(1) 参数影响

以波动性较明显的 pitch 为例，固定平移步长 $s=1$ ，选取不同的初始序列长度 m (11~30)，分别计算 RMSE、MAPE，结果如图 4 所示。

由图可知，初始长度 m 越大，误差越大，然而， m 过小会导致局部尖端化。因此，在预测时需要根据序列的平稳性选取合适的初始序列长度。

(2) 改进前后的 GM(1,1) 模型的性能比较

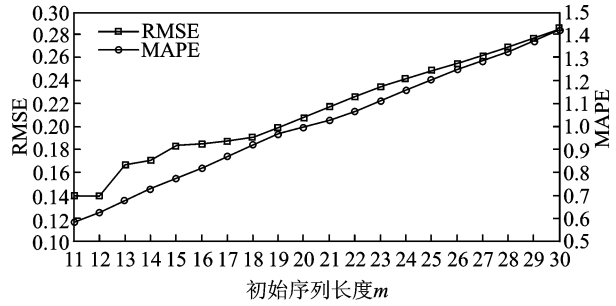
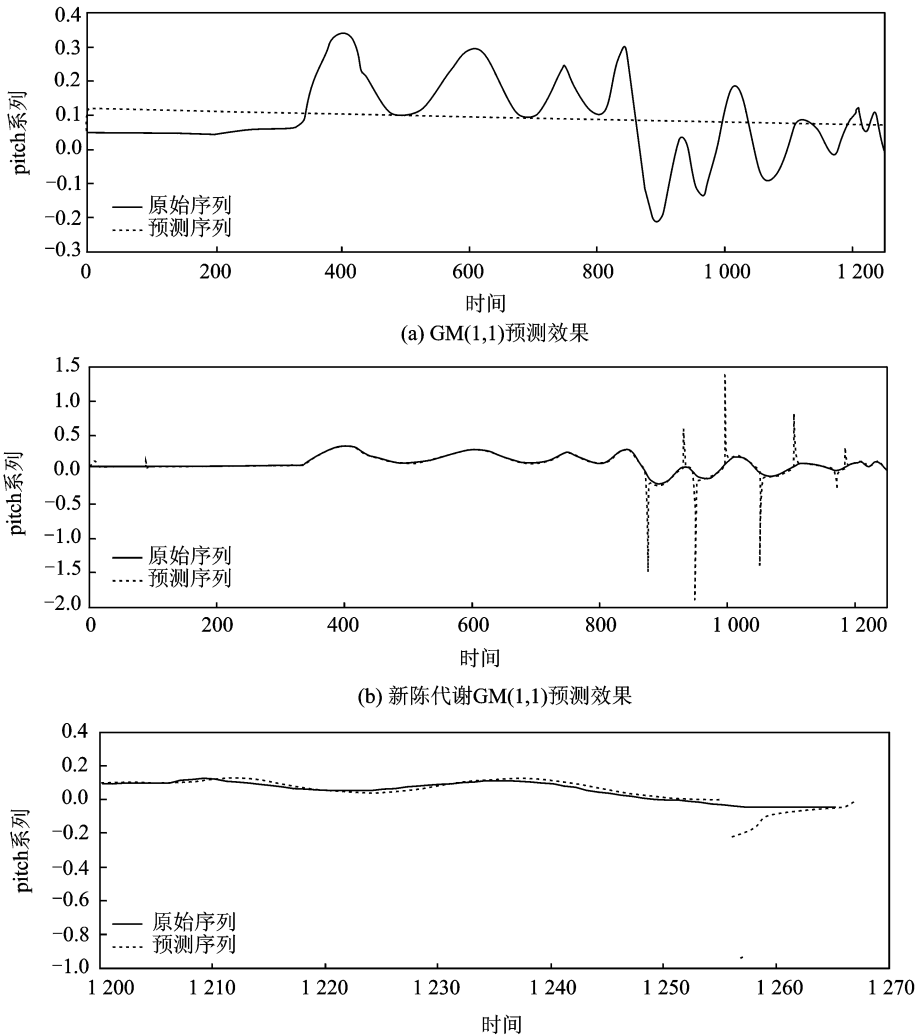


图 4 初始序列长度对预测性能的影响

Fig. 4 Effect of initial sequence length on prediction performance

以 pitch 序列为例，分别采用 GM(1,1) 与改进后的新陈代谢模型进行预测，预测步长为 2，效果如图 5 所示，其中参数设置为 $m=10, s=1$ 。图 5 (a) 的预测误差：RMSE=0.110 022，MAPE=1.897 991；图 5 (b) 的预测误差：RMSE=0.105 424，MAPE=0.524 081。由图可知，对于波动较大的序



(c) 新陈代谢 GM(1,1) 预测效果局部放大
图 5 两种预测模型的结果对比

Fig. 5 Comparison of the results of two prediction models

列而言,改进后的灰色预测模型尽管在某些转折处有些偏差,但整体预测效果较好,预测误差较小。图5(c)为图5(b)局部放大后的效果图。从图中不难发现,改进后的模型的预测值在曲线拐点附近处会发

生较大的偏离,但总体预测效果明显好于原模型,很大程度上减少波动的飞行数据对原模型的影响。

为进一步比较两种算法的预测效果,分别在不同参数序列上进行试验,预测效果如表1所示。

表1 不同序列的预测效果对比情况

Tab.1 Prediction effect of different sequences

序列	RMSE		MAPE	
	改进 GM(1,1)	GM(1,1)	改进 GM(1,1)	GM(1,1)
Longitude	3.6459×10^{-5}	4.9690×10^{-5}	8.9017×10^{-6}	1.9849×10^{-5}
Latitude	2.0032×10^{-5}	4.2882×10^{-5}	2.1587×10^{-5}	5.32125×10^{-5}
Altitude	13.690 1	178.452 6	0.237 9	8.506 7
Roll	0.200 1	0.174 7	0.407 7	6.916 2
Pitch	0.105 4	0.110 0	0.524 1	1.898 0
Heading	0.667 2	0.807 4	0.258 5	0.667 2

由表1可知,由于参数可调,改进后的GM(1,1)有较强的适用性,对于各种序列的预测误差均小于GM(1,1),预测效果较好。

(3)与其他预测方法的性能比较

以pitch序列为例,分别采用ARMA(1,1)、神经网络方法进行预测,并与改进后的新陈代谢模型进行对比。表2为各类方法预测误差对比。

表2 各类方法预测误差分析

Tab.2 Prediction error analysis of various methods

误差	改进 GM(1,1)	ARMA(1,1)	BP神经网络
RMSE	0.105 424	1.411 089	0.225 173
MAPE	0.524 081	1.942 016	0.826 430

由表2可知,改进后的GM(1,1)模型与其他两种常用的预测方法相比,预测效果明显较好,与实际值的偏差较小,对于非平稳的飞行参数序列具有较高的预测精度。

4 结束语

为满足某飞行系统研发的仿真验证需求,本文通过扩展FlightGear接口,设计并实现了一套飞行数据管理与分析的软件系统。该系统集数据管理和时间序列分析于一体,使用了UDP、XML、ODBC、接口等相关技术,集成了新陈代谢GM(1,1)方法,并在飞行状态参数的预测中取得了较好的效果。此外,该系统的数据分析模块为外部提供了数据接口,为扩展更多的挖掘和分析方法提供了便利。目前,该系统已成功应用于某飞行器系统的仿真验证中,具有较高的实际应用价值。

基于FlightGear的飞行数据管理与分析系统还可以从如下几个方面进行改进:

(1)为系统增加飞行任务规划及管理功能,并与电子地图与航迹显示模块配合,进一步监管飞行器状态。

(2)利用系统中分析模块的可扩展性,为系统提供一种或多种有效的针对飞行器数据的数据挖掘方法。

(3)考虑到飞行数据量较大,因而考虑将其扩展至分布式大数据平台上进行数据分析。

参考文献:

- [1] Sehgal B, Deters R W, Selig M S. Icing encounter flight simulator[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana Champaign, 2002.
- [2] Bhandari S, Raheja A, Tang D, et al. Nonlinear control of UAVs using multi-layer perceptrons with off-line and on-line learning[C]//American Control Conference (ACC), 2014. [S. l.]: IEEE, 2014: 2875-2880.
- [3] Khalastchi E, Kalech M, Rokach L. Sensor fault detection and diagnosis for autonomous systems[C]//Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems. Richland: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2013: 15-22.
- [4] Somers S, West R L. Steering control in a flight simulator using ACT-R[C]//Proceedings of the International Conference for Cognitive Modeling. Otta-

- wa; Carleton University, 2013.
- [5] 黄华, 徐幼平, 邓志武. 基于 Flightgear 模拟器的实时可视化飞行仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(19): 4421-4423.
Huang Hua, Xu Youping, Deng Ziwu. Real-time visual flight simulation system based on flightgear simulator[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(19): 4421-4423.
- [6] 刘永建. 基于改进神经网络的民机发动机故障诊断与性能预测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Liu Yongjian, Research on modified neural network for fault diagnosis and performance prediction of aeroengine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012.
- [7] Omkar S N, Venkatesh A, Mudigere M. MPI-based parallel synchronous vector evaluated particle swarm optimization for multi-objective design optimization of composite structures[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(8): 1611-1627.
- [8] 史勇杰, 徐国华. 飞行参数对旋翼桨-涡干扰噪声特性的影响机理研究[J]. 航空学报, 2013, 34(11): 2520-2528.
Shi Yongjie, Xu Guohua. Research on the influence of flight parameters on helicopter rotor BVI noise characteristics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2520-2528.
- [9] 王润全, 史忠科, 薛洁妮. 一种飞行数据预测方法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(20): 5459-5461.
Wang Runquan, Shi Zhongke, Xue Jieni. Prediction method for flight data processing[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(20): 5459-5461.
- [10] 崔建国, 董世良, 吕瑞, 等. 基于混沌理论的飞机健康预测方法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(3): 270-274.
Cui Jianguo, Dong Shiliang, Lü Rui, et al. Aircraft health forecast method based on chaos theory[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(3): 270-274.
- [11] Duda B M, Menter F R, Hansen T, et al. Aerothermal prediction of multiple hot jets in crossflow for aircraft Applications[J]. AIAA Journal, 2014, 52(5): 1035-1046.
- [12] 李玻, 魏勇. 优化灰导数后的新 GM (1, 1) 模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(2): 100-105.
Li Bo, Wei Yong. Optimizes grey derivative of GM (1,1)[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(2): 100-105.

