

基于改进灰色模型的飞机飞行 仿真数据预测

崔海青¹, 魏士皓², 王彦翔¹

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;

2. 天津职业技术师范大学 电子工程学院, 天津 300300)

摘要: 为解决仿真中的实时性问题, 提出利用灰色预测模型进行仿真数据预测的方式加快仿真速度, 并针对灰色模型在仿真数据预测方面实际应用时的问题做出了相应的改进: 采用3次样条插值对非等时距序列进行插值处理得到等时距的序列; 改进了灰色模型建模过程中的背景值计算过程; 结合新陈代谢的思想对数据更新, 弱化旧数据、强化新数据对模型的影响; 将灰色模型接入到飞机分布式虚拟仿真平台中进行验证, 验证结果表明改进后的灰色预测模型性能更好, 接入到仿真平台中能加速8.9%, 效果明显。

关键词: 数据预测; 灰色模型; 3次样条插值; 背景值; 新陈代谢

Prediction on Aircraft Flight Simulation Data Based on Improved Grey Model

CUI Haiqing¹, WEI Shihao², WANG Yanxiang¹

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. College of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to solve the real-time problem in simulation, this paper proposes a grey prediction model to predict the simulation data, and improve the simulation speed and practical application of grey model in the prediction on simulation data; Cubic spline interpolation is used to interpolate non-equal time interval sequences to obtain equal time interval sequences; The background value calculation process is improved during the modeling process of grey model; The idea of metabolism is combined in the updating data, weakening the old data, and strengthening the influence of new data on the model; The grey model is connected to be verified on the aircraft distributed virtual simulation platform. The verification results show that after the improved grey prediction model is connected to the simulation platform, it has a better performance and can accelerate up to 8.9%.

Keywords: data prediction; grey model; cubic spline interpolation; background value; metabolism

0 引言

随着航空工业的发展, 飞机的系统变得越来越复杂, 飞机各部件之间运行关系更加紧密, 飞机内部的数据交联关系也越来越复杂。因此在飞行器研制过程中, 系统仿真是必不可少的支撑手段, 它对提高飞行器设计质量, 降低研制成本, 缩短研制周期具有极其重要的作用。统计发现, 运用仿真技术研发周期能够缩短20%~40%, 试验次数减少50%~80%^[1], 因此构建一个仿真平台, 对飞机系统的论证、研制、测试、改进等各方面都具有十分重要的作用。

在需要多个仿真模型协同仿真实现系统仿真的目的时, 由于不同的模型实现不同的仿真功能, 执行不同的控制与管理机制, 因此在一次仿真时间推进时不同模型的解算量

各不相同甚至差别很大^[3]。为了实现各个仿真模型之间的同步, 在仿真时需要将每个仿真模型既约束着其他模型同时又被其他模型所约束, 因此系统单步仿真推进时间由耗时最长的模型决定, 每一步的计算耗时均不相同。在协同仿真过程中, 如果某个仿真模型仿真推进速度太慢、仿真用时较长, 其他模型在当前步长仿真结束之后只能等待, 导致整个系统都无法继续向前推进, 使得整个协同仿真的效率下降。在实际情况中, 单个仿真模型的仿真功能复杂、联系紧密难以拆分, 因此无法对仿真模型进行拆分之后并行计算。若要在这种情况下进行实时仿真, 需要增大仿真模型的积分步长, 但是这样就会降低仿真的分辨率, 导致仿真精度不够。此外在复杂系统协同仿真中除了仿真模型之外, 经常会有真实物理组件的参与, 构成硬件在回路仿

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-06-27。

基金项目: 中央高校基本科研业务费自然科学基金一般项目(3122022087)。

作者简介: 崔海青(1987-), 男, 硕士研究生, 讲师。

通讯作者: 魏士皓(1996-), 男, 硕士研究生, 助理实验师。

引用格式: 崔海青, 魏士皓, 王彦翔. 基于改进灰色模型的飞机飞行仿真数据预测[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 290-295, 311.

真系统, 此时对仿真系统的实时性要求比较高, 要求仿真系统能够达到实时仿真的要求。为了使低速仿真能够加速推进, 达到实时仿真的要求, 可以对仿真数据预测从而加速仿真的推进, 即可以在仿真速度较慢时利用已有的数据对下一步长的数据进行预测, 使用预测值作为仿真模型下一步的计算值参与仿真推进, 跳过下一步仿真解算, 达到仿真加速推进的目的。

1 仿真数据预测灰色模型的改进

灰色系统理论是由我国著名学者邓聚龙于 1982 年首创, 并且广泛应用于各个领域^[4-7]。灰色系统理论的主要核心内容是灰色预测^[8], 灰色预测法是利用等时距观测到的数据序列构造预测模型用来预测未来时刻的值。该方法最少只需要 4 个原始数据就可通过生成变换来建立灰色模型, 因此与多项式预测模型相比通过灰色理论建立预测模型对仿真数据进行预测时使用的数据量少、计算量小, 能解决历史数据少、序列的完整性及可靠性低的问题^[9], 这些优点使得灰色预测模型特别适合于当数学模型仿真速度较慢时, 利用已有的仿真数据建立灰色预测模型对下一解算步长的数据进行预测, 并将预测值作为仿真模型下一步的解算值参与仿真推进, 跳过下一仿真步长解算, 从而达到仿真推进加速的目的。

GM (1, 1) 模型是一种研究“少数据”、“贫信息”问题的方法, 是当前灰色预测模型研究的热点^[10], 通过对已知信息进行生成变换处理, 弱化不确定性, 凸显出有价值的信息, 发现其中的规律, 进而实现对未来的定量预测^[11]。对于不同类型的问题需要采取其对应的不同的灰色预测模型, 仿真过程中产生的数据是和时间相关的, GM (1, 1) 表示一阶的, 一个变量的微分方程型预测模型, 主要用于时间序列预测, 因此可以利用 GM (1, 1) 模型对仿真数据进行预测。然而直接采用 GM (1, 1) 模型在实际数据预测过程中会出现预测精度不稳定, 甚至出现偏差的情况^[12], 因此需要对经典灰色预测模型进行分析与优化。

本文对于灰色模型的改进从建立灰色模型前非等时距数据的处理、建立灰色模型时背景值计算公式的优化以及一次预测完成之后灰色预测模型的迭代 3 个方面进行。

1.1 非等时距序列的处理

在仿真中, 主要有 3 个时间概念: 物理时间 RT 、仿真时间 ST 以及机器时间 MT 。仿真时间 ST 与物理时间 RT 的关系可以用以下公式进行描述:

$$ST = \lambda \times RT \quad (1)$$

在实际仿真过程中, 经常出现 λ 不等于 1 的情况, 即仿真时间 ST 与物理时间 RT 不相等。

GM (1, 1) 灰色预测模型是以等时距序列为基础的, 所以构建灰色预测模型使用的数据必须是等时距的。在数字仿真模型仿真过程中存在定步长计算以及不定步长计算两种仿真时钟推进模式。采用定步长仿真时钟推进模式时, 当仿真模型在当前步长计算量较小, 解算所耗时间小于步长对应的物理时间时, 当前步长下仿真模型将等待到该步

长耗时与物理时间相同之后再启动下一次仿真步长, 因此得到的数据输出是等时距的, 可以直接使用当前数据建立灰色模型而不必对数据做任何处理; 但在实际情况中, 仿真模型在当前解算步长中如果与其他仿真模型进行了交互或者触发了另外一个模型的计算等情况都会造成帧计算时间发生变化, 而且这种变化一般不固定; 同时在仿真的不同阶段所需的解算量也可能会有所差异, 比如在飞机起飞与降落过程中起落架液压系统所需的仿真解算量就很大, 而当飞机在定高度巡航时由于不需要起落架动作, 因此液压系统的解算量为零, 此时为了实现仿真速度的提升, 可能会使用不定步长的时钟推进模式, 采用不定步长时, 仿真推进可以根据当前仿真结算情况对积分步长进行动态调整, 当解算量较小时步长可以设置的较小, 此时仿真数据的精度也会更高, 反之可以增大积分步长, 虽然能够加快仿真的推进, 但是相应的仿真精度会降低, 而且在不定步长仿真时数据输出不是等时距的。

由于当仿真系统采用不定步长仿真时钟推进模式时获取到的数据不是等时距的, 因此无法使用灰色模型进行预测。同时考虑到在飞机仿真系统中, 实体属性是被仿真实体所具有的一些物理特征参数, 如位置、速度、姿态、角速度等参数。这些物理量一般都是变化连续、突变较少, 可以利用插值的方法对仿真模型输出的数据进行处理, 实现对中间缺失数据的补充, 因此对于采用不定步长仿真时钟推进模式时输出的非等时距仿真数据可以先使用插值的方式进行插值处理得到等时距的数据, 然后再利用处理后的等时距序列建立灰色预测模型进行仿真数据预测。在实际操作过程中可以使用 3 次样条插值算法对非等时距的序列进行插值处理, 该算法的收敛性和误差估计有着严格的理论依据, 因此将使用 3 次样条插值处理后的数据样本作为建立灰色模型的原始数据而产生的误差对预测计算精度的影响是可控的^[14]。文献 [14] 与文献 [15] 也对 3 次样条插值在灰色预测模型原始数据的处理中做出了证明。

1.2 灰色模型背景值的优化

经典灰色预测模型把等时距的离散数据看成一组连续变化的序列, 采用累加或者累减的方式进行处理, 从而弱化系统中的不确定性, 并强化规律性, 然后建立一个以时间为自变量的微分方程, 通过求解方程中的未知参数, 实现预测的目的。

在建立灰色模型时要先对原始非负时间序列 $x^{(0)}$ 做生成处理, 建立生成序列 $x^{(1)}$, 此举能够弱化原始序列的波动性和不确定性; 然后根据灰色理论对 $x^{(1)}$ 建立关于时间 t 的白化微分方程 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$, 其中 a 为发展系数, b 为灰色作用量, 都是待解系数, 记 a, b 构成的矩阵 $u = [a]^T$ 为灰参数, 只要求出 a 和 b 的值, 就能求出 $x^{(1)}$ 进而还原出 $x^{(0)}$ 的预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(k) = (\hat{x}^{(0)}(1) - \frac{b}{a})(e^{-a(k-1)} - e^{-a(k-2)}) \quad (2)$$

观察预测值公式不难发现, 灰色模型对已有数据的模

拟和未知数据的预测只取决于发展系数 a 和灰色作用量 b ，而发展系数和灰色作用量值的求解又完全依赖于原始数据序列 $x^{(0)}$ 和背景值，原始序列用来建立灰色模型的基础数据，是仿真模型通过计算得到仿真值，无法更改，因此可以说灰色模型对已知数据的模拟和未知数据预测精度完全取决于灰色模型的背景值计算是否正确，因此背景值计算公式构造的是否合理会直接影响模型精度^[13]。

对均值形式的 $GM(1, 1)$ 模型进行分析，可知其白化微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (3)$$

对白化微分方程在 $[k-1, k]$ 上进行积分可以得到如下公式：

$$x^{(0)} + a \int_{k-1}^k x^{(1)} dt = b \quad (4)$$

由上式可知灰色模型的背景值为：

$$z^{(1)}(k) = \int_{k-1}^k x^{(1)} dt, k = 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

由背景值 $z^{(1)}(k)$ 的公式可知背景值所代表的含义是曲线 $x^{(1)}$ 在区间 $[k-1, k]$ 上与时间 t 轴所围成的封闭图形的面积，经典灰色预测模型 $GM(1, 1)$ 在对背景值的计算过程中进行了简化，是图 1 中由 $[k-1, x^{(1)}(k-1)]$ 、 $[k, x^{(1)}(k)]$ 、 $[k-1, 0]$ 和 $[k, 0]$ 四点所围成的梯形面积，因此图 1 中阴影部分的面积，即两个图形的面积之差是经典 $GM(1, 1)$ 背景值的误差来源，为了能够提高灰色模型数据预测的精度，必须在保证计算速度的情况下尽可能的减小背景值的误差，使其接近真实值。

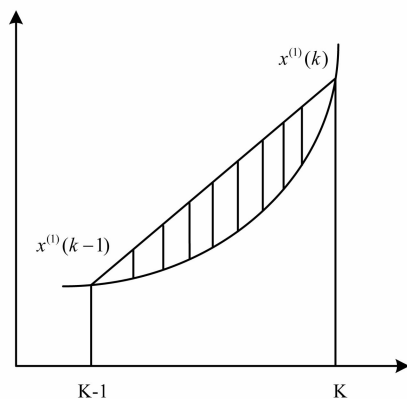


图 1 灰色模型背景值误差来源

为了尽可能背景值计算时的误差以提高数据预测的精度，可以采取直接对曲线在 $[k-1, k]$ 之间进行积分得到背景值，但是这些原始数据是离散的点，并不是一条完整的曲线，要想获取更为精准的背景值可以对已知的原始数据进行曲线拟合，得到一条经过原始数据点的曲线 $f(x)$ ，然后对曲线在 $[k-1, k]$ 之间进行积分，积分后的值即为背景值。本文使用的是多项式拟合的方式进行曲线拟合，但是不同数学仿真模型仿真对象也是不同的，比如起落架液压仿真模型输出的是起落架工作过程中各液压泵的数据，

而发动机功率仿真模型输出的是发动机不同时刻不同工作状态下的发动机功率，因此仿真模型输出的数据具有不同的特征，所以在进行拟合时不能使用一个固定的公式去拟合，本文采用不同次数多项式进行拟合，然后计算不同次数多项式拟合值的平均相对误差（MRE），取拟合值与真实序列之间最小平均相对误差对应的多项式拟合次数作为本次拟合的多项式，以此确定最优的拟合方程进行建模，以减小背景值的误差从而获得更好地精度表现。平均相对误差公式如下：

$$MRE = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \Delta(k) = \frac{1}{n-1} \left| \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \right| \quad (6)$$

1.3 基于新陈代谢方法的建模数据等维替补

在建立灰色预测模型时使用的数据不一定是越多越好，这是由于仿真对象都是位置、速度、姿态、角速度等具有实体属性的参数，在连续仿真过程中这些参数的变化都是连续的，不会发生突变，因此当前仿真状态受上一时刻的新信息影响大，受之前时刻老信息的影响小，而建模数据增多时增加的是距离当前时刻较远的老信息的数量，当老信息数量太多时往往会弱化甚至淹没新信息的特点，使预测对系统的波动反映迟缓，跟踪性变差，预测精度降低。图 2 给出了采用不同数量的已知数据点建立灰色模型时预测数据和真实数据之间的误差关系图，由图可知预测数据与真实值之间的误差随着建模使用数据量的增多而变大，因此要控制建立灰色模型时所使用的数据量，使其能够更好地反映出当前系统的波动，提高其对系统的跟踪性，提高仿真精度。

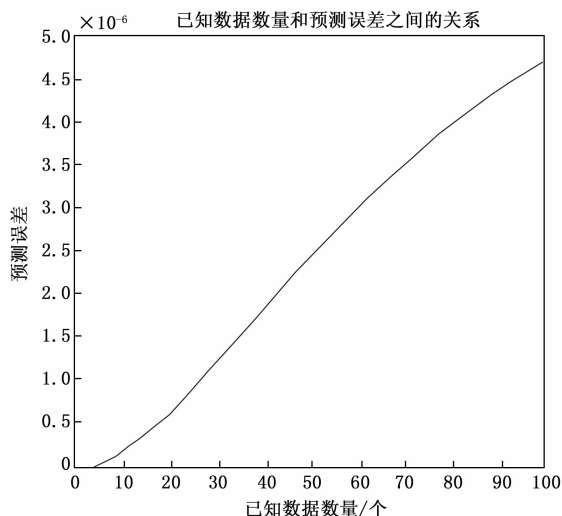


图 2 已知数据数量和预测误差之间的关系

$GM(1, 1)$ 预测模型的精度不仅与原始数据有关，同时也与建模维数有关^[16]。图 3 给出了灰色模型预测值和真实值之间的相对误差与预测数量之间的关系，由图可知随着预测数据的增多，相对误差也越来越大，这表明 $GM(1, 1)$ 并不适用于长期预测只适用于中短期的预测，因此使用新陈代谢的思想对模型进行改进对于在仿真过程中进行持

续可靠的预测来说是非常有必要的, 引入新陈代谢对灰色预测模型进行改进能够有效减少旧数据的使用, 更多地使用新数据, 从而提高对系统波动的跟踪性, 提高预测精度, 降低预测值的相对误差。综合考虑建模维数一般取 $n=5$ 为宜^[12]。由于建模维数为 5 所以在对背景值优化中对曲线 $x^{(1)}$ 的拟合多项式次数设置为 0~4, 其中次数为 0 时使用的经典灰色模型的背景值构建公式。

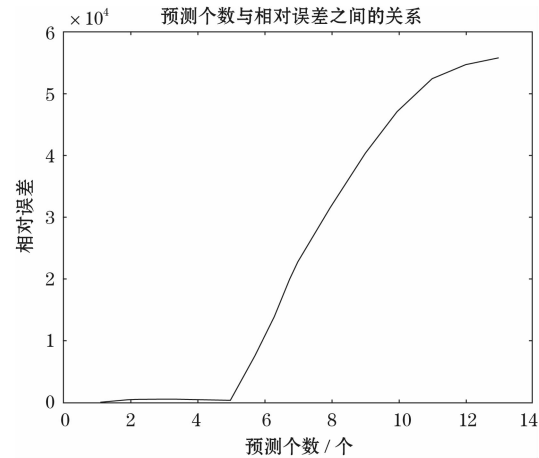


图 3 预测点数和相对误差的关系

新陈代谢在当前场景下的含义为保持建模数据总量不变, 即保持预测模型建模维数恒定 ($n=5$), 在仿真推进过程中, 需要不断对灰色模型进行更新, 舍弃旧数据的同时补充新数据, 使建模的数据量始终保持一致, 即在需要使用灰色模型对仿真数据预测实现仿真模型加速时, 每次都选用距离当前时刻最近的 5 个已知值建立灰色预测模型, 如此不仅保持了建模数据的等维替补, 始终保证建模维数恒定, 而且还可以在持续的预测过程中对数据进行更新, 不至于让老信息过多淹没新信息, 能够更加有效地利用新数据, 提升预测的精度。

将改进后的灰色模型接入到仿真模型中, 采用灰色模型预测仿真数据的流程图如图 4 所示。

1.4 灰色模型的检验

在仿真持续推进的过程中仿真模型解算和数据预测是穿插进行的, 以仿真模型解算为主, 数据预测扮演辅助推进的角色, 只有当仿真速度较慢的时候才进行数据预测以加快仿真推进。以预测一个数据为例, 当仿真推进到第 n 步时, 根据之前输出的数据, 采取第 $n-4$ 至第 n 步输出的 5 个数据建立灰色模型然后预测第 $n+1$ 步时的数据, 将预测得到的数据直接传递给仿真模型, 使用该数据参与第 $n+2$ 步数据的计算, 即在仿真过程中, 仿真模型利用预测数据代替真实数据跳过了第 $n+1$ 步的积分计算, 直接进行第 $n+2$ 步的计算, 节省了时间, 能够加速仿真的推进。

由于仿真数据预测是利用已知数据预测未知数据, 误差是必然存在的, 而且在建立灰色预测模型时必然会引入一些误差, 虽然通过一系列的手段去优化改进能将预测误差做到很小但是仍旧无法消除, 因此建立灰色预测模型之

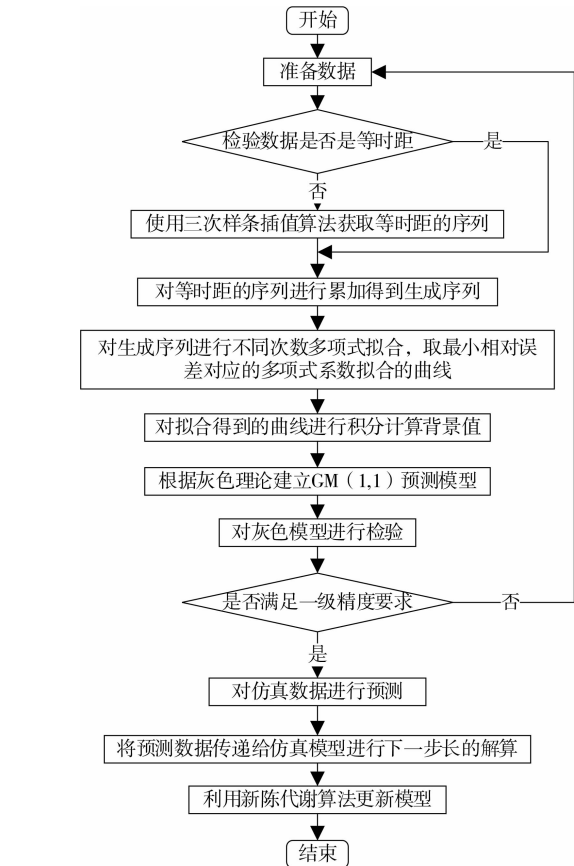


图 4 仿真数据预测流程

后对其进行严格的检验是十分必要的, 只有达到精度要求时才能够用来进行数据预测。常用来检验灰色模型精度的指标有相对误差、关联度、均方差比值以及小误差概率 4 种方式^[11], 常用的精度等级如表 1 所示。

表 1 灰色预测精度检验等级参照表

指标临界值 精度等级	相对 误差 α	关联度 ϵ	均方差 比值 C	小误差 概率 p
一级	0.01	0.90	0.35	0.95
二级	0.05	0.80	0.50	0.80
三级	0.10	0.70	0.65	0.70
四级	0.20	0.60	0.80	0.60

由于预测得到的数据将直接作为模型解算的数据参与下一步长的解算, 因此对预测数据精度的要求比较高。建立灰色预测模型之后, 参照灰色预测精度检验等级表, 只有当 4 种检验方式得到的精度等级都为一级时才可以使用该模型来进行数据预测; 同时由前文分析可知预测的数据越多误差也就越大, 因此要对预测数据的数量做限制。

2 实验结果与分析

为了验证基于灰色模型的仿真数据预测对仿真的加速效果, 先对灰色预测进行离线验证, 然后对加入灰色预测模型前后的分布式平台仿真效果进行仿真验证。

2.1 灰色模型离线验证

本文以仿真平台飞机液压系统中发动机驱动泵的输出功率为研究对象建立灰色模型,对改进后的模型性能进行验证。图 5 为仿真平台输出数据的时间间隔,由图可知数据是非等时距的。

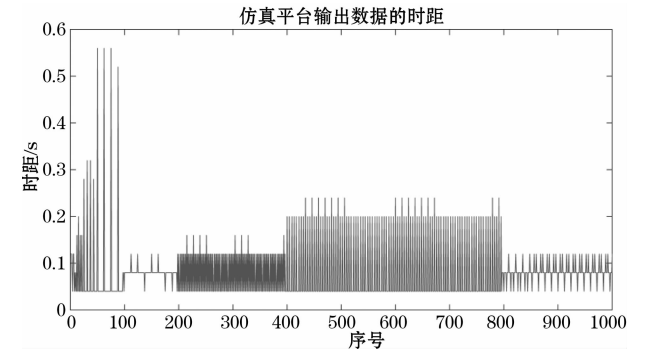


图 5 发动机驱动泵输出数据的时距

因此对其采用 3 次样条插值进行处理,得到等时距数据,随机选取 6 个数据如表 2 所示。

表 2 3 次样条插值后数据

序号	时间	插值处理后的值
1	191.04	5 333.88
2	191.16	5 331.58
3	191.28	5 329.27
4	191.40	5 327.04
5	191.52	5 324.84
6	191.64	5 323.15

使用表 2 中序号 1~5 的数据建立灰色模型,用序号 6 的数据验证灰色模型预测值与仿真平台输出的真实值之间的相对误差。分别建立经典灰色预测模型和改进后的灰色预测模型,对模拟值以及预测值的相对误差进行计算分析,对比结果如表 3 所示。

表 3 经典灰色模型与改进后的灰色模型性能对比

序号	真实值	经典模型		改进后的模型	
		模拟/预测值	MRE/ $\times 10^{-3}$	模拟值	MRE/ $\times 10^{-3}$
1	5 333.88	5 333.880	—	5 333.880	—
2	5 331.58	5 331.550	0.005 550	5 331.536	0.008 219
3	5 329.27	5 329.304	0.006 465	5 329.300	0.005 586
4	5 327.04	5 327.059	0.003 650	5 327.064	0.004 562
5	5 324.84	5 324.815	0.004 623	5 324.830	0.001 921
6	5 323.15	5 322.572	0.108 533	5 322.596	0.104 040

根据表 3 进行可以看出改进后的灰色模型相对于经典灰色预测模型整体而言更优秀,经计算,改进后的模型平均相对误差降低了 3.5%;预测数据相对误差降低了 4.14%。图 6 可以直观的看出两种预测模型在数据模拟和预测的性能对比情况。参考文献 [11] 中的方法,对建立

的灰色模型使用 4 种检验方法对其进行精度检验,检验结果如表 4 所示,所有指标均满足一级精度。

表 4 灰色模型检验结果

检验项目	平均相对误差	关联度	均方差比	小概率误差
计算值	4.1×10^{-6}	0.999 7	0.003 7	1
判断标准	< 0.01	> 0.9	< 0.35	> 0.95
等级	一级	一级	一级	一级

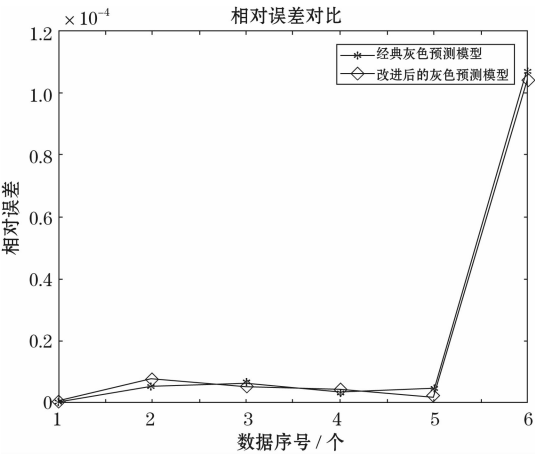


图 6 相对误差对比

在使用 5 个数据建立模型的前提下,结合新陈代谢的思想在仿真过程中对灰色预测模型进行迭代,通过与仿真模型输出的值对比,预测数据的相对误差如图 7 所示。

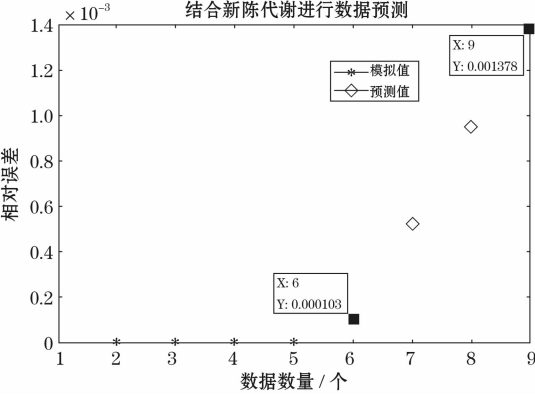


图 7 结合新陈代谢方法的数据预测

由图 7 可知,当预测模型所有检验标准均满足一级精度要求时,以飞机液压系统中发动机驱动泵的输出功率为例,当误差率小于 0.1% 时可以预测 4 个数据;当误差率小于 0.01% 时能预测 1 个数据,预测数据精度较高。

2.2 利用灰色模型对仿真加速的验证

将基于灰色模型的仿真数据预测功能添加到仿真平台中,对仿真加速功能进行在线仿真实验验证。对仿真加速首先要保证仿真数据的精度,因此首先对利用灰色预测进行仿真加速时的仿真精度进行验证,然后在保证精度的前提下对仿真加速进行验证。

2.2.1 仿真精度验证

首先在协同仿真中设置一条航线，在同样初始条件的情况下分别对改进前后的仿真平台进行仿真并记录仿真输出的数据。对比曲线如图 8~10 所示。

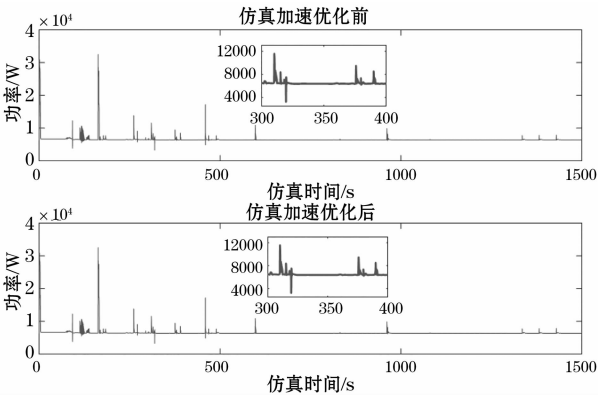


图 8 飞机液压系统中央电动泵输出功率

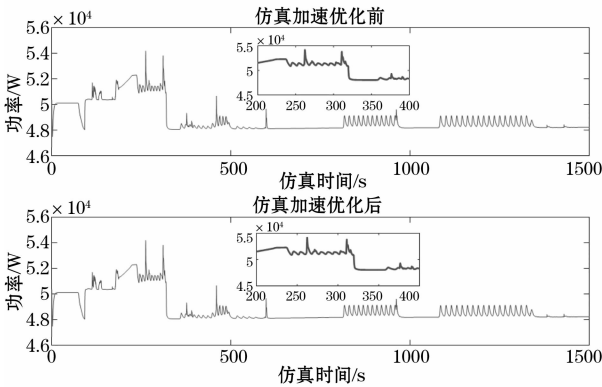


图 9 飞机电源系统整流器输出功率

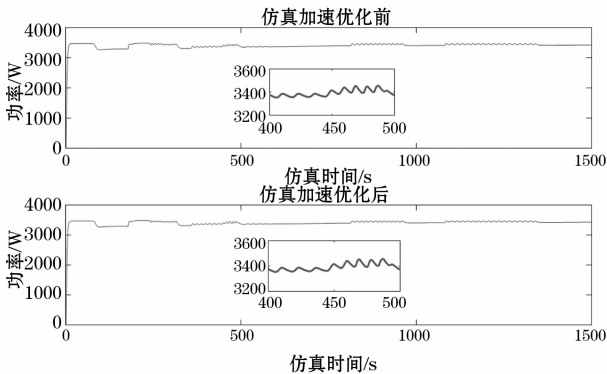


图 10 飞机燃油系统中央燃油泵输出功率

通过对仿真加速前后的飞机液压系统中央电动泵输出功率、飞机电源系统整流器输出功率和飞机燃油系统中央燃油泵输出功率 3 组曲线对比，可以看出两条仿真数据曲线趋势一致，走向相同，具有较好的贴合度，进一步对仿真输出数据放大对比，如图 11 所示，可以看出虽然仿真数据会围绕真实值进行波动。

对误差大小进行计算，如图 12 可以看出进行仿真加速

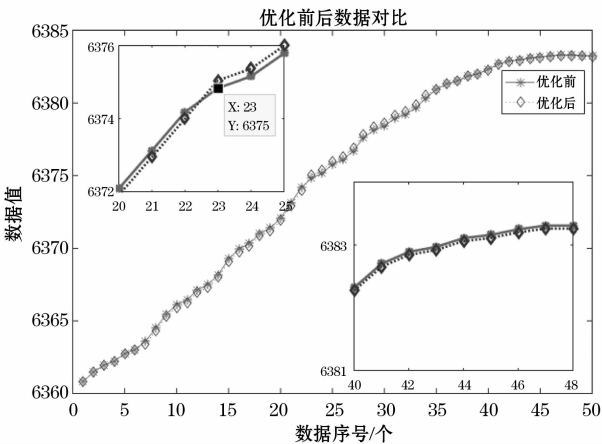


图 11 仿真预测前后数据输出对比

后输出的数据误差小于 1%，在工程实践的可接受范围之内。因此认为引入灰色预测模型对仿真进行加速后的仿真结果依旧可信。

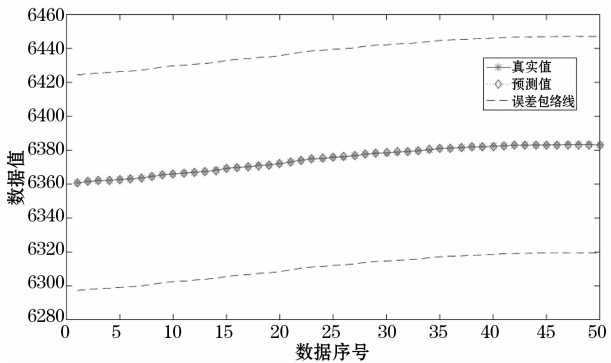


图 12 误差范围对比

2.2.2 仿真消耗时间对比

将灰色预测模型添加到仿真平台中，设置仿真时间为 100 秒，灰色预测模型最大预测频率为仿真模型每解算 10 个数据最多预测 1 个数据进行仿真消耗时间对比，对比结果如图 13 所示。

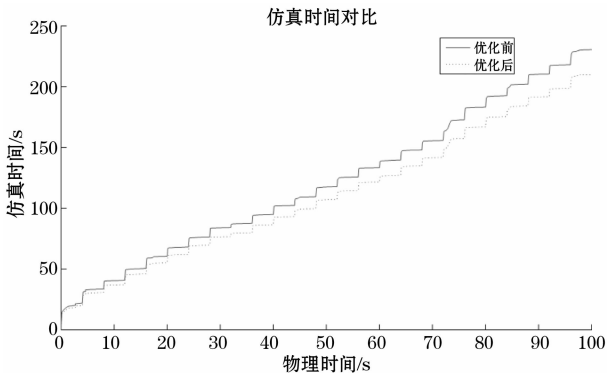


图 13 仿真时间对比

由图 13 可知在进行仿真时，加入灰色预测模型之前仿真 100 秒需要消耗 230.63 秒物理时间，加入灰色预测模型（下转第 311 页）